بسم الله الرحمن الرحيم
كلك ١٤١٧

دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه قدرت

پایان نامه کارشناسی ارشد

مدلسازی، شبیه‌سازی و بررسی شاخصه‌های عملکردی یک موتور DC بدون جاروبک و درایو آن

مرتضی آزادی

استاد راهنما

دکتر احمد دارابی

استاد مشاور

دکتر علی دستفان

آبان ۱۳۸۹

تقدیم به پدر، مادر و برادر عزیز و مهربانم

تشکر و قدردانی

پس از حمد و ستایش خداوند یکتا، وظیفه خود می‌دانم که تشکر و قدرانی خود را از جناب آقای دکتر احمد دارابی و جناب آقای دکتر علی دستفان که راهنمایی‌ها، مشاوره‌ها و حمایت‌های ارزنده‌شان همواره راهگشا در پیشبرد اهداف این پایان نامه بود، ابراز نمایم.
همچنین سلامتی و طول عمر با عزت را برای پدر بزرگوار و مادر عزیز و دلسوز و برادرم مهربانم که همواره باعث ایجاد انگیزه در من برای ادامه تحصیل و تلاش در این راه بوده‌اند را از خداوند متعال خواستارم.

مرتضی آزادی

چکیده:

برجستگی‌های ساختاری و تغذیه اینورتری دو فاکتور بسیار مهم ایجاد نوسانات گشتاور موتورهای DC بدون جاروبک (PMBLDC) می‌باشند. ریپل گشتاور دندانه‌ای بعلت تاثیر متقابل بین میدان مغناطیسی روتور و شیارهای استاتور تولید می‌شود. این نوسانات گشتاور دندانه‌ای را می‌توان با طراحی بهینه شیارها و دندانه‌های استاتور و با انتخاب مناسب شکل قطب‌ها تا حدودی کاهش داد. با توجه به تحقیقات بسیار انجام گرفته در زمینه روش‌های بهینه‌سازی ساختار و طراحی موتور، تا زمانیکه یک تحول اساسی در تکنولوژی مواد هادی و مغناطیسی اتفاق نیفتد، انتظار اصلاح قابل توجهی در بازده و کیفیت عملکرد موتور نمی‌رود. بنابراین امروزه بیشترین تحقیقات صرف ابداع و یا اصلاح روش‌های تغذیه موتور و سیستم‌های کنترلی برای محدود کردن نوسانات گشتاور و سرعت و بهبود دیگر شاخصه‌های عملکردی موتور می‌شود.

در این پایان نامه، تلاش‌ها معطوف به بهبود شاخصه‌های عملکردی موتور به ویژه کاهش نوسانات گشتاور با استفاده از روش‌های تغذیه مناسب می‌باشد. به کمک اینورتر منبع ولتاژی با مدولاسیون-های مختلف، سیم‌پیچ‌های استاتور یک موتور سه فاز نوع سینوسی تغذیه می‌شوند و شاخصه‌های عملکردی موتور نیز با یکدیگر مقایسه می‌شوند. نتایج نشان می‌دهند که شاخصه‌های عملکردی موتور زمانی که از روش مدولاسیون هیسترزیس با پهنای باند مناسب استفاده می‌شود بهبود می‌یابد. شاخصه‌های عملکردی موتور تغذیه شده با دو اینورتر مختلف چند سطحی نیز در این پایان نامه نشان داده شده است. ضمناً در هر دو حالت تلفات هسته موتور در نظر گرفته شده است و همچنین سوئیچ-ها با توجه به توان موتور و جریان عبور کننده از سوئیچ‌ها، بصورت واقعی مدل شده‌اند. در این پایان نامه بدلیل کاربرد موتورهای با تعداد فازهای بالا در صنایع نظامی و گسترش روزافزون منطق فازی به کنترل سرعت موتور الکتریکی یازده فاز به کمک کنترل‌کننده فازی افزایشی و موتور نه فاز با ماتریس اندوکتانس واقعی نیز پرداخته شده است.

کلمات کلیدی: موتور PMBLDC، اینورتر چند سطحی، مدولاسیون پهنای پالس، مدولاسیون هیسترزیس، کنترل اسکالر، کنترل برداری، کنترل‌کننده فازی.

