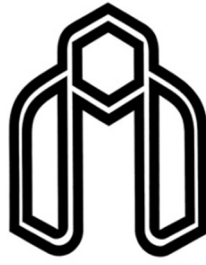


صلى الله عليه وسلم



دانشگاه شاهرود

دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه قدرت

عنوان:

طراحی، مدل‌سازی و بررسی عملکرد موتور چند فاز شار محوری ترکیبی  
مغناطیس دائم و پسماند

دانشجو:

محمدهادی ابراهیمی

استاد راهنما:

دکتر احمد دارابی

پایان‌نامه برای اخذ مدرک کارشناسی ارشد در رشته

مهندسی برق - گرایش قدرت

بهمن ۱۳۹۳

شماره : ۱۳۵۳ / آ.ت.ب  
تاریخ : ۹۳/۱۱/۲۷  
ویرایش : -----

بسمه تعالی



فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای :

محمد هادی ابراهیمی رشته : برق - قدرت گرایش : ماشینهای الکتریکی

تحت عنوان : مدلسازی و بررسی عملکرد موتور چند فاز شارمحوری ترکیبی مغناطیس دائم و پسماند

که در تاریخ ۹۳/۱۱/۲۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است :

قبول (با درجه : بسیار خوب امتیاز ۱۸/۵۶)  دفاع مجدد  مردود

۱- عالی (۲۰ - ۱۹) ✓ ۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۷/۹۹ - ۱۶) ۴- قابل قبول (۱۵/۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	رئیس	احمد رارابانی	۱- استاد راهنما
	دانشیار	مهدي بانهاشمی	۲- استاد مشاور
	دانشیار	امیرحسین امین	۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی
	دانشیار	امیرحسین امین	۴- استاد ممتحن
	استادیار	امیرحسین امین	۵- استاد ممتحن

رئیس دانشکده :

## تقدیم به پدر و مادر عزیزم

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پر بار وجودشان بیسایم و از ریشه آنان شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم. آموزگارانی که برایم زندگی، بودن و انسانیت را معنا کردند؛ حال این برگ سبزی است تحفه درویش تقدیم آنان...  
به پاس تعبیر عظیم و انسانی‌شان از کلمه ایثار و از خود گذشتگی، به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودشان که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است، به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می‌گراید و به پاس محبت‌های بی‌دریغشان که هرگز فروکش نمی‌کند،

این مجموعه را به این عزیزان تقدیم می‌کنم.

## تشکر و قدردانی

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند. و سلام و درود بر محمد و خاندان پاک او، طاهران معصوم، هم آنان که وجودمان وامدار وجودشان است؛ و نفرین پیوسته بر دشمنان ایشان تا روز رستاخیز...

از استاد با کمالات و شایسته؛ جناب آقای دکتر احمد دارابی که در کمال سعه‌صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه بر من دریغ نمودند و زحمت راهنمایی این رساله را بر عهده گرفتند کمال تشکر و قدردانی را دارم.

در این مدت از هم‌نشینی دوستانی بهره‌مند شدم که کمک‌های بی‌حصرشان راهگشای بسیاری از مشکلات بود. با سپاس فراوان از آقایان دکتر بهنیافر، دکتر طحانیان، دکتر بقایی‌پور، دکتر میرزاحسینی، دکتر حسن‌نیا، مهندس عجم‌اکرامی، مهندس فاتح و مهندس نیکخو و دیگر دوستانی که مرا یاری نمودند.

## تعهد نامه

اینجانب **محمد هادی ابراهیمی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق - قدرت دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه **طراحی، مدل سازی و بررسی عملکرد موتور چند فاز شار محوری ترکیبی مغناطیس دائم و پسماند** تحت راهنمایی **دکتر احمد دارابی** متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده ( یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

### تاریخ

### امضای دانشجو

### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

## چکیده

موتور سنکرون آهنربای دائم<sup>1</sup> PM نوع تخت به دلیل مزایای برجسته‌ای که دارد، بسیار مورد توجه صنعت قرار گرفته است. از جمله این مزایای می‌توان به بازده بالا، چگالی توان بالا، عدم نیاز به جاروبک و ضریب توان بالا اشاره کرد. دو عیب اصلی این موتور عدم گشتاور راه‌اندازی در فرکانس خط و نوسانات در سرعت سنکرون می‌باشد. از طرف دیگر، موتورهای پسماند بر عکس موتورهای مغناطیس دائم دارای گشتاور یکنواخت از لحظه راه‌اندازی تا سنکرونیزم می‌باشند. همچنین، موتور پسماند نقطه سنکرونیزم مشخصی ندارد و این امر باعث بروز نوسانات فرکانس پایین حول سرعت سنکرون می‌شود.

در این پایان‌نامه قصد بر این است تا برای برطرف کردن معایب موتور سنکرون PM نوع تخت از ترکیب آن با موتور پسماند استفاده شود. موتور حاصل، موتور سنکرون پسماند آهنربای دائم (PMHS<sup>2</sup>) نامیده می‌شود. ساختار جدید ارائه شده در این پایان‌نامه برای این موتور ترکیبی، معایب ساختارهای پیشین را نداشته و دارای ویژگی‌های برتری نسبت به آن‌ها می‌باشد. مقایسه نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های موتور سنکرون PM با موتور PMHS صحت روش پیشنهادی و ساختار ارائه شده را تأیید می‌کند.

**کلمات کلیدی:** موتور سنکرون PM نوع تخت، موتور هیستریسیس، PMHS، مدل تحلیلی

---

<sup>1</sup>- Permanent Magnet

<sup>2</sup>- Permanent Magnet Hysteresis Synchronous

## فهرست

- ۱: ماشین پسماند و بررسی انواع ساختارهای آن ..... ۱
- ۱-۱: مقدمه ..... ۲
- ۲-۱: تاریخچه ..... ۳
- ۳-۱: انواع ساختار موتور پسماند ..... ۵
- ۱-۳-۱: موتور پسماند استوانه‌ای ..... ۶
- ۲-۳-۱: موتورهای پسماند استوانه‌ای معکوس ..... ۷
- ۳-۳-۱: موتور پسماند تخت ..... ۸
- ۴-۱: پدیده پسماند ..... ۱۰
- ۵-۱: تئوری عملکرد ماشین پسماند ..... ۱۱
- ۶-۱: حلقه‌های جزئی ..... ۱۵
- ۷-۱: روش‌های تقریب حلقه پسماند ..... ۱۶
- ۲: ماشین آهنربای دائم و بررسی انواع ساختارهای آن ..... ۱۹
- ۱-۲: مقدمه ..... ۲۰
- ۲-۲: تاریخچه ماشین آهنربای دائم ..... ۲۱
- ۳-۲: معرفی مواد مغناطیسی ..... ۲۱
- ۱-۳-۲: منحنی ضد مغناطیسی ..... ۲۴
- ۴-۲: انواع ساختار موتورهای سنکرون ..... ۲۵
- ۱-۴-۲: دسته‌بندی براساس مسیر شار ..... ۲۵
- ۲-۴-۲: دسته‌بندی براساس نوع روتور ..... ۲۹
- ۵-۲: موتورهای سنکرون بزرگ ..... ۳۱
- ۳: معرفی موتور سنکرون پسماند آهنربای دائم ..... ۳۳



۳۴	مقدمه.....	۱-۳
۳۷	تاریخچه و مطالعات انجام شده.....	۲-۳
۴۳	<b>طراحی، مدل سازی و بررسی عملکرد موتور پسماند آهنربای دائم</b> .....	<b>۴</b>
۴۴	مقدمه.....	۱-۴
۴۶	ساختار موتور PMHS نوع تخت پیشنهادی.....	۲-۴
۴۸	طراحی ماشین سنکرون پسماند آهنربای دائم PMHS.....	۳-۴
۵۰	طراحی موتور PM تک روتور.....	۴-۴
۵۰	پارامترهای طراحی.....	۱-۴-۴
۵۵	نتایج طراحی موتور PM.....	۲-۴-۴
۵۷	طراحی ماشین پسماند.....	۵-۴
۵۷	پارامترهای طراحی ورودی.....	۱-۵-۴
۵۸	فرضیات در نظر گرفته شده.....	۲-۵-۴
۶۱	مدل تحلیلی ماشین PMHS.....	۶-۴
۶۱	مدل تحلیلی موتور پسماند.....	۷-۴
۶۳	مدار معادل موتور آهنربای دائم PM.....	۸-۴
۶۶	نتایج شبیه سازی.....	۹-۴
۶۹	<b>نتیجه گیری و پیشنهادات</b> .....	<b>۵</b>
۷۰	نتیجه گیری.....	۱-۵
۷۱	پیشنهادات.....	۲-۵
۷۲	مراجع.....	

## فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: موتور پسماند شار محیطی..... ۷
- شکل ۲-۱: موتور پسماند شار شعاعی..... ۸
- شکل ۳-۱: موتور پسماند معکوس..... ۸
- شکل ۴-۱: موتور پسماند نوع تخت شار محیطی و نحوه شکل‌گیری قطب‌ها در آن..... ۱۰
- شکل ۵-۱: مکانیزم تولید گشتاور در موتور پسماند..... ۱۱
- شکل ۶-۱: مشخصه گشتاور موتور پسماند..... ۱۳
- شکل ۷-۱: منحنی پسماند با حلقه‌های جزئی [27]..... ۱۶
- شکل ۸-۱: روش تقریب متوازی‌الاضلاع [۷]..... ۱۷
- شکل ۱-۲: منحنی پسماند مواد مغناطیسی سخت و نرم [29]..... ۲۴
- شکل ۲-۲: حلقه پسماند و منحنی مغناطیسی [29]..... ۲۵
- شکل ۳-۲: نمودار طبقه‌بندی انواع توپولوژی‌های ماشین AFPM..... ۲۶
- شکل ۴-۲: (a) ماشین RFPM (b) ماشین AFPM [29]..... ۲۷
- شکل ۵-۲: ساختمان روتور توزیع‌شده: (a) متقارن (b) نامتقارن [28]..... ۳۱
- شکل ۱-۳: ساختار روتور موتور PMHS ارائه شده توسط پیرف..... ۳۷
- شکل ۲-۳: ساختار موتور PMHS ارائه شده توسط رحمان و همکارانش..... ۳۸
- شکل ۳-۳: ساختار موتور پسماند رلوکتانسی ارائه شده توسط رحمان و اوشیبا..... ۳۸
- شکل ۴-۳: ساختار موتور PMHS ارائه شده توسط رحمان..... ۳۹
- شکل ۱-۴: فرآیند مطالعاتی برای موتور PMHS..... ۴۳
- شکل ۲-۴: ساختار موتور PMHS نوع تخت پیشنهادی..... ۴۴
- شکل ۳-۴: مسیر شار در دیسکها..... ۴۵

- شکل ۴-۴: الگوریتم طراحی ماشین ..... ۴۷
- شکل ۴-۵: مشخصه‌های نفوذپذیری و زاویه تاخیر فاز هیستریزیس بر حسب شدت میدان فلز آلومینیوم\_ نیکل [41] ..... ۵۸
- شکل ۴-۶: مساحت حلقه‌ها بر حسب شدت میدان مغناطیسی ماده آلومینیوم\_ نیکل ..... ۵۸
- شکل ۴-۷: مدار معادل موتور پسماند بدون در نظر گرفتن تلفات اهمی و شار پراکندگی سیم‌پیچی استاتور ..... ۶۰
- شکل ۴-۸: مدار معادل موتور PM ..... ۶۱
- شکل ۴-۹: مدار معادل موتور PMHS ..... ۶۲
- شکل ۴-۱۰: بلوک دیاگرام روش پیشنهادی تحلیل ماشین PMHS ..... ۶۳
- شکل ۴-۱۱: بازده موتور PMHS در ضخامت‌های مختلف دیسک پسماند ..... ۶۴
- شکل ۴-۱۲: ضریب توان موتور PMHS در ضخامت‌های مختلف دیسک پسماند ..... ۶۵
- شکل ۴-۱۳: جریان موتور PMHS در ضخامت‌های مختلف دیسک پسماند ..... ۶۵
- شکل ۴-۱۴: نمودار حلقه‌های پسماند در بار کامل در ضخامت‌های مختلف ..... ۶۶
- شکل ۴-۱۵: مساحت حلقه در بار کامل در ضخامت‌های مختلف ..... ۶۶
- شکل ۴-۱۶: توان سهم دیسک پسماند در موتور ترکیبی PMHS ..... ۶۷
- شکل ۴-۱۷: سهم دیسک PM در موتور ترکیبی PMHS ..... ۶۷

## فهرست جداول

- جدول ۴-۱: نتایج طراحی موتور PM ..... ۵۴
- جدول ۴-۲: نتایج حاصل از شبیه‌سازی دو موتور PM و PMHS ..... ۶۸

## فهرست علائم و اختصارات

توان خروجی کل ماشین الکتریکی	$P_{out}$
بازده	$\eta$
مقدار ولتاژ نامی موثر ترمینال مربوط به هر فاز	$V_{ph-rms}$
مقدار back emf مربوط به هر فاز بر حسب پریونیت	$E_{pm}$
ولتاژ القا شده در سیم پیچی فاز a ناشی از آهنرباهای دائم	$e_a$
جریان هر فاز سیم پیچی آرمیچر	$i_a$
جریان مغناطیس کنندگی	$i_g$
جریان معادل دیسک پسماند	$i_h$
جریان مؤثر مربوط به هر فاز استاتور	$I_{rms}$
تعداد فازهای ماشین	$M$
دوره تناوب یک سیکل	$T$
ضریب نشست شار	$K_d$
ضریب پر شوندگی مس	$K_{cu}$
متوسط چگالی شار زیر هر قطب (بارگذاری مغناطیسی ویژه)	$B_{avg}$
ماکزیمم چگالی شار مجاز در هسته استاتور	$B_{cs}$
مقدار چگالی شار در هسته روتور	$B_{cr}$
چگالی شار پسماند آهنربا دائم	$B_r$
دامنه چگالی شار مغناطیسی فاصله هوایی	$B_g$
چگالی شار مغناطیسی در شعاع متوسط $R_{av}$ دیسک پسماند	$B_m$
تعداد جفت قطبهای ماشین	$P$
قطر داخلی	$D_i$
قطر خارجی	$D_o$
قطر متوسط	$D_g$
قطر هادیهای رشتهای	$D_{str}$
نسبت قطر داخلی به قطر خارجی	$\lambda$
شار گذرنده از فاصله هوایی	$\varphi_{gap}$
ضریب سیم پیچی	$K_w$
تعداد دور سیم پیچ سری در هر فاز	$N_{ph}$
فرکانس زاویه‌ای ولتاژ القایی در هر فاز	$\omega_e$

بارگذاری الکتریکی ویژه	$A$
طول محوری هسته استاتور	$L_{cs}$
ضخامت شعاعی سیم پیچی آرمیچر	$L_w$
طول محوری (ضخامت) آهنربای دائم	$L_{PM}$
طول محوری هسته روتور	$L_{cr}$
طول شعاعی آهنربا دائم	$L_i$
طول فاصله هوایی	$G$
چگالی جریان هادی های استاتور	$J_s$
مساحت سطح آهنربای دائم	$A_{PM}$
ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی آهنربای دائم	$\mu_{rPM}$
ضریب نفوذپذیری مغناطیسی هوا	$\mu_0$
فرکانس ولتاژ ترمینال	$f$
سطح مقطع مربوط به هر رشته هادی	$S_{str}$
شدت میدان مغناطیس زدا	$H_c$
نیروی محرکه مغناطیسی تولیدی توسط آهنربا دائم	$mmf_{pm}$
مقاومت مغناطیسی آهنربا دائم	$\mathfrak{R}_{pm}$
مقدار رلوکتانس مسیر شار فاصله هوایی	$\mathfrak{R}$
گشتاور بار	$T_l$
گشتاور پسماند	$T_h$
زاویه تأخیر پسماند	$\alpha_h$
سطح حلقه پسماند	$E_h$
حجم ماده پسماند روتور	$V_r$
فرکانس میدان روتور	$f_r$
تعداد مسیرهای موازی جریان	$a_p$
تعداد دور سیم پیچی بر قطب بر فاز	$Q$
سرعت سنکرون	$n_{syn}$
چگالی هادی های فاز $n$	$Z_{(n)}$
زاویه الکتریکی استاتور	$\phi$
زاویه الکتریکی شیار	$\gamma$
تعداد شیار بر قطب	$y_p$
کوتاهی گام کلاف	$y_z$
گام سیم پیچی بر حسب پریونیت	$A$

زاویه کوتاهی گام بر حسب رادیان الکتریکی	$\varepsilon$
نسبت قوس قطب مغناطیس دائم به گام قطب	$\alpha_i$
مقاومت مخصوص الکتریکی مس	$\rho_{cu}$
تعداد دور سیم پیچی سری	$N_s$
تلفات مسی استاتور	$P_{cu-loss}$
تلفات آهنی هسته استاتور	$P_{iron-loss}$
مقاومت اهمی سیم پیچی مربوط به هر فاز	$R_{ph}$
طول متوسط یک دور سیم پیچی پیچیده شده به دور هسته استاتور	$L_{lav}$
طول کل سیم پیچی مورد نیاز	$L_{winding}$
راکتانس سنکرون مربوط به هر فاز	$X_s$
ولتاژ ترمینال ماشین سنکرون	$V_t$
زاویه قدرت	$\delta$

## فصل اول

ماشین پسماند سنکرون و بررسی انواع

ساختارهای آن

## ۱-۱: مقدمه

موتور پسماند به عنوان یک موتور سنکرون خود راه انداز است که به علت مزایای ویژه آن به منظور کاربردهای خاص بیشتر از موتورهای دیگر مورد توجه قرار گرفته است. از جمله این مزایا می توان گشتاور ثابت در سرعت سنکرون، مشخصه های ایده آل مسطح سرعت- گشتاور، ضریب قدرت کم و بیش ثابت، سر و صدای کم و در نتیجه نویز کمتر نسبت به سایر موتورها، جریان راه اندازی در حدود ۱.۲ تا ۱.۵ در زمان جریان بار کامل است و همچنین ساختار روتور آن قوی و ساده است. با وجود مزایای فوق، موتور پسماند تجاری هنوز از محدودیت های مزمینی رنج می برد مانند، جریان مغناطیسی بالا با ضریب قدرت کم و بهره وری کم، با وجود تلفات پارازیتیک بالا است. به این ترتیب کاربردهای عمومی محدود به حوزه های موتورهای کوچک، برای کاربردهای ویژه که در آن بهره وری بسیار مهم نیست کاربرد دارد. با این حال، به طور گسترده ای در حال حاضر در موارد مختلف استفاده می شود، به عنوان چرخاننده تجهیزات ضبط، ژيروسکوپ، دستگاه های اندازه گیری زمان و به طور کلی در وسایلی که گشتاور و سرعت ثابت و عملکرد بی صدا ضروری می باشد [۱].

موتور پسماند ویژگی های ساختمانی ساده ای دارد، استاتور آن به صورت یک موتور القایی بوده و در یک سیم پیچی چند فاز متعادل در سطح آن توزیع شده است. روتور آن به صورت یکپارچه و بدون شیار است که باعث عملکرد بدون نویز ماشین می شود و یک رینگ پسماند از مواد مغناطیسی سطح بیرونی آن را فرا گرفته است.

موتور پسماند یک نوع موتور سنکرون می باشد که براساس پدیده پسماند کار می کند. رینگ پسماند که به عنوان روتور این نوع موتور بکار می رود از موادی مانند فولاد پرکربن، فولاد کبالت، آلیاژ P-6 و فولاد آلیاژی آلومینیوم نیکل ساخته می شود. بخشی از مشخصه مغناطیسی که در طراحی ماشین های نوع مغناطیس دائم اهمیت دارد، در ربع دوم صفحه B-H واقع است اما در موتورهای پسماند مشخصه پسماند در تمام ربع ها مهم می باشد. بدین ترتیب این نوع موتور از موتورهای نوع



مغناطیس دائم متمایز می‌گردد، هرچند مغناطیس دائم یک نقش اساسی را در موتورهای پسماند ایفاء می‌نماید. موتورهای پسماند اولیه فقط به عنوان یک دست آورد مهندسی مطرح بودند و کاربرد زیادی نداشتند، ولی با گسترش مواد مغناطیسی جدید و برداشته شدن محدودیت‌های تکنیکی، موتوری که قبلاً برای کاربردهای زمان‌سنجی با توان خروجی خیلی کم در حدود چند میلی‌وات مناسب بود در به‌کارگیری در سطوح توان خیلی بالاتر عملی شد. این پیشرفت‌ها، موتور را برای به‌کارگیری در خیلی از فرآیندهای صنعتی، جایی که سرعت سنکرون لازم می‌باشد آماده نمود. این موتورها اکنون به طور وسیع در وسایل کنترل و تجهیزات آکوستیک بکار می‌روند. همچنین در صنایع نساجی و شیمی کاربرد دارند و بیشتر موتورهای ۴۰۰ هرتز مینیاتوری که در صنایع نظامی و هوایی بکار می‌روند از این نوع موتورها می‌باشند. با توجه به پیشرفت‌های جدید و رشد تقاضاهای موتور پسماند، آینده درخشان برای موتور پسماند پیش‌بینی می‌شود. اگر چه موتورهای پسماند عموماً راندمان و ضریب توان نسبتاً پایینی دارند ولی خصوصیات منحصر به فرد این موتورها از قبیل جریان راه‌اندازی کم باعث شده است که این موتورها برای کاربردهای خاص بسیار مناسب و مورد توجه باشند. کاربردهای نظامی و ویژه‌ی این موتورها باعث شده است که گزارش‌ها کمی در مورد این موتورها در دسترس باشد و بسیاری از پیشرفت‌ها به صورت مقالات علمی منتشر نشوند [۱].

## ۱-۲: تاریخچه

موتور پسماند، اولین بار توسط استینمتر<sup>۱</sup> معرفی شد، اما به علت تئوری ضعیف ارائه شده زیاد مورد توجه قرار نگرفت [2]. در سال‌های بعد تی‌پرا<sup>۲</sup>، مطالعاتی بر روی موتور پسماند نوع استوانه‌ای انجام داد [3]. وی نشان داد که گشتاور این موتور از حالت سکون تا رسیدن به سرعت سنکرون، متناسب با حجم ماده پسماند روتور و همچنین مساحت حلقه پسماند آن است. او همچنین تأثیر هارمونیک‌ها را نیز بر رفتار موتور بررسی کرد و نشان داد که وجود هارمونیک در میدان دوار استاتور

<sup>1</sup>Steinmetz

<sup>2</sup>Teare

باعث تغییر شکل حلقه پسماند و در نتیجه کاهش گشتاور خواهد شد.

سپس، روترز<sup>1</sup> نشان داد که تلفات پسماند پارازیتیک در روتور ناشی از نوسانات شار محلی می-تواند تا حد زیادی با استفاده از شکاف بسته استاتور کاهش یابد [4].

کوپلند<sup>2</sup> و سلمون<sup>3</sup> مطالعات خود را در مورد موتور پسماند در دو مقاله [5] و [6] در سال‌های ۱۹۶۳ و ۱۹۶۴ منتشر کردند. در [5]، یک موتور پسماند استوانه‌ای نوع شار شعاعی با ساختار استاتور شیار بسته مورد مطالعه قرار گرفت. سپس، رابطه گشتاور ماشین را به دست آورده و نشان دادند که نتایج آزمایشات عملی و نتایج حاصل از مدار معادل تطبیق بسیار مناسبی دارند.

