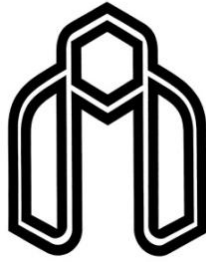


صلى الله عليه وسلم



دانشگاه شاهرود

دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه قدرت

عنوان پایان نامه ارشد

مدلسازی و بررسی عملکرد دینامیکی-گذرایبی موتور هیستریزیس

در بارهای هارمونیکی

دانشجو: علی فاتح

استاد راهنما:

دکتر احمد دارابی

پایان نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۹۳

دانشگاه شاهرود

دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه قدرت

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای **علی فاتح** به شماره دانشجویی ۹۱۰۵۴۴۴

تحت عنوان:

مدلسازی و بررسی عملکرد دینامیکی- گذرای موتور هیستریزیس در بارهای هارمونیکی

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد

مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	استاد مشاور	امضاء	استاد راهنما

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور

تقدیم به

آنهایی که رفتند تا بمانند و نماندند تا بمیرند!

آنانکه پلاکشان را از گردن خویش درآوردند تا مانند مادرشان گمنام و بی

مزار بمانند...

این مجموعه را به تمامی شهدای گمنام خصوصا دو تن از شهدای گمنام

مدفون در دانشگاه شاهرود تقدیم می‌کنم.

تشکر و قدردانی

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

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم همسری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پر بار وجودش بیاسایم و در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. به پاس تعبیر عظیم و انسانیش از کلمه ایثار و از خود گذشتگی، به پاس عاطفه سرشار و گرمای امیدبخش وجودش که در این سردترین روزگاران بهترین پشتیبان است، به پاس قلب بزرگش که فریادرس است و سرگردانی و ترس در پناهش به شجاعت می‌گراید و به پاس محبت‌های بی‌دریغش که هرگز فروکش نمی‌کند خدای را شاکرم.

خدای را شاکرم که پدر و مادری مهربان به من عطا نموده است؛ پدر و مادری که بودنشان تاج افتخاری است بر سرم و نامشان دلیلی است بر بودنم. آموزگارانی که برایم زندگی و انسانیت را معنا کردند.

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

در این مدت از همنشینی دوستانی بهره‌مند شدم که کمک‌های بی‌حصرشان راهگشای بسیاری از مشکلات بود. با سپاس فراوان از آقایان مهندس خوش‌آبادی، مهندس سلیمانی، مهندس تورانی، مهندس فاتح، مهندس ابراهیمیان، مهندس عجم‌اکرامی، مهندس نیکخو، مهندس ناطقی، مهندس عامری، دکتر عامریون، دکتر رحیمیان، مهندس اکبرپور و دیگر دوستانی که مرا یاری نمودند.

تعهد نامه

اینجانب علی فاتح دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق-قدرت دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدلسازی و بررسی عملکرد دینامیکی-گذرای موتور هیستریزیس در بارهای هارمونیک تحت راهنمایی دکتر احمد دارابی متعهد می شوم.

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

موتورهای هیستریزیس، موتورهای سنکرون خود راه‌اندازی هستند که بر اساس خصوصیات پسماند مواد مغناطیسی عمل می‌کنند. بر اساس مراجع چاپ شده در دسترس، هنوز سوالات زیادی در رابطه با این موتورها وجود دارد که به آن‌ها پاسخ داده نشده است و یا پاسخ‌ها کامل و همه‌جانبه نمی‌باشند. از جمله این سوالات می‌توان به اثر بارهای جزئی و هارمونیک بر روی موتور، پایین بودن ضریب توان و بازده اشاره کرد. برای مطالعه و بررسی عملکرد موتور هیستریزیس و دستیابی به مشخصه‌های آن، نیاز به مدلی مناسب و جامع از موتور وجود دارد. این پایان‌نامه به مدل‌سازی و بررسی عملکرد دینامیکی گذرای موتور هیستریزیس می‌پردازد. مدل ارائه شده در این پایان‌نامه رفتار موتور را در همه شرایط عملکردی مانند رژیم راه‌اندازی و شتابگری، عملکرد حالت دائمی و عملکرد دینامیکی گذرای حاصل از تغییرات بار و تغذیه ورودی به‌طور قابل قبولی توصیف می‌نماید. در این پایان‌نامه ابتدا معادلات دینامیکی گذرای و همچنین مدار معادل موتور هیستریزیس استخراج شده و سپس الگوریتم و نحوه به‌روزرسانی پارامترهای مدار معادل ارائه می‌شود. با انتخاب موتور هیستریزیس دیسکی مرجع [۷] به‌عنوان موتور مورد مطالعه، معادلات دینامیکی گذرای پیشنهادی شبیه‌سازی شده و نتیجه‌های حاصل با نتیجه‌های مرجع [۷] مقایسه می‌شود. این مقایسه، تطابق خوب این نتیجه‌ها را باهم نشان می‌دهد. در نهایت اثرات مطلوب کاهش ولتاژ ورودی موتور بر بهبود ضریب توان، بازده و جریان استاتور موتور هیستریزیس در شرایط بار جزئی و همچنین اثرات نامطلوب بارهای هارمونیک بر روی عملکرد موتور بررسی خواهد شد.