مقالات پدیرفته شده

• Morteza Azadi, Ahmad Darabi, and Ali Dastfan, “Investigation of Performance Characteristics of a Brushless DC Motor,” 3rd International Conference on Computer and Electrical Engineering, 2010.

• Morteza Azadi, and Ahmad Darabi, “Speed Control of an Eleven-Phase Brushless DC Motor,” 3rd International Conference on Computer and Electrical Engineering, 2010.

- مرتضی آزادی، احمد دارابی، "مدلسازی وشبیه سازی موتور جریان مستقیم بدون جاروبک ۹ فاز"، بیست و پنجمین کنفرانس بین المللی سیستمهای قدرت، ۲۰۱۰.

فهرست مطالب

فصل اول

مقدمه ۱

فصل دوم

موتور DC بدون جاروبک مغناطیس دائم

۲-۱: مقدمه ۵
۲-۲: موتور سنکرون ۵
۲-۲-۱: مدارمعادل موتور سنکرون ۷
۲-۲-۲: دیاگرام فازوری ۷
۲-۲-۳: راه‌اندازی موتور سنکرون ۹
۲-۲-۴: مقایسه موتور سنکرون با موتور القایی ۱۱
۲-۲-۵: منحنی‌های مغناطیسی‌زدا و روابط تحلیلی مربوط به این زمینه ۱۴
۲-۳: دسته‌بندی موتورهای DC بدون جاروبک مغناطیس دائم ۱۷
۲-۳-۱: تعداد فازها ۱۷
۲-۳-۲: جایگاه آهنربای مغناطیس دائم ۱۸
۲-۳-۳: ساختمان استاتور ۲۰
۲-۳-۴: مقایسه موتور PMBLDC نوع سینوسی با نوع دوزنقه‌ای ۲۱
۲-۳-۵: درایو موتورهای PMBLDC ۲۲

فصل سوم

معادله‌های ماشین DC بدون جاروبک مغناطیس دائم

۳-۱: مقدمه ۲۵
۳-۲: معادله‌های موتور DC بدون جاروبک مغناطیس دائم ۲۵
۳-۲-۱: مدلسازی موتور در دستگاه "abc" ۲۵
۳-۲-۲: معادلات ولتاژ در دستگاه مرجع روتور ۲۸

فصل چهارم

روش‌های مدولاسیون اینورتر منبع ولتاژی

۴-۱: مقدمه ۳۳

۴-۲: مدولاسیون هیسترزیس ۳۳
۴-۳: مدولاسیون پهنای پالس بردار فضایی ۳۴

فصل پنجم

کنترل برداری موتور DC بدون جاروبک مغناطیس دائم

۵-۱: مقدمه ۴۱
۵-۲: شبیه‌سازی درایو موتور DC بدون جاروبک ۴۱

فصل ششم

آشنایی با مبدل‌های چند سطحی

۶-۱: مقدمه ۵۵
۶-۱-۱: مزایای اینورترهای چندسطحی ۵۵
۶-۲: ساختار اینورترهای چند سطحی ۵۶
۶-۲-۱: اینورتر چند سلولی طبقاتی شده با منابع DC جداگانه ۵۷
۶-۲-۲: اینورتر با دیود محدود شده ۶۰
۶-۲-۳: اینورتر با خازن محدود شده ۶۳
۶-۳: مدولاسیون پهنای پالس سینوسی چند سطحی با سیگنال‌های حامل ۶۶

فصل هفتم

شبیه‌سازی موتور BLDC تغذیه شده توسط اینورترهای چند سطحی بامشخصات واقعی

۷-۱: مقدمه ۶۹
۷-۲: انتخاب سوئیچ و تعیین ماکزیمم فرکانس سیگنال حامل ۶۹
۷-۳: تغذیه موتور PMBLDC توسط اینورتر پنج سطحی و دو سطحی ۷۲
۷-۳-۱: شبیه‌سازی و کنترل سرعت موتور DC بدون جاروبک مغناطیس دائم ۷۳

