

دانشگاه یزد  
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر  
گروه مهندسی قدرت-الکترونیک

پایان نامه  
برای دریافت درجه کارشناسی ارشد  
مهندسی قدرت

کنترل کننده مدلغزشی فازی موتور DC بدون جاروبک

استاد راهنما: دکتر احمد میرزایی

پژوهش و نگارش: وحید کاملی رحیمی

## چکیده

این پایان‌نامه به معرفی و طراحی کنترل‌کننده مدل‌غزشی فازی موتور DC بدون جاروبک می‌پردازد. این کنترل‌کننده با داشتن ساختاری متغیر و براساس قانون همگرایی سرعت ثابت و ارضاء شرط لغزش در تنظیم سرعت موتور DC بدون جاروبک بکارگرفته شده است. نتایج شبیه‌سازی‌ها، عملکرد مطلوب کنترل‌کننده مدل‌غزشی را در جنبه‌های مختلف از قبیل سرعت پاسخ، خطای حالت ماندگار ناچیز، سیگنال کنترلی قابل دستیابی و مقابله با اغتشاشات نشان می‌دهد. سرانجام با رهیافت جستجوی جدولی فازی، کنترل‌کننده سرعت مدل‌غزشی فازی موتور DC بدون جاروبک طراحی و علاوه بر آن طرح متفاوتی از کنترل‌کننده مدل‌غزشی فازی دو ورودی-تک خروجی مبتنی بر پایگاه قوانین مطرح می‌گردد. نتایج شبیه‌سازی‌ها برای حالت کاری مختلف و برای هر کنترل‌کننده، ارائه و با یکدیگر مقایسه می‌گردد. از نتایج مشاهده می‌شود که کنترل‌کننده‌های فازی مدل‌غزشی تمام مزایای کنترل‌کننده مدل‌غزشی و فازی را داراست و در نتیجه به کنترل‌کننده‌ای مقاوم دست یافته‌ایم که توسط کنترل‌کننده‌های فازی به سادگی قابل اجرا است.

تقدیم به خانواده و دوستانم

رجب اوزمىنى ان اشكر نعمتك التى انعمت على و على والدى و ان العمل صالحا ترضيه و اطلع  
فى ذريتى انى تبت اليك و انى من المسلمين

## فهرست

صفحه	عنوان
۱	فصل اول: مقدمه
۶	فصل دوم: ساختمان موتور DC بدون جاروبک
۶	۱-۲- ساختمان موتور DC بدون جاروبک
۸	۱-۱-۲- سنسورهای اثر هال
۹	۱-۱-۱-۲- ویژگی‌های عمومی
۹	۲-۱-۱-۲- تئوری اثر هال
۹	۳-۱-۱-۲- روش تعیین وضعیت توسط سنسور اثر هال
۱۰	۴-۱-۱-۲- آی سی های هال
۱۱	۲-۱-۲- درایوهای موتور BLDC و نحوه عملکرد آنها
۱۱	۱-۲-۱-۲- درایو تک قطبی
۱۴	۱-۲-۱-۲- موتورهای چهارفاز (پوش پول دو فاز) با مدار فرمان تک قطبی
۱۶	۲-۲-۱-۲- مدار فرمان دو قطبی
۲۰	۲-۲- معادلات عملکردی ماشین سنکرون مغناطیس دایم دو فاز
۲۳	۱-۲-۲- نمودار بلوکی و معادلات حالت
۲۴	۲-۲-۲- تحلیل عملکرد ماندگار
۲۶	۲-۲-۱- عملکرد بدون جابجایی فاز
۲۸	۲-۲-۲-۲- عملکرد با جابجایی فاز
۳۰	۳-۲-۲-۲- عملکرد حالت ماندگار با ورودی منبع جریان
۳۰	۳-۲-۲- عملکرد دینامیکی
۳۶	۳-۲- کاربردهای موتور BLDC در سیستمهای ابزار دقیق
۴۱	۴-۲- مقایسه موتورهای BLDC و DC
۴۵	۵-۲- مزایا و معایب
۴۶	۶-۲- کنترل سرعت
۴۸	۷-۲- کنترل کننده‌های سرعت موتور BLDC
۵۱	فصل سوم - کنترل ساختار متغیر: مدلغزشی
۵۱	۱-۳- مقدمه‌ای بر مهندسی کنترل
۵۱	۱-۱-۳- فضای حالت
۵۱	۲-۱-۳- هدف اصلی از طرح سیستم کنترلی
۵۲	۳-۱-۳- عدم قطعیت‌ها در مدل‌سازی
۵۳	۲-۳- کنترل ساختار متغیر
۵۵	۱-۲-۳- معرفی سیستم