کلمات کلیدی: موتور هیستریزیس، مدل‌سازی، پارامترهای متغیر، مدار معادل، حلقه هیستریزیس،

زاویه تأخیر

فهرست مطالب

فصل اول مقدمه	۱
۱-۱ انگیزه‌های تحقیق	۲
۲-۱ اهداف تحقیق	۲
۳-۱ نوآوری‌های تحقیق	۳
۴-۱ ساختار پایان‌نامه	۳
فصل دوم کلیاتی راجع به موتورهای هیستریزیس	۵
۱-۲ مقدمه	۶
۲-۲ معرفی پدیده هیستریزیس	۶
۳-۲ مواد مغناطیس دائم	۱۰
۴-۲ مواد مغناطیس دائم مورد استفاده در موتورهای هیستریزیس	۱۱
۵-۲ معرفی موتور هیستریزیس	۱۳
۶-۲ انواع موتورهای هیستریزیس	۱۳
۷-۲ مزایا و معایب موتورهای هیستریزیس	۱۵
۸-۲ مشخصه مغناطیسی ماده هیستریزیس روتور	۱۶
۹-۲ مکانیزم تولید گشتاور در موتورهای هیستریزیس	۱۹
۱۰-۲ معرفی بار حداکثر و بار جزئی در موتورهای هیستریزیس	۲۲
۱۱-۲ مروری بر کارهای دیگران در زمینه مدار معادل موتورهای هیستریزیس	۲۲
۱-۱۱-۲ کاربرهای موتور هیستریزیس	۲۴

۲۴	..... ژيروسکوپ ۱-۱-۱۱-۲
۲۴	..... سانتریفیوژ ۲-۱-۱۱-۲
۲۵	..... ضبط کننده‌های ویدئویی ۳-۱-۱۱-۲
۲۵	..... شتاب‌دهنده توربوشارژرها ۴-۱-۱۱-۲
۲۶	..... زمانسنج‌ها ۵-۱-۱۱-۲
۲۶	..... خودرو برقی ۶-۱-۱۱-۲
۲۷	..... فصل سوم مدل‌سازی عملکرد دینامیکی گذرای موتور هیستریزس
۲۸	..... ۱-۳ مقدمه
۲۸	..... ۲-۳ معادلات دینامیکی گذرای و مدل مداری
۲۸	..... ۱-۲-۳ معادله‌های ولتاژ
۲۸	..... ۱-۱-۲-۳ معادله‌های ولتاژ در متغیرهای ماشین
۳۲	..... ۲-۱-۲-۳ معادله‌های تبدیل برای مدارهای روتور و استاتور- دستگاه مرجع اختیاری
۳۳	..... ۳-۱-۲-۳ معادله‌های ولتاژ در متغیرهای دستگاه مرجع اختیاری
۳۷	..... ۲-۲-۳ معادله گشتاور الکترومغناطیسی موتور
۴۰	..... ۳-۲-۳ معادله سرعت روتور
۴۱	..... ۴-۲-۳ معادله زاویه تاخیر α
	..... فصل چهارم محاسبه حلقه هیستریزس زمان شتاب‌گیری و پارامترهای مدار معادل در
۴۵	..... لحظه ورود به سنکرون
۴۶	..... ۱-۴ مقدمه

۴-۲	الگوریتم محاسبه حلقه هیستریزیس لحظات راه‌اندازی	۴۶
۴-۳	تغییرات عناصر مدار معادل در اثر تغییرات ولتاژ	۵۱
	فصل پنجم نتایج شبیه‌سازی موتور هیستریزیس تخت نمونه	۵۳
۵-۱	مقدمه	۵۴
۵-۲	نحوه شبیه‌سازی موتور مرجع [۷] توسط معادلات دینامیکی گذرای پیشنهادی	۵۵
۵-۳	مقایسه نتایج حاصل از معادلات دینامیکی گذرای پیشنهادی با نتایج مرجع [۷]	۵۸
۵-۴	اثرات کاهش ولتاژ تغذیه موتور هیستریزیس در بارهای جزئی	۶۲
۵-۵	اثرات بارهای هارمونیکی و تغییرات آنی بار بر مشخصات عملکردی موتور هیستریزیس	۶۶
	فصل ششم نتیجه‌گیری و ارزیابی پیشنهادات	۷۳
۶-۱	جمع‌بندی و نتیجه‌گیری	۷۴
۶-۲	پیشنهادات	۷۵
	پیوست	۷۷
	مراجع	۸۵

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ مراحل شبیه‌سازی موتور هیستریزیس نمونه ۴
- شکل ۱-۲ حلقه هیستریزیس، تغییرات چگالی شار برحسب شدت میدان مغناطیسی ۷
- شکل ۲-۲ هسته و سیم‌پیچ حامل جریان [۱] ۷
- شکل ۳-۲ منحنی شدت میدان و چگالی شار مغناطیسی در یک ماده مغناطیسی ۸
- شکل ۴-۲ اختلاف فاز شدت میدان مغناطیسی و مؤلفه اصلی چگالی شار در یک ماده مغناطیسی ۸
- شکل ۵-۲ منحنی مغناطیس‌شوندگی برای مواد دیامغناطیس، پارامغناطیس و فرومغناطیس [۳] .. ۱۰
- شکل ۶-۲ الف) منحنی هیستریزیس مواد مغناطیسی نرم ب) منحنی هیستریزیس مواد مغناطیسی سخت [۱] ۱۱
- شکل ۷-۲ منحنی هیستریزیس با حلقه‌های جزئی [۳] ۱۲
- شکل ۸-۲ موتور هیستریزیس استوانه‌ای الف: شار محیطی ب: شار شعاعی [۳] ۱۴
- شکل ۹-۲ هسته روتور و استاتور موتور هیستریزیس نوع تخت ۱۵
- شکل ۱۰-۲ موتور هیستریزیس نوع تخت ۱۵
- شکل ۱۱-۲ حلقه‌های هیستریزیس اندازه‌گیری شده برای ماده مغناطیسی مورد استفاده در روتور .. ۱۷
- شکل ۱۲-۲ مساحت حلقه هیستریزیس برحسب دامنه شدت میدان مغناطیسی ۱۷
- شکل ۱۳-۲ تغییرات a_1 برحسب دامنه شدت میدان مغناطیسی ۱۸
- شکل ۱۴-۲ ایجاد گشتاور در موتور هیستریزیس [۴] ۲۰
- شکل ۱۵-۲ باریک شدن حلقه B-H در هنگام ورود به حالت سنکرون [۱۱] ۲۱
- شکل ۱۶-۲ مشخصه گشتاور-سرعت موتور هیستریزیس [۴] ۲۲