فصل هشتم

موتورهای DC بدون جاروبک چند فاز

۸-۱: مقدمه ۹۶
۸-۲: شبیه‌سازی موتور DC بدون جاروبک یازده فاز و کنترل سرعت آن با منطق فازی ۹۷
۸-۲-۱: معادله‌های ماشین DC بدون جاروبک یازده فاز ۹۷

۸-۲-۲: شبیه سازی و کنترل سرعت درایو موتور DC بدون جاروبک یازده فاز ۹۸
۸-۳: شبیه‌سازی موتور نه فاز با در نظر گرفتن اندوکتانس‌های متقابل متفاوت ۱۰۹
۸-۳-۱: معادلات مربوط به موتور نه فاز با در نظر گرفتن اندوکتانس‌های متقابل متفاوت ۱۰۹
۸-۳-۲: شبیه سازی و کنترل سرعت درایو موتور DC بدون جاروبک نه فاز ۱۱۱

نتیجه‌گیری ۱۱۸

پیوست

منطق فازی

الف-۱: مقدمه ۱۲۲
الف-۲: ساختارهای سیستم‌های فازی ۱۲۲
الف-۲-۱: سیستم‌های فازی خالص ۱۲۳
الف-۲-۲: سیستم‌های فازی تاکاگی-سوگنو-کانگ ۱۲۳
الف-۲-۳: سیستم فازی با فازی‌ساز و فازی‌زدا ۱۲۴
الف-۳: مروری کلی بر تئوری منطق فازی ۱۲۴
الف-۴: مجموعه‌های فازی ۱۲۷
الف-۴-۱: تعریف تابع عضویت ۱۲۷
الف-۴-۲: انواع توابع عضویت ۱۲۸
الف-۴-۳: عملیات بر روی مجموعه فازی ۱۳۰

مراجع ۱۳۳

لیست شکل‌ها

شکل ۲-۱	(الف)روتور قطب صاف و (ب) روتور قطب برجسته	۶
شکل ۲-۲	مدار معادل تکفاز موتور سنکرون	۷
شکل ۲-۳	دیاگرام فازوری موتور سنکرون تحت شرایط عملکردی مختلف	۹
شکل ۲-۴	نمایی از موتور سنکرون خود تحریک	۱۰
شکل ۲-۵	منحنی مغناطیس شوندگی برای مواد دیامغناطیس، پارامغناطیس و فرومغناطیس	۱۲
شکل ۲-۶	منحنی هیسترزیس برای مواد مغناطیسی (الف) نرم و (ب) سخت	۱۳
شکل ۲-۷	آهنربای مغناطیس دائم روی سطح روتور آهنی	۱۸
شکل ۲-۸	آهنربای مغناطیس دائم نصب شده روی سطح بیرونی روتور آهنی	۱۹
شکل ۲-۹	آهنربای مغناطیس دائم نصب شده روی سطح درونی روتور آهنی	۱۹
شکل ۲-۱۰	(الف) روتور مغناطیس دائم درونی محیطی، (ب) روتور مغناطیس دائم درونی شعاعی	۲۰
شکل ۴-۱	نحوه تولید سیگنال خطای جریان جهت مقایسه آن با پهنای باند هیسترزیس	۳۳
شکل ۴-۲	روش مدولاسیون هیسترزیس	۳۴
شکل ۴-۳	اینورتر دو سطحی	۳۵
شکل ۴-۴	هشت بردار ولتاژ	۳۷
شکل ۴-۵	شش ضلعی مجازی ساخته شده با شش بردار ولتاژ غیر صفر	۳۸
شکل ۴-۶	تقسیم‌بندی یک دوره سوئیچینگ	۳۸
شکل ۵-۱	بلوک دیاگرام کنترل سرعت و کنترل برداری	۴۳
شکل ۵-۲	شکل موج ولتاژ فاز به نول موتور، HM	۴۷
شکل ۵-۳	شکل موج ولتاژ فاز به فاز موتور، HM	۴۷
شکل ۵-۴	اندازه مولفه‌های هارمونیکی ولتاژ خط، HM	۴۸
شکل ۵-۵	شکل موج جریان ورودی به موتور که در لحظه t=۰/۵s بار مکانیکی ۳۰N.m روی شافت اضافه شده است، HM	۴۸
شکل ۵-۶	(a) شکل موج سرعت موتور، (b) نوسانات سرعت قبل از افزایش بار ثابت مکانیکی و (c) نوسانات سرعت با بار ثابت ۴۰N.m و بار اصطکاکی متناسب با سرعت، HM	۴۹
شکل ۵-۷	(a) شکل موج گشتاور الکترومغناطیسی، (b) نوسانات گشتاور قبل از افزایش بار ثابت مکانیکی و (c) نوسانات گشتاور با بار ثابت ۴۰ N.m و بار اصطکاکی متناسب با سرعت، HM	۴۹

