دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

گروه قدرت

پایان‌نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته‌ی مهندسی برق- قدرت

عنوان

طراحی کنترل کننده‌های سرعت بر اساس الگوریتم‌های هوشمند و تطبیقی برای موتور بدون جاروبک جریان مستقیم

استادان راهنما

دکتر محمد رضا فیضی

دکتر کاظم زارع

استاد مشاور

دکتر مهران صباحی

پژوهشگر

مهدی شفیعی

تیر 90

نام خانوادگی: شفیعی **نام**: مهدی

عنوان پایان نامه: طراحی کنترل کننده‌های سرعت بر اساس الگوریتم‌های هوشمند و تطبیقی برای موتور بدون جاروبک جریان مستقیم

استاد راهنما اول: دکتر محمد رضا فیضی

استاد راهنما دوم: دکتر کاظم زارع

استاد مشاور: دکتر مهران صباحی

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته**: مهندسی برق قدرت **گرایش**: ماشینهای الکتریکی و درایو **دانشگاه**: تبریز

دانشکده: مهندسی برق و کامپیوتر **تاریخ فارغ التحصیلی** : **تعداد صفحه**: 116

کلید واژه‌ها: موتورdc بدون جاروبک(BLDC)، کنترل کننده منطق فازی (FLC)، سیستم تطبیقی عصبی- فازی (ANFIS)، کنترل فازی افزایشی (FInc)، سیستم تطبیقی مدل مرجع (MRAS)

چکیده:

موتور BLDC[1] از دسته موتورهای الکتریکی سنکرون است که شباهت زیادی با موتورهای DC دارد. به دلیل پاسخ بهتر سرعت و گشتاور، پاسخ دینامیکی بالا، بازده بالا، طول عمر بالا، عملکرد بدون نویز و محدود عملکرد متفاوت سرعت، این موتور نسبت به موتورهای DC و القایی برتری دارد.

کنترل مستقیم گشتاور به منظور درایو موتور BLDC به کار گرفته شده است. سرعت بالای پاسخ گشتاور، طراحی ساده و مقاوم از مزایای این روش کنترلی است.

کنترل‌کننده مرسوم در کنترل سرعت این قبیل موتورها کنترل‌کننده PI است. هر چند این کنترل‌کننده کلاسیک ساختاری ساده دارد ولی دقت پایین این کنترل‌کننده باعث به وجود آمدن فراجهش در پاسخ سرعت و گشتاور می‌گردد. به همین منظور در دو دهه‌ی اخیر کنترل کننده‌هایی بر اساس الگوریتم‌های هوشمند و تطبیقی ارائه شده‌اند. کنترل کننده فازی را می‌توان اولین کنترل کننده هوشمند نامید. مزیت این کنترل کننده ساختاری ساده و عدم نیاز به معادلات پیچیده ریاضی دانست. مشکل این کنترل کننده این است که صحت دستورات توسط صحیح و خطا تعیین می‌گردد که این از دقت این کنترل‌کننده می‌کاهد. به منظور حل این مشکل در سال 1993 کنترل‌کننده سیستم تطبیقی عصبی- فازی[2] توسط جنگ ارائه شد. این کنترل کننده بر اساس آموزش سیستم توسط داده‌های مناسب و اعمال این داده‌ها به کنترل‌کننده فازی، سیستم را کنترل می‌کند.

ریپل بالای گشتاور یکی از معایب دو کنترل‌کننده هوشمند بیان شده در فوق است. به منظور رفع این مشکل یان سن در سال 1998 ایده فازی-تطبیقی را ارائه کرد. این ساختار شامل ترکیب دو کنترلر فازی و PI است.

در دهه‌ی اخیر کنترلرهایی که دارای ساختاری تطبیقی و مقاوم هستند بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. سیستم تطبیقی مدل مرجع[3] (MRAS) از این قبیل کنترل‌کننده‌ها است. در این کنترل‌کننده با توجه به درجه‌ی سیستم یک مدل ایده‌ال تعریف می‌گردد. اختلاف مدل حقیقی از این مدل مرجع سیگنال خطایی را ایجاد می‌کند که این سیگنال خطا به صورت فیدبک به ورودی سیستم وارد گشته و خروجی سیستم حقیقی را اصلاح می‌کند.

در این پایان نامه پنج روش بیان‌شده در فوق به عنوان کنترلر سرعت موتور BLDC به کار گرفته شده‌اند، و نتایج حاصل از هرکدام با روش‌های دیگر مقایسه شده‌اند. با مقایسه روش‌ها می‌توان گفت کنترلر فازی-تطبیقی پاسخ بهتری نسبت به کنترلر فازی-عصبی و فازی از خود نشان می‌دهد. کنترلر MRAS نیز در مقایسه با کنترلرهای هوشمند و کنترلر PI بهترین پاسخ را از لحاظ حذف فراجهش، توانایی تطبیق با تغییرات آنی سیستم و بهبود زمان حالت گذرا را از خود نشان می‌دهد.

---

[1] Brushless DC Motor
[2] Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System
[3] Model Reference Adaptive System

تقدیم به

فرانک عزیزم

با تشکر از خانواده عزیزم که در تمامی مراحل زندگی پشتیبان و حامی من بوده اند.

برخود لازم می‌دانم تا از اساتید عزیز و گرانقدرم جناب آقای دکتر محمدرضا فیضی، جناب آقای دکتر کاظم زارع و جناب آقای دکتر مهران صباحی که زحمت راهنمایی بنده را بر عهده داشتند و جناب آقای دکتر محمد باقر بناشریفیان که داوری پایان‌نامه اینجانب را تقبل نمودند، کمال تشکر را داشته باشم.

فهرست مطالب

فصل اول: معرفی موتور جریان مستقیم بدون جاروبک و اصول عملکرد آن

1-1- مقدمه 1
2-1- تاریخچه 3
3-1- تعریف موتور BLDC 3
1-3-1- مزایا و معایب موتور BLDC 4
4-1- ساختمان موتور BLDC 7
1-4-1- استاتور 7
2-4-1- روتور 11
3-4-1- سنسورهای هال 12
5-1- اصول عملکرد موتور BLDC 13
1-5-1- تبیین مفهوم کموتاسیون در یک موتور DC 14
2-5-1- مقایسه موتور BLDC با موتورهای DC و القایی 15
3-5-1- کموتاسیون در موتور BLDC 17
6-1- مدل موتور BLDC 20
5-1- خلاصه 23

فصل دوم: کنترل مستقیم گشتاور موتور جریان مستقیم بدون جاروبک

1-2- مقدمه 25
2-2- ساختار کنترل مستقیم گشتاور (DTC) 26
3-2- خلاصه 36

فصل سوم: طراحی کنترل‌کننده‌های سرعت موتور جریان مستقیم بدون جاروبک

1-3- مقدمه 38
2-3- روش‌های کنترل کلاسیک 38
3-3- طراحی کنترل‌کننده سرعت بر پایه منطق فازی 40
1-3-3- مقدمه 40
2-3-3- طراحی کنترل‌کننده سرعت بر اساس منطق فازی 42
4-3- طراحی کنترل‌کننده سرعت بر پایه منطق فازی-عصبی (ANFIS) 49
1-4-3- مقدمه 49
2-4-3- کنترلر فازی-عصبی بر اساس سوگیون 52
3-4-3- طراحی کنترل‌کننده سرعت بر اساس شبکه عصبی-فازی (ANFIS) 57
5-3- طراحی کنترل‌کننده سرعت بر پایه منطق فازی-تطبیقی (FInc) 58
1-5-3- طراحی کنترلر فازی-تطبیقی 59

3-5-2- طراحی کنترل‌کننده سرعت بر اساس الگوریتم فازی-تطبیقی (Fuzzy Incremental) 63
3-6- طراحی کنترل‌کننده سرعت براساس سیستم‌های تطبیقی مدل – مرجع (MRAS) 64
3-6-1- قاعده MIT 65
3-6-2- طراحی کنترل‌کننده سرعت بر اساس الگوریتم MRAS 66
3-7- خلاصه 71
فصل چهارم: نتایج شبیه سازی
4-1- مقدمه 75
4-2- نتایج شبیه‌سازی کنترل مستقیم گشتاور با کنترل سرعت **PI** 76
4-3- نتایج شبیه‌سازی کنترلر سرعت فازی 79
4-4- نتایج شبیه‌سازی کنترلر فازی- عصبی (ANFIS) 81
4-5- نتایج شبیه‌سازی کنترلر فازی- تطبیقی (Fuzzy Incremental) 84
4-6- نتایج شبیه‌سازی کنترلر سرعت براساس سیستم تطبیقی مدل- مرجع (MRAS) 90
فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات
5-1- نتیجه‌گیری 98
5-2- پیشنهادات 99
فصل ششم: مراجع
6-1- مراجع 102
ضمیمه الف: جعبه ابزار فازی 106
ضمیمه ب: الگوریتم کوچ پرندگان 113

فهرست شکل‌ها

فصل اول

شکل 1-1: استاتور یک موتور BLDC 8

شکل 1-2: شکل موج ولتاژ Back-EMF یک موتور BLDC سینوسی 9

شکل 1-3: شکل موج ولتاژ Back-EMF یک موتور BLDC ذوزنقه‌ای 10

شکل1-4: پیکربندی‌های مختلف روتور در یک موتور مغناطیس دائم 12

شکل1-5: برش عرضی یک موتور BLDC 13

شکل 1-6: مقطع عرضی از یک موتور DC 14

شکل 1-7: موتور DC اولیه با سه جزءکموتاتور و 2 جاروبک 14

شکل1-8: مدار اینورتر PWM جهت استفاده در موتورهای BLDC سه فازه 15

شکل 1-9: تغییرات سیگنال‌های اثر هال، Back-EMF، گشتاور خروجی و جریان فازها دریک موتورBLDC 18

شکل1-10: ترتیب تحریک سیم پیچ‌ها با توجه به سنسورهای هال یک موتور BLDC 19

شکل 1-11: ساختار موتور BLDC و مدار داریو آن 21

فصل دوم

شکل 2-1: مسیر شار حقیقی (خطوط پیوسته)، مسیر شار ایده‌آل (خطوط نقطه‌چین) 29

شکل2-2: الگوریتم سویئچ‌زنی در صورتی که گشتاور حقیقی کم‌تر از گشتاور مرجع باشد 32

شکل2-3: الگوریتم سویئچ‌زنی در صورتی که گشتاور حقیقی بیش‌تر از گشتاور مرجع باشد 32

شکل2-4: مدار اینورتر ولتاژ مد دو فاز موتور BLDC 33

شکل2-5: نمای کلی DTC در موتور BLDC 34

فصل سوم

شکل 3-1: یک نمونه FLC 43

شکل 3-2: تابع عضویت‌های ورودی‌های کنترل کننده فازی 46

شکل 3-3: بلوک دیاگرام کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با کنترل‌کننده سرعت فازی 48

شکل 3-4: نرون عمومی i ام در لایه k ام 53

شکل 3-5: مدل سوگیون مرتبه اول با دو ورودی و دو قاعده 54

شکل 3-6: ساختار ANFIS پنج لایه 54

شکل 3-7: محدوده تغییرات خروجی فازی با توجه به محدوده ورودی‌ها و قواعد دستوری 55
شکل 3-8: بلوک دیاگرام کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با کنترل‌کننده سرعت ANFIS 58
شکل 3-12: بلوک دیاگرام کنترل مستقیم گشتاور موتور BLDC با کنترل‌کننده سرعت FInc 63
شکل 3-13: نمودار بلوکی سیستم مدل – مرجع (MRAS) 64
شکل 3-14: بلوک دیاگرام کنترل‌کننده سرعت 67
شکل 3-15: بلوک دیاگرام کنترل‌کننده سرعت MRAS 69
شکل 3-16: بلوک دیاگرام کنترل‌کننده مستقیم گشتاور با کنترل‌کننده سرعت MRAS 70

فصل چهارم

شکل 4-1: سرعت روتور با استفاده از کنترلر سرعت PI 77
شکل 4-2: گشتاور الکترومغناطیسی با استفاده از کنترلر سرعت PI 78
شکل 4-3: جریان‌های فاز a، b، c استاتور 79
شکل 4-4: سرعت روتور با استفاده از کنترلر سرعت فازی 80
شکل 4-5: گشتاور الکترومغناطیسی با استفاده از کنترلر سرعت فازی 81
شکل 4-6: سرعت روتور با استفاده از کنترلر سرعت فازی- عصبی 83
شکل 4-7: گشتاور الکترومغناطیسی با استفاده از کنترلر سرعت فازی- عصبی 84
شکل 4-8: سرعت روتور با استفاده از کنترلر سرعت Fuzzy Incremental 87
شکل 4-9: سرعت حقیقی روتور با تغییر در سرعت مرجع، الف) کنترلر PI، ب) کنترلر Fuzzy Incremental 88
شکل 4-10: گشتاور الکترومغناطیسی با استفاده از کنترلر Fuzzy Incremental 89
شکل 4-11: مدل ایده‌ال سرعت روتور با استفاده از کنترلر سرعت MRAS 90
شکل 4-12: مدل حقیقی سرعت روتور با استفاده از کنترلر سرعت MRAS 91
شکل 4-13: خطای سرعت مرجع سیستم نسبت به سرعت حقیقی 92
شکل 4-14: مدل ایده‌آل سرعت روتور با کنترلر سرعت MRAS و تغییر در سرعت مرجع 93
شکل 4-15: سرعت حقیقی روتور با تغییر در سرعت مرجع، الف) کنترلر PI، ب) کنترلر

MRAS 94
شکل 4-16: خطای سرعت مرجع سیستم نسبت به سرعت حقیقی با تغییر سرعت مرجع 95
شکل 4-17: گشتاور الکترومغناطیسی با استفاده از کنترلر MRAS 96

ضمیمه الف

شکل 1: Toolbux Fuzzy 107
شکل 2: FIS Editor 108
شکل 3: FIS Editor tipper 109
شکل 4: The Rule Editor 110
شکل 5: Rule Viewer 110
شکل 6: The Surface Viewer 111

فهرست جدول‌ها

فصل اول

جدول1-1: مقایسه موتور BLDC با موتورهای DC و القایی 16

فصل دوم

جدول2-1: الگوریتم کلیدزنی در روش DTC 31

فصل سوم

جدول 3-1: دستورالعمل‌های کنترل‌کننده فازی 47

فصل چهارم

جدول 4-1: پارامترهای موتور BLDC مورد استفاده در شبیه‌سازی 75
جدول 4-2: پارامترهای بهینه شده کنترلر PI توسط الگوریتم PSO 76
جدول 4-3: ضرایب ثابت کنترلر Fuzzy Incremental 86

فصل اول

معرفی موتور جریان مستقیم بدون جاروبک

و

اصول عملکرد آن

1-1 مقدمه

هر چند موتورهای جریان مستقیم (DC) از ساختار کنترلی ساده‌ی برخوردار هستند، ولی به دلیل اصطکاک، که باعث خوردگی زغال‌ها می‌شود نیاز به تعویض جاروبک‌ها امری اجتناب ناپذیر است. موتورهای مغناطیس دائم در اغلب موارد می‌تواند جایگزین موتورهای DC شوند.

موتورهای مغناطیس دائم به‌صورت کلی بر دو نوع است [1]:

نوع ذوزنقه‌ی: نیروی ضد محرکه القایی (Back-EMF) با توجه به نوع سیم‌پیچی و منبع تغذیه DC ذوزنقه‌ی شکل و جریان هر فاز سیم‌پیچی استاتور مستطیلی شکل است. به این گونه موتورها، موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک[1] (BLDC) می‌گویند.

نوع سینوسی: Back-EMF القایی در سیم پیچ‌های استاتور و جریان هر فاز سیم‌پیچی استاتور سینوسی است. این قبیل موتورها به موتورهای سنکرون مغناطیس[2] (PMSM) معروف هستند. شکل Back-EMF به نوع چینش قطعات مغناطیس دائم روتور و توزیع سیم‌پیچ‌های استاتور بستگی دارد. در نوع سینوسی به دلیل این‌که موقعیت لحظه‌ی روتور برای عملکرد موتور مورد نیاز است، سنسور الکتریکی با دقت بالا مورد نیاز است. نوع ذوزنقه‌ی به دلیل سادگی ساختار، قیمت پایین و بازده بالا کاربرد بیش‌تری نسبت به نوع سینوسی دارد.

[1] Brushless DC Motor
[2] Permanent Magnet Synchronous Motor

موتور BLDC در حقیقت یک موتور سنکرون مغناطیس دائم است که توسط ولتاژ DC تغذیه می‌گردد. در این موتور کموتاسیون جریان توسط کلیدهای مدار اینورتر صورت می‌گیرد. لحظه‌ی کموتاسیون توسط سنسورهای تشخیص موقعیت تعیین می‌گردد [2].

موتورهای BLDC در رنج وسیع توان از موتورهای کوچک موجود در CD-RAMهای کامپیوترها تا موتورهای مورد استفاده در خودروهای برقی به‌کار می‌روند. معادلات موتور BLDC خطی بوده و شبیه معادلات موتور DC است. دقت سرعت در این نوع موتورها با توجه به سنسورهای دیجیتالی بسیار بالاست. مزیت اصلی این قبیل موتورها خصوصیت گرمایی فوق العاده آن‌ها است. به دلیل استفاده از مواد مغناطیس دائم محدودیت گرمایی ناشی از سیم‌پیچ روتور در این موتورها نسبت به موتورهای DC بسیار کم‌تر است، به همین دلیل ابعاد موتورهای BLDC در مقایسه با مقادیر متناظر موتورها DC هم قدرت کوچک‌تر است [3].

مزیت‌های موتور BLDC عبارتند از [4]، [5]:

- پاسخ سرعت مناسب در رنج وسیع از سرعت
- پاسخ دینامیکی مناسب
- ضریب توان ثابت
- اندازه کوچک‌تر در مقایسه با موتورهای DC هم قدرت
- عدم نیاز به مراقبت‌های کوتاه مدت
- بازده بالا (بین 91% تا 96%)

- کنترل ساده
- عملکرد تقریباً بدون نویز
- قابلیت اطمینان بالا

2-1 تاریخچه

ایده اولیه‌ی موتور BLDC در سال 1962 بدین صورت مطرح گشت که برای کموتاسیون موتور DC از مدارات کلیدزنی استفاده شد [6]. به دلیل پاسخ مناسب گشتاور و کنترل ساده و مطمئن، این ایده در ضبط صوت‌ها، رباتیک، سیستم‌های تعیین موقعیت و سیستم‌های فضایی به‌کار گرفته شد. ولی این موتورها به دلیل این‌که قادر به راه‌اندازی در توان‌های بیش‌تر از 5hp نبودند جایگاه صنعتی پیدا نکردند. با پیشرفت مواد مغناطیس دائم و گسترش کاربرد آن‌ها در موتورها، در اواسط دهه‌ی 80 میلادی موتورهای مغناطیس دائم به‌منظور کاربردهای صنعتی طراحی شد. از سال 1992 خط تولید موتورهای BLDC توان‌های پایین و بالا (0/5hp تا 300hp) راه‌اندازی شد.

3-1 تعریف موتور BLDC

موتور BLDC درمراجع مختلف دارای تعاریف متفاوتی است. استاندارد انجمن ملی سازندگان تجهیزات الکتریکی (NEMA)، موتور BLDC را این‌گونه تعریف می‌نماید:

یک موتور بدون جاروبک، ماشین دوار خود سنکرونی است که دارای روتور مغناطیس دائم بوده و از موقعیت‌های مشخصی از شفت دوار روتور، جهت کموتاسیون الکترونیکی استفاده می‌کند. این موتور

می‌تواند همراه با درایوهای الکترونیکی مربوطه به‌صورت مجتمع باشد یا این‌که موتور از درایو مربوطه جدا باشد.

KUSKO نیز همین موتور را به‌صورت زیر بیان می کند [7]:

یک موتور که دارای سیم‌پیچی استاتور بوده و یک روتور مغناطیس دائم برجسته از جنس آهن نرم دارد. سیم پیچی‌های استاتور از یک منبع تغذیه اولیه DC و توسط یک ماتریس از سوئیچ‌های حالت جامد تغذیه گشته و عمل کنترل با استفاده از سنسورهای موقعیت و با منطقی مشخص انجام می‌شود. در غیاب یک رگولاتور، سرعت موتور متناسب با سرعت قطع و وصل ولتاژ DC اولیه به فازهای مختلف موتور است.

موتور BLDC اساساً دارای یک ساختار مشابه یک مغناطیس دائم دوار همراه با یک مجموعه از هادی‌های حامل جریان است. در موتورهای DC و BLDC، برای ثابت ماندن جهت گشتاور ، جهت جریان در هادی‌ها باید در زمانی که پلاریته قطب مغناطیسی روبروی آن تغییر می‌کند، معکوس شود. در یک موتور کموتاتوردار DC، معکوس شدن پلاریته با کموتاتور و جاروبک‌ها انجام می‌شود. در یک موتورBLDC، معکوس شدن پلاریته با کلیدزنی ادوات الکترونیک قدرت انجام می‌گردد. کموتاسیون در هر دو نوع ماشین، شبیه به هم بوده و سنکرون با وضعیت روتور است، لذا معادلات دینامیکی مربوطه و مشخصه‌های سرعت - گشتاور آن‌ها یکسان است [8]، [9].

1-3-1 مزایا و معایب موتور BLDC

موتورهای BLDC مغناطیس دائم در صنایع اتومبیل سازی، هوافضا، رباتیک، مصارف خانگی، کاربردهای صنعتی، نظامی و ... مورد استفاده قرار می‌گیرند و شامل مزایای ذیل هستند [10]، [11]:

- **نویز پائین**: به دلیل عدم نیاز به جاروبک مکانیکی یا حلقه‌های لغزان درموتورهای مغناطیس دائم BLDC، تمام نویزهای مکانیکی به استثنای نویزهای مربوط به بلبرینگ‌ها، کوپلینگ‌ها و بار حذف می‌شوند.

- **بهره بالا**: موتورهای BLDC در بین موتورهای موجود بالاترین بهره را دارند. بهره بالای موتورهای BLDC به دلیل وجود میدان مغناطیس دائم موتور و بدون نیاز به مصرف توان الکتریکی برای تحریک است. خصوصیت مهم دیگر مغناطیس دائم، طول عمر آن‌ها است که تحت شرایط کاری مناسب، ضریب مغناطیس زدایی پائینی دارند.

- **کاهش ملزومات تحریک**: همان‌طور که اشاره گردید مغناطیس‌های دائم یک میدان مغناطیسی ثابت ایجاد می‌کنند که بهره را با حذف نیاز به ایجاد یک میدان تحریک الکترومغناطیسی، افزایش می‌دهند.

- **نگهداری کم و طول عمر بیشتر**: چون هیچ جاروبک مکانیکی در ساختار کموتاسیون این موتور وجود ندارد، طول عمر موتور بستگی به طول عمر عایقی بلبرینگ‌ها و عمر مغناطیس دائم آن‌ها دارد.

- **سهولت کنترل**: در موتورBLDC، گشتاور خروجی به‌صورت مستقیم با جریان موتور متناسب است که در نتیجه عمل کنترل به راحتی انجام می‌گردد. لذا بسیاری از سازندگان نیمه هادی‌ها برای

موتورهای BLDC، ادوات نیمه هادی قدرت با مدارات درایو گیت را به‌صورت مجتمع و در بسته‌های 6 تایی طراحی می‌کنند تا نیازهای اینورتر درایو موتور را برآورده سازند، لذا قیمت کلی سیستم و هزینه درایو کاهش می‌یابد.

- **ساختارمجتمع و متراکم**: کاربردهای هوافضا و اتومبیل سازی، نیاز به تجهیزات با وزن وحجم هر چه کوچک‌تر دارند تا بهره سوخت مصرفی را افزایش و از آنجا نیاز به انرژی را کاهش دهند. به‌منظور افزایش دانسیته انرژی ماشین، مواد مغناطیسی با دانسیته بالا نظیر ساماریوم- کبالت و نئودیمیم – آهن – بور (Nd Fe B) در طراحی موتور BLDC به‌کار گرفته می‌شود.

با وجود مزایای ذکر شده، این موتورها دارای معایب ذاتی هستند که عبارتند از:

- **قیمت بالای مواد مغناطیسی**: قیمت بالای مواد مغناطیس دائم با دانسیته انرژی بالا، مانع از استفاده از آن‌ها در کاربردهایی که قیمت و هزینه استفاده از این مواد بیش‌تر از ایجاد مزایای مذکور می‌گردد، می‌شود. به عنوان مثال سرامیک‌ها، کم‌ترین قیمت را دارند و از طرفی دارای کم‌ترین دانسیته انرژی نیز می‌باشند. مغناطیس دائم از نوع (Nd Fe B) دانسیته انرژی بالاتری نسبت به سرامیک دارد، ولی قیمت آن در حدود سه برابر قیمت سرامیک است. مگنت ساماریوم- کبالت، دانسیته انرژی قابل ملاحظه‌ی نسبت به مگنت (Nd Fe B) دارد ولی قیمت آن تقریباً شش برابر سرامیک است.

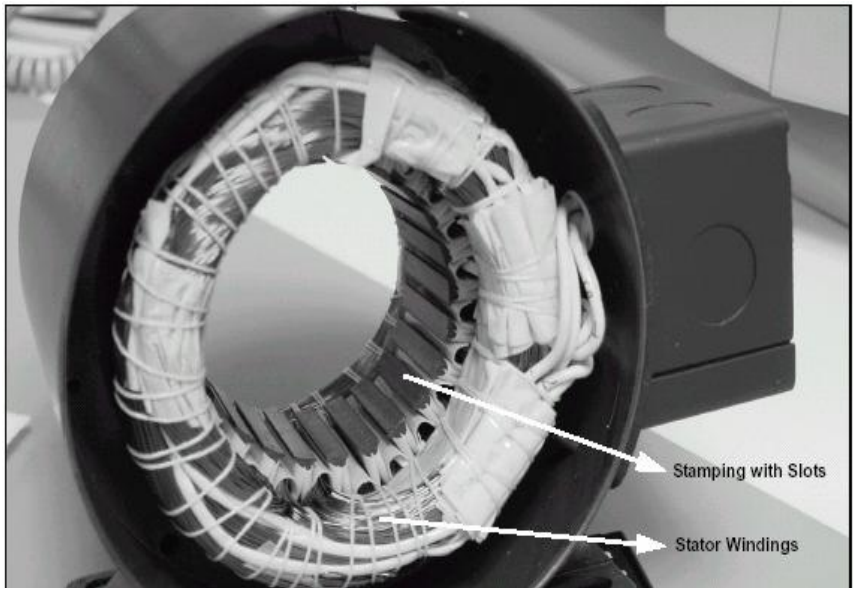
- **احتمال مغناطیس زدایی**: در استفاده از مواد مغناطیس دائم باید از مقادیر بالای نیروهای مغناطیس زدا و با درجه حرارت‌های بالا که می‌توانند اثر مغناطیسی مگنت را از بین ببرند، اجتناب شود.

علاوه بر موارد فوق می‌توان به خطرات ناشی از وقوع خطاهای اتصال کوتاه در مبدل برای سیم‌بندی‌های استاتور، ناحیه توان ثابت محدود و عملکرد ضعیف در سرعت‌های بالا نیز اشاره نمود.

1-4 ساختمان موتور BLDC

موتورهای BLDC یک نوع خاص از موتورهای سنکرون است، که میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط استاتور و میدان مغناطیسی ایجاد شده توسط روتور با سرعت‌های یکسان دوران می‌کنند. موتورهای BLDC درساختارهای تک فاز، دو فاز، سه فاز، پنج فاز و بیش از پنج فاز طراحی شده‌اند. متناظر با هر یک از انواع مذکور، استاتور نیز به همان تعداد دارای سیم‌پیچ است. از بین انواع این موتورها نوع سه فاز فراگیر بوده بیش‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در ادامه اجزای اساسی تشکیل‌دهنده یک موتور BLDC شرح داده می‌شود.

1-4-1 استاتور



شکل 1-1: استاتور یک موتور BLDC

استاتور موتور BLDC شبیه به استاتور موتور القایی است اما الگوی سیم‌بندی متفاوتی دارد. شکل 1-1 استاتور یک موتور BLDC را نمایش می‌دهد. اغلب موتورهای BLDC دارای سه سیم‌پیچ استاتور هستند که به‌صورت ستاره به یکدیگر متصل شده‌اند. دو نوع آرایش سیم‌بندی برای استاتور وجود دارد که در نیتجه آن موتورهای BLDC ذوزنقه‌ای و موتورهای BLDC سینوسی مطرح می‌شوند. این تفاوت از نحوه اتصال کویل‌های استاتور ظاهر می‌گردد که در نتیجه دو نوع مختلف ولتاژ ضد محرکه الکترومغناطیسی (Back-EMF) پدید می‌آید.

موتور BLDC با تغذیه ولتاژ سینوسی (BLAC)

در نوع تغذیه سینوسی که در واقع همان موتور سنکرون مغناطیس دائم (PMSM) است برای ایجاد شار سینوسی علاوه بر این‌که توزیع سیم‌پیچی فازهای استاتور سینوسی است، ولتاژ سینوسی نیز به فازها اعمال می‌گردد. به‌منظور درایو صحیح موتورهای سنکرون مغناطیس دائم دانستن موقعیت