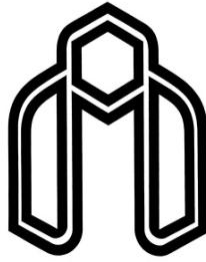


رسالة الرجوع من الرجوع



دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده مهندسی برق و رباتیک
گروه قدرت

عنوان:

مدل سازی و بررسی تحریک اضافی موقت

در یک موتور هیستریزیس چند فاز

دانشجو:

حسین عجم اکرامی

استاد راهنما:

دکتر احمد دارابی

پایان نامه برای اخذ مدرک کارشناسی ارشد در رشته

مهندسی برق - گرایش قدرت

بهمن ۱۳۹۳



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

بسمه تعالی

شماره : ۱۴۵۵/آ.ت.ب
تاریخ : ۹۳/۱۱/۲۸
ویرایش : -----

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 :

حسین عجم اکرامی رشته : برق - قدرت گرایش : ماشینهای الکتریکی

تحت عنوان : مدلسازی و بررسی تحریک اضافی موقت در یک موتور هیستریزس چند فاز

که در تاریخ ۹۳/۱۱/۲۸ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است :

قبول (با درجه : بسیار ممتاز امتیاز ۱۸/۸۸) دفاع مجدد مردود

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

۳- خوب (۹۹ - ۱۶) ۴- قابل قبول (۹۹ - ۱۴)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	احمد راداب	دانشیار	
۲- استاد مشاور	---	---	---
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	مرتضی رحمان	استاد	
۴- استاد امتحن	ایرینا سرزهی	استاد	
۵- استاد امتحن	محمّد اصلی	استاد	

رئیس دانشکده:

تقدیم به مادر عزیزم

تقدیم به روح پاک پدرم که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی، ایستادگی را تجربه نمایم و به مادرم، دریای بی‌کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر. نه می‌توانم موهایش را که در راه عزت من سفید شد، سیاه کنم و نه برای دست‌های پینه‌بسته‌اش که ثمره تلاش برای افتخار من است، مرهمی دارم. پس توفیقم ده که هر لحظه شکرگزارش باشم و ثانیه‌های عمرم را در عصای دست بودنش بگذرانم.

تشکر و قدردانی

وظیفه خود میدانم از تمام اساتیدی که در طول دوران تحصیل پیوسته روشنگر راهم بودند تشکر کنم. همچنین خدا را شاکرم که توفیق داشتم در محضر استاد محبوبم، جناب آقای دکتر احمد دارابی درس پیاموزم. از رُک گویی ایشان روراستی آموختم و فریادهای از سر دلسوزی‌شان به من شهامت بیان حقیقت داد. برای به پیشرفت واداشتن ما خستگی نمی‌شناختند و باعث شدند که در انتها آدم بهتری از چیزی که قبلاً بودم باشم. از ایشان متشکرم که راهنمایی من در نوشتن این پایان‌نامه را به عهده گرفتند. همچنین کمال تشکر را از جناب دکتر اصیلی و جناب دکتر معروضی دارم که زحمت داوری این پایان‌نامه را پذیرفتند.

لازم میدانم از حضور پربر و دلگرم‌کننده دوستانم از جمله آقایان مهندس ابراهیمی، مهندس طحانیان، مهندس بهنیافر و مهندس فاتح تشکر کنم که بدون وجودشان پیمودن این مسیر بسیار دشوار می‌شد.

تهدنامه

این جانب حسین عجم اکرامی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق قدرت دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدل سازی و بررسی تحریک اضافی موقت در یک موتور هیستریزس چند فاز تحت راهنمایی دکتر احمد دارابی متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط این جانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های 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 بافت های آن ها) 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 افزارها 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

موتورهای پسماند سالیان درازی است که به واسطه خصوصیت‌های منحصربه‌فردی مانند خود راه‌اندازی، اعوجاج کم گشتاور، لرزش و نویز ناچیز، جریان راه‌اندازی کوچک و ساختار محکم، جایگاه خود را در کاربردهای خاص پیدا کرده‌اند. در عوض این موتور بازده کمی دارد و ضریب توان آن نسبت به موتورهای معمول مثل موتور القایی پایین‌تر است که باعث شده است صناعی که به طور گسترده از این موتور استفاده می‌کنند ناچار به نصب بانک خازنی عظیمی برای جبران ضریب توان پایین موتورهای پسماند شوند. تنها راه‌حلی که باعث بهبود بخشیدن نقاط ضعف این موتور می‌شود و در عین حال نیازمند تغییر در ساختار موتور نیست، تحریک اضافی موقت است. تحریک اضافی به این معناست که ولتاژ اعمالی به یک موتور پسماند در سرعت سنکرون به طور پیوسته افزایش می‌یابد و به مقدار بزرگ‌تری می‌رسد، سپس به طور پیوسته به مقدار اولیه برمی‌گردد. این کار علاوه بر اینکه ضریب توان را افزایش می‌دهد موجب کاهش جریان ورودی و افزایش بازده نیز می‌شود.

هدف این پایان‌نامه بررسی پدیده تحریک اضافی موقت و دلایل بهبود رفتار موتور بعد از آن است. در این راستا ابتدا مدل‌سازی حلقه و موتور پسماند انجام شده است. معیارهای مدل‌سازی حلقه به گونه‌ای انتخاب شده‌اند که بیضی معادل بیشترین تطابق ممکن را با حلقه پسماند داشته باشد. تحلیل دقیق موتور پسماند در شرایط کار گوناگون و تغییرات حالت مغناطیسی آن نیز که لازمه پرداختن به بحث تحریک اضافی است انجام شده است. در این پایان‌نامه الگوریتمی کلی برای پیش‌بینی عملکرد موتور مطرح می‌شود که پاسخ‌گوی تقریباً تمامی حالات ممکن در بحث تحریک اضافی است. استفاده از منحنی‌های واقعی بیشینه چگالی شار (B_p)، مساحت حلقه‌های پسماند (E_h)، چگالی شار پسماند (B_r)، میدان مغناطیس‌زدا (H_c) در این الگوریتم، دقت بالای آن را تضمین می‌کند. نوع خاص‌تری از تحریک اضافی موقت معرفی می‌شود که نشان می‌دهد کاهش ولتاژ موتور به زیر ولتاژ نامی پس از تحریک اضافی موجب بهینه شدن رفتار موتور می‌گردد.

واژه‌های کلیدی: تحریک اضافی موقت، تغییر ولتاژ، مدل‌سازی، موتور پسماند تخت

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ رفتار مواد مغناطیسی.....	۲
۳-۱ پدیده پسماند.....	۴
۴-۱ تولید گشتاور در موتور پسماند.....	۶
۵-۱ انواع موتور پسماند.....	۹
۶-۱ کاربردهای موتور پسماند.....	۱۲
۷-۱ نتیجه‌گیری.....	۱۴
فصل دوم: مدل‌سازی موتور پسماند.....	۱۵
۱-۲ مقدمه.....	۱۶
۲-۲ مدل‌سازی حلقه پسماند.....	۱۸
۱-۲-۲ معرفی مدل متوازی‌الاضلاع.....	۱۸
۲-۲-۲ معرفی مدل بیضی.....	۲۱
۳-۲ مدار معادل موتور پسماند.....	۲۴
۴-۲ مدار معادل برای موتورهای پسماند استوانه‌ای.....	۳۱
۵-۲ محدودیت‌های مدل ارائه‌شده.....	۳۲
فصل سوم: تحریک اضافی موقت.....	۳۷
۱-۳ مقدمه.....	۳۸
۲-۳ مرور کارهای گذشته.....	۳۹
۳-۳ تحلیل عملکرد موتور.....	۴۱

۳-۳-۱	موتور قبل از اعمال تحریک اضافی	۴۱
۳-۳-۲	تحلیل موتور با اعمال تحریک اضافی	۴۶
۳-۳-۳	تحلیل موتور با کاهش دادن تحریک بعد از اعمال اضافه ولتاژ	۴۷
۳-۳-۴	تأثیر مقدار کاهش ولتاژ بر نتیجه نهایی	۵۱
۳-۳-۵	تأثیر مقدار افزایش ولتاژ بر نتیجه نهایی	۵۲
۳-۴	تحریک اضافی خودکار	۵۵
فصل چهارم: شبیه‌سازی تحریک اضافی		
۳-۴-۱	مقدمه	۵۷
۳-۴-۲	مشخصات موتور شبیه‌سازی شده	۵۸
۳-۴-۳	نتایج قبل از اعمال تحریک اضافی	۶۰
۳-۴-۱	راه‌اندازی موتور با ولتاژ نامی	۶۱
۳-۴-۲	تأثیر پارامترهای طراحی در خروجی‌های موتور	۶۱
۳-۴-۳	نتایج با کاهش ولتاژ نامی بعد از حالت سنکرون	۶۶
۳-۴-۴	نتایج با اعمال تحریک اضافی	۶۹
۳-۴-۵	کاهش دادن ولتاژ ورودی به ولتاژ نامی	۷۱
۳-۴-۶	کاهش ولتاژ به مقادیر متفاوت	۷۳
فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات		
۳-۵-۱	جمع‌بندی و نتیجه‌گیری	۷۶
۳-۵-۲	پیشنهادات	۷۹
پیوست		
۸۳		
مراجع		
۸۷		

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ حوزه‌های مواد مغناطیسی در نبود میدان خارجی ۴
- شکل ۱-۲ حلقه پسماند یک ماده فرومغناطیس ۵
- شکل ۱-۳ خطوط شار موتور الکتریکی در نبود خاصیت پسماند ۷
- شکل ۱-۴ خمیدگی خطوط شار و ایجاد گشتاور در موتور پسماند استوانه‌ای ۸
- شکل ۱-۵ مسیر شار در موتور استوانه‌ای شار شعاعی و شار محیطی بدون اثر پسماند ۱۰
- شکل ۱-۶ نمای سه بعدی موتور پسماند شار محیطی و نمای مقابل از موتور پسماند شار محوری... ۱۲
- شکل ۱-۲ شکل موج‌های B و H با سینوسی فرض کردن چگالی شار B ۱۶
- شکل ۲-۲ شکل موج‌های B و H با سینوسی فرض کردن میدان H ۱۷
- شکل ۳-۲ مدل متوازی‌الاضلاع برای مدل کردن حلقه پسماند ۱۸
- شکل ۴-۲ استخراج رلوکتانس سری از مدل متوازی‌الاضلاع ۱۹
- شکل ۵-۲ استخراج رلوکتانس موازی از مدل متوازی‌الاضلاع ۲۰
- شکل ۶-۲ مدار معادل ساده‌شده موتور پسماند ۲۰
- شکل ۷-۲ شکل موج H و هارمونیک اول آن ۲۱
- شکل ۸-۲ صرف‌نظر کردن از هارمونیک‌های H و تبدیل حلقه پسماند به بیضی ۲۲
- شکل ۹-۲ بیضی‌های مختلف حاصل از B و H های سینوسی متفاوت ۲۳
- شکل ۱۰-۲ برش دو بعدی موتور پسماند تخت و اعمال قانون مداری آمپر ۲۴
- شکل ۱۱-۲ چگالی شار روتور و فاصله هوایی در موتور پسماند تخت شار محیطی ۲۵

- شکل ۲-۱۲ مدار معادل موتور پسماند در سمت روتور..... ۲۸
- شکل ۲-۱۳ تغییرات عمق پوستی با تغییرات فرکانس برای مس..... ۳۰
- شکل ۲-۱۴ مدار معادل موتور پسماند..... ۳۱
- شکل ۲-۱۵ افزایش زاویه پسماند و تشابه بیشتر حلقه پسماند با بیضی معادل آن..... ۳۲
- شکل ۲-۱۶ کاهش هارمونیک‌های تولیدی از حلقه پسماند و تشابه بیشتر حلقه با بیضی معادل آن..... ۳۳
- شکل ۲-۱۷ بیضی حاصل از دو شکل موج سینوسی H و B با ماکزیمم‌های B_p و H_p ۳۴
- شکل ۲-۱۸ منحنی اشباع‌شده فولاد $D6AC$ ، شکل موج‌های B و H متناظر با آن H ۳۵
- شکل ۳-۱ نحوه تغییر ولتاژ استاتور در موتور پسماند..... ۳۹
- شکل ۳-۲ منبع ولتاژ فرضی در سمت روتور برای مدل کردن تحریک اضافی ولتاژ در..... ۴۰
- شکل ۳-۳ حلقه‌های اصلی یک ماده پسماند..... ۴۲
- شکل ۳-۴ باریک شدن حلقه $B-H$ در هنگام ورود به حالت سنکرون..... ۴۳
- شکل ۳-۵ الگوریتم تشخیص بیضی معادل قبل از حالت سنکرون..... ۴۳
- شکل ۳-۶ الگوریتم محاسبه حلقه کاری تغییر یافته در حالت سنکرون..... ۴۵
- شکل ۳-۷ تغییر حلقه با افزایش ولتاژ..... ۴۶
- شکل ۳-۸ حلقه پسماند بعد از کاهش ولتاژ..... ۴۸
- شکل ۳-۹ حلقه پسماند بعد از کاهش ولتاژ..... ۴۹
- شکل ۳-۱۰ تخمین ماکزیمم شدت میدان بعد از کاهش ولتاژ..... ۵۰
- شکل ۳-۱۱ محاسبه محل قرارگیری رأس حلقه بعد از کاهش ولتاژ..... ۵۱

- شکل ۳-۱۲ تأثیر مقدار کاهش ولتاژ روی محل قرارگیری رأس حلقه پسماند نهایی ۵۲
- شکل ۳-۱۳ تأثیر مقدار افزایش ولتاژ روی محل قرارگیری رأس حلقه پسماند نهایی ۵۳
- شکل ۳-۱۴ تغییر حلقه پسماند نهایی با تحریک‌های اضافی متفاوت ۵۴
- شکل ۳-۱۵ کاهش تأثیر مقدار افزایش ولتاژ در بهبود وضعیت حلقه پسماند در ماده اشباع‌شده ۵۵
- شکل ۴-۱ الگوریتم کامل محاسبه عملکرد موتور ۵۹
- شکل ۴-۲ منحنی نفوذپذیری نسبی برای ماده پسماند روتور ۶۰
- شکل ۴-۳ زاویه پسماند بیضی‌های معادل برای ماده پسماند روتور ۶۰
- شکل ۴-۴ بیضی‌های معادل با حلقه‌های پسماند قبل و بعد از سنکرونیسم ۶۲
- شکل ۴-۵ بیضی‌های معادل با حلقه‌های پسماند قبل و بعد از سنکرونیسم در ۸۰٪ حداکثر بار ۶۳
- شکل ۴-۶ بیضی‌های معادل با حلقه‌های پسماند قبل و بعد از سنکرونیسم ۶۵
- شکل ۴-۷ بیضی‌های معادل با حلقه‌های پسماند در کاهش ولتاژ بلافاصله بعد از سنکرونیسم ۷۱
- شکل ۴-۸ بیضی‌های معادل با حلقه‌های پسماند قبل و بعد از سنکرونیسم و بعد از اضافه ولتاژ ۷۳
- شکل ۴-۹ بیضی‌های معادل با حلقه‌های پسماند در طول شبیه‌سازی موتور ۷۵
- شکل ۴-۱۰ بیضی‌هایی با B_p ، H_p و اندازه μ_r یکسان و اختلاف زاویه‌هایی متفاوت. ۷۶
- شکل ۴-۱۱ حلقه‌های پسماند اصلی در ولتاژ نامی و ولتاژ افزایش‌یافته و حلقه پسماند نهایی ۷۷
- شکل ۴-۱۲ بیضی‌های معادل هنگام کاهش دادن ولتاژ به مقداری کمتر از ولتاژ نامی ۷۸

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱ نفوذپذیری نسبی (μ) برای مواد مغناطیسی مختلف ۳
- جدول ۱-۲ تفاوت بین دو روش استفاده از هارمونیک اول H و استفاده از شرط برابری مساحت‌ها ۳۴
- جدول ۱-۳ وضعیت مشخصه‌های حلقه پسماند پس از کاهش ولتاژ در حالات مختلف ۵۱
- جدول ۱-۴ مشخصه‌های موتور شبیه‌سازی شده ۶۰
- جدول ۲-۴ خروجی‌های مدل و موتور در شرایط راه‌اندازی نامی ۶۱
- جدول ۳-۴ خروجی‌های مدل و موتور در باری معادل 0.8 حداکثر بار قابل تحمل موتور ۶۳
- جدول ۴-۴ خروجی‌های مدل و موتور در ولتاژی معادل 0.8 ولتاژ نامی موتور ۶۴
- جدول ۵-۴ خروجی‌های مدل و موتور به ازای $t_r=3\text{mm}$ ۶۶
- جدول ۶-۴ خروجی‌های مدل و موتور به ازای $t_r=5\text{mm}$ ۶۷
- جدول ۷-۴ خروجی‌های مدل و موتور به ازای $l_g=2\text{mm}$ ۶۸
- جدول ۹-۴ خروجی‌های مدل و موتور به ازای $l_g=0.5\text{mm}$ ۶۹
- جدول ۱۰-۴ خروجی‌های مدل و موتور با کاهش ولتاژ بعد از رسیدن به سرعت سنکرون ۷۰
- جدول ۱۱-۴ خروجی‌های مدل و موتور با افزایش ولتاژ ورودی ۷۲
- جدول ۱۲-۴ خروجی‌های مدل و موتور با اعمال تحریک اضافی معمول ۷۴
- جدول ۱۳-۴ خروجی‌های موتور با افزایش ولتاژ ورودی و کاهش به 60 و 80 درصد ولتاژ نامی ۷۸
- جدول ۱-۵ خروجی‌های مدل و موتور در حالت‌های مختلف ۸۱

نمادهای به کار رفته

B_p	بیشینه شار در ماده پسماند
B_r	چگالی شار پسماند
e	ولتاژ القایی در سیم‌پیچی استاتور
f	فرکانس منبع ولتاژ
H_c	شدت میدان مغناطیس زدا
$K_w N_w$	تعداد دورهای موثر بر فاز
l	طول شعاعی دیسک روتور
L	طول محیطی موثر روتور
l_g	طول فاصله هوایی
m	تعداد فازهای منبع ولتاژ
p	تعداد جفت قطب‌های استاتور
P_h	توان پسماند
P_{in}	توان ورودی موتور پسماند
P_{out}	توان خروجی موتور پسماند
R_{av}	شعاع متوسط دیسک روتور
R_H	مقاومت معادل روتور در مدار معادل موتور پسماند
R_i	شعاع داخلی روتور
R_o	شعاع خارجی روتور
T_m	گشتاور خروجی موتور پسماند
t_r	ضخامت محوری دیسک روتور
V_i	ولتاژ ورودی موتور
V_r	حجم ماده پسماند روتور
$W^{(k)}$	چگالی توزیع سیم‌پیچی در فاز k ام استاتور
W_h	انرژی تلف‌شده در روتور
X_g	راکتانس فاصله هوایی در مدار معادل موتور پسماند
X_H	راکتانس معادل روتور در مدار معادل موتور پسماند
α	زاویه پسماند
μ	نفوذپذیری ماده پسماند
μ_0	نفوذپذیری مغناطیسی هوا

μ_r	نفوذپذیری نسبی ماده پسماند
μ_{sr}	نفوذپذیری نسبی ماده پسماند در حالت اشباع
ψ	زاویه الکتریکی روتور
ω	فرکانس زاویه‌ای منبع
\mathfrak{R}_s	رلوکتانس شاخه افقی مدل متوازی‌الاضلاع
\mathfrak{R}_o	رلوکتانس شاخه عمودی مدل متوازی‌الاضلاع
\mathfrak{R}_g	رلوکتانس فاصله هوایی

فصل اول

مقدمه

۱-۱ مقدمه

موتورهای پسماند مزیت‌های بسیاری دارند از جمله: خودراه‌اندازی، عملکرد نرم و بدون لرزش، جریان راه‌اندازی کم، ساختار ساده و محکم؛ ولی مواردی چون بازده و ضریب توان پایین از مهم‌ترین معایب این موتورها به شمار می‌رود. تحریک اضافی موقت بهترین راه‌حلی است که علاوه بر حفظ مزیت‌های موتور، معایبش را مرتفع می‌کند. هدف این پایان‌نامه مدل‌سازی تحریک اضافی و بررسی علل تأثیرگذاری قابل توجه این راه‌کار در بهبود خروجی‌های موتور است. تحریک اضافی از این جهت حائز اهمیت است که اعمال آن نیازی به تغییرات فیزیکی در ساختار موتور طراحی شده ندارد. لازمه مدل‌سازی تحریک اضافی، تحلیل و مدل‌سازی موتور پسماند است. اولین گام در این راستا، آشنایی با ساختار و مواد سازنده موتور پسماند است.

بخش‌های مهمی از ماشین‌های الکتریکی از مواد مغناطیسی ساخته می‌شوند. با توجه به اهمیت شناخت رفتار آن‌ها برای تحلیل ماشین‌های الکتریکی، در این فصل مختصری درباره رفتار مغناطیسی مواد توضیح داده می‌شود. سپس به طور خاص به پدیده پسماند در مواد مغناطیسی پرداخته می‌شود. در ادامه چگونگی استفاده از این پدیده برای تولید گشتاور در موتور پسماند تشریح می‌شود. انواع موتور پسماندی که تاکنون مطرح شده و کاربردهای هر کدام پایان‌بخش این فصل است.

۱-۲ رفتار مواد مغناطیسی

مواد مغناطیسی را می‌توان با توجه به مقدار نفوذپذیری نسبی μ_r به سه گروه اصلی تقسیم کرد:

دایامغناطیسی^۱ است اگر $\mu_r < 1$ (نفوذپذیری نسبی اندکی از یک کوچک‌تر است).

پارامغناطیسی^۲ است اگر $\mu_r > 1$ (نفوذپذیری نسبی اندکی از یک بزرگ‌تر است).

^۲ Paramagnetic

^۱ Diamagnetic

فرومغناطیسی^۱ است اگر $\mu_r \gg 1$ (نفوذپذیری نسبی بسیار بزرگتر از یک است).

خاصیت دایامغناطیس از حرکت مداری الکترون‌ها درون اتم ایجاد می‌شود و در همه مواد وجود دارد. این پدیده معمولاً آنقدر ضعیف است که قابل چشم‌پوشی است. در موادی که پارامغناطیس یا فرومغناطیس باشند، در سایه این دو قرار می‌گیرد. ماده دایامغناطیس خاصیت دائمی مغناطیسی ندارد و با حذف میدان خارجی، گشتاور مغناطیسی القایی نیز حذف می‌شود.

خاصیت پارامغناطیس مربوط به موادی است که گشتاورهای مغناطیسی مربوط به الکترون‌هایی که حرکت مداری و چرخشی دارند یکدیگر را کاملاً خنثی نمی‌کنند. در صورت اعمال میدان خارجی، علاوه بر تأثیر دایامغناطیسی اندک، گشتاورهای مغناطیسی مولکولی در جهت میدان اعمالی هم راستا می‌گردند. در نتیجه چگالی شار مغناطیسی افزایش می‌یابد. به این مواد پارامغناطیس می‌گویند.

مواد فرومغناطیس، مغناطیس شوندگی بسیار بزرگ‌تری از مواد پارامغناطیس دارند. جدول ۱-۱ را ببینید.

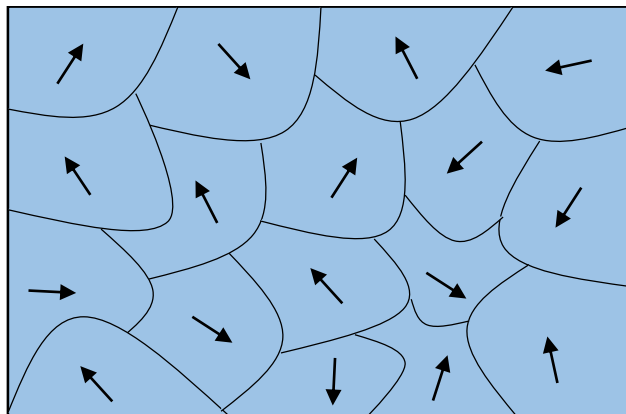
جدول ۱-۱ نفوذپذیری نسبی (μ_r) برای مواد مغناطیسی مختلف

مواد دایامغناطیسی		مواد پارامغناطیسی		مواد فرومغناطیسی	
۰/۹۹۹۹۶	طلا	۱/۰۰۰۰۲۱	آلومینیوم	۲۵۰	نیکل
۰/۹۹۹۹۸	نقره	۱/۰۰۰۰۱۲	منیزیم	۶۰۰	کبالت
۰/۹۹۹۹۹	مس	۱/۰۰۰۰۸۲	پالودیم	۴۰۰۰	آهن

فرومغناطیس بر اساس حوزه‌های مغناطیسی قابل توضیح است. طبق این مدل که به طور تجربی اثبات شده است، مواد فرومغناطیس (کبالت، آهن و نیکل) از تعداد زیادی حوزه کوچک تشکیل شده است که طول آن‌ها از چند میکرون تا حدود ۱ میلی‌متر متغیر است. این حوزه‌ها به خاطر داشتن دوقطبی‌های مغناطیسی هم راستا حتی در نبود میدان خارجی کاملاً مغناطیسی هستند. بین حوزه‌های مجاور،

^۱ Ferromagnetic

ناحیه‌ای به ضخامت ۱۰۰ الکترون وجود دارد که دیواره حوزه نامیده می‌شود. در نبود میدان خارجی حوزه‌های مجاور جهات گوناگونی دارند و باعث مغناطیس شدگی نمی‌شود [1].



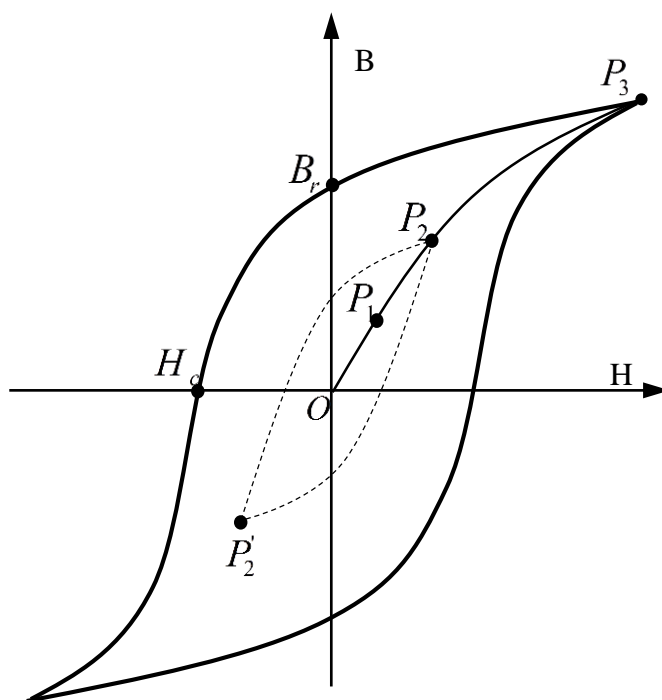
شکل ۱-۱ حوزه‌های مواد مغناطیسی در نبود میدان خارجی

۳-۱ پدیده پسماند

وقتی به ماده فرومغناطیس میدان خارجی اعمال شود، دیواره حوزه‌های هم راستا با میدان اعمالی به صورتی حرکت می‌کنند که حجم آن حوزه افزایش یابد و چگالی شار مغناطیسی بیشتر می‌شود. اگر میدان اعمال شده ضعیف باشد، حرکت دیواره‌ها برگشت پذیر است (نقطه P_1 در شکل ۱-۲). اگر میدان قوی‌تر شود، حرکت دیواره‌های حوزه برگشت پذیر نیست و حوزه‌ها به سمت میدان اعمالی می‌چرخند. برای مثال اگر در شکل ۱-۲ میدانی با اندازه P_2 به مقدار صفر کاهش یابد، به جای مسیر P_1O P_2 ، مسیر خط چین $P_2P'_2$ طی می‌شود. این پدیده مغناطیسی را پسماند می‌نامند. اگر میدان باز هم قوی‌تر شود (به نقطه P_3 برسد) حرکت دیواره‌ها و چرخش حوزه‌ها باعث هم‌راستا شدن کلی گشتاورهای مغناطیسی با میدان اعمالی می‌شود و ماده مغناطیسی اصطلاحاً به حالت اشباع^۱ می‌رود. منحنی $P_3P_2P_1O$ منحنی مغناطیس شدگی عادی نامیده می‌شود.

^۱ Saturation

اگر میدان از مقدار P_3 به صفر کاهش یابد، چگالی شار صفر نمی‌شود و مقداری برابر B_r خواهد داشت. این مقدار، چگالی شار پسماند نامیده می‌شود و به حداکثر شدت میدان اعمال شده وابسته است. همین چگالی شار پسماند باعث ایجاد آهنرباهای دائم می‌شود. برای صفر کردن چگالی شار مغناطیسی باید میدانی به بزرگی H_c اعمال کرد که شدت میدان وادارنده^۱ نامیده می‌شود. H_c نیز به حداکثر مقدار شدت میدان مغناطیسی اعمال شده بستگی دارد.



شکل ۱-۲ حلقه پسماند یک ماده فرومغناطیس

از شکل ۱-۲ می‌توان فهمید که رابطه $B-H$ در یک ماده فرومغناطیس غیرخطی است. در معادله $B=\mu H$ نفوذپذیری μ تابع مقدار H و سابقه مغناطیس شدگی ماده است. مواد فرومغناطیس مورد استفاده در موتورهای الکتریکی معمول، به ازای یک میدان کوچک، مغناطیس شوندگی بزرگی دارند و حلقه پسماند آن‌ها باریک و بلند است. تغییر تناوبی شدت میدان مغناطیسی باعث طی شدن حلقه در هر سیکل می‌شود. مساحت حلقه پسماند متناظر با تلفات انرژی در واحد حجم در سیکل است. این تلفات همان حرارت ناشی از حرکت دیواره‌ها و گردش حوزه‌هاست. موادی که حلقه پسماندی بلند و باریک داشته

^۱ Coercive Field Intensity

باشند، مواد «نرم» نامیده می‌شوند. این مواد بعد از حرارت دیدن به آهستگی سرد می‌شوند تا ناخالصی آن‌ها به حداقل برسد و حرکت دیواره‌ها ساده‌تر انجام شود.

از طرف دیگر، آهنرباهای دائم از مواد مغناطیسی «سخت» ساخته می‌شوند. این مواد باید در مقابل مغناطیس زدایی به خوبی مقاومت کنند. از این رو باید شدت میدان وادارنده H_c آن‌ها بزرگ، و حلقه پسماند آن‌ها پهن باشد. مقدار H_c در این مواد می‌تواند به 105 (A/m) برسد (آلیاژهای آلنیکو^۱). این مقدار در مواد نرم معمولاً کمتر از 50 (A/m) است [1].

۱-۴ تولید گشتاور در موتور پسماند

کاربرد پدیده پسماند برای تبدیل انرژی الکتریکی به مکانیکی از طریق میدان مغناطیسی بیش از صد سال است که مشخص شده است. موتور پسماند اولین بار توسط استینمتز^۲ به عنوان وسیله تولید گشتاور بررسی شد [2]. کار اساسی دیگر توسط تی^۳ انجام شد که روشی برای محاسبه گشتاور ماده پسماند از شار مغناطیسی و mmf مطرح کرد [3].