شکل ۵-۸ شکل موج سرعت بر حسب گشتاور الکترومغناطیس، HM ۵۰
شکل ۵-۹ شکل موج ولتاژ فاز به نول موتور، SVPWM ۵۰
شکل ۵-۱۰ شکل موج ولتاژ فاز به فاز موتور، SVPWM ۵۱
شکل ۵-۱۱ اندازه مولفه‌های هارمونیکی ولتاژ خط، SVPWM ۵۱
شکل ۵-۱۲ شکل موج جریان ورودی به موتور که در لحظه t=۰/۵s بار مکانیکی ۳۰N.m روی شافت اضافه شده است، SVPWM ۵۲
شکل ۵-۱۳ (a) شکل موج سرعت موتور، (b) نوسانات سرعت قبل از افزایش بار ثابت مکانیکی و (c) نوسانات سرعت با بار ثابت ۴۰N.m و بار اصطکاکی متناسب با سرعت، SVPWM ۵۲
شکل ۵-۱۴ (a) شکل موج گشتاور الکترومغناطیسی، (b) نوسانات گشتاور قبل از افزایش بار ثابت مکانیکی و (c) نوسانات گشتاور با بار ثابت ۴۰ N.m و بار اصطکاکی متناسب با سرعت، SVPWM ۵۳
شکل ۵-۱۵ شکل موج سرعت بر حسب گشتاور الکترومغناطیس، SVPWM ۵۳
شکل ۶-۱ یک پایه اینورتر (الف) دوسطحی، (ب) سه سطحی و (پ) m سطحی ۵۶
شکل ۶-۲ ساختار تک فاز از یک اینورتر طبقاتی پنج سطحی با منبع‌های DC مجزا ۵۸
شکل ۶-۳ ساختار تک فاز از یک اینورتر با دیود محدود شده سه سطحی ۶۲
شکل ۶-۴ ساختار تک فاز از یک اینورتر با دیود محدود شده سه سطحی ۶۲
شکل ۶-۵ ساختار تک فاز از یک اینورتر با با خازن محدود شده سه سطحی ۶۴
شکل ۶-۶ ساختار تک فاز از یک اینورتر با با خازن محدود شده سه سطحی ۶۴
شکل ۶-۷ (الف) سیگنال‌های حامل مثلثی مربوط به اینورتر هشت سطحی و (ب) سیگنال‌های حامل مثلثی مربوط به اینورتر هفت سطحی ۶۷
شکل ۷-۱ جریان کلکتور بر حسب ولتاژ کلکتور-امیتر در دمای بدنه $^{\circ}$C ۱۲۵ ۷۰
شکل ۷-۲ جریان عبوری از دیود به ولتاژ دو سر دیود در زمان هدایت آن ۷۰
شکل ۷-۳ جریان‌های مربوط به سوئیچینگ IGBT بر اساس جریان عبوری از آن ۷۱
شکل ۷-۴ مشخصه بازیابی معکوس مربوط به دیود نصب شده بصورت موازی معکوس با IGBT ۷۱
شکل ۷-۵ بلوک دیاگرام کنترل سرعت موتور PMBLDC ۷۴
شکل ۷-۶ شکل موج ولتاژ بین فاز "a" و نقطه وسط اینورتر پنج سطحی ۷۹
شکل ۷-۷ شکل موج ولتاژ بین فاز "a" و نقطه نول موتور تغذیه شده توسط اینورتر پنج سطحی ۸۰
شکل ۷-۸ شکل موج ولتاژ بین فاز "a" و "b" موتور تغذیه شده توسط اینورتر پنج سطحی ۸۰

