دانشکده :

مهندسی برق و رباتیک

گروه قدرت

پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

طراحی و شبیه سازی درایو موتورBLDC دوازده فاز

دانشجو :

حمید رضا غلامی

استاد راهنما :

دکترعلی دستفان

استاد مشاور:

دکتر محمد مهدی فاتح

شهریورماه ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

تقدیم به:

پدر و مادر فداکارم و همسر عزیزم که در تمام مدت، حضورشان موجب آرامش و امید در بنده گردید.

تشکر وقدردانی :

با پایان یافتن این پروژه وظیفه خود می‌دانم، نهایت سپاس و تشکر را از اساتید دلسوزم، جناب آقای دکتر دستفان و جناب آقای دکتر فاتح داشته باشم که در به ثمر رسیدن این پایان‌نامه نقش اساسی ایفا نمودند.

چکیده :

موتورهای بدون جاروبک مغناطیس دائم جریان مستقیم[1]، با ولتاژ ضد محرکه الکتریکی[2] ذوزنقه‌ای شکل به سرعت در حال به‌کارگیری در کاربردهای با عملکرد بالا، به‌دلیل ویژگی‌های برتری که این موتورها در مقایسه با موتورهای الکتریکی مرسوم دارند هستند. از ویژگی‌های برتر این موتورها می‌توان به بازده بالا ، فرم فشرده ، قابلیت اطمینان زیاد ، گشتاور زیاد و هزینه نگهداری پایین اشاره کرد. این نوع از موتورهای الکتریکی اغلب در آرایش سه فاز مطرح وبه‌کارگرفته می شود. استفاده از موتور های BLDC سه فاز در صنایع حساس بویژه صنایع نظامی، مستلزم بهبود هر چه بیشتر شاخصه‌های عملکردی این موتورهاست. راهکارهای مختلفی در بهبود عملکرد این موتورها مطرح شده است از جمله می توان به بهینه سازی در روشهای کنترلی و افزایش تعداد فاز استاتور این موتورها را نام برد. موتورهای BLDC با تعداد فاز بالاتر گزینه‌ای است که در صنایع نظامی به عنوان نیروی پیشران در شناورهای زیرسطحی بسیار مورد توجه است. موتورهای BLDC چند فاز مزایای زیادی نسبت به موتور های BLDC مرسوم، سه فاز دارا هستند؛ در این گونه از موتورهای BLDC ،ریپل گشتاور و سرعت بهبود می‌یابد، جریان هر فاز کاهش می یابد و قابلیت اطمینان در کارکرد بدون وقفه در کنار چگالی توان در هر فاز افزایش می یابد.

در این پایان‌نامه، طراحی وشبیه سازی درایو موتور BLDC دوازده فاز، بدون انتقال روابط میان پارامترهای موتور به دستگاه های مرجع شناخته شده شکل گرفته و شاخصه های عملکردی این موتور با بهره‌گیری از روش کنترل مستقیم سرعت به روش کنترل جریان و با استفاده از منطق فازی[3]، استخراج شده و با موتور مشابه BLDC سه فاز مقایسه شده است. از جمله نتایج حاصله از این مقایسه می‌توان به کاهش ریپل سرعت و گشتاور ، کاهش جریان موتور درهر فاز و افزایش محدوده کاری موتور در زمان وقوع خطای فاز در موتور BLDC دوازده فاز در قیاس با موتورBLDC سه فاز را نام برد.

کلمات کلیدی: **موتور BLDC دوازده فاز، bEMF ذوزنقه ای، کنترل سرعت، کنترل جریان ، منطق فازی، کاهش ریپل سرعت وگشتاور**

[1] Permanent magnet Brushless DC mtor(PMBLDC)

[2] Back electro motive force(bEMF)