۵۵	۲-۲-۳- معرفی سطح لغزش
۵۷	۳-۲-۳- انتخاب سطح لغزش
۵۷	۴-۲-۳- ویژگی‌های سطح لغزش
۵۸	۵-۲-۳- معرفی شرط لغزش
۶۱	۶-۲-۳- سیگنال کنترلی معادل
۶۲	۷-۲-۳- تعبیر Filippov از دینامیک معادل
۶۲	۸-۲-۳- پدیده Chattering
۶۵	۹-۲-۳- اثر Chattering در ردگیری حالت مطلوب
۶۶	۱۰-۲-۳- حذف Chattering
۶۸	۱۱-۲-۳- پارامتر $\lambda$
۷۰	۱۲-۲-۳- پارامتر $\phi$
۷۵	۱۳-۲-۳- مشکلات و چالش‌های کنترل مدلغزشی
۷۵	۱۴-۲-۳- مزایای کنترل مدلغزشی
۷۶	۱۵-۲-۳- افق‌های کنترل مدلغزشی
۷۶	۱۶-۲-۳- کنترل مدلغزشی متکی بر قانون همگرایی
۷۷	۱۷-۲-۳- انواع سطوح لغزش
۷۸	<b>فصل چهارم-کنترل فازی</b>
۷۸	۱-۴- مجموعه‌های فازی
۷۸	۲-۴- قواعد فازی
۷۹	۳-۴- تابع عضویت
۷۹	۴-۴- مراحل پیاده سازی کنترل کننده فازی
۸۱	<b>فصل پنجم- کنترل مدلغزشی فازی</b>
۸۱	۱-۵- اجرای کنترل کننده مدلغزشی توسط الگوریتم فازی
۸۲	۲-۵- تقریب سیستم‌ها توسط سیستم فازی
۸۳	۳-۵- روش جستجوی جدولی
۸۴	۴-۵- معرفی روش‌های جایگزین برای پیاده‌سازی کنترل کننده‌های مدلغزشی
۸۷	<b>فصل ششم: پیاده سازی، شبیه سازی، مقایسه</b>
۸۷	۱-۶- طراحی کنترل کننده مدلغزشی موتور BLDC
۸۸	۱-۱-۶- اصلاح سیگنال کنترلی
۱۱۱	۱-۲-۶- طراحی لایه مرزی متغیر با زمان

۱۱۴	۳-۱-۶- بررسی تاثیر پارامترهای طراحی بر عملکرد سیستم کنترلی SMC
۱۱۵	۱-۳-۱-۶- تاثیر پارامتر $\lambda$
۱۲۰	۲-۳-۱-۶- تاثیر پارامتر $\phi$
۱۲۴	۳-۳-۱-۶- تاثیر پارامتر $k$
۱۲۷	۴-۱-۶- استفاده از سطوح لغزش مختلف در کنترل کننده SMC موتور BLDC
۱۲۸	۱-۴-۱-۶- سطح لغزش $S2(X, t) = (z \frac{d}{dt} + \lambda)^{n-1} \tilde{x}$
۱۳۱	۲-۴-۱-۶- سطح لغزش $S3(X, t) = z(\frac{d}{dt} + \lambda)^{n-1} \tilde{x}$
۱۳۴	۳-۴-۱-۶- سطح لغزش $S4(X, t) = (\frac{d}{dt} + \lambda)^n \int \tilde{x} dt$
۱۳۷	۴-۴-۱-۶- سطح لغزش $S5(X, t) = a_3(a_2 \frac{d}{dt} + \lambda)^n \int \tilde{x} dt$
۱۴۰	۵-۱-۶- قوانین همگرایی مختلف و تاثیر آنها
۱۴۳	۶-۱-۶- تاثیر در نظر گرفتن محدودیت بر مقدار سیگنال کنترلی
۱۴۵	۲-۶- کنترل کننده فازی موتور BLDC
۱۶۲	۳-۶- کنترل کننده های فازی مدلغزشی موتور BLDC مبتنی بر جستجوی جدولی
۱۶۷	۴-۶- کنترل کننده های فازی مدلغزشی موتور BLDC مبتنی بر سیستم TISO هوانگ
۱۸۱	فصل هفتم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۸۱	۱-۷- نتیجه گیری
۱۸۲	۲-۷- پیشنهادات
۱۸۳	پیوست (۱)
۱۸۴	پیوست (۲)
۱۸۶	پیوست (۳)
۱۸۷	پیوست (۴)
۱۸۸	مراجع