شکل ۷-۹	شکل موج ولتاژ بین نقطه وسط اینورتر پنج سطحی و نول موتور	۸۱
شکل ۷-۱۰	شکل موج جریان فاز ورودی به موتور تغذیه شده توسط اینورتر پنج سطحی	۸۱
شکل ۷-۱۱	شکل موج جریان خروجی از باس DC مربوط به موتور تغذیه شده توسط اینورتر پنج سطحی	۸۲
شکل ۷-۱۲	شکل موج‌های جریان عبوری از (a) IGBT اول از بالا و IGBT(b) چهارم از بالا	۸۲
شکل ۷-۱۳	(a) موج‌های حامل و موج مرجع و (b) نحوه آتش شدن چهارمین سوئیچ از بالا	۸۳
شکل ۷-۱۴	(a) سرعت موتور و (b) نوسانات سرعت موتور	۸۳
شکل ۷-۱۵	(a) گشتاور الکترومغناطیسی و (b) نوسانات گشتاور	۸۴
شکل ۷-۱۶	سرعت موتور بر حسب گشتاور الکترومغناطیسی	۸۴
شکل ۷-۱۷	توان لحظه‌ای ورودی به اینورتر پنج سطحی	۸۵
شکل ۷-۱۸	توان لحظه‌ای ورودی به موتور تغذیه شده توسط اینورتر پنج سطحی	۸۵
شکل ۷-۱۹	توان لحظه‌ای خروجی موتور تغذیه شده توسط اینورتر پنج سطحی	۸۶
شکل ۷-۲۰	شکل موج ولتاژ بین فاز "a" و نقطه وسط اینورتر دو سطحی	۸۷
شکل ۷-۲۱	شکل موج ولتاژ بین فاز "a" و نقطه نول موتور تغذیه شده توسط اینورتر دو سطحی	۸۷
شکل ۷-۲۲	شکل موج ولتاژ بین فاز "a" و "b" موتور تغذیه شده وسط اینورتر دو سطحی	۸۸
شکل ۷-۲۳	شکل موج ولتاژ بین نقطه وسط اینورتر دو سطحی و نول موتور	۸۸
شکل ۷-۲۴	شکل موج جریان فاز ورودی به موتور تغذیه شده توسط اینورتر دو سطحی	۸۹
شکل ۷-۲۵	شکل موج جریان خروجی از باس DC مربوط به موتور تغذیه شده توسط اینورتر دو سطحی	۸۹
شکل ۷-۲۶	شکل موج‌های جریان عبوری از (a) IGBT بالایی و (b) دیود بالایی	۹۰
شکل ۷-۲۷	ولتاژ کلکتور به امیتر مربوط به اینورتر دو سطحی	۹۰
شکل ۷-۲۸	(a) سرعت موتور و (b) نوسانات سرعت موتور	۹۱
شکل ۷-۲۹	(a) گشتاور الکترومغناطیسی و (b) نوسانات گشتاور	۹۱
شکل ۷-۳۰	سرعت موتور بر حسب گشتاور الکترومغناطیسی	۹۲
شکل ۷-۳۱	توان لحظه‌ای ورودی به اینورتر دو سطحی	۹۲
شکل ۷-۳۲	توان لحظه‌ای ورودی به موتور تغذیه شده توسط اینورتر دو سطحی	۹۳

