دانشگاه مازندران

طراحی و ساخت یک موتور دورانی بدون جاروبک با سرعت پائین

جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد
رشته مهندسی مکانیک- گرایش ساخت تولید

استاد راهنما:
دکتر محسن شاکری

استاد مشاور:
مهندس شعبانعلی گل

نگارش:
امین کلاه‌دوز

1388

بسم الله الرحمن الرحیم

تقدیم به

پدر و مادر

مهربانم

قدردانی

خدای را سپاس، که شعله شوق علم در قلب من برافروخت و طریق تحصیل دانش به من بنمود و دری از بوستان علم برویم بگشود. منت خدای تعالی را که توفیق و عنایت فرمود تا تهیه و تنظیم این مختصر را به عنوان پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، ساخت و تولید به اتمام برسانم.

این موفقیت را بیش از هرچیز وامدار دو محور استوار زندگی، پدر و مادر گرانقدر می‌باشم. آنان که با شکیبایی و بردباری، لحظه‌ایی از پشتیبانی‌ام غافل نبوده و با گذشت و فداکاری در ناهمواریهای زندگی، راه دانش‌آموزی را بر من هموار نمودند.

وظیفه خود می‌دانم از همه اساتید بزرگوار دانشکده مهندسی مکانیک، بویژه استاد گرانقدر جناب آقای دکتر شاکری قدردانی نموده، راهنمایی‌های ارزنده و تشویق‌های پیوسته ایشان را سپاس گویم. در اینجا بر خود لازم می‌دانم که از زحمات و راهنمایی‌های بسیار ارزنده اساتید محترم، آقای مهندس گل و آقای مهندس جباری تشکر بنمایم.

از خداوند سبحان، سلامتی و موفقیت روزافزون این عزیزان، در راه خدمت به جامعه علمی ایران را خواهانم.

چکیده

در سال 1831 میلادی پس از کشف پدیده اندوکسیون الکترومغناطیسی، اولین وساده‌ترین ماشین الکتریکی ساخته شد. موتورهای الکتریکی برای تغذیه و راه‌اندازی بسیاری از وسایلی که در زندگی روزمره استفاده می‌شود، بکار می‌روند. از جمله انواع درایو دیسک در رایانه، ماشین‌های لباسشویی، آسانسورها، صنایع نورد فولاد و آلومینیوم (در بخش غلطک‌ها). برای کاربردهای سرعت پائین، استفاده از موتورهای آهن‌ربای دائم نیاز به جعبه-دنده را که در ماشین‌های القائی استاندارد غیرقابل اجتناب است، حذف می‌کند. جعبه‌دنده‌ها به مرور زمان دچار فرسایش و شکستگی شده و تعمیر آن‌ها هزینه به کاربران تحمیل می‌کند. همچنین در حین کار، علاوه بر ایجاد نویز صوتی، بخشی از توان مکانیکی موتور را نیز تلف می‌کنند. در کاربردهای خاص که منابع انرژی محدود و زمان عملیات دارای اهمیت بالائی است، استفاده از موتورهائی با راندمان بالا و نیاز کمتر به تعمیر و نگهداری، کاربرد بیشتری را خواهند داشت.

در این پایان‌نامه به بررسی طراحی و ساخت یک نمونه موتور جریان مستقیم آهن‌ربای دائم بدون جاروبک با توان 300 وات و سرعت 220 دور بر دقیقه پرداخته شده‌است. این پایان‌نامه، ابتدا در مورد انواع مختلف پیکربندی‌های موجود برای این نوع کاربرد و مواد قابل استفاده برای اجزاء مختلف موتور بحث شده و با توجه به امکانات در دسترس نوع موتور و جنس‌های مختلف برای هر بخش از آن با ذکر دلیل، انتخاب شده‌است. بخش دوم این پایان‌نامه به بررسی نحوه طراحی این‌گونه موتورها می‌پردازد. در این بخش ابتدا روابط و معادلات حاکم برای بخش‌های مختلف موتور از قبیل آهن‌رباها، تعداد فازها، شیارها و قطب‌ها، نحوه بارگذاری الکتریکی، پارامترهای هندسی، تلفات، راندمان و غیره مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و در انتها با ارائه روشی کلی، محاسبات مربوطه برای طراحی موتور مورد نظر صورت پذیرفته‌است. بخش سوم، آنالیز حرارتی و الکترومغناطیسی موتور را مورد بررسی قرار می‌دهد و با توجه به نتایج بدست آمده از آنالیزهای صورت گرفته، نحوه عملکرد موتور بررسی شده و طراحی موتور مورد بازبینی قرار گرفته‌است. بخش بعدی پایان‌نامه در مورد روش راه‌اندازی و نحوه کنترل سرعت موتور بحث می‌کند. در این بخش موتور به صورت مدلی ریاضی شبیه‌سازی شده با توجه به نوع کاربرد، سیستم کنترلی برای آن تعریف شده‌است. بخش انتهایی پایان‌نامه، ساخت اجزاء موتور و درایو را مورد بررسی قرار داده و نتایج آزمایشات عملی را با نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌ها مقایسه کرده‌است. در این بخش به

بررسی قسمت‌های مختلف موتور پرداخته شده و نحوه ساخت آن قسمت‌ها به همراه فرایندهایی که برای به دست آوردن آن قطعه صورت پذیرفته از جمله تهیه قالب برای ایجاد شیارهای استاتور توضیح داده می‌شود.

مقادیر بدست آمده برای مقاومت و اندوکتانس، نشان دهنده ساخت و مونتاژ مناسب موتور می‌باشد. مقدار راندمان و توان موتور در سرعت مبنا برای موتور نمونه با حل شبیه‌سازی و حل تحلیلی دارای تطابق مناسبی می-باشد، همچنین گشتاور نسبت به جریان برای موتور نمونه به صورت خطی تغییر کرده که عملکرد صحیح موتور را نشان می‌دهند.

واژگان کلیدی: موتور جریان مستقیم بدون جاروبک، طراحی، آنالیز المان محدود، آنالیز حرارتی، شبیه‌سازی سیستم کنترل، ساخت موتور نمونه، آزمایشات عملی

فهرست مطالب

قدردانی ... ...

چکیده ... I

فهرست مطالب ... III

فهرست شکل‌ها ... VII

فهرست جداول ... X

فصل اول: آشنایی با موتورهای سنکرون ... ۱

1-1- مقدمه ... ۲

2-1- ماشین‌های سنکرون آهن‌ربای دائمی ... ۲

3-1- کاربردهای ماشین‌های سنکرون آهن‌ربای دائمی ... ۲

4-1- ماشین‌های سنکرون آهن‌ربای دائمی برای محرک‌های مستقیم سرعت پائین ... ۳

1-4-1- ماشین‌ها با شار شعاعی ... 3

الف) ماشین‌ها با آهن‌ربای نصب شده بر روی سطح با روتور داخلی ... 3

ب) ماشین‌ها با آهن‌ربای نصب شده بر روی سطح با روتورخارجی ... 3

ج) ماشین‌ها با آهن‌رباهای دائمی الحاقی ... 4

د) ماشین‌ها با آهن‌رباهای دائمی مدفون ... 5

- آهن‌رباهای دائمی V شکل ... 5

- آهن‌رباهای دائمی مغناطیس شده بطور مماسی ... 6

2-4-1- ماشین‌های شار محوری ... 6

3-4-1- ماشین‌های شار متقاطع ... 8

4-4-1- ماشین‌های شروع خطی، مدولار و القائی ... 8

الف) ماشین‌های آهن‌ربای دائمی شروع خطی ... 8

ب) ماشین‌های آهن‌ربای دائمی مدولار برای عملیات سرعت متغیر ... 9

ج) ماشین‌های آهن‌ربای دائمی القائی ... 10

5-1- مواد مورد نیاز در موتورها ... ۱۱

1-5-1- مواد مغناطیسی نرم ... 11

الف) تلفات آهن ... 11

ب) انتخاب مواد هسته ... 13

2-5-1- مواد هادی ... 14

3-5-1- مواد عایق ... 15

4-5-1- مواد آهن‌ربای دائم ... 16

فصل دوم: طراحی موتور ... 19

2-1- مقدمه ... ۲۰

2-1-1- مزایا نسبت به سایر موتورها 20
2-1-2- معایب نسبت به سایر موتورها 21
2-2- معادلات خروجی ۲۱
2-2-1- معادله خروجی ماشین‌های DC 21
2-3- طراحی آهن‌ربا ۲۲
2-4- طراحی ماشین ۲۳
2-4-1- تعداد فازها، قطب‌ها و دندانه‌ها 24
الف) تعداد فازها 25
ب) تعداد قطب‌ها 25
ج) تعداد دندانه‌ها 26
2-4-2- بارگذاری الکتریکی 27
2-4-3- طول و قطر آرمیچر 28
2-4-4- طول فاصله هوایی 28
2-4-5- سیم‌بندی آرمیچر 29
الف) اندوکتانس فاصله هوایی (L_{Lg}) 30
ب) اندوکتانس نشتی شیار (L_s) 30
ج) اندوکتانس سیم‌پیچ انتهائی (L_e) 31
2-4-6- شیارهای آرمیچر 31
2-4-7- ابعاد یوغ و قطب 31
2-4-8- پارامترهای هندسی 32
2-4-9- محاسبه اینرسی روتور 34
الف) اینرسی شفت 34
ب) اینرسی هاب 34
ج) اینرسی آهن‌رباها 34
2-4-10- تلفات و راندمان 35
الف) تلفات مسی (P_{cu}) 35
ب) تلفات هسته (P_{core}) 35
ج) تلفات بادخوری و اصطکاک یاتاقان (P_s) 36
2-4-11- نتیجه‌گیری و روش کلی تحلیل 36
2-5- محاسبه تحلیلی موتوری خاص ۳۷
2-5-1- محاسبه تلفات 42
الف) تلفات مسی 42
ب) تلفات هسته 42
فصل سوم: آنالیز المان محدود 44
3-1- مقدمه ٤٥
3-2- آنالیز حرارتی ٤٦
3-2-1- طراحی 49

3-2-2- قسمت Input 50
3-2-3- قسمت Post-Processing 50
الف) بخش Schematic 50
ب) بخش Output Data 51
ج) بخش Transient Graph 51
3-3- آنالیز میدان الکترومغناطیسی و گذرای موتور ٥٤
3-3-1- تعیین مدل موتور 54
3-3-2- انتخاب مواد 54
3-3-3- تعیین شرایط مرزی 54
3-3-4- بدست آوردن منحنی‌ها 54
3-3-5- پیدا کردن نتایج 55
3-3-6- نتایج شبیه‌سازی و منحنی‌های بدست آمده 56
فصل چهارم: شبیه‌سازی سیستم کنترل 62
4-1- مقدمه ٦٣
4-2- مدل سیستم درایو آهن‌ربای دائمی ٦٣
4-2-1- جزئیات مدل موتور 64
4-2-2- معادلات انتقال پارک و مدل دینامیکی $d-q$ 65
4-2-3- مدار موتور 66
4-3- روش کنترل موتور ٦٦
4-4- نتایج شبیه‌سازی ٧٢
فصل پنجم: ساخت موتور و درایو وآزمایشات عملی 74
5-1- مقدمه ٧٥
5-2- قسمت‌های اصلی موتور ٧٥
5-2-1- بدنه 75
5-2-2- آهن‌رباهای دائمی 76
5-2-3- یاتاقان‌ها 76
5-2-4- استاتور 77
الف) هسته 77
ب) سیم پیچ 79
ج) سنسور اثر هال 79
د) سنسور دما 81
5-2-5- درب‌ها 82
5-2-6- روتور 83
5-2-7- موتور مونتاژ شده 84
5-3- ساختار راه انداز بدون حسگر موتور BLDC و بخش‌های مختلف درایور ٨٥
5-3-1- برنامه‌ریز 87
5-3-2- بخش مقایسه‌گر 87

5-3-3- فیلترسازی 88
5-3-4- منابع تغذیه 88
5-3-5- بخش Power Stage 88
5-4- نتایج تست آزمایشگاهی موتور ۸۹
5-4-1- مقادیر اندازه‌گیری‌شده 90
الف) اندازه‌گیری اندوکتانس و مقاومت 90
ب) اندازهگیری BEMF 90
ج) اندازه‌گیری گشتاور و جریان 92
د) دیگر نتایج 93
فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات 94
6-1- نتیجه‌گیری ۹۵
6-2- پیشنهادات ۹۶
منابع و مراجع 97
فهرست علائم 101
پیوست‌ها 103
ABSTRACT 117

فهرست شکل‌ها

فصل اول

شکل(1-1): توربین‌های بادی از صنایع "JEUMONT"، محرک قایق و آسانسور "KONE" بدون اتاق ماشین 2
شکل(1-2): ماشین RFPM 3
شکل(1-3): ماشین ISMPM 4
شکل(1-4): ماشین OSMPM 4
شکل(1-5): ماشین IPM 5
شکل(1-6): ماشین VBPM 6
شکل(1-7): ماشین TBPM 6
شکل(1-8): ماشین AFPM 7
شکل(1-9): ماشین TORUS 7
شکل(1-10): ماشین TFM 8
شکل(1-11): ماشین LSPM 9
شکل(1-12): ماشین LSPM 10
شکل(1-13): ماشین آهن‌ربای دائمی القائی 10
شکل(1-14): تضاد و ناسازگاری بین ملزومات مورد نیاز برای داشتن همزمان تلفات کم و نفوذپذیری زیاد در آهن سیلیکون‌دار 13
شکل(1-15): جدول عناصر بر اساس خاصیت مغناطیسی 16
شکل(1-16): حلقه هیسترزیس آهن‌ربای دائم 17
شکل(1-17): خواص مغناطیسی مواد آهن‌ربا 18

فصل دوم

شکل (2-1): چگالی شار فرضی و واقعی قطب 23
شکل (2-2): چگالی شار فاصله هوائی برای موتورهای DC کوچک 24
شکل (2-3): اثر افزایش تعداد قطب‌ها 26
شکل (2-4): بارگذاری الکتریکی ویژه برای موتورهای DC کوچک 27
شکل (2-5): تاثیر افزایش بارگذاری الکتریکی 28
شکل (2-6): نحوه محاسبه طول و قطر آرمیچر 28
شکل(2-7): پیکربندی موتور و ابعاد شیار و دندانه و یوغ 33
شکل(2-8): مساحت مس مناسب در شیار استاتور 34
شکل(2-9): شافت موتور روتور داخلی 34
شکل (2-10): ورقه آرمیچر و جزئیات مربوط 39

فصل سوم

شکل(3-1): انواع تلفات 46
شکل(3-2): رابطه تلفات با عمر ماشین 47
شکل(3-3): (الف) کارکرد پیوسته (ب) کارکرد کوتاه مدت (ج) کارکرد دوره‌ای 48
شکل(3-4): مقطع شعاعی موتور 49
شکل(3-5): مقطع محوری موتور 49
شکل(3-6): مدل سیم‌پیچی برای نمونه موتور 50
شکل(3-7): ویرایش‌گر چرخه‌کار در نرم‌افزار MOTOR-CAD 51
شکل(3-8): خروجی نرم افزار در بخش SCHMATIC 52
شکل(3-9): نتایج عددی برای عملیات S1 52
شکل(3-10): نتایج عددی برای عملیات S2 53
شکل(3-11): نتایج عددی برای عملیات S2 53
شکل(3-12): صفحات آهنی دو-بعدی از موتور طراحی‌شده 54
شکل(3-13): محصول مش‌بندی 55
شکل(3-14): شدت میدان مغناطیسی موتور طراحی شده 56
شکل(3-15): منحنی B/H ورقه‌های M19 56
شکل(3-16): منحنی B/H آهن‌رباها 57
شکل(3-17): توزیع خطوط میدان مغناطیسی موتور 57
شکل(3-18): منحنی شدت میدان فاصله‌هوایی 58
شکل(3-19): نمودار سرعت-جریان ورودی 58
شکل(3-20): نمودار سرعت-توان خروجی 59
شکل(3-21): نمودار سرعت-راندمان 59
شکل(3-22): نمودار سرعت-گشتاور 60
شکل(3-23): نمودار زمان-گشتاور 60
شکل(3-24): نمودار زمان-نیروی الکترومغناطیسی برگشتی 61
شکل(3-25): نمودار زمان-سرعت 61

فصل چهارم

شکل(4-1): محورهای موتور 64
شکل(4-2): جریان و EMF فاز A 66
شکل(4-3): مدار معادل موتور بدون سیم‌پیچ‌های دمپر 67
شکل(4-4): شماتیکی از سیستم درایو 67
شکل(4-5): گشتاور الکتریکی در برابر سرعت 68
شکل(4-6): فلوچارت کنترل موتور 70
شکل(4-8): بلوک تبدیل ODQ به ABC 71
شکل(4-9): بلوک اینورتر 72

شکل(4-10): گشتاور الکتریکی در شبیه‌سازی 73
شکل(4-11): جریان‌های سه فاز در شبیه‌سازی 73
شکل(4-12): سرعت مکانیکی در شبیه‌سازی 73

فصل پنجم

شکل(5-1): بدنه 75
شکل(5-2): یاتاقان‌ها 77
شکل(5-3): قالب ساخته شده برای تولید شیارها 78
شکل(5-4): نحوه قرارگیری ورقه‌ها 78
شکل(5-5): روش سیم‌پیچی 79
شکل(5-6): سنسور اثر هال 80
شکل(5-7): سنسور و مدار کنترل آن 81
شکل(5-8): استاتور 82
شکل(5-9): درب و روتور 83
شکل(5-10): شافت و استیفنر 83
شکل(5-11): موتور 84
شکل(5-12): فیکسچر ساخته شده برای نصب موتور 84
شکل(5-13): نمونه موتور نصب‌شده بر روی دستگاه تست 85
شکل(5-14): بلوک دیاگرام سامانه راه انداز موتور BLDC 86
شکل(5-15): کنترل‌کننده 87
شکل(5-16): برنامه‌ریز 87
شکل(5-17): بخش مقایسه‌گر 88
شکل(5-18): بخش فیلتراسیون 88
شکل(5-19): منابع تغذیه 89
شکل(5-20): بخش POWER STAGE 89
شکل(5-21): شکل موج BEMF 91
شکل(5-22): سیگنال کلیدزنی 91
شکل(5-23): نمودار ولتاژ بر حسب سرعت 92
شکل(5-24): نمودار گشتاور بر حسب جریان 92

فهرست جداول

فصل دوم

جدول(2-2): مواد مصرفی 38
جدول(2-3): نتایج تحلیل 43

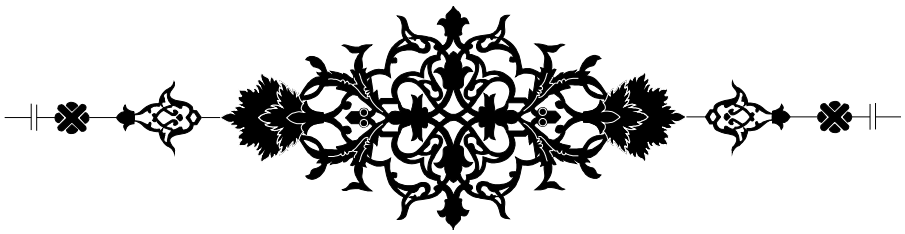
فصل سوم

جدول(3-1): نوع مواد انتخابی 55

فصل پنجم

جدول(5-1): مقادیر مشخصه صفحه اصلی موتور 75
جدول(5-2): مقادیر مشخصات آهن‌ربا 76
جدول(5-3): مشخصات یاتاقان‌های استفاده شده 77
جدول(5-4): مشخصات هسته موتور خطی 78
جدول(5-5): الگوی سیم‌پیچی 80
جدول(5-7): مشخصات درب 83
جدول(5-8): مقایسه ثابت‌های موتور 92
جدول(5-9): نتایج تست موتور 93

فصل اول



آشنایی با موتورهای سنکرون

1-1- مقدمه

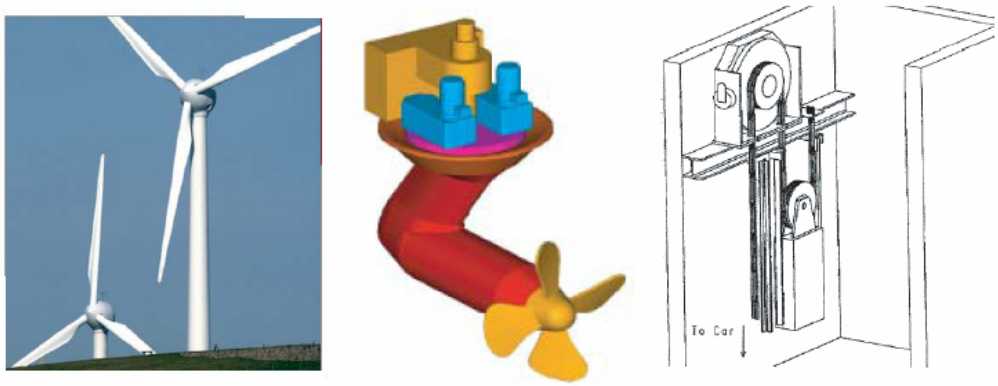
در این فصل ابتدا با ماشین‌های سنکرون آهن‌ربای دائم، انواع و کاربردهای آن‌ها آشنا شده و در ادامه نوع مواد مورد استفاده با ذکر دلیل انتخاب آن ماده تشریح شده‌است.

1-2- ماشین‌های سنکرون آهن‌ربای دائمی

موتورهای الکتریکی حدود 65 درصد مصرف انرژی جهانی را در حال حاضر به خود اختصاص داده‌اند. به علت نگرانی‌ها زیست محیطی، محرک‌های الکتریکی باید از راندمان بالائی برخوردار باشند. در سال‌های اخیر ماشین‌های سنکرون، به دلیل ارزانی مواد آهن‌ربای دائمی، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. در اینگونه ماشین‌ها روتور به سیم‌پیچ نیاز نداشته، در نتیجه تلفات مسی آنها کمتر بوده و راندمان بیشتری نسبت به موتور القائی دارد. یکی از مزایای ماشین‌های آهن‌ربای دائم با سرعت پائین، حذف جعبه‌دنده است. در این موارد محور روتور به طور مستقیم به بار خارجی وصل می‌شود.

1-3- کاربردهای ماشین‌های سنکرون آهن‌ربای دائمی

امروزه، این نوع ماشین‌ها بطور گسترده در توربین‌های بادی و قایق‌ها (شکل1-1) مورد استفاده قرار می‌گیرند[2-1]. استفاده از این نوع ماشین‌ها در توربین‌های بادی، باعث تقلیل اغتشاشات صوتی و کاهش نشتی روغن می‌گردد.



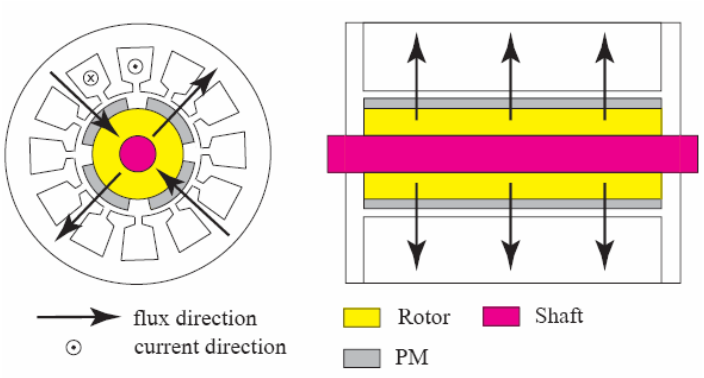
شکل(1-1): توربین‌های بادی از صنایع "Jeumont"، محرک قایق و آسانسور "Kone" بدون اتاق ماشین [2-1]

1-4- ماشین‌های سنکرون آهن‌ربای دائمی برای محرک‌های مستقیم سرعت پائین

در این بخش، انواع ماشین‌های آهن‌ربای دائمی که در سرعت‌های پائین کاربرد دارند شرح داده شده‌است و در ادامه مزایا و معایب هر یک مورد بررسی قرار گرفته‌است.

1-4-1- ماشین‌ها با شار شعاعی[1]

شکل(1-2) دو نما از این نوع ماشین را همراه با جهت شار و جریان نشان می‌دهد. شار در ماشین به طور شعاعی است در حالی که جریان موثر در جهت محور روتور آن می‌باشد.



شکل(1-2): ماشین RFPM [3]

این ماشین‌ها، از لحاظ ساخت، ساده‌ترین و ارزانترین ماشین‌های آهن‌ربای دائمی بوده، که این امر استفاده آنها را در صنعت معمول‌تر کرده‌است. انواع این ماشین‌ها به شرح زیر می‌باشد:

الف) ماشین‌ها با آهن‌ربای نصب شده بر روی سطح با روتور داخلی[2]

همان‌طورکه در شکل(1-3) نشان داده شده است در این نوع ماشین‌ها، آهن‌رباهای دائمی روی سطح روتور قرار داده می‌شوند. مزیت اصلی این نوع ماشین‌ها سادگی و هزینه کم ساخت آن می‌باشد. عیب اصلی آن‌ها نیز نحوه توزیع آهن‌رباهای دائمی برای مغناطیس‌زدائی میدان‌ها می‌باشد. بعلاوه، آهن‌رباها در معرض نیروهای گریز از مرکز، که باعث جدا شدن آن‌ها از روتور می‌شود، قرار دارند[3-4].

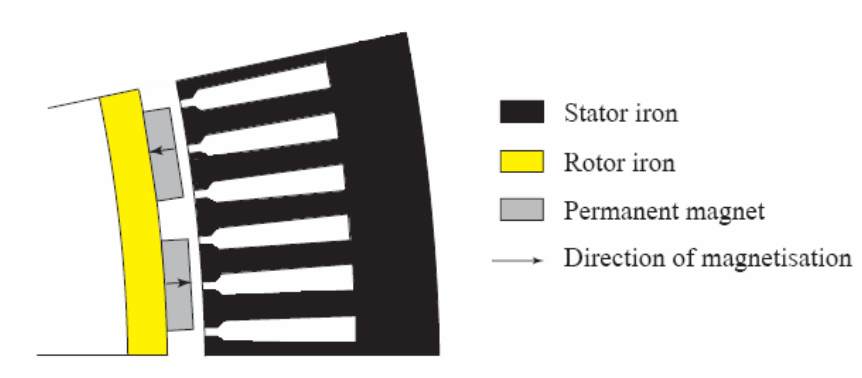
ب) ماشین‌ها با آهن‌ربای نصب شده بر روی سطح با روتورخارجی[3]

این نوع ماشین متشکل از یک استاتور سیم‌پیچی شده ثابت که در مرکز ماشین قرار گرفته است می‌باشد که در آن آهن‌رباها در طول محیط داخلی روتور ثابت شده‌اند (شکل1-4)[5-6].

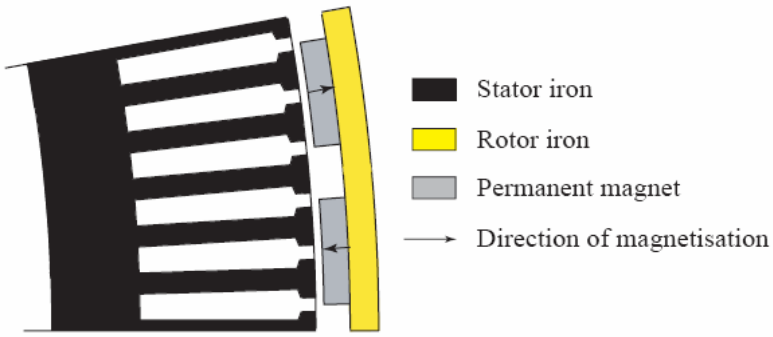
1- Radial Flux Permanent Magnet Motor (RFPM)
2- Surface-Mounted PM machines with inner rotor (ISMPM)
3- Surface-Mounted PM machines with outer rotor (OSMPM)

مزایای این پیکربندی عبارتند از:

- بزرگتر بودن قطر روتور و در نتیجه نصب تعداد بیشتر آهن‌رباها.
- عدم تاثیر نیروهای گریز از مرکز بر جدا شدن روی آهن‌رباها از سطح روتور.



شکل(1-3): ماشین ISMPM [4]

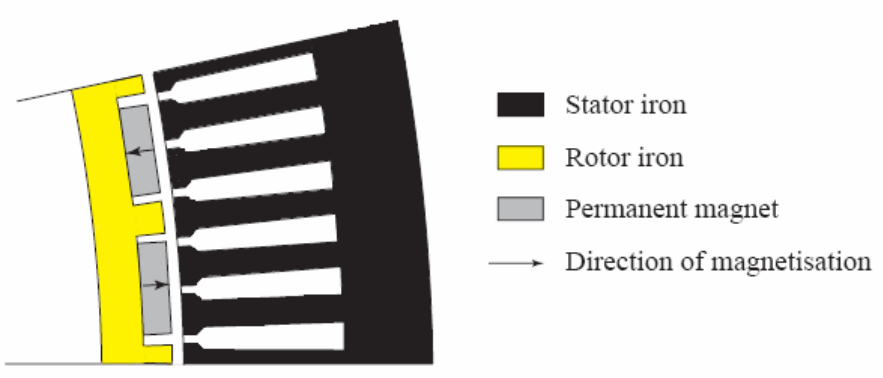


شکل(1-4): ماشین OSMPM [5]

ج) ماشین‌ها با آهن‌رباهای دائمی الحاقی[1]

تفاوت این نوع موتورها با ماشین‌های SMPM، در وجود آهن بین آهن‌رباهای دائمی می‌باشد. آهن موجود بین آهن‌رباها، باعث ایجاد یک گشتاور مقاوم علاوه بر گشتاور تولیدی توسط آهن‌ربا می‌شود. تاکنون این نوع ماشین‌ها در سرعت‌های دورانی پائین کاربرد نداشته‌اند. تاثیر گشتاور مقاوم روی نفوذپذیری[2] ماشین و مقایسه آن با طرح‌های ماشین‌های SMPM می‌تواند قابل توجه باشد.

1- Inset PM machines (IPM)
2- Permeability



شکل(1-5): ماشین IPM [6]

د) ماشین‌ها با آهن‌رباهای دائمی مدفون[1]

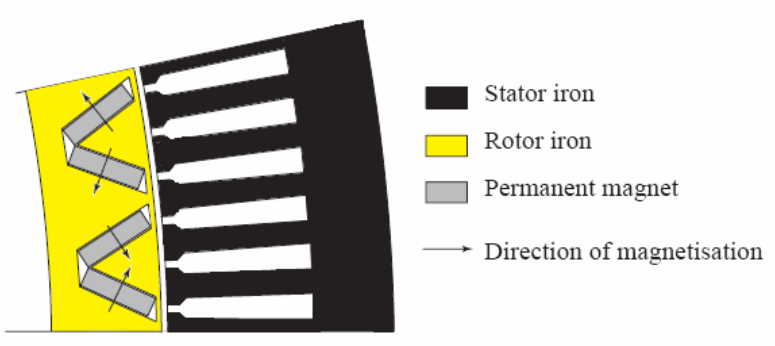
راه دیگری برای قرارگیری آهن‌رباهای دائمی در روتور قراردادن آن‌ها داخل پیکر روتور می‌باشد. مزیت این نوع ماشین‌ها در مقایسه با ماشین‌های آهن‌ربائی سطحی، امکان تمرکز شار تولید شده بوسیله آهنرباها در روتور است که باعث رسیدن به چگالی‌های شار بیشتری در فاصله هوائی می‌شود. به هر حال، آهن‌رباهای کاشته شده به خوبی در برابر نیروهای مکانیکی و مغناطیس‌زدائی محافظت می‌شوند. روش‌های مختلفی برای قرارگیری آهن‌رباها در روتور وجود دارد که در زیر دو شیوه آن توضیح داده شده‌است:

- آهن‌رباهای دائمی V شکل[2]

همان‌طورکه در شکل(1-6) نشان داده می‌شود، در این پیکربندی دو آهن‌ربا به ازاء هر قطب در یک زاویه مشخص به شکل V جایگذاری شده‌است.

از معایب اصلی این نوع موتورها کاهش چگالی شار مغناطیسی آهن‌ربا می‌باشد. علاوه بر این، روتور برای تعداد قطب‌های زیاد به آسانی قابل تعبیه و تنظیم نیست. تعداد جفت قطب‌های زیاد، فضای کوچک‌تری برای آهن‌رباها ایجاد کرده و زاویه کوچکتری بین دو آهن‌ربا را سبب می‌شود. یکی دیگر از معایب پیکربندی V شکل، ازدیاد تعداد آهن‌رباها است، که باعث افزایش هزینه ماشین می‌شود. ماشین‌هائی که در مرجع [7] مورد بررسی قرار گرفته‌اند نشان دهنده کاربرد این موتور(موتور سنکرون 45 Kw ، 600 rpm) در صنایع کاغذسازی می‌باشد.

1- Buried PM machines (BPM)
2- V-shaped permanent magnets (VBPM)

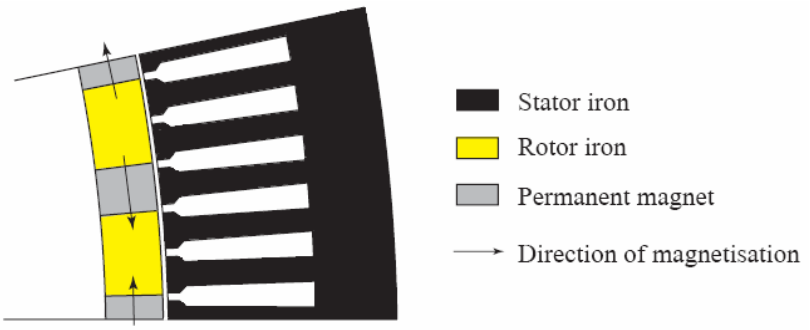


شکل(1-6): ماشین VBPM [7]

- آهن‌رباهای دائمی مغناطیس شده بطور مماسی[1]

در شکل(1-7) این نوع پیکربندی نشان داده شده‌است. روتور از قطعات مغناطیس و غیرمغناطیس شامل شده که بر روی یک میله فرومغناطیس نصب شده، تشکیل یافته‌است. کاربرد میله فرومغناطیس، انتقال شار تولیدی توسط آهن‌رباها به محور موتور می‌باشد.

عیب این نوع موتورها استفاده از تعداد زیاد قطعات الحاقی است که اگر تعداد قطب‌ها زیاد باشد باید با مهارت خاصی جایگذاری گردند. این امر دشواری تولید این نوع از پیکربندی را سبب می‌شود. به هر حال، در مقایسه با حالت V شکل، به دلیل عدم وجود لبه‌های آهن، نشت شار مغناطیسی خیلی کمتر است. در مرجع [8] نمونه‌ای از کاربرد این موتورها ارائه شده‌است.



شکل(1-7): ماشین TBPM [8]

1-4-2- ماشین‌های شار محوری[2]

ماشین‌های آهن‌ربای دائمی شار محوری یکی دیگر از موتورها برای کاربردهای سرعت پائین هستند. این نوع ماشین‌ها در مقایسه با ماشین‌های شار شعاعی قطر بزرگ‌تری و بطور نسبی طول محوری کوتاه‌تری دارند. با

1- Tangentially-magnetized permanent magnets (TBPM)
2- Axial Flux Permanent Magnet Motor (AFPM)