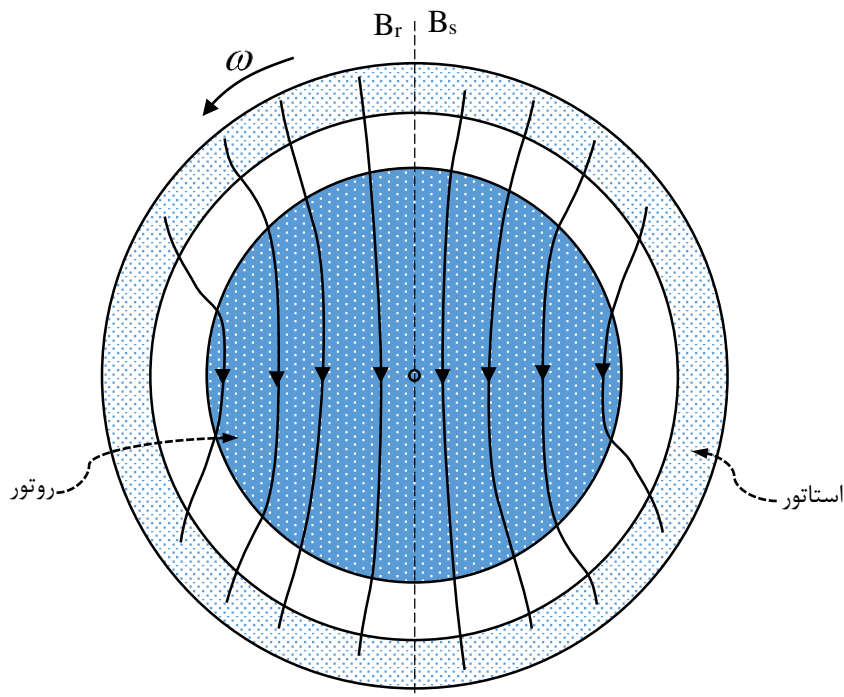
شکل ۱-۳ را در نظر بگیرید. جایی که میدان ایجادشده به وسیله سیم‌پیچی‌های استاتور با سرعت زاویه‌ای ω می‌چرخد و روتوری بدون خاصیت پسماند با سرعت $s\omega$ در این میدان در حال چرخش باشد (s بیانگر لغزش است). در نبود خاصیت پسماند شار گذرنده از روتور هم فاز با نیروی محرکه مغناطیسی استاتور است و محورهای مغناطیسی روتور و میدان استاتور بر هم منطبق هستند. در این حالت گشتاوری در موتور ایجاد نخواهد شد [4].

در صورت وجود خاصیت پسماند، مغناطیس شوندگی روتور از نیروی محرکه استاتور عقب می‌افتد. مقدار این عقب‌افتادگی همان زاویه میان محورهای این دو است که در شکل ۱-۴ با α نشان داده شده است. اگر میدان سینوسی باشد واضح است که گشتاور روتور با مقدار نیروی محرکه مغناطیسی استاتور،

^۳ Teare

^۱ آلیاژ ساخته شده از آلومینیوم، نیکل، کبالت، مس و آهن
^۲ Steinmetz

شار روتور و سینوس زاویه α متناسب است [4]. زاویه فاز فضایی بین نیروی محرکه مغناطیسی^۱ و شار پسماند باعث افزایش گشتاور محرکی می‌شود که بدون کمک جریان‌های روتور یا قطب‌های برجسته تولید شده است [3].

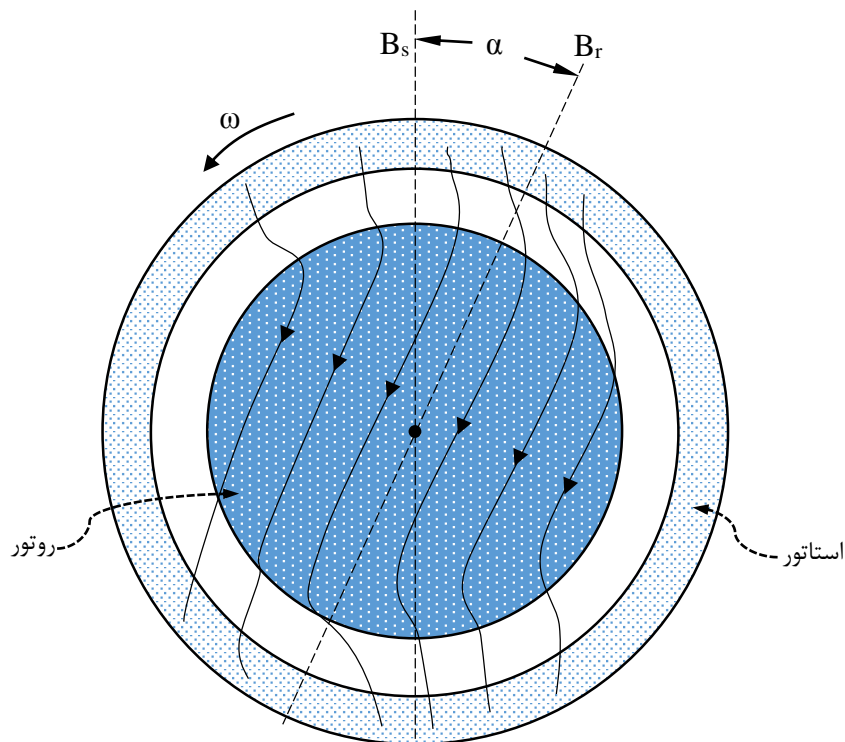


شکل ۱-۳ خطوط شار موتور الکتریکی در نبود خاصیت پسماند

وقتی روتور با سرعتی کمتر از سرعت سنکرون می‌چرخد، محور مغناطیس شونده روتور نسبت به میدان استاتور ثابت است ولی با اختلاف زاویه α عقب‌تر از آن حرکت می‌کند. در این وضعیت محور مغناطیس شونده روی روتور می‌لغزد که علتش سرعت بیشتر محور مغناطیس شونده نسبت به روتور است. وقتی روتور به سرعت سنکرون می‌رسد محور مغناطیس شونده نسبت به روتور ثابت خواهد شد هر چند همچنان به اندازه زاویه α عقب‌تر از میدان استاتور است [4].

گشتاور پسماند معمولاً در تحلیل ماشین‌های الکتریکی (غیر از ماشین پسماند) در نظر گرفته نمی‌شود. در بسیاری از کاربردها این فرض درستی است و منجر به خطای بزرگی نمی‌شود چرا که گشتاور پسماند

نسبت به گشتاور الکترومغناطیسی کل، مقدار کوچکی دارد. ولی گاهی اوقات از این گشتاور نه به علت اندازه آن، بلکه به علت ساده‌سازی صرف نظر می‌شود [5].



شکل ۴-۱ خمیدگی خطوط شار و ایجاد گشتاور در موتور پسماند استوانه‌ای

در موتورهای معمول حداکثر گشتاور تولیدی، به ازای زاویه داخلی ۴۵ درجه ایجاد می‌شود. در موتور پسماند، افزایش گشتاور بار، عقب‌افتادگی قطب‌های روتور از قطب‌های استاتور را بیشتر می‌کند. اگر زاویه عقب‌افتادگی از زاویه پسماند حلقه اصلی ماده بیشتر شود، روتور از حالت سنکرون خارج می‌شود [6].

همان‌طور که گفته شد، رابطه شدت میدان مغناطیسی و چگالی شار با حلقه پسماند بیان می‌شود. وقتی روتور با سرعتی کمتر از میدان چرخان و عقب‌تر از آن حرکت می‌کند، تک‌تک اجزا روتور همان حلقه پسماند را با یک اختلاف فاز تجربه می‌کنند. این چرخه مغناطیسی با لغزش اجزا به اندازه هر جفت قطب، کامل می‌شود و گرمایی را متناسب با مساحت حلقه پسماند هر یک از اجزا آزاد می‌کند.

بنابراین کل انرژی تلف‌شده روتور به ازای جفت قطب برابر است با:

$$W = V_r \int HdB \text{ (joules)} \quad (1-1)$$

که در آن $\int HdB$ مساحت حلقه پسماند بر حسب ژول بر مترمکعب و V_r حجم روتور بر حسب مترمکعب است. توان پسماند ایجادشده در روتور برابر است با:

$$P_h = fV_r \int HdB \text{ (watts)} \quad (2-1)$$

بخشی از این توان که متناسب با لغزش روتور است به گرما و باقیمانده آن به کار تبدیل می‌شود [4]. گشتاور موتور پسماند نیز متناسب با مساحت حلقه پسماند است و این گشتاور از لحظه راه‌اندازی تا رسیدن به سرعت سنکرون تقریباً ثابت می‌ماند [3].

۱-۵ انواع موتور پسماند

موتورهای پسماند معمول دارای یک روتور یکپارچه از ماده‌ای با خاصیت پسماند و استاتور با سیم‌پیچی چند فاز است. دهانه شیارهای استاتور برای کاهش اعوجاج در شکل سینوسی میدان، نیمه بسته یا بسته ساخته می‌شود. در روتور از جنس فریت مقاومت الکتریکی بزرگ است و جریان‌های فوکو به حداقل می‌رسد و گشتاور موتور از لحظه راه‌اندازی تا حالت دائمی سنکرون از خاصیت پسماند ناشی می‌شود. در آلیاژهای با خاصیت پسماند مناسب، مقاومت الکتریکی به نسبت کمتر است و جریان‌های گردابی در سرعت‌هایی غیر از سنکرون وجود دارند. در این حالت علاوه بر گشتاور پسماند، گشتاور القایی نیز متناسب با فرکانس لغزش در موتور وجود دارد. با این حال در سرعت سنکرون فرکانس لغزش صفر است و اثر این گشتاور از بین می‌رود [7].

مهم‌ترین تقسیم‌بندی موتورهای پسماند از روی شکل ظاهری روتور آنهاست. در ادامه به معرفی آنها می‌پردازیم.

۱-۵-۱ استوانه‌ای

استاتور موتور پسماند استوانه‌ای مشابه با استاتور معمول ماشین‌های القایی چند فاز است. روتور پسماند در این نوع موتورها یک استوانه توخالی از جنس ماده دارای خاصیت پسماند است. موتورهای پسماند استوانه‌ای با توجه به جنس هسته نگهدارنده روتور به دو دسته عمده تقسیم می‌شوند.

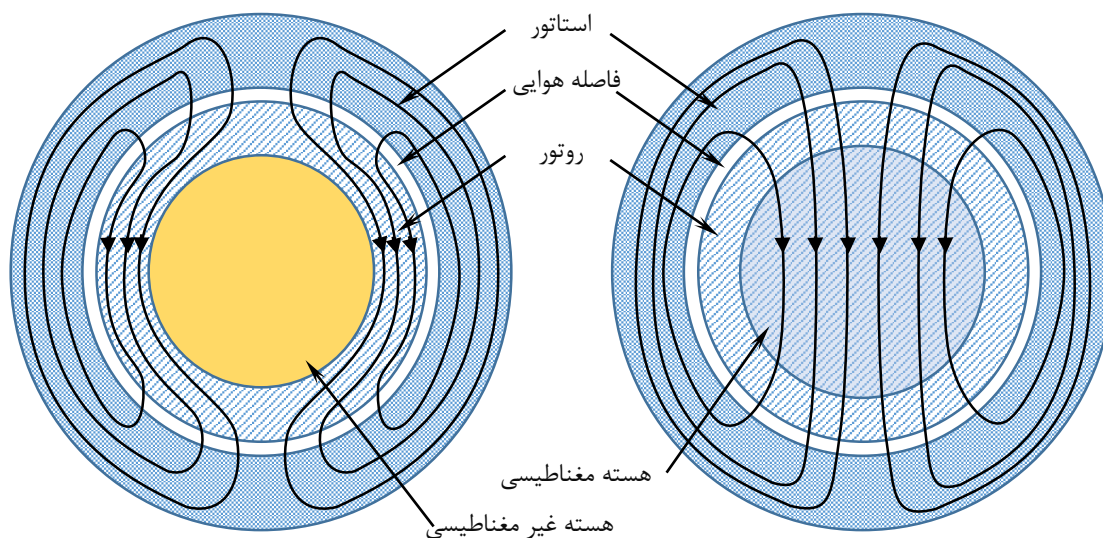
- استوانه‌ای شار شعاعی

در این موتورها جنس هسته نگهدارنده روتور از مواد فرومغناطیس نرم با نفوذپذیری بالاست. این عامل باعث می‌شود خطوط شار پس از عبور از روتور، مسیر خود را در جهت شعاع موتور از داخل هسته ببندند.

- استوانه‌ای شار محیطی

برعکس موتورهای شار شعاعی، جنس هسته نگهدارنده روتور در موتورهای شار محیطی، ماده‌ای فاقد خاصیت مغناطیسی است. مقاومت مغناطیسی بالای این ماده باعث می‌شود خطوط شار پس از عبور از روتور، محیط روتور را طی کنند.

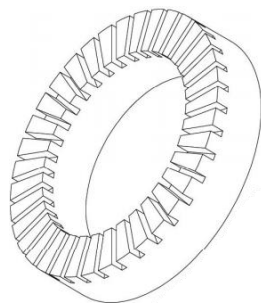
مسیر خطوط شار در موتورهای استوانه‌ای در شکل ۱-۵ نشان داده شده است.



شکل ۱-۵ مسیر شار در برش طولی از موتور استوانه‌ای شار شعاعی (سمت راست) و شار محیطی (سمت چپ) بدون اثر پسماند

۱-۵-۲ تخت

استاتور این نوع موتور شیارهایی در جهت شعاع دارد بنابراین خطوط شار ایجاد شده توسط سیم‌پیچی‌ها



در جهت محور موتور خواهد بود. در موتور استوانه‌ای، شکل استاتور باعث می-

شد طول مسیر مغناطیسی در راستای محور موتور با صرف نظر از اثرات لبه‌ای

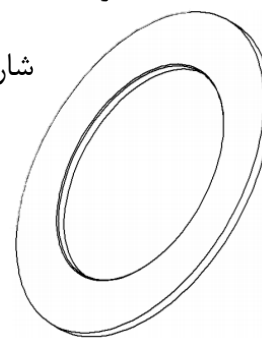
تقریباً ثابت در نظر گرفته شود، ولی در موتور تخت طول مسیر

شار در راستای شعاع ثابت نخواهد بود.

روتور در این موتورها به شکل یک دیسک حلقوی و از جنس ماده

فرومغناطیس است. روتور روی یک نگه‌دارنده قرار می‌گیرد. جنس این

نگه‌دارنده باعث تقسیم موتورهای تخت به دو نوع عمده می‌شود.



• تخت شار محیطی

در این نوع موتور، نگه‌دارنده روتور نفوذپذیری مغناطیسی بسیار کمی دارد. بنابراین خطوط شار با ورود

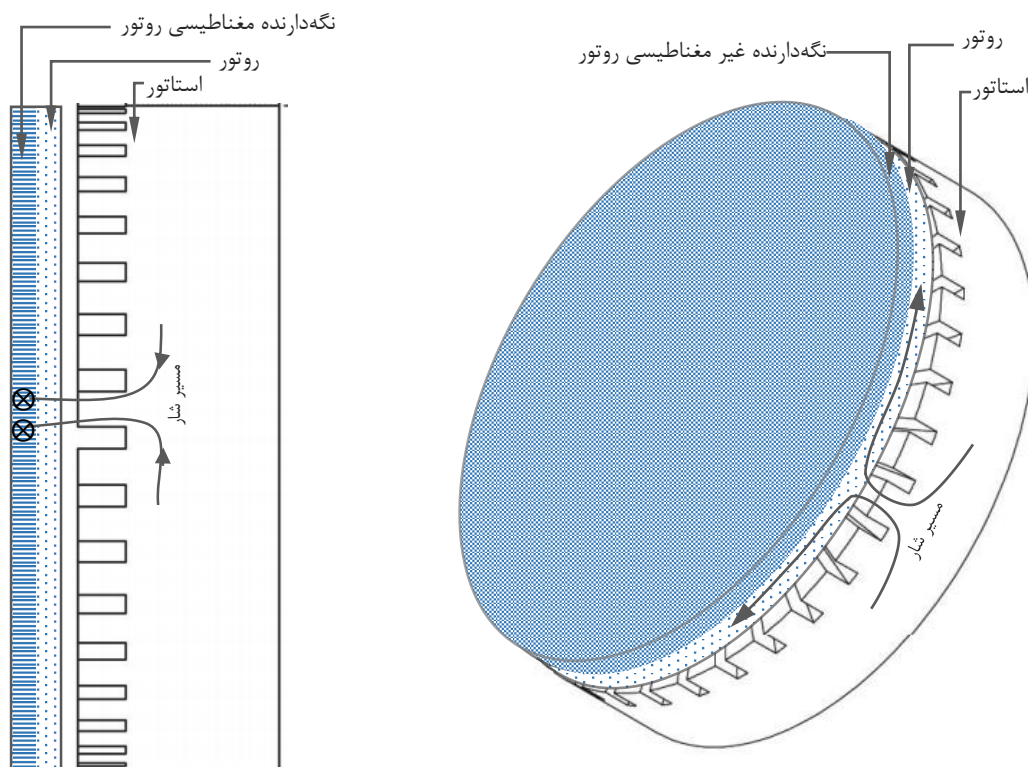
به روتور، محیط آن را دور می‌زنند و به همین دلیل این موتور را شار محیطی می‌نامند.

- تخت شار محوری

نگهدارنده روتور ماده‌ای با نفوذپذیری بالاست. این موضوع باعث می‌شود که عمده خطوط شار ضخامت روتور را عمودی طی کنند و وارد نگهدارنده روتور شوند. هم جهت بودن خطوط شار عبوری از روتور با محور موتور پسماند منشأ نام‌گذاری این موتور است.

۱-۵-۳ موتورهای پسماند خاص

انواع دیگری از موتورهای پسماند هم وجود دارند که معمولاً می‌توانند زیرمجموعه یکی از گروه‌های کلی بالا قرار گیرند. موتورهای استوانه‌ای معکوس، موتورهای تخت دو روتوره، موتورهای پسماند چند طبقه، موتورهای پسماند بدون شیار، موتورهای پسماند بدون هسته از این جمله‌اند [15]. اخیراً ترکیب موتورهای پسماند با موتورهای مغناطیس دائم نیز بسیار مطرح شده است.



شکل ۱-۶ نمای سه بعدی موتور پسماند شار محیطی (سمت راست) و نمای مقابل از موتور پسماند شار محوری (سمت چپ)

۱-۶ کاربردهای موتور پسماند

موتور القایی معمول‌ترین موتور جریان متناوب است که به قلب تپنده صنعت معروف است. این موتور سرعت تقریباً ثابتی دارد که در بارگذاری‌ها تغییر زیادی نمی‌کند. از این رو در کاربردهای سرعت ثابت نیز از این موتور استفاده می‌شود. نقیصه این موتور را می‌توان ضریب توان نسبتاً پایین این موتور دانست که همیشه هم پس فاز است. از سوی دیگر موتور سنکرون که سرعت ثابت دارد و ضریب توان قابل کنترل که حتی می‌تواند پیش فاز هم شود. ولی به خاطر وجود حلقه‌های لغزان و جاروبک نسبت به موتور قفسی سنجابی موتور القایی گران‌تر است. با این حال مشکل بزرگ‌تر این موتور سنکرون سازی^۱ آن است. موتور رلوکتانسی نیز در سرعت ثابت کار می‌کند. تفاوت این موتور با موتور سنکرون، نبود سیم‌پیچی‌های گردان و تحریک جریان مستقیم روی روتور موتور رلوکتانسی است. نقیصه اصلی موتور رلوکتانسی جدا از ضریب توان نسبتاً پایین به خاطر جریان مغناطیس شونده‌گی بالا، باز هم سنکرون سازی آن است. گشتاور قابل تأمین این موتور عموماً کمتر از حداکثر گشتاور قابل تحمل است و این باعث می‌شود در مقایسه با موتور سنکرونی با سرعت و توان مشابه چندین برابر بزرگ‌تر باشد. هر چند در بعضی کاربردها به خاطر ساختار ساده‌اش می‌توان از این معایب چشم‌پوشی کرد چرا که فاقد حلقه لغزان و جاروبک است [8].

موتور پسماند هم مانند موتور رلوکتانسی فاقد حلقه لغزان و جاروبک است ولی روتورش قطب‌های برجسته ندارد. گشتاور موتور از لحظه راه‌اندازی تا سرعت سنکرون تقریباً ثابت است بنابراین موتوری خودراه‌انداز است. نبود لرزش‌های مکانیکی و مغناطیسی، موتور پسماند را به کم صداترین و نرم‌ترین موتور چرخان موجود تبدیل کرده است. همین عوامل باعث به کارگیری این موتور در وسایلی چون ضبط و پخش و زمان‌سنجی شده است. غیر از این موتور پسماند در صنایع نظامی، سیستم HVDC، والو الکتریکی^۲ و حافظه‌های دیسکی کاربرد دارد. این موتور همچنین محرک اصلی در سانتریفیوژهای

^۱ Electric Valve

^۲ Synchronization

جداساز اورانیوم و ژيروسکوپها است. فارغ از مقدار لختی بار، موتور پسماند می‌تواند هر باری را که کوچک‌تر از حداکثر بار قابل تأمین باشد سنکرون کند. هیچ ماشین دیگری قادر به انجام این کار نیست. برای مثال موتور رلوکتانسی ناچار است بار را به یک باره از مشخصه سرعت-گشتاور موتور القایی به سرعت سنکرون ببرد که با تنش همراه است.

با این حال محدودیت اصلی موتور پسماند توان خروجی پایین است به طوری که توان خروجی اش حدود یک چهارم یک موتور القایی با ابعاد مشابه است [8].

۱-۷ نتیجه گیری

در این فصل کلیاتی مطرح شد که برای ورود به فصل‌های آتی ضروری به نظر میرسید. آشنایی با ساختار موتورها برای فهم نحوه مدل‌سازی موتور لازم است. از طرفی شناخت رفتار مواد مغناطیسی لازمه درک تاثیر تحریک اضافی روی حالت مغناطیسی ماده پسماند روتور است. در اینجا به طور مختصر به مطالب فصول پیش رو اشاره می‌شود.

در فصل دوم مدل‌سازی حلقه و موتور پسماند انجام شده و بهترین روش برای مدل‌سازی حلقه پسماند مطرح می‌شود. فصل سوم حالت‌های مغناطیسی موتور را با تغییرات ولتاژ در شرایط گوناگون تحلیل می‌کند. پدیده تحریک اضافی موقت و دلایل بهبود رفتار موتور بعد از آن به طور مفصل در این فصل تشریح شده است. در فصل چهارم الگوریتم کلی پیش‌بینی عملکرد موتور مطرح می‌شود. این فصل همچنین حاوی نتایج شبیه‌سازی موتور، ارائه راه‌کارهایی برای بهبود رفتار موتور، ضرورت اعمال تحریک اضافی موقت و معرفی نوع خاص‌تری از تحریک اضافی موقت است که موجب بهینه شدن رفتار موتور می‌گردد. فصل پنجم شامل جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی در رابطه با بهبود تأثیر تحریک اضافی است.

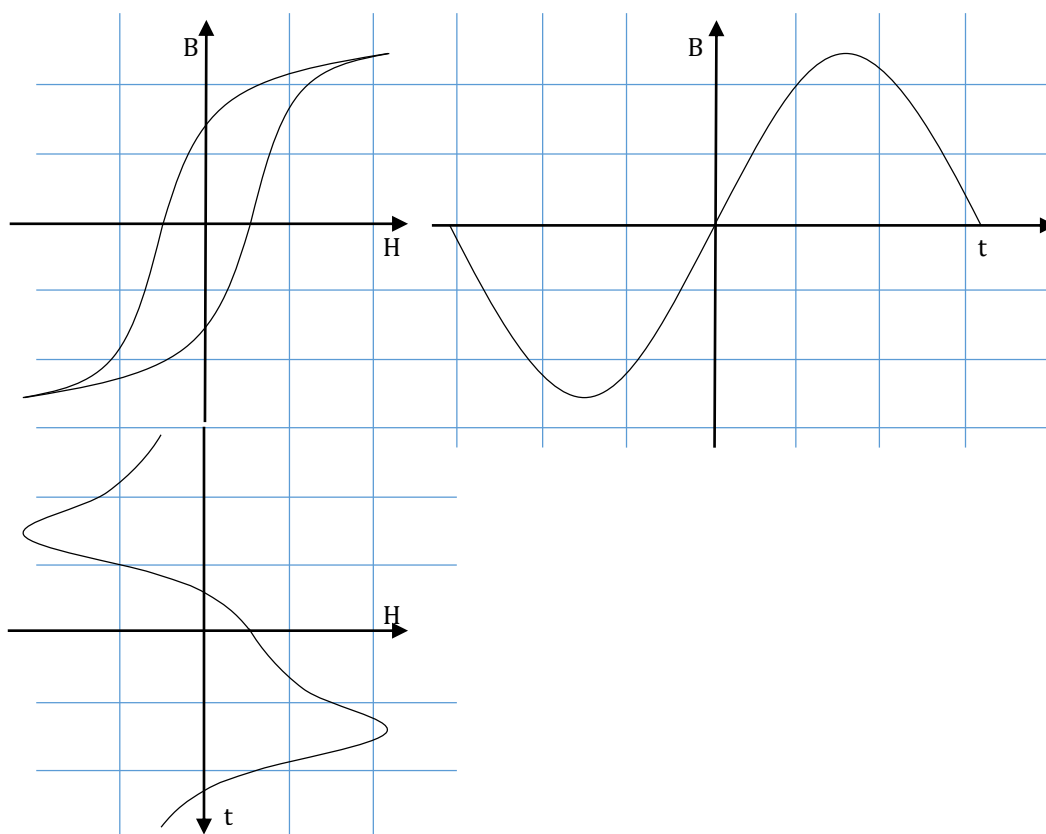
فصل دوم

مدل سازی موتور پسماند

۱-۲ مقدمه

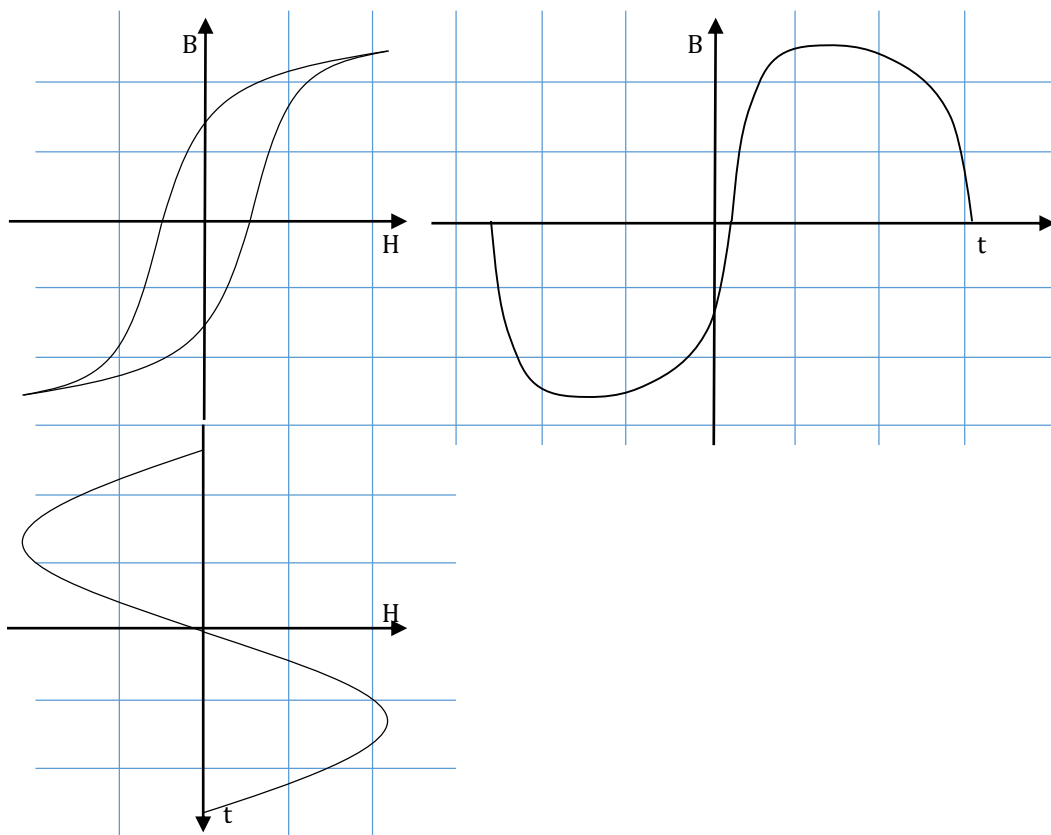
مدل سازی موتور پسماند را می توان در دو مرحله انجام داد. مرحله اول مدل سازی حلقه پسماند و مرحله دوم به دست آوردن مدار معادل برای موتور است.

حلقه پسماند بیانگر رابطه موجود بین چگالی شار مغناطیسی (B) و شدت میدان مغناطیسی (H) در ماده پسماند است. این رابطه غیرخطی است. حتی در صورتی که فرض کنیم سیم پیچی های استاتور طوری توزیع شده اند که شار در فاصله هوایی و روتور سینوسی است، وجود مشخصه غیرخطی در روتور باعث ایجاد H کاملاً غیر سینوسی می شود. نمونه ای از این شکل موجها در شکل ۱-۲ و شکل ۲-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۲ شکل موجهای B و H با سینوسی فرض کردن چگالی شار B

مدل سازی حلقه پسماند به شکل بیضی برای اولین بار توسط تییر انجام شد [3]. بعدها این مدل توسط روترز^۱ [4]، میایری^۲ [9]، کاتاوکا^۳ [10] و رابرتسون^۴ [11] استفاده شد و بهبود پیدا کرد. در مدل سازی حلقه پسماند علاوه بر مدل بیضی که معمول ترین روش برای تقریب حلقه پسماند است، مدل متوازی الاضلاع نیز بارها استفاده شده است. با این حال برای محاسبه اختلاف فاز بین چگالی شار و میدان مغناطیسی توسط آنالیز میدان الکترومغناطیسی، استفاده از مدلی غیر از بیضی، رسیدن مستقیم به جواب را بسیار سخت می کند [12].

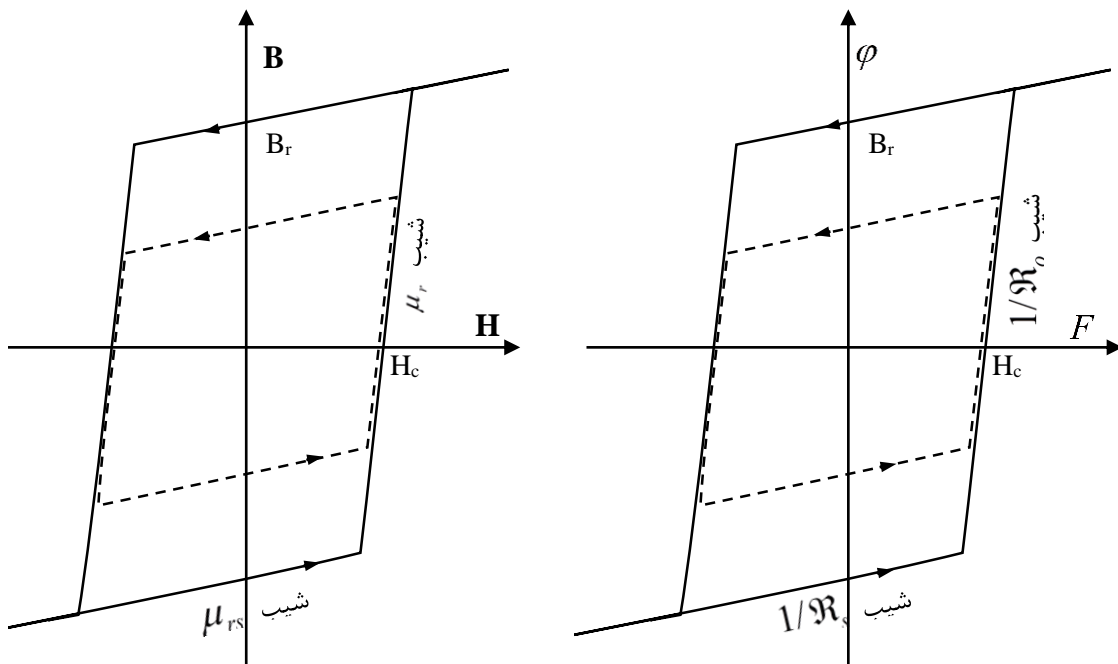


شکل ۲-۲ شکل موج های B و H با سینوسی فرض کردن میدان H

۲-۲ مدل سازی حلقه پسماند

۱-۲-۲ معرفی مدل متوازی الاضلاع

مدل متوازی الاضلاع به علت تقریب شکل موج غیر سینوسی برای چگالی شار در تحلیل تحریک اضافی موقت کاربرد زیادی ندارد. با این حال در اینجا مختصری به معرفی این مدل پرداخته می شود. در شکل ۳-۲ سمت چپ مدل ایده آل متوازی الاضلاع برای حلقه پسماند نشان داده شده است. چون هدف دستیابی به یک مدار معادل مغناطیسی برای موتور است می توان این مدل را به صورت شکل ۳-۲ سمت راست در آورد. مدل تغییر یافته به علت اینکه شامل شار گذرنده از روتور بر حسب نیروی محرکه مغناطیسی است دستیابی به مدار معادل مغناطیسی را ساده تر می کند.