شکل ۷-۳۳	توان لحظه‌ای خروجی موتور تغذیه شده توسط اینورتر دو سطحی	۹۳
شکل ۸-۱	بلوک دیاگرام کنترل سرعت به کمک منطق فازی	۱۰۰
شکل ۸-۲	توابع عضویت مربوط به خطا و تغییرات خطا و اندازه جریان متناسب با سرعت مطلوب	۱۰۱
شکل ۸-۳	نمایش دهنده سطح کنترل‌کننده افزایشی فازی	۱۰۱
شکل ۸-۴	موج‌های نیروهای ضد محرکه موتوری ذوزنقه‌ای و جریانهای مرجع مستطیلی	۱۰۵
شکل ۸-۵	شکل موج‌های جریان‌های واقعی شبه مستطیلی	۱۰۶
شکل ۸-۶	(a) شکل موج سرعت موتور، (b) نوسانات سرعت قبل از افزایش بار ثابت مکانیکی و (c) نوسانات سرعت با فزایش بار ثابت ۷۰N.m و بار اصطکاکی متناسب با سرعت	۱۰۷
شکل ۸-۷	(a) شکل موج گشتاور الکترومغناطیسی، (b) نوسانات گشتاور قبل از افزایش بار ثابت مکانیکی و (c) نوسانات گشتاور با بار ثابت ۷۰N.m و بار اصطکاکی متناسب با سرعت	۱۰۸
شکل ۸-۸	شکل موج سرعت بر حسب گشتاور الکترومغناطیس	۱۰۸
شکل ۸-۹	رابطه بین کموتاسیون جریان فازها و نوسانات گشتاور و سرعت	۱۰۹
شکل ۸-۱۰	مدار معادل الکتریکی از موتور نه فاز PMBLDC	۱۱۲
شکل ۸-۱۱	شکل موج‌های نیروهای ضد محرکه موتوری و جریان‌های واقعی شبه مستطیلی	۱۱۵
شکل ۸-۱۲	(a) شکل موج سرعت موتور، (b) نوسانات سرعت قبل از افزایش بار ثابت مکانیکی و (c) نوسانات سرعت با فزایش بار ثابت ۷۰N.m و بار اصطکاکی متناسب با سرعت	۱۱۶
شکل ۸-۱۳	(a) شکل موج گشتاور الکترومغناطیسی، (b) نوسانات گشتاور قبل از افزایش بار ثابت مکانیکی و (c) نوسانات گشتاور با بار ثابت ۷۰N.m و بار اصطکاکی متناسب با سرعت	۱۱۶
شکل ۸-۱۴	شکل موج سرعت بر حسب گشتاور الکترومغناطیس	۱۱۷
شکل ۸-۱۵	رابطه بین کموتاسیون جریان فازها و نوسانات گشتاور و سرعت	۱۱۷
شکل الف-۱	ساختار اصلی سیستم فازی خالص	۱۲۳
شکل الف-۲	ساختار اصلی سیستم فازی تاکاگی-سوگنو و کانگ	۱۲۳
شکل الف-۳	ساختار اصلی سیستم فازی با فازی‌ساز و فازی‌زدا	۱۲۴
شکل الف-۴	بلوک دیاگرام یک سیستم تحت کنترل‌کننده فازی	۱۲۵
شکل الف-۵	توابع عضویت برای مجموعه کلاسیک (الف) A و (ب) A’	۱۲۸

شکل الف-۶ انواع توابع عضویت موجود در Matlab/Simulink ۱۲۹
شکل الف-۷ توابع تعلق A و B ۱۳۰
شکل الف-۸ توابع تعلق A و ’A ۱۳۰
شکل الف-۹ توابع تعلق A و B ۱۳۱
شکل الف-۱۰ توابع تعلق A و B ۱۳۱
شکل الف-۱۱ مجموعه‌های فازی مربوط به متغیر زبانی سرعت ماشین ۱۳۲

لیست جداول

جدول ۲-۱	مقایسه موتور القایی با موتور سنکرون	۱۱
جدول ۲-۲	دسته‌بندی درایو موتورهای PMBLDC	۱۷
جدول ۴-۱	رابطه بین بردارهای ولتاژ و متغیر سوئیچینگ و ولتاژهای فاز به نول و فاز به فاز تولیدی در هر حالت	۳۶
جدول ۵-۱	اطلاعات کاملی از درایو ماشین DC بدون جاروبک مغناطیس دائم	۴۲
جدول ۶-۱	نحوه سوئیچینگ مربوط به یک اینورتر پنج سطحی با ساختار چند سلولی طبقاتی شده با منابع DC جداگانه	۵۹
جدول ۶-۲	نحوه سوئیچینگ مربوط به یک اینورتر پنج سطحی با خازن محدود شده	۶۵
جدول ۷-۱	اطلاعات کاملی از درایو ماشین DC بدون جاروبک مغناطیس دائم	۷۳
جدول ۷-۲	مولفه‌های هارمونیکی مربوط به ولتاژ فاز موتور، ولتاژ خط و جریان فاز برای اینورتر پنج سطحی و دو سطحی	۸۶
جدول ۸-۱	اطلاعات کاملی از درایو ماشین DC بدون جاروبک مغناطیس دائم	۹۹
جدول ۸-۲	روند جریان‌های فاز جاری شده مطابق با ۲۲ مودهای عملکردی	۱۰۳
جدول ۸-۳	اطلاعات کاملی از درایو ماشین DC بدون جاروبک مغناطیس دائم	۱۱۱
جدول ۸-۴	روند جریان‌های فاز جاری شده مطابق با ۱۸ مودهای عملکردی	۱۱۳