## فهرست اشکال

صفحه

عنوان

۶	شکل ۱-۲ - شمای یک موتور DC بدون جاروبک
۷	شکل ۲-۲ - برش موتور BLDC
۷	شکل ۳-۲ - برش موتور DC معمولی
۱۰	شکل ۴-۲ - اصول کار موتور BLDC با استفاده از عنصر هال
۱۰	شکل ۵-۲ - تولید گشتاور ، چرخش و کلید زنی عنصر هال
۱۲	شکل ۶-۲ - موتور BLDC با مدار فرمان تک قطبی
۱۳	شکل ۷-۲ - ترتیب کلید زنی و چرخش میدان
۱۴	شکل ۸-۲ - مدار فرمان کاربردی موتور تک قطبی
۱۴	شکل ۹-۲ - نحوه تولید سیگنال فرمان ترانزیستورها از سیگنال خروجی عناصر هال
۱۵	شکل ۱۰-۲ - شمای موتور BLDC چهار فاز
۱۵	شکل ۱۱-۲ - موتور BLDC سه فاز با مدار فرمان دو قطبی
۱۷	شکل ۱۲-۲ - میدان مغناطیسی استاتور و جهت گشتاور
۱۸	شکل ۱۳-۲ - چرخش رتور و میدان مغناطیسی استاتور در جهت عقربه های ساعت
۱۸	شکل ۱۴-۲ - چرخش رتور و میدان مغناطیسی استاتور در جهت خلاف عقربه های ساعت
۱۹	شکل ۱۵-۲ - اینورتر پل سه فاز و منطق ۱۸۰ کلید زنی
۲۰	شکل ۱۶-۲ - ماشین سنکرون مغناطیس دایم دو فازه دو قطب
۲۰	شکل ۱۷-۲ - Back EMF دوزنقه ای
۲۳	شکل ۱۸-۲ - نمودار بلوکی در حوزه زمان موتور BLDC
۲۴	شکل ۱۹-۲ - بلوک دیاگرام خطی موتور BLDC
۲۷	شکل ۲۰-۲ - مشخصه گشتاور - سرعت حالت ماندگار بدون جابجایی فاز
۲۷	شکل ۲۱-۲ - مشخصه گشتاور - سرعت موتور شنت
۲۸	شکل ۲۲-۲ - مشخصه گشتاور - سرعت با جابجایی در فاز
۲۹	شکل ۲۳-۲ - مشخصه گشتاور - سرعت با افزایش سه برابری $\tau_s$ در اثر کاهش $\tau_s$
۲۹	شکل ۲۴-۲ - مشخصه گشتاور - سرعت با افزایش سه برابری $\tau_s$ در اثر افزایش $L_{ss}$
۳۱	شکل ۲۵-۲ - شتاب آزاد موتور BLDC با تغذیه از منبع سینوسی دو فاز
۳۱	شکل ۲۶-۲ - مشخصه گشتاور - سرعت در هنگام شتاب آزاد
۳۲	شکل ۲۷-۲ - شتاب آزاد موتور با لختی ۵ برابر
۳۲	شکل ۲۸-۲ - مشخصه گشتاور - سرعت با لختی کبرابر
۳۳	شکل ۲۹-۲ - مشخصه دینامیکی در حالت تغیر بار
۳۴	شکل ۳۰-۲ - شتاب آزاد موتور با تغذیه از اینورتر جریان پیوسته شش پالسه
۳۴	شکل ۳۱-۲ - مشخصه گشتاور - سرعت در حالت تغذیه با اینورتر جریان پیوسته
۳۵	شکل ۳۲-۲ - مشخصه دینامیکی موتور در هنگام تغذیه از اینورتر جریان پیوسته و تغیر بار

- شکل ۳۳-۲- مدار عملی موتور سه فازه با مدار فرمان دو قطبی و ترتیب قرار گرفتن اثر هال
- شکل ۳۴-۲- نقش موتور BLDC در چاپگر لیزری ، این موتور آینه چند وجهی را می چرخاند
- شکل ۳۵-۲- اصول کار چاپگر لیزری
- شکل ۳۶-۲- موتور BLDC مورد استفاده در پرینتر لیزری
- شکل ۳۷-۲- سیستم هارد دیسک درایو
- شکل ۳۸-۲- مدار یک گاورنر الکترونیکی که برای موتور چهار فاز با دو عنصر هال طراحی شده است
- شکل ۳۹-۲- هارمونیک های جریان خط موتور BLDC
- شکل ۴۰-۲- هارمونیک های جریان خط موتور DC
- شکل ۴۱-۳- تفسیر گرافیکی معادلات (۸-۹) و (۹-۵)
- شکل ۴۲-۳- تعبیر فیلیپوف در حالت دو بعدی
- شکل ۴۳-۳- پدیده Chattering حاصل از سوئیچینگ کنترلی ناقص
- شکل ۴۴-۳- لغزش ایده آل
- شکل ۴۵-۳- لغزش نوسانی و همگرایی به سمت حالت ایده آل
- شکل ۴۶-۳- متد لایه مرزی
- شکل ۴۷-۳- تنظیم مناسب پارامتر  $\phi$
- شکل ۴۸-۳-  $\phi$  متغیر با زمان
- شکل ۴۹-۶- بلوک دیاگرام SMC و موتور BLDC
- شکل ۵۰-۶- زیر سیستم SMC
- شکل ۵۱-۶- زیر سیستم BLDC
- شکل ۵۲-۶- نمودارهای عملکردی کنترل کننده SMC موتور BLDC با وجود Chattering
- شکل ۵۳-۶- نمودارهای عملکردی کنترل کننده SMC موتور BLDC با حذف Chattering (تابع sat)
- شکل ۵۴-۶- نمودارهای عملکردی کنترل کننده SMC موتور BLDC با حذف Chattering (تابع tanh)
- شکل ۵۵-۶- بلوک دیاگرام کنترل کننده PID موتور BLDC
- شکل ۵۶-۶- نمودارهای عملکردی کنترل کننده PID موتور BLDC
- شکل ۵۷-۶- منحنی سرعت کنترل کننده PID و SMC
- شکل ۵۸-۶- تغییر درجه دوم بار
- شکل ۵۹-۶- نمودارهای عملکردی کنترل کننده SMC موتور BLDC در تغییر درجه دوم گشتاور بار
- شکل ۶۰-۶- نمودارهای عملکردی کنترل کننده PID موتور BLDC در تغییر درجه دوم گشتاور بار
- شکل ۶۱-۶- منحنی سرعت کنترل کننده PID و SMC در تغییر درجه دوم گشتاور بار
- شکل ۶۲-۶- تغییر گشتاور بار به صورت متناوب سینوسی
- شکل ۶۳-۶- نمودارهای عملکردی کنترل کننده SMC موتور BLDC در تغییر متناوب گشتاور بار
- شکل ۶۴-۶- نمودارهای عملکردی کنترل کننده PID موتور BLDC در تغییر متناوب گشتاور بار
- شکل ۶۵-۶- منحنی سرعت کنترل کننده PID و SMC در تغییر متناوب گشتاور بار
- شکل ۶۶-۶- تغییر سرعت مرجع به صورت درجه دوم
- شکل ۶۷-۶- نمودارهای عملکردی کنترل کننده SMC موتور BLDC در تغییر درجه دوم سرعت مرجع
- شکل ۶۸-۶- نمودارهای عملکردی کنترل کننده PID موتور BLDC در تغییر درجه دوم سرعت مرجع

- شکل ۶-۲۱- نمودارهای عملکردی کنترل کننده SMC موتور BLDC با لایه مرزی متغیر با زمان ۱۱۲
- شکل ۶-۲۲- لایه مرزی متغیر با زمان ۱۱۳
- شکل ۶-۲۳- منحنی های سرعت و لغزش با وبدون لایه مرزی متغیر با زمان ۱۱۴
- شکل ۶-۲۴- منحنی عملکردی SMC با لحاظ  $\lambda = 50$  ۱۱۵
- شکل ۶-۲۵- منحنی عملکرد SMC با لحاظ  $\lambda = 150$  ۱۱۷
- شکل ۶-۲۶- منحنی های عملکرد SMC با لحاظ  $\lambda = 2000$  ۱۱۸
- شکل ۶-۲۷- منحنی های عملکرد SMC با لحاظ  $\phi = 1/0.006$  ۱۲۱
- شکل ۶-۲۸- منحنی های عملکرد SMC با لحاظ  $\phi = 1/0.000009$  ۱۲۲
- شکل ۶-۲۹- منحنی های عملکرد SMC با لحاظ  $K=100$  ۱۲۴
- شکل ۶-۳۰- منحنی عملکردی SMC با لحاظ  $k = 5$  ۱۲۶
- شکل ۶-۳۱- منحنی های عملکردی SMC با لحاظ سطح لغزش S2 ۱۳۰
- شکل ۶-۳۲- منحنی های سرعت و سطح لغزش S1 و S2 ۱۳۱
- شکل ۶-۳۳- منحنی های عملکردی SMC با لحاظ سطح لغزش S3 ۱۳۳
- شکل ۶-۳۴- منحنی های سرعت و سطح لغزش S1 و S3 ۱۳۴
- شکل ۶-۳۵- منحنی های عملکرد SMC با لحاظ سطح لغزش S4 ۱۳۵
- شکل ۶-۳۶- منحنی های سرعت و سطح لغزش S1 و S4 ۱۳۶
- شکل ۶-۳۷- منحنی های عملکردی SMC با لحاظ سطح لغزش S5 ۱۳۸
- شکل ۶-۳۸- منحنی های سرعت و سطح لغزش S1 و S5 ۱۳۹
- شکل ۶-۳۹- منحنی های عملکردی SMC با لحاظ قانون همگرایی نمائی ۱۴۱
- شکل ۶-۴۰- منحنی های سرعت و سطح لغزش طرح همگرایی سرعت ثابت و نمائی ۱۴۲
- شکل ۶-۴۱-۱۲- منحنی های عملکردی SMC با وجود محدودیت در سیگنال کنترل ۱۴۴
- شکل ۶-۴۲- کنترل کننده فازی موتور BLDC ۱۴۶
- شکل ۶-۴۳- توابع عضویت ورودی و خروجی کنترل کننده فازی ۱۴۷
- شکل ۶-۴۴- منحنی های عملکردی کنترل کننده فازی ۱۴۸
- شکل ۶-۴۵- منحنی های سرعت کنترل کننده فازی و SMC ۱۴۹
- شکل ۶-۴۶- منحنی های عملکردی کنترل کننده فازی در تغییر درجه دوم گشتاور بار ۱۵۰
- شکل ۶-۴۷- منحنی های سرعت دو کنترل کننده فازی و SMC ۱۵۱
- شکل ۶-۴۸- گشتاور بار پله ای ۱۵۲
- شکل ۶-۴۹- منحنی های عملکرد کنترل کننده SMC با لحظ تغییرات ناگهانی گشتاور بار ۱۵۲
- شکل ۶-۵۰- منحنی های عملکردی کنترل کننده فازی در تغییر ناگهانی بار ۱۵۵
- شکل ۶-۵۱- منحنی های عملکردی کنترل کننده فازی در تغییر متناوب گشتاور بار ۱۵۶
- شکل ۶-۵۲- منحنی های عملکردی کنترل کننده فازی با لحاظ تغییرات متناوب گشتاور بار ۱۵۸
- شکل ۶-۵۳- منحنی های سرعت SMC و کنترل کننده فازی در تغییر متناوب گشتاور بار ۱۵۹
- شکل ۶-۵۴- تغییر ناگهانی سرعت مرجع ۱۵۹
- شکل ۶-۵۵- منحنی های عملکردی SMC در تغییر ناگهانی سرعت مرجع ۱۵۹
- شکل ۶-۵۶- منحنی های عملکردی کنترل کننده فازی در تغییرات ناگهانی سرعت مرجع ۱۶۱

۱۶۳	شکل ۶-۵۷- توابع عضویت ورودی و خروجی
۱۶۵	شکل ۶-۵۸- کنترل کننده فازی مد لغزشی مبتنی بر جستجوی جدولی
۱۶۶	شکل ۶-۵۹- منحنی‌های عملکردی کنترل کننده فازی مبتنی بر جستجوی جدولی
۱۶۹	شکل ۶-۶۰- کنترل کننده فازی مد لغزشی TISO هوانگ
۱۷۰	شکل ۶-۶۱- توابع عضویت منغیرهای ورودی و خروجی
۱۷۰	شکل ۶-۶۲- منحنی‌های عملکردی FSMC
۱۷۲	شکل ۶-۶۳- منحنی‌های سرعت و سطح لغزش FSMC و SMC
۱۷۲	شکل ۶-۶۴- منحنی‌های عملکردی FSMC در تغییر درجه دوم گشتاور بار
۱۷۵	شکل ۶-۶۵- منحنی‌های عملکردی FSMC در تغییر ناگهانی گشتاور بار
۱۷۶	شکل ۶-۶۶- منحنی‌های عملکردی FSMC در تغییر متناوب گشتاور بار
۱۷۸	شکل ۶-۶۷- منحنی‌های عملکردی FSMC در تغییر درجه دوم سرعت مرجع
۱۷۹	شکل ۶-۶۸- منحنی‌های عملکردی FSMC در تغییر ناگهانی سرعت مرجع

## فهرست جداول

صفحه	عنوان
۳۸	جدول ۱-۲- مشخصات موتور سه فازه با مدار فرمان تک قطبی
۳۹	جدول ۲-۲- مقایسه موتور AC سنکرون و موتور BLDC مورد استفاده در هارد دیسک درایو ۸ اینچ
۳۹	جدول ۲-۳- مشخصه‌های موتورهای BLDC سه فاز تک قطبی ، مورد استفاده در درایو هارد دیسک
۴۱	جدول ۲-۴- مقایسه موتورهای DC و BLDC
۴۲	جدول ۲-۵. بازده موتور BLDC بر حسب سرعت و گشتاور
۴۲	جدول ۲-۶. بازده موتور DC بر حسب سرعت و گشتاور
۴۳	جدول ۲-۷. ضریب توان موتور BLDC بر حسب سرعت و گشتاور
۴۳	جدول ۲-۸. ضریب توان موتور DC بر حسب سرعت و گشتاور
۱۴۷	جدول ۶-۱- پایگاه قوانین کنترل کننده فازی

This document was created with Win2PDF available at <http://www.daneprairie.com>.  
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.

## فصل اول: مقدمه

موتور DC بدون جاروبک<sup>۱</sup> به عنوان یک موتور کنترلی کم قدرت کاربرد وسیعی دارد. این موتور، یک موتور DC نیست، بلکه یک ماشین سنکرون مغناطیس دائم است. هنگامی که این ماشین از منبعی تغذیه شود که فرکانس آن با فرکانس چرخش رتور ماشین همواره برابر باشد به یک موتور BLDC تبدیل می‌گردد. استفاده از نام DC نه به این خاطر است که شبیه یک موتور DC است، بلکه به خاطر آن است که مشخصات عملکردی آن، شبیه موتور DC شنت با جریان میدان ثابت می‌باشد [۱].

موتورهای DC راندمان بالایی دارند و به دلیل مشخصه برجسته‌اشان، می‌توان از آنها به عنوان سروموتور استفاده نمود. تنها عیب این موتورها نیاز آنها به کموتاتور و جاروبک‌هاست که دائماً در معرض فرسایش می‌باشند و نیاز به سرویس و نگهداری دارند. در موتورهای BLDC که وظیفه کموتاتور و جاروبک به عهده کلیدهای الکترونیکی می‌باشد [۲]. اگر سویچینگ توسط ادوات نیمه هادی بجای مکانیکی انجام شود، می‌تواند مسایل همراه با یک کموتاتور را برطرف نماید. استفاده از ادوات نیمه هادی برای جایگزینی کموتاسیون یک موتور DC مغناطیس دائم مسایل جدیدی را مطرح می‌نماید، به علاوه سیستم موتور BLDC باید دارای مشخصه‌های سرعت – گشتاور موتور DC باشد [۳].

موتور BLDC برای تنوعی از کاربردها می‌تواند بکار روند. مزیت تنوع مواد مغناطیسی، ساخت طرح‌های BLDC که دارای نسبت گشتاور به اینرسی بالایی می‌باشند را امکان پذیر ساخته است. از آنجایی که کموتاسیون در المان‌های خارجی صورت می‌گیرد، هیچ عنصری غیر از بلبرینگ‌های موتور از مسایل مکانیکی صدمه نخواهند دید. بنابراین عمر این موتور تنها توسط بلبرینگ مکانیکی و پایداری کنترل کننده الکترونیکی محدود می‌شود.

BLDC می‌تواند با کنترل کننده‌های خیلی خوب کنترل گردد. در مورد وضعیت‌های سخت محیطی کنترل کننده می‌تواند دور از موتور واقع گردد. سیستم کنترل می‌تواند به آسانی با ورودی‌های آنالوگ و دیجیتال واسط گردد. بنابراین این موتورها برای کنترل حرکتی رتور بصورت گام‌های مجزا بسیار مناسب است (کنترل افزایشی). همچنین این موتور نسبت به موتور DC معمولی تشعشعات RF

---

1. Brushless DC Motor (BLDC)

کمتری دارد. BLDC ها دارای عمر طولانی و قابلیت اعتماد بالایی (ناشی از فقدان جاروبکها و کموتاتور مکانیکی) می‌باشند و به هیچ تعمیر و نگهداری نیاز ندارند. همچنین این موتورها به ولتاژهای اعمالی بسرعت پاسخ می‌دهند.

از طرف دیگر تدارک کنترل‌کننده‌ای مناسب جهت کنترل سرعت موتور در مسیر مطلوب مهم‌ترین دغدغه محققان بوده و طرح‌های کنترلی بیشماری تا امروز پیشنهاد شده‌است. در گذشته براساس مدل خطی شده موتور BLDC و براساس رهیافت کنترل خطی، کنترل‌کننده‌های گین ثابت پیشنهاد شده است. ولی چنانچه بار غیرخطی و پارامترها متغیر و عدم قطعیت در مدل‌سازی و شرایط عملکردی وجود داشته باشد، کنترل‌کننده‌های مزبور بطور نامطلوبی عمل می‌نمایند. بنابراین روش کنترلی درایو الکتریکی با کارایی بالا باید تطبیقی و مقاوم باشد، لذا در دهه گذشته علاقه فراوان در گسترش سیستم‌های کنترل تطبیقی افزایش یافته است و چندین طرح کنترل تطبیقی برای موتور BLDC بر پایه مدل‌های خطی شده، ارائه گردیده است. در طی دهه اخیر سیستمی فازی مبتنی بر شبکه عصبی که سیستم هوشمند فازی - عصبی خوانده می‌شود، در کنترل سیستم‌های غیرخطی مورد توجه قرار گرفت. در این طرح‌ها قواعد کنترلی بصورت تطبیقی اصلاح می‌شود و الگوریتم‌های بازگشتی و فیدبک‌دار برای آموزش کنترل‌کننده فازی-عصبی بکار می‌رود [۱۰].

برخلاف مدل‌های ریاضی مداری و یا کوپل شده میدانی - مداری، شبکه‌های عصبی مصنوعی به مدل تحلیلی احتیاجی ندارد و با مفروضات مدل‌های متعارف محدود نشده است. همچنین در مقایسه با روش‌های عددی پیچیده نتایج را سریعتر ایجاد می‌نماید. با این حال اینگونه تکنیک‌ها در مراحل ابتدایی پیشرفتشان قرار دارند [۱۲]. با آنچه گفته شد معلوم می‌گردد تقاضا برای ساختارهای کنترلی غیرخطی مدرن افزایش می‌یابد. عملاً کنترل‌کننده‌های تطبیقی بسیار کمی در کنترل وسایل الکتریکی بکار گرفته شده است، زیرا عملکرد پیچیده‌ای دارند. کنترل‌کننده‌های فازی نیز ابزاری مناسب در کاربردهای کنترل صنعتی است. این تکنیک‌های کنترلی به قابلیت‌های انسانی در درک رفتار سیستم‌ها و نیز قواعد کنترلی وابسته‌اند. اینچنین کنترل‌کننده‌هایی ذاتاً نسبت به اغتشاشات بار، مقاوم و نیرومندند. مزیت دیگر آن‌ها، سادگی اجراست [۱۳].



کاربردهای کنترل‌کننده‌های فازی به خاطر مشکلاتی محدود شده است زیرا پارامترهای کنترل‌کننده فازی باید پس از تست‌های مکرر و توسط متخصصان تعیین گردد و همچنین روش سیستماتیک مدونی برای تعیین پایداری سیستم وجود ندارد. در مورد شبکه‌های عصبی نیز باید گفت که پارامترها توسط آموزش‌دهی پیوسته تنظیم می‌شوند که سبب کند شدن سرعت پاسخ به اغتشاشات می‌گردد و نیاز به میکروپروسسورهای سریعتر را لازم می‌دارد. در نتیجه محققان با ترکیب کنترل هوشمند و کنترل مقاوم، افق‌های تازه‌ای را در زمینه کنترل و درایو آشکار ساخته‌اند [۱۵].

همچنین کنترل تطبیقی به روش شناسایی پارامترها بصورت برخط نیازمند است، بنابراین به تغییرات سریع بار بسیار حساس است. به منظور رفع این مشکلات می‌توان از کنترل مدل‌گزشی در ساختارهای کنترلی متغیر استفاده نمود. این روش، روش تطبیقی است که بسیار مقاوم و سازگار به تغییرات پارامترها و اغتشاشات و عدم قطعیت‌هاست [۱۵].

سیستم ساختار متغیر، سیستم دینامیکی است که ساختار آن با توجه به مقدار فعلی بردارهای حالت تغییر می‌کند. سیستم ساختار متغیر می‌تواند به عنوان یک سیستم متشکل از چندین ساختار مستقل (با یک منطق سویچینگ ما بین آنها) تعبیر شود. با منطق سویچینگ مناسب، سیستم ساختار متغیر می‌تواند خواص ایده‌آل هر کدام از ساختارهای تشکیل دهنده آن را داشته باشد. هر چند سیستم ساختار متغیر ممکن است دارای خاصیتی باشد که در هیچ یک از ساختارهای آن نتوان مشاهده نمود. با توجه به اهمیت چنین سیستم‌هایی روش‌های متعددی در این زمینه ارائه شده است که از آن جمله می‌توان به روش‌های مدل‌گزشی، کنترل بنگ - بنگ و On-Off Control اشاره نمود.

تئوری‌های اولیه و مبانی کنترل لغزشی تحت عنوان کنترل ساختار متغیر مطرح شده‌اند که علت این نامگذاری، تغییر ساختار این کنترل‌کننده در حین فرایند کنترل می‌باشد. این تغییر ساختار همیشه در جهتی انجام می‌پذیرد که مقدار یک تابع موسوم به سطح ناپیوسته، به سمت صفر میل کند. این سطح ناپیوستگی باید طوری تعیین شده باشد که در صورت صفر شدن، خطای سیستم به سمت صفر میل نماید. به دلیل اینکه تغییر ساختار کنترل‌کننده، منجر به نوسانات کوچکی حول سطح مزبور می‌شود، این کنترل‌کننده‌ها به کنترل‌کننده‌های لغزشی مشهور شده‌اند و به سطح ناپیوستگی نیز اصطلاحاً سطح لغزش گویند. البته کنترل دیگری نیز از نوع ساختار متغیر با عنوان سیستم کنترل

فازی مطرح شده است که کار آن از لحاظ منطقی، شبیه کنترل لغزشی است ولی با این حال، هنوز هم این عنوان بطور اختصاصی برای کنترل کننده های لغزشی بکار می رود. در روش مدل لغزشی تحلیل پایداری براساس روش لیاپانوف صورت می پذیرد و در نتیجه روشی است که از دو فاکتور طراحی برخوردار است. در وهله اول می توان سطح لغزش مناسب را با توجه به نیاز بطور مناسب تعریف نمود (قطبهای این سطح می تواند توسط طراح تعیین گردد) و در مرحله بعد می توان شرایط مناسب پایداری را با قضایای لیاپانوف بدست آورد. بنابراین با توجه به گستردگی فضای کاری به راحتی می توان این روش را با سایر روش های کنترلی دیگر ترکیب نمود [۸].

مقایسه ای دقیق بین کنترل لغزشی و کنترل فازی نشان می دهد که عملکرد این دو روش در بسیاری از حالات مشابه هستند [۲۶]. اگر بتوان کنترل کننده ای فازی طراحی نمود که قادر به تخمین سیگنال کنترلی طراحی شده در مرحله مد لغزشی بوده و بنابراین شروط لغزش، قانون همگرایی و همگرایی مولفه های خطای متغیرهای حالت به صفر را ارضاء نماید، آنگاه کنترل مدل لغزشی فازی مورد نظر بدست آمده است و توسط کنترل کننده های فازی قادر به پیاده سازی قوانین کنترل مدل لغزشی می باشیم.