در [7]، رحمان<sup>4</sup> با همکاری کوپلند و سلمون به بررسی تلفات پارازیتیک در موتورهای پسماند پرداختند. آن‌ها توانستند روابطی برای تلفات پارازیتیک نیروی محرکه مغناطیسی و تلفات پارازیتیک شار به دست آورند. رحمان سال ۱۹۷۱ یک مدل تحلیلی جامع برای موتور پسماند نوع استوانه‌ای در دو حالت سنکرون و آسنکرون ارائه داد [8]. کانیسترا<sup>5</sup> و سایلوس<sup>6</sup> در سال ۱۹۸۷ دو موتور پسماند استوانه‌ای نوع شار محیطی و شار شعاعی را مورد بررسی قرار دادند [9]. آن‌ها با مدل‌سازی منحنی مشخصه مغناطیسی روتور با استفاده از تقریب متوازی‌الاضلاع، مدار معادل موتورهای پسماند مذکور در سرعت سنکرون را به دست آوردند. ظاهر<sup>7</sup> در سال ۱۹۹۰ با استفاده از معادلات ماکسول به محاسبه توزیع میدان الکترومغناطیسی در موتور پسماند استوانه‌ای نوع شار محیطی در سرعت سنکرون پرداخت [10]. رحمان در سال ۱۹۸۰ موتور پسماند استوانه‌ای از نوع شار محیطی چند فاز را مورد مطالعه قرار داد [11]. وی با انجام یک تحلیل میدان جامع برای این موتور در سرعت‌های پایین-تر از سرعت سنکرون، توانست معادلات میدان را برای فاصله هوایی و رینگ پسماند موتور به دست

<sup>1</sup> Roters

<sup>2</sup> Copeland

<sup>3</sup> Slemon

<sup>4</sup> Rahman

<sup>5</sup> Cannistra

<sup>6</sup> Sylos

<sup>7</sup> Zaher

آورد. ایشیکاوا<sup>۱</sup> و کاتائوکا<sup>۲</sup> در سال ۱۹۸۱ به تحلیل موتور پسماند نوع تخت پرداختند [12]. این تحلیل در شرایط گشتاور ماکزیمم در سرعت سنکرون انجام گرفته است. کاتائوکا و همکاران در سال ۱۹۸۲، به بررسی اثرات تحریک اضافی کوتاه مدت در رفتار موتور پسماند پرداختند [13]. بررسی‌های کلی دیگری نیز در رابطه با موتور پسماند انجام گرفته است. مانند واکوئی<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۱۹۸۳ و اوکلی<sup>۴</sup> در سال ۱۹۹۶ و ...

از جمله مهم‌ترین پایان‌نامه‌ها و مقالات منتشرشده توسط محققین دانشگاه صنعتی شاهرود در زمینه ماشین‌های پسماند می‌توان به مراجع [۱]، [۱۵]، [۱۶]، [۱۷]، [۱۸]، [۱۹]، [۲۰]، [۲۱]، [۲۲]، [۲۳]، [۲۴] و [۲۵] اشاره نمود. از مطالب این پژوهش‌ها در معرفی و نحوه عملکرد موتور پسماند در بخش‌های قبلی و بعدی استفاده شده است.

از زمان ارائه تئوری گشتاور پسماند توسط استینمتز، بسیاری از نویسندگان، ماشین پسماند را بر اساس تقریب حلقه پسماند به صورت هر دو مدل بیضوی یا متوازی‌الاضلاع تجزیه و تحلیل کرده‌اند. حلقه پسماندهای مدل بیضی برای اولین بار توسط تی‌پرا در تجزیه و تحلیل موتور پسماند استفاده شد. نمایش بیضوی بیشتر توسط روترز، میاری<sup>۵</sup> و رابرتسون<sup>۶</sup> برای موتور پسماند سنکرون گسترش داده شد. مدل‌سازی متوازی‌الاضلاع حلقه B-H توسط کولپند<sup>۷</sup> و سلمون<sup>۸</sup> در تجزیه و تحلیل موتور پسماند و گشتاور اساسی از لحاظ ابعاد ماشین و مشخصات ماده پسماند معرفی شد [۱].

### ۳-۱: انواع ساختار موتور پسماند

موتور پسماند نوع خاصی از موتور سنکرون با ساختارهای الکترومغناطیسی و مکانیکی متفاوت

<sup>1</sup> Ishikawa

<sup>2</sup> Kataoka

<sup>3</sup> Wakui

<sup>4</sup> O'Kelly

<sup>5</sup> Miyairi

<sup>6</sup> Robertsonl

<sup>7</sup> copeland

<sup>8</sup> Slemon

می‌باشد. این موتورها تک فاز و یا چند فاز می‌باشند و از نقطه‌نظرهای متفاوت به انواع مختلف طبقه‌بندی می‌شوند. استاتور موتورهای پسماند، از ورقه‌های معمولی که در استاتور موتور القایی نیز به کار می‌رود، ساخته می‌شود و حلقه پسماندی که در روتور بکار می‌رود به صورت ورقه‌ای یا یکپارچه می‌باشد. هر یک از این ساختارها مزایائی دارند. اگر حلقه به صورت یکپارچه ساخته شود، گشتاور در حالت آسنکرون بیشتر می‌شود و تلفات فوکوی حاصل از هارمونیک در حالت سنکرون بیشتر می‌گردد. در موتورهای کوچک حلقه روتور به صورت یکپارچه ساخته می‌شود و حتی برای کاربردهای ویژه که زمان راه‌اندازی کم لازم است، سطح حلقه با یک ماده با هدایت الکتریکی بالا پوشانده می‌شود تا گشتاور به علت تلفات فوکو در حالت غیر سنکرون بیشتر گردد و به این ترتیب زمان راه‌اندازی را کم نماید [۱].

به لحاظ ساختار مکانیکی و محل قرارگیری نسبی روتور و استاتور به سه نوع استوانه‌ای معمولی، معکوس و نوع تخت تقسیم می‌شوند [۱].

### ۱-۳-۱: موتور پسماند استوانه‌ای

استاتور موتورهای پسماند استوانه‌ای مشابه استاتور موتورهای القایی معمولی است، که عمدتاً یک سیم‌پیچ آرمیچر سه فاز بر روی آن پیچیده می‌شود. این موتورها یک روتور استوانه‌ای دارند که می‌تواند به طور کامل از مواد پسماند ساخته شود و یا این که شامل یک رینگ پسماند قرار گرفته روی یک نگه‌دارنده مغناطیسی و یا غیر مغناطیسی باشد. بر این اساس این موتورها به سه دسته تقسیم می‌شوند:

#### • موتور پسماند استوانه‌ای شار محیطی

موتورهای پسماند استوانه‌ای شار محیطی، ساده‌ترین و معمول‌ترین ساختاری است که برای موتور پسماند می‌توان در نظر گرفت. موتورهای پسماند استوانه‌ای شار محیطی، که در آن‌ها روتور یک رینگ پسماند استوانه‌ای است که بر روی نگه‌دارنده‌ای از جنس مواد غیر مغناطیسی قرار دارد. در این

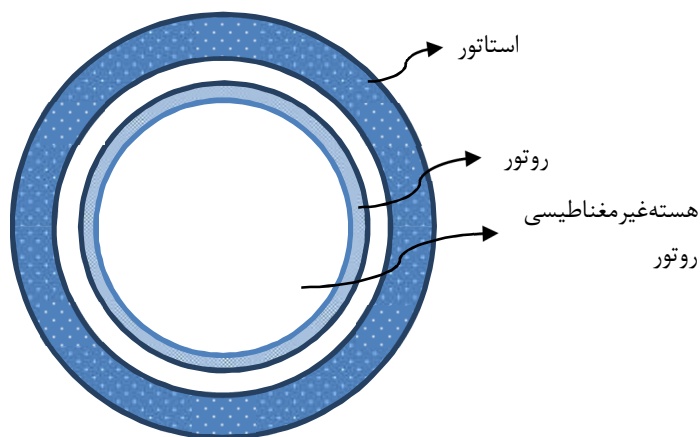
نوع موتورهای شار در روتور به صورت محیطی می باشد (شکل ۱-۱).

### • موتور پسماند استوانه‌ای شار شعاعی

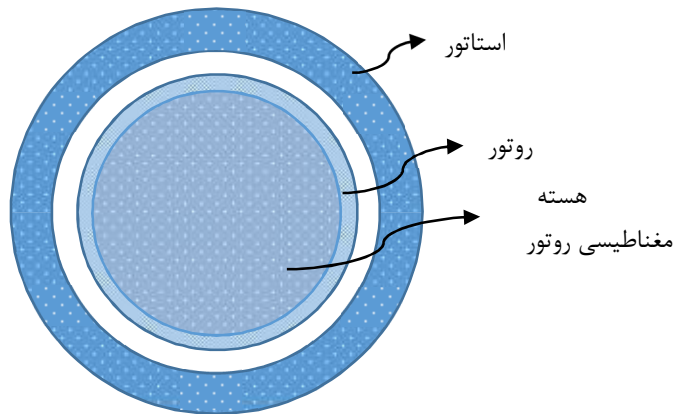
موتورهای پسماند استوانه‌ای شار شعاعی، که در آن‌ها روتور به صورت یکپارچه از مواد پسماند ساخته می‌شود و یا اینکه یک رینگ پسماند بر روی نگه‌دارنده‌ای از جنس مواد فرو مغناطیسی نرم مانند سیلیکون، قرار می‌گیرد. در این نوع موتورهای شار در راستای شعاعی می‌باشد (شکل ۲-۱).

### ۲-۳-۱: موتورهای پسماند استوانه‌ای معکوس

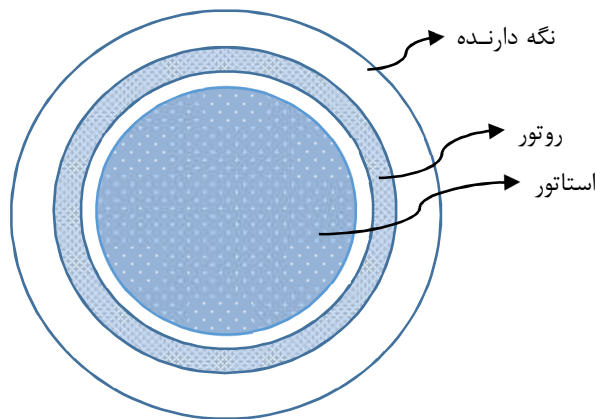
موتورهای پسماند استوانه‌ای معکوس، که در آن‌ها روتور در قسمت بیرونی قرار گرفته و استاتور را دربر می‌گیرد. با طرح معکوس امکان ساخت موتورهای مینیاتوری با ممان اینرسی بالا وجود دارد. افزایش اینرسی سبب حداقل شدن لرزش در کاربردهای ثبت اطلاعات می‌گردد، که به طور گسترده‌ای در ژيروسکوپها مورد استفاده قرار می‌گیرد (شکل ۳-۱). این موتورها را نیز به صورت شار شعاعی یا محیطی می‌توان ساخت.



شکل ۱-۱: موتور پسماند شار محیطی



شکل ۱-۲: موتور پسماند شار شعاعی



شکل ۱-۳: موتور پسماند معکوس

### ۱-۳-۳: موتور پسماند تخت

موتورهای پسماند تخت که معمولاً در سرعت‌های بسیار بالا بکار گرفته می‌شود دارای یک یا دو دیسک از جنس مواد پسماندی به عنوان روتور می‌باشند. در این ماشین فاصله هوایی بر خلاف ماشین معمولی که در راستای شعاع است، در امتداد محور ماشین است. اولین ماشین الکتریکی ساخته‌شده ماشین نوع تخت فاراده می‌باشد. ماشین‌های نوع تخت به خاطر ویژگی‌های خاص و منحصربه‌فرد در دهه‌های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. به علت کمتر بودن مواد هسته در ماشین‌های تخت، این ماشین‌ها دارای نسبت توان به وزن بالاتری در مقایسه با ماشین‌های استوانه‌ای هستند. یکی دیگر از مزایای ماشین تخت قابلیت تنظیم راحت فاصله هوایی است. اگرچه وجود نیروهای محوری متقابل

بین استاتور و روتور یکی از معایب این موتورها است، مزایای دیگر این موتورها، آن‌ها را برای استفاده از کاربردهای خاص بسیار مناسب کرده است.

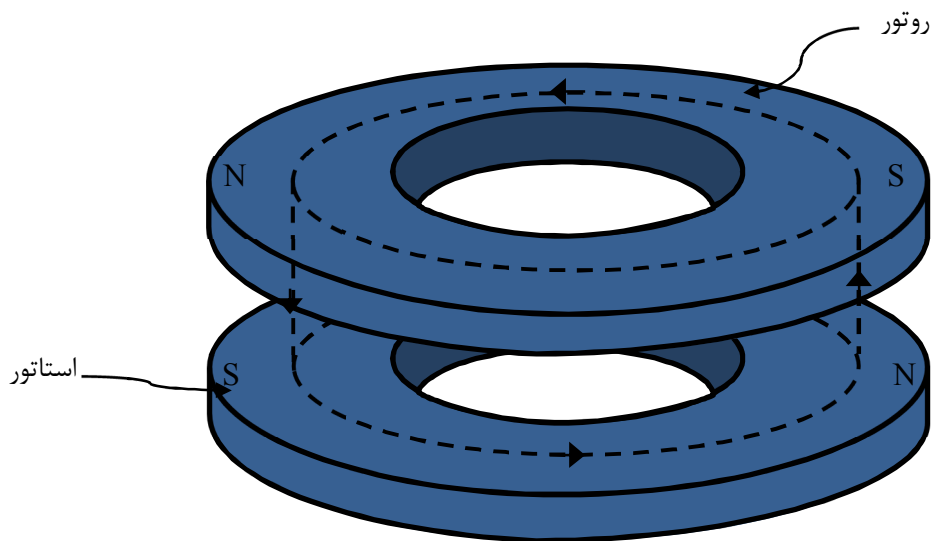
امروزه ماشین‌های نوع تخت آهنربای دائم بسیار شناخته شده هستند. امکان تغییر دادن مسیر شار در نوع تخت باعث شده است که موتورهای آهنربای دائم نوع تخت در ساختارهای متنوع عرضه شود. اما موتور پسماند نوع تخت بسیار کم مورد بررسی قرار گرفته است.

#### • موتور پسماند نوع تخت شار محوری

در ساده‌ترین حالت موتور پسماند نوع تخت دارای استاتوری به صورت تخت است و روتور آن یک دیسک یکپارچه ساخته شده از ماده پسماند می‌باشد. در صورتی که روی روتور یک نگه‌دارنده از جنس فولاد سیلیکون دار یا هر ماده فرو مغناطیس نرم قرار داشته باشد، شار عبوری از روتور کاملاً محوری است و در این حالت این موتور، موتور پسماند نوع تخت شار محوری نامیده می‌شود.

#### • موتور پسماند نوع تخت شار محیطی

در صورتی که نگه‌دارنده وجود نداشته باشد و یا از یک ماده غیر مغناطیسی ساخته شده باشد، شار عبوری از روتور محیطی است، در این صورت موتور پسماند نوع تخت را شار محیطی می‌نامند. شکل ۴-۱ موتور پسماند نوع تخت شار محیطی و نحوه شکل قطب‌ها را در آن نشان می‌دهد.



شکل ۴-۱: موتور پسماند نوع تخت شار محیطی و نحوه شکل‌گیری قطب‌ها در آن

#### ۴-۱: پدیده پسماند

پسماند در مواد فرو مغناطیسی پدیده‌ای معروف است. هنگامی که یک میدان مغناطیسی خارجی بر روی یک ماده فرو مغناطیس عمل کند دو قطبی‌های اتمی، خود را با این میدان خارجی هم‌راستا می‌کنند. حتی پس از خنثی کردن میدان مغناطیسی خارجی، بخشی از این جهت‌گیری به جا می‌ماند. در این حالت اصطلاحاً گفته می‌شود که این ماده مغناطیده شده است. رابطه میان شدت میدان مغناطیسی (H) و چگالی شار مغناطیسی (B) در چنین موادی یک رابطه خطی نیست.

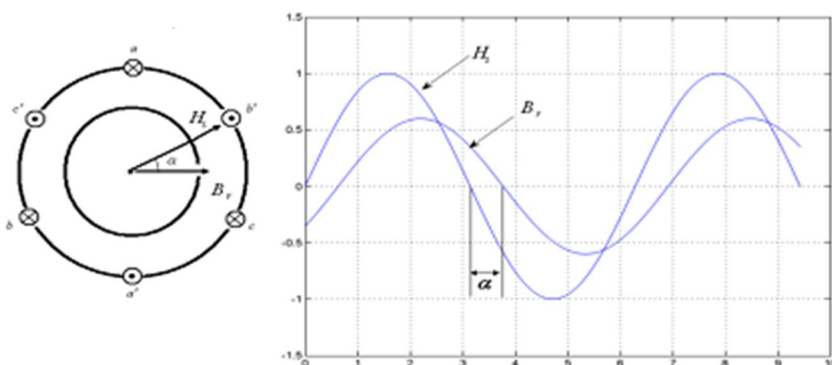
هنگامی که یک ماده مغناطیسی تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی متناوب قرار می‌گیرد پدیده پسماند به وجود می‌آید. این پدیده ناشی از ثابت زمانی است که حوزه‌های مغناطیسی ماده به خاطر جهت یافتن یا جهت دادن به خود در اثر میدان مغناطیسی، بروز می‌دهد. به عبارت دیگر می‌توان گفت بین اعمال میدان مغناطیسی بر ماده و ظهور چگالی شار، تأخیر فاز وجود دارد. همه‌ی مواد مغناطیسی مقداری خاصیت پسماند دارند. بعضی مواد مثل آلیاژهای کبالت- فولاد خاصیت پسماند زیادی دارند. در یک ماده پسماند، مغناطیس شونده‌گی پس از حذف کامل میدان خارجی باقی می‌ماند. در حقیقت میدان باید در جهت عکس اعمال شود تا مغناطیس شونده‌گی صفر شود.



## ۵-۱: تئوری عملکرد ماشین پسماند

موتور پسماند (پسماند) یک موتور سنکرون است که بر اساس پدیده پسماند کار می‌کند. اتصالات کویل‌های استاتور با هدف ایجاد میدان گردانی در اطراف روتور، مشابه موتور القایی است. میدان استاتور قطب‌هایی را به واسطه مغناطیس شونده روی روتور ایجاد می‌کند. این قطب‌ها میدان چرخان را دنبال می‌کنند و روتور به دنبال آن کشیده می‌شود. بدون پسماند، روتور به دنبال میدان حرکت نخواهد کرد.

هرگاه به یک ماشین پسماند یک ولتاژ سینوسی متعادل اعمال شود، به دنبال آن یک میدان مغناطیسی  $H$  به صورت سینوسی  $H = \hat{H} \sin \omega t$  ناشی از توزیع سینوسی سیم‌پیچی در استاتور ایجاد می‌شود. این میدان سینوسی در رینگ پسماند یک موج چگالی شار غیر سینوسی ایجاد می‌کند. مؤلفه اصلی موج چگالی شار  $B = \hat{B} \sin(\omega t - \alpha)$  یک موج سینوسی با اختلاف زاویه  $\alpha$  می‌باشد این اختلاف فاز منجر به تولید گشتاور پسماند می‌شود. (شکل ۵-۱ را ببینید).



شکل ۵-۱: مکانیزم تولید گشتاور در موتور پسماند

اگر روتور در حالت سکون باشد هر نقطه از روتور که در معرض میدان مغناطیسی متغییر با زمان (ناشی از گردش میدان) قرار بگیرد حلقه پسماند را می‌پیماید. برای یافتن تغییرات زمانی شدت میدان مغناطیسی  $H$  مربوط به هر نقطه و چگالی شار مغناطیسی  $B$  حاصل از آن در همان نقطه می‌توان از حلقه پسماند استفاده کرد. به خاطر پدیده پسماند میدان حاصله توسط روتور از میدان

استاتور عقب است. در این گونه موتورها به خاطر پدیده پسماند اختلاف زاویه  $\alpha$  بین این دو میدان به وجود می‌آید. تا زمانی که سرعت روتور به سرعت سنکرون نرسیده است سیکل پسماند تحت فرکانس لغزش در ماده روتور تکرار می‌شود با نزدیک شدن سرعت موتور به سرعت سنکرون، فرکانس جریان گردابی روتور کم شده و در سرعت سنکرون، ماده مغناطیسی روتور به صورت آهنربای دائم کار می‌کند. مشخصه گشتاور سرعت ثابت یکی از مشخصات بارز این موتورها می‌باشد و به علت این مشخصه، می‌تواند خود را با هر نوع باری تطبیق دهد.

در حالت عادی و سرعت زیر سنکرون هر نقطه از روتور یک B غیرسینوسی را تجربه می‌کند و لوپ پسماند را طی می‌کند. تمام نقاط دیگر نیز همین شرایط را، ولی با یک شیفت فاز زمانی نسبت به هم دارند. وقتی سرعت زیر سرعت سنکرون است از لحاظ مکانی هم، شار روی نقاط روتور در حرکت است، ولی با رسیدن به سرعت سنکرون هر نقطه، چگالی شار فیکسی خواهند داشت و قطب‌ها با اندکی نوسان ثابت می‌شود.

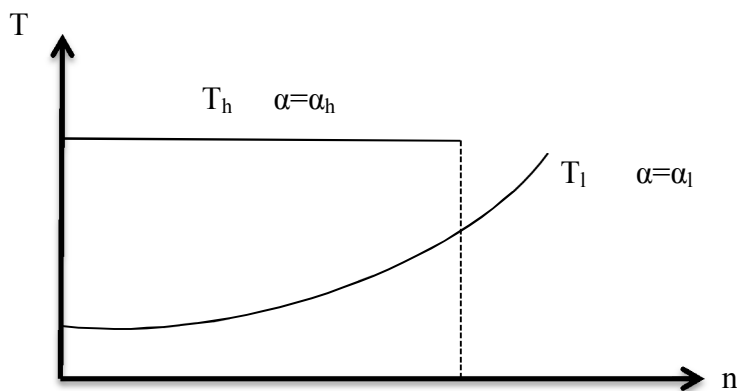
همان طور که می‌دانیم در ماشین‌های الکتریکی پدیده پسماند و جریان ادی از عوامل اصلی تلفات محسوب می‌شود و همواره سعی در کم کردن این تلفات داریم. اما در ماشین پسماند اساس گشتاور ماشین این دو مؤلفه است. گشتاور پسماند ناشی از پدیده پسماند و گشتاور ادی ناشی از جریان‌های گردابی است. گشتاور در موتورهای پسماند به نیروی محرکه استاتور، شار روتور و زاویه بین میدان استاتور و میدان دوار روتور بستگی دارد و چون شار روتور ثابت است و تابعی از مقدار بار نیست این موتورها تقریباً دارای گشتاور ثابت می‌باشند.

کار خالص ماکزیمم ناشی از یک چرخه مغناطیسی با سطح داخلی منحنی بسته B-H متناسب است. اگر مقدار گشتاور بار کم باشد به طوری که کوچک‌تر یا مساوی حداکثر کار موجود باشد، روتور به واسطه قطب‌های مغناطیس شده‌اش حرکت می‌کند. سرعت چرخش روتور در حالت دائمی برابر با سرعت میدان چرخان است و گفته می‌شود موتور تحت عملکرد سنکرون با سرعت مکانیکی مساوی با

سرعت سنکرون کار می‌کند. اگر گشتاور بار قدری بزرگ باشد که کار لازم از حداکثر کار موجود بیشتر باشد آنگاه روتور از قطب‌های مغناطیس شده عقب می‌افتد، به این ترتیب سرعت چرخش روتور کمتر از سرعت سنکرون است. قطب‌ها، روتور را دنبال خود، ولی با مقداری لغزش می‌کشند.

در سرعت سنکرون، گشتاور جریان گردابی اصلی صفر است و بهره‌برداری از موتور به طور انحصاری توسط گشتاور پسماند انجام می‌شود. در هر سرعتی زیر سرعت سنکرون، گشتاور موتور به خاطر هر دو اثر پسماند و جریان گردابی است. در سرعت‌های زیر سنکرون، جریان ادی القا شده در روتور سهم قابل‌توجهی از گشتاور را علاوه بر گشتاور پسماند دارد. در سرعت سنکرون حالت دائمی، جریان فوکو نخواهیم داشت چرا که حرکت نسبی بین روتور و میدان استاتور وجود ندارد. در سرعت‌های بالاتر از سرعت سنکرون، جریان‌های ادی (به همراه حرکت قطب‌های چرخان) باعث رفتاری مانند ژنراتور القایی می‌شود. در شرایط غیردائمی، مانند نوسانات حول سرعت سنکرون هم باعث القای جریان ادی خواهد شد.

تا زمانی که روتور با سرعت کمتر از سرعت میدان گردان استاتور بچرخد گشتاور پسماند وجود دارد و تا رسیدن به سرعت سنکرون تقریباً ثابت است. شکل ۶-۱ مشخصه گشتاور  $T_h$  بر حسب سرعت موتور پسماند را نشان می‌دهد. در شکل گشتاور بار فرضی  $T_l$  در نظر گرفته شده است.



شکل ۶-۱: مشخصه گشتاور موتور پسماند

هنگامی که موتور به سرعت سنکرون می‌رسد گشتاور الکترومغناطیسی فرض می‌کنیم از گشتاور

بار بزرگ‌تر است پس سرعت موتور از سرعت سنکرون بالاتر می‌رود در این شرایط حلقه کاری عوض می‌شود و زاویه  $\alpha$  نیز به تبع آن تغییر می‌کند تا گشتاور الکترومغناطیسی موتور برابر گشتاور بار شود. از آن به بعد قطب‌ها بر روی روتور جابجا نمی‌شود و موتور مشابه یک موتور مغناطیس دائم بعد از چند نوسان در سرعت ثابت و برابر با سرعت سنکرون به کار خود ادامه می‌دهد.

گشتاور اصلی تولیدشده در موتور پسماند متناسب با توان پسماند روتور است. توان پسماند روتور برابر است با:

$$P_{hr} = E_h f_r V_r \quad (1-1)$$

که در آن  $E_h$  سطح حلقه پسماند،  $f_r$  فرکانس میدان روتور و  $V_r$  حجم ماده پسماند روتور است. تقریباً در همه شرایط کاری، توان واردشده به فاصله هوایی برابر با توان پسماندی است که از استاتور در حالت سکون به روتور وارد می‌شود یعنی:

$$P_{hs} = E_h f_s V_r \quad (2-1)$$

پس توان مکانیکی و گشتاور به ترتیب برابر خواهند شد با:

$$P_{mech} = (1-s)E_h f_s V_r \quad (3-1)$$

$$T_h = \frac{P_{mech}}{\omega_r} = \frac{(1-s)E_h f_s V_r}{(1-s)\omega_s} = \frac{E_h V_r p}{4\pi} \quad (4-1)$$

همان‌طور که از رابطه گشتاور پسماند پیداست موتور پسماند تا لحظه سنکرون شدن، گشتاور ثابتی دارد. اگر جریان‌های گردابی ایجادشده در روتور موتور پسماند را هم در نظر بگیریم موتور پسماند دارای گشتاور القایی نیز خواهد بود. بنابراین در موتور پسماند علاوه بر گشتاور پسماند، گشتاور القایی نیز در هنگام راه‌اندازی وجود دارد که باعث می‌شود گشتاور راه‌اندازی نسبتاً خوبی به وجود آید. بنابراین موتور پسماند هر باری را که بتواند به حرکت در آورد به سرعت سنکرون می‌-

رساند [26]. نحوه شکل‌گیری قطب‌ها روی روتور موتور پسماند به گونه‌ای است که در سرعت سنکرون مشخصه گشتاور بسیار ثابت و یکنواخت است و موتور بسیار نرم و بدون نویز و سر و صدا کار می‌کند. در لحظه‌ای که روتور موتور پسماند به سرعت سنکرون می‌رسد شار روتور نوسان می‌کند و چگالی شار پسماند، ماده پسماند روی حلقه خاصی تثبیت می‌شود. از آنجا که در شرایط سنکرونیسم گشتاور القایی وجود ندارد موتور مثل یک موتور آهنربای دائم عمل می‌کند. وقتی که اغتشاشات ناگهانی اتفاق می‌افتد، قطب‌های منتجه روی روتور حرکت می‌کند. بنابراین روتور حول سرعت سنکرون، در فرکانس کم ( دو تا پنج هرتز) نوسان می‌کند به طوری که موتور پسماند نقطه سنکرون مشخصی ندارد و موقعیت روتور نسبت به میدان مغناطیسی گردان تصادفی است. که این موضوع خطای شناور در ژيروسکوپ‌ها را افزایش می‌دهد.

## ۱-۶: حلقه‌های جزئی

در اینجا فرض شده است که شدت میدان مغناطیسی کاملاً سینوسی است. اگر شدت میدان مغناطیسی هارمونیک باشد منحنی پسماند دارای حلقه‌های جزئی<sup>۱</sup> نیز می‌باشد. این حلقه‌های جزئی در اثر هارمونیک‌های شدت میدان مغناطیسی به وجود می‌آیند. حلقه‌های جزئی ایجاد شده در اثر این هارمونیک‌ها، متناسب با سطح خود باعث ایجاد تلفات توان می‌شوند که در موتور پسماند تحت عنوان تلفات پارازیتیک<sup>۲</sup> مطرح است [38]. شکل ۱-۷ یک منحنی پسماند به همراه چند حلقه جزئی را نشان می‌دهد. برای مدل‌سازی دقیق پدیده پسماند و این حلقه‌های جزئی می‌توان از روش‌های عددی، بر پایه معادلات دیفرانسیل از قبیل هدگدن<sup>۳</sup>، جیلز اثرتون<sup>۴</sup> و پریساج<sup>۵</sup> استفاده کرد.

---

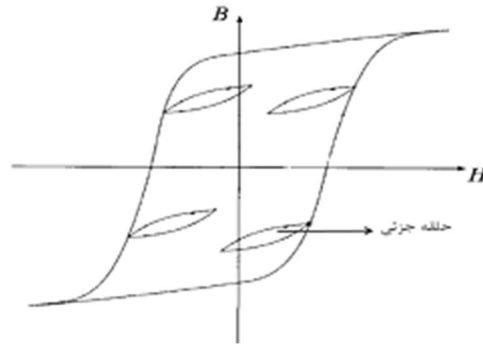
<sup>1</sup> Minor Loops

<sup>2</sup> Parasitic Losses

<sup>3</sup> Hodgdon

<sup>4</sup> Jiles-Atherton

<sup>5</sup> Preisach



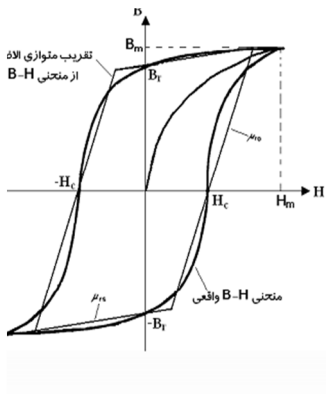
شکل ۷-۱: منحنی پسماند با حلقه‌های جزئی [27]

### ۷-۱: روش‌های تقریب حلقه پسماند

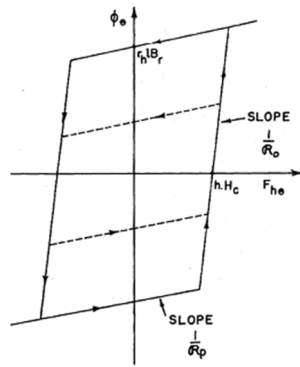
برای تحلیل رفتار ماشین پسماند نیاز است تا حلقه پسماند ماده روتور مدل‌سازی شود. برای این کار معمولاً از روش‌های هندسی تقریبی مانند بیضی و متوازی‌الاضلاع و یا از روش‌های تقریبی بر پایه معادلات دیفرانسیل از قبیل هدگدن، جیلز اثرتون و پریساج استفاده می‌کنند. تقریب منحنی‌های پسماند با بیضی باعث می‌شود که فقط مؤلفه اصلی شدت میدان مغناطیسی در نظر گرفته شود و از هارمونیک‌های دیگر آن صرف‌نظر شود. این بیضی‌ها هر کدام دارای زاویه تأخیر پسماند  $\alpha$  و ضریب نفوذپذیری  $\mu = \frac{B_{\max}}{H_{\max}}$  مغناطیسی منحصر به فرد می‌باشند. مقدار زاویه تأخیر پسماند از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\alpha = \sin^{-1}\left(\frac{E_h}{\pi H_{\max} B_{\max}}\right) \quad \text{معادله ۵-۱}$$

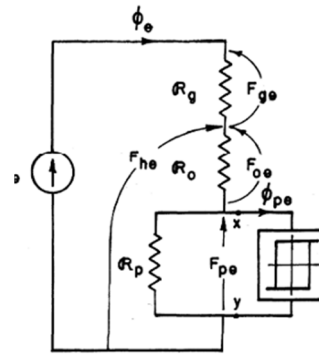
یکی دیگر از روش‌های تقریب منحنی پسماند تقریب متوازی‌الاضلاع است. در مرجع [۷] از تقریب متوازی‌الاضلاع برای مدل‌سازی موتور پسماند استفاده شده است. در این روش مدار معادل مغناطیسی روتور را می‌توان به صورت یک رلوکتانس موازی با یک حلقه مستطیلی ایده‌آل تقریب زد. در شکل ۷-۲ روند خلاصه نمایش داده شده است.



الف) منحنی پسماند روتور



ب) تقریب متوازی الاضلاع ماده روتور



ج) مدار معادل موتور پسماند

شکل ۸-۱: روش تقریب متوازی الاضلاع [۷]

در این پایان نامه از تقریب بیضی استفاده شده است که از دقت خوبی برای مدل سازی موتور

پسماند به منظور طراحی برخوردار است.





## فصل دوم

ماشین سنکرون آهنربا دائم و بررسی

انواع ساختارهای آن

## ۲-۱: مقدمه

ماشین‌های مغناطیس دائم، نوعی از ماشین‌های الکتریکی سنکرون هستند که در روتور آن‌ها از آهنربای دائم استفاده می‌شود. در ماشین‌های سنکرون سیم‌پیچی تحریک روی استاتور و سیم‌پیچی آرمیچر روی روتور قرار دارد و استاتور و روتور دارای قطب‌های مغناطیسی معمولی هستند. در ماشین‌های مغناطیس دائم ماشین به دلیل ثابت بودن جریان تحریک، فاقد سیم‌پیچ تحریک است و سیم‌پیچی آرمیچر نیز روی استاتور قرار می‌گیرد. در واقع روتور در ماشین مغناطیس دائم بدون سیم‌پیچی است. نکته بسیار مهم در این نوع ماشین‌ها کارایی بالا و قابلیت‌های منحصربه‌فرد آن‌ها همچون راندمان بالا، ضریب توان بالا و عملکرد بدون جاروبک، است. ماشین‌های سنکرون مغناطیس دائم با مغناطیس نصب‌شده روی استاتور، اخیراً با عنوان ماشین‌های مرکب وارد دنیای ماشین‌ها شده‌اند.

در موتورهای سنکرون مغناطیس دائم، جهت حذف منبع DC تحریک در روتور از یک مغناطیس دائم استفاده می‌شود. قسمت اصلی گشتاور تولیدشده در این موتور از نوع تداخلی است و از تأثیر متقابل میدان گردان استاتور و میدان حاصل از مغناطیس دائم در روتور تولید می‌شود. مقدار متوسط این گشتاور در هر سرعتی به جز سرعت سنکرون صفر است، لذا چنین موتوری فاقد گشتاور راه‌اندازی است. به علاوه لازم است پس از راه افتادن، سرعت آن توسط مکانیزم دیگری به مقدار سنکرون رسانده شود. این عمل معمولاً توسط یک قفس سنجابی یا مشابه آن مثلاً یک استوانه هادی که روی قسمت روتور سوار می‌شود انجام می‌گیرد. بدین ترتیب موتور مانند یک موتور القایی راه‌اندازی می‌شود و سرعت آن تا نزدیکی‌های سرعت سنکرون صعود می‌کند و چنانچه شرایط دینامیکی قسمت گردان اجازه دهد سرعت موتور تحت تأثیر گشتاور تداخلی موجود بین میدان‌های روتور و استاتور به مقدار سنکرون کشانده می‌شود. تئوری عملکرد این موتور در حالت کلی مشابه موتورهای سنکرون بزرگ با تحریک DC است.

## ۲-۲: تاریخچه ماشین آهنربای دائم

اگر چه اولین سیستم تحریک آهنربای دائم برای ماشین‌های الکتریکی در اوایل سال ۱۸۳۰ به کار گرفته شده بود، ولی به دلیل کیفیت پایین مواد مغناطیسی سخت، استفاده از آن‌ها به سرعت رو به سستی نهاد. اختراع آلیاژ آلومینیوم-نیکل-کبالت<sup>۱</sup> (Alnico) در سال ۱۹۳۱، فریت باریم در سال ۱۹۵۰ و به ویژه ماده کمیاب خاکی نئودیوم-آهن-بورن<sup>۲</sup> (NdFeB) در سال ۱۹۸۳، بازگشت سیستم تحریک آهنربای دائم را ممکن ساخت.

عموماً اعتقاد بر این است که در دسترس بودن مواد آهنربای انرژی بالا (به ویژه آهنرباهای دائم کمیاب خاکی) نیروی محرک اصلی برای بهره‌برداری از توپولوژی‌های ماشین‌های آهنربای دائم جدید است. از آن جایی که قیمت آهنرباهای کمیاب خاکی نسبت به زمان، از یک منحنی کاهشی پیروی می‌کنند، لذا با روند کاهشی قیمت و نیز با در دسترس بودن مواد آهنربای دائم، ماشین‌های PM در آینده نزدیک نقش کلیدی مهم‌تری خواهند داشت [28].

اولین کار متمرکز بر روی ماشین‌های دیسکی آهنربای دائم، در اواخر دهه ۷۰ و اوایل دهه ۸۰ انجام گرفت. ماشین‌های شار محوری آهنربای دائم در دهه‌های اخیر رشد قابل توجهی داشته است به ویژه در دهه ۹۰ به طور گسترده‌ای در کاربردهای نیروی دریایی و خانگی به عنوان یک جایگزین بسیار مناسب برای ماشین‌های شار شعاعی متداول استفاده شده است [29].

## ۳-۲: معرفی مواد مغناطیسی

همان طور که می‌دانیم مواد مغناطیسی به گروه‌های زیر تقسیم‌بندی می‌شوند [29]:

۱- مواد دیامغناطیس: موادی هستند که ممان‌های مداری و چرخشی الکترونی آن‌ها

مساوی و مختلف‌الجهت می‌باشد به طوری که نتیجه برآیند ممان‌های داخلی جسم برابر

<sup>1</sup> Aluminum Nickel Cobalt

<sup>2</sup> Neodymium-Iron-Boron

صفر شود. مانند گازهای بی اثر که به میدان‌های خارجی توجهی ندارند.

## ۲- مواد پارامغناطیس: این گونه مواد در غیاب میدان‌های خارجی هیچ گونه خاصیت

مغناطیسی از خود نشان نمی‌دهند ولی هنگامی که میدان مغناطیسی خارجی به این جسم اعمال گردد، گشتاور کوچکی به هر یک از ممان‌های داخلی اتم وارد شده و این ممان‌های داخلی سعی می‌کنند که در امتداد میدان مغناطیسی خارجی قرار گیرند. این امر باعث می‌شود که میدان مغناطیسی داخلی جسم افزایش یابد.

## ۳- مواد فرو مغناطیس: در مواد فرو مغناطیس هر اتم دارای گشتاور دو قطبی است که عمدتاً

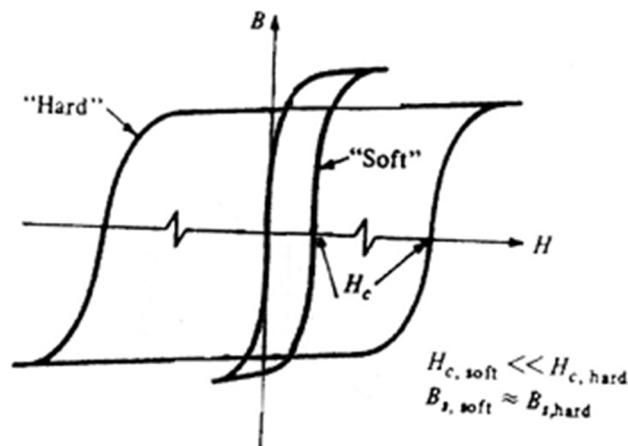
در اثر ممان چرخشی الکترونی خنثی نشده در ماده به وجود آمده است. نیروهای بین اتمی باعث می‌شود که این ممان‌ها در ناحیه‌ای که شامل تعداد زیادی اتم است به طور موازی با یکدیگر قرار گیرند. این نواحی به حوزه‌های مغناطیسی معروف‌اند. در حالت عادی (یعنی وقتی ماده هیچ گونه سابقه مغناطیس شدن نداشته) این مواد دارای حوزه‌هایی هستند که هر یک دارای یک ممان مغناطیسی قوی می‌باشد اما جهت ممان هر حوزه از یک حوزه به حوزه‌ی دیگر متفاوت است. در نتیجه برآیند کل ممان حوزه‌های جسم صفر است. با اعمال یک میدان مغناطیسی خارجی بر این گونه اجسام اندازه حوزه‌هایی که ممان مغناطیسی آن‌ها هم جهت با میدان اعمالی خارجی می‌باشد بزرگ‌تر شده و گسترش می‌یابد. معمولاً وقتی میدان خارجی مرتفع می‌گردد، وضعیت حوزه‌های داخل جسم به صورت اولیه (کاملاً تصادفی) برقرار نمی‌شود. در این حالت یک میدان دو قطبی باقی می‌ماند که در داخل ساختمان ماکروسکوپی جسم حفظ می‌شود. به این خاصیت جسم که ممان مغناطیسی آن بعد از برطرف شدن میدان خارجی، با ممان اولیه‌اش متفاوت است، پسماند گویند. تنها موادی که در دمای اتاق خاصیت فرو مغناطیس دارند آهن، نیکل و کبالت می‌باشند. بعضی از آلیاژهای فلزات غیرفرومغناطیس خاصیت فرو مغناطیس دارند، از قبیل آلیاژ بیسموت- منگنز و آلیاژ مس- منگنز- روی.

۴- **مواد آنتی فرو مغناطیس:** در مواد آنتی فرو مغناطیس، نیروهای بین اتم‌های مجاور باعث هم ردیف شدن ممان‌های اتمی به صورت موازی ولی مختلف‌الجهت می‌شود. به این ترتیب ممان مغناطیسی کل جسم صفر می‌گردد. این مواد فقط به مقدار ناچیزی تحت تأثیر میدان‌های خارجی قرار می‌گیرند. این اثر اولین بار در اکسید منگنز کشف شد.

۵- **مواد سوپر پارامغناطیس:** این مواد تشکیل شده‌اند از مجموعه ذرات فرو مغناطیس که در داخل محیطی از ماده فرو مغناطیس قرار دارند. گرچه حوزه‌های مغناطیسی در داخل ذرات این ماده وجود دارند، لیکن دیواره حوزه‌ها نمی‌توانند از طریق ماده فرو مغناطیس به ذرات مجاور نفوذ کنند. مثال مهمی از این دسته از مواد نوارهای مغناطیسی هستند که در دستگاه‌های ضبط صوت به کار می‌روند.

۶- **مواد مغناطیس سخت:** به ماده‌ای از لحاظ مغناطیسی سخت گفته می‌شود که اگر تحت میدان مغناطیسی خارجی قوی قرار گیرد، قسمت اعظم خاصیت مغناطیسی (آهنربایش) در ماده باقی بماند. ضمناً جهت رفع کامل خاصیت مغناطیسی آن ماده احتیاج به میدان ضد مغناطیس کننده بسیار قوی باشد. اگر ماده‌ای دارای هر دو شرط ذکر شده فوق باشد به آن ماده از لحاظ مغناطیسی سخت و یا مغناطیس دائم می‌گویند. به عنوان مثال به فولاد معمولی مغناطیس دائم گفته نمی‌شود، زیرا شرط دوم را ارضاء نمی‌کند.

به عبارت دیگر مواد مغناطیسی سخت دارای حلقه پسماند بسیار عریض تری نسبت به مواد مغناطیسی نرم هستند (شکل ۱-۲).

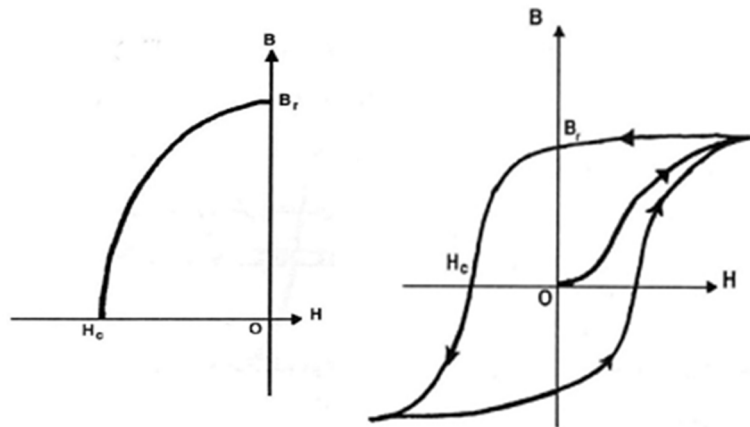


شکل ۱-۲: منحنی پسماند مواد مغناطیسی سخت و نرم [29]

یعنی پس ماند آن‌ها بسیار بزرگ‌تر از پس ماند مواد نرم مغناطیسی است. به عبارت دیگر پسماند آن‌ها بزرگ‌تر از پسماند مواد نرم مغناطیسی است. شکل و فرمی که برای هر کاربرد خاص آهنربای دائم طرح می‌گردد، بستگی مستقیمی به خاصیت آن دارد، به طوری که با پیشرفت‌هایی که در تولید این گونه مواد شده، باعث گردیده که بتوان با انتخاب حجم کمتری از این مواد کاربردهای بهتری از آن‌ها انتظار داشت.

### ۱-۳-۲: منحنی ضد مغناطیسی

خواص مغناطیسی مواد مغناطیس توسط منحنی پسماند آن تعیین می‌گردد. اما در مورد مغناطیس‌های دائم با توجه به اینکه این گونه مواد به عنوان ایجادکننده نیروی محرکه مغناطیسی مورد استفاده قرار می‌گیرند، لذا ربع دوم از منحنی پسماند آن‌ها برای ما اهمیت پیدا می‌کند، که به آن اصطلاحاً منحنی ضد مغناطیس می‌گویند این منحنی، کاهش آهنربایش (یا اندکسیون) را در قبال افزایش نیروی ضد مغناطیس کننده نشان می‌دهد. در شکل ۲-۲ حلقه پسماند کامل و نیز ربع دوم حلقه پسماند (یا منحنی مغناطیسی) برای یک ماده سخت مغناطیسی نشان داده شده است.



شکل ۲-۲: حلقه پسماند و منحنی مغناطیسی [29]

## ۴-۲: انواع ساختار موتورهای سنکرون

ساختار موتورهای سنکرون بر مبنای ساختار مواد، عملکرد و طراحی روتور آن‌ها به چهار گروه

اصلی تقسیم می‌شوند:

موتورهای تحریک الکترومغناطیسی

موتورهای مغناطیس دائم

موتورهای رلوکتانسی

موتورهای پسماند

موتورهای سنکرون آهنربای دائم را از جنبه‌های گوناگون دسته‌بندی کرده‌اند که در زیر به

صورت اجمالی به معرفی این دسته‌بندی‌ها می‌پردازیم.

### ۲-۴-۱: دسته‌بندی براساس مسیر شار

موتورهای سنکرون آهنربای دائم دارای ساختارهای گوناگونی هستند. در یک دسته‌بندی کلی

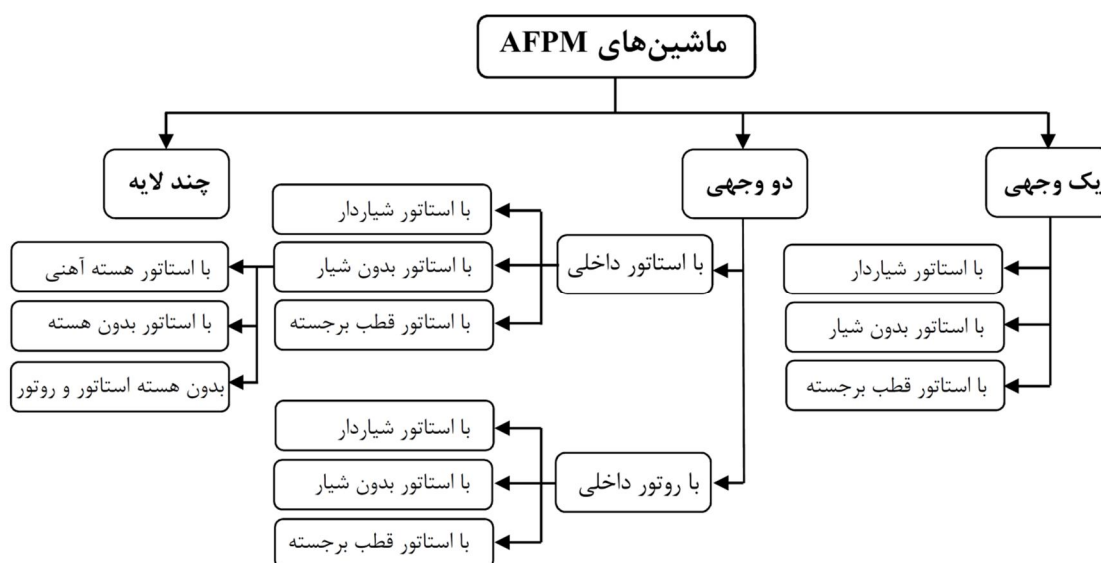
می‌توان این نوع موتورها را به دو نوع استوانه‌ای<sup>۱</sup> و تخت<sup>۱</sup> تقسیم‌بندی کرد که هر کدام از این دو نوع

<sup>۱</sup> Cylindrical-Type

در توپولوژی و ساختارهای مختلفی ساخته می‌شوند. ماشین‌های شار محوری آهنربای دائم (AFPM)<sup>۲</sup> که همچنین با نام ماشین‌های نوع تخت نیز شناخته می‌شوند، به واسطه ساختار فشرده و چگالی توان بالایی که دارند جایگزین مناسبی برای ماشین‌های شار شعاعی آهنربای دائم (RFPM)<sup>۳</sup> می‌باشند.

## ۲-۴-۱-۱: انواع توپولوژی‌های ماشین شار محوری آهنربای دائم

از نظر ساختاری، ماشین‌های AFPM بدون جاروبک می‌توانند به صورت ماشین‌های "یک وجهی"<sup>۴</sup>، "دو وجهی"<sup>۵</sup>، یا "چند لایه (چند دیسکی)"<sup>۶</sup> با یا بدون شیار آرمیچر، با یا بدون هسته آرمیچر، با روتور PM داخلی یا خارجی، با "اتصال سطحی"<sup>۷</sup> یا "درونی"<sup>۸</sup> آهنرباهای دائم طراحی شوند. در پیکربندی‌های دو وجهی، هر دو آرایش استاتور خارجی یا روتور خارجی می‌توانند در نظر گرفته شوند. به طور کلی طبقه‌بندی انواع توپولوژی‌های ماشین AFPM بدون جاروبک به صورت نمودار شکل ۲-۳ می‌باشد [29].



شکل ۲-۳: نمودار طبقه‌بندی انواع توپولوژی‌های ماشین AFPM

<sup>1</sup> Disc-Type

<sup>2</sup> Axial Flux Permanent Magnet

<sup>3</sup> Radial Flux Permanent Magnet

<sup>5</sup> - Single-sided

<sup>6</sup> - double-sided

<sup>7</sup> - multi-stage (multi-disc)

<sup>8</sup> - surface-mounted

<sup>۸</sup> - buried



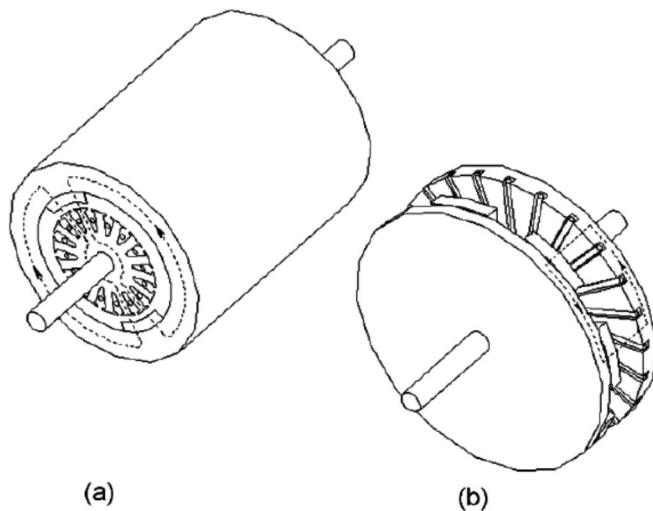
## ۲-۴-۱-۲: مقایسه ماشین شار محوری با ماشین شار شعاعی آهنربای دائم

همگام با کاربرد مواد جدید، نوآوری در تکنولوژی ساخت و پیشرفت در روش‌های خنک‌سازی امکان افزایش بیشتر چگالی توان (نسبت توان خروجی به جرم یا حجم) ماشین‌های الکتریکی فراهم گردیده است. اما با این حال برخی محدودیت‌های ذاتی برای این افزایش چگالی توان برای ماشین‌های شار شعاعی آهنربای دائم وجود دارند که عبارت‌اند از [29]:

۱- تراکم شار عبوری در مسیر انتهای دندانه استاتور در مورد ماشین‌های القایی و کموتاتوردار جریان مستقیم یا ماشین‌های بدون جاروبک با روتورهای خارجی.

۲- از هسته روتور اطراف محور (یوغ روتور) به سختی به عنوان یک مدار مغناطیسی استفاده می‌شود.

۳- گرمای سیم‌پیچی استاتور ابتدا به هسته استاتور و سپس به بدنه منتقل می‌شود. لذا انتقال گرمای ضعیفی از طریق استاتور، فاصله هوایی، روتور و محور، بدون وجود سیستم خنک‌کننده صورت می‌گیرد.



شکل ۲-۴: (a) ماشین RFPM (b) ماشین AFPM [29]

این محدودیت‌های ذاتی ساختار شار شعاعی را محدود می‌کنند و نمی‌توانند به آسانی رفع شوند مگر این که یک توپولوژی جدید اختیار شود.

به طور خلاصه ماشین‌های شار محوری آهنربای دائم (شکل ۲-۴-b) دارای برخی ویژگی‌های برجسته‌ای نسبت به ماشین‌های شار شعاعی هستند که عبارت‌اند از:

- ۱- ساختار فشرده، طول محوری کوتاه و قابلیت مونتاژ به صورت چند لایه
  - ۲- خنک‌کاری راحت‌تر به دلیل تماس سطح بیشتر سیم‌پیچی آرمیچر با هوا نسبت به سایر ماشین‌های RFPM
  - ۳- چگالی توان بالا و دستیابی به چگالی شار بیشتر در فاصله هوایی نسبت به سایر ماشین‌های RFPM
  - ۴- بازده بالا به دلیل استفاده از آهنربای دائم بدون نیاز به منبع تولید انرژی الکتریکی و عدم وجود تلفات مس در روتور
  - ۵- دستیابی به بیش‌ترین بازده با قابلیت ساخت روتور بدون استفاده از فولاد
  - ۶- رنج اینرسی وسیع با توجه به ساختار و تعداد لایه‌های منتخب
  - ۷- نیاز به نگهداری کمتر نسبت به ساختار استوانه‌ای
- همچنین از جمله معایب این ماشین‌ها نیز می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- ۱- احتمال مغناطیس‌زدایی آهنرباهای دائم و فروپاشی ماشین
  - ۲- کاهش سطح تماس بین روتور و میل محور با افزایش توان خروجی
  - ۳- ساخت و مونتاژ پیچیده‌تر نسبت به ماشین‌های استوانه‌ای
  - ۴- توپولوژی پیچیده ماشین با دو یا چند فاصله هوایی
- چندین دلیل برای کنار گذاشته شدن ماشین‌های شار محوری در ابتدا وجود داشت که به صورت خلاصه در زیر آورده شده‌اند.

- ۱- نیروی جذب مغناطیسی محوری قوی بین استاتور و روتور
- ۲- مشکلات ساخت، مانند برش شیارها در هسته‌ی موروک و روش‌های ساخت هسته‌های

## استاتور شیاردار

۳- هزینه‌های بالای مورد بحث در ساخت هسته‌های موقر استاتور

۴- مشکلات در مونتاژ ماشین و موضوع حفظ یکنواختی فاصله هوایی

### ۲-۴-۲: دسته‌بندی براساس نوع روتور

پیشرفت‌های اخیر در مواد PM چشم اندازه‌های تازه‌ای را در طراحی و کاربرد در موتورهای سنکرون مغناطیس دائم به وجود آورده است. استاتور این ماشین‌ها همانند ماشین‌های سنکرون معمولی است. اما در روتور PM جایگزین سیم‌پیچ میدان گردیده است. موتورهای سنکرون مغناطیس دائم روتورهایی با ساختارهای متفاوت به شرح زیر تا به حال معرفی گردیده است [28]:

#### Merrill's rotor ۱-۲-۴-۲

ابتدایی‌ترین ساختار موفقیت‌آمیز روتور در موتورهای سنکرون کوچک مغناطیس دائم به وسیله مریل<sup>۱</sup>، ابداع گردید که به صورت یک موتور چهار قطبی بود. در این ساختار رینگ خارجی موقر دارای شیارهای باریک و عمیقی در بین هر یک از قطب‌های PM می‌باشد. شار ناشی تولیدشده توسط PM می‌تواند به وسیله تغییر در عرض شیارها تنظیم گردد. PMها به وسیله آلنیکو در برابر ضد مغناطیس شوندگی محافظت می‌گردد، زیرا شار آرمیچر که در راه‌اندازی و توقف از میان رینگ-های موقر و شیارهای باریک می‌گذرد سبب از بین رفتن PM می‌شود. PM به کمک مهره‌ای از جنس روی و آلومینیوم بر روی محور سوار می‌شود.

#### ۲-۴-۲: موتور با PM درونی<sup>۲</sup>

در روتورهای با مغناطیس داخلی، مغناطیس‌ها دارای مغناطیس شوندگی شعاعی هستند. در این طرح راکتانس سنکرون محور d کوچک‌تر از راکتانس سنکرون محور q می‌باشد چرا که شار

<sup>۱</sup>F.w.merrill

<sup>۲</sup>Interior-type Pm Motor

مغناطیسی محور  $q$  می‌تواند از قطعات آهنی قطب بگذرد، بدون آنکه از PMها عبور کند.

## ۲-۴-۲-۳: موتور با PM رویه‌ای<sup>۱</sup>

در روتورهای با مغناطیس رویه‌ای مغناطیس‌ها می‌تواند به صورت شعاعی و یا به صورت محیطی مغناطیس شوند معمولاً یک سیلندر غیر فرو مغناطیس با رسانایی بالا استفاده می‌گردد تا PM را در برابر ضد مغناطیس شوندگی به وجود آمده توسط واکنش آرمیچر محافظت کرده، همچنین گشتاور راه‌اندازی غیر سنکرون را فراهم آورد. لذا همانند سرعت‌گیر عمل می‌نماید، اگر در این طرح از PMهای کمیاب زمینی استفاده گردد راکتانس‌های سنکرون محور  $d$  و محور  $q$  عملاً باهم برابر خواهند بود.

## ۲-۴-۲-۴: موتور با PM فرورفته<sup>۲</sup>

در موتورهای با PM فرورفته (inset)، PMها به صورت شعاعی مغناطیس شده‌اند و در شیارهای کم عمق قرار می‌گیرند مدار مغناطیسی روتور می‌تواند به صورت مورق و یا از آهن یکپارچه باشد. در این طرح نیز راکتانس سنکرون محور  $q$  از محور  $d$  بزرگتر می‌باشد.

## ۲-۴-۲-۵: موتور با مغناطیس توزیع شده<sup>۳</sup>

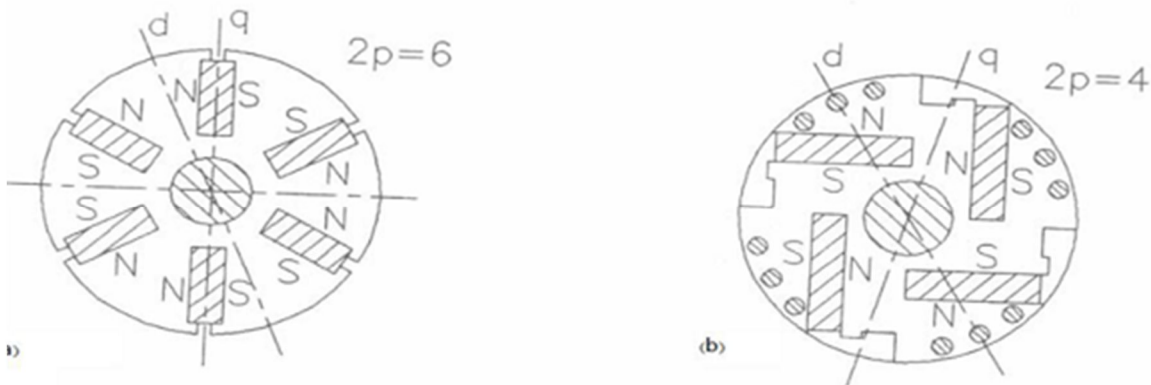
موتورهای با مغناطیس توزیع شده (buried) دارای PMهای مغناطیس شده به صورت محیطی می‌باشند که در شیارهای عمیق قرار گرفته‌اند. گشتاور راه‌اندازی آسنکرون یا به وسیله‌ی سیم‌پیچی قفسی موجود در شیارهای روی کفشک قطب‌ها تأمین می‌گردد و یا به وسیله‌ی کفشک قطب‌های یکپارچه ساخته شده از فولاد نورد شده. راکتانس محور  $q$  بزرگتر از محور  $d$  می‌باشد. عرض پل‌های آهنی ما بین انتهای داخلی مغناطیس‌های مجاور باید با دقت انتخاب گردد.

<sup>1</sup>Surface PM Motor

<sup>2</sup>Inseto - type PM Rotor

<sup>3</sup>Buried PM Motor

استفاده از یک محور غیر فرومغناطیسی ضروری است چرا که با محور فرو مغناطیسی بخش عمده‌ای از شار مغناطیسی به طور غیرمفید از میان محور می‌گذرد. جهت افزایش شار حلقه عبوری در شکاف هوایی این نوع روتورها، باید به وسیله‌ی یک محور غیر فرومغناطیسی تجهیز گردد.



شکل ۵-۲: ساختمان روتور توزیع‌شده: (a) متقارن (b) نامتقارن [28]

روتورهای دارای مغناطیس توزیع‌شده دارای دو طرح توزیع‌شده متقارن و یا توزیع‌شده نامتقارن می‌باشد (شکل ۵-۲).

## ۵-۲: موتورهای سنکرون بزرگ

واضح است که در مورد همه‌ی طرح‌های الکترومغناطیسی و ماشین‌های الکتریکی با افزایش قدرت خروجی، نسبت تلفات انرژی به قدرت خروجی کمتر می‌شود. بدین معنی که با بالا رفتن قدرت نامی در موتورهای الکتریکی راندمان نیز افزایش می‌یابد موتورهای سنکرون بزرگ مغناطیس دائم می‌توانند راندمان بالاتری را در مقایسه با دیگر موتورهای الکتریکی داشته باشند تنها محدودیت موجود قیمت بالای مواد PM می‌باشد. در موتورهای سنکرون بزرگ سیستم خنک کن طبیعی گاهی اوقات کافی نیست و استاتور باید با جریان چرخشی آب در بدنه استاتور خنک شود. ابعاد اصلی یک موتور الکتریکی ( قطر داخلی استاتور و طول موثر هسته استاتور ) به وسیله قدرت نامی، سرعت، چگالی شار

میدان مغناطیسی در شکاف هوایی و چگالی جریان خط آرمیچر تعیین می‌شود. چگالی شار مغناطیسی شکاف هوایی به وسیله‌ی چگالی جریان شار پس ماند مغناطیسی PMها و چگالی شار اشباع مغناطیسی هسته فرو مغناطیسی محدود می‌شود. چگالی جریان نامی خط را می‌توان با بالا بردن شدت خنک‌کنندگی بالا برد. در قطر داخلی معینی از استاتور، جرم موتور را با بکار گرفتن تعداد قطب‌های بیشتر می‌توان کاهش داد.

## فصل سوم

معرفی موتور سنکرون پسماند آهنربای دائم

موتور سنکرون آهنربای دائم از مزایای متعددی مانند راندمان بالا، ضریب توان بالا و پایداری مناسب برخوردار است. عملکرد نرم بدون جاروبک و ساختار ساده روتور در موتور آهنربای دائم به ویژه در کاربردهای با سرعت بالا اهمیت ویژه‌ای دارد. اما وقتی موتور آهنربای دائم در فرکانس خط کار می‌کند، گشتاور راه‌اندازی ندارد. در طراحی مرسوم با کمک سیم‌پیچی قفسی، گشتاور شتاب‌دهنده لازم را ایجاد می‌کنند [۳۱].

از طرف دیگر موتور پسماند را داریم که دارای ساختار ساده، عملکرد نرم و گشتاور خود راه‌انداز است. ولی از محدودیت‌هایی مثل، جریان مغناطیس‌کنندگی بالا، ضریب توان پایین و راندمان کم رنج می‌برد. سه راه کار معمول برای کاهش این عیوب عبارت‌اند از: (۱) اضافه کردن یک گشتاور سنکرون دیگر به گشتاور پسماند و (۲) استفاده از رینگ پسماند بزرگ‌تر. (۳) تحریک اضافی کوتاه‌مدت<sup>۱</sup> می‌باشد. تحریک اضافی کوتاه‌مدت به این معنی است که ولتاژ ورودی  $V_i$  اعمالی به موتوری که در سرعت سنکرون مشغول کار است به طور پیوسته تا یک مقدار  $nV_i$  ( $n > 1$ ) افزایش یافته و سپس به طور پیوسته تا  $V_i$  کاهش می‌یابد. ضریب  $n$  به عنوان ضریب تحریک اضافه نامیده می‌شود. مزیت استفاده از تحریک اضافه آن است که لازم نیست ساختار خود موتور تغییری کند.

امروزه محققینی چند به این فکر افتاده‌اند که با ترکیب موتور پسماند و آهنربای دائم، معایب موتورهای پسماند با سرعت‌های متفاوت را در حد امکان برطرف نمایند و بر مزایای برجسته موتورهای پسماند بیفزایند. با توجه به مزایا و معایب بیان‌شده برای دو موتور پسماند و آهنربای دائم، چنین به نظر می‌رسد که موتورهای پسماند و آهنربای دائم مکمل یکدیگر باشند. این موتور ترکیبی که در آن آهنرباهای دائم و ماده پسماند در القای ولتاژ ضد محرکه در سیم‌پیچی آرمیچر نقش دارند، موتور سنکرون پسماند مغناطیس دائم نامیده می‌شوند. هر چند این موتورها با ساختارهای متنوع قابل

<sup>1</sup> Short Duration Over excitation



طراحی و ساخت هستند ولی در این بین فقط موتورهای ترکیبی نوع استوانه‌ای آن هم به صورت بسیار اندک مورد توجه و بررسی قرار گرفته‌اند. به ویژه هیچ گزارش مکتوبی در رابطه با موتورهای ترکیبی شار محوری در دسترس نمی‌باشد. اندک توجهی نیز که به موتور ترکیبی استوانه‌ای شده است معطوف به حفظ ساختار و ویژگی‌های موتور پسماند و بهبود عملکرد آن با به‌کارگیری مواد مغناطیس دائم در کنار مواد پسماند می‌باشد. ساختار مورد استفاده در آن گزارش‌ها نیز مناسب نبوده است و بنابراین منجر به نتایج چشم‌گیری نشده است. به‌کارگیری مقدار مناسب از مواد مغناطیس دائم در یک موتور پسماند با ساختار شار محوری ابتکاری جدید، می‌تواند باعث بهبود مشخصه‌های عملکردی موتورهای پسماند تخت شود. همچنین به‌کارگیری مواد پسماند در کنار مواد آهنربای دائم در موتورهای مغناطیس دائم نیز می‌تواند ضمن حل مسئله راه‌اندازی موتورهای مغناطیس دائم بر بعضی از معایب دیگر این ماشین‌ها نیز فائق آید. بدین ترتیب این موتورها می‌توانند کاربردهای بسیار وسیعی مثلاً در خودروهای برقی، پمپ‌های کمپرسورها، ربات‌ها و درایوهای صنعتی دقیق، ژيروسکوپ-ها و .... که به عملکرد نرم و با راندمان بالا احتیاج دارند، داشته باشند.

در کنار تمامی مزایایی که افزودن آهنربا به موتور پسماند و یا ماده پسماند به موتور آهنربای دائم به دنبال دارد، قطعاً معایبی نیز از قبیل کاهش بالانس مکانیکی و تقارن الکترومغناطیسی موتورهای پسماند و احیاناً کاهش بهره موتور آهنربای دائم متصور است. این موضوعات به خصوص ساختار انتخابی، نحوه طراحی و نسبت ترکیب، در میزان لرزش، نویزهای صوتی و مخبراتی، نوسانات سرعت و گشتاور و بهره موتور موثر هستند. با توجه به این مسائل سؤال اساسی در انتخاب ساختار این است با تلفیق این دو نوع موتور به کدام هدف می‌خواهیم دست یابیم، بهبود عملکرد موتور پسماند یا بهبود عملکرد موتور PM. به طور مثال اگر بخواهیم مشکل راه‌اندازی موتور PM را برطرف کنیم می‌توانیم رینگ پسماند را به موتور اضافه کنیم.

تئوری عملکرد موتور سنکرون پسماند آهنربای دائم بسیار مشابه عملکرد هر دو موتور پسماند و

آهنربای دائم می‌باشد. در ابتدای راه‌اندازی تأثیر منفی گشتاور ترمزی ناشی از آهنربای دائم، توسط گشتاور پسماند و جریان ادی خنثی می‌شود. پس از اتصال موتور به یک مجموعه ولتاژ متعادل، موتور با وجود گشتاورهای پسماند و فوکوی ناشی از رینگ پسماند و گشتاور ضربانی ناشی از وجود آهنرباهای دائم راه‌اندازی می‌شود و در صورتی که گشتاور بار از ماکزیمم گشتاور موتور (در حالت آسنکرون) کمتر باشد تا سرعت سنکرون شتاب می‌گیرد. در سرعت سنکرون، موتور دارای گشتاورهای ناشی از آهنرباهای دائم و پسماند خواهد بود.