فصل اول

مقدمه

امروزه محرکه‌های الکتریکی یا درایوها که مجموعه‌ای از موتورهای الکتریکی و مبدل‌های الکترونیک قدرت و سیستم کنترل می‌باشند در بسیاری از صنایع الکتریکی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. محرکه های الکتریکی، پایه‌های مهم تمدن مدرن صنعت امروزی محسوب می‌شوند. این محرکه‌های الکتریکی در همه زمینه‌ها رسوخ کرده‌اند که از آن جمله می‌توان به کاربرد آنها در صنایع فضاپیمایی و هواپیمایی، صنایع نظامی، کشتی‌ها و ناوهای جنگی، وسایل نقلیه، وسایل خانگی و تجهیزات ورزشی اشاره کرد. در کشورهای توسعه یافته نزدیک به دو سوم انرژی الکتریکی توسط محرکه‌های الکتریکی مصرف می‌شوند. قسمت اصلی این محرکه‌ها، ماشین‌های الکتریکی می‌باشند. در گذشته ماشین‌های DC جاروبکدار مرسوم بدلیل مشخصات پایانه‌ای خوب، بسیار مورد استفاده قرار می‌گرفتند. وجود کموتاتورها، جاروبک‌ها و نیاز به نگهداری مداوم از معایب اصلی ماشین‌های DC می‌باشند و این موضوع سبب محدودیت کاربرد این موتورها شده است. ولی با توجه به اینکه گشتاور تولید شده توسط موتورهای DC بسیار مناسب و تقریباً نوسان‌های کمی دارد، همواره سعی شده با وجود مشکل‌های بیان شده، باز هم در صنعت مورد استفاده قرار گیرند. در چند دهه اخیر، پیشرفت‌های گسترده حاصل شده در زمینه تولید سوئیچ‌های قدرت و میکروپروسسورها و میکروکامپیوترها سبب به کارگیری اینورترها و سنسورها به جای کموتاتورها و جاروبک‌ها شده است. به عبارت بهتر، با استفاده از اینورترها و مبدل‌های قدرت، کموتاسیون مکانیکی به کموتاسیون الکتریکی تبدیل شده است. در نتیجه مشکلات مربوط به کموتاسیون مکانیکی مرتفع شده است. با این پیشرفت‌ها، موتوری با مشخصات پایانه‌ای مشابه موتور DC معمولی ولی به لحاظ ساختاری مشابه یک موتور سنکرون AC تولید شده است. در نتیجه کارایی موتور DC در صنعت روز به روز کاهش یافته و جای خود را کم و بیش به موتور جریان مستقیم بدون جاروبک مغناطیس دائم (PMBLDC) داده است. محرکه موتورهای PMBLDC در مقایسه با محرکه موتورهای DC، دارای بازده و چگالی توان و نسبت گشتاور به اینرسی بالاتری می‌باشد.