- شکل ۱-۳ موتور هیستریزیس استوانه‌ای ۲۹
- شکل ۲-۳ مدار معادل موتور هیستریزیس سه فاز در مختصات $qd0$ در دستگاه مرجع اختیاری ۳۶
- شکل ۳-۳ مدار معادل بر فاز موتور هیستریزیس [۱۶] ۳۸
- شکل ۱-۴ مدار معادل الکتریکی بر فاز موتور هیستریزیس [۱۶] ۴۷
- شکل ۲-۴ ساختار استاتور، روتور و شیار استاتور موتور هیستریزیس تخت مرجع [۷] ۴۷
- شکل ۳-۴ الگوریتم محاسبه حلقه هیستریزیس لحظات راه‌اندازی [۷] ۴۹
- شکل ۴-۴ حلقه کاری هیستریزیس لحظات راه‌اندازی موتور هیستریزیس مورد مطالعه ۵۰
- شکل ۵-۴ تغییرات پارامترهای مدار معادل برحسب مقدار مؤثر ولتاژ فاز ورودی ۵۱
- شکل ۶-۴ مقایسه حلقه‌های هیستریزیس لحظات شتاب‌گیری در ولتاژهای مؤثر ۱۹۰ و ۲۰۰ ولت ۵۲
- شکل ۱-۵ تغییرات حلقه‌های هیستریزیس تنها در مقدار زاویه تاخیر α می‌باشد و بیشینه چگالی شار و شدت میدان حلقه‌ها باهم برابر می‌باشند ۵۸
- شکل ۲-۵ نمودار سرعت در شرایط ولتاژ و بار نامی ۶۰
- شکل ۳-۵ پدیده هانتینگ در شرایط ولتاژ و بار نامی ۶۰
- شکل ۴-۵ زاویه تاخیر موتور هیستریزیس در شرایط ولتاژ و بار نامی ۶۰
- شکل ۵-۵ حلقه‌های هیستریزیس لحظات راه‌اندازی و حالت دایمی موتور نمونه در مقادیر نامی ۶۱
- شکل ۶-۵ توان خروجی موتور در شرایط ولتاژ و بار نامی ۶۱
- شکل ۷-۵ گشتاور الکترومغناطیسی موتور در شرایط ولتاژ و بار نامی ۶۱
- شکل ۸-۵ جریان مؤثر استاتور در شرایط ولتاژ و بار نامی ۶۲
- شکل ۹-۵ نتایج ارایه شده در مرجع [۷] ۶۲

شکل ۵-۱۰ سرعت موتور a: $V=200v$ و $P_{out}=180W$ و b: $V=150v$ و $P_{out}=180W$ ۶۴

شکل ۵-۱۱ دامنه نوسانات پدیده هانتینگ a: $V=200v$ و $P_{out}=180W$ و b: $V=150v$ و $P_{out}=180W$ ۶۴

شکل ۵-۱۲ زاویه تاخیر موتور a: $V=200v$ و $P_{out}=180W$ و b: $V=150v$ و $P_{out}=180W$ ۶۴

شکل ۵-۱۳ گشتاور الکترومغناطیسی a: $V=200v$ و $P_{out}=180W$ و b: $V=150v$ و $P_{out}=180W$ ۶۵

شکل ۵-۱۴ دیاگرام برداری مدار معادل شکل ۴-۱ ۶۶

شکل ۵-۱۵ نمودار سرعت a: $V=150v$ و $P_{out}=180W$ و b: $V_{syn}=200v$ ، $V_{sys}=150v$ ۶۶

شکل ۵-۱۶ نمودار سرعت در بار هارمونیک با فرکانس ۵ هرتز و دامنه ۰/۰۱ نیوتن متر ۶۷

شکل ۵-۱۷ پدیده هانتینگ در بار هارمونیک با فرکانس ۵ هرتز و دامنه ۰/۰۱ نیوتن متر ۶۷

شکل ۵-۱۸ توان خروجی در بار هارمونیک با فرکانس ۵ هرتز و دامنه ۰/۰۱ نیوتن متر ۶۸

شکل ۵-۱۹ توان خروجی در بار هارمونیک با فرکانس ۵ هرتز و دامنه ۰/۰۱ نیوتن متر ۶۸

شکل ۵-۲۰ گشتاور موتور در بار هارمونیک با فرکانس ۵ هرتز و دامنه ۰/۰۱ نیوتن متر ۶۸

شکل ۵-۲۱ زاویه تاخیر در بار هارمونیک با فرکانس ۵ هرتز و دامنه ۰/۰۱ نیوتن متر ۶۸

شکل ۵-۲۲ بزرگ‌نمایی زاویه تاخیر در بار هارمونیک با فرکانس ۵ هرتز و دامنه ۰/۰۱ نیوتن متر ۶۹

شکل ۵-۲۳ جریان مؤثر استاتور در بار هارمونیک با فرکانس ۵ هرتز و دامنه ۰/۰۱ نیوتن متر ۶۹

شکل ۵-۲۴ بزرگ‌نمایی جریان در بار هارمونیک با فرکانس ۵ هرتز و دامنه ۰/۰۱ نیوتن متر ۶۹

شکل ۵-۲۵ نمودار سرعت در شرایط بار هارمونیک و تغییر آنی بار در زمان ۳۰۰ ثانیه ۷۰

شکل ۵-۲۶ بزرگ‌نمایی سرعت در شرایط بار هارمونیک و تغییر آنی بار در زمان ۳۰۰ ثانیه ۷۰