ایده ساخت موتور ترکیبی موتور پسماند از موتور پسماند رلوکتانسی شروع شد. چنانچه در هر ساختاری از موتور پسماند بتوان روتور آن را به صورت قطب برجسته ساخت، مؤلفه گشتاور رلوکتانسی همانند موتور رلوکتانسی تولید خواهد شد که با گشتاور پسماند (ناشی از رینگ پسماند) در سرعت سنکرون جمع می‌شود. در تمام سرعت‌های زیر سرعت سنکرون، برجستگی روتور تولید گشتاور ضربانی می‌کند. وقتی سرعت روتور به سرعت سنکرون برسد، روتور در یک موقعیت مشخص نسبت به میدان استاتور ثابت می‌شود. این موقعیت توسط محورهای برجستگی و گشتاور بار تعیین می‌گردد. در نتیجه گشتاور ماکزیمم در سرعت سنکرون، ترکیب گشتاور رلوکتانسی و گشتاور پسماند خواهد شد که بیشتر از گشتاور موتور پسماند ساده است. همین موضوع ایده‌ای برای ساخت موتور پسماند هیبرید گشت. ایجاد برجستگی بر روی رینگ پسماند با به وجود آوردن شیارهای متقارنی بر روی سطح خارجی رینگ پسماند قابل اجراست. موتور پسماند رلوکتانسی حاصل، علی‌رغم اینکه مشکل هانتینگ آن تا حدودی برطرف شده است اما همچنان دارای معایبی از قبیل ضریب توان و بازده پایین (به دلیل افزایش تلفات پارازیتیک ناشی از نوسانات شار در شیارهای ایجادشده در سطح خارجی رینگ پسماند) و جریان مغناطیس‌کنندگی بالا خواهد بود. چنانچه شیارها بر روی سطح داخلی رینگ پسماند ایجاد شود که دشواری‌های خاص خود را دارد، مشکلات مذکور تا حدودی مرتفع می‌گردند اما باز هم به دلیل قابل توجه نبودن گشتاور رلوکتانسی حاصل، صرفه لازم را ندارد. لذا محققان بر آن شدند تا از مغناطیس دائم در ترکیب با رینگ پسماند صاف استفاده کنند [32].

دلایل عمده عدم توجه کافی به این موتورها را به صورت زیر می‌توان بیان کرد:

ترکیبات تا کنون ارائه شده در نوع استوانه‌ای نتایج قابل قبولی را ارائه نداده است.

ماشین پسماند، یک ماشین توان پایین با سرعت بسیار بالا می‌باشد، در حالی که ماشین‌های

PM در توان‌های نسبتاً بالا و سرعت‌های پایین ساخته می‌شوند.

اندک مطالعات انجام شده در مورد ساختارهای خاص نظامی و حساس بوده که به طور محسوس

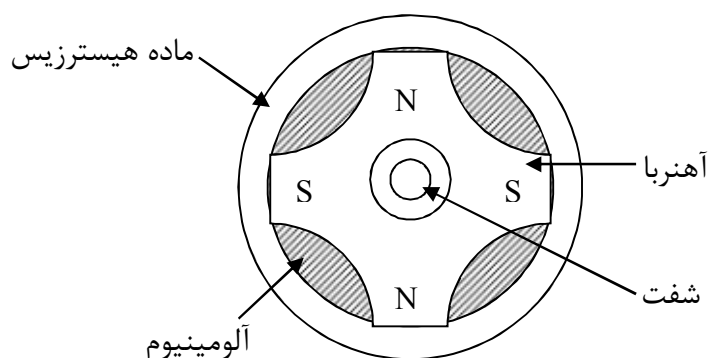
گزارش‌ها آن منتشر نشده است.

### ۲-۳: تاریخچه و مطالعات انجام شده

پیرف<sup>۱</sup> در سال ۱۹۵۹ اولین موتور پسماند آهنربای دائم را ساخت. او با افزودن آهنربای دائم به

موتور پسماند عملکرد موتور پسماند را بهبود داد. آهنربای دائم در این موتور گشتاوری تولید می‌کند

که به گشتاور پسماند افزوده می‌شود [33].



شکل ۳-۱: ساختار روتور موتور PMHS ارائه شده توسط پیرف

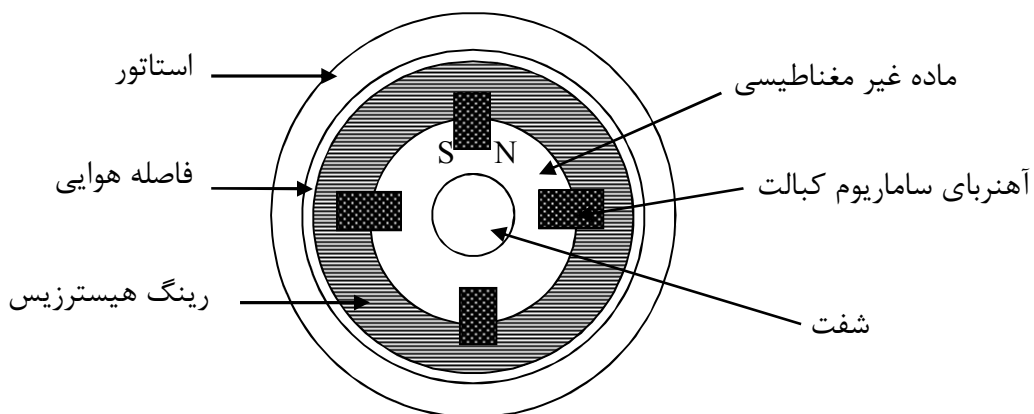
در سال‌های بعد رحمان و همکارانش، ۱۹۸۴، اثر اضافه کردن آهنربای دائم ساماریوم-کبالت را

به موتور پسماند چند فاز استوانه‌ای تحت ساختار نشان داده شده در شکل ۳-۲ بررسی کردند [34].

آن‌ها نشان دادند که استفاده از این آهنربا نسبت به آهنرباهای دیگری مانند آلنیکو۵، به دلیل افزایش

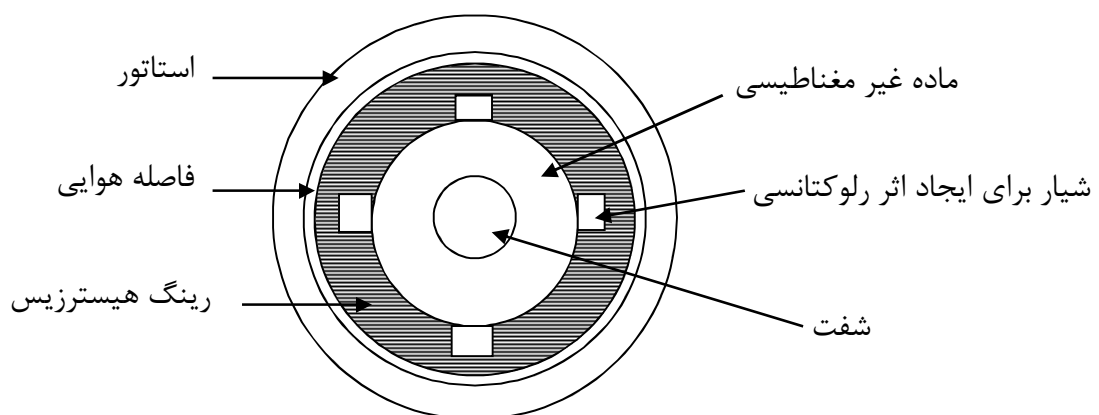
<sup>۱</sup>Perov

ولتاژ تحریک فاصله هوایی عملکرد ماشین را بهبود می‌بخشد.



شکل ۳-۲: ساختار موتور PMHS ارائه شده توسط رحمان و همکارانش

در ادامه رحمان و اوشیبا<sup>۱</sup> در سال ۱۹۸۵ عملکرد حالت دائمی موتور پسماند رلوکتانسی استوانه‌ای با ساختار جدیدی را مورد بررسی قرار دادند [35]. در این ساختار (شکل ۳-۳) با ایجاد شیارهایی در سطح داخلی رینگ پسماند، برجستگی‌های مغناطیسی به وجود آمده است و در سال ۱۹۹۰ رفتار دینامیکی و حالت دائم موتور پسماند رلوکتانسی با ساختار معرفی شده را در حالت تغذیه با منبع تک فاز به همراه متعادل کننده‌های فاز، مورد بررسی قرار دادند [36].

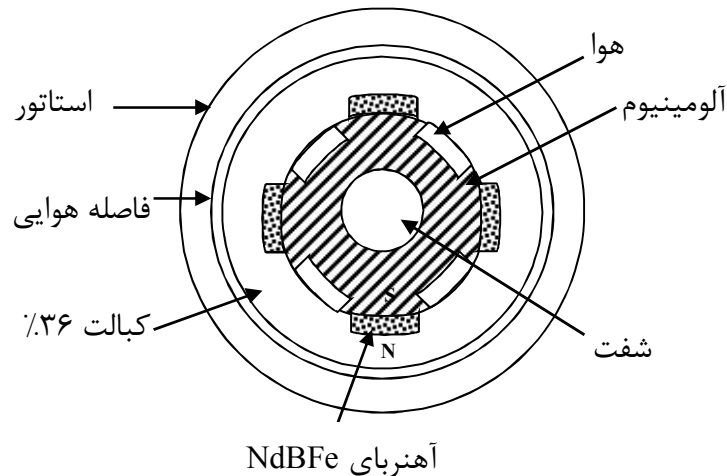


شکل ۳-۳: ساختار موتور پسماند رلوکتانسی ارائه شده توسط رحمان و اوشیبا

رحمان در سال ۱۹۹۱، با اضافه کردن آهنربای دائم به رینگ پسماند، ساختار نشان داده شده

<sup>۱</sup>Osheiba

در شکل ۳-۴ را ثبت اختراع کرد، که در این ساختار نیز شیارهایی در سطح رینگ ایجاد شده است [37].



شکل ۳-۴: ساختار موتور PMHS ارائه شده توسط رحمان

در ادامه رحمان و کین<sup>۱</sup> در سال ۱۹۹۶ موتور سنکرون پسماند آهنربای دائم با ساختار ارائه شده در شکل ۳-۴ را مورد بررسی قرار داده و رفتار آن را با استفاده از متغیرهای حالت موتور در حوزه زمان پیش‌بینی کردند [38]. کین و رحمان در سال ۲۰۰۳ مدار معادل مغناطیسی محورهای d-q را به دست آوردند و بر اساس همین مدار معادل استراتژی کنترل موتور سنکرون پسماند آهنربای دائم را طراحی کردند [39]. و در سال ۲۰۰۴ کوریهارا<sup>۲</sup> و رحمان با استفاده از روش اجزاء محدود به تحلیل این موتور پرداختند [40].

اما ساختارهای ارائه شده در مقالات دارای معایبی است. از آنجا که معمولاً رینگ پسماند به صورت فویل ساخته می‌شود، لذا امکان ایجاد شیار در آن به منظور جاسازی آهنربا بسیار مشکل خواهد بود. از طرف دیگر چگالی توان در ماشین استوانه‌ای نسبت به ساختار تخت پایین خواهد بود. در این ساختارها مسیر صحیحی برای بسته شدن شار آهنربا انتخاب نشده است چرا که آهنرباها در

<sup>۱</sup>Qin  
<sup>۲</sup>Kurihara

راستای شعاعی قرار داده شده‌اند و از طرفی نگه‌دارنده آهنربا از جنس مواد غیر مغناطیسی انتخاب شده است که این امر باعث تضعیف شار آهنربا خواهد شد.

موتور پسماند رلوکتانسی نسبت به موتور پسماند معمولی در بازده، ضریب توان و گشتاور ماکزیمم حالت سنکرون دارای مشخصه بهتری می‌باشد. در ساختار ترکیبی موتور پسماند رلوکتانسی باید روتور به صورت قطب برجسته ساخته شود. چنین ساختاری در مرحله معرفی اجمالی در یک یا چند مقاله باقی مانده است. بدیهی است موتور تلفیقی پسماند-رلوکتانسی در شرایط عملکرد دائمی علاوه بر گشتاور پسماند دارای مؤلفه گشتاور رلوکتانسی نیز خواهد بود ولی در رژیم عملکردی آسنکرون یا شرایط کار زیر سرعت سنکرون، برجستگی موجود در روتور، جز مزاحمت‌های تولید گشتاور ضربانی هیچ مزیت عملکردی خاصی را دارا نمی‌باشد. مزیت‌های عمده وجود برجستگی در روتور مربوط به شرایط عملکرد ماشین در سرعت سنکرون می‌باشد. از مزیت‌های عمده وجود برجستگی در روتور ماشین پسماند شاید بتوان به دو مورد تولید مؤلفه گشتاور اضافی تحت عنوان گشتاور رلوکتانسی و موضوع مهم جلوگیری از پدیده هانتینگ و یا نوسانات روتور اشاره کرد. به هر حال اگر طراحی برجستگی‌های روی رینگ پسماند به درستی انجام نگیرد ماشین هیبریدی طراحی شده شاید نتواند عملکرد نرم و بدون نویز مورد انتظار از ماشین‌های پسماند سرعت بالای معمول را برآورده نماید.

فرآیند مطالعاتی در این پایان‌نامه پس از جمع‌آوری اطلاعات و داده‌های نرم‌افزاری با طراحی و مدل‌سازی بخش‌های مغناطیس دائم و پسماند موتور ترکیبی ادامه می‌یابد. در واقع با اجرای این فرآیند داده‌های مربوط به پارامترهای مداری با تاکید بر رفتار حالت دائمی موتور استخراج و شبیه‌سازی مدل موتور شار محوری ترکیبی پسماند-مغناطیس دائم در فضای سیمولینک نرم‌افزار متلب انجام می‌گیرد.

## فصل چهارم

طراحی، مدل سازی و بررسی عملکرد موتور

پسماند آهنربای دائم

#### ۴-۱: مقدمه

ترکیب موتور سنکرون آهنربای دائم با موتور پسماند با دو دیدگاه صورت می‌پذیرد. دیدگاه اول، ترکیب رینگ پسماند در موتور سنکرون آهنربای دائم به جهت رفع نواقص موتور سنکرون آهنربای دائم خواهد بود که موتور سنکرون آهنربای دائم پسماند را نتیجه می‌دهد و دیدگاه دوم، ترکیب آهنربای دائم در موتور پسماند به جهت رفع نواقص موتور پسماند است که موتور سنکرون پسماند آهنربای دائم را نتیجه می‌دهد در موتور سنکرون آهنربای دائم پسماند، رینگ پسماند به دلیل ایجاد گشتاور راه‌اندازی در موتور سنکرون آهنربای دائم، به روتور آن اضافه شده است. موتور سنکرون آهنربای دائم معمولاً در کاربردهای توان و گشتاور بالا استفاده می‌شود. چنانچه این موتور تحت بار راه‌اندازی شود، رینگ پسماند مورد نیاز برای ایجاد گشتاور راه‌اندازی در چنین شرایطی بسیار بزرگ و از مواد گران‌قیمت خواهد بود. همچنین از آنجایی که بهره‌موتور پسماند پایین است، بنابراین پیش‌بینی می‌شود که این ترکیب برای این شرایط از لحاظ اقتصادی به صرفه نخواهد بود. بر همین اساس می‌توان گفت که به‌کارگیری موتور آهنربای دائم پسماند در کاربردهای توان و گشتاور پایین منطقی‌تر خواهد بود.

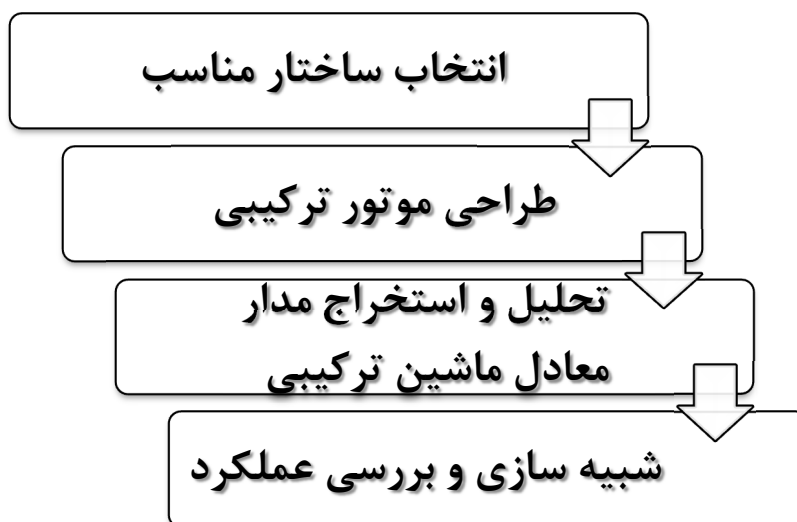
در موتور پسماند آهنربای دائم، آهنربای دائم به دلیل افزایش بازده و ضریب توان موتور پسماند و کاهش هانتینگ، به روتور آن اضافه شده است. ویژگی اصلی موتور پسماند که استفاده از آن را توجیه می‌کند، عملکرد نرم و با نویز بسیار پایین آن می‌باشد. هر چند که اضافه کردن آهنربای دائم به روتور موتور پسماند این ویژگی را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

اضافه کردن دیسک پسماند به موتور PM باعث نتایج مثبتی برای موتور آهنربای دائم می‌شود. از جمله این نتایج همان‌طور که گفته شده گشتاور راه‌اندازی موتور آهنربای دائم را فراهم می‌کند. همچنین از جمله معایب موتور آهنربای دائم نوسانات سرعت سنکرون می‌باشد، که با اضافه شدن رینگ پسماند، این نوسانات کاهش می‌یابد و در سرعت سنکرون موتور سریع‌تر میرا می‌شود [۳۱].



ساختار مورد نظر این پروژه موتور سنکرون شار محوری دو دیسکی ترکیبی آهنربای دائم و پسماند می‌باشد. این ماشین از یک هسته استاتور رول شده بدون شیار با سیم‌پیچی تروئیدال که از دو طرف توسط یک دیسک حاوی آهنربای دائم و دیسک دیگر پسماند محصور شده است، تشکیل می‌شود. ایده به‌کارگیری ماشین‌های سنکرون پسماند شار محوری دو طرفه برای اولین بار در دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود ارائه شده است.

در نهایت فرآیند مطالعاتی برای موتور PMHS را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت (شکل ۱-۴).



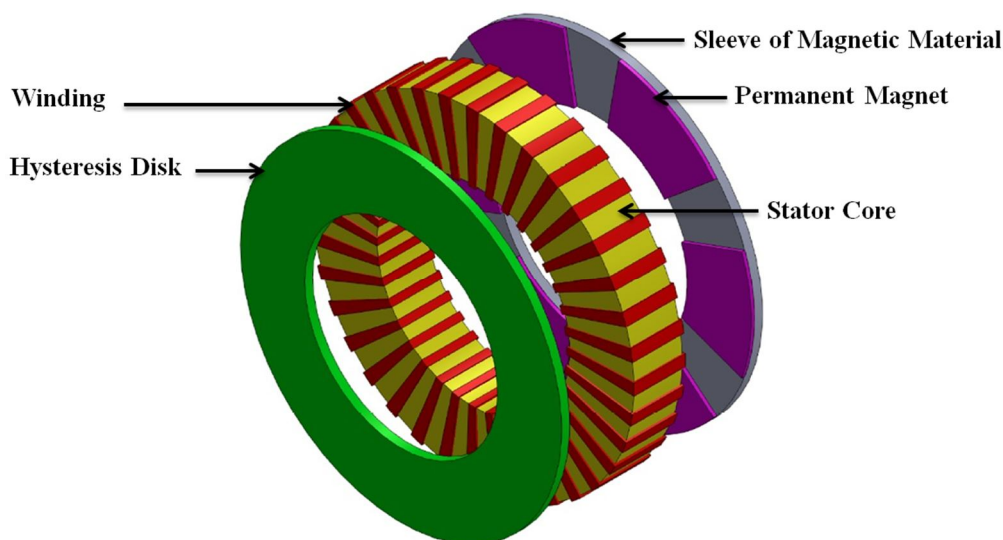
شکل ۱-۴: فرآیند مطالعاتی برای موتور PMHS

#### ۲-۴: ساختار موتور PMHS نوع تخت پیشنهادی

هر یک از ماشین‌های پسماند و یا مغناطیس دائم شار محوری را می‌توان به صورت یک طرفه، دو طرفه، یک طبقه، چند لایه، چند فاز، بدون شیار، با شیار، بدون هسته آهنی، با هسته آهنی، با مغناطیس‌های دائم سطحی و با مغناطیس‌های دائم داخلی ساخت. این تنوع ساختاری ماشین‌های شار محوری تنوع انتخاب‌های مشابه‌ای را نیز برای موتورهای تلفیقی PMHS فراهم می‌کند.

بهترین و ساده‌ترین ساختار، که ساختار مورد نظر این پروژه است، موتور سنکرون شار محوری دو دیسکی ترکیبی آهنربای دائم و پسماند می‌باشد. این ماشین از یک هسته استاتور رول شده بدون شیار با سیم‌پیچی تروئیدال که از دو طرف توسط یک دیسک حاوی آهنربای دائم و دیسک دیگر پسماند محصور شده است، تشکیل می‌شود.

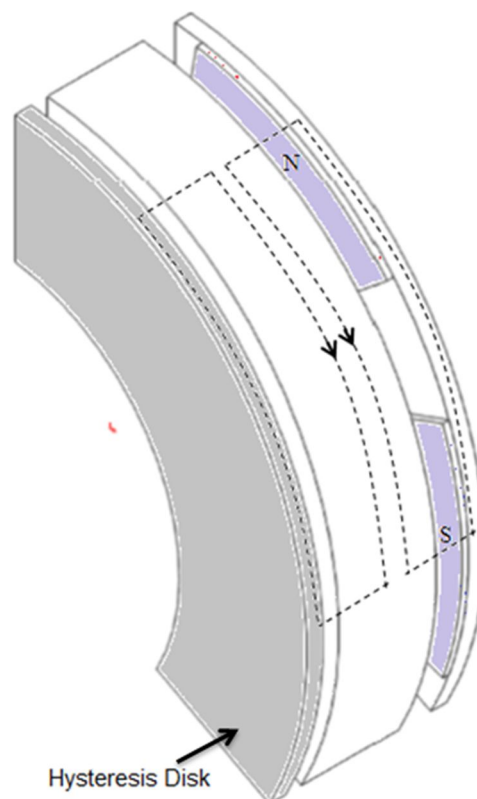
این ساختار الهام گرفته از همان ساختار موتور سنکرون آهنربای دائم یا موتور پسماند TORUS می‌باشد. به این صورت که دارای یک استاتور داخلی و دو روتور خارجی است. یک روتور از دیسک پسماند و دیگری از مگنت‌های سوار شده بر روی دیسک نگه‌دارنده تشکیل شده‌اند. این ساختار در شکل ۲-۴ نشان داده شده است.



شکل ۲-۴: ساختار موتور PMHS نوع تخت پیشنهادی

در این ساختار، استاتور به صورت بدون شیار انتخاب شده است. وجود شیار باعث به وجود آمدن نوساناتی در شار فاصله هوایی شده (ریپل دندانه) و در نتیجه تلفات پارازیتیک شار را افزایش می‌دهد و از آنجا بازده ماشین به شدت کاهش می‌یابد.

جنس ماده نگه‌دارنده مگنت‌ها از جنس مواد مغناطیسی انتخاب شده تا مسیر شار در آن با کمترین تضعیف بسته شود. بنابراین، شار در فاصله‌های هوایی و هسته استاتور در راستای محور و در دیسک پسماند و دیسک نگه‌دارنده مگنت‌ها در راستای محیطی خواهد بود. این موضوع در شکل ۳-۴ قابل مشاهده است. از آنجایی که مگنت‌ها روی سطح دیسک قرار گرفته‌اند، ماشین به صورت قطب صاف تلقی می‌شود، که باعث کاهش نويز می‌شود.



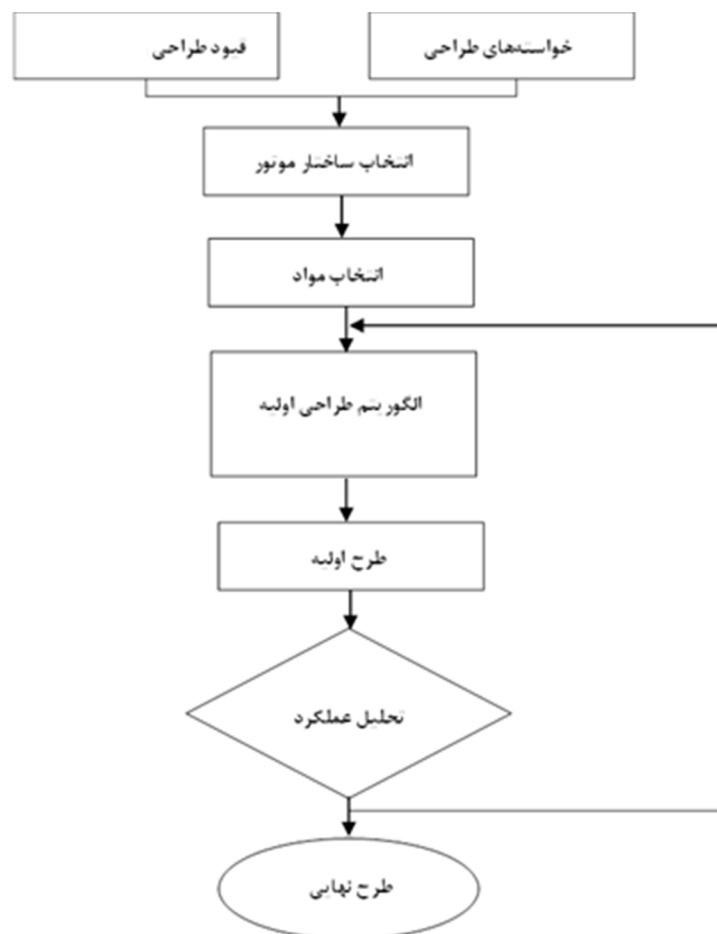
شکل ۳-۴: مسیر شار در دیسک‌ها

#### ۳-۴: طراحی ماشین سنکرون پسماند آهنربای دائم PMHS

با توجه به ساختار معرفی شده در بخش قبل برای طراحی این موتور دو روش می‌توان در نظر گرفت. در روش اول طراحی موتور پسماند و بعد اضافه کردن دیسک آهنربای دائم جهت بهبود عملکرد موتور پسماند می‌باشد. همان طور که ذکر شد آهنربای دائم به دلیل افزایش بازده و ضریب توان موتور پسماند و کاهش هانتینگ، به روتور آن اضافه شده است. ویژگی اصلی موتور پسماند که استفاده از آن را توجیه می‌کند، عملکرد نرم و با نویز بسیار پایین آن می‌باشد. اما اضافه کردن آهنربای دائم به روتور موتور پسماند این ویژگی‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد و همچنین ماشین آهنربای دائم یک موتور با رنج قدرتی بالا می‌باشد، درحالی که موتور پسماند یک موتور با رنج توان پایین می‌باشد. لذا طراحی ماشین آهنربای دائم در اندازه ماشین پسماند مورد نظر مشکلات زیادی دارد. از جمله این که، آهنربای اضافه شده باید بسیار کوچک باشد تا توان بر توان هیستریزیس غلبه نکند.

در روش دوم، طراحی موتور سنکرون آهنربای دائم و اضافه کردن یک دیسک پسماند به آن می‌باشد. رینگ پسماند به دلیل ایجاد گشتاور راه‌اندازی در موتور سنکرون آهنربای دائم، به روتور آن اضافه شده است. موتور سنکرون آهنربای دائم معمولاً در کاربردهای توان و گشتاور بالا استفاده می‌شود. چنانچه این موتور تحت بار راه‌اندازی شود، رینگ پسماند مورد نیاز برای ایجاد گشتاور راه‌اندازی در چنین شرایطی بسیار بزرگ و از مواد گران‌قیمت خواهد بود. بر همین اساس در کاربردهای توان و گشتاور پایین منطقی خواهد بود. اما در توان‌های پایین ماشین آهنربای دائم، طراحی یک ماشین پسماند با توان پایین به جهت راه‌انداز ماشین آهنربای دائم امکان‌پذیر می‌باشد. همچنین نوسانات سرعت سنکرون را کاهش می‌دهد و در سرعت سنکرون موتور سریع‌تر میرا می‌شود. در این پایان‌نامه با توجه به هدف طراحی یک موتور ترکیبی سنکرون آهنربای دائم پسماند که یک رینگ پسماند به موتور آهنربای دائم اضافه می‌شود، روش دوم مورد استفاده قرار گرفته است. در ابتدا یک موتور آهنربای دائم با ساختار یک دیسک استاتور بدون شیار با سیم‌پیچی تروئیدال و یک دیسک

روتور با PMهایی در سطح دیسک طراحی می‌شود و بعد یک دیسک پسماند به آن اضافه می‌گردد. در این مرحله ضخامت دیسک پسماند، جهت بررسی عملکرد بهینه موتور نیز به دست می‌آید. در این بخش روند طراحی ساختار و ابعاد اساسی ماشین شار محوری مغناطیس دائم پسماند با جزئیات لازم ارائه می‌شود. الگوریتم طراحی کلی ماشین در مرحله اول شامل تعیین پارامترهای اصلی یا خواسته‌های طراحی و محدودیت‌های کلی ماشین مورد نظر می‌باشد. در هر مسأله طراحی ماشین مجموعه‌ای از متغیرهای ابعادی و الکترومغناطیسی با مقادیر نامعلوم وجود دارند که تحت عنوان پارامترهای طراحی ماشین شناخته می‌شوند. از آنجایی که در مسائل طراحی ماشین همواره تعداد مجهولات از معادلات بیشتر است، برخی از پارامترهای طراحی باید به عنوان پارامترهای انتخابی تعیین شوند و مقادیر سایر پارامترها از روی آن‌ها محاسبه گردند.



شکل ۴-۴: الگوریتم طراحی ماشین

در ابتدا، طراحی موتور سنکرون PM صورت می‌گیرد. سپس یک رینگ پسماند به موتور افزوده

و عملکرد موتور در ضخامت‌های مختلف دیسک را بررسی می‌کنیم. در قسمت بعد معادلات مورد استفاده در طراحی هر یک از دو ماشین آهنربای دائم و پسماند تعیین می‌شود. در نهایت با استفاده از مدل تحلیلی عملکرد دو موتور مقایسه می‌شود.

#### ۴-۴: طراحی موتور PM تک روتور

در این پایان‌نامه طراحی ماشین آهنربای دائم به طور خلاصه بیان می‌گردد. توضیح کامل آن در مرجع [۳۰] ارائه شده است. بر این اساس فقط پارامترهای در نظر گرفته‌شده در طراحی ماشین و برخی از فرمول‌های کاربردی در طراحی ماشین معرفی می‌گردد، که بر اساس آن برنامه طراحی موتور PM تک روتور نوشته شده است. همچنین به این نکته توجه شود که برخی معادلات جهت طراحی موتور PM تک روتور می‌باشد.

#### ۴-۴-۱: پارامترهای طراحی

۱. ولتاژ نامی مؤثر فازی ترمینال ماشین ( $V_{ph\_rms}$ ) بر حسب ولت  
 $V_{ph\_rms} = 135/\sqrt{2}$
۲. سرعت چرخش نامی موتور بر حسب دور در دقیقه  
9000 rpm
۳. توان خروجی (مکانیکی) کل  $P_{out}$   
300 W
۴. تعداد فازها  $m$   
3
۵. نوع اتصال سیم‌پیچی‌های استاتور  
Y
۶. تعداد مسیرهای موازی جریان  $a_p$   
1
۷. مقاومت ویژه هادی (مس)  $\rho_{cu}$   
 $2.0052 \times 10^{-8} \Omega.m$
۸. ضریب سیم‌پیچی  $K_w$   
1
۹. ضریب پر شوندگی مس  $K_{cu}$   
1
۱۰. طول فاصله هوایی  $g$   
0.5 mm

۱۱. چگالی شار باقیمانده<sup>۱</sup> آهنربای دائم  $B_r$  (آهنربای سوماریوم-کبالت با کد SmCo 2:17) 1 T

۱۲. شدت میدان مغناطیس‌زدای یا خنثی‌کننده<sup>۲</sup> آهنربای دائم  $H_c$  756000 A/m

۱۳. ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی آهنربای دائم  $\mu_{rpm}$  1.0526

ضریب نفوذپذیری مغناطیسی آهنربای دائم ( $\mu_{pm}$ ) به صورت (۱-۴) تعریف می‌گردد .

$$\mu_{pm} = \frac{B_r}{H_c} = \mu_{rpm} \mu_0 \quad (1-4)$$

۱۴. ماکزیمم مقدار چگالی شار در هسته روتور  $B_{cr}$  1.6 T

۱۵. ضریب قدرت  $0.9 \leq \cos \varphi \leq 1$

۱۶. راندمان  $0.94 \leq \eta \leq 1$

۱۷. ضریب نشت شار  $0.75 \leq K_d \leq 1$

۱۸. فرکانس تغذیه استاتور ( $f$ ) بر حسب هرتز 150 Hz

ماشین PM یک ماشین قدرتی و سرعت پایین می‌باشد و معمولاً تا سرعت کمتر از ۳۰۰۰ دور در دقیقه طراحی می‌شود. از طرف دیگر ماشین سنکرون پسماند یک ماشین سرعت بالا می‌باشد. بنابراین باید در ماشین PMHS خواسته سرعتی هر دو ماشین را در نظر گرفت. انتخاب فرکانس 150 Hz نیز به این دلیل می‌باشد.

۱۹. مقدار ولتاژ القایی یا back emf در هر فاز  $E_{fpm} = 95 / \sqrt{2}$

۲۰. چگالی جریان هادی‌های استاتور ( $J_s$ ) بر حسب  $A/m^2$   $2 \times 10^6 \leq J_s \leq 7 \times 10^6$

۲۱. دامنه چگالی شار فاصله هوایی ( $B_g$ ) بر حسب تسلا  $0.3 \leq B_g \leq 0.9$

۲۲. نسبت قوس قطب مغناطیس دائم به گام قطب  $\alpha_i$   $0.6 \leq \alpha_i \leq 0.7$

۲۳. ماکزیمم مقدار چگالی شار در هسته استاتور ( $B_{cs}$ ) بر حسب تسلا  $1 \leq B_{cs} \leq 1.6$

---

1 - Residual Flux Density

2 - Coercive Force

$$10000 \leq A \leq 40000$$

۲۴. بارگذاری الکتریکی ویژه (A) بر حسب A/m

$$\lambda = 0.57$$

۲۵. نسبت قطر داخلی به قطر خارجی  $\lambda$

پارامتر  $\lambda$  عبارت است از نسبت قطر داخلی ( $D_i$ ) به قطر خارجی ( $D_o$ ) (عددی بین صفر و یک)

و با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\lambda = \frac{D_i}{D_o} \quad (۲-۴)$$

$$p=1$$

۲۶. تعداد جفت قطب‌های روتور

۲۷. مقدار مؤثر جریان هر فاز سیم‌پیچی استاتور  $I_{rms}$

$$I_{rms} = \frac{P_{out}}{m V_{ph\_rms} \cos \varphi \eta} \quad (۳-۴)$$

۲۸. مقدار مؤثر جریان در هر مسیر موازی یا جریان هر هادی  $I_{con}$

$$I_{con} = \frac{I_{rms}}{a_p} \quad (۴-۴)$$

۲۹. تعداد دور سیم‌پیچی سری در هر فاز استاتور  $N_s$

تعداد دور سیم‌پیچی سری ( $N_{ph}$ ) در حقیقت اصلی‌ترین و تأثیرگذارترین پارامتر در ولتاژ داخلی

ماشین می‌باشد. مقدار پارامتر  $N_{ph}$  با توجه به مقادیر اتخاذ شده برای بارگذاری الکتریکی ویژه، شار بر

قطب روتور، فرکانس و ولتاژ القایی مطلوب در هر فاز استاتور از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$N_{ph} = \frac{E_{pm}}{2K_w B_g \frac{f}{p} (1 - \lambda^2) D_o^2} \quad (۵-۴)$$

۳۰. تعداد دور سیم‌پیچی بر قطب بر فاز  $q$

$$q = \frac{N_{ph}}{2p} \quad (۶-۴)$$

۳۱. قطر متوسط ماشین  $D_g$

مقدار قطر متوسط ماشین از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:



$$D_g = \frac{2mN_s a_p I_{con}}{2\pi A} \quad (7-4)$$

۳۲. قطر خارجی ماشین  $D_o$

با توجه به مقادیر قطر متوسط ماشین  $(D_g)$  و  $\lambda$ ، قطر خارجی آن  $(D_o)$  به صورت رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$D_o = \frac{2D_g}{1+\lambda} \quad (8-4)$$

۳۳. قطر داخلی ماشین  $D_i$

با توجه به مقادیر قطر خارجی  $(D_o)$  و  $\lambda$ ، مقدار قطر داخلی ماشین  $(D_i)$  با استفاده از رابطه زیر تعیین می‌گردد:

$$D_i = \lambda D_o \quad (9-4)$$

۳۳. طول مؤثر هسته روتور و استاتور در جهت شعاعی (طول شعاعی آهنربا)  $l_i$

این پارامتر مطابق با رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$l_i = \frac{D_o - D_i}{2} = \frac{D_o(1-\lambda)}{2} \quad (10-4)$$

۳۴. مقدار متوسط چگالی شار فاصله هوایی  $B_{avg}$

در این پروژه جهت محاسبه نسبت  $B_{avg}$  به  $B_g$  از رابطه تقریبی زیر استفاده شده است.

$$B_{avg} = 0.78B_g(1+\alpha_i)/2 \quad (11-4)$$

۳۵. طول محوری هسته استاتور  $l_{cs}$

طول محوری استاتور به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$l_{cs} = \frac{\pi B_{avg} D_o (1+\lambda)}{8pB_{cs}} \quad (12-4)$$

۳۶. طول محوری هسته روتور  $l_{cr}$

مقدار طول محوری روتور از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$l_{cr} = 0.83 \frac{\pi B_{avg} D_o (1 + \lambda)}{8 p B_{cr}} \quad (13-4)$$

۳۷. طول محوری آهنربای دائم  $l_{pm}$

$$l_{PM} = \frac{2.4 B_{avg}}{\mu_0 H_c (1 + \alpha_i) \left(1 - \frac{1}{B_r} B_u\right)} (g + l_w) \quad (14-4)$$

۳۸. طول متوسط یک دور سیم‌پیچی  $l_{lav}$

$$l_{lav} = 2(l_i + l_s) \times 1.05 \quad (15-4)$$

۳۹. مقاومت اهمی سیم‌پیچی در هر فاز استاتور  $R_{ph}$

با داشتن طول متوسط هر دور سیم‌پیچی استاتور ( $l_{lav}$ ) و با فرض هادی‌های با سطح مقطع  $s_{str}$  ، مقدار مقاومت اهمی سیم‌پیچی در هر فاز استاتور ( $R_{ph}$ ) با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R_{ph} = \frac{\rho_{cu} l_{lav} N_{ph}}{a_p s_{str}} \quad (16-4)$$

۴۰. راکتانس سنکرون ماشین سه فاز  $X_s$

همچنین مقدار راکتانس سنکرون ماشین به صورت زیر به دست می‌آید:

$$X_s = 2\pi f (L_{aa} - L_{ab}) \quad (17-4)$$

برای به دست آوردن اندوکتانس‌های خودی  $L_{aa}$  و متقابل  $L_{ab}$  سیم‌پیچی‌های ماشین در شرایطی که یکی از فازهای ماشین دارای جریان نامی درحالی‌که دو فاز دیگر دارای جریان صفر می‌باشند محاسبات انجام می‌گیرد. مقادیر اندوکتانس‌های خودی و متقابل توسط روش اجزا محدود<sup>۱</sup> (FEM) محاسبه می‌گردد.

۴۱. تلفات مسی سیم‌پیچی استاتور  $P_{cu\_loss}$

با در دست داشتن مقادیر مقاومت اهمی و جریان مؤثر سیم‌پیچی در هر فاز استاتور، تلفات مسی سیم‌پیچی به سادگی با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

<sup>۱</sup> Finite Element Method

$$P_{cu\_loss} = mR_{ph} I_{rms}^2 \quad (18-4)$$

۴۲. تلفات آهنی هسته استاتور ماشین  $P_{iron\_loss}$

تا کنون معادله مشخصی جهت محاسبه تلفات آهنی هسته استاتور ماشین ارائه نشده است. یک روش محاسبه این پارامتر این است که چگالی حجمی تلفات آهنی هسته استاتور را در حجم هسته استاتور ضرب نمود.

$$P_{iron\_loss} = (47.7 B_{cs}^{1.97} f^{1.39}) \frac{\pi (D_o^2 - D_i^2) l_{cs}}{4} \quad (19-4)$$

#### ۴-۴-۲: نتایج طراحی موتور PM

موتور آهنربای دائم با ساختار یک دیسک استاتور بدون شیار با سیم‌پیچی تروئیدال و یک دیسک روتور با PM‌هایی در سطح دیسک براساس روند و معادلات ذکرشده، طراحی می‌شود. نتایج طراحی در جدول ۴-۱ آمده است.

جدول ۴-۱: نتایج طراحی موتور PM

135 Volt	ولتاژ ورودی $V_{max}$
300 Watt	توان خروجی $P_{out}$
150 Hz	فرکانس $f_s$
9000 rpm	سرعت $n_s$
2	تعداد قطب $p$
0.5 mm	فاصله هوایی $g$
255	تعداد دور سیم‌پیچی در هر فاز $N_{ph}$
18.01 mm	ضخامت استاتور $L_{cs}$
1.23 Amper	جریان بار کامل $I_{Full}$
1	ضریب توان $Pf$
97.57%	بازده $E$
90 mm	قطر خارجی $D_o$
57.1 mm	قطر داخلی $D_i$
21.1 mm	ضخامت روتور $L_{cr}$
1.1 mm	ضخامت PM ها $L_{pm}$
0.93 $\Omega$	مقاومت $R_{ph}$
3.63 H	راکتانس سنکرون $X_s$
1.05 T	چگالی شار استاتور $B_{cs}$
94.5 volt	ولتاژ القایی back emf در هر فاز $(E_{fpm})$

#### ۴-۵: طراحی ماشین پسماند

در طراحی ماشین پسماند با توجه به هدف کاربردی ماشین، پارامترهای متفاوتی از جمله راندمان، ضریب توان، وزن تمام‌شده و هزینه ساخت ماشین را می‌توان محاسبه کرد. در این قسمت بر مبنای مدل مبتنی بر پارامترهای طراحی، یعنی ابعاد ماشین و ساختار سیم‌پیچی، پارامترهای مربوط به ماده پسماند و برخی ملاحظات طراحی، پارامترهای مورد نظر محاسبه می‌شود. مبحث طراحی موتور پسماند نوع تخت بدون شیار به طور کامل در مرجع [۱] ارائه شده است. لذا در این پایان‌نامه از توضیح مجدد آن خوداری نموده و فقط موضوعات مهم آن بیان می‌شود.

#### ۴-۵-۱: پارامترهای طراحی ورودی

همان طور که گفته شد ابتدا یک موتور سنکرون آهنربای دائم طراحی می‌شود. بعد از آن با اضافه کردن یک دیسک پسماند، موتور ترکیبی آهنربای دائم پسماند مورد نظر طراحی می‌شود. بر اساس الگوریتم ذکر شده بسیاری از پارامترهای ورودی ماشین پسماند از قسمت طراحی ماشین آهنربای دائم استخراج می‌شود.

ورودی‌های مسئله طراحی ماشین پسماند شامل مشخصه‌های ماده پسماند و برخی پارامترهای به دست آمده از طراحی موتور آهنربای دائم می‌باشد.

۱- توان خروجی ماشین یا گشتاور خروجی ( $T_{out}$  یا  $p_{out}$ )

۲- سرعت سنکرون ( $n_{syn}$ )

۳- فرکانس تغذیه ( $f_s$ )

۴- ولتاژ تغذیه ورودی ( $V_t$ )

۵- تعداد فازها ( $m$ )

علاوه بر این پارامترها که به عنوان مشخصات موتور در طراحی در نظر گرفته می‌شود، بعضی از

پارامترهای ماشین پسماند همانند شعاع داخلی و خارجی رینگ، تعداد دور سیم پیچی، قطر هادی، اندازه فاصله هوایی و ضخامت هسته استاتور از قسمت طراحی ماشین آهنربای دائم در نظر گرفته می شود.

#### ۴-۵-۲: فرضیات در نظر گرفته شده

برای طراحی ابتدا فرضیاتی را در نظر می گیریم. این فرضیات عبارتند از:

الف) موتور در حالت کاری سنکرون قرار دارد و دارای بیشترین باری است که آن را از حالت سنکرون خارج نکند.

ب) استاتور دارای یک سیم پیچ سه فاز توزیع شده سینوسی است و نیروی محرکه مغناطیسی سیم پیچی استاتور توسط یک جریان سینوسی ایجاد می شود. چگالی هادی های فاز  $n$  می تواند با رابطه زیر توصیف شود.

$$Z_{(n)} = Z \cos\left(\phi - (n-1)2\pi/m\right) \quad (20-4)$$

در این رابطه  $n = 1, 2, \dots, m$  و  $m$  تعداد فازهاست.  $\phi$  زاویه الکتریکی استاتور است به طوری که  $\phi = p\theta$ ، که در آن  $\theta$  زاویه مکانیکی و  $p$  تعداد زوج قطبها است.  $Z$  حداکثر چگالی هادی است که از رابطه زیر به دست می آید:

$$Z = \frac{2K_w N_{ph}}{p\pi} \quad (21-4)$$

که در آن  $K_w$  ضریب سیم پیچی و  $N_{ph}$  تعداد دور سیم پیچی بر فاز است و داریم:

$$K_w = \cos\left(\frac{\varepsilon}{2}\right) \frac{\sin\left(q\frac{\gamma}{2}\right)}{q \sin\left(q\frac{\gamma}{2}\right)} \quad (22-4)$$

که در آن  $q$  تعداد شیار بر قطب بر فاز است و برابر است با:

$$q = \frac{z}{2pm} \quad (23-4)$$

$\gamma$  زاویه الکتریکی شیار است و از رابطه زیر به دست می آید:

$$\gamma = \frac{2\pi p}{z} \quad (24-4)$$

و  $z$  تعداد کل شیارهای استاتور است.

اگر تعداد شیار بر قطب  $y_p$  را به صورت زیر تعریف کنیم:

$$y_p = \frac{z}{2p} \quad (25-4)$$

کوتاهی گام کلاف بر حسب تعداد شیارها برابر خواهد بود با:

$$y_z = y_p - ay_p \quad (26-4)$$

به طوری که  $a$  گام سیم پیچی بر حسب پریونیت می باشد. بنابراین زاویه کوتاهی گام بر حسب رادیان الکتریکی برابر است با:

$$\varepsilon = \gamma y_z \quad (27-4)$$

ج) مشخصه پسماند به صورت بیضی های متحدالمرکز با  $\mu$  و  $\alpha$  متغیر و مرتبط با سطح حلقه های پسماند در نظر گرفته شده اند. مؤلفه اصلی چگالی شار و شدت میدان مغناطیسی در ماده پسماند روتور به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$B = B_m \cos(\omega t - \phi - \phi_0) \quad (28-4)$$

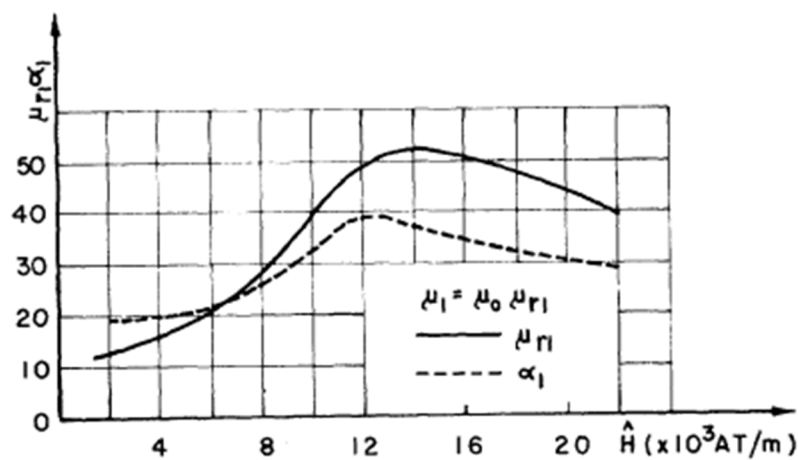
$$H = H_m \cos(\omega t - \phi - \phi_0 - \alpha) \quad (29-4)$$

که در آن:

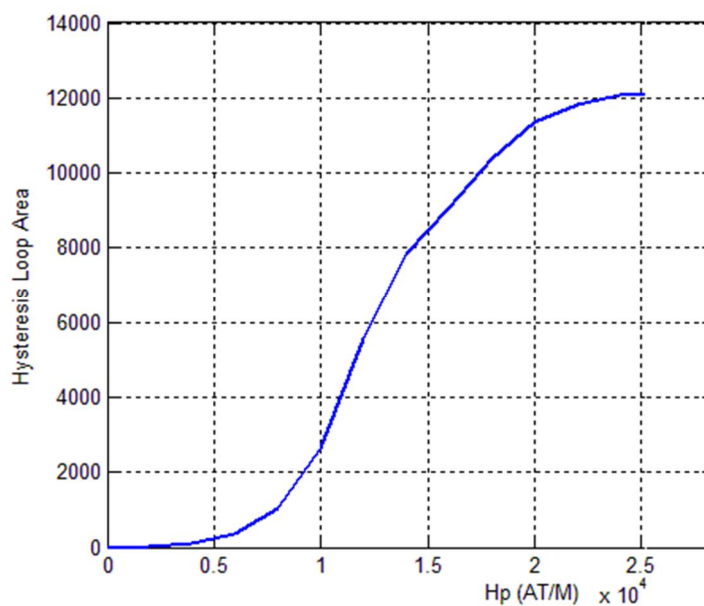
$$H_m = \frac{B_m}{\mu} \quad (30-4)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left( \frac{E_h}{\pi H_m B_m} \right) \quad (31-4)$$

در این رابطه‌ها  $\mu$  نفوذپذیری مغناطیسی ماده پسماند،  $\alpha$  زاویه تأخیر پسماند و  $E_h$  سطح حلقه پسماند می‌باشد. ماده استفاده شده در دیسک هیستریزس از نوع فلز آلومینیوم-نیکل<sup>۱</sup> می‌باشد که مشخصه‌های پرمابیلته و زاویه تأخیر فاز هیستریزس آن در شکل ۴-۵ آمده است. همچنین در شکل ۴-۶ مساحت حلقه‌های هیستریزس بر حسب شدت میدان ماده رسم شده است.



شکل ۴-۵: مشخصه‌های نفوذپذیری و زاویه تأخیر فاز هیستریزس بر حسب شدت میدان فلز آلومینیوم-نیکل [41]



شکل ۴-۶: مساحت حلقه‌ها بر حسب شدت میدان مغناطیسی، فلز آلومینیوم-نیکل

<sup>1</sup>Aluminum Nickel



و) در موتور مورد بحث فرض بر این است که ضخامت دیسک روتور به قدر کافی کم است که در این صورت مؤلفه اصلی چگالی شار در دیسک روتور فقط شامل مؤلفه محیطی است.

در ماشین پسماند، راندمان به ازای یکی از حلقه‌های پسماند ماکزیمم است. همچنین در موتور پسماند با یک توان خروجی مشخص، می‌توان حجم ماده پسماند را به دست آورد. سپس با داشتن حجم روتور، شعاع داخلی و خارجی از رابطه زیر می‌توان ضخامت دیسک پسماند را به دست آورد:

$$t_{rh} = \frac{V_{hysteresis}}{2\pi(R_o^2 - R_i^2)} \quad (۳۲-۴)$$

#### ۴-۶: مدل تحلیلی ماشین PMHS

ولتاژ القایی در ترمینال‌های استاتور از مجموع دو ولتاژ القایی ناشی از MMF دیسک پسماند و مگنت-ها می‌باشد. بنابراین مدل نهایی ماشین از اتصال سری مدار معادل ماشین پسماند و مدار معادل ماشین PM حاصل خواهد شد. همچنین به دلیل فاصله هوایی بزرگ ایجادشده بین دو روتور از اثر متقابل بین آن‌ها صرف نظر می‌گردد. در ادامه مدل تحلیلی موتور پسماند و موتور PM به طور مختصر بیان شده و مدار معادل نهایی آن‌ها استخراج می‌شود. سپس با سری کردن این دو مدار معادل مدل نهایی موتور PMHS به دست می‌آید.

#### ۴-۷: مدل تحلیلی موتور پسماند

مدل تحلیلی موتور پسماند نوع تخت بدون شیار به طور کامل در مرجع [۱] ارائه شده است. روابط اصلی حاکم بر این موتور پس از پیاده‌سازی قانون مداری آمپر به صورت زیر است.

$$B_m = \frac{\frac{3}{2}\sqrt{2}IZ}{\frac{R_{av}}{p\mu}(\cos\phi_0 \cos\alpha + \sin\phi_0 \sin\alpha) + \frac{g}{\mu_0 R_{av}} \cos\phi_0} \quad (۳۳-۴)$$

که در آن  $B_m$  چگالی شار مغناطیسی در شعاع متوسط  $R_{av}$  دیسک پسماند می‌باشد. رابطه شار

مغناطیسی به صورت (۴-۳۴) خواهد شد.

$$\varphi = 2t_r(R_o - R_i)B_m \cos(\omega t - \phi - \phi_0) \quad (۴-۳۴)$$

و از آنجا

$$\varphi_{MAX} = 2t_r(R_o - R_i)B_m \quad (۴-۳۵)$$

رابطه ولتاژ القایی در سیم‌پیچی‌های یک فاز استاتور به صورت زیر است.

$$e_a = \omega K_w N_{ph} \varphi_{MAX} \cos\left(\omega t - \phi_0 + \frac{\pi}{2}\right) \quad (۴-۳۶)$$

از بسط رابطه ولتاژ می‌توان به رابطه جریان یک فاز استاتور دست یافت.

$$i_a = i_h + i_g \quad (۴-۳۷)$$

به طوری که

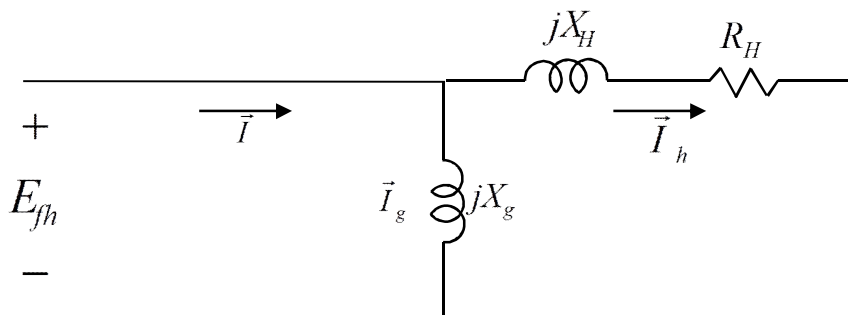
$$i_g = \frac{2g p t_r B_m}{3Z\mu_0 r} \cos(\omega t - \phi_0) \quad (۴-۳۸)$$

$$i_h = \frac{2R_{av} B_m}{3Zp\mu} \cos(\omega t - \phi_0 + \alpha) \quad (۴-۳۹)$$

در این روابط  $i_g$  جریان مغناطیس‌کنندگی و  $i_h$  جریان معادل دیسک پسماند می‌باشد.

در نهایت مدار معادل برای روتور موتور پسماند نوع تخت بدون شیار به صورت شکل ۴-۷ به دست

می‌آید.



شکل ۴-۷: مدار معادل موتور پسماند بدون در نظر گرفتن تلفات اهمی و شار پراکندگی سیم‌پیچی استاتور

که المان‌های این مدار معادل به شرح زیر است:

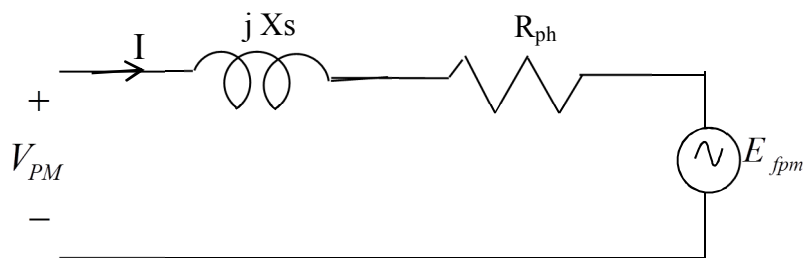
$$X_g = j \frac{3\omega K_w N_{ph} \varphi_{MAX} \mu_0 R_{av} Z}{2g p t_r B_m} \quad (40-4)$$

$$R_H = \frac{3\omega K_w N_{ph} \varphi_{MAX} p \mu Z}{2R_{av} B_m} \sin(\alpha) \quad (41-4)$$

$$X_H = \frac{3\omega K_w N_{ph} \varphi_{MAX} p \mu Z}{2R_{av} B_m} \cos(\alpha) \quad (42-4)$$

#### ۸-۴: مدار معادل موتور آهنربای دائم PM

مدل تحلیلی موتور آهنربای دائم نوع تخت بدون شیار و با PM‌های سطحی در مرجع [۳۰] به تفصیل ارائه شده است. مدار معادل این موتور به صورت شکل ۸-۴ است.



شکل ۸-۴: مدار معادل موتور PM

که المان‌های این مدار معادل به شرح زیر است.

$$E_{fpm} = \frac{2k_w N_{ph} B_g f R_o^2 (1 - \lambda^2)}{\sqrt{2p}} \quad (43-4)$$

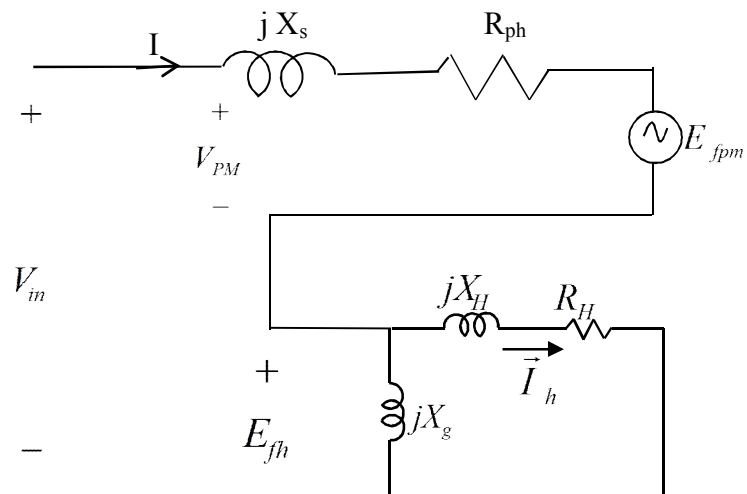
$$X_s = (2\pi f)(L_{aa} - L_{ab}) \quad (44-4)$$

$$R_{ph} = \frac{\rho_{cu} l_{av} N_{ph}}{a_p s_{str}} \quad (45-4)$$

همان طور که گفت شد، برای به دست آوردن اندوکتانس‌های خودی  $L_{aa}$  و متقابل  $L_{ab}$  سیم‌پیچی‌های ماشین در شرایطی که یکی از فازهای ماشین دارای جریان نامی درحالی که دو فاز دیگر دارای جریان صفر می‌باشند محاسبات انجام می‌گیرد. مقادیر اندوکتانس‌های خودی و متقابل توسط روش اجزا

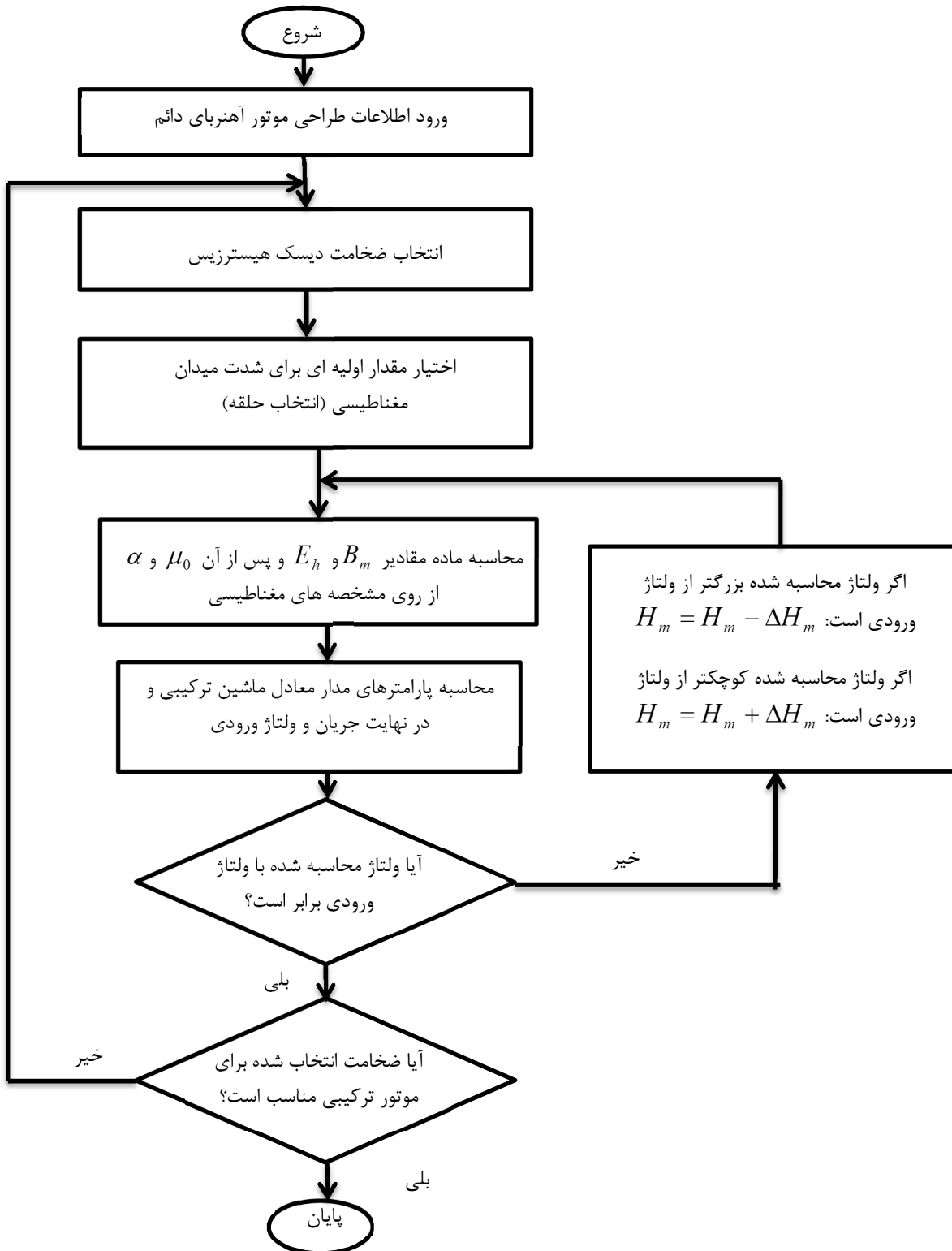
محدود (FEM) محاسبه می‌گردد.

در دو بخش قبل مدل تحلیلی هردو موتور پسماند و PM به دست آمد. همان طور که بیان شد با سری کردن مدار معادل این دو موتور، مدار معادل موتور PMHS به دست می‌آید. این مدار معادل در شکل ۹-۴ نشان داده شده است.



شکل ۹-۴: مدار معادل موتور PMHS

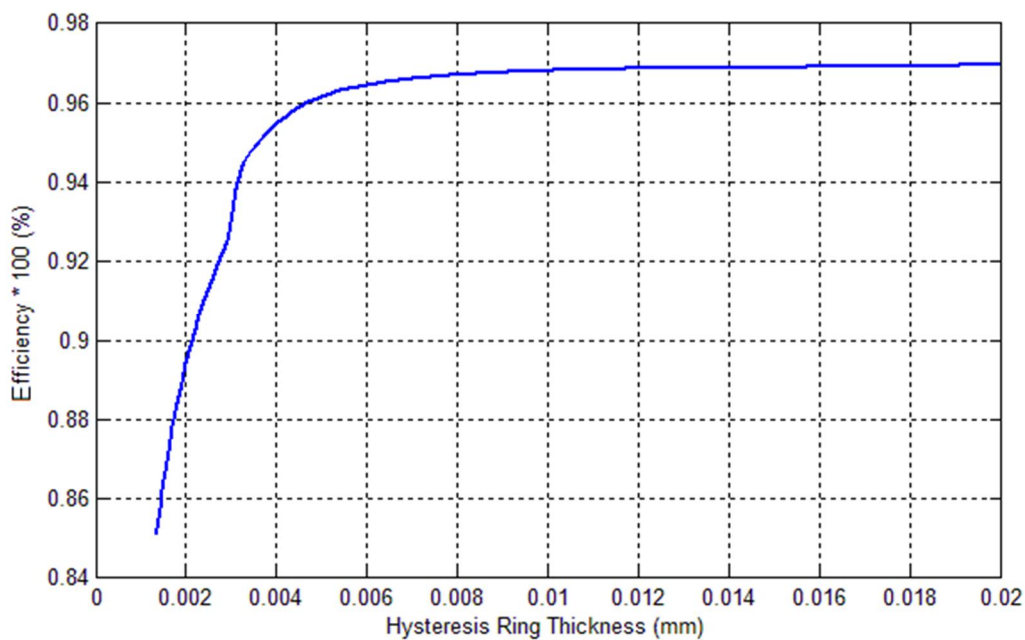
برای پیاده‌سازی عملکرد حالت دائمی موتور PMHS الگوریتم پیشنهادی نشان داده‌شده در شکل ۱۰-۴ ارائه می‌گردد.



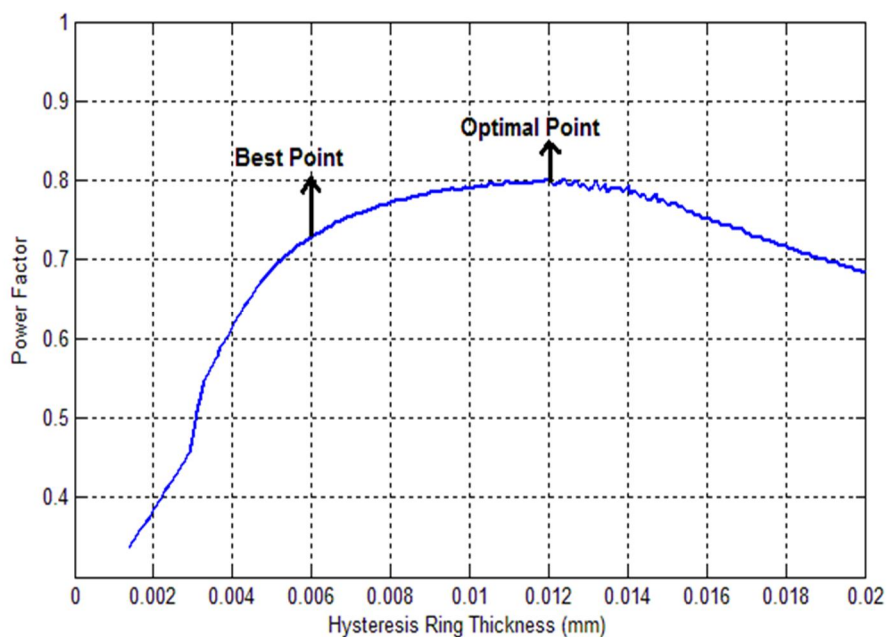
شکل ۱۰-۴: بلوک دیاگرام روش پیشنهادی تحلیل ماشین PMHS

#### ۹-۴: نتایج شبیه‌سازی

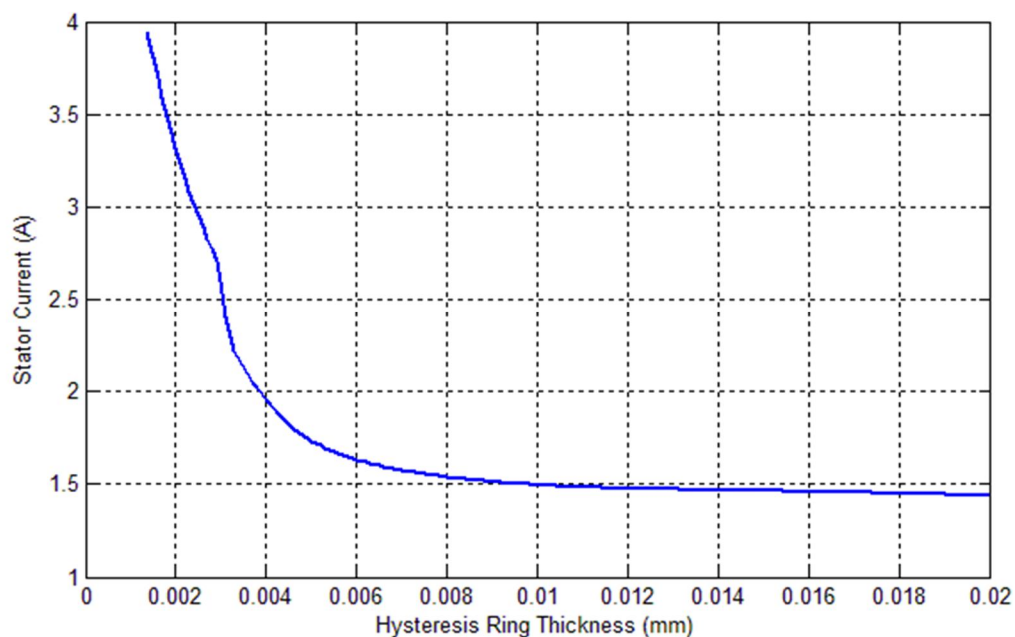
در این بخش به موتور سنکرون PM با ساختار ذکرشده، یک دیسک پسماند اضافه شده و با به‌کارگیری مدار معادل موتور PMHS، عملکرد موتور شبیه‌سازی و در نهایت نتایج مقایسه می‌گردد. قبل از هر چیز باید مقدار مناسبی برای ضخامت دیسک پسماند تعیین گردد. برای این منظور در ضخامت‌های مختلفی از دیسک پسماند شبیه‌سازی انجام می‌شود. در ضخامت‌های مختلف دیسک پسماند می‌توان پارامترهای متفاوت موتور همچون ضریب توان، بازده و جریان استاتور را مشاهده کرد. نتایج این شبیه‌سازی‌ها در شکل ۴-۱۱، شکل ۴-۱۲ و شکل ۴-۱۳ آمده است.



شکل ۴-۱۱: بازده موتور PMHS در ضخامت‌های مختلف دیسک پسماند



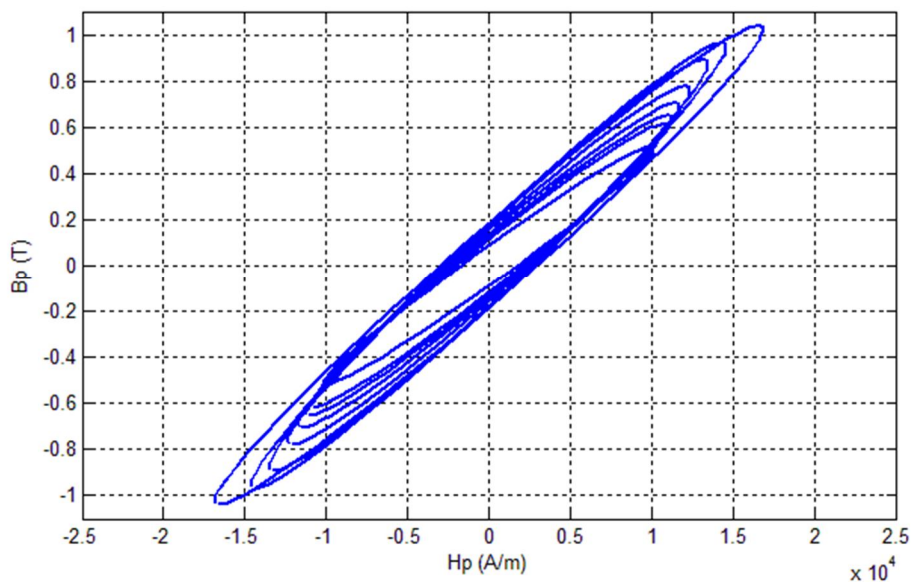
شکل ۴-۱۲. ضریب توان موتور PMHS در ضخامت‌های مختلف دیسک پسماند



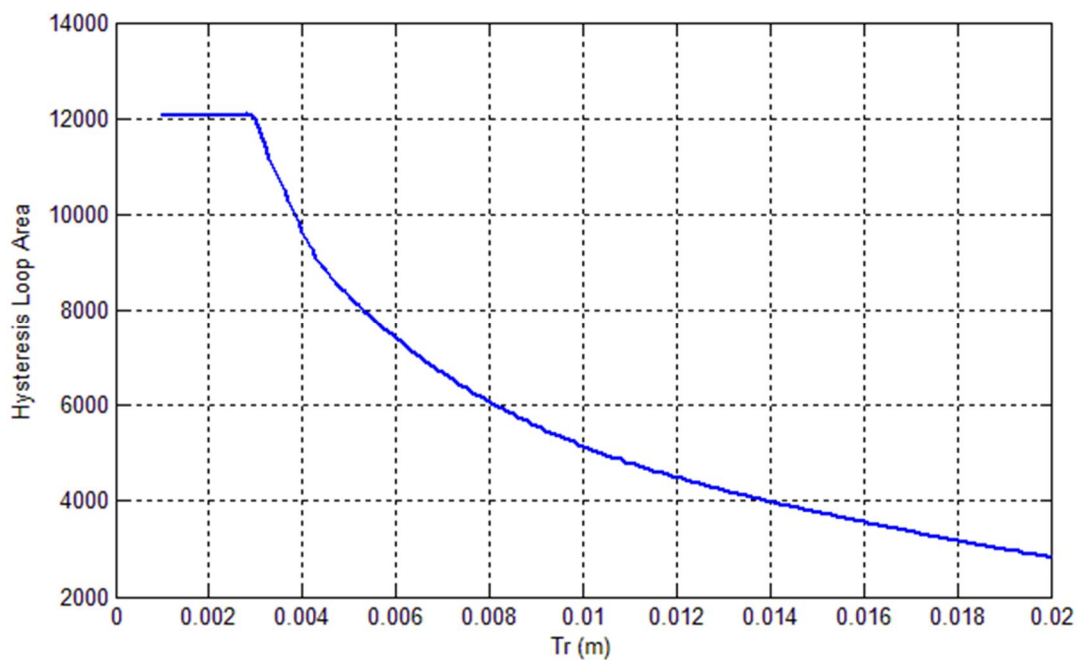
شکل ۴-۱۳. جریان موتور PMHS در ضخامت‌های مختلف دیسک پسماند

با توجه به نتایج مشخص است که بهترین ضخامت برابر با ۱۲ میلی‌متر است. اما از طرفی هرچه ضخامت بیشتر انتخاب شود، افزایش حجم ماده و هزینه ساخت را در پی خواهد داشت. چنانچه مقدار ضخامت برابر با ۶ میلی‌متر در نظر گرفته شود، حجم و هزینه ماشین بسیار کاهش می‌یابد،

در حالی که نتایج فرق چندانی با مقدار بهینه آن نخواهد کرد. در شکل ۱۴-۴ حلقه‌های پسماند در بار کامل در ضخامت‌های مختلف نمایش داده شده است.



شکل ۱۴-۴: نمودار حلقه‌های پسماند در بار کامل در ضخامت‌های مختلف



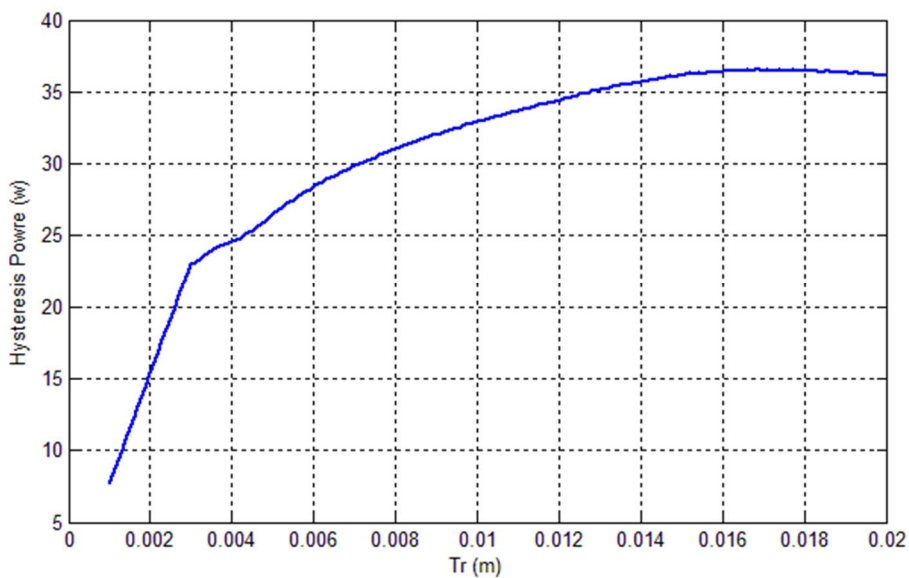
شکل ۱۵-۴: مساحت حلقه در بار کامل در ضخامت‌های مختلف

همان طور که از شکل ۱۴-۴ و شکل ۱۵-۴ مشخص است با افزایش ضخامت حلقه‌ها کوچک‌تر

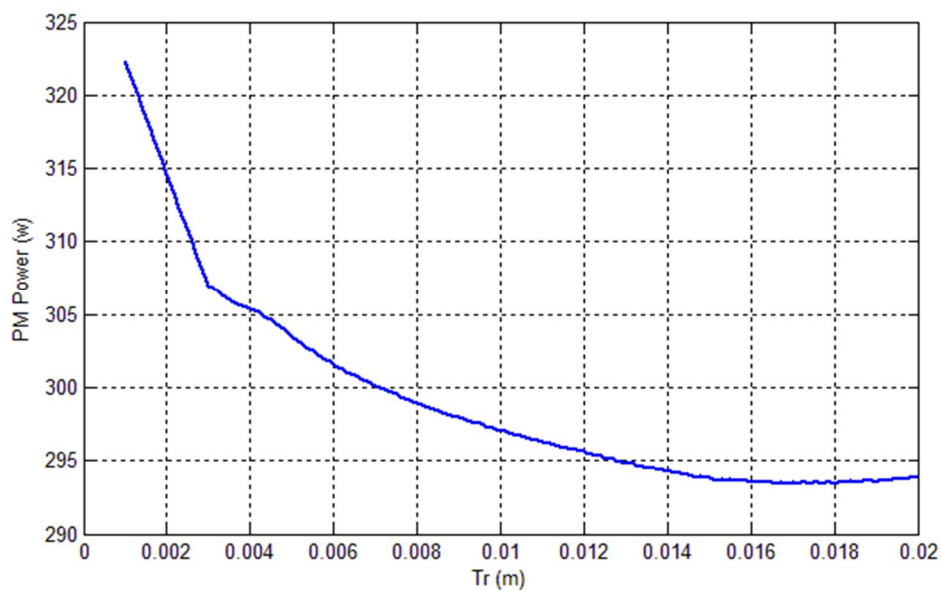


می‌شود، چون با افزایش ضخامت، حجم ماده روتور افزایش می‌یابد، در حالی که توان خروجی موتور در رنج تقریباً ثابتی است، در نتیجه مساحت حلقه پسماند کوچک‌تر می‌شود.

در نهایت سهم هر کدام از دیسک‌های PM و پسماند در موتور سنکرون PMHS را می‌توان به صورت شکل ۱۶-۴ و شکل ۱۷-۴ نشان داد.



شکل ۱۶-۴: توان سهم دیسک پسماند در موتور ترکیبی PMHS



شکل ۱۷-۴: سهم دیسک PM در موتور ترکیبی PMHS

در جدول ۲-۴ نتایج حاصل از شبیه‌سازی دو موتور PM و PMHS مذکور مقایسه می‌شود. موتور PMHS با ضخامت دیسک پسماند ۶ میلی‌متر در توان و ولتاژ ورودی یکسان با موتور PM مقایسه می‌شود.

جدول ۲-۴. نتایج حاصل از شبیه‌سازی دو موتور PM و PMHS

نوع موتور	موتور آهنربای دائم تک دیسک	موتور ترکیبی PMHS
ولتاژ ورودی $V_{max}$	135 Volt	135 Volt
توان خروجی $P_{out}$	330 Watt	330 Watt
فرکانس $f_s$	150 Hz	150 Hz
سرعت $n_s$	9000 rpm	9000 rpm
تعداد قطب $p$	2	2
جریان بار کامل $I_{Full}$	1.156 A	1.63 A
ضریب توان $Pf$	0.998	0.7289
بازده $E$	97.55 %	96.45 %

همان‌طور که از نتایج جدول ۲-۴ قابل مشاهده است اضافه کردن دیسک پسماند به موتور PM تأثیر چندانی بر مزیت‌های موتور PM وارد نکرده است اما از طرف دیگر باعث تولید گشتاور راه‌اندازی در موتور PM شده است. در نهایت می‌توان گفت یکی دیگر از روش‌های بهبود نقایص موتور PM اضافه کردن دیسک پسماند به آن می‌باشد، که علاوه بر تأمین گشتاور راه‌انداز، به عنوان میراکننده نوسانات در سرعت سنکرون عمل خواهد کرد.

## فصل پنجم

### نتیجه‌گیری و پیشنهادات

## ۵-۱: نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه در فصل اول ابتدا معرفی اجمالی از موتور سنکرون پسماند آهنربای دائم صورت گرفت و بعد تاریخچه این موتور مورد بررسی قرار گرفت. در فصل دوم ابتدا موتور پسماند معرفی شد و سپس تاریخچه آن بیان گردید. تئوری عملکرد و انواع ساختار این موتور نیز در این فصل بیان شد. در فصل سوم موتور PM معرفی گردید. تاریخچه این موتور نیز به صورت اجمالی بیان شد و انواع ساختارهای این موتور نیز بیان شد. در این فصل همچنین انواع مواد مغناطیس دائم نیز معرفی شد. در نهایت در فصل چهارم ساختار موتور PMHS انتخابی معرفی و مزیت‌های این ساختار بیان شد. در ادامه طراحی این موتور براساس پارامترهای ابعادی صورت گرفته و مدار معادل آن براساس پارامترهای ابعادی را به دست آوردیم. در نهایت نتایج طراحی و مدل تحلیلی بیان شده و مورد بررسی قرار گرفت.

براساس این پایان‌نامه می‌توان گفت، موتور سنکرون PM در کنار تمام مزایای برجسته‌ای که دارد، دارای دو عیب اصلی می‌باشد. اول اینکه، اگر این موتور با فرکانس خط تغذیه شود گشتاور راه-اندازی نخواهد داشت، دوم اینکه، در صورت بروز اغتشاش در سرعت سنکرون دچار نوساناتی خواهد شد. در این مقاله برای برطرف کردن معایب موتور سنکرون PM نوع تخت از ترکیب آن با موتور پسماند استفاده شده و ساختار جدیدی برای موتور ترکیبی حاصل (PMHS) ارائه گردیده است. این ساختار معایب ساختارهای پیشین را نداشته و دارای ویژگی‌های برتری نسبت به آن‌ها می‌باشد. همچنین ساختار تخت نسبت به ساختار استوانه‌ای دارای مزیت‌هایی می‌باشد. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به چگالی توان بیشتر، تلفات هسته کمتر، بازده بالاتر، حجم کمتر، اینرسی بیشتر، طول محوری کوتاه‌تر و خنک کاری راحت‌تر اشاره کرد. با انتخاب ضخامت مناسبی از دیسک پسماند و اضافه کردن آن به موتور سنکرون PM نوع تخت نشان داده شد که، علاوه بر این که تغییر چندانی در ویژگی‌های برتر موتور سنکرون PM به وجود نیامد، معایب این موتور نیز برطرف گردید. دیسک

پسماند می تواند جایگزین قفسه سنجایی در موتور PM شود که علاوه بر تأمین گشتاور راه انداز موتور، نوسانات سرعت سنکرون در موتور PM را نیز بسیار سریع تر می تواند میرا کند. نتایج حاصل از شبیه سازی صحت و قوت ساختار پیشنهادی را تأیید می کند.

## ۲-۵: پیشنهادات

از آنجایی که در زمینه ماشین های PMHS هنوز جای کار و تحقیق بسیار فراوان است در این بخش پیشنهادهایی جهت ادامه کار در آینده در رابطه با این ماشین برای پژوهشگران و محققینی که علاقمند به کار و تحقیق بیشتر در این زمینه هستند ارائه می گردد که عبارت اند از:

- ۱- بررسی و تحلیل حالت گذرای ماشین PMHS
- ۲- بررسی و مطالعه تحلیل حرارتی ماشین به روش FE و بررسی خطوط شار و میدان در دیسک
- ۳- بررسی تلفات جریان گردابی، تلفات آهن و تلفات روتور
- ۴- تعریف توابع هدف دقیق و بهینه سازی ماشین به روش های مختلف
- ۵- بررسی محدودیت های مکانیکی و منظور نمودن آن در طراحی ماشین
- ۶- بررسی اثر اضافه نمودن آهنربای دائم به موتور پسماند تخت

## مراجع:

- [۱] صنعتی، م. (۱۳۸۷). طراحی و مدل سازی موتور سنکرون پسماند نوع تخت دو روتوره. دانشگاه شاهرود.
- [2] Steinmetz, C. (1917). *Theory and Calculation of Electrical Apparatus*.
- [3] AB.R.Teare. (March 1940). Theory of Hysteresis Motor Torque. *AIEE*, 59, 907-912.
- [4] K.Honda. (1985). "Magnetic Properties Of Matter". *Syokwabo and Company Tokyo, Japan*.
- [5] M.A.Copeland, G.R.Slemon. (April 1963). An Analysis of Hysteresis Motor: I- Analysis of the Idealized Machine. *AIEE*, 34-42.
- [6] M.A.Copeland, G.R.Slemon. (June 1964). An Analysis of Hysteresis Motor: II-The Circumferential Flux Machine. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 83, 619-625.
- [7] M.A. Rahman, M. C. (1969). An analysis of the hysteresis Motor III- Parasitic Losses. *IEEE Trans* , 954-960.
- [8] Rahman, M. A. (January/February 1971). Analytical Models for Polyphase Hysteresis Motor. *IEEE Power Engineering Society*. New York.
- [9] G.Cannistra and M.Sylos. (October 1987). A Model for the Hysteresis Motor Analysis. *Electric Energy Conference Adelaide*, 648-654.
- [10] A.A.Zaher, F. (March 1990). An Analytical Solution for the Field of a Hysteresis Motor Based on Complex Permeability. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 5, 156-163.
- [11] M.A.Rahman. (May/June 1980). Field Analysis of Polyphase Hysteresis Motor. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 99, 1164-1171.
- [12] Ishikawa, T., & Kataoka, T. (1981). Basic Analysis of Disc-Type Hysteresis Motors. *Electrical Engineering in Japan*, 101B, 659-666.

- [13] T. Kataoka, T. Ishikawa, and T. Takahashi. (November 1982). Analysis of a Hysteresis Motor with Overexcitation. *IEEE Transactions on Magnetics*, 18, 1731-1733.
- [14] G. Wakui, K. Ichinose, T. Horii. (1983). Analysis of Condenser Split-Phase Hysteresis Motor. *Electrical Engineering in Japan*, 103, 105-112.
- [15] A. Darabi, M. Sanati, and T. Ghanbari. (2010). Coreless Dual-rotor Disc Hysteresis Motor, Modeling, and Performance Prediction. *Electric Power Components and Systems*, 38, 575-591.
- [16] A. Darabi, M.H. Sadeghi, A. Hassannia. (December 2011). Design Optimization of Multistack Coreless Disk-Type Hysteresis Motor. *IEEE Transaction on Energy Conversion*, 26(4), 1081-1087.
- [17] A. Darabi, T. Ghanbari, and M. Sanati-Moghadam. (2009). Slotless axial flux hysteresis motor, modelling and performance calculation. *IET Electrical Power Application*, 3(5), 491-501.
- [18] A. Darabi, T. Ghanbari, M. Rafiei, H. Lesani and M. Sanati-Moghadam. (2008). Dynamic Performance Analysis of Hysteresis Motors by a Linear Time-Varying Model. *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, 4(4), 202-215.
- [19] Ahmad Darabi, Mohamadreza Rafiei, and Teimoor Ghanbari. (2007). Hunting in Hysteresis Motors, Impact of Supply. *Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems*, (pp. 1715-1718). Seoul, Korea.
- [20] H. Lesani, A. Darabi, Z. Nasiri Gheidari, and F. Tootoonchian. (2006). Very Fast Field Oriented Control for Permanent Magnet Hysteresis Synchronous Motor. *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, 2(1), 34-40.
- [۲۱] خسروی، م. (۱۳۸۸). تحلیل عملکرد یک ترانسفورماتور با استفاده از مدل غیر خطی و چند مقدره پریساج. دانشگاه شاهرود.
- [۲۲] دارابی، ا. (۱۳۷۱). مدل سازی موتورهای پسماند و طراحی و ساخت یک نمونه. دانشگاه فردوسی مشهد: رساله کارشناسی ارشد.
- [۲۳] زهرا نصیری قیداری، حمید لسانی، احمد دارابی و فرید توتونچیان. (۱۳۸۶). تحلیل دینامیکی

- موتور پسماند سنکرون آهنربای دائم با در نظر گرفتن اثر فوکو. مجله فناوری و آموزش، ۲(۱)، ۳۴-۲۵.
- [۲۴] صادقی، م. ح. (۱۳۸۹). بهینه‌سازی ماشین‌های پسماند تخت چند طبقه، طراحی و شبیه‌سازی. دانشگاه شاهرود.
- [25] M. H. Sadeghi and A. Darabi. (2010). Optimization of a New Type of Hysteresis Motor Using Genetic Algorithm. *9th International Conference on Environment and Electrical Engineering, EEEIC*, (pp. 479-482). Prague .
- [26] Osheiba, M. R. (1990). Dynamic performance prediction of polyphase. *IEEE Trans on Industry App*, 1026-1033.
- [27] Mayeregoyz, I. (2003). *Mathematical Models of Hysteresis and Their Applications. Elsevier publication.*
- [28] Jacek F. Gieras, R.-J. W. (2008). *Axial Flux Magnet Brushless Mashines. publisher: Springer.*
- [29] M. Aydin, S. H. (2004). *Axial Flux Permanent Magnet Disk Mashine Review. Research Report, University of Wisconsin- Madison .*
- [۳۰] نیکخو، م. (۱۳۹۲). انتخاب فرکانس و تعداد فازها برای طراحی و مونتاژ ماشین شار محوری آهنربای دائم (AFPM) سرعت پایین. شاهرود: دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [۳۱] نصیری، ز. (۱۳۸۵). بررسی موتورهای پسماند سنکرون. تهران: دانشگاه تهران.
- [32] M. A. Rahman, A. M. Osheiba. (May/June 1985). Steady-State Performance Analysis of Polyphase Hysteresis-Reluctance Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications, IA-21(4)*, 659-663.
- [33] G. Wakui. (1978). Hysteresis Motor with Reaction Torque and Its Analysis. *Electrical Engineering in Japan*, 58-67.
- [34] M.A. Rahman, A. O. (1984). Effects of Samarium Cobalt Permanent Magnet on the Performance of Polyphase Hysteresis-Reluctance Motors. *IEEE Transaction on Magnetics*, 1765-1767.



- [35] M. A. Rahman, A. M. Osheiba. (May/June 1985). Steady-State Performance Analysis of Polyphase Hysteresis-Reluctance Motors. *IEEE Transactions on Industry Applications*, IA-21(4), 659-663.
- [36] M. A. Rahman and A. M. Osheiba . (January/February 1990). Improved Performance of Polyphase Hysteresis-Reluctance Motors Fed from Single-phase Supplies. *IEEE Transactions on Industry Application*, 26(1), 130-136.
- [37] Rahman, M. A. (1993, February 16). *Patent No. 5,187,401*. United States of America.
- [38] M. Azizur Rahman and Ruifeng Qin,. (September/October 1996). Starting and Synchronization of Permanent Magnet Hysteresis Motors. *IEEE Transactions on Industry Application*, 32(5), 1183-1189.
- [39] R. Qin, and M. A. Rahman,. (September 2003). Magnetic Equivalent Circuit of PM Hysteresis Synchronous Motor. *IEEE Transactions on Magnetics*, 39(5), 2998-3000.
- [40] Kazumi Kurihara, and M. Azizur Rahman,. (January/February 2004). Transient Performance Analysis for Permanent-Magnet Hysteresis Synchronous Motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 40(1), 135-142.
- [41] S. D. T. Robertson and S. Z. G. Zaky(1969), Analysis of the Hysteresis Machin- PartI, Power Apparatus Systems, IEEE Transaction on, vol.pas-88,pp 474-483



## Abstract

Recently, the Disc-Type Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) has been greatly focused due to its prominent features such as the high efficiency and power factor levels, as well as the brushless structure. On the other hand, two major drawbacks of this motor are the loss of starting torque in the nominal frequency and the speed oscillations in the synchronous operation. On the other hand, despite PM motors, hysteresis motor torque is almost constant from start-up until synchronous speed is reached. Hysteresis motor doesn't have a specific synchronism point and this causes the low-frequency oscillations around the steady state synchronous speed.

This paper aims to resolve such weaknesses via combining the Disc-Type PM motor with the Hysteresis motor. The resultant is named here as 'Permanent Magnet Hysteresis Synchronous (PMHS) motor'. In this paper, the validity of the proposed structure is verified via simultaneous simulation of the PMSM and PMHS and the comparison between the results. According to these analyses, the new structure not only corrects the drawbacks of the previous PMSMs, but also has several advantages as compared to them.

**Keywords:** Disc-Type Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM), Hysteresis motor, PMHS, Analytical model



**Shahrood University**

**Faculty Electrical Engineering and Robotics**

**Design, Modeling and Analysis of Multi-Phase Axial Flux Hybrid  
PM-Hysteresis Motor**

By:

**Mohammad Hadi Ebrahimi**

Supervisor:

**Dr. Ahmad Darabi**

Submitted in partial fulfillment of the  
Requirements for the degree of  
Master of Science in Electrical engineering

February 2015