در فصل اول این پایان نامه ابتدا توضیحات مختصری راجع به موتورهای سنکرون معمول و روش‌های راه‌اندازی آنها ارائه می‌شود. سپس به منحنی‌های مغناطیس‌زدایی هذلولی و روابط تحلیلی مربوط به مواد مغناطیس دائم و نقطه کار بهینه حالت دائمی آن پرداخته می شود. عملکرد یک ماشین شدیداً به نقطه کار ماده مغناطیس دائم وابسته است ضمن اینکه انتخاب نقطه کار مناسب هنگام طراحی به لحاظ کاهش حجم موتور مغناطیس دائم از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. موتورهای PMBLDC از نقطه نظرهای متفاوت در پایان این فصل دسته‌بندی می‌شوند. در فصل دوم، معادلات کامل ماشین PMBLDC در دستگاه "abc" و "qd0" نشان داده شده است. با توجه به این موضوع که سیم‌پیچ‌های استاتور توسط اینورترها تغذیه می‌شوند در نتیجه موتورها در فصل سوم به ارائه انواع روش‌های مدولاسیون اینورتر منبع ولتاژی پرداخته شده است. در فصل چهارم شبیه‌سازی یک موتور مغناطیس دائم تغذیه شده توسط اینورتر منبع ولتاژی با دو روش مدولاسیون بیان شده در فصل قبل و همچنین با روش کنترل برداری ارائه می‌شود. در فصل پنجم انواع مبدل‌های چند سطحی و مزایای آنها بیان شده است. در فصل ششم نحوه انتخاب سوئیچ‌ها و تعیین حداکثر فرکانس موج حامل ارائه شده است. همچنین مقایسه شاخصه‌های عملکردی موتور تغذیه شده با اینورترهای دو سطحی و پنج سطحی با استفاده از روش کنترل اسکالر ارائه می‌شود. در فصل هفتم خلاصه‌ای درباره منطق فازی بیان می‌شود و در نهایت فصل هشتم، -بدلیل کاربرد موتورهای با تعداد فازهای بالا در صنایع نظامی- به کنترل سرعت موتور الکتریکی یازده فازه به کمک کنترل‌کننده فازی افزایشی و موتور نه فاز با ماتریس اندوکتانس واقعی اختصاص داده شده است.

فصل دوم

موتور DC بدون جاروبک مغناطیس دائم

۲-۱: مقدمه

درایوهای موتورهای الکتریکی PMBLDC شامل یک موتور سنکرون با روتور PM، یک اینورتر، کنترل‌کننده و سنسور تشخیص موقعیت روتور می‌باشند. موتور سنکرون جزء اصلی درایو PMBLDC است. اینورتر و سنسور تشخیص موقعیت روتور جهت کموتاسیون الکتریکی مورد نیاز می‌باشند. کنترل‌کننده نیز به عنوان مغز درایو می‌باشد که جهت کنترل سرعت و پردازش سیگنال‌های سنسور موقعیت روتور مورد استفاده قرار می‌گیرد. با توجه به اینکه موتور سنکرون جزء اصلی درایو PMBLDC است، در زیر به توضیح بیشتر این موتور پرداخته شده است.

۲-۲: موتور سنکرون

همانطور که هر مهندس برق در گرایش قدرت می‌داند، عبور جریان سه فاز از سیم‌پیچ‌های سه فاز، میدان گردانی تولید می‌کند که فرکانس این میدان گردان با فرکانس منبع تغذیه رابطه مستقیم و با تعداد قطب‌ها رابطه معکوس دارد. در موتور القایی روتور بدنبال میدان گردان حاصل از جریان‌های سه فاز جاری شده در سیم‌پیچی سه فاز استاتور کشیده می‌شود. در بی‌باری سرعت روتور بسیار نزدیک به سرعت میدان گردان می‌باشد و با افزایش بار مکانیکی روی شافت موتور، سرعت موتور کاهش می‌یابد و به اصطلاح لغزش افزایش می‌یابد تا گشتاور مورد نیاز جهت چرخش بار تولید شود. سرعت روتور همیشه کمتر از سرعت سنکرون است و هر چه بار افزایش می‌یابد سرعت روتور از سرعت سنکرون فاصله می‌گیرد. ولی در موتور سنکرون، میدانی که توسط استاتور تولید می‌شود با میدان تولید شده توسط روتور کوپل می‌گردد و هر دو میدان در سرعتی برابر با سرعت سنکرون خواهند چرخید. بنابراین تحت فرکانس ثابتی موتور حرکت خواهد کرد. سرعت سنکرون به کمک ۲-۱ محاسبه می‌شود.

$$n_s = \frac{120f}{P} \text{ [rpm]} \qquad (۱-۲)$$