برای تخمین عملکرد سیستم ها توسط سیستم فازی چندین روش وجود دارد که عبارت از تقریب مرتبه اول، تقریب مرتبه دوم، تقریب براساس داده های ورودی - خروجی، روش جدول جستجو، روش گرادیان نزولی، روش کمترین مربعات بازگشتی و روش خوشه سازی می باشند [۲۶]. روش اول و دوم تابعی خاص را در تمام بازه ورودی تقریب می زنند ولی از آنجایی که در عمل تعداد محدودی از داده های ورودی - خروجی (حاصل نمونه برداری) در اختیار می باشد، مساله طراحی به مساله پیشگویی رفتار سیستم در بازه ای خاص خلاصه می شود و روش سوم در طراحی مد نظر قرار می گیرد. در روش جدول جستجو ابتدا قواعد فازی تولید شده و سپس براساس موتورهای استنتاج مطلوب، سیستم فازی ساخته می شود، ولی در روش گرادیان نزولی ابتدا سیستم فازی مشخص شده و سپس براساس داده های ورودی - خروجی به آموزش دهی سیستم و تعیین پارامترهای متغیر خواهیم پرداخت. روش های دیگر نیز دقت تقریب را افزایش داده و از طرف دیگر روش های سیستماتیک و منسجم تری را برای طراحی سیستم های فازی ارایه می نمایند.

در فصول آتی ابتدا به معرفی اجمالی کنترل‌کننده‌های مد‌لغزشی، فازی و مد‌لغزشی فازی پرداخته و سپس با شبیه‌سازی‌های انجام‌گرفته، عملکرد هر کنترل‌کننده تحت شرایط مختلف کاری نشان داده خواهد شد. با انجام مقایسات، تاثیر هر کنترل‌کننده بر عملکرد سیستم BLDC مشخص شده و نقاط ضعف و قوت آن تعیین می‌گردد. همچنین با تعریف سطوح لغزش مختلف و قوانین همگرایی متفاوت به بررسی رفتار موتور خواهیم پرداخت و از این راه قالب کاری مناسبی فراهم می‌آوریم که محققان بتوانند بنا بر مشخصات مورد نیاز عملکرد، طرح‌های متفاوتی از سطوح لغزش و قوانین همگرایی را برگزینند. به علاوه تاثیر پارامترهای مختلف طراحی، مورد بررسی دقیق قرار گرفته و نتایج لازم ارائه می‌گردد.

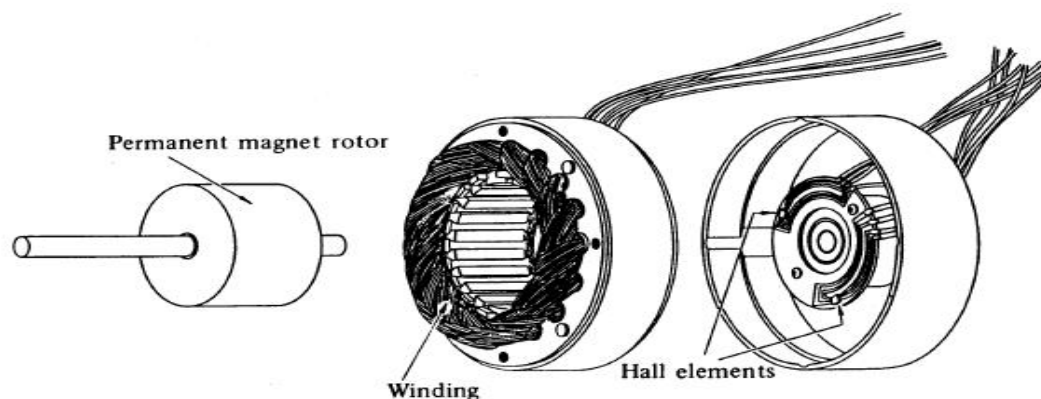
## فصل دوم: ساختمان موتور DC بدون جاروبک

### ۲-۱- ساختمان موتور DC بدون جاروبک

در یک موتور DC معمولی، آرمیچر در روی رتور و میدان بر روی استاتور قرار دارد. ولی در موتور BLDC وضع بدین گونه نیست، بلکه ساختمان این موتورها شباهت بسیاری به ساختمان موتورهای AC سنکرون دارد. در این موتورها آرمیچر بر روی استاتور قرار دارد و میدان از یک یا چند آهنربا که روی رتور نصب می‌شود، تشکیل می‌گردد. سیم پیچی این نوع موتورها شبیه سیم پیچی موتورهای AC چند فازه می‌باشد و معمول ترین آنها دارای سیم پیچی سه فاز است که با یک سیستم تحریک تک قطبی کار می‌کند. BLDC ها دارای چهار قسمت اصلی هستند: رتور مغناطیس دائم، استاتور سیم پیچی شده، کموتاتور الکترونیکی و سنسور موقعیت رتور.

موتورهای BLDC از نظر طرز تعیین وضعیت رتور با موتورهای AC تفاوت دارند. بدین منظور در این موتورها از کلیدهای الکترونیکی استفاده می‌شود که سیگنال‌های تعیین وضعیت را تولید می‌نمایند. عمومی ترین روش کنترل وضعیت، روش هال می‌باشد ولی بعضی از موتورها از آشکارسازهای نوری استفاده می‌نمایند.

نمونه‌ای از این موتورها در شکل ۲-۱ ملاحظه می‌شود [۲].



شکل ۲-۱. شمای یک موتور DC بدون جاروبک [۲]