شکل ۳-۲ مدل متوازی الاضلاع برای مدل کردن حلقه پسماند

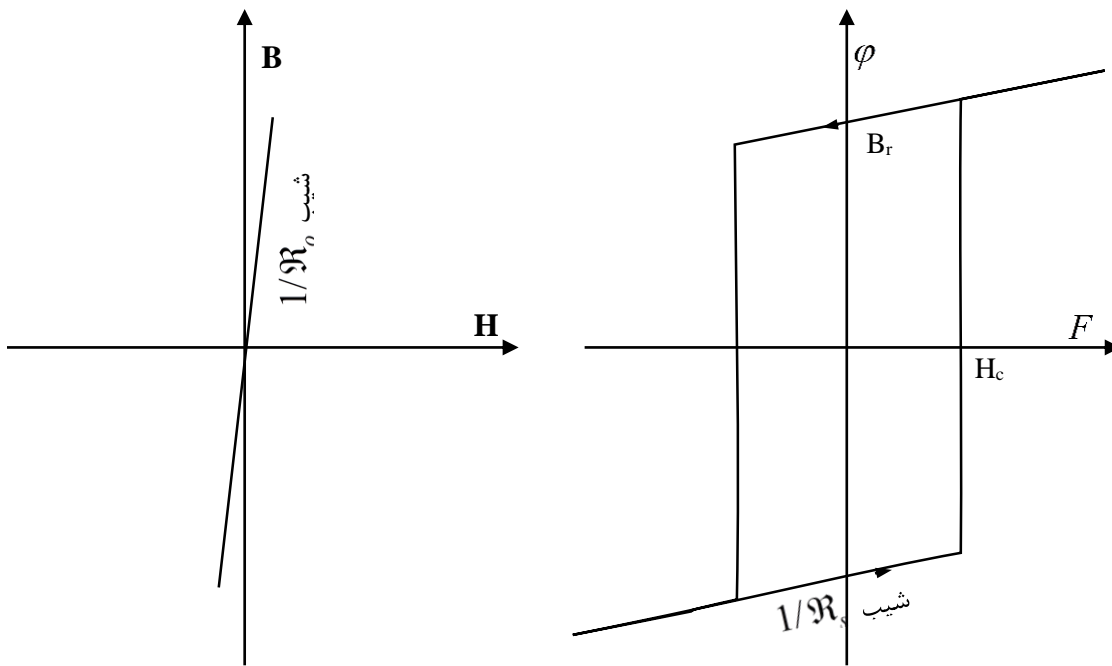
در شکل ۳-۲ μ_r و μ_{rs} به ترتیب بیانگر نفوذپذیری مغناطیسی روتور در حالت غیر اشباع و اشباع هستند. و از طرفی داریم:

$$\mathfrak{R}_o = \frac{t_r}{\mu_r R_{av} l} \quad (A/Wb \cdot rad)$$

$$\mathfrak{R}_s = \frac{t_r}{\mu_{rs} R_{av} l} \quad (A/Wb.rad)$$

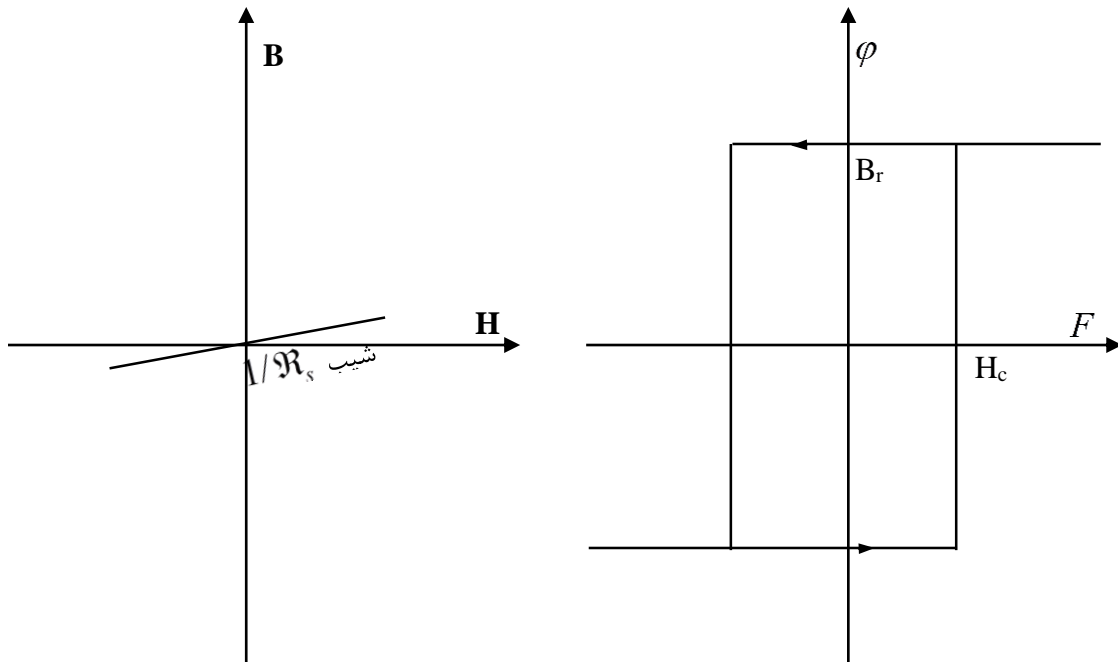
در معادلات بالا R_{av} شعاع متوسط دیسک روتور و t_r ضخامت دیسک روتور است. l نیز در موتورهای پسماند استوانه‌ای برابر طول محوری دیسک روتور و در موتورهای پسماند تخت بیانگر طول شعاعی دیسک روتور است.

مدل نشان داده شده در شکل ۳-۲ را می‌توان با در نظر گرفتن یک رلوکتانس سری ساده‌تر نیز کرد. این کار باعث می‌شود که خطوط مدل شکل ۳-۲ که شیب $1/\mathfrak{R}_o$ داشتند عمودی شوند. این موضوع در شکل ۴-۲ نشان داده شده است.



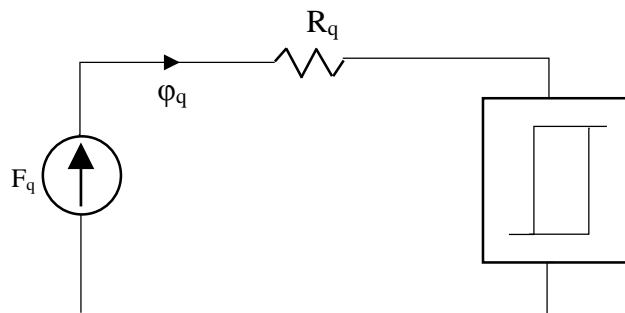
شکل ۴-۲ استخراج رلوکتانس سری از مدل متوازی‌الاضلاع

می‌توان از این هم فراتر رفت و با در نظر گرفتن یک رلوکتانس موازی با مدلی که به مستطیل تبدیل می‌شود، مدل را ساده‌تر کرد.



شکل ۵-۲ استخراج رلوکتانس موازی از مدل متوازی الاضلاع

نهایتاً با نوشتن قضیه تونن برای مدار معادل ماشین پسماند می توان آن را مطابق شکل ۶-۲ ساده کرد.



شکل ۶-۲ مدار معادل ساده شده موتور پسماند

که در مدار بالا:

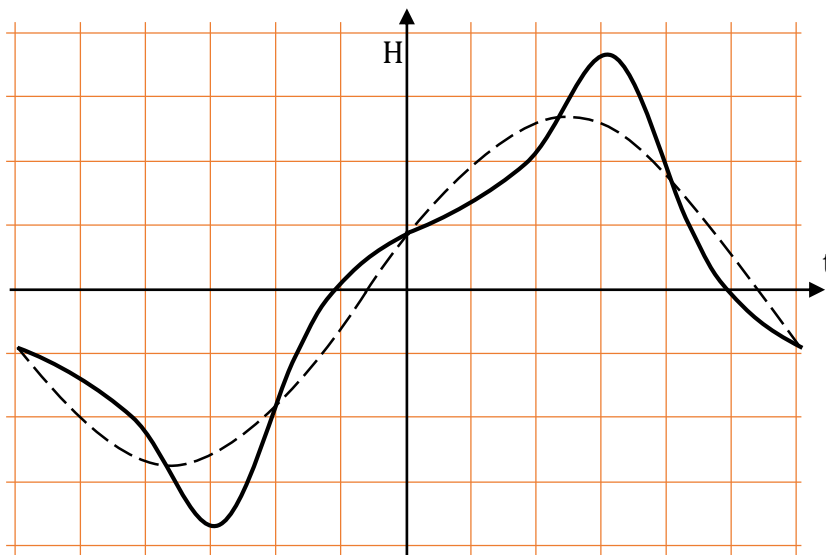
$$F_q = \frac{F(\mathfrak{R}_s - \mathfrak{R}_o)}{\mathfrak{R}_s + \mathfrak{R}_g} \text{ amps}$$

$$\mathfrak{R}_q = \frac{(\mathfrak{R}_s - \mathfrak{R}_o)(\mathfrak{R}_o + \mathfrak{R}_g)}{\mathfrak{R}_s + \mathfrak{R}_g} \text{ amps/wb.rad}$$

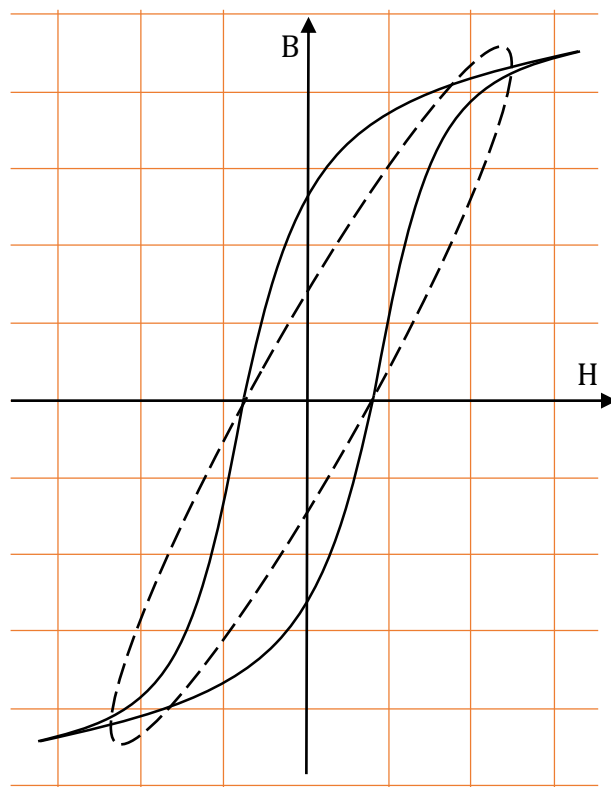
و \mathcal{R}_g رلوکتانس فاصله هوایی است. به دست آوردن توزیع چگالی شار و تحلیل عملکرد موتور پسماند توسط این مدل در [2] آمده است.

۲-۲-۲ معرفی مدل بیضی

در روش معمول تر، برای مدل کردن حلقه پسماند، یک بیضی جایگزین آن می شود (شکل ۸-۲ را ببینید). این جایگزینی از فرض دیگری مبنی بر سینوسی بودن شکل موج H ناشی می شود. شکل سینوسی H می تواند با فرض های مختلف و تقریب های گوناگون به دست آید. استفاده از هارمونیک اول H یکی از معمول ترین روش ها برای تقریب حلقه است، هر چند در این جا از آن استفاده نشده است. در این رساله H به گونه ای انتخاب می شود که مساحت بیضی را با حلقه پسماند برابر کند. این سینوسی لزوماً هارمونیک اول شکل موج H نیست. با این که روش ها برای تقریب H متفاوت است ولی تفاوت نتایج در جزئیات است. شکل ۷-۲ رابطه هارمونیک اول و شکل موج اصلی شدت میدان مغناطیسی در یک ماده پسماند را نشان می دهد. یکی از حلقه های پسماند ماده و بیضی حاصل از تقریب هارمونیک اول شکل موج H در شکل ۸-۲ نشان داده شده است.



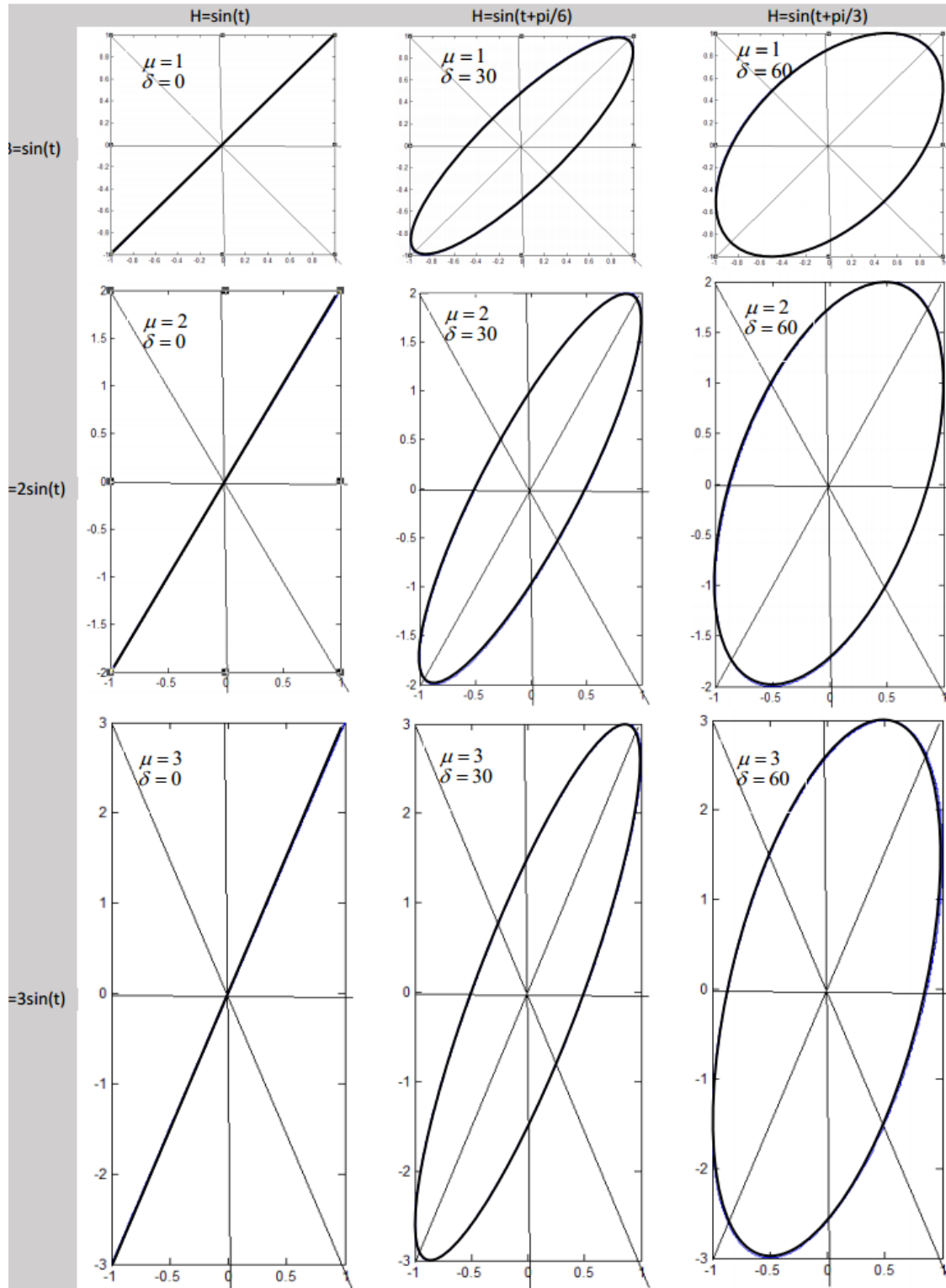
شکل ۷-۲ شکل موج H و هارمونیک اول آن



شکل ۲-۸ صرف نظر کردن از هارمونیک‌های H و تبدیل حلقه پسماند به بیضی

بیضی‌های مختلف حاصل از B و H های سینوسی متفاوت در شکل ۲-۹ نشان داده شده است. در این شکل δ اختلاف زاویه بین شکل موج‌های سینوسی تشکیل‌دهنده بیضی است. هنگامی که بیضی

جایگزین حلقه پسماند می‌شود، δ نقش زاویه پسماند را بازی می‌کند یعنی $\delta = \alpha$.



شکل ۹-۲ بیضی‌های مختلف حاصل از H و B های سینوسی متفاوت

۲-۳ مدار معادل موتور پسماند

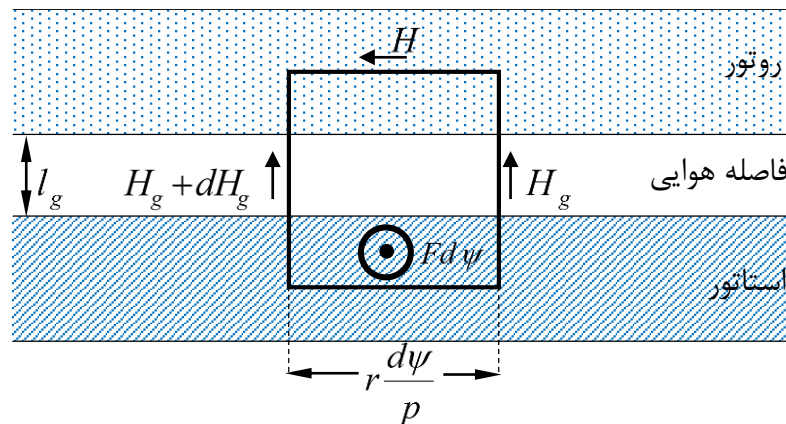
دو روش عمده برای به دست آوردن مدار معادل ماشین پسماند وجود دارد. روش اول استفاده از امیدانس‌های معادل و روش دوم به کارگیری قانون مداری آمپر است [6]. در اینجا روش دوم به کار گرفته شده است.

قانون مداری آمپر را برای مسیری که قسمتی از استاتور، فاصله هوایی و قسمتی از روتور را در بر می‌گیرد اعمال می‌کنیم. رابطه (۱-۲) برای مسیر نشان داده‌شده در شکل ۱۰-۲ قابل نوشتن است [13].

$$F d\psi = H_g l_g + H r \frac{d\psi}{p} - (H_g + dH_g) l_g \quad (1-2)$$

ساده‌سازی رابطه (۱-۲) منجر به رابطه زیر خواهد شد.

$$F = \frac{r}{p} H - \frac{dH_g}{d\psi} l_g \quad (2-2)$$



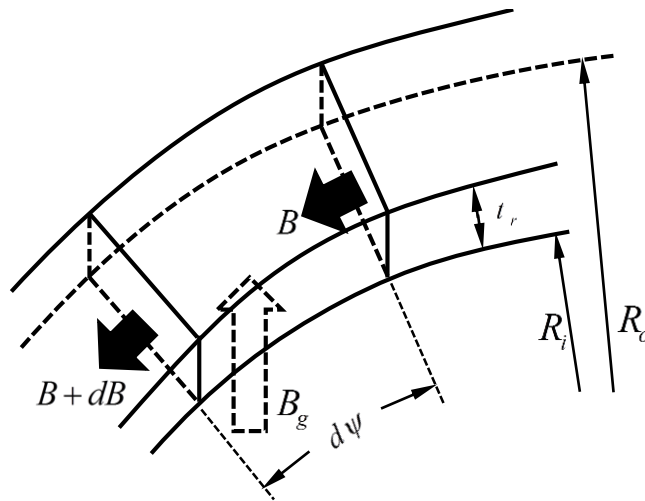
شکل ۱۰-۲ برش دو بعدی موتور پسماند تخت و اعمال قانون مداری آمپر

قانون پیوستگی شار در فاصله هوایی و روتور رابطه (۳-۲) را نتیجه خواهد داد.

$$t_r (B + dB) = t_r B + r \frac{d\psi}{p} B_g \quad (3-2)$$

ساده‌سازی رابطه (۳-۲) منجر به رابطه (۴-۲) می‌شود.

$$B_g = \frac{p t_r}{r} \frac{dB}{d\psi} \quad (4-2)$$



شکل ۱۱-۲ چگالی شار روتور و فاصله هوایی در موتور پسماند تخت شار محیطی

از طرفی در فاصله هوایی داریم:

$$B_g = \mu_0 H_g \quad (۵-۲)$$

همان طور که در بخش ۲-۲ گفته شد، رابطه بین B و H در هر نقطه از روتور، توسط یک بیضی تقریب زده می شود. فرض کنیم که عبارتی مانند رابطه (۶-۲) برای چگالی شار، در معادله میدان صدق می کند.

$$B = B_p \cos(\omega t - \psi - \varphi_0) \quad (۶-۲)$$

که در آن $\theta = \omega t - \psi$. لازم است که مقداری قابل قبول برای B_p و φ_0 محاسبه شود.

با توجه به رابطه (۶-۲)، رابطه H به صورت زیر قابل نوشتن است.

$$H = \frac{B_p}{\mu} \cos(\omega t - \psi - \varphi_0 + \alpha) \quad (۷-۲)$$

با جایگذاری (۶-۲) در (۴-۲)، برای چگالی شار فاصله هوایی خواهیم داشت:

$$B_g = \frac{P t_r}{r} B_p \sin(\omega t - \psi - \varphi_0) \quad (۸-۲)$$

با استفاده از رابطه (۵-۲) و جایگذاری روابط (۷-۲) و (۸-۲) در رابطه (۲-۲) داریم:

$$F = \frac{B_p r}{\mu p} \cos(\omega t - \psi - \varphi_0 + \alpha) + \frac{B_p l_g p t_r}{\mu_0 r} \cos(\omega t - \psi - \varphi_0) \quad (9-2)$$

برای حل معادله (9-2) باید F محاسبه شود.

$$F = \sum_{k=1}^m I^{(k)} W^{(k)} \quad (10-2)$$

در رابطه (10-2) $W^{(k)}$ چگالی توزیع سیم پیچی در فاز kام است که آن را به صورت زیر تعریف می کنیم.

$$W^{(k)} = W \cos(\psi - \psi_k) \quad (11-2)$$

که :

$$\psi_k = (k-1)2\pi/m \quad (12-2)$$

$$W = \frac{2K_\omega N_\omega}{p\pi} \quad (13-2)$$

جریان های متعادل در فاز kام استاتور را به صورت زیر در نظر می گیریم:

$$I^{(k)} = \sqrt{2}I \cos(\omega t - \psi_k) \quad (14-2)$$

حال رابطه (10-2) قابل بازنویسی است.

$$\begin{aligned} F &= \sum_{k=1}^m \sqrt{2}IW \cos(\omega t - \psi_k) \cos(\psi - \psi_k) \\ &= \frac{m}{2} \sqrt{2}IW \cos(\omega t - \psi) \end{aligned} \quad (15-2)$$

با جایگذاری (15-2) در (9-2) رابطه زیر حاصل می شود.

$$\frac{m}{2} \sqrt{2}IW \cos(\omega t - \psi) = \frac{B_p r}{\mu p} \cos(\omega t - \psi - \varphi_0 + \alpha) + \frac{B_p l_g p t_r}{\mu_0 r} \cos(\omega t - \psi - \varphi_0) \quad (16-2)$$

با حل رابطه (16-2) برای B_p و φ_0 (پیوست ۱ را ببینید) خواهیم داشت:

$$\varphi_0 = \tan^{-1} \left\{ \frac{\frac{r}{p\mu} \sin \alpha}{\left(\frac{r}{\mu p} \cos \alpha + \frac{l_g p t_r}{\mu_0 r} \right)} \right\} \quad (17-2)$$

$$B_p = \frac{\frac{m}{2} IW}{\sqrt{p^2 \mu^2 + \frac{2l_g t_r}{\mu_0 \mu} \cos \alpha + \frac{l_g^2 p^2 t_r^2}{\mu_0^2 r^2}}} \quad (18-2)$$

عبارت (۱۷-۲) و (۱۸-۲) نشان دهنده وابستگی B_p و ϕ_0 به r است.

برای محاسبه امپدانس های مدار معادل، نیروی محرکه مغناطیسی (emf) القایی در هر فاز استاتور را به دست می آوریم. سپس جریان استاتور را به دو مؤلفه i_g (ایجاد کننده mmf هوایی) و i_r (ایجاد کننده mmf روتور) تقسیم می کنیم. با تقسیم emf القایی بر جریان ها، امپدانس های معادل به دست می آید [13].

شار گذرنده از یک دور سیم که یکی از دو هادی آن در موقعیت ψ و دیگری در $\psi + \pi$ قرار دارد، به صورت زیر است.

$$\phi = \int_{R_i}^{R_o} \int_{\phi}^{\phi+\pi} (-B_g) r \frac{d\psi}{p} dr \quad (19-2)$$

با توجه به وابستگی B_p و ϕ_0 به r ، حل انتگرال بالا بسیار پیچیده است. برای ساده سازی فرض می کنیم

که مقادیر B_p و ϕ_0 به r وابسته نیستند و مقدار آنها در شعاع میانگین $r = R_{av} = \frac{R_o + R_i}{2}$ مد نظر است.

$$\begin{aligned} \phi &= \int_{\phi}^{\phi+\pi} (-B_g) I R_{av} \frac{d\psi}{p} \\ &= 2l_t B_p \cos(\omega t - \psi - \phi_0) \end{aligned} \quad (20-2)$$

در رابطه بالا $l = R_o - R_i$ طول شعاعی روتور است. Emf القایی در یک هادی مستقر در ψ برابر $\frac{1}{2} \left(-\frac{\partial \phi}{\partial t}\right)$

است. بنابراین ولتاژ القایی در یک کلاف استاتور از انتگرال گیری $\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t}\right)$ روی چگالی سیم پیچ فازها

به دست می آید [13].

$$e_k = \int_0^{2p\pi} \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \phi}{\partial t} \right) W \cos(\psi - \psi_k) d\psi$$

$$= p\omega t_r \pi l W B_p \cos\left(\omega t - \psi_k + \frac{\pi}{2}\right) \quad (21-2)$$

با تقسیم رابطه (۲-۱۶) بر $mW/2$ می توان دید که سمت راست عبارت همان جریان فاز k ام استاتور است.

$$i_g = \frac{\pi p^2 l_g t_r B_p}{mW \mu_0 R_{av}} \cos\{\omega t - \psi_k - \phi_0\} \quad (22-2)$$

$$i_r = \frac{\pi R_{av} B_p}{mW \mu} \cos\{\omega t - \psi_k - \phi_0 + \alpha\} \quad (23-2)$$

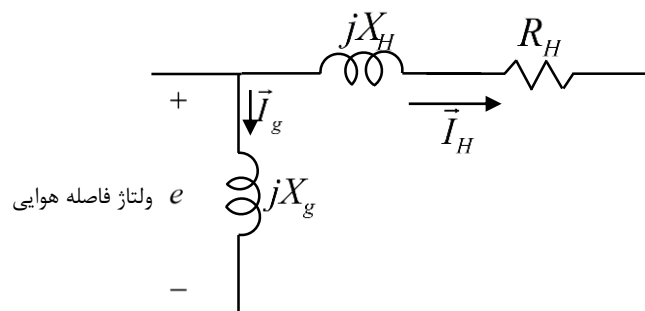
امپدانس های معادل بر فاز به صورت زیر به دست می آیند:

$$jX_g = \frac{e}{i_g} = j \frac{2\omega l R_{av} K_w^2 N_w^2 m \mu_0}{p^2 \pi l_g} \quad (24-2)$$

$$R_H = \operatorname{Re}\left\{ \frac{e}{i_r} \right\} = \frac{2\omega t_r l K_w^2 N_w^2 m \mu}{R_{av} \pi} \sin \alpha \quad (25-2)$$

$$X_H = \operatorname{Im}\left\{ \frac{e}{i_r} \right\} = \frac{2\omega t_r l K_w^2 N_w^2 m \mu}{R_{av} \pi} \cos \alpha \quad (26-2)$$

مدار معادل سمت روتور در شکل ۲-۱۲ آورده شده است.



شکل ۲-۱۲ مدار معادل موتور پسماند در سمت روتور

با به دست آوردن مقاومت و راکتانس پراکندگی استاتور مدار معادل کامل خواهد شد.

مقاومت و راکتانس پراکندگی استاتور: مقاومت dc سیم پیچی های استاتور از رابطه (۲-۲۷) به دست می آید که در آن l طول رشته سیم، a تعداد رشته های موازی، σ رسانایی و A_c سطح مقطع رسانا است.

$$R_{dc} = \frac{l}{\sigma a A_c} \quad (2-27)$$

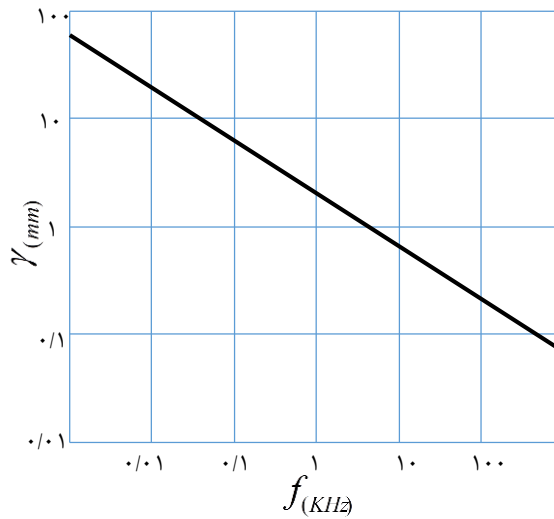
مقاومت همچنین به دما وابسته است. فرمول محاسبه مقاومت مس در دمای دلخواه در رابطه (۲-۲۸) آمده است که در آن ρ_{Cu} رسانندگی مس، ΔT اختلاف دمای کار با دمای ۲۰ درجه سانتی گراد و α_{Cu} ضریب دمایی مقاومت است.

$$\rho_{Cu} = \rho_{Cu,20^\circ C} (1 + \Delta T \alpha_{Cu}) \quad (2-28)$$

اثر پوستی^۱ که بر اثر القای الکترومغناطیسی در رسانا به وجود می آید دیگر عامل تأثیرگذار در مقاومت است. رابطه (۲-۲۹) فرمول محاسبه عمق پوستی^۲ را نشان می دهد که در آن γ عمق پوستی بر حسب متر، f فرکانس بر حسب هرتز، σ رسانایی بر حسب اهم متر (برای مس 5.9×10^7) و μ نفوذپذیری مغناطیسی رسانا (برای مس تقریباً مساوی نفوذپذیری مغناطیسی هوا) است [14].