شکل ۵-۲۷ زاویه تاخیر در شرایط بار هارمونیکی و تغییر آنی بار در زمان ۳۰۰ ثانیه ۷۱

شکل ۵-۲۸ گشتاور الکترومغناطیسی در شرایط بار هارمونیکی و تغییر آنی بار در زمان ۳۰۰ ثانیه. ۷۱

شکل ۵-۲۹ جریان مؤثر استاتور در شرایط بار هارمونیکی و تغییر آنی بار در زمان ۳۰۰ ثانیه ۷۱

شکل (الف-۱) K_b برحسب تعداد شیارهای بر قطب [۷] ۸۰

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۴ پارامترهای موتور هیستریزیس مرجع [۷]..... ۴۷
- جدول ۲-۴ خروجی الگوریتم شکل ۳-۴..... ۵۰
- جدول ۳-۴ مقایسه حلقه‌های هیستریزیس کاری و مقادیر پارامترهای مدار معادل موتور هیستریزیس در هنگام شتاب‌گیری در ولتاژهای مؤثر ۱۹۰ و ۲۰۰ ولت..... ۵۲
- جدول ۱-۵ مقادیر حالت دائمی موتور هیستریزیس نمونه در شرایط نامی، ولتاژ نامی و بار جزئی، ولتاژ کاهش یافته و بار جزئی..... ۶۵
- جدول (الف-۱) ثابت توزیع برحسب پریونیت گام سیم‌پیچی‌های استاتور [۷]..... ۷۹

فهرست علائم و اختصارات

میانگین پرتاب کوئل	ACT
محور سیم‌پیچی فاز b استاتور	Ar
محور سیم‌پیچی فاز a استاتور	As
دامنه هارمونیک اصلی چگالی شار	B _q
چگالی شار پسماند	B _r
راستای شار میدان رتور	B _R
راستای شار میدان استاتور	B _S
تعداد هادی‌های هر شیار استاتور	CSL
قطر سیم سیم‌پیچی استاتور	d
عمق دهانه شیار استاتور	d ₁₀
طول محوری بخش دوزنقه‌ای شکل شیار استاتور	d ₁₁
طول بخش مستطیلی شکل شیار استاتور	d ₁₄
ارتفاع یوغ استاتور	d _y
مساحت حلقه پسماند	E _h
فرکانس تغذیه	f
فاصله هوایی محوری	g
نیروی مغناطیس زدا	H _c
دامنه شدت میدان مغناطیسی	H _p
جریان رتور در دستگاه dq	I _{dr} , I _{qr}
جریان استاتور در دستگاه dq	I _{ds} , I _{qs}

ممان اینرسی کل	J
گام پریونیت سیم پیچی استاتور	K_{pp}
اندوکتانس پراکندگی روتور	L_{lr}
اندوکتانس پراکندگی استاتور	L_{ls}
اندوکتانس مغناطیس کننده استاتور روتور	L_{mr}
اندوکتانس مغناطیس کننده استاتور	L_{ms}
تعداد فازها	m
تعداد دور معادل سیم پیچی استاتور و روتور	N
تعداد قطب های استاتور	P
تعداد زوج قطب های استاتور	p
مقاومت هسته استاتور	R_c
مقاومت هیستریزیس رتور	R_h
شعاع داخلی استاتور و روتور	R_i
شعاع خارجی استاتور و روتور	R_o
مقاومت استاتور	R_s
تعداد شیارهای استاتور	S
متوسط کمان یک شیار استاتور	t
ترانهاده ماتریس	T
ضخامت دیسک روتور	t_r
ولتاژ رتور در دستگاه dq	V_{dr}, V_{qr}
ولتاژ استاتور در دستگاه dq	V_{ds}, V_{qs}
ولتاژ موثر تغذیه	V_{p-rms}

عرض مستطیل شکل شیپار استاتور	W_{10}
دهانه شیپار استاتور	W_{11}
راکتانس نشتی روتور	X_{hr}
راکتانس نشتی استاتور	X_{ls}
راکتانس مغناطیس کننده	X_m
زاویه تاخیر هیستریزیس	α
زاویه تاخیر حلقه هیستریزیس لحظات شتابگیری	α_{max}
موقعیت زاویه‌ای رتور	θ
فرکانس زاویه‌ای الکتریکی میدان گردان استاتور	ω_b
سرعت زاویه‌ای الکتریکی روتور	ω_{re}
سرعت زاویه‌ای مکانیکی رتور	ω_{rm}

فصل اول

مقدمه

۱-۱ انگیزه‌های تحقیق

موتورهای هیستریزیس نوعی از موتورهای سنکرون بدون جاروبک هستند که در توان‌های کسری از اسب بخار کاربرد زیادی یافته‌اند. امروزه با توسعه علم مربوط به مواد مغناطیسی دایم و مناسب شدن قیمت تمام شده آن‌ها، موتورهای هیستریزیس کاربردهای بیشتری پیدا کرده است. خصوصیات برجسته موتورهای هیستریزیس باعث شده تا این موتورها در کاربردهای سرعت بالا نظیر سانتریفوژها و ژيروسکوپها بسیار مورد استفاده قرار بگیرد. استفاده ویژه این موتورها در صنایع دفاعی و هسته‌ای، محرمانه بودن کاربردها و تکنولوژی‌های استراتژیک مربوط به آن و عدم صدور مجوز چاپ و انتشار خروجی تحقیقات، موجب عدم پاسخ‌گویی به سوالات زیادی راجع به این موتورها شده است. دستیابی به مدار معادلی جامع و کامل برای تمامی زمان‌ها می‌تواند پاسخی مناسب به اکثر سوالات باشد. مدار معادلی که رفتار دینامیکی گذرای موتور هیستریزیس را در تمامی شرایط عملکردی موتور چه ناشی از تغییرات ولتاژ (گذرای) و چه ناشی از تغییرات بار (دینامیکی) مدل‌سازی نماید. از جمله مشکلات گزارش شده از صنعت می‌توان به اثرات مخرب بارهای هارمونیک در موتورهای هیستریزیس اشاره نمود. جهت بررسی این اثرات مخرب، نیاز به مدلی مناسب و جامع از موتور وجود دارد. لذا در این پایان‌نامه تلاش خواهیم نمود تا معادلات دینامیکی گذرای و همچنین مدار معادلی کامل برای موتور هیستریزیس استخراج شود تا بتوانیم رفتار موتور را در شرایط مختلف مورد بررسی قرار دهیم.