[3] Fuzzy logic

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول-**مقدمه** **۱**

فصل دوم- ساختار موتورBLDC **۶**

۲-۱ تعاریفی از موتور BLDC ۷

۲-۲-آشنایی با موتور BLDC ۷

۲-۳:روتور مغناطیس دائم ۸

۲-۴ساختمان استاتور ۱۱

۲-۴-۱سیم پیچی در استاتور ۱۲

۲-۴-۲موتور BLDC با توزیع سیم پیچی سینوسی(PMSM) ۱۳

۲-۴-۳موتور BLDC باتوزیع سیم پیچی متمرکز ۱٤

۲-۴-۴مقایسه موتور BLDC و موتور PMSM ۱٥

۲-۵ مقایسه موتور BLDC با موتور DC و القایی ۱٦

۲-۶کموتاسیون در موتور BLDC ۱۷

۲-۷موتور های BLDC چند فاز ۲۰

۲-۸ مزایا و معایب موتور BLDC ۲۲

۲-۹کاربردهای موتور BLDC ۲۳

۲-۱۰مدل ریاضی موتور ۲٤

فصل سوم- روش های کنترل درایو BLDC **۲۸**

۳-۱: تشخیص موقعیت روتور ۲۹

۳-۱-۱:تشخیص موقعیت روتور با حسگر ۳۰

۳-۱-۲: روش های تشخیص موقعیت روتوربدون حسگر ۳۲

۳-۲-روش های کنترلی درایو موتور BLDC ۳٤

۳-۲-۱-روش های کنترل کلاسیک ۳٥

۳-۲-۲-روش های کنترل هوشمند ۳٦

۳-۳-سیستم های فازی ۳۷

۳-۳-۱-پیکربندی یک سیستم فازی ۳۸

۳-۴ روش های کنترل موتورBLDC ٤۱

۳-۴-۱کنترل اسکالر ٤۱

۳-۴-۲کنترل برداری ٤۲

۳-۵- روش های کنترلی اینورترهای منبع ولتاژی ٤٥

۳-۵-۱روشSPWM ٤٦

۳-۵-۲روش PWM با نمونه برداری یکنواخت ٤۷

۳-۵-۳روش PWM با حذف هارمونیک های انتخابی ٤۸

۳-۵-۴روش SVPWM : ٤۸

۳-۵-۵روش کنترل جریان HYSTERSIS ٥۲

۳-۶-راه اندازی موتور BLDC ۵۳
۳-۶-۱راه اندازی حلقه باز ٥٤
۳-۶-۲ تخمین مکان اولیه روتور با تکنیک های مناسب ٥٤
۳-۶-۳ راه اندازی با ایجاد نقطه ای مشخص برای روتور ٥٥
فصل چهارم-درایو موتور BLDC، دوازده فاز و کنترل آن ۵۶
۴-۱پیاده سازی روش کنترل سرعت درایو موتور BLDC دوازده فاز ۵۷
۴-۲بلوک موتور ۵۸
۴-۳مودهای عملکرد ٦٢
۴-۴بلوک ولتاژ ضد محرکه(bEMF): ٦٤
۴-۵بلوک جریان مرجع ٦٦
۴-۶بلوک سرعت و وضعیت موتور ٦٧
۴-۷ بلوک کنترل سرعت ٦٩
۴-۸بلوک کنترل جریان هیسترزیس ۷۱
فصل پنجم-نتایج شبیه سازی ۷۳
۵-۱:سرعت موتور ۷۷
۵-۲گشتاور الکترومغناطیسی ۸۲
۵-۳جریان استاتور و ولتاژ bEMF ۸۳
۵-۴ قابلیت پایداری در برابرخطا ۸۷
فصل ششم- نتیجه گیری و پیشنهادات ۹۰
۶-۱نتیجه گیری ۹۱
۶-۲پیشنهادات ۹۲

فهرست شکل‌ها:

شکل ۲-۱ : درایو موتور BLDC ۸
شکل۲-۲:آهنربای مغناطیس دائم روی سطح خارجی روتور ۹
شکل ۲-۳: آهنربای مغناطیس دائم روی سطح داخلی روتور ۱۰
شکل۲-۴: آهنربای مغناطیس دائم روتور به فرم شعاعی ۱۰
شکل۲-۵: حلقه B_H ماده مغناطیسی ۱۰
شکل۲-۶:استاتور یک موتور BLDC ۱۲
شکل۲-۷: موتورBLDC باآرایش سیم پیچی توزیع شده ۱۴
شکل۲-۸:موتورBLDC باآرایش سیم پیچی متمرکز ۱۵
شکل ۲-۹:درایو موتور BLDC سه فاز ۱۸
شکل ۲-۱۰ : کموتاسیون الکتریکی در یک موتور BLDC،سه فاز ۱۹
شکل۲-۱۱ : ترتیب تحریک سیم پیچ ها با توجه به موقعیت روتور یک موتور BLDC، سه فاز ۲۰
شکل ۲-۱۳ :مدار معادل یک موتورBLDC سه فاز [۲۳] ۲۵
شکل۳-۱:نحوه قرارگیری حسگرهای اثر هال در استاتور موتور BLDC ۳۲
شکل ۳-۲:ولتاژهای فیلتر شده ترمیتال موتور در روشPWM ۳۳
شکل ۳-۳:ولتاژهای ضد محرکه و ارتباط آن ها با کموتاسیون فاز ۳۴
شکل۳-۴:ساختار کلی سسیستم استنتاج فازی ۳۸
شکل ۳-۵:توابع عضویت در MATLAB / SIMULINK ۴۰
شکل۳-۶: قاعده ی روش pwm مبتنی بر موج حامل مثلثی ۴۶
شکل ۳-۷:روند شکل گیری موج مدولاسیون به روش نمونه برداری یکنواخت ۴۷
شکل ۳-۸ :بردار فضایی یک سیستم سه فاز ۴۸
شکل ۳-۱۳: روش هیسترزیس برای یک فازموتور ۵۳
شکل ۴-۱ بلوک دیاگرام روش کنترل سرعت درایو BLDC ۵۸
شکل۴-۲:مدار معادل با موتورBLDC سه فاز ۵۹
شکل ۴-۳:مدار معادل موتور BLDC دوازده فاز ۶۱
شکل۴-۴: مدل موتور دوازده فاز در محیط شبیه سازی ۶۲
شکل ۴-۵ ولتاژهایbEMF در موتور دوازده فاز ۶۴
شکل ۴-۶:بلوک تولید کننده ولتاژهای ضد محرکه فازها برحسب وضعیت روتور ۶۵
شکل۴-۷:ارتباط میان جریان موتور و ولتاژbEMF ۶۷
شکل۴-۸:روندددستیابی به سرعت(ωr) ووضعیت موتور(θr) ۶۸
شکل۴-۹ :محاسبه دامنه جریان مرجع ۶۹
شکل۴-۱۰:توابع عضویت خطای سرعت وتغییرات خطا ی سرعت کنترل کننده فازی ۷۰
شکل۴-۱۱: توابع عضویت خروجی کنترل کننده فازی ۷۰
شکل ۴-۱۲: منحنی سه بعدی سطح، کنترل کننده فازی ۷۱
شکل ۴-۱۳:مدولاسیون هیسترزیس در کنترل سرعت موتورBLDC ۷۲
شکل۴-۱۴:روش مدولاسیون جریان هیسترزیس ۷۲
شکل۵-۱:تغییرات موقعیت روتور ۷۶

شکل۵-۲: تغییرات موقعیت روتور در محدوده ۰- ۲π ۷۶
شکل۵-۳ :سرعت مکانیکی موتور ۷۸
شکل۵-۴:نوسانات سرعت موتورBLDC پیش از اعمال پله ی بار ۷۹
شکل۵-۵:نوسانات سرعت موتورBLDC پس از اعمال پله ی بار ۸۰
شکل۵-۶:عملکرد حلقه ی کنترل سرعت موتورBLDC ۸۱
شکل۵-۷:نوسانات گشتاور الکترومغناطیسی در موتورBLDC ۸۳
شکل۵-۸:ولتاژهای bEMF ۸۵
شکل۵-۹:جریان استاتور ۸۷
شکل۵-۱۰:خطای فاز در موتورBLDC ۸۸

فهرست جداول

جدول ۲-۱ : مقایسه موتور BLDC با موتورهای DC جاروبک دار و القایی ۱۶
جدول۴-۱: مودهای عملکرد برای جریان فازهای موتور ۶۳
جدول۵-۱:مشخصات درایو موتور BLDC دوازده فاز ۷۵
جدول ۵-۲:مشخصات موتورBLDC سه فاز ۷۵

فصل اول :

مقدمه

امروزه، موتورهای الکتریکی در سطح بسیار وسیعی در تمامی صنایع مورد استفاده قرار می‌گیرد و اکثر تجهیزات به انواع مختلف موتورهای الکتریکی تجهیز شده‌اند. اگرکمی به اطراف بنگریم، خواهیم دید که در انبوهی از این وسائل احاطه شده‌ایم که البته حضور این تکنولوژی موجب سهولت در زندگی روزمره شده است.