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{\pi f \mu \sigma}} \quad (2-29)$$

عمق پوستی بیانگر فاصله از سطح رساناست جایی که جریان عبوری از رسانا از ۳۶/۸ درصد جریان روی سطح رسانا کمتر می شود. شکل ۲-۱۳ تغییرات عمق پوستی مس را نسبت به تغییرات فرکانس نشان می دهد. می توان دید که عمق پوستی مس تا حدود فرکانس ۴ کیلوهرتز بزرگ تر از ۱ میلی متر است. بنابراین اگر هادی های به کاررفته در سیم پیچی های استاتور به اندازه کافی نازک باشند می توان از اثر پوستی صرف نظر کرد. اگر اثر پوستی قابل چشم پوشی نباشد باید در رابطه (۲-۲۷) به جای A_c سطح مقطع موثر رسانا قرار گیرد.



شکل ۲-۱۳ تغییرات عمق پوستی با تغییرات فرکانس برای مس

با صرف نظر کردن از راکتانس پراکندگی کله سیم‌ها رابطه (۲-۳۰) برای محاسبه راکتانس پراکندگی استاتور در [15] به دست آمده است.

$$X_{ls} = \frac{\mathfrak{R}_{total}}{\mathfrak{R}_{lg}} X_{eq} \quad (۲-۳۰)$$

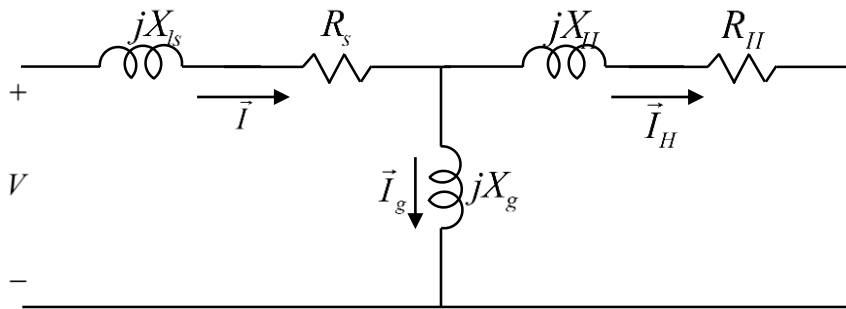
در رابطه (۲-۳۰) \mathfrak{R}_{total} رلوکتانس مسیر شاری است که از روتور پسماند بسته می‌شود و \mathfrak{R}_{lg} رلوکتانس مسیر شاری است که تنها از فاصله هوایی بسته می‌شود و X_{eq} امپدانس معادل مدار شکل ۲-۱۲ از دید ولتاژ e است.

$$\mathfrak{R}_{total} = \frac{2l_g}{\mu_0 L (R_o - R_i)} + \frac{L}{2\mu_r t_r (R_o - R_i)} \quad (۲-۳۱)$$

$$\mathfrak{R}_{lg} = \frac{L}{2\mu_0 l_g (R_o - R_i)} \quad (۲-۳۲)$$

در روابط بالا $L = \frac{\pi R_{av}}{p}$ طول محیطی موثر روتور و R_{av} شعاع متوسط دیسک روتور است. مدار معادل

کامل موتور پسماند در شکل ۲-۱۴ نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۴ مدار معادل موتور پسماند

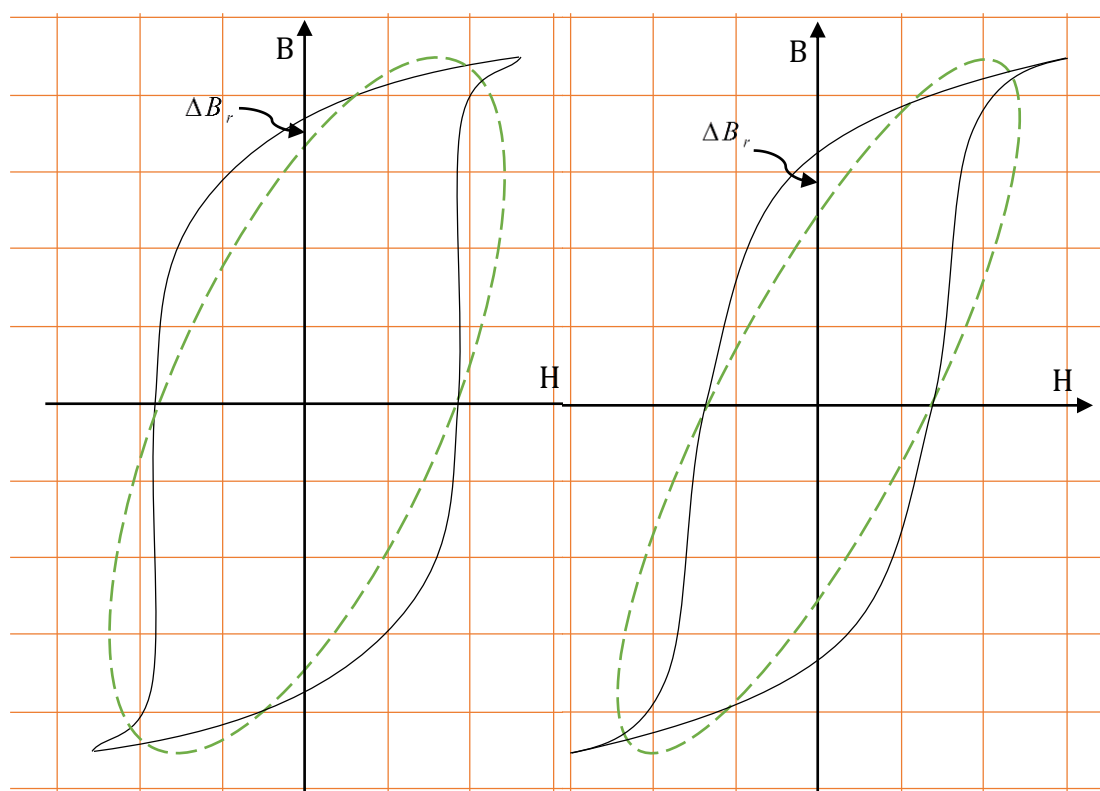
۲-۴ مدار معادل برای موتورهای پسماند استوانه‌ای

روابط (۲-۲۴) تا (۲-۲۶) مربوط به موتور پسماند شار محیطی در حالت کلی به ترتیب دارای ضرایب بدون بعد α_g ، α_r و α_l هستند. در اینجا مقدار این ضرایب با فرض‌هایی مساوی یک تقریب زده شده‌اند. فرض اول این است که ماکزیمم چگالی شار در شعاع میانگین دیسک پسماند R_{av} اتفاق می‌افتد و فرض دوم اینکه طول شعاعی دیسک روتور یعنی $R_o - R_i$ به اندازه کافی از شعاع میانگین دیسک پسماند کوچک‌تر است. غیرمنطقی بودن دو فرض بالا باعث فاصله گرفتن ضرایب از یک می‌شود. چگونگی تغییرات این ضرایب در [13] آمده است.

این فرض‌ها برای انطباق امپدانس‌های موتور پسماند تخت شار محیطی بر امپدانس‌های موتور استوانه‌ای شار شعاعی ضروری نیست. باید توجه کرد که پارامترهای r ، l و t_r به کاررفته در روابط موتور پسماند تخت شار محیطی، به ترتیب معادل با متوسط شعاع فاصله هوایی r_g ، طول محوری دیسک پسماند و ضخامت دیسک پسماند در موتور استوانه‌ای هستند. موتور پسماند شار شعاعی باید روتور بسیار باریک و نگه‌دارنده‌ای با نفوذپذیری بالا داشته باشد. در صورت اعمال دو فرض بالا روابط (۲-۲۴) تا (۲-۲۶) بیانگر امپدانس‌های موتور پسماند استوانه‌ای شار محیطی نیز هستند.

۲-۵ محدودیت های مدل ارائه شده

این موضوع که آیا بیضی جایگزین مناسبی برای حلقه پسماند است یا خیر به چند عامل وابسته است. یکی از این عوامل زاویه پسماند است. برای مثال در شکل ۲-۸ اختلاف زاویه بین چگالی شار B و هارمونیک اول H تنها ۱۸ درجه است. این زاویه با بارگذاری موتور رابطه دارد و می تواند تغییر کند. شکل ۲-۱۵ نشان می دهد که افزایش زاویه پسماند باعث تشابه بیشتر حلقه پسماند با بیضی معادلش می شود و احتمالاً دقت مدل را بالاتر می برد. این مسئله از مقایسه بین اختلاف ماکزیمم H در بیضی و حلقه و همچنین مقایسه خطای B_r مشخص است.



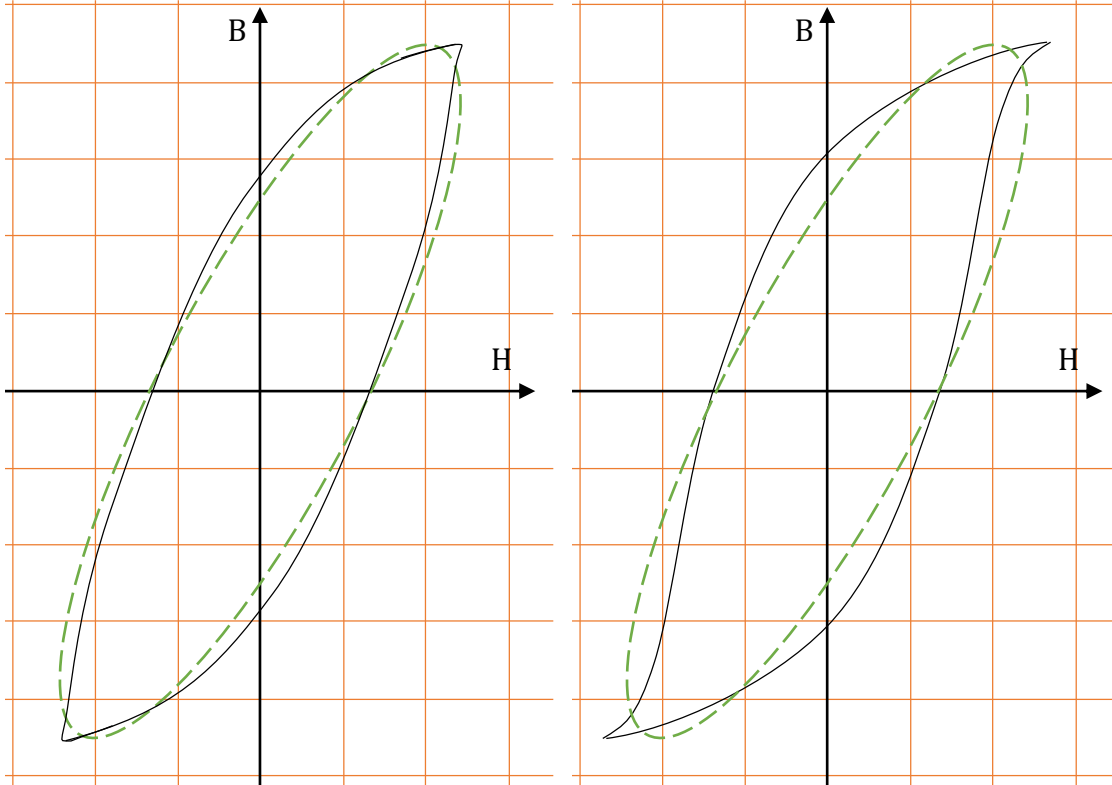
ب. زاویه پسماند ۴۸ درجه

آ. زاویه پسماند ۳۳ درجه

شکل ۲-۱۵ افزایش زاویه پسماند و تشابه بیشتر حلقه پسماند با بیضی معادل آن

عامل دیگر، ماده استفاده شده در روتور است. طبیعی است که مواد مختلف دارای حلقه های پسماند مختلفند. بعضی از این حلقه ها هارمونیک کمتری در H ایجاد می کنند. برای مثال حلقه پسماند شکل ۲-۸ دارای ۳۰ درصد هارمونیک سوم، ۱۰ درصد هارمونیک پنجم و ۲/۵ درصد هارمونیک هفتم است.

دقت مدل ارائه شده در حلقه‌هایی که هارمونیک کمتری تولید می‌کنند بیشتر است. شکل ۱۶-۲ نشان می‌دهد که چگونه کاهش هارمونیک باعث تشابه بیشتر حلقه پسماند و بیضی می‌شود.



آ. حذف ۳۳٪ از هارمونیک‌های شکل ۸-۲

ب. حذف ۶۷٪ از هارمونیک‌های شکل ۸-۲

شکل ۱۶-۲ کاهش هارمونیک‌های تولیدی از حلقه پسماند و تشابه بیشتر حلقه با بیضی معادل آن

در شکل ۱۵-۲ و شکل ۱۶-۲ مساحت‌های بیضی و حلقه پسماند لزوماً برابر نیست. به عبارتی حذف تمامی هارمونیک‌های H برابری مساحت‌های بیضی و حلقه پسماند را ایجاد نمی‌کند. ولی مساحت حلقه پسماند مستقیماً در تحلیل عملکرد موتور دخالت دارد. گشتاور موتور پسماند متناسب با این مساحت است. بنابراین بهتر است هم زمان با فرض سینوسی بودن H ، شرط برابری مساحت نیز رعایت شود.

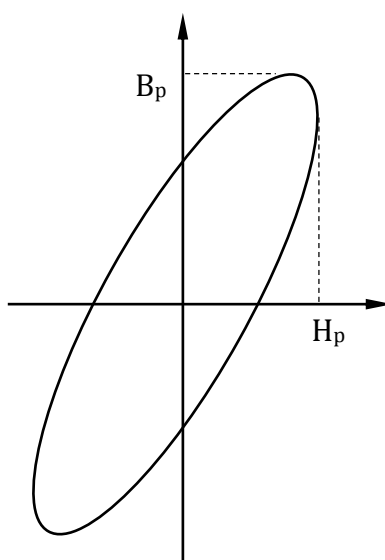
در این تحقیق شکل سینوسی فرض شده برای H ، هارمونیک اول آن نیست. برای توضیح معیار سینوسی فرض کردن H ابتدا رابطه مساحت بیضی را برای یک بیضی نمونه همانند شکل ۱۷-۲ بیان می‌کنیم.

$$E = \pi B_p H_p \sin(\angle H - \angle B) \quad (۳۳-۲)$$

مقایسه بین روش ۱- استفاده از هارمونیک اول H و ۲- استفاده از شرط برابری مساحتها در جدول ۱-۲ خلاصه شده است.

جدول ۱-۲ تفاوت بین دو روش استفاده از هارمونیک اول H و استفاده از شرط برابری مساحتها

روش ↓	پارامتر مدل سازی ←	B_p	H_p	زاویه پسماند
استفاده از هارمونیک اول H	ماکزیمم شکل موج B	ماکزیمم شکل موج H	ماکزیمم هارمونیک اول شکل موج H (H_{1p})	زاویه بین B و H_1
استفاده از معیار برابری مساحتها	ماکزیمم شکل موج B	ماکزیمم شکل موج H	ماکزیمم شکل موج H	زاویه بین B و H معادل



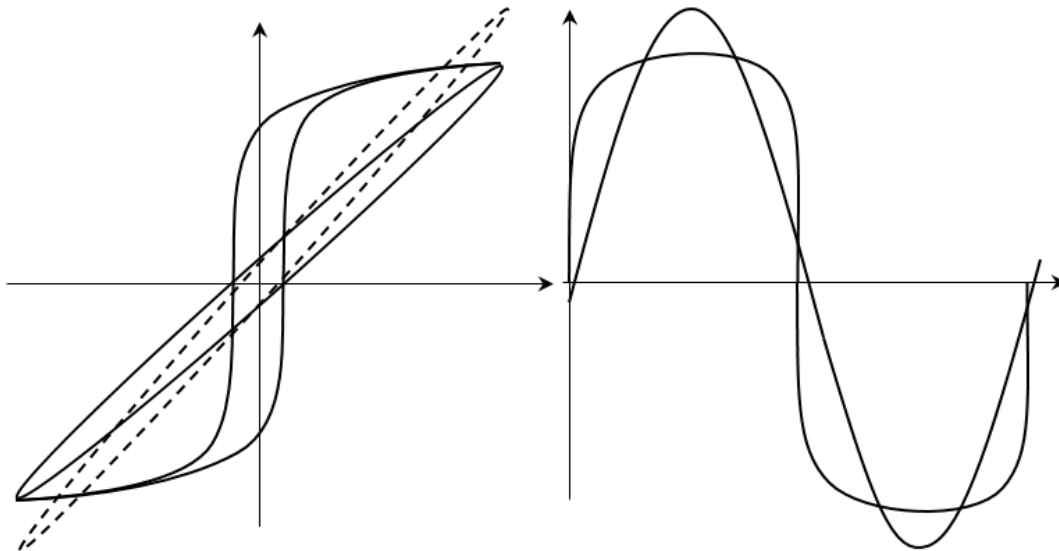
شکل ۱۷-۲ بیضی حاصل از دو شکل موج سینوسی H و B با ماکزیممهای H_p و B_p

اشباع شدن ماده روتور و افقی شدن انتهای حلقه پسماند با افزایش هارمونیکهای مرتبه بالا رخ می دهد. با مطالعه اشباع علاوه بر اینکه می توان ناکارآمدی نسبی بیضیهای معادل را دید، می توان درباره بهترین تقریب شکل موج H نیز بحث کرد.

شکل ۱۸-۲ منحنی اشباع شده فولاد D6ac را در حضور میدان 20 kA/m نشان می دهد [16]. حتی با نگاهی به شکل حلقه پسماند نیز می توان دریافت که هیچ بیضی ای نمی تواند نقش آن را در معادلات

ایفا کند. تحلیل هارمونیک حلقه پسماند شکل ۲-۱۸ در پیوست ۲ آورده شده است. این تحلیل نشان می دهد که حتی هارمونیک مرتبه ۳۷ نیز مقداری بزرگ تر از ۱ درصد هارمونیک اول دارد.

اگر بخواهیم دو روش مرسوم برای تقریب سینوسی شکل موج H را که در بخش ۲-۲ مطرح شد را در حالت اشباع مقایسه کنیم، باز هم روش استفاده شده در این تحقیق برتری دارد. شکل ۲-۱۸ نشان دهنده دو بیضی حاصل از دو روش تقریب H است. بیضی توپر حاصل از شرط برابری مساحت ها و بیضی خط چین حاصل استفاده از هارمونیک اول H است. علاوه بر حسن برابری مساحت ها که قبلاً به آن اشاره شد، منحنی توپر B_r را بهتر پیش بینی می کند. از طرفی مقدار ماکزیمم B نیز در این بیضی مقداری دقیق دارد. مجموعه این دلایل برتری این روش را نسبت به استفاده از هارمونیک اول نشان می دهند.



شکل ۲-۱۸ منحنی اشباع شده فولاد D6ac، شکل موج های B و H متناظر با آن و مقایسه دو روش تقریب سینوسی برای شکل موج H . بیضی توپر: برابری مساحت ها؛ بیضی خط چین: استفاده از هارمونیک اول.

فصل سوم

تحريك اضافى موقت

۱-۳ مقدمه

موتور پسماند محاسن زیادی دارد که می‌توان از مهم‌ترین آن‌ها این‌گونه نام برد:

- اعوجاج گشتاور کوچک
- لرزش و نویز کم
- جریان راه‌اندازی کوچک
- ساختار محکم

ولی معایبی هم دارد از جمله:

- اندازه بزرگ نسبت به موتورهای معمول در توان یکسان
- ضریب توان و بازده نسبتاً پایین

راه‌حلهایی برای رفع یا تعدیل عیوب مطرح است:

- اضافه کردن یک گشتاور سنکرون علاوه بر گشتاور پسماند
- استفاده از رینگ بزرگ‌تر که گشتاور پسماند بزرگ‌تری تولید می‌کند
- تحریک اضافی موقت موتور پسماند

در میان راه‌حل‌های مطرح‌شده، اعمال تحریک اضافی موقت مزایای منحصر به فردی دارد که به آن‌ها

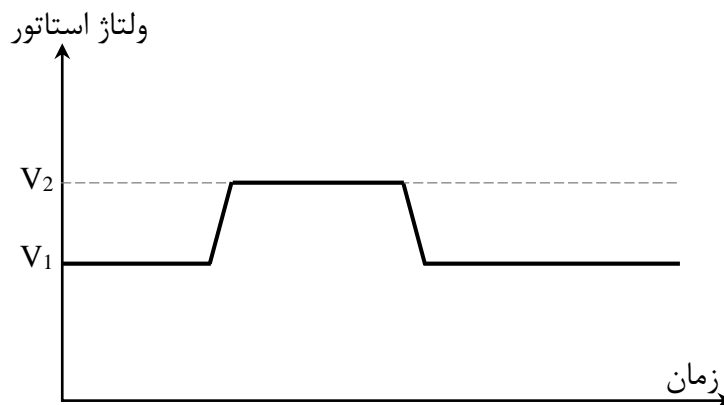
اشاره می‌شود:

- افزایش توان خروجی
- بهبود بازده و ضریب توان
- کاهش جریان ورودی
- عدم نیاز به دست‌کاری ساختار فیزیکی موتور

امروزه هزاران موتور پسماند در سانتریفیوژهای جداساز اورانیوم استفاده می‌شود. ضریب قدرت پایین این موتورها نسبت به موتورهای القایی نصب بانک‌های خازنی عظیم را اجتناب‌ناپذیر می‌کند. این راه حل مطلوبی نیست چرا که علاوه نه تنها تاثیری در بهبود بازده ندارد، بلکه موجب ایجاد تشدید میان اندوکتانس موتور و بانک خازنی می‌شود. تحریک اضافی موقت نه تنها ضریب توان را بهبود می‌بخشد بلکه بازده را نیز افزایش می‌دهد [17].

۲-۳ مرور کارهای گذشته

افزایش ولتاژ موتور پسماند به ولتاژی بزرگ‌تر از ولتاژ نامی و سپس برگرداندن آن به ولتاژ اولیه باعث تغییرات مثبتی در عملکرد موتور خواهد شد. مثلاً بازده و گشتاور خروج از سنکرون^۱ بزرگ‌تر می‌شود و جریان ورودی کاهش می‌یابد و در نتیجه موجب کاهش تلفات مسی و افزایش ضریب توان و بازده می‌شود. این موارد را برای اولین بار روترز^۲ به شکل تجربی مطرح کرد [4]، [18]، [19].



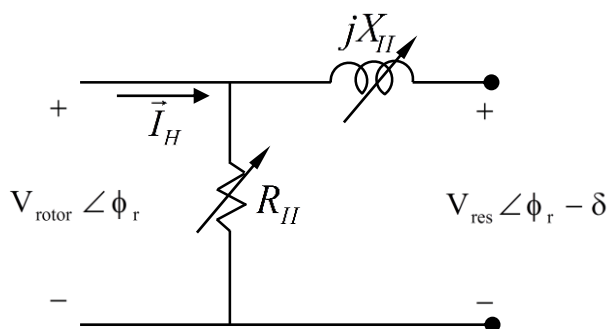
شکل ۱-۳ نحوه تغییر ولتاژ استاتور در موتور پسماند

تحریک اضافی موقت را اُکلی^۳ در سال ۱۹۷۸ با قرار دادن یک منبع ولتاژ در مدار معادل، مدل کرد. این منبع ولتاژ در شرایط عادی (بدون تحریک اضافی) طوری محاسبه می‌شود که تغییری در مشخصه‌های مدار معادل ایجاد نکند. در حالت تحریک اضافی مقدار این ولتاژ متناسب با ولتاژ افزایش‌یافته تغییر

^۳ O'Kelly

^۱ Pull-out Torque
^۲ Rotors

می‌کند. اُکلی نیز مانند روترز معتقد بود که روتور تحریک اضافه‌شده، به آهنربای دائم تبدیل می‌شود و موتور در سرعت سنکرون تا حدی رفتار موتور مغناطیس دائم را دارد و همین موضوع عامل افزایش گشتاور خروج از سنکرون است [20]، [4].



شکل ۲-۳ منبع ولتاژ فرضی در سمت روتور برای مدل کردن تحریک اضافی ولتاژ در [20]

واکوی^۱ و نیشینو^۲ در سال ۱۹۸۱ ضمن رد ادعای بالا، حلقه پسماند معادلی برای روتور تحریک اضافه‌شده ارائه دادند که این حلقه تعیین‌کننده پارامترهایی چون نفوذپذیری روتور و زاویه پسماند بود. استفاده از این پارامترها در مدار معادل معمول موتور، عملکرد موتور را مشخص می‌کرد. آن‌ها نشان دادند که بهبود عملکرد موتور نه به خاطر آهنربای دائم شدن روتور، بلکه به علت خازنی شدن مدار معادل سمت روتور در نتیجه تحریک اضافی موقت است [18]. کاتاواکا و ایشیکاوا^۲ در سال ۱۹۸۲ ضمن تایید روش واکوی و نیشینو، تحریک اضافی موقت را در باری اختیاری غیر از حداکثر بار قابل تحمل بررسی کردند [10]. هر دو تحقیق بالا از یک مدار معادل مشترک استفاده کرده‌اند و در هر دو برای مدل کردن حلقه پسماند از بیضی استفاده شده است. واکوی و همکارانش در سال ۱۹۸۳ بحث تحریک اضافه خودکار را در مورد بارهایی که مدت طولانی روی موتور قرار دارند مطرح کردند [17]. کاتاواکا و ایشیکاوا در سال ۱۹۹۱ به بررسی رابطه بین میزان تحریک اضافه ولتاژ با جریان ورودی موتور پسماند پرداختند و منحنی V شکل را که مبین رابطه آن دو معرفی کردند [19].

Ishikawa^۲

Wakui^۱
Nishino^۲

۳-۳ تحلیل عملکرد موتور

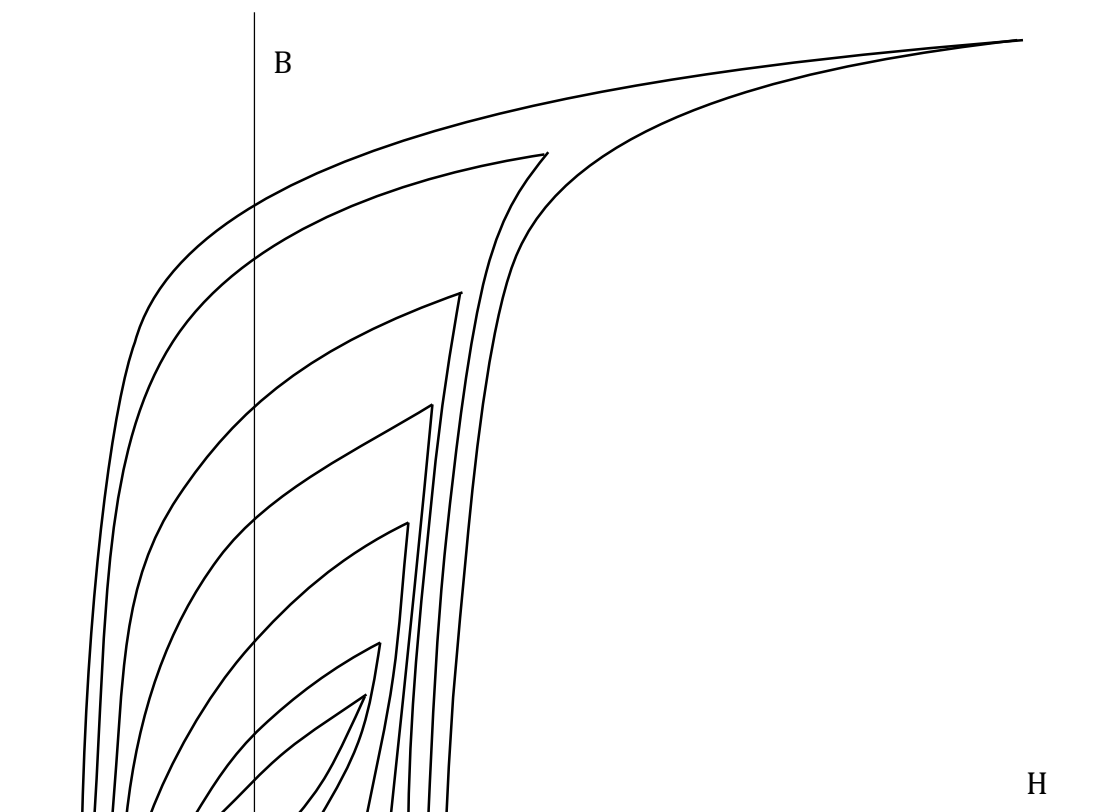
به کار بردن تحریک اضافی موقت در روتورهای با مواد مغناطیسی سخت، امکان افزایش توان در موتور پسماند با ابعاد مشخص را فراهم می‌کند. با این حال تراشکاری در مواد مطلوب برای موتور پسماند کار مشکلی است. استفاده از مواد مغناطیسی معمول‌تر مشکل کاهش چگالی شار را به دنبال دارد. در موتوری با ولتاژ ورودی معین، حق انتخاب زیادی در مورد ماده پسماند روتور وجود ندارد چرا که چگالی شار معینی در فاصله هوایی نیاز است [20]. یکی از راه‌های مطلوب‌تر کردن مواد پسماند نه چندان مناسب روتور، اعمال تحریک اضافی موقت است.

۳-۳-۱ موتور قبل از اعمال تحریک اضافی

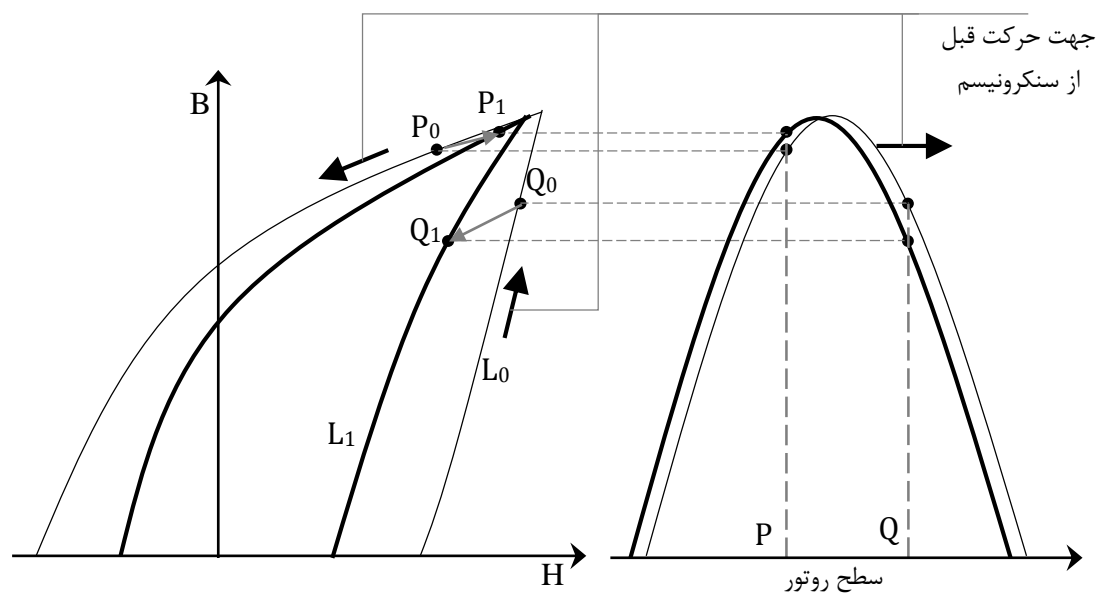
ابتدا موتور پسماند بدون تحریک اضافی در نظر گرفته می‌شود. مشخصه B-H ماده پسماند از زمان راه‌اندازی موتور تا رسیدن به سرعت سنکرون منطبق بر یک حلقه پسماند اصلی است. این حالت تا هنگامی که موتور گشتاور باری کوچک‌تر از گشتاور خروج از سنکرون داشته باشد برقرار است. گشتاور خروج از سنکرون، حداکثر گشتاور قابل تحمل موتور است و گشتاوری است که برای موتوری بدون تحریک اضافی، مستقل از شرایط بارگذاری موتور می‌باشد [6]. در اینجا از مساحت حلقه پسماند اصلی برای مشخص کردن گشتاور خروج از سنکرون استفاده می‌شود. نمونه‌ای از این حلقه‌ها در شکل ۳-۳ نشان داده شده است.