۱-۲ اهداف تحقیق

مهمترین هدف این پایان‌نامه دستیابی به معادلات دینامیکی گذرای موتور هیستریزیس و همچنین مدل مداری برای این موتور می‌باشد. مدار معادلی که ضمن مدل‌سازی رفتار موتور هیستریزیس در شرایط کارکرد عادی، بتواند عملکرد این موتور را تحت شرایط خاص نیز بررسی نماید. شرایطی از جمله اثرات تغییرات ولتاژ تغذیه ورودی و بار خروجی بر روی عملکرد موتور، اثرات بارهای جزئی و هارمونیک و همچنین اثرات نوسانات پدیده هانتینگ بر روی عملکرد موتور هیستریزیس.

جهت بررسی رفتار موتور هیستریزیس در تمامی زمان‌ها، باید پارامترهای مدار معادل لحظه به لحظه به‌روز شوند؛ لذا با استفاده از فرضیات و معادلات بخصوصی این کار انجام خواهد شد. همچنین نیاز است تا در صورت تغییرات بار و یا ولتاژ ورودی، حلقه هیستریزیس به حلقه کاری جدید تغییر پیدا کند. الگوریتم معرفی شده در یکی از مراجع توانایی محاسبه حلقه هیستریزیس کاری موتور را در تمامی شرایط خواهد داشت. این الگوریتم در این پایان‌نامه معرفی و مورد استفاده قرار خواهد گرفت.

۳-۱ نوآوری‌های تحقیق

مطالعات انجام شده با موضوع موتورهای هیستریزیس برخلاف موتورهای الکتریکی دیگر بسیار محدود می‌باشد و سوالات زیادی در رابطه با این موتورها هنوز پاسخ داده نشده است. اثرات بارهای جزئی و هارمونیک بر روی موتورهای هیستریزیس از جمله این سوالات می‌باشد. مدارهای معادل و معادلات دینامیکی گذرای معرفی شده تنها توانایی مدل‌سازی بار حداکثر را دارند و اثرات بارهای جزئی و هارمونیک قابل بررسی و مدل‌سازی نمی‌باشد. در این پایان‌نامه

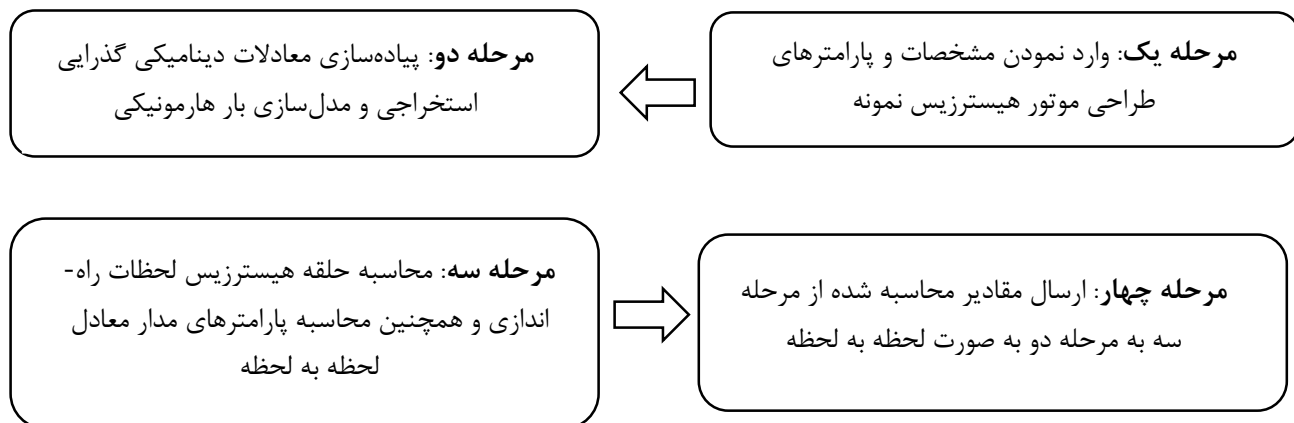
۱. معادلات دینامیکی گذرای جامع و کامل و همچنین مدل مداری موتور هیستریزیس استخراج می‌شود.

۲. با استفاده از مدل مداری پیشنهادی، بارهای جزئی و هارمونیک در موتورهای هیستریزیس مدل‌سازی شده و اثرات بارهای جزئی و هارمونیک و همچنین اثرات مطلوب کاهش ولتاژ در بارهای جزئی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۴-۱ ساختار پایان‌نامه

در فصل دوم این پایان‌نامه به معرفی مختصری راجع به موتورهای هیستریزیس می‌پردازیم. از جمله این مباحث می‌توان به معرفی پدیده پسماند، تقسیم‌بندی ساده موتورهای هیستریزیس، مکانیزم تولید گشتاور در موتورهای هیستریزیس، مروری بر کارهای صورت گرفته در زمینه مدار معادل این نوع موتورها، نحوه استفاده از مشخصه مغناطیسی ماده هیستریزیس روتور (حلقه‌های هیستریزیس) و تفاوت