امروزه محدودیت‌های اقتصادی و استانداردهای وضع شده توسط دولت‌ها به شدت روی سیستم‌های الکتریکی اثر گذاشته است. تولیدات جدید باید کارایی بیشتر، بازده بهتر و کاهش اختلالات الکترومغناطیسی را به همراه داشته باشند. انعطاف پذیری سیستم‌ها باید زیاد شود تا زمان به روز کردن محصولات کاهش پیدا کند . همچنین در سالهای اخیر استانداردهای جدید مصرف انرژی برای صنایع پیشنهاد داده شده که در آینده نزدیک به صنایع تحمیل خواهد شد. صنایع باید همزمان با برآورده کردن این مسائل قیمت سیستم‌ها را نیز کاهش دهند.

موتورهای کلاسیک (انواعDC وAC)به مدت طولانی است که در صنایع مختلف استفاده می‌شوند. ماشین‌های DC جاروبک دار مرسوم، به دلیل مشخصات پایانه‌ای خوب، بسیار مورداستفاده قرار می‌گرفتند؛ وجود جاروبک‌ها و کموتاسیون، نیاز به رفع عیب و صرف هزینه‌های نگهداری و ایجاد جرقه در جاروبک‌ها در زمان کموتاسیون از معایب این نوع از موتورها می باشد.

موتورهای AC نیز در سطح وسیع و در کاربردهای مختلف مورد استفاده قرار می‌گرفته و می‌گیرد از مهمترین مزایای این موتورها بر موتورهای DC عدم وجود جاروبک و بازده بالاتر را می‌توان نام برد. تا قبل از پیدایش تکنولوژی عناصر نیمه هادی و کاربرد آن در کنترل دور موتورهایAC، این موتورها اغلب در کاربردهایی با دور ثابت بکارگرفته می‌شده است. البته در گذشته با به کارگیری تکنیک‌هایی، دور این موتورها تغییر داده شده است که به دلیل محدودیت‌های این روش‌ها، مقرون به صرفه نبودن و بازده‌ی پایین آنها، استفاده از این موتورها را با چالش مواجه می سازد.

در اواخر سال ۱۹۵۰ با ورود تریستور به بازار، به سرعت در یکسو کننده‌ها به منظور تنظیم سرعت موتورهای DC به‌کار گرفته شد، و در اوایل دهه‌ی ۶۰ اینورترهای مجهز به عناصر نیمه هادی جای پای خود را در تنظیم سرعت موتورهای AC باز نمود[۲].

پیشرفت در تکنولوژی تولید سوئیچ‌های نیمه هادی و میکروپروسسورها سبب ایجاد درایوهای کنترل سرعت به واسطه بهره‌گیری از مبدل‌های قدرت و شکل‌گیری کموتاسیون الکتریکی به جای کموتاسیون مکانیکی شده است. تلفیق این کموتاسیون الکتریکی در موتورهای کلاسیک مرسوم، ساختار جدیدی در موتورهای الکتریکی ایجاد نموده است که دارای مشخصات پایانه‌ای مشابه با موتورهای DC است با این تفاوت که به لحاظ ساختاری مشابه با یک موتور سنکرون AC می باشد. این موتور با نام موتورهای جریان مستقیم مغناطیس دائم[۱] شناخته می‌شوند.

برای نخستین بار، در سال ۱۹۶۲ دو مهندس به نام T.G. Wilson و P.H. Trickey مقاله ای منتشر نمودند که در آن موتورBLDC مطرح و معرفی شده بود؛ ولی مغناطیس دائم و سوئیچینگ قدرت دو عاملی بود که مانع از فراگیر شدن این تکنولوژی تا سال ۱۹۸۰ در صنعت شد. استفاده تجاری از این محصول درهمین سال توسط کمپانی Powertec آغاز شد.

این موتورها به علت بازده بالا، فرم فشرده، قابلیت اطمینان زیاد، گشتاور زیاد و هزینه نگهداری پایین مورد توجه واقع شدند. اما پیچیده بودن روشهای کنترل و هزینه‌ی بالای درایوهای الکترونیکی مانع از گسترش کامل این موتورها شده است. هر چند تلاش محققین در دهه‌های اخیر روش‌های نوینی را در به کارگیری وکنترل این موتورها به‌وجود آورده که بسیاری از موانع و پیچیدگی‌های استفاده از این موتورها را از سر راه برداشته است [۳].

در این موتورها، جاروبک‌های مکانیکی که در موتورهای DC وجود داشتند حذف و با مبدل‌های قدرت مجهز به سوئیچ‌های نیمه هادی جایگزین شده و به منظور ایجاد گشتاور الکترومغناطیسی، روتور به

[۱] Permanent magnet brushless dc motor(PMBLDC)

مغناطیس دائم مجهز شده است. این دسته از موتورها با توجه به ویژگی‌های خاصی که دارند در صنایع مختلف، از جمله صنایع نظامی صنایع خودروسازی، هواپیمایی، وسایل خانگی، صنایع الکترونیکی و چندین مورد دیگر به کارگرفته می‌شوند.

موتوررهای PMBLDC چند فاز (تعداد فاز بیشتر از سه) ، به دلیل قابلیت تحمل خطا، افزایش قابلیت اطمینان، کاهش ریپل گشتاور وکاهش جریان در هر فاز، در صنایع نظامی بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از جمله این کاربردها می‌توان به استفاده از موتورهای چند فاز در شناورهای زیرسطحی به عنوان پیشران اشاره کرد[۴]-[۶].

افزایش قیمت تمام شده در درایو موتورهایBLDC، چند فاز و پیچیدگی‌های روش کنترل آن از جمله مواردی است که تا مدت‌ها مانع توسعه و به‌کارگیری این موتورها در صنعت می‌شده است. ولی تلاش محققین و پیشرفت تکنولوژی‌های کنترلی باعث به‌کارگیری روش‌هایی در جهت رفع این نقیصه شده است. از جمله این راه‌کارها می توان به استفاده از کنترل کنندهایDSP، اشاره نمود که پیچیدگی‌های کنترلی را تا حد زیادی مرتفع ساخته است. استفاده از روش‌های تک قطبی جریان در تحریک استاتور نیز از جمله مواردی است که موجب کاهش تلفات وهزینه‌ها در سوئیچ‌ها شده است. از طرفی می‌توان بیان نمود که در صنایع‌های مانند صنایع نظامی و صنایع هوانوردی هزینه‌ای که این نوع موتورها بر پروژه تحمیل می نماید، در مقایسه با مزایای فروانی که ارائه می‌دهند، ناچیز می‌باشد[۵].

در پایان نامه‌ی پیش روی در فصل اول مقدمه‌ای کلی از موضوع مورد بحث بیان شد ، درفصل دوم مفهوم کارکردی این موتور به همراه شرح ساختار این موتور و انواع آن اشاره خواهد شد، مزایای آن نسبت به موتورهایAC و DC بیان شده و کاربردهای آن در صنایع مختلف مرور می‌شود. در پایان مدل ریاضی معادل با موتورهایBLDC دوازده فاز و سه فاز ارائه می‌شود.

در فصل سوم، به دلیل اهمیت وضعیت روتور در شرایط کاری مختلف موتور ابتدا روش های دستیابی به موقعیت روتور مطرح شده و سپس روش‌های کنترل موتورBLDC مرور می شود، این روش‌ها در دو موضوع

روش‌های کنترل کلاسیک و روش‌های هوشمند مرور می شود. سپس روش‌های کنترلی موتور بیان شده ومزایا و معایب آن ارائه می‌شود و در ادامه روش‌های مدولاسیون اینورترهای منبع ولتاژ که به عنوان منبع تغذیه در درایو BLDC مورد استفاده قرار می‌گیرد، مرور خواهند شد و در پایان روش‌های راه اندازی موتورهای بدون جاروبک مرور شده است.

فصل چهارم به شرح و ارائه روش استفاده شده در کنترل سرعت موتور BLDC دوازده فاز می‌پردازد. در این فصل به بررسی جزء به جزء، حلقه‌ی کنترل سرعت موتور BLDC دوازده فاز و سه فاز با روش کنترل جریان و با استفاده از منطق فازی می پردازیم و نقش هر کدام از این اجزا و چگونگی پیاده سازی آن در محیط شبیه سازی برشمرده می شود. و نهایتاً در فصل پنجم نتایج حاصل از شبیه سازی موتور BLDC دوازده فاز و انواع سه فاز آن ارائه شده و این نتایج در بوته‌ی مقایسه قرار می‌گیرد. در این فصل شاخصه‌های عملکردی موتور از قبیل سرعت ،گشتاور، سطح جریان استاتور و قابلیت اطمینان در کارکرد بدون وقفه‌ی این دو موتور مقایسه شده‌اند.

فصل دوم:

ساختار موتورBLDC

در این فصل به بررسی ساختار، اصول کاری وانواع موتور BLDC پرداخته، همچنین دلایل مورد توجه قرار گرفتن این موتور بررسی شده و در ادامه در مقام مقایسه‌ی ویژگی‌های این موتور نسبت به موتورهای مرسوم برخواهیم آمد . در پایان مدل ریاضی معادل با موتورهایBLDC دوازده فاز و سه فاز ارائه می‌شود.

۲-۱ تعاریفی از موتور BLDC

موتورهای BLDC در مراجع مختلف دارای تعاریف متفاوتی می باشد. استاندارد انجمن ملی سازندگان تجهیزات الکتریکی(NEMA) موتور BLDC را این گونه معرفی می کند:

"یک موتور بدون جاروبک، ماشین دوار سنکرونی است که دارای روتور مغناطیس دائم بوده و از موقعیت های مشخصی از شفت دوار روتور، جهت کموتاسیون الکترونیکی استفاده می شود. این موتور می‌تواند همراه با درایورهای الکترونیکی مربوطه به صورت مجتمع یا این که موتور از درایور مربوطه جدا باشد."

KUSKO تعریف زیر را بیان می کند:

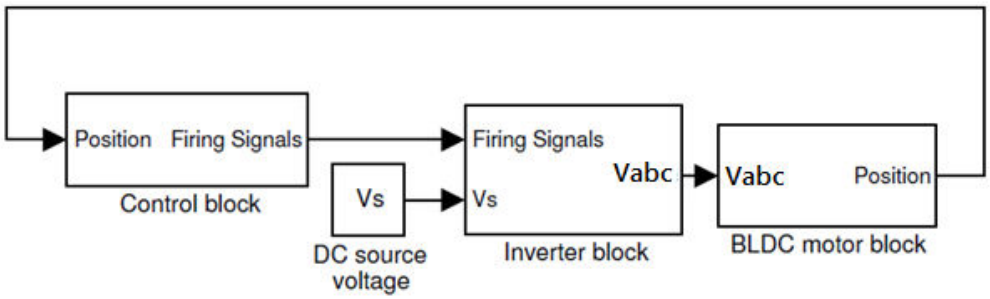
"یک موتور که دارای سیم پیچی استاتور بوده و یک روتور مغناطیس دائم برجسته از جنس آهن نرم دارد. سیم پیچ‌های استاتور از یک منبع تغذیه DC و توسط یک ماتریس از سوئیچ‌های حالت جامد تغذیه گشته و عمل کنترل با استفاده از حسگرهای وضعیت و با منطقی مشخص انجام می شود"[۱۰].

۲-۲-آشنایی با موتور BLDC

موتور BLDC اساساً دارای ساختاری مشابه یک مغناطیس دائم دوار همراه با یک مجموعه از هادی‌های جریان می باشد، که برای ثابت ماندن جهت گشتاور در یک سو، جریان در هادی‌ها می‌بایست در هر زمان که یک قطب مغناطیسی از مقابل آن عبور کند، پلاریته‌اش نیز معکوس شود. در یک موتور DC، معکوس شدن پلاریته با کموتاتور و جاروبک‌ها انجام می‌شود. چون کموتاتور نسبت به روتور ثابت می‌باشد. لحظات سوئیچ‌زنی به طور اتوماتیک با تغییر پلاریته میدان مغناطیسی هادی‌ها سنکرون می شود. در یک موتور BLDC، معکوس شدن پلاریته با کلیدزنی ادوات الکترونیک قدرت انجام می‌شود. روند کموتاسیون در هر

دو نوع ماشین، شبیه به هم بوده و سنکرون با وضعیت روتور می‌باشد. لذا معادلات دینامیکی مربوطه و مشخصه‌های سرعت-گشتاور آن‌ها نیز یکسان می‌باشند.