فرض کنیم که چگالی شار در فاصله هوایی و ماده پسماند سینوسی است. با این فرض وقتی موتور در سرعت زیر سنکرون می‌چرخد، هر نقطه از ماده پسماند روتور، چگالی شار سینوسی شکلی را تجربه می‌کند. در نتیجه هر نقطه روی روتور، حلقه پسماند L_0 مطابق شکل ۳-۴ را دور می‌زند. سایر نقاط روتور نیز همین حلقه را با یک شیفت زمانی می‌پیمایند. بنابراین این حلقه از یک طرف بیانگر تغییرات

زمانی حالت مغناطیسی در یک نقطه ثابت است، از طرف دیگر تغییرات فضایی حالت مغناطیسی را نیز در یک زمان مشخص در اطراف روتور نشان می‌دهد.

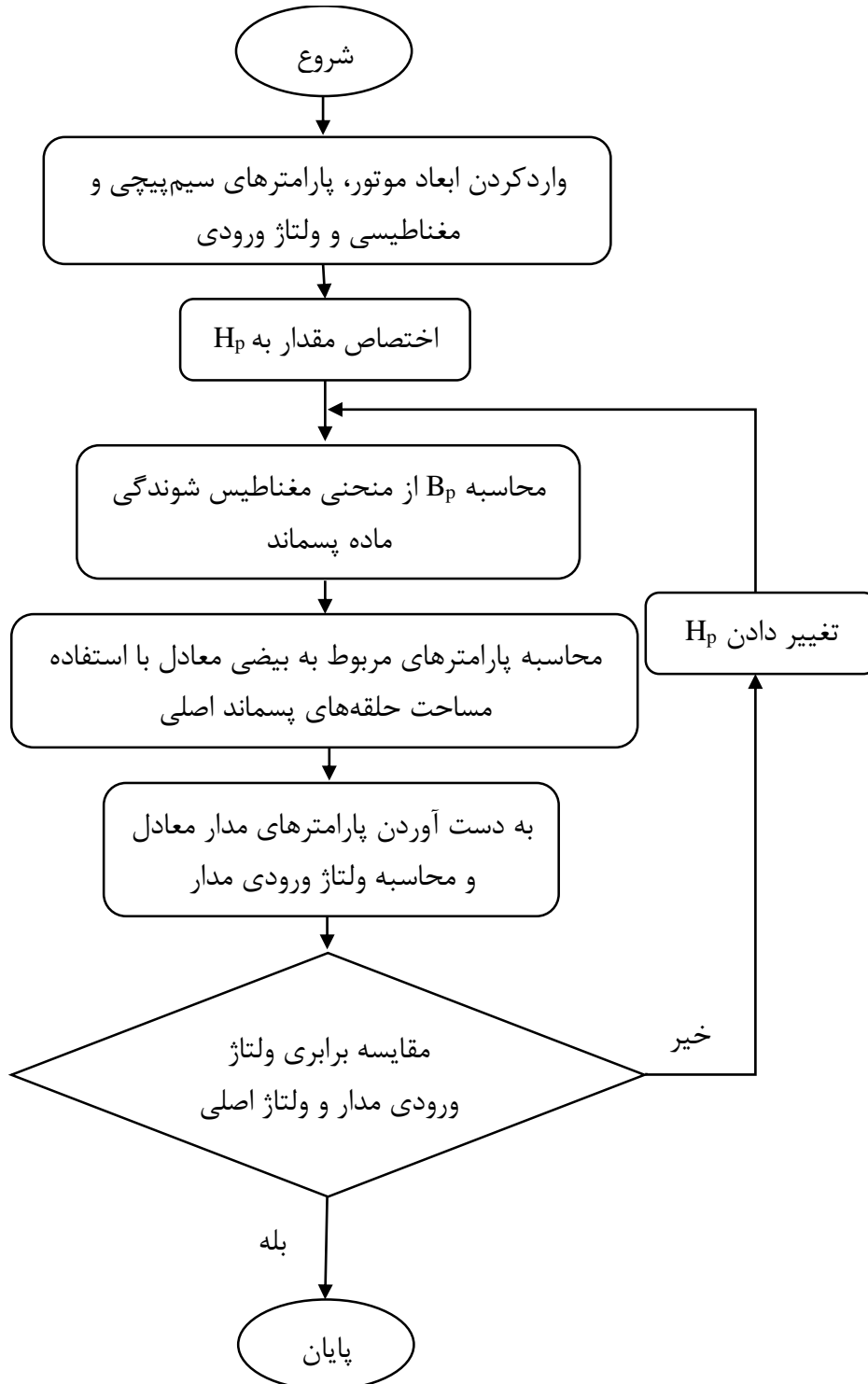


شکل ۳-۳ حلقه‌های اصلی یک ماده پسماند [18]



شکل ۳-۴ باریک شدن حلقه B-H در هنگام ورود به حالت سنکرون

الگوریتم محاسبه عملکرد موتور تا لحظه ورود به حالت سنکرون در شکل ۳-۵ آمده است.



شکل ۳-۵ الگوریتم تشخیص بیضی معادل قبل از حالت سنکرون

وقتی موتور به سرعت سنکرون می‌رسد، تغییر حالت مغناطیسی در هر نقطه از روتور متوقف می‌شود. برای مثال، حالت مغناطیسی نقطه P در محل P_0 ثابت می‌شود. به طور مشابه حالت مغناطیسی نقطه Q در محل Q_0 تثبیت می‌شود. اگر در این لحظه گشتاور بار همان گشتاور خروجی T_m باشد، سرعت موتور تغییری نخواهد کرد. ولی اگر گشتاور بار کمتر از گشتاور خروجی باشد، سرعت موتور باز هم افزایش می‌یابد و روتور از موج چگالی شار جلو می‌افتد. یا به عبارت دیگر با فرض ثابت نگه‌داشتن نقاط P و Q روی روتور، چگالی شار از روتور عقب می‌افتد که خلاف جهت حرکت قبل از سنکرونیسم است. به این ترتیب، چگالی شار نقطه P که قبل از این در حال کاهش بود، افزایش می‌یابد و چگالی شار نقطه Q که قبل از این در حال افزایش بود کاهش خواهد یافت. این تغییرات حالت مغناطیسی منجر به ایجاد حلقه‌های جزئی می‌شود. مطابق شکل، نقاط P_0 و Q_0 به ترتیب به P_1 و Q_1 منتقل می‌شوند. بنابراین رابطه جدید B-H با حلقه L_1 بیان می‌شود. سطح حلقه L_1 کوچک‌تر از سطح حلقه L_0 است که متناسب با گشتاور باری است که کمتر از گشتاور T_m است [10].

رسیدن به حلقه L_1 یک باره اتفاق نمی‌افتد. وقتی موتور به سرعت سنکرون می‌رسد و سرعت روتور نسبت به میدان چرخان افزایش پیدا می‌کند موجب کوچک شدن حلقه پسماند می‌شود. جایی که مساحت حلقه پسماند متناسب با گشتاور خروجی می‌شود به علت بیشتر بودن سرعت روتور، حلقه پسماند باز هم باریک‌تر می‌شود. این عامل باعث کاهش سرعت روتور می‌شود تا جایی که سرعت روتور برابر سرعت سنکرون می‌شود ولی به علت کوچک بودن حلقه پسماند، سرعت روتور باز هم کاهش می‌یابد. به همین ترتیب روتور حول سرعت سنکرون نوسان می‌کند تا جایی که تلفات باعث میرا شدن این نوسانات می‌شود [3].

حلقه جدید جزو حلقه‌های اصلی ماده نیست ولی فرض ما بر این است که تقریباً ماکزیمم چگالی شار و ماکزیمم شدت میدان‌ش برابر با حلقه اصلی است. تفاوتش با حلقه اصلی، کمتر شدن اختلاف فاز بین

چگالی شار و شدت میدان است که باعث باریک‌تر شدن حلقه می‌شود. با شکل‌گیری این حلقه، موتور

به حالت دائمی رسیده است و تنها تغییر در ورودی‌های موتور شرایط را تغییر می‌دهد.

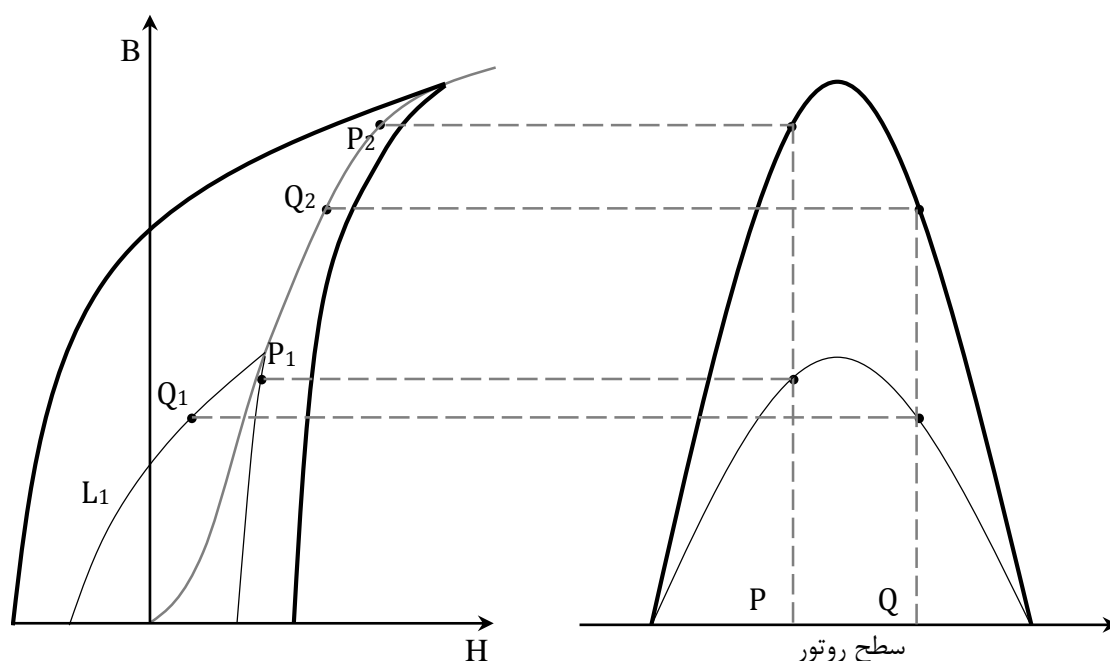
یک الگوریتم تکراری برای به دست آوردن حلقه جدید اجرا می‌شود که در زیر آمده است.



شکل ۳-۶ الگوریتم محاسبه حلقه کاری تغییر یافته در حالت سنکرون

۳-۳-۲ تحلیل موتور با اعمال تحریک اضافی

افزایش ولتاژ در موتور پسماند باعث افزایش چگالی شار مغناطیسی می‌شود؛ که باعث می‌شود مطابق شکل ۳-۷ چگالی شار نقاط P_1 و Q_1 روی مسیر فرعی مربوط به خود شروع به افزایش کنند. با رسیدن به شاخه صعودی حلقه اصلی پسماند، از آن بالا می‌روند و با گذشتن از نوک حلقه پسماند روی منحنی مغناطیس شونده حرکت می‌کنند. حلقه جدید، یک حلقه اصلی است که ماکزیمم چگالی شاری متناسب با ولتاژ جدید دارد. بیضی معادل با این حلقه را می‌توان با الگوریتمی مشابه الگوریتم شکل ۳-۵ به دست آورد با این تفاوت که به جای ولتاژ اولیه، ولتاژ افزایش یافته قرار داده می‌شود [18].



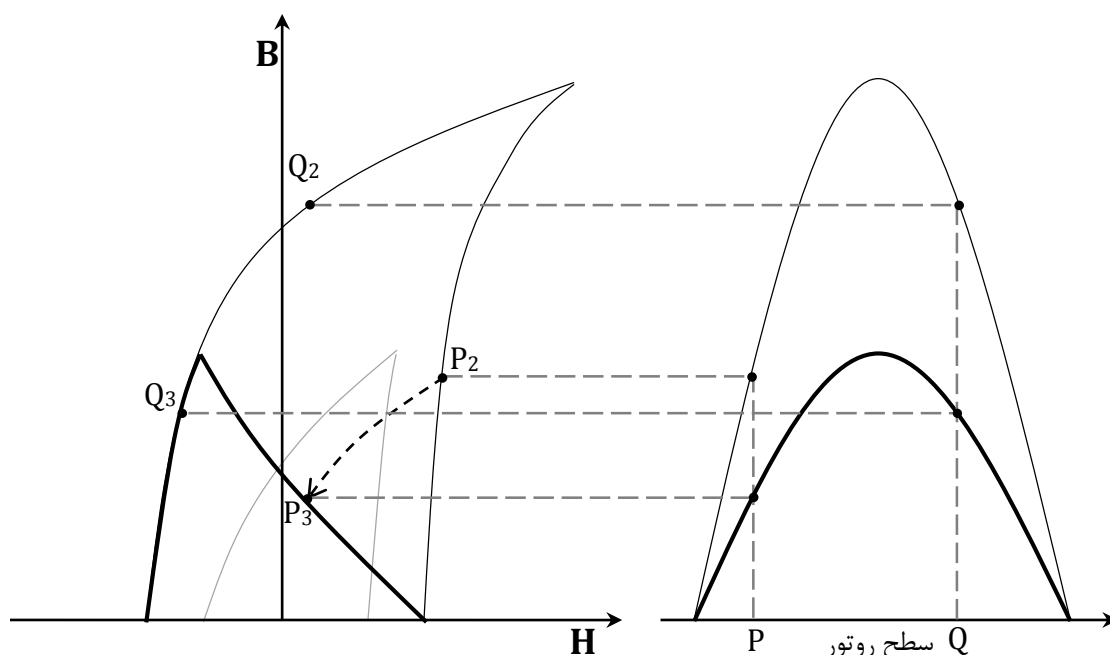
شکل ۳-۷ تغییر حلقه با افزایش ولتاژ

اتفاقی که در لحظه ورود به سنکرون رخ داد اینجا هم اتفاق می‌افتد؛ گشتاور متناظر با مساحت این حلقه از گشتاور بار بزرگ‌تر است. به همین دلیل سرعت موتور از سرعت میدان چرخان بیشتر می‌شود. این افزایش سرعت باعث کوچک‌تر شدن حلقه شده تا جایی که مساحتی متناظر با گشتاور خروجی داشته باشد. روند به دست آوردن این حلقه مشابه با الگوریتم شکل ۳-۶ است. قابل تصور است که زاویه پسماند در این حالت کمتر از قبل باشد.

۳-۳-۳ تحلیل موتور با کاهش دادن تحریک بعد از اعمال اضافه ولتاژ

به دلیل راندمان پایین موتور در ولتاژ افزایش یافته، بهتر است که ولتاژ سریعاً کاهش یابد. با کاهش ولتاژ، نقاطی که روی شاخه نزولی منحنی L_2 هستند روی همان شاخه پایین می‌آیند. نقاط روی شاخه صعودی از مسیرهای فرعی، کاهش چگالی شار را تجربه می‌کنند (شکل ۳-۸). در نهایت حلقه L_3 ایجاد می‌شود. از آنجایی که گشتاور بار تغییر نکرده است مساحت این حلقه باید با مساحت L_1 برابر باشد.

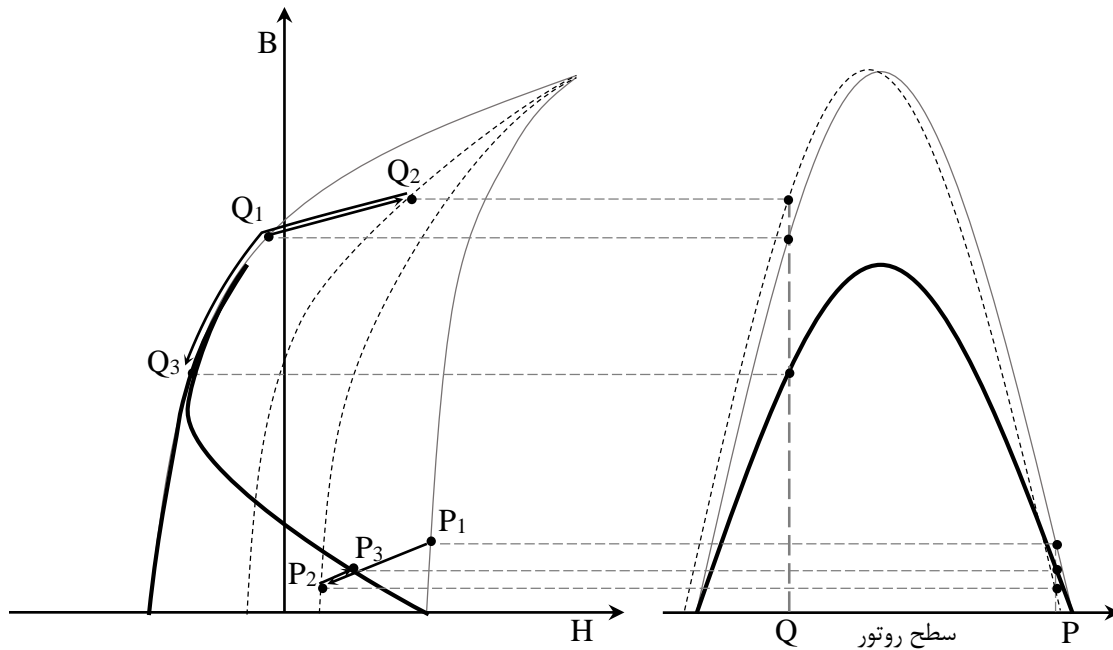
همان طور که از شکل ۳-۸ پیداست، بعد از کاهش ولتاژ در این مورد نوعی، رأس حلقه پسماند به ربع دوم منتقل شده است. این حالت نشان‌دهنده اختلاف زاویه بزرگ‌تر از 90° درجه بین میدان و چگالی شار است. باید دقت کرد که علی‌رغم باریک شدن حلقه بعد از افزایش ولتاژ، کاهش چگالی شار نقاط از مسیرهای موازی با حلقه اصلی اتفاق می‌افتد. به همین دلیل حلقه باریک شده در شکل ۳-۸ نشان داده نشده است. با توجه به رابطه X_H می‌توان نتیجه گرفت که مدار معادل سمت روتور حالت خازنی پیدا می‌کند. این خاصیت جریان ورودی را کاهش می‌دهد و باعث بهبود ضریب توان و بازده می‌شود [18]. همان طور که گفته شد مساحت محاط در منحنی اصلی متناسب با گشتاور خروج از سنکرون است. شکل ۳-۸ نشان می‌دهد که حلقه جدید L_3 مساحت بزرگ‌تری از حلقه اصلی اولیه (حلقه کمرنگ) دارد. بزرگ‌تر شدن قاعده حلقه L_3 باعث این افزایش مساحت است. حداکثر شدت جریانی که ماده روتور در این حلقه تجربه می‌کند همان H_c حلقه اصلی بزرگ L_2 است. نتیجه این افزایش مساحت را می‌توان به دو صورت بیان کرد. اول اینکه گشتاور خروج از سنکرون افزایش پیدا کرده است. دوم اینکه می‌توان گشتاور بار مشخصی را با ولتاژ کمتری تأمین کرد که قبل از تحریک اضافی ولتاژ ممکن نبود.



شکل ۳-۸ حلقه پسماند بعد از کاهش ولتاژ [18]

اگر موتور از ابتدا با ولتاژی بیش از ولتاژ نامی راه‌اندازی شود شکل کیفی حلقه پسماند نهایی کمی متفاوت است. در این حالت پس از رسیدن به سرعت سنکرون مشابه با قبل، حلقه پسماند باریک‌تر شده به طوری که مساحت آن متناسب با گشتاور بار شود. تغییرات مغناطیسی نقاط روتور هنگام کاهش ولتاژ شکل تغییر یافته‌ای از حلقه باریک شده است. این مسئله در شکل ۳-۹ نشان داده شده است. وقتی موتور به سرعت سنکرون می‌رسد نقاط P و Q روی نقطه‌هایی از روتور ثابت می‌شوند؛ ولی چون مساحت حلقه پسماند بیشتر از نیاز بار است، سرعت روتور از سرعت سنکرون فراتر می‌رود. عقب‌افتادگی شکل موج چگالی شار از روتور می‌شود. بنابراین نقاط P₁ و Q₁ حرکت کرده و به ترتیب به نقاط P₂ و Q₂ می‌رسند. در شرایط بار یکسان، این حلقه باریک‌تر از حلقه شکل ۳-۴ است چرا که باید در ماکزیمم چگالی شار و شدت میدانی بزرگ‌تر، همان مساحت متناسب با بار را داشته باشد.

با کاهش ولتاژ نقاط P₂ و Q₂ حرکت کرده و به ترتیب به نقاط P₃ و Q₃ می‌رسند. حالت مغناطیسی جدید روتور به گونه ایست که باز هم رأس حلقه پسماند به ربع دوم یا نزدیکی آن منتقل می‌شود [19].



شکل ۳-۹ حلقه پسماند بعد از کاهش ولتاژ [10]

پیچیدگی الگوریتم حل برای این حالت موتور بیشتر از قبل است. از این پس فرض ما بر این است که موتور با ولتاژ اولیه V_1 شروع به کار کرده و به حالت سنکرون می‌رسد. سپس ولتاژ به اندازه V_2 افزایش می‌یابد و بعد از آن ولتاژ کاهش یافته و به V_3 می‌رسد.

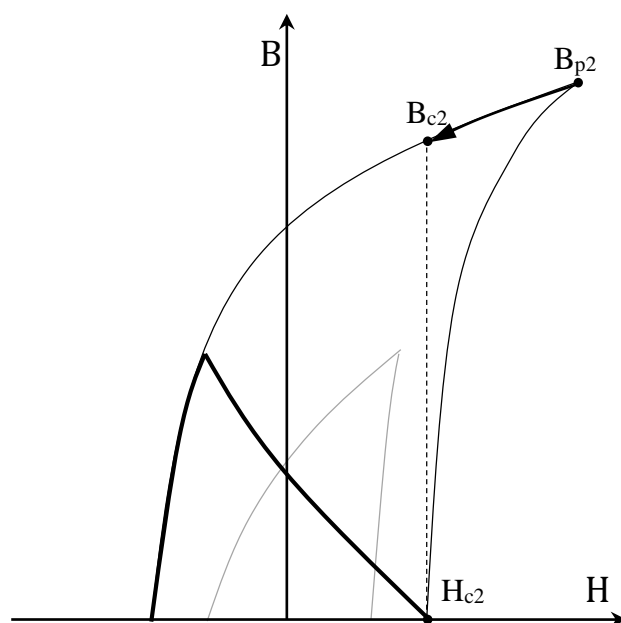
برای محاسبه بیضی معادل، داشتن چند پارامتر از حلقه کاری اهمیت زیادی دارد؛ از جمله ماکزیمم چگالی شار، ماکزیمم شدت میدان و ربع محل قرارگیری رأس یا نوک حلقه در صفحه مختصات B و H . تا قبل از این، پارامترهای ذکر شده به راحتی از منحنی‌های اولیه موتور قابل محاسبه بود. ولی در اینجا باید از فرضیاتی استفاده کرد و آن‌ها تخمین زد. ابتدا ماکزیمم چگالی شار در هنگام کاهش ولتاژ تخمین زده می‌شود.

فرض کنیم که موتور با ولتاژ V_1 شروع به کار می‌کند و به حالت سنکرون می‌رسد و ماکزیمم چگالی شار B_p را دارد. اگر ولتاژ را به V_2 افزایش دهیم چگالی شار هم افزایش می‌یابد و به B_{p2} می‌رسد. با کاهش ولتاژ مقدار ماکزیمم چگالی شار نیز کاهش یافته و به مقدار B_{p3} می‌رسد.

برای به دست آوردن ماکزیمم چگالی شار در ولتاژ V_3 می‌توان ابتدا فرض کرد موتور با همین ولتاژ شروع به کار می‌کند. الگوریتم شکل ۳-۵ می‌تواند B_p را محاسبه کند. حال می‌توان تخمین زد که ماکزیمم چگالی شار بعد از کاهش ولتاژ به V_3 حدوداً چه مقداری دارد.

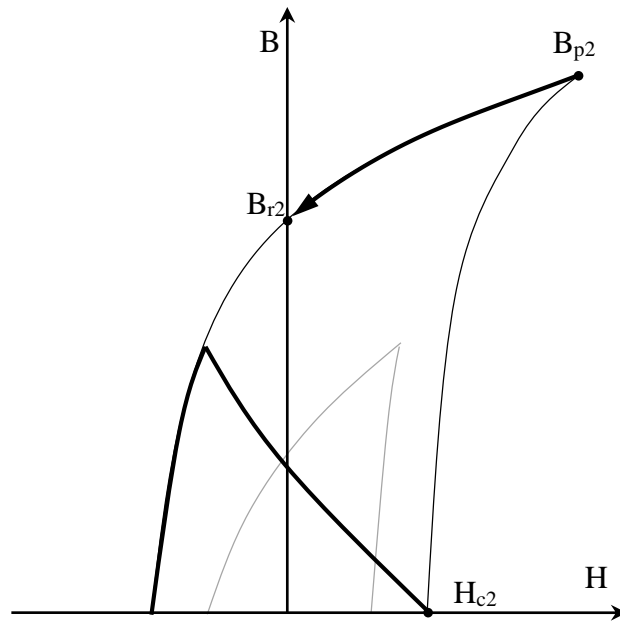
برای تخمین مقدار ماکزیمم شدت میدان H_{p3} باید دید که ولتاژ افزایش یافته تا چه حد کاهش می‌یابد. با توجه به شکل ۳-۱۰، اگر کاهش ولتاژ به قدری باشد که مقدار B_{p2} - که سقوط خواهد کرد و مقدار B_{p3} را خواهد ساخت - حداقل تا مقدار B_{c2} افت کند، می‌توان گفت که H_{p3} همان H_{c2} خواهد شد. کاهش بیشتر ولتاژ این نتیجه‌گیری را تغییر نمی‌دهد.

پارامتر تأثیرگذار دیگر، محل قرارگیری رأس یا نوک حلقه پسماند است. قرارگیری رأس در ربع اول صفحه مختصات بیانگر $0^\circ < \alpha_3 < 90^\circ$ است؛



شکل ۳-۱۰ تخمین ماکزیمم شدت میدان بعد از کاهش ولتاژ

درحالی‌که اگر رأس حلقه به ربع دوم منتقل شود باعث می‌شود $90^\circ < \alpha_3 < 180^\circ$ باشد. بنابراین مطابق شکل ۳-۱۱ برای انتقال رأس حلقه پسماند به ربع دوم، B_{p2} حداقل باید تا نقطه B_{r2} پایین بیاید.



شکل ۱۱-۳ محاسبه محل فرارگیری رأس حلقه بعد از کاهش ولتاژ

به عنوان جمع‌بندی می‌توان وضعیت حلقه نهایی پس از کاهش ولتاژ را با توجه به مقدار B_{p3} (چگالی شار بعد از کاهش ولتاژ) در جدول ۱-۳ خلاصه کرد.

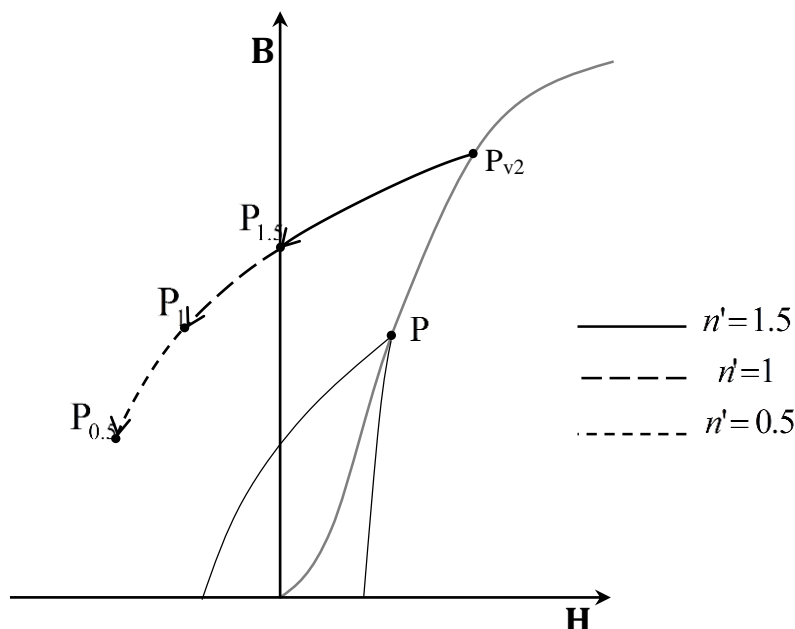
جدول ۱-۳ وضعیت مشخصه‌های حلقه پسماند پس از کاهش ولتاژ در حالات مختلف

حدود α_3	حدود H_{p3}	وضعیت B_{p3} ↓
$90^\circ < \alpha_3 < 0^\circ$	$H_{c2} < H_{p3}$	$B_{Hc2} < B_{p3}$
$90^\circ < \alpha_3 < 0^\circ$	H_{c2}	$B_{r2} < B_{p3} < B_{Hc2}$
$180^\circ < \alpha_3 < 90^\circ$	H_{c2}	$B_{p3} < B_{r2}$

۳-۳-۴ تأثیر مقدار کاهش ولتاژ بر نتیجه نهایی

انتظار می‌رود میزان کاهش ولتاژ نهایی روی خروجی‌های موتور تأثیر بگذارد. برای درک این تأثیر می‌توانیم مسیر حرکت رأس حلقه پسماند را تعقیب کنیم. برای تمرکز روی هدف اصلی، فرض کنیم که موتور در حالت دایمی و با ولتاژ V_1 کار می‌کند. سپس ولتاژ موتور به $2V_1$ افزایش می‌یابد. پس از آن ولتاژ جداگانه به سه مقدار متفاوت کاهش پیدا می‌کند. شکل ۱۲-۳ مسیر کیفی حرکت رأس حلقه

پسماند را نشان می‌دهد (n' نسبت ولتاژ کاهش یافته نهایی به ولتاژ نامی است). فرض بر این است که موتور بتواند در همه این حالت‌ها گشتاور بار را تأمین کند.



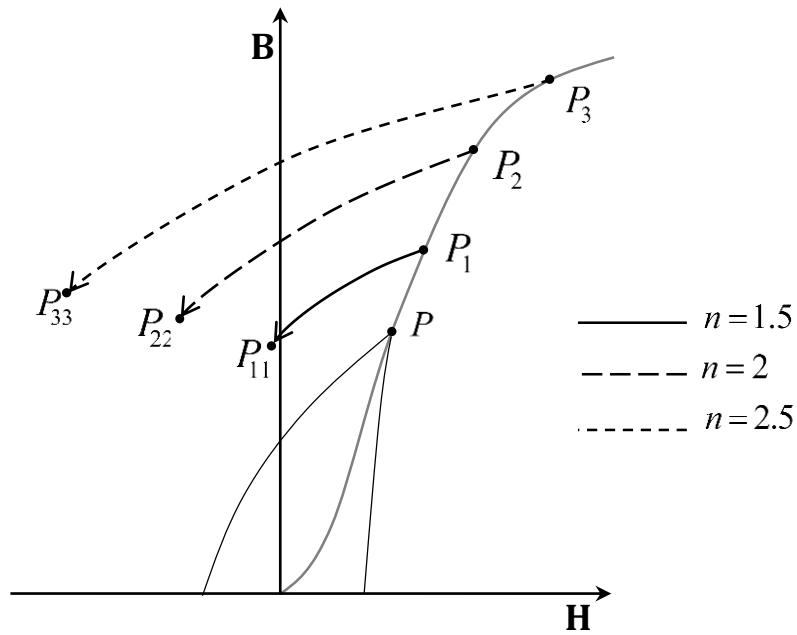
شکل ۳-۱۲ تأثیر مقدار کاهش ولتاژ روی محل قرارگیری رأس حلقه پسماند نهایی

می‌توان دید که با کاهش بیشتر ولتاژ، ماکزیمم چگالی شار کاهش می‌یابد. با توجه به ثابت ماندن مساحت محاط در بیضی، باید زاویه پسماند که در حالت $n'=1$ و $n'=0.5$ نشان داده شده در شکل ۳-۱۲ بزرگ‌تر از ۹۰ درجه است، به ۹۰ درجه نزدیک‌تر شود. پیش‌بینی می‌شود این عامل تأثیر مثبتی روی عملکرد موتور داشته باشد.

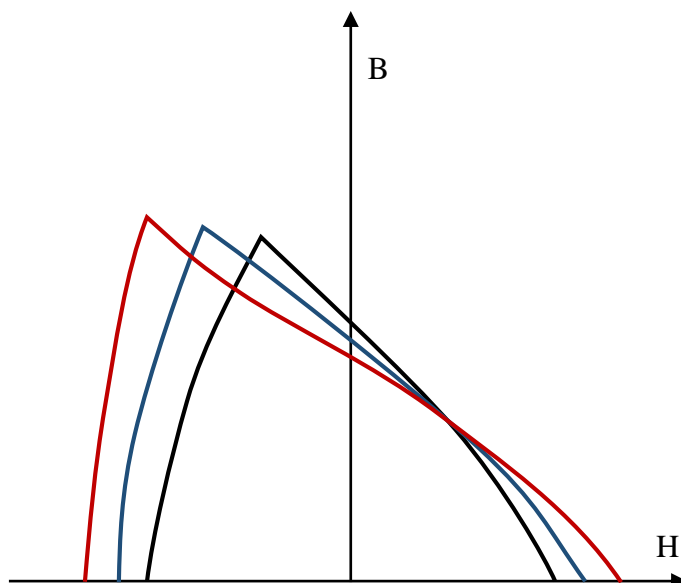
۳-۳-۵ تأثیر مقدار افزایش ولتاژ بر نتیجه نهایی

برای بررسی این موضوع باید مسیر تغییر حلقه‌های پسماند در تغییرات ولتاژ را بررسی کنیم. برای کم کردن مجهولات فرض می‌کنیم که موتور در حالت دائمی با ولتاژ V_1 کار می‌کند. سپس ولتاژ به مقدار V_2 افزایش می‌یابد که n برابر V_1 است و دوباره به همان مقدار V_1 برمی‌گردد. شکل کیفی مسیرهای افزایش و کاهش ماکزیمم چگالی شار در شکل ۳-۱۳ نشان داده شده است. همان طور که از شکل پیداست، افزایش بیشتر ولتاژ ورودی باعث پیشروی هر چه بیشتر رأس حلقه نهایی در ربع دوم می‌شود.

مقدار ماکزیمم شدت میدان در حلقه‌های پسماند متناظر با مسیرهای شکل ۳-۱۳ همان مقدار H_c مربوط به حلقه بزرگ DC است. بنابراین با بیشتر شدن تحریک اضافی موتور، حلقه پسماند متناظر با این ولتاژ اضافه شده هم بزرگ‌تر می‌شود که این حلقه بزرگ‌تر طبعاً H_c بزرگ‌تری هم دارد. اولین تأثیر این عامل، بزرگ‌تر شدن گشتاور خروج از سنکرون است.

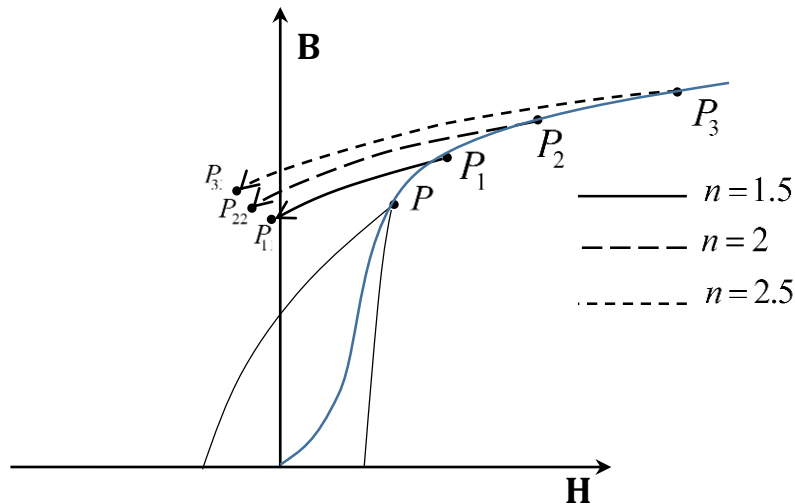


شکل ۳-۱۳ تأثیر مقدار افزایش ولتاژ روی محل قرارگیری رأس حلقه پسماند نهایی



شکل ۱۴-۳ تغییر حلقه پسماند نهایی با تحریک‌های اضافی متفاوت

نکته‌ای که بسیار حائز اهمیت است توجه به منحنی مغناطیس شونده‌ی ماده روتور است. اگر شیب منحنی مغناطیس شونده‌ی ماده مورد مطالعه در نقطه کار بسیار تند باشد، آستانه بهبود گشتاور خروج از سنکرون موتور پایین می‌آید. به این معنی که افزایش‌های کوچک در ولتاژ ورودی باعث جهش بزرگ در حلقه پسماند می‌شود. به دنبال بزرگ شدن حلقه، مقدار B_r حلقه‌ها نیز به سرعت رشد می‌کند و باعث می‌شود سطر سوم جدول ۱-۳ برای موتور صادق شود. در این حالت زاویه پسماند از ۹۰ درجه بزرگ‌تر می‌شود که هدف افزایش ولتاژ نیز همین است. در عوض منحنی مغناطیس شونده‌ی این‌گونه مواد سریع‌تر افقی می‌شود و باعث می‌شود ولتاژهای خیلی بزرگ، باعث بهبود چشمگیر خروجی‌های موتور نشود. با به اشباع رفتن ماده پسماند نقاط P_{11} ، P_{22} و P_{33} در شکل ۱۳-۳ به یکدیگر نزدیک و نزدیک‌تر می‌شوند تا جایی که تأثیر افزایش ولتاژ بر افزایش گشتاور خروج از سنکرون به حداقل می‌رسد. با توجه به این مباحث توجه به نقطه کار موتور پسماند ضروری است. اگر نقطه کار به ناحیه اشباع نزدیک باشد تحریک اضافه ممکن است تأثیر چشم‌گیری بر گشتاور خروج از سنکرون نداشته باشد.



شکل ۳-۱۵ کاهش تأثیر مقدار افزایش ولتاژ در بهبود وضعیت حلقه پسماند در ماده اشباع شده

۳-۴ تحریک اضافی خود کار

همان طور که گفته شد، تغییرات بار در موتوری که تحریک آن موقتاً افزایش پیدا کرده ممکن است باعث نوسان در سرعت موتور شود. این نوسان باعث می شود که موتور بعد از مدتی به حلقه اصلی قبل از اعمال تحریک اضافی برگردد.

برای مثال اگر بار موتور ثابت و زمان کار موتور کوتاه باشد مانند دستگاه ضبط که معمولاً زمان کار پیوسته ای کمتر از یک ساعت دارد، یک بار اعمال تحریک اضافه برای موتور کافی است. بهتر است بار موتور یک درجه کمتر از حداکثر بار قابل تحملش باشد (مثلاً ۸۰ درصد) تا نوسانات ناشی از تغییرات جزئی بار یا ولتاژ ورودی خللی در عملکرد آن وارد نکند.

اگر بار موتور پسماند ثابت و مدت عملکرد طولانی باشد مثل سانتریفیوژهای جداساز اورانیوم، نیاز است که تحریک اضافی به طور خودکار بعد از برگشت موتور به حلقه کاری عادی دوباره اعمال شود. معیاری که برای اعمال دوباره تحریک اضافی موقت می تواند یکی از موارد زیر باشد:

- جریان ورودی موتور
- ضریب توان موتور

حسگر ضریب توان بدون تأثیرپذیری از تغییرات ولتاژ منبع عمل می‌کند. البته ولتاژ ورودی موتور پسماند در حالت عادی تغییرات زیادی ندارد.

بازه‌ای که باید ولتاژ موتور بالا نگه داشته شود به نوسانات مکانیکی موتور بستگی دارد. ممکن است بسته به نوع موتور زمانی بین ۳ تا ۴ ثانیه برای تعدیل نوسانات ناشی از افزایش ولتاژ نیاز باشد. اگر موتور هیچ‌گونه نوسان مکانیکی نداشته باشد بازه‌ای به اندازه ۲۰ میلی‌ثانیه برای افزایش ولتاژ کافی است [17].

فصل چهارم

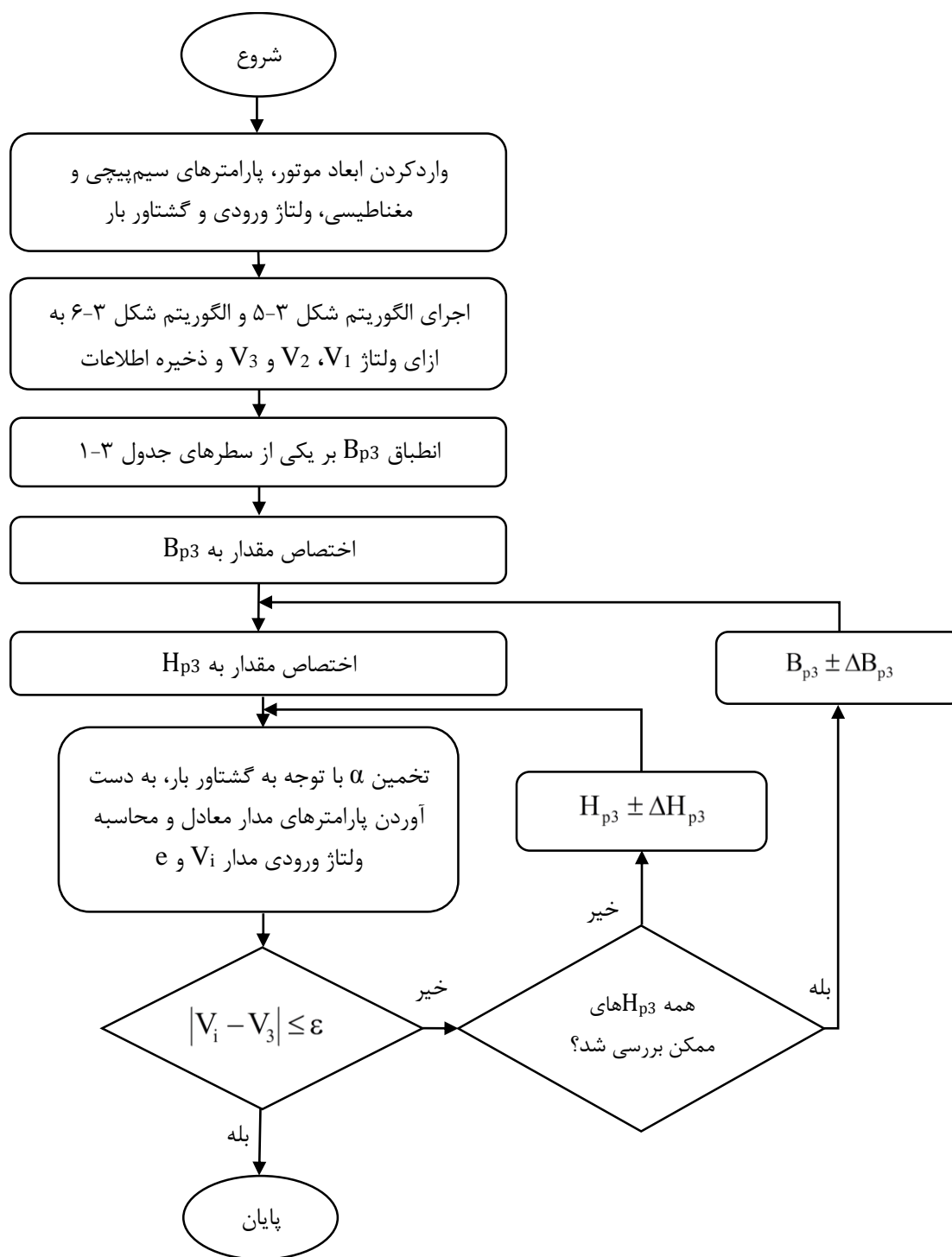
شبیه‌سازی تحریک اضافی

۴-۱ مقدمه

در فصل قبل الگوریتم‌هایی برای محاسبه عملکرد موتور در راه‌اندازی با ولتاژ نامی بیان شد. ولی در اینجا لازم است برای پیش‌بینی عملکرد موتور پسماند الگوریتمی جامع معرفی شود که علاوه بر پوشش دادن الگوریتم‌های ساده‌تر بیان شده در فصل سوم، قابلیت اجرای سناریوهای مختلف از جمله تحریک اضافی موقت را داشته باشد. این الگوریتم در شکل ۴-۱ نشان داده شده است. گنجانده شدن سه ولتاژ مختلف در این الگوریتم آزادی عمل زیادی برای اجرای حالت‌های مختلف فراهم می‌کند. به چند مورد از مهم‌ترین آن‌ها اشاره می‌شود:

- اگر $V_1=V_2=V_3$: بیانگر راه‌اندازی موتور با ولتاژ نامی و رسیدن به حالت پایدار است.
- اگر $V_1=V_2>V_3$: بیانگر حالتی است که موتور با ولتاژ نامی راه‌اندازی شده و پس از رسیدن به سرعت سنکرون و حالت پایدار ولتاژ موتور به مقداری کمتر از ولتاژ نامی کاهش می‌یابد.
- اگر $V_1=V_3<V_2$: بیانگر حالت معمول تحریک اضافی است که موتور با ولتاژ نامی راه‌اندازی می‌شود و پس از رسیدن به سرعت سنکرون ولتاژ تا مقدار V_2 افزایش یافته و سپس به مقدار نامی برمی‌گردد.
- اگر $V_2>V_1>V_3$: بیانگر حالت خاص تحریک اضافی است که ولتاژ نهایی کمتر از ولتاژ نامی خواهد بود.

برای اجرای الگوریتم شکل ۴-۱ برنامه‌ای در محیط MATLAB نوشته شده است.



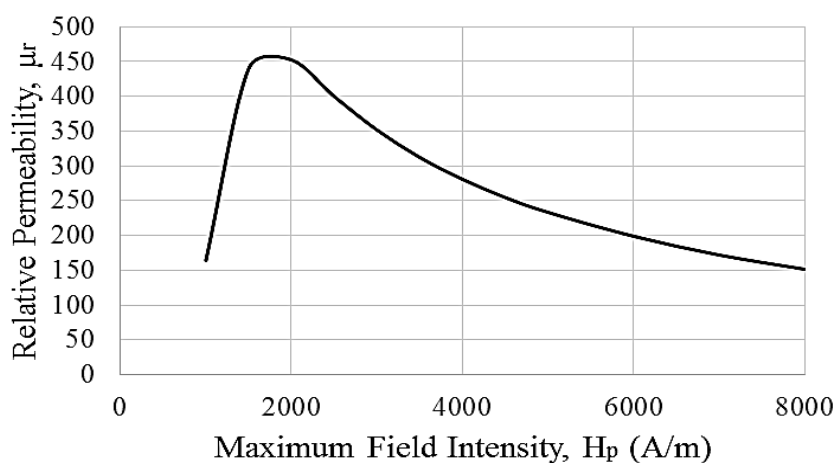
شکل ۴-۱ الگوریتم کامل محاسبه عملکرد موتور

۲-۴ مشخصات موتور شبه‌سازی شده

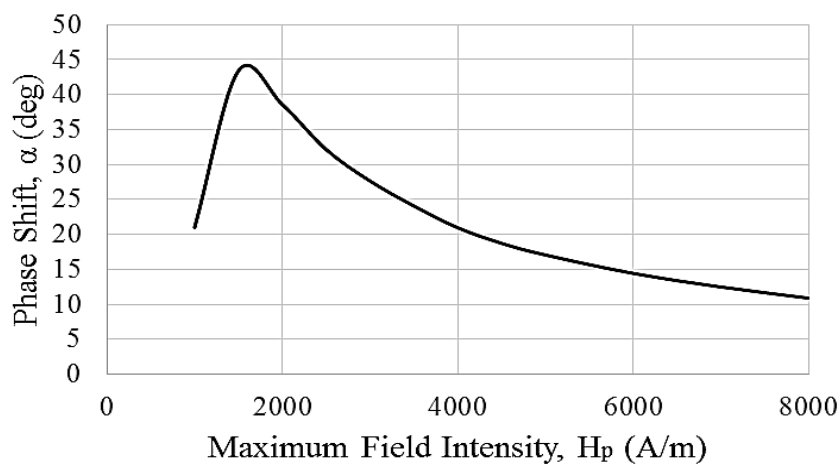
مشخصه‌های موتور شبه‌سازی شده در جدول ۱-۴ و منحنی‌های نفوذپذیری نسبی و زاویه پسماند برای بیضی‌های معادل با حلقه‌های پسماند ماده روتور به ترتیب در شکل ۲-۴ و شکل ۳-۴ آمده است [21].

جدول ۱-۴ مشخصه‌های موتور شبه‌سازی شده

1 mm	طول محوری فاصله هوایی	40 W	توان خروجی
24	تعداد شیارهای استاتور	200 V	ولتاژ خط به خط
2	تعداد قطب‌ها	1000 Hz	فرکانس منبع ولتاژ
38	تعداد هادی‌های هر شیار استاتور	50 mm	شعاع خارجی روتور و استاتور
0.83	ضریب پرشوندگی شیار استاتور	27 mm	شعاع داخلی روتور و استاتور
1 mm	طول محوری فاصله هوایی	4 mm	ضخامت دیسک روتور



شکل ۲-۴ منحنی نفوذپذیری نسبی برای ماده پسماند روتور



شکل ۳-۴ زاویه پسماند بیضی‌های معادل برای ماده پسماند روتور

۳-۴ نتایج قبل از اعمال تحریک اضافی

۱-۳-۴ راه‌اندازی موتور با ولتاژ نامی

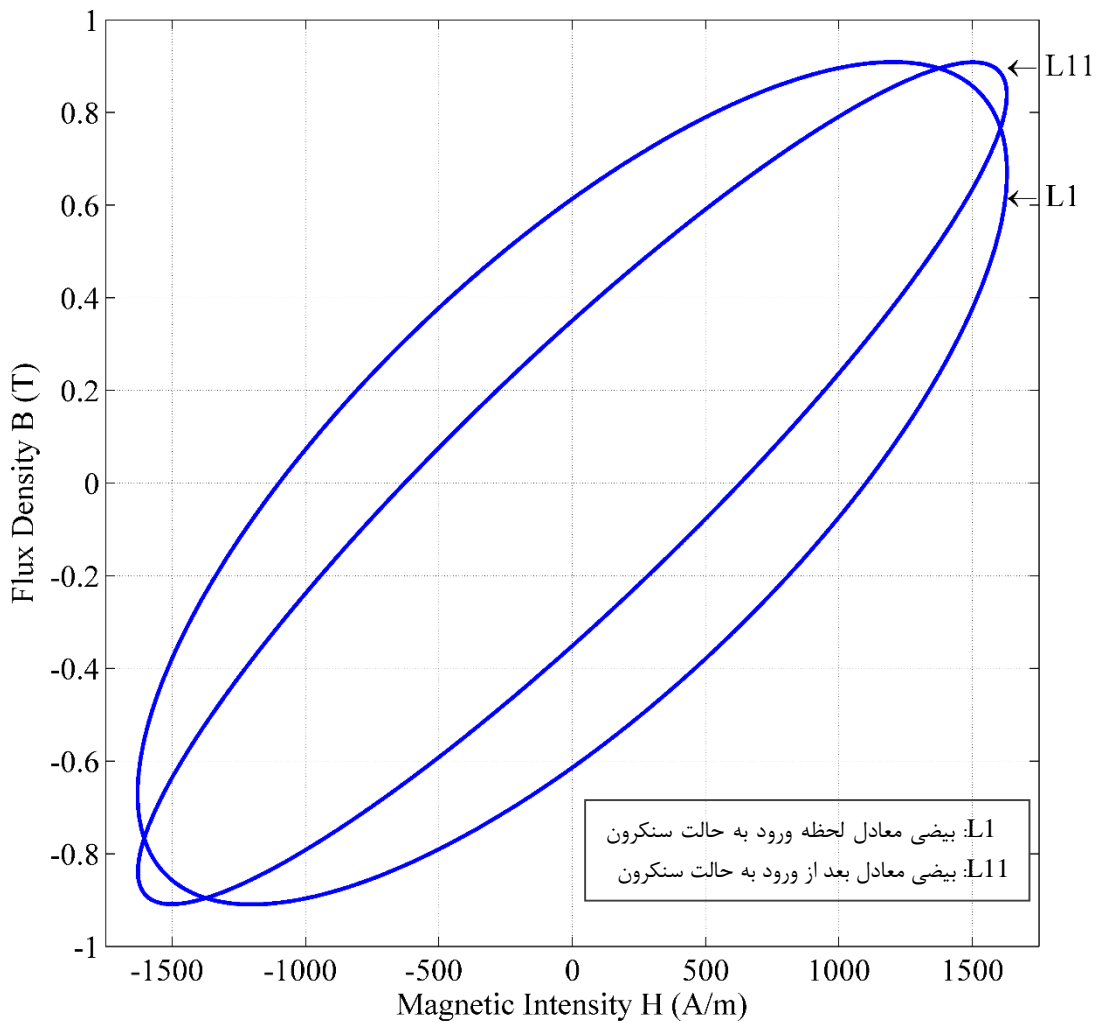
ابتدا نتایج را بدون اضافه کردن ولتاژ نامی موتور بررسی می‌کنیم. راه‌اندازی موتور در شرایط نامی نتایج جدول ۲-۴ را در پی دارد.

جدول ۲-۴ خروجی‌های مدل و موتور در شرایط راه‌اندازی نامی

پارامترهای مدل						
	H_p (A/m)	B_p (T)	α (deg)	X_g (Ω)	r_H (Ω)	x_H (Ω)
لحظه ورود به سنکرون	1630	0.909	42.5	263	213	233
بعد از سنکرونیسم	1629	0.909	22.7	263	122	291
مشخصه‌های موتور						
	V_{in} (V)	I_{in} (A)	PF	P_{in} (W)	P_{out} (W)	η (%)
لحظه ورود به سنکرون	200	0.69	0.37	88.4	70.0	79.1
بعد از سنکرونیسم	200	0.72	0.24	59.2	40.0	67.6

در جدول ۲-۴ می‌بینیم که موتور در لحظه ورود به حالت سنکرون حدود ۸۸ وات توان مصرف می‌کند که حدود ۷۰ وات آن توان خروجی است. این توان که متناسب با مساحت حلقه پسماند اصلی ماده است، گشتاور خروج از سنکرون نیز نامیده می‌شود. این در شرایطی است که توان بار ۴۰ وات است. بنابراین وقتی موتور به حالت سنکرون می‌رسد حلقه پسماند اصلی برای هماهنگ شدن با توان خروجی باریک‌تر می‌شود. این تغییر در بیضی معادل باعث تغییر در پارامترهای مدار معادل شده و خروجی‌های موتور را تحت تأثیر قرار می‌دهد. بیضی‌های معادل با حلقه‌های پسماند در شکل ۴-۴ آمده است.

کمتر بودن گشتاور بار از حداکثر گشتاور قابل تأمین برای موتور باعث کاهش کیفیت خروجی‌های موتور می‌شود. به طوری که جریان ورودی افزایش یافته و بازده و ضریب توان افت می‌کنند. علی‌رغم این که نزدیک شدن بیش از حد گشتاور بار به حداکثر گشتاور قابل تأمین موتور، پایداری موتور را تهدید می‌کند ولی باید این دو را تا حد امکان به هم نزدیک کرد.

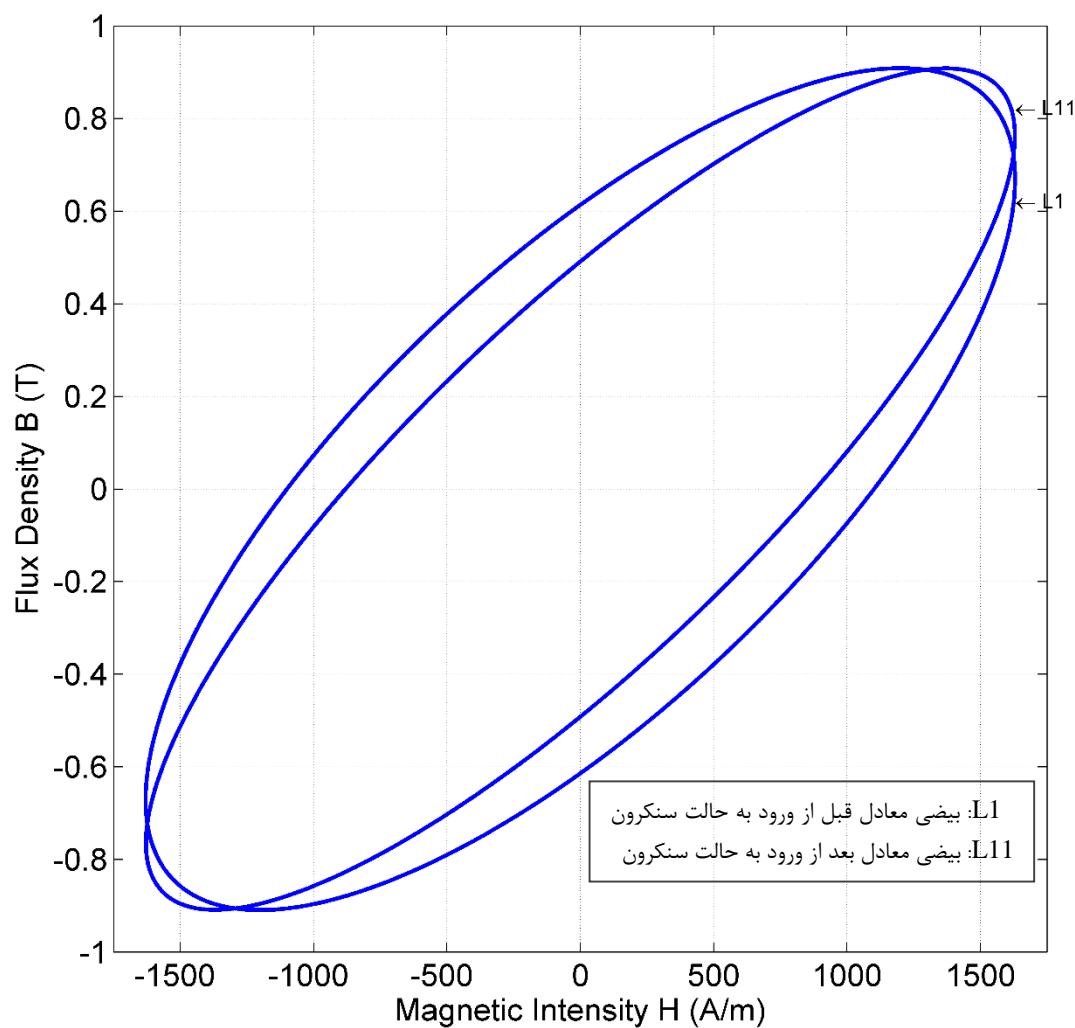


شکل ۴-۴ بیضی‌های معادل با حلقه‌های پسماند قبل و بعد از سنکرونیسم

در جدول ۳-۴ خروجی‌های موتور وقتی که توان خروجی ۸۰ درصد توان قابل تأمین موتور است آورده شده‌اند. همان طور که دیده می‌شود زاویه پسماند از ۲۳ درجه به ۳۳ درجه افزایش پیدا کرده است. متعاقب آن جریان موتور نسبت به حالت قبل کاهش یافته و ضریب توان و بازده نیز افزایش پیدا کرده‌اند. بیضی‌های معادل موتور در حالت راه‌اندازی با ۸۰٪ حداکثر با قابل تحمل موتور در شکل ۴-۵ نشان داده شده است. مقایسه این بیضی‌ها با شکل ۴-۴ نشان می‌دهد که بیضی L_{11} در شکل ۴-۵ به بیضی L_1 نزدیک‌تر شده است.

جدول ۳-۴ خروجی‌های مدل و موتور در باری معادل ۸۰٪ حداکثر بار قابل تحمل موتور

پارامترهای مدل						
	H_p (A/m)	B_p (T)	α (deg)	X_g (Ω)	r_H (Ω)	x_H (Ω)
لحظه ورود به سنکرون	1630	0.909	42.5	263	213	233
بعد از سنکرونیسم	1629	0.909	32.8	263	171	265
مشخصه‌های موتور						
	V_{in} (V)	I_{in} (A)	PF	P_{in} (W)	P_{out} (W)	η (%)
لحظه ورود به سنکرون	200	0.69	0.37	88.4	70.0	79.1
بعد از سنکرونیسم	200	0.71	0.31	74.9	56.0	74.8



شکل ۴-۵ بیضی‌های معادل با حلقه‌های پسماند قبل و بعد از سنکرونیسم در ۸۰٪ حداکثر بار قابل تحمل موتور

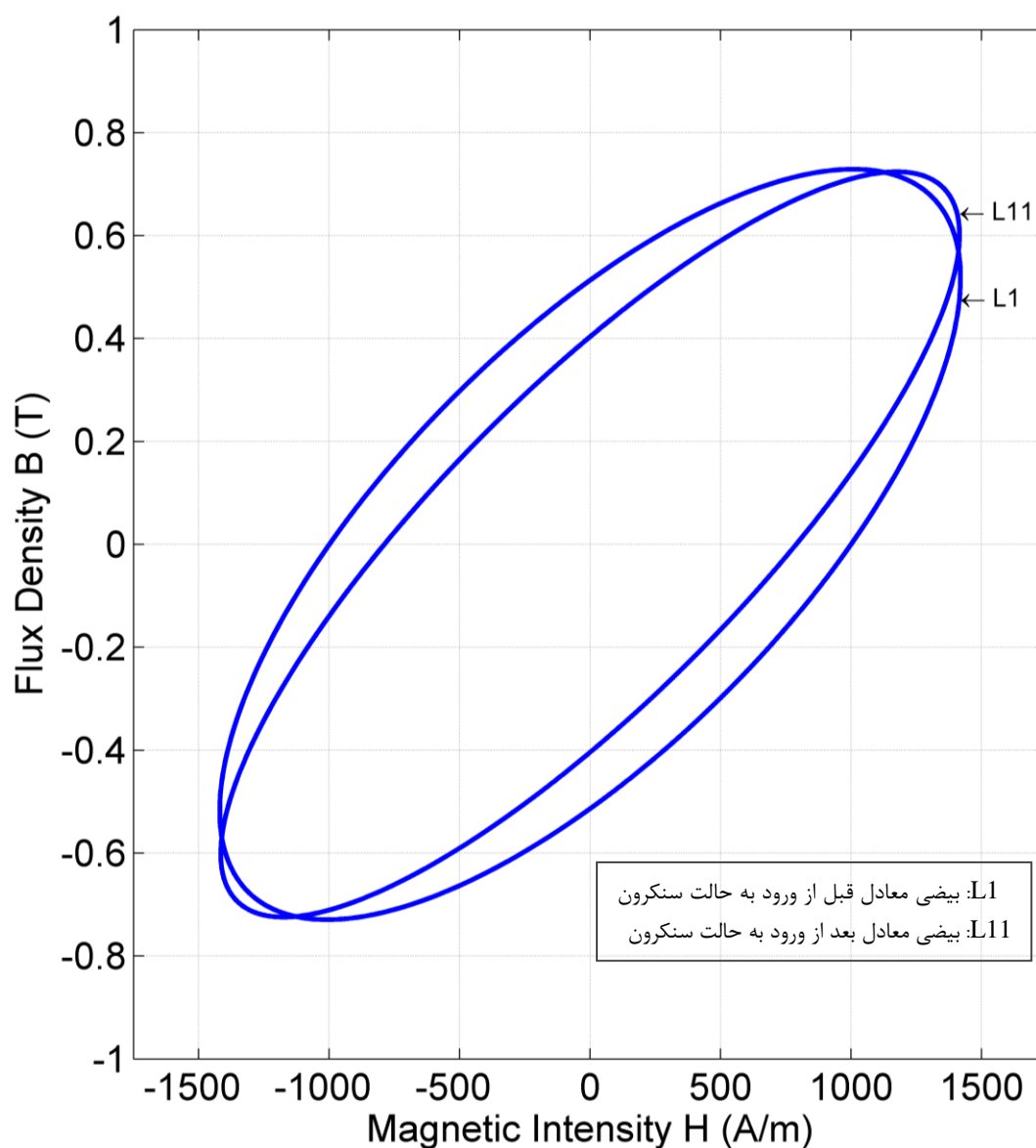
راهی که در بالا برای بهبود عملکرد موتور پیشنهاد شد وقتی که بار موتور ثابت باشد عملی نیست. در این مورد می‌توان به جای افزایش گشتاور بار، ولتاژ ورودی موتور را قبل از راه‌اندازی کاهش داد. این کار باعث می‌شود که موتور روی حلقه پسماند کوچک‌تری کار کند و در نتیجه گشتاور خروجی حداکثر موتور که متناسب با مساحت حلقه پسماند است به گشتاور بار نزدیک‌تر شود. قابل پیش‌بینی است که نتایج در این حالت هم جهت با حالت افزایش گشتاور بار رخ دهد. خروجی‌های موتور حاصل از ۲۰ درصد کاهش در ولتاژ ورودی در جدول ۴-۴ آمده است.

جدول ۴-۴ خروجی‌های مدل و موتور در ولتاژی معادل ۸۰٪ ولتاژ نامی موتور

پارامترهای مدل						
	H_p (A/m)	B_p (T)	α (deg)	X_g (Ω)	r_H (Ω)	x_H (Ω)
لحظه ورود به سنکرون	1420	0.729	44.8	263	204	206
بعد از سنکرونیسم	1416	0.724	33.9	263	161	240
مشخصه‌های موتور						
	V_{in} (V)	I_{in} (A)	PF	P_{in} (W)	P_{out} (W)	η (%)
لحظه ورود به سنکرون	160	0.57	0.40	63.2	51.0	80.7
بعد از سنکرونیسم	160	0.58	0.32	52.4	40.0	76.3

در جدول ۴-۴ توان خروجی موتور در لحظه ورود به حالت سنکرون همچنان بزرگ‌تر از توان بار است. به این معنی که علی‌رغم کاهش ولتاژ ورودی، همچنان موتور قادر به تأمین توان بار می‌باشد افزایش بازده موتور باعث شده است در این حالت علی‌رغم کاهش ولتاژ ورودی، جریان کشیده شده موتور نیز در حالت سنکرون نسبت به راه‌اندازی در شرایط نامی کاهش یابد. نزدیک شدن بیضی‌های معادل قبل و بعد از سنکرونیسم از مهم‌ترین علت‌های این افزایش بازده است.

بیضی‌های معادل با حلقه‌های پسماند در حالت راه‌اندازی موتور با ولتاژی کمتر از ولتاژ نامی در شکل ۴-۶ آورده شده است. کاهش پیدا کردن حداکثر چگالی شار باعث شده است که زاویه پسماند به ۹۰ درجه نزدیک‌تر شود تا موتور قادر به تأمین بار باشد.



شکل ۴-۶ بیضی‌های معادل با حلقه‌های پسماند قبل و بعد از سنکرونیسم

در نتیجه بهترین عملکرد موتور وقتی است که گشتاور نزدیک به خروج از سنکرون را تأمین کند. برعکس حالت معمول در موتورها، کمتر شدن بار در موتور پسماند باعث افزایش جریان موتور می‌شود. بنابراین بهترین بار، باری است که متناسب با مساحت حلقه اصلی باشد. اگر در ولتاژ نامی موتور در گشتاوری نزدیک به گشتاور حداکثر کار کند ممکن است زمان راه‌اندازی موتور به طرز غیرقابل قبولی افزایش یابد. حل کردن این مشکل راحت‌تر از مرتفع کردن خطر ناپایداری موتور است. در بخش‌های بعد در این باره بحث خواهد شد.

۴-۳-۲ تأثیر پارامترهای طراحی در خروجی‌های موتور

مفید است اگر قبل از شبیه‌سازی تحریک اضافی موتور پسماند، نگاهی به دیگر عوامل تأثیرگذار در خروجی‌های موتور داشته باشیم. با نگاهی به تاثیری که هر یک از این پارامترها در بهبود عملکرد موتور دارند، ضرورت اعمال یا عدم اعمال تحریک اضافی روشن‌تر می‌شود. سختی اعمال این تغییرات در موتور واقعی را نیز باید مد نظر داشت.

تأثیر تغییرات ضخامت دیسک روتور

تغییر کردن ضخامت دیسک روتور حجم ماده پسماند را تغییر می‌دهد. با توجه به رابطه‌ای که حجم ماده روتور با توان موتور پسماند دارد، تغییر ضخامت دیسک روتور خروجی‌های موتور را دچار تغییر خواهد کرد. نتایج شبیه‌سازی موتور برای $t_r=3\text{mm}$ و $t_r=5\text{mm}$ به ترتیب در جدول ۴-۵ و جدول ۴-۶ آمده است.

جدول ۴-۵ خروجی‌های مدل و موتور به ازای $t_r=3\text{mm}$

پارامترهای مدل						
	H_p (A/m)	B_p (T)	α (deg)	X_g (Ω)	r_H (Ω)	x_H (Ω)
لحظه ورود به سنکرون	2225	1.191	35.3	263	131	185
بعد از سنکرونیسم	2215	1.189	16.8	263	66	218
مشخصه‌های موتور						
	V_{in} (V)	I_{in} (A)	PF	P_{in} (W)	P_{out} (W)	η (%)
لحظه ورود به سنکرون	200	0.81	0.36	101.8	80.3	78.9
بعد از سنکرونیسم	200	0.83	0.22	62.1	40.0	64.4

در مورد $t_r=3\text{mm}$ باید گفت کاهش ضخامت دیسک روتور باعث می‌شود موتور حلقه پسماندی با H_p و B_p بزرگ‌تری را انتخاب کند. پیش‌بینی می‌شد کاهش ضخامت دیسک منجر به کاهش گشتاور خروج از سنکرون شود ولی در کمال تعجب این اتفاق درباره این موتور نمی‌افتد. با کاهش ضخامت دیسک به 0.75 مقدار اولیه، مساحت داخل حلقه پسماند حدود $1/5$ برابر شده است که نه تنها اثر کاهش ضخامت را از بین برده است بلکه منجر به افزایش گشتاور خروج از سنکرون نیز شده است. این یک نتیجه‌گیری

عمومی نیست. علت اصلی این اتفاق را می‌توان در شکل ۲-۴ و شکل ۳-۴ دید؛ جایی که شیب منحنی‌ها در مقادیر شدت جریان کمتر از 2000 A/m بسیار تند است. در هر حال با کاهش ضخامت دیسک به $t_r=3\text{mm}$ بعد از رسیدن موتور به سرعت سنکرون، زاویه پسماند کوچک‌تر از حالت $t_r=4\text{mm}$ (ضخامت اصلی روتور) می‌شود و این عامل باعث کاهش ضریب توان و بازده می‌شود و جریان ورودی را افزایش می‌دهد.

جدول ۴-۶ خروجی‌های مدل و موتور به ازای $t_r=5\text{mm}$

پارامترهای مدل						
	H_p (A/m)	B_p (T)	α (deg)	X_g (Ω)	r_H (Ω)	x_H (Ω)
لحظه ورود به سنکرون	1425	0.736	44.7	263	257	259
بعد از سنکرونیسم	1425	0.736	25.9	263	159	328
مشخصه‌های موتور						
	V_{in} (V)	I_{in} (A)	PF	P_{in} (W)	P_{out} (W)	η (%)
لحظه ورود به سنکرون	200	0.65	0.36	82.2	64.4	78.4
بعد از سنکرونیسم	200	0.68	0.25	58.4	40.0	68.4

در مورد $t_r=5\text{mm}$ نتایج دقیقاً عکس حالت $t_r=3\text{mm}$ است. با ضخیم‌تر شدن دیسک روتور، موتور با حلقه پسماند کوچک‌تری راه می‌افتد. مجدداً باید گفت چون در اینجا شیب کاهش مساحت حلقه پسماند، بیشتر از شیب افزایش ضخامت دیسک است، گشتاور خروج از سنکرون کم می‌شود. به بیان دقیق‌تر، با $1/25$ برابر کردن ضخامت دیسک روتور، مساحت حلقه پسماند $0/74$ برابر می‌شود که در نهایت به کاهش گشتاور خروج از سنکرون می‌انجامد. با این حال حلقه کوچک‌تر، بعد از رسیدن به حالت سنکرون، زاویه پسماند بزرگ‌تری از حالت قبل خواهد داشت. بنابراین بازده و ضریب توان موتور افزایش پیدا می‌کند و جریان ورودی کم می‌شود.

نتیجه بسیار مهمی که از این بخش می‌توان گرفت این است که تأثیر افزایش ضخامت دیسک پسماند روی افزایش گشتاور موتور، کاملاً وابسته به منحنی مغناطیس شونده‌گی و شکل حلقه‌های پسماند روتور

است و در این باره نمی‌توان نتیجه‌گیری کلی کرد. ولی با اطمینان می‌توان گفت، افزایش ضخامت دیسک پسماند، بازده و ضریب توان موتور را افزایش می‌دهد و جریان ورودی موتور را کم می‌کند.

تأثیر تغییر طول فاصله هوایی

طول فاصله هوایی مهم‌ترین عامل تعیین راکتانس فاصله هوایی است. اندازه این راکتانس تأثیر مستقیم بر جریان ورودی موتور دارد. بزرگ بودن طول فاصله هوایی علاوه بر اینکه جریان موتور را افزایش می‌دهد، ضریب توان موتور را نیز کم می‌کند.

شبه‌سازی موتور به ازای $l_g=2\text{mm}$ ، $l_g=1\text{mm}$ و $l_g=0.5\text{mm}$ به ترتیب در جدول ۴-۷، جدول ۴-۸ و جدول ۴-۹ آمده است. مشخص است که با افزایش فاصله هوایی مقدار راکتانس موازی X_g کاهش می‌یابد. این عامل باعث افزایش جریان موتور می‌شود. جریان گذرنده از راکتانس فاصله هوایی کاملاً سلفی است بنابراین با افزایش این جریان، ضریب توان موتور نیز کاهش پیدا می‌کند.

با کاهش جریان موتور در فاصله هوایی کوچک‌تر، تلفات مسی کاهش پیدا می‌کند و موجب افزایش بازده می‌شود.

جدول ۴-۷ خروجی‌های مدل و موتور به ازای $l_g=2\text{mm}$

پارامترهای مدل						
	H_p (A/m)	B_p (T)	α (deg)	X_g (Ω)	r_H (Ω)	x_H (Ω)
لحظه ورود به سنکرون	1565	0.869	43.0	132	214	230
بعد از سنکرونیسم	1557	0.864	25.2	132	133	284
مشخصه‌های موتور						
	V_{in} (V)	I_{in} (A)	PF	P_{in} (W)	P_{out} (W)	η (%)
لحظه ورود به سنکرون	200	1.02	0.26	92.7	64.9	70.0
بعد از سنکرونیسم	200	1.05	0.19	68.9	40.0	58.1

جدول ۴-۸ خروجی‌های مدل و موتور به ازای $l_g=1\text{mm}$

پارامترهای مدل						
	H_p (A/m)	B_p (T)	α (deg)	X_g (Ω)	r_H (Ω)	x_H (Ω)
لحظه ورود به سنکرون	1630	0.909	42.5	263	213	233
بعد از سنکرونیسم	1629	0.909	22.7	263	122	291
مشخصه‌های موتور						
	V_{in} (V)	I_{in} (A)	PF	P_{in} (W)	P_{out} (W)	η (%)
لحظه ورود به سنکرون	200	0.69	0.37	88.4	70.0	79.1
بعد از سنکرونیسم	200	0.72	0.24	59.2	40.0	67.6

جدول ۴-۹ خروجی‌های مدل و موتور به ازای $l_g=0.5\text{mm}$

پارامترهای مدل						
	H_p (A/m)	B_p (T)	α (deg)	X_g (Ω)	r_H (Ω)	x_H (Ω)
لحظه ورود به سنکرون	1670	0.934	42.1	526	212	235
بعد از سنکرونیسم	1666	0.932	21.6	526	117	294
مشخصه‌های موتور						
	V_{in} (V)	I_{in} (A)	PF	P_{in} (W)	P_{out} (W)	η (%)
لحظه ورود به سنکرون	200	0.52	0.49	88.5	73.1	82.6
بعد از سنکرونیسم	200	0.54	0.30	55.7	40.0	71.9

۴-۳-۳ نتایج با کاهش ولتاژ نامی بعد از حالت سنکرون

حالت قابل بررسی دیگری که وجود دارد این است که موتور با ولتاژ نامی راه‌اندازی شود و پس از رسیدن به سرعت سنکرون، ولتاژ موتور مقداری کاهش یابد. در این حالت زمان راه‌اندازی موتور از حد مجاز تجاوز نمی‌کند چرا که در طول راه‌اندازی موتور با ولتاژ نامی کار خواهد کرد. این روش با روشی که در آن ولتاژ موتور قبل از راه‌اندازی کاهش پیدا می‌کرد تفاوت دیگری نیز دارد. اگر ولتاژ موتور قبل از راه‌اندازی کم شود حلقه پسماند اصلی که موتور در طول راه‌اندازی انتخاب می‌کند عوض خواهد شد. اما کاهش ولتاژ بعد از رسیدن به سرعت سنکرون باعث می‌شود که موتور در طول راه‌اندازی با همان حلقه پسماند اصلی متناسب با ولتاژ نامی کار کند ولی وقتی ولتاژ کاهش می‌یابد حلقه پسماند، دیگر حلقه‌ی

باریک شده‌ی حلقه‌ی اصلی موتور نیست بلکه تغییر ماهیت می‌دهد. این کار را می‌توان نمونه خفیف‌تر از تحریک اضافه موقت دانست.

نتایج شبه‌سازی موتور در جدول ۴-۱۰ آمده است. سطر اول و دوم بیانگر نتایج لحظه ورود به سنکرون و بعد از حالت سنکرون و تکرار نتایج جدول ۴-۲ است. سطر سوم نتایجی است که با کاهش ۱۰ درصدی ولتاژ ورودی موتور به دست آمده است.

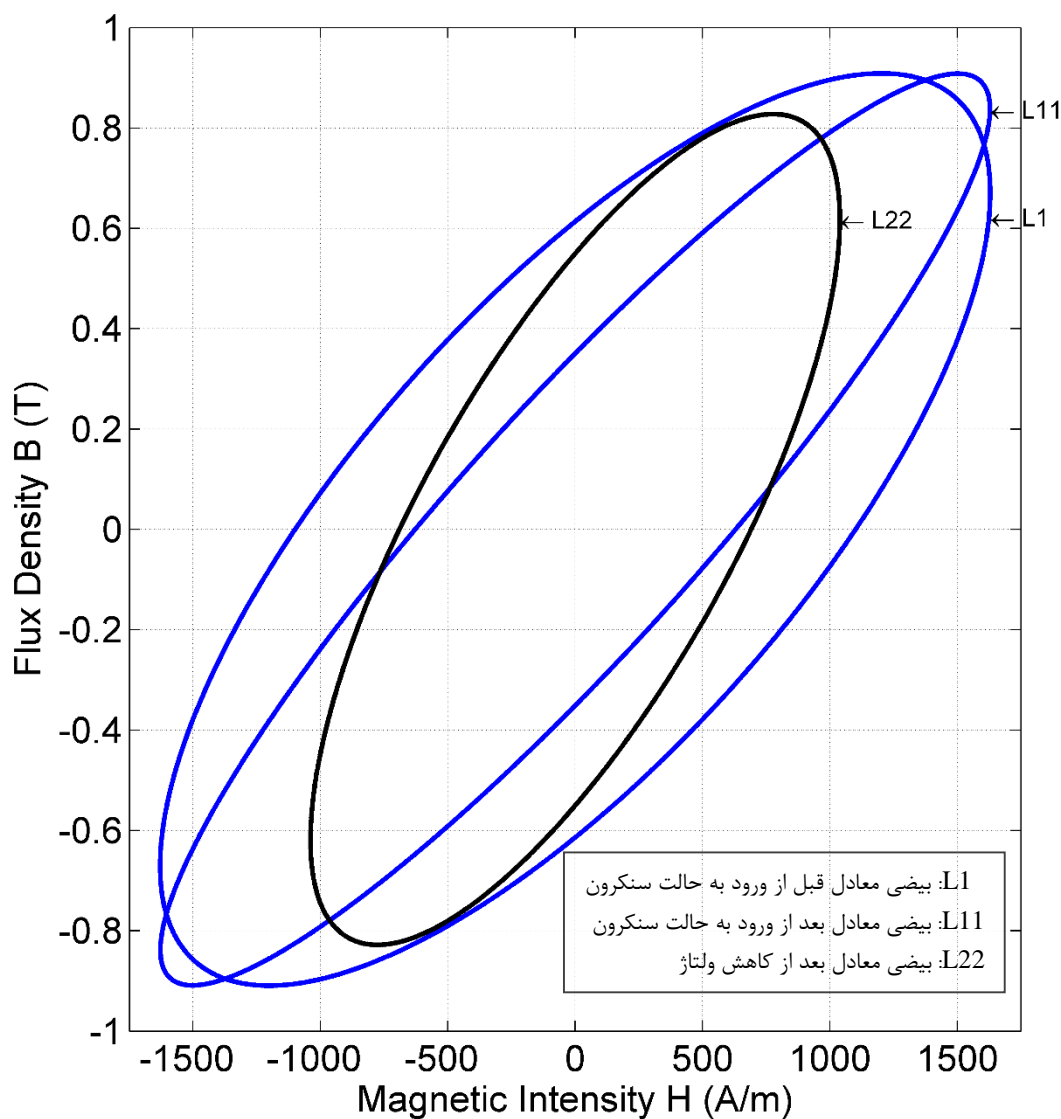
بهبود خروجی‌ها موتور در این حالت بسیار محسوس‌تر از قبل است. نتایج موتور با ولتاژ کاهش یافته در مورد جریان ورودی و بازده حتی از زمان ورود به سنکرون موتور نیز بهتر شده است. یکی از علل اصلی این بهبود، زاویه پسماندی است که تغییر اساسی کرده است. درحالی‌که این زاویه در حالت کار دائمی موتور حدود ۲۳ درجه است، با کاهش ولتاژ به حدود ۴۱ درجه رسیده است. علت این رشد سریع، کاهش شدید در مقادیر B_p و به خصوص H_p است. با کاهش این دو مقدار، و از طرفی ثابت ماندن بار موتور، زاویه پسماند باید افزایش چشمگیری داشته باشد به طوری که موتور بتواند همچنان بار را تأمین کند.

جدول ۴-۱۰ خروجی‌های مدل و موتور با کاهش ولتاژ بعد از رسیدن به سرعت سنکرون

پارامترهای مدل						
	H_p (A/m)	B_p (T)	α (deg)	X_g (Ω)	r_H (Ω)	x_H (Ω)
لحظه ورود به سنکرون	1630	0.909	42.5	263	213	233
بعد از سنکرونیسم	1629	0.909	22.7	263	122	291
کاهش ۱۰ درصدی ولتاژ	1040	0.828	41.7	263	299	336
مشخصه‌های موتور						
	V_{in} (V)	I_{in} (A)	PF	P_{in} (W)	P_{out} (W)	η (%)
لحظه ورود به سنکرون	200	0.69	0.37	88.4	70.0	79.1
بعد از سنکرونیسم	200	0.72	0.24	59.2	40.0	67.6
کاهش ۱۰ درصدی ولتاژ	180	0.55	0.32	53.6	40.0	74.7

با نگاهی به بیضی معادل نهایی در این حالت مشخص است که این بیضی تفاوت اساسی با بیضی‌های قبل دارد. یکی از این تفاوت‌ها تغییر اندازه μ است. اندازه μ در حالت‌های قبل از روی منحنی مغناطیس

شوندگی ماده روتور انتخاب می‌شد. حال آنکه چرخش بیضی نهایی در شکل ۴-۷ نشان‌دهنده تغییر این مقدار است.



شکل ۴-۷ بیضی‌های معادل با حلقه‌های پسماند در کاهش ولتاژ بلافاصله بعد از سنکرونیسم

۴-۴ نتایج با اعمال تحریک اضافی

در بخش‌های قبل اشاره شد که می‌توان بعد از رسیدن موتور به سرعت سنکرون ولتاژ را موقتاً بالا برد؛ ولی زمان اعمال این اضافه ولتاژ را می‌توان تغییر داد. آزمایش نشان می‌دهد که می‌توان از همان ابتدا موتور را با ولتاژی بزرگ‌تر از ولتاژ نامی راه‌اندازی کرد و بعد از سنکرون شدن، ولتاژ را کاهش داد [20].

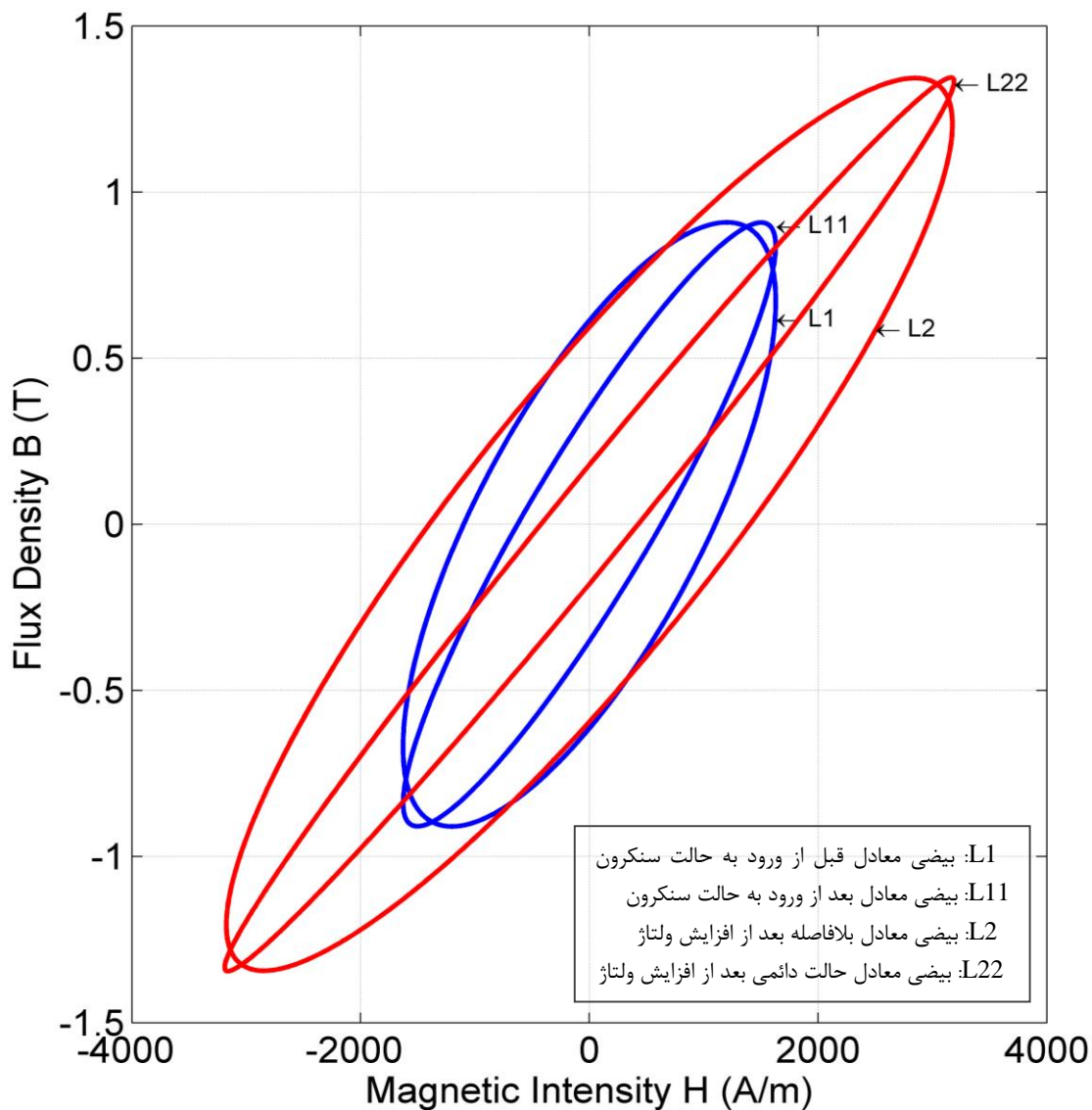
این موضوع از این جهت حائز اهمیت است که می‌تواند مشکل راه‌اندازی کند موتور با بار حداکثری را حل کند. بدین صورت که ابتدا موتور را با بار حداکثر و ولتاژی بزرگ‌تر از ولتاژ نامی راه‌اندازی می‌کنیم و پس از رسیدن به سرعت سنکرون ولتاژ را تا حد مطلوب پایین می‌آوریم که در ادامه خواهیم دید که این ولتاژ لزوماً ولتاژ نامی موتور نخواهد بود.

با توجه به اینکه زمان اعمال افزایش ولتاژ تأثیر چندانی در نتایج ندارد، در اینجا موتور ابتدا با ولتاژ نامی راه‌اندازی شده است. موتور را با شرایط بخش ۳-۴ راه‌اندازی می‌کنیم و بعد از رسیدن به حلقه نهایی در سرعت سنکرون، ولتاژ ورودی را $1/5$ برابر می‌کنیم. میدانیم که ابتدا حلقه پسماند بزرگ می‌شود و سپس سطح داخلی حلقه چنان تغییر می‌کند که متناسب با گشتاور بار موتور باشد. افزایش ولتاژ موتور پسماند مشابه این است که بار را از مقدار حداکثر کاهش داده باشیم. بنابراین قابل تصور است که جریان موتور افزایش پیدا کند و بازده موتور کاهش یابد. نتایج از ابتدای راه‌اندازی در جدول ۴-۱۱ آمده است. باید دقت کرد که هنوز ولتاژ از مقدار افزایش یافته کاهش پیدا نکرده است.

جدول ۴-۱۱ خروجی‌های مدل و موتور با افزایش ولتاژ ورودی

پارامترهای مدل						
	H_p (A/m)	B_p (T)	α (deg)	X_g (Ω)	r_H (Ω)	x_H (Ω)
لحظه ورود به سنکرون	1630	0.909	42.5	263	213	233
بعد از سنکرونیسم	1629	0.909	22.7	263	122	291
بلافاصله بعد از اضافه ولتاژ	3175	1.344	26.2	263	106	215
حالت دائمی بعد از اضافه ولتاژ	3190	1.345	7.7	263	32	236
مشخصه‌های موتور						
	V_{in} (V)	I_{in} (A)	PF	P_{in} (W)	P_{out} (W)	η (%)
لحظه ورود به سنکرون	200	0.69	0.37	88.4	70.0	79.1
بعد از سنکرونیسم	200	0.72	0.24	59.2	40.0	67.6
بلافاصله بعد از اضافه ولتاژ	300	1.21	0.29	179.8	131.8	73.3
حالت دائمی بعد از اضافه ولتاژ	300	1.24	0.14	89.1	40.0	44.9

بیضی‌های معادل با هر کدام از سطرهای جدول ۴-۱۱ در شکل ۴-۸ آورده شده است.



شکل ۴-۸ بیضی‌های معادل با حلقه‌های پسماند قبل و بعد از سنکرونیسم و بعد از اضافه ولتاژ

قبلاً گفته شد که موتور پسماند با افزایش ولتاژ ورودی از شرایط مطلوب فاصله می‌گیرد و بنابراین باید هر چه سریع‌تر ولتاژ را کاهش داد. دو سطر انتهایی جدول ۴-۱۱ نیز نشان می‌دهد که با افزایش ولتاژ، جریان ورودی افزایش پیدا می‌کند، بازده و ضریب توان افت می‌کنند.

۴-۵ کاهش دادن ولتاژ ورودی به ولتاژ نامی

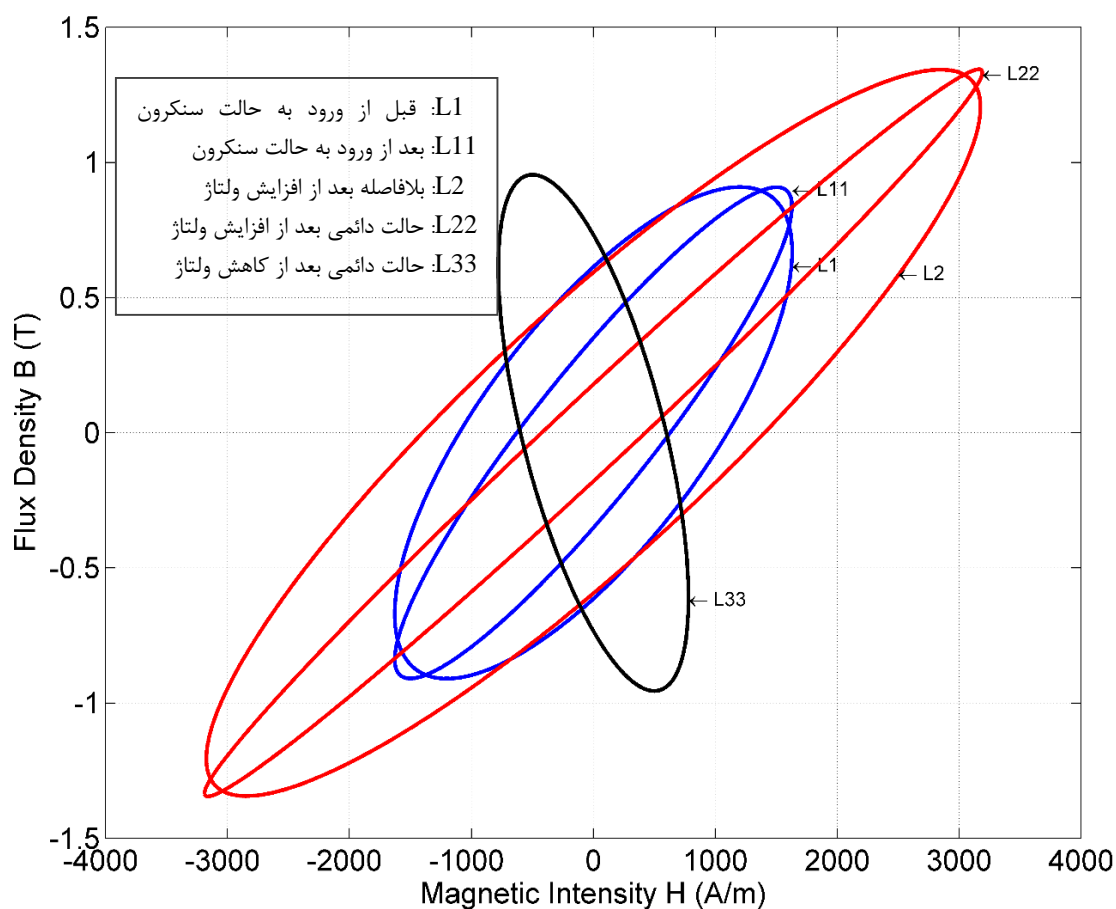
معمول‌ترین حالت این است که ولتاژ مجدداً به ولتاژ نامی برگردانده شود. جدول ۴-۱۲ نتایج ۱/۵ برابر کردن ولتاژ ورودی موتور و برگرداندن آن به ولتاژ نامی را نشان می‌دهد. سطر دوم این جدول حالت

دایمی موتور را قبل از افزایش تحریک نشان می‌دهد. بعد از افزایش و بازگرداندن ولتاژ به ولتاژ نامی، موتور شرایط سطر پنجم جدول را دارد که مقایسه جریان ورودی، ضریب توان و بازده نشان‌دهنده بهبود عملکرد موتور است.