بارهای جزئی و بار حداکثر اشاره نمود. در فصل سوم معادلات دینامیکی گذرای و همچنین مدار معادل موتور هیستریزیس را استخراج می‌کنیم و سپس در فصل چهارم الگوریتم محاسبه حلقه هیستریزیس لحظات راه‌اندازی و پارامترهای مدار معادل در لحظه ورود روتور به سرعت سنکرون و همچنین معرفی موتور هیستریزیس مورد مطالعه را ارائه می‌نماییم. در فصل پنجم معادلات دینامیکی گذرای پیشنهادی در محیط SIMULINK/MATLAB برای موتور مورد مطالعه پیاده‌سازی شده و نتیجه‌های حاصل از شبیه‌سازی را با نتیجه‌های مرجع [۷] مقایسه می‌کنیم. این مقایسه، تطابق خوب این نتیجه‌ها را باهم نشان داده و نوعی اعتبار سنجی برای معادلات پیشنهادی محسوب می‌شود. در نهایت اثرات کاهش ولتاژ ورودی موتور بر روی عملکرد موتور هیستریزیس در شرایط بار جزئی و همچنین اثرات نامطلوب بارهای هارمونیکی بررسی خواهد شد. مراحل شبیه‌سازی موتور هیستریزیس نمونه در نرم‌افزار متلب دارای مراحل نشان داده شده در شکل ۱-۱ می‌باشد.



شکل ۱-۱ مراحل شبیه‌سازی موتور هیستریزیس نمونه

پس از وارد نمودن پارامترهای طراحی ارایه شده در جدول ۱-۴ به نرم‌افزار متلب و همچنین پیاده‌سازی مدل مداری شکل ۲-۳، معادلات سرعت روتور، گشتاور، زاویه تاخیر و مدل بار هارمونیکی در محیط سیمولینک، توسط الگوریتم شکل ۳-۴ حلقه هیستریزیس لحظات راه‌اندازی و پارامترهای مدار معادل لحظه به لحظه محاسبه شده و این مقادیر به مدل مداری ارسال می‌شود.

فصل دوم

کلیاتی راجع به موتورهای هیستریزیس

۱-۲ مقدمه

به دلیل اینکه اساس کار موتورهای هیستریزیس^۱ بر خاصیت هیستریزیس مواد مغناطیسی^۲ متکی است، ابتدا پدیده هیستریزیس به صورت مختصر مورد بررسی قرار می‌گیرد. در ادامه دسته‌بندی مواد از لحاظ رفتار مغناطیسی انجام شده و توضیحاتی مختصر راجع به آن‌ها ارائه می‌گردد. همچنین مواد مغناطیسی مورد استفاده در موتورهای هیستریزیس معرفی می‌شوند. سپس به معرفی مختصر موتور هیستریزیس می‌پردازیم. در قسمت بعد موتورهای هیستریزیس را از نظر نحوه عبور شار در روتور تقسیم‌بندی می‌کنیم. مزایا و معایب موتورهای هیستریزیس را برشمرده و سپس راجع به مشخصه مغناطیسی ماده هیستریزیس روتور و نحوه تولید گشتاور در این موتورها و معرفی بار حداکثر و بار جزیی مطالبی بیان می‌نماییم. در پایان مروری بر کارهای انجام‌شده در زمینه مدار معادل موتورهای هیستریزیس و همچنین کاربرد این موتورها در صنعت مختصر توضیحاتی داده خواهد شد.

۲-۲ معرفی پدیده هیستریزیس

هنگامی که یک ماده مغناطیسی تحت تأثیر یک میدان مغناطیسی متناوب با فرکانس f قرار می‌گیرد، پدیده هیستریزیس به وجود می‌آید. این پدیده ناشی از ثابت زمانی است که حوزه‌های مغناطیسی فلز به خاطر جهت یافتن و یا جهت دادن به خود در اثر شدت میدان مغناطیسی^۳ بروز می‌دهند؛ به عبارت دیگر می‌توان گفت بین اعمال میدان مغناطیسی بر ماده و ظهور چگالی شار^۴، یک تاخیر فاز^۵ وجود دارد. شکل ۱-۲ تغییرات چگالی شار را بر حسب شدت میدان مغناطیسی نشان می‌دهد [۱]. در شکل ۱-۲ محل تقاطع منحنی با محور افقی، نیروی مغناطیس‌زدا^۶ نامیده شده و با H_c نشان داده می‌شود.

۱- Hysteresis motors

۲- Magnetic materials

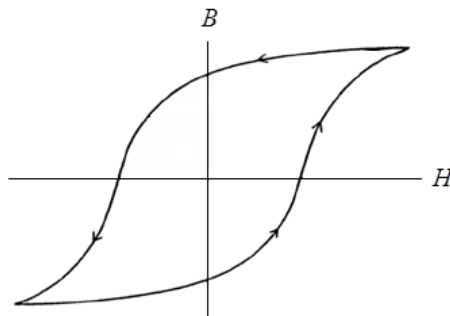
۳- Magnetic field intensity

۴- Flux density

۵- Delay angle

۶ - Coercive

همچنین محل تقاطع با محور عمودی، چگالی شار پسماند^۱ نامیده می‌شود که با B_r نشان می‌دهند.



شکل ۱-۲ حلقه هیستریزس، تغییرات چگالی شار بر حسب شدت میدان مغناطیسی

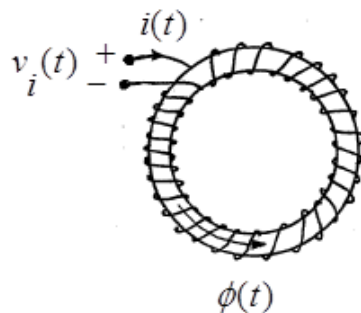
مدار شکل ۲-۲ را در نظر بگیرید. با اعمال یک ولتاژ سینوسی با فرکانس f ، جریان $i(t)$ در سیم پیچ جاری می‌گردد. با چشم‌پوشی از مقاومت سیم پیچ و اثر پراکندگی شار و با فرض اینکه جریان $i(t)$ در هسته، سینوسی با فرکانس f است داریم:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t) \quad (۱-۲)$$