به مجموعه‌ی موتور سنکرون با روتور مغناطیس دائم ، اینورتر و کنترل‌کننده، درایو گفته می‌شود. این مجموعه را در شکل ۲-۱ می‌توان دید .



شکل ۲-۱ : درایو موتور BLDC[۱۱]

همان‌گونه که می‌بینیم تغذیه موتور توسط یک اینورتر انجام می‌گیرد حال این‌که در چه زمانی کدام فاز در خروجی اینورتر قرار گیرد، وابسته به فرمان آتش ساخته شده توسط سیستم کنترلی اینورتر می‌باشد که البته خود این امر به روش کنترل موتور وابسته است. و در نهایت در روش کنترل موتور تعیین موقعیت روتور است، که مبدأ شکل‌گیری این چرخه‌ی کنترلی را شکل می دهد. در این مجموعه حسگرهای موقعیت‌یاب یا روش‌های تخمین، موقعیت روتور را تعیین می‌نمایند.

روتور، در موتورDC بدون جاروبک (BLDC) مجهز به مغناطیس دائم شده است. وجود این خاصیت در روتور، حضور جاروبک‌ها را حذف نموده و ساختار جدیدی را به‌وجود آورده است. برآیند میان میدان حاصل از آهنربای دائمی روتور و میدان حاصل از سیم پیچ‌های استاتور تحریک شده توسط اینورتر سبب ایجاد گشتاور در موتور می شود[۱۲].

۲-۳:روتور مغناطیس دائم

در موتور BLDC روتور یا از مغناطیس دائم ساخته شده است و یا به مغناطیس دائم تجهیز گردیده است، روتور می‌تواند از یک جفت قطب تا چندین جفت قطب را شامل باشد که قطب های SوN یک در

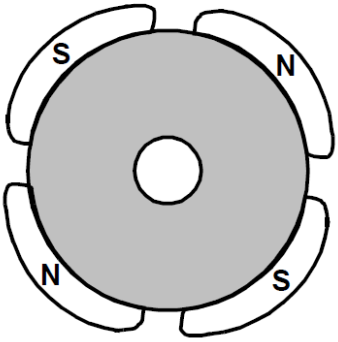
میان قرار گرفته‌اند. در بسیاری از روش‌های تخمین موقعیت از اثر همین قطب‌های مغناطیسی روی روتور و میدانی که هر قطب ایجاد می‌نماید به منظور تشخیص موقعیت روتور استفاده می کنند [۱۳].

قرار گیری مغناطیس دائم درروتورخود به چند روش انجام می شود

- مغناطیس دائم روی سطح خارجی روتور
- مغناطیس دائم روی سطح داخلی روتور
- مغناطیس دائم روی سطح داخلی به فرم شعاعی

در شکل ۲-۲ روتوری که مغناطیس دائم روی سطح خارجی‌آن قرار گرفته است مشاهده می شود، این-گونه قرارگیری مغناطیس دائم موجب می‌شود روتور حالت قطب برجسته داشته باشد و این موجب ایجاد گشتاور رلوکتانسی در موتور می‌شود.

در شکل ۲- ۳ مغناطیس دائم در سطح داخلی روتور قرار گرفته است. تفاوت این حالت با حالت قبلی در این است که روتور دیگر قطب برجسته نیست و به تبع آن دیگر گشتاور رلوکتانسی نیز وجود نخواهد داشت. در حالت سوم که مغناطیس دائم به صورت شعاعی درون روتور قرار می گیرد؛ در شکل ۲-۴ آورده شده است. لازم به توضیح است که موتور مجهز به این نوع روتور در سرعت‌های بالاتری می‌تواند به‌کار گرفته شود چرا که وجود آهنربای دائم در درون روتور به فرم شعاعی موجب عمر بالاتر روتور در سرعت‌های بالا می‌شود.



شکل۲-۲:آهنربای مغناطیس دائم روی سطح خارجی روتور[۱۳]