جدول ۴-۱۲ خروجی‌های مدل و موتور با اعمال تحریک اضافی معمول

پارامترهای مدل						
	H_p (A/m)	B_p (T)	α (deg)	X_g (Ω)	r_H (Ω)	x_H (Ω)
لحظه ورود به سنکرون	1630	0.909	42.5	263	213	233
بعد از سنکرونیسم	1629	0.909	22.7	263	122	291
بلافاصله بعد از اضافه ولتاژ	3175	1.344	26.2	263	106	215
حالت دائمی بعد از اضافه ولتاژ	3190	1.345	7.7	263	32	236
حالت دائمی بعد از کاهش ولتاژ	780	0.955	129.8	263	531	-443
مشخصه‌های موتور						
	V_{in} (V)	I_{in} (A)	PF	P_{in} (W)	P_{out} (W)	η (%)
لحظه ورود به سنکرون	200	0.69	0.37	88.4	70.0	79.1
بعد از سنکرونیسم	200	0.72	0.24	59.2	40.0	67.6
بلافاصله بعد از اضافه ولتاژ	300	1.21	0.29	179.8	131.8	73.3
حالت دائمی بعد از اضافه ولتاژ	300	1.24	0.14	89.1	40.0	44.9
حالت دائمی بعد از کاهش ولتاژ	200	0.35	0.44	53.1	40.0	75.3

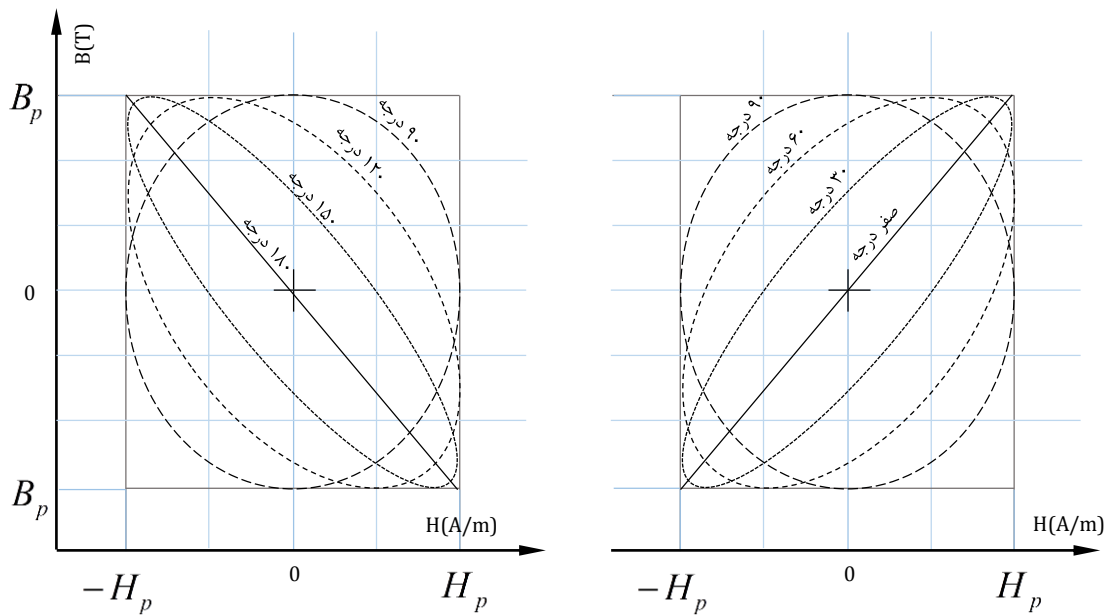
دلیل بهبود قابل توجه ضریب توان مقدار زاویه پسماند در سطر پنجم است. در این حالت مقدار این زاویه بیش از ۹۰ درجه شده است. متناسب بودن مقدار X_H با کسینوس این زاویه باعث منفی شدن مقدار امپدانس شده و به مدار معادل سمت روتور خاصیت خازنی می‌دهد که هم باعث بهبود ضریب توان می‌شود هم جریان ورودی را مقدار چشمگیری کاهش می‌دهد. پنج بیضی معادل حلقه‌های پسماند که متناظر با پنج سطر جدول ۴-۱۲ است در شکل ۴-۹ آمده است. اگر گشتاور بار در حین تحریک اضافی ولتاژ تغییر نکند، مساحت حلقه نهایی بزرگ‌تر از مقدار مورد نیاز بار است. بنابراین به نحوی تغییر شکل می‌دهد که مجدداً متناسب با گشتاور بار شود.



شکل ۴-۹ بیضی‌های معادل با حلقه‌های پسماند در طول شبیه‌سازی موتور

مفهوم عینی انتخاب بیضی مناسب

برای درک چگونگی انتخاب بیضی مناسب، می‌توان الگوریتم کلی مسئله را این‌گونه توضیح داد: الگوریتم با توجه به ورودی‌های موتور مقدار اولیه مناسبی برای H_p و B_p فرض می‌کند. انتخاب این دو مقدار علاوه بر این که اندازه μ_r را مشخص می‌کند، مشابه این است که یک قاب مستطیلی روی محورهای مختصات فرض شده است که بیضی معادل باید در آن محاط شود. بدیهی است که بی‌شمار بیضی را می‌توان در یک مستطیل محاط کرد ولی بیضی مطلوب باید علاوه بر برآورده کردن مقدار مورد نیاز گشتاور بار، ولتاژ ورودی مدار معادل را نیز تأیید کند.



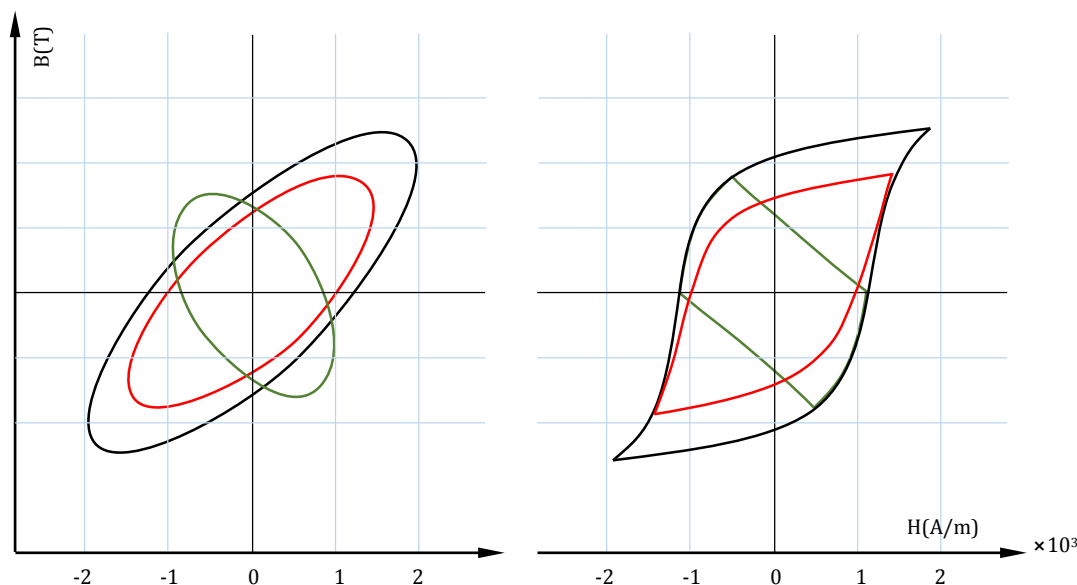
شکل ۴-۱۰ بیضی‌هایی با B_p ، H_p و اندازه μ_r یکسان و اختلاف زاویه‌هایی متفاوت: وقتی که رأس حلقه پسماند در ربع اول باشد (سمت راست)، وقتی که رأس حلقه پسماند در ربع دوم باشد (سمت چپ).

حلقه‌های فرعی ایجادشده در طول راه‌اندازی موتور دقیقاً قابل اندازه‌گیری نیست. برای مقایسه حلقه‌های اصلی موتور با مدل بیضی آن می‌توان فرض ساده‌ای را در نظر گرفت. اگر فرض کنیم موتور در حداکثر بار قابل تحمل خود کار می‌کند، حلقه پسماند موتور بعد از سنکرون‌نیسم ثابت می‌ماند. این فرض باعث می‌شود که حلقه پسماند نهایی بعد از کاهش ولتاژ نیز کمترین تغییر را نسبت به تخمین شکل ۳-۸ داشته باشد. در شکل ۴-۱۱ سه حلقه پسماند و بیضی‌های معادل آن‌ها که نتیجه شبیه‌سازی است نشان داده شده است.

۴-۶ کاهش ولتاژ به مقادیر متفاوت

قبلاً گفته شد که تحریک اضافی موقت باعث افزایش گشتاور خروج از سنکرون می‌شود؛ به این معنی که موتور بعد از تحریک اضافی قادر به تأمین بار بیشتری است. برای بررسی این حالت در شبیه‌سازی موتور ولتاژ نهایی یک بار تا ۸۰ و بار دیگر تا ۶۰ درصد ولتاژ نامی کاهش پیدا کرده است. نتایج جدول ۴-۱۳ نشان می‌دهد که علی‌رغم اینکه جریان کاهش چشمگیری در ولتاژهای پایین ندارد ولی بازده

افزایش یافته است. علت افزایش بازده کاهش ولتاژ تلفات هسته موتور است که باعث کاهش ماکزیمم چگالی شار شده است. کاهش ولتاژ ضریب توان موتور را نیز به سمت پیش‌فاز شدن تغییر می‌دهد هرچند مقدار نسبتاً کوچک راکتانس فاصله هوایی از پیش‌فاز شدن موتور جلوگیری می‌کند.

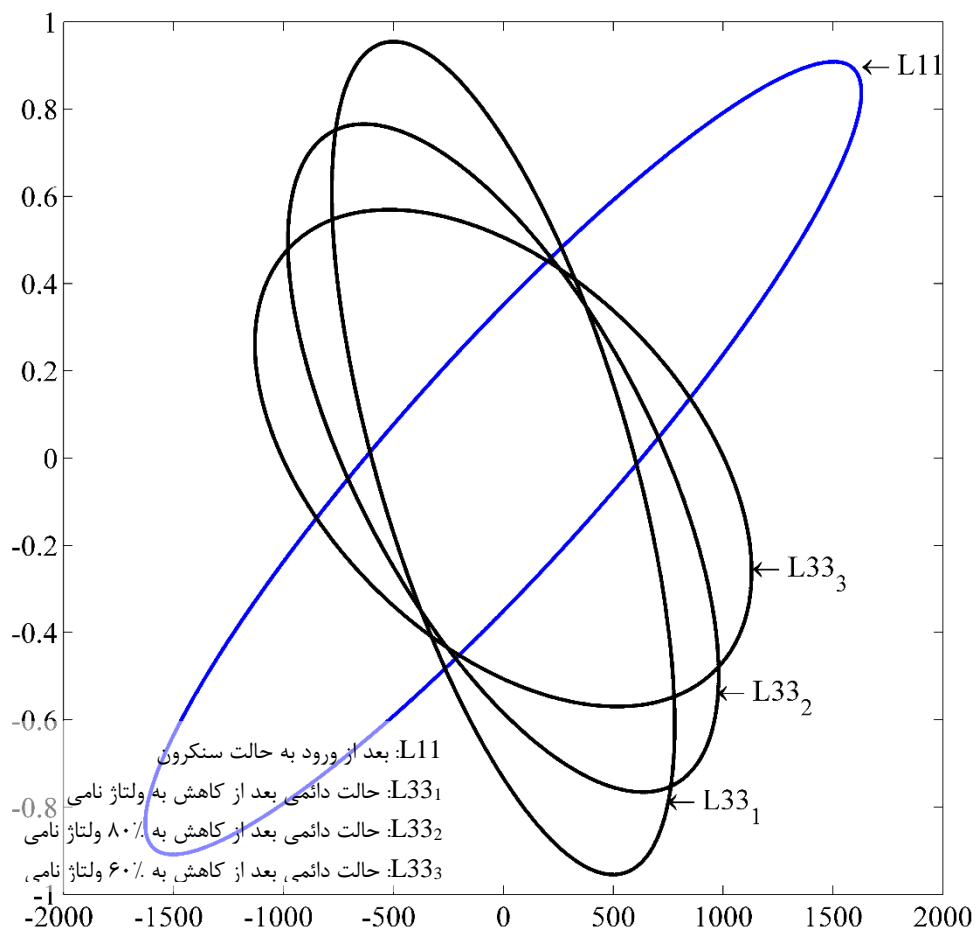


شکل ۴-۱۱ حلقه‌های پسماند اصلی در ولتاژ نامی و ولتاژ افزایش یافته و حلقه پسماند نهایی (سمت راست)، بیضی‌های معادل (سمت چپ) همگی در حداکثر گشتاور موتور

با توجه به اهمیت بازده، به نظر می‌رسد که بهترین کاهش ولتاژ حالتی است که کاهش بیشتر آن موتور را از حالت سنکرون خارج کند. یعنی آن قدر ولتاژ کاهش یابد که بار موجود روی موتور، نقش بار خروج از سنکرون را بازی کند. این ولتاژ کمتر از ولتاژ اولیه موتور است.

جدول ۴-۱۳ خروجی‌های مدل و موتور با افزایش ولتاژ ورودی و کاهش به ۶۰ و ۸۰ درصد ولتاژ نامی

پارامترهای مدل						
	H_p (A/m)	B_p (T)	α (deg)	X_g (Ω)	r_H (Ω)	x_H (Ω)
حالت دائمی بعد از سنکرونیسم	1629	0.909	22.7	263	122	291
کاهش ولتاژ به ولتاژ نامی	780	0.955	129.8	263	531	-443
کاهش ولتاژ به ۸۰٪ ولتاژ نامی	980	0.766	130.3	263	337	-286
کاهش ولتاژ به ۶۰٪ ولتاژ نامی	1130	0.570	117.3	263	253	-131
مشخصه‌های موتور						
	V_{in} (V)	I_{in} (A)	PF	P_{in} (W)	P_{out} (W)	η (%)
حالت دائمی بعد از سنکرونیسم	200	0.72	0.24	59.2	40.0	67.6
کاهش ولتاژ به ولتاژ نامی	200	0.35	0.44	53.1	40.0	75.3
کاهش ولتاژ به ۸۰٪ ولتاژ نامی	160	0.27	0.65	48.4	40.0	82.7
کاهش ولتاژ به ۶۰٪ ولتاژ نامی	120	0.27	0.82	45.2	40.0	88.6



شکل ۴-۱۲ بیضی‌های معادل هنگام کاهش دادن ولتاژ به مقادیری کمتر از ولتاژ نامی

فصل پنجم

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۵-۱ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این رساله تحریک اضافی موقت بررسی و مدل‌سازی شد. مشخص شد که تحریک اضافی می‌تواند تا حدود زیادی ضعف‌های موتور پسماند را جبران کند. ابتدا حلقه پسماند و سپس موتور پسماند مدل‌سازی شدند. وضعیت مغناطیسی موتور پسماند در تغییرات ولتاژ مورد بررسی قرار گرفت. راهکارهایی برای بهبود عملکرد موتور، قبل و بعد از اعمال تحریک اضافی مطرح شد که در این بخش به برخی از آنها اشاره می‌شود:

- مشخص شد که موتور پسماند در شرایطی که باری نزدیک‌تر به بار خروج از سنکرون را تأمین کند، خروجی‌های بهتری خواهد داشت. این خروجی‌های بهتر شامل جریان کمتر و ضریب توان و بازده بیشتر است.
- مشخص شد که کاهش ولتاژ موتور پسماند بعد از رسیدن به سرعت سنکرون تغییرات مثبتی را در کارکرد موتور ایجاد می‌کند. علیرغم اینکه در این حالت یعنی با کاهش ولتاژ به مقداری کمتر از ولتاژ نامی، گشتاور خروج از سنکرون کاهش می‌یابد ولی در نهایت خروجی‌ها هم جهت با خروجی‌های بند اول، بهتر می‌شوند.
- در ادامه افزایش دادن ولتاژ مد نظر قرار گرفت. اشاره شد که این افزایش ولتاژ موقتی است و بعد از چند سیکل منبع، دوباره ولتاژ کاهش می‌یابد. اما توجه به پاسخ هر چند موقتی موتور به این افزایش ولتاژ، خالی از لطف نبود. درحالی‌که این ولتاژ عکس بند بالا بود، نتایج نیز دقیقاً همین موضوع را تصدیق می‌کرد. بنابراین گفته شد که نباید اجازه داد موتور مدت زیادی در این ولتاژ افزایش‌یافته کار کند.
- سپس بحث اصلی این پایان‌نامه یعنی کاهش دادن ولتاژ ورودی افزایش‌یافته مطرح شد. نتایج حاکی از این بود که موتور پسماند پاسخی کاملاً مثبت به افزایش موقتی و کاهش دوباره ولتاژ می‌دهد. این پاسخ شامل افزایش قابل توجه در ضریب توان و کاهش جریان ورودی هم چنین

بهبود بازده است. گشتاور خروج از سنکرون نیز در صورتی که ولتاژ موتور به ولتاژ نامی برگردد بیشتر خواهد شد.

- نهایتاً این موضوع مورد بررسی قرار گرفت که با توجه به افزایش گشتاور خروج از سنکرون بعد از اعمال تحریک اضافی موقت، می‌توان ولتاژ را به زیر ولتاژ نامی کاهش داد. بعد از اعمال تحریک اضافی، امکان کاهش ولتاژ به مقادیری ممکن شد که در حالت عادی (بدون تحریک اضافی موقت) موتور را از سنکرونیسم خارج می‌کرد.
- علت بهبود رفتار موتور در حالت‌های مختلف بالا، توسط حلقه‌های پسماند به دست آمده تحلیل شد و الگوریتمی که رفتار موتور را در تغییرات دلخواه ولتاژ ورودی پیش‌بینی می‌کند مطرح شد.

به عنوان جمع‌بندی به مقایسه خروجی‌های موتور در شرایط مختلف بررسی شده در این پایان‌نامه پرداخته می‌شود که در جدول ۵-۱ آورده شده است. همان‌گونه که از جدول پیداست، شرایط بهینه در سطر آخر یعنی تحریک اضافی ویژه رخ می‌دهد.

جدول ۵-۱ خروجی‌های مدل و موتور در حالت‌های مختلف

مشخصه‌های موتور						
	V_{in} (V)	I_{in} (A)	PF	P_{in} (W)	P_{out} (W)	η (%)
حالت دائمی بعد از سنکرونیسم	200	0.72	0.24	59.2	40.0	67.6
راه‌اندازی موتور با ولتاژ کاهش‌یافته به حداقل ممکن در بار نامی	135	0.50	0.42	49.0	40.0	81.6
افزایش بار به حداکثر بار قابل تحمل موتور در ولتاژ نامی	200	0.69	0.37	88.6	70.0	79.0
کاهش ولتاژ بلافاصله بعد از سنکرونیسم به حداقل ممکن (بدون تحریک اضافی)	130	0.29	0.73	45.9	40.0	87.0
کاهش ولتاژ به حداقل ولتاژ ممکن بعد از اعمال تحریک اضافی ۳۰۰ ولتی	106	0.28	0.82	44.5	40.0	89.9

۲-۵ پیشنهادات

- بار خروجی موتور پسماند تا حد امکان نزدیک به بار خروج از سنکرون انتخاب شود.
- اگر نزدیکی مقدار بار خروجی به بار خروج از سنکرون باعث افزایش غیرقابل قبول زمان راه‌اندازی می‌شود، می‌توان از ابتدا موتور را با ولتاژ افزایش یافته راه‌اندازی کرد.
- اگر بار به مدت طولانی روی موتور قرار دارد باید به صورت خودکار یا دستی، تحریک اضافی متناوباً تکرار شود. معیار این تکرارها می‌تواند جریان ورودی موتور یا ضریب توان باشد.
- در صورتی که تغییرات بار خروجی روی موتور اندک باشد می‌توان ولتاژ را پس از افزایش به زیر ولتاژ نامی کاهش داد. اما در صورتی که بار با اغتشاشات قابل توجه همراه باشد، این اغتشاشات ممکن است موتور را از حالت سنکرون خارج کند.
- باید هنگام مطالعه روی تحریک اضافی، به محل نقطه کار دقت کرد. به عنوان مثال اگر نقطه کار نزدیک به ناحیه اشباع ماده پسماند باشد، تحریک اضافی تأثیر زیادی روی گشتاور خروج از سنکرون نخواهد داشت.
- ضروری است که به شکل حلقه‌های پسماند توجه شود، چرا که عامل مهمی در تأثیرپذیری موتور از تحریک اضافی است. به عنوان مثال، اگر منحنی کاهشی حلقه‌ی کاری پسماند با شیب کمتری آغاز شود، تحریک اضافی کوچک‌تری قادر است رأس حلقه پسماند نهایی را به ربع دوم منتقل کند.

پیوست‌ها

پیوست ۱: حل معادله میدان

سمت راست رابطه (۲-۱۶) را بازنویسی می‌کنیم و بسط می‌دهیم.

$$\begin{aligned} & \frac{B_m r}{\mu p} \cos(\omega t - \psi - \varphi_0 + \delta) + \frac{B_m l_g p t_r}{\mu_0 r} \cos(\omega t - \psi - \varphi_0) = \\ & = \frac{B_m r}{\mu p} \cos(\delta) \cos(\omega t - \psi - \varphi_0) - \frac{B_m r}{\mu p} \sin(\delta) \sin(\omega t - \psi - \varphi_0) + \frac{B_m l_g p t_r}{\mu_0 r} \cos(\omega t - \psi - \varphi_0) \\ & = \left(\frac{B_m r}{\mu p} \cos(\delta) + \frac{B_m l_g p t_r}{\mu_0 r} \right) \cos(\omega t - \psi - \varphi_0) - \left(\frac{B_m r}{\mu p} \sin(\delta) \right) \sin(\omega t - \psi - \varphi_0) \end{aligned}$$

(پ-۱)

برای ساده‌تر کردن رابطه بالا از اتحاد ریاضی زیر استفاده می‌کنیم.

$a \cos(\lambda) + b \sin(\lambda) = c \cos(\lambda - \text{phi})$
به طوری که:
$a = c \cos(\text{phi})$
$b = c \sin(\text{phi})$
$\tan(\text{phi}) = b/a$
$c = \sqrt{a^2 + b^2}$

با معادل‌سازی پارامترهای اتحاد بالا برای (پ-۱) خواهیم داشت.

$$\lambda = \omega t - \psi - \varphi_0$$

$$a = \left(\frac{B_m r}{\mu \varphi} \cos(\delta) + \frac{B_m l_g p t_r}{\mu_0 r} \right)$$

$$b = - \left(\frac{B_m r}{\mu \varphi} \sin(\delta) \right)$$

و از اینجا phi و c قابل محاسبه است:

$$- \text{phi} = \tan^{-1} \left(\frac{\left(\frac{r}{\mu \varphi} \sin(\delta) \right)}{\left(\frac{r}{\mu \varphi} \cos(\delta) + \frac{l_g p t_r}{\mu_0 r} \right)} \right)$$

$$c = B_m \sqrt{\left(\frac{r}{\mu \varphi} \cos(\delta) + \frac{l_g p t_r}{\mu_0 r} \right)^2 + \left(\frac{r}{\mu \varphi} \sin(\delta) \right)^2}$$

حال می‌توان رابطه (پ-۱) را تنها با یک کسینوس و یک شیفیت فاز نوشت.

$$\begin{aligned} & \left(\frac{B_m r}{\mu \varphi} \cos(\delta) + \frac{B_m l_g p t_r}{\mu_0 r} \right) \cos(\omega t - \psi - \varphi_0) - \left(\frac{B_m r}{\mu \varphi} \sin(\delta) \right) \sin(\omega t - \psi - \varphi_0) = \\ & = B_m \sqrt{\left(\frac{r}{\mu \varphi} \cos(\delta) + \frac{l_g p t_r}{\mu_0 r} \right)^2 + \left(\frac{r}{\mu \varphi} \sin(\delta) \right)^2} \cos \left(\omega t - \psi - \varphi_0 + \tan^{-1} \left(\frac{\left(\frac{r}{\mu \varphi} \sin(\delta) \right)}{\left(\frac{r}{\mu \varphi} \cos(\delta) + \frac{l_g p t_r}{\mu_0 r} \right)} \right) \right) \end{aligned}$$

(پ-۲)

رابطه (پ-۲) همان سمت راست رابطه (۲-۱۶) است. از لزوم برابری آن با سمت چپ رابطه (۲-۱۶)

مقادیر B_m و φ_0 مشابه روابط (۲-۱۷) و (۲-۱۸) به دست می‌آید.

پیوست ۲: تحلیل فوریه حلقه پسماند

جدول پ ۱ تحلیل فوریه برای حلقه پسماند شکل ۲-۱۸

شماره هارمونیک	اندازه (% نسبت به هارمونیک اول)	فاز (درجه)
1	100	4.8
2	0.034973	10.4
3	28.27104	-163.3
4	0.030601	-156.9
5	15.61093	29
6	0.02623	35.3
7	10.46995	-138.6
8	0.02623	-132.4
9	7.746448	53.5
10	0.02623	59.9
11	5.967213	-113.7
12	0.021858	-106.8
13	4.778142	79.3
14	0.021858	85.6
15	3.969399	-88.5
16	0.021858	-81.9
17	3.344262	104.4
18	0.021858	111.4
19	2.872131	-61.9
20	0.017486	-54.7
21	2.539891	131.7
22	0.017486	138.6
23	2.286339	-35.3
24	0.017486	-28.7
25	2.059016	157
26	0.017486	163.2
27	1.831694	-11.4
28	0.017486	-5
29	1.617486	-179.3
30	0.017486	-172.6
31	1.442623	13.2
32	0.017486	20
33	1.293989	-154.4
34	0.013115	-147.6
35	1.162842	38
36	0.013115	44.8
37	1.053552	-129.5
38	0.013115	-122.5
39	0.970492	63.4
40	0.013115	70.6

مراجع

- [1] D. K. Cheng, (1917), "**Field and Wave Electromagnetics**", Pearson Education, pp 110-116
- [2] M. A. Copeland and G. R. Slemon, (1963), "An Analysis of the Hysteresis Motor I", **AIEE**.
- [3] Teare (1940), "Theory of Hysteresis-Motor Torque", **AIEE TRANSACTIONS**, vol. 59.
- [4] H. C. Roters, (1947), "The Hysteresis Motor-Advances Which Permit Economical Fractional Horsepower Ratings", **AIEE TRANSACTIONS**, pp. 1419-1430
- [5] D. O'Kelly, (1970), "Steady-state power/rotor-angle characteristics for synchronous machine including hysteresis," **IEE**, vol. 117.
- [6] G. Wakui, (1978), "Hysteresis Motor with Reaction Torque and Its Analysis", **Electrical Engineering in Japan**, vol. 98.
- [7] D. O'Kelly, (1996), "Computation of hysteresis motor performance including negative sequence excitation", **IEE proc**, vol. 143, pp. 157-164.
- [8] L. U. Anih and E. S. Obe, (2011), "Analytic synthesis of a hysteresis motor", **Energy Conversion and Management**, pp. 391-396.
- [9] S. Miyairi and T. Kataoka, (1965), "A Basic Equivalent Circuit of the Hysteresis Motor", **IEE Japan**, pp. 41-50.
- [10] T. Kataoka and T. Ishikawa, (1982), "Analysis of a Hysteresis Motor with Overexcitation", **IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS**.
- [11] S. Robertson and S. Zaky, (1969), "Analysis of the Hysteresis Machine-Part I", **IEEE TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS**, pp. 474-483.
- [12] T. Horii, N. Yuge and G. Wakui, (1994), "Analysis of a Hysteresis Motor on Asynchronous Speed Using Complex Permeability", **IEEE TRANSLATION JOURNAL ON MAGNETICS IN JAPAN**, vol. 9, pp. 135-142.

- [13] T. Ishikawa and T. Kataoka, (1981), "Basic Analysis of Disc-Type Hysteresis Motors", **Electrical Engineering in Japan**, vol. 101B, pp. 659-666.
- [14] H. Hamalainen, J. Pyrhonen and J. Puranen, (2009), "Minimizing Skin Effect in Random Wound High Speed Machine Stator", **IEEE**, pp. 752-757.
- [۱۵] صادقی. ح. ز. م. (۱۳۸۹)، "پایان نامه کارشناسی ارشد به راهنمایی احمد دارابی: "بهینه سازی ماشینهای پسماند تخت چند طبقه، طراحی و شبیه سازی"، دانشکده برق و رباتیک، دانشگاه شاهرود.
- [16] B. S. K and I. M. E, (2007), "Electrical and Magnetic Properties of D6ac Steel", **Maritime Platforms Division**, Australia.
- [17] G. Wakui, I. Ohashi and K. Kurihara, (1983), "Automatic Operation of Hysteresis Motor with Short Duration Overexcitation", **Electrical Engineering in Japan**, vol. 103B, pp. 837-843.
- [18] G. Wakui and S. Nishino, (1981), "Performance of Hysteresis Motor after Short-Duration Overexcitation (Underexcitation) and Its Analysis", **Electrical Engineering in Japan**, vol. 101.
- [19] T. Ishikawa and T. Kataoka, (1991), "V Curve of Hysteresis Motor", **IEE PROCEEDING**, vol. 138, pp. 137-141.
- [20] D. O'Kelly, (1978), "Hysteresis motor with overexcitation and solid-state control," **IEE**, vol. 125.
- [21] D. Repas, (1973), "Digital-Computer Program for Design-Analysis of Salient Wound Pole Alternator", **NASA Technical Note**.

Abstract

Hysteresis motors have been used in special applications for decades. Hysteresis motor has many advantages such as self-starting, constant torque, low noise and vibration, low start up current and robust construction. Although these benefits make hysteresis motor very convenient to use, the motor has its own problems including relatively low power factor and efficiency. Industries, that use hysteresis motors greatly, have to install huge capacitive bank due to low power factor. Applying this solution is so expensive and it does not improve low efficiency. In other solutions, it is required to modify the motor structure. Overexcitation can improve power factor and efficiency of the motor without any changes in the motor structure. During the overexcitation, the input voltage of a hysteresis motor is increased from its steady state value V_i to nV_i continuously, and then is reduced again to V_i .

This paper investigates the effects of various scenarios of the input voltage variations on the performance of a hysteresis motor including normal and special kinds of overexcitation. A simulation algorithm is presented for performance prediction of the motor. This algorithm gives the relations between circumferential components of magnetic field intensity and magnetic flux density around the hysteresis disk of motor as elliptical loops. By having these loops, parameters of the motor equivalent circuit are computed and the motor performance is evaluated for each operation condition. It is also discussed that how overexcitation can make considerable improvement in the hysteresis motor characteristics.

Keywords: elliptical hysteresis loops, hysteresis motor, modeling, overexcitation, voltage changes



Shahrood University

Faculty Electrical Engineering and Robotics

**Modelling and an Investigation on short Over-Excitation of a
Multi-phase Hysteresis Motor**

By:

Hosein Ajam Ekrami

Supervisor:

Dr. Ahmad Darabi

Submitted in partial fulfillment of the
Requirements for the Degree of
Master of Science in Electrical Engineering

February 2015