$$\oint H \cdot dl = ni(t) \quad (۲-۲)$$

$$H(t) = H_m \sin(\omega t) = \frac{nI_m}{l} \sin(\omega t) \quad (۳-۲)$$

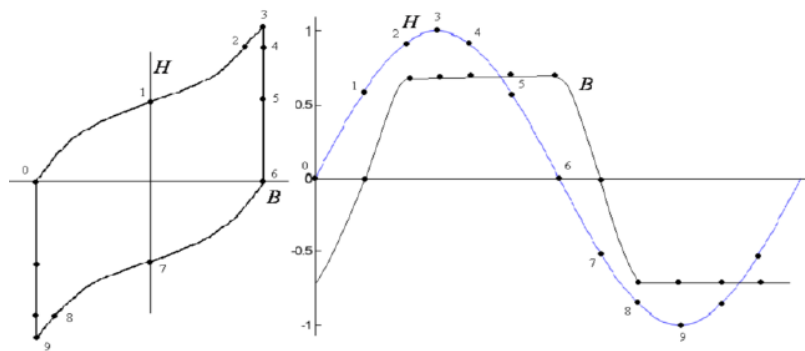
که n تعداد دور سیم پیچ و l طول مسیر مغناطیسی هسته می‌باشد.



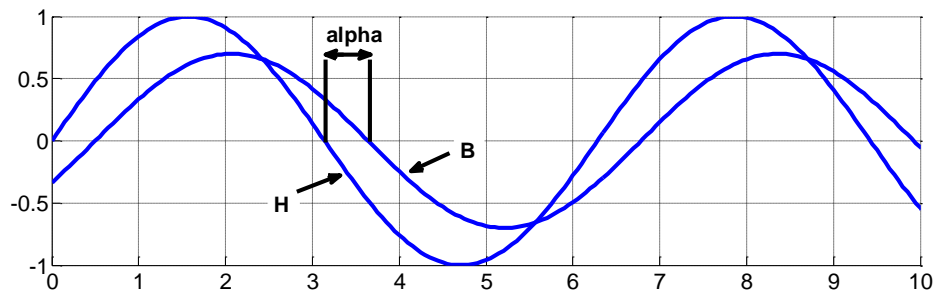
شکل ۲-۲ هسته و سیم پیچ حامل جریان [۱]

۱- Residual flux density

بنابراین $H(t)$ سینوسی و با جریان هم‌فاز می‌باشد. با فرض سینوسی بودن $H(t)$ و با در نظر گرفتن منحنی غیرخطی هیستریزیس می‌توان چگالی شار $B(t)$ را با روش نقطه‌یابی به دست آورد. چگالی شار برحسب زمان غیرخطی و متناوب می‌باشد. اگر سری فوریه $B(t)$ نوشته شود، فاقد هارمونیک‌های زوج بوده و مؤلفه اصلی چگالی شار با شدت میدان مغناطیسی به اندازه زاویه α اختلاف فاز دارد [۱]. در شکل ۳-۲ چگالی شار برحسب زمان با روش نقطه‌یابی به دست آمده است و اختلاف فاز شدت میدان مغناطیسی و مؤلفه اصلی چگالی شار در شکل ۴-۲ نشان داده شده است.



شکل ۳-۲ منحنی شدت میدان و چگالی شار مغناطیسی در یک ماده مغناطیسی [۲]



شکل ۴-۲ اختلاف فاز شدت میدان مغناطیسی و مؤلفه اصلی چگالی شار در یک ماده مغناطیسی

پس داریم:

$$B(t) = B_m \sin(\omega t - \alpha) \quad (۴-۲)$$

$$\phi(t) = SB_m \sin(\omega t - \alpha) \quad (۵-۲)$$

که $\Phi(t)$ شار هسته و S سطح مقطع هسته می‌باشد. ولتاژ القایی دو سر سیم‌پیچ برابر خواهد بود با:

$$v(t) = n \frac{d\phi}{dt} = 2n\pi f S B_m \cos(\omega t - \alpha) \quad (6-2)$$

با در نظر گرفتن مؤلفه‌های اصلی، توان ورودی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\bar{E} = \sqrt{2}\pi f n S B_m \angle 0 \quad (7-2)$$

$$\bar{I} = \frac{H_m l}{n\sqrt{2}} \angle (\alpha - \frac{\pi}{2}) \quad (8-2)$$

$$P = \bar{E}\bar{I} \cos(\varphi) = \pi f S B_m H_m l \cos(\frac{\pi}{2} - \alpha) \quad (9-2)$$

$$= \pi f B_m H_m \sin(\alpha) \times V$$

که در روابط بالا \bar{I} و \bar{E} به ترتیب فازور ولتاژ و جریان ورودی و $V=Sl$ حجم ماده مغناطیسی می‌باشد؛ بنابراین:

$$P = \left(\sqrt{2}\pi f B_m\right) \left(\frac{H_m \sin(\alpha)}{\sqrt{2}}\right) V \quad (10-2)$$

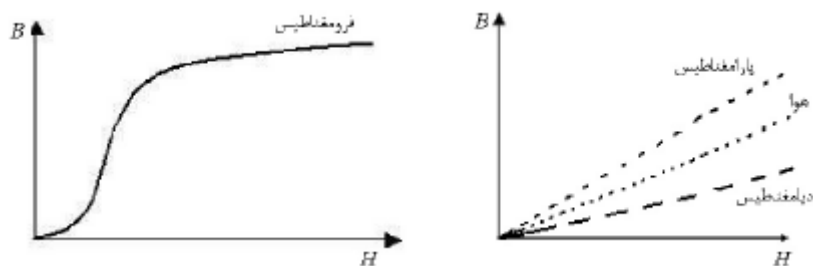
معادله (۱۰-۲) حاصل ضرب سه جمله می‌باشد که این جملات به ترتیب بیان گر «آمپر دور مؤثر در یک متر طول ماده مغناطیسی هم‌فاز با ولتاژ»، «ولتاژ مؤثر القا شده توسط شار در یک دور سیم‌پیچ در یک متر مربع ماده مغناطیسی» و «حجم ماده مغناطیسی» می‌باشند.

همچنین توان تلف شده به علت خاصیت هیستریزیس برابر است با:

$$P = V \int_0^B H \cdot dB = (\text{سطح حلقه هیستریزیس ماده}) (\text{حجم ماده هیستریزیس}) \quad (11-2)$$

۲-۳ مواد مغناطیسی دائم

مواد از لحاظ رفتار مغناطیسی به چهار دسته دیامغناطیس^۱، پارامغناطیس^۲، فرومغناطیس^۳ و آنتی مغناطیس^۴ تقسیم می‌شوند [۳]. با مشاهده شکل ۲-۵ و مقایسه شیب منحنی‌های مغناطیس‌شوندگی انواع مواد مغناطیسی با هوا درمی‌یابیم که شیب منحنی مغناطیس‌شوندگی مواد پارامغناطیس از هوا بیشتر است در حالی که در مواد دیامغناطیس این شیب از هوا کمتر است. در مورد مواد فرومغناطیس ابتدا شیب منحنی مغناطیس‌شوندگی زیاد و بعد از رسیدن به اشباع شیب منحنی مغناطیس‌شوندگی کم می‌شود.



شکل ۲-۵ منحنی مغناطیس‌شوندگی برای مواد دیامغناطیس، پارامغناطیس و فرومغناطیس [۳]

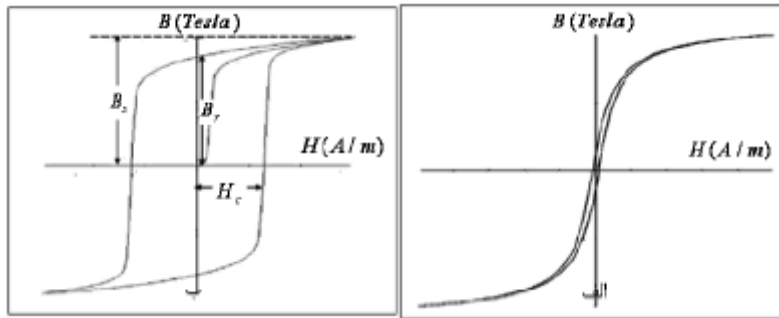
علاوه بر نفوذپذیری، وجود عوامل دیگری نظیر نیروی ضد مغناطیسی و چگالی شار پسماند باعث تفاوت مواد فرومغناطیس با مواد دیامغناطیس و پارامغناطیس می‌شوند. مواد فرومغناطیس را می‌توان با توجه به نیروی ضد مغناطیسی به دو دسته نرم و سخت تقسیم نمود. در مواد فرومغناطیس نرم نیروی مغناطیس‌زدا کم و چگالی شار پسماند در این مواد بسیار کوچک است اما مواد فرومغناطیس سخت نیروی مغناطیس‌زدای بزرگی دارند و چگالی شار پسماند در این مواد مقدار قابل ملاحظه‌ای است. شکل ۲-۶ منحنی‌های هیستریزیس برای مواد فرومغناطیس نرم و سخت را نشان می‌دهد.

۱ - Diamagnetic

۲ - Paramagnetic

۳ - Ferromagnetic

۴ - Anti-Ferromagnetic



شکل ۲-۶ الف) منحنی هیستریزیس مواد مغناطیسی نرم ب) منحنی هیستریزیس مواد مغناطیسی سخت [۱]

۴-۲ مواد مغناطیسی دائم مورد استفاده در موتورهای هیستریزیس

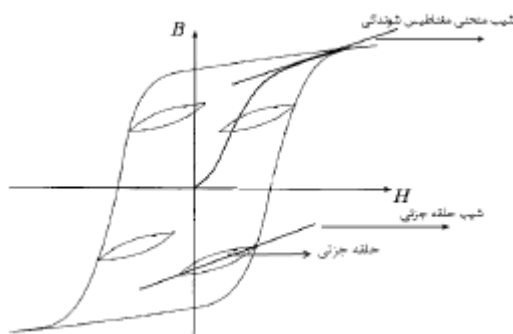
مشخصه عملکرد موتور هیستریزیس بسیار تحت تأثیر نوع ماده استفاده شده در روتور این موتورها می باشد. از مهم ترین مواد مغناطیسی دائم قابل استفاده در موتور هیستریزیس می توان آلیاژ آهن-کبالت ۳۶٪ (Fe-Co)، آلیاژ آهن کبالت وانادیم یا P6 با ترکیب (Fe-Co-V) را نام برد. مشخصه های مغناطیسی و جزییات چگونگی تولید برخی از این آلیاژها تا حدودی غیرقابل دسترس است [۱].

در انتخاب ماده روتور موتور هیستریزیس باید نکاتی را در نظر داشت که به طور خلاصه به آن ها اشاره می شود:

- ۱) توان خروجی موتور هیستریزیس متناسب با سطح حلقه هیستریزیس و حجم ماده استفاده شده در روتور است. پس هرچه سطح حلقه هیستریزیس ماده روتور بزرگ تر باشد، با یک حجم مشخص از ماده روتور می توان توان خروجی بالاتری داشت.
- ۲) راندمان بیشینه در موتور هیستریزیس به ازای یکی از حلقه های هیستریزیس اتفاق می افتد که به آن حلقه، حلقه نرمال می گویند. هرچه چگالی شار پسماند و نفوذپذیری مربوط به حلقه نرمال بالاتر باشد، جریان استاتور کمتر خواهد شد و بنابراین تلفات مسی پایین تر خواهد بود.
- ۳) هارمونیک های نیروی محرکه مغناطیسی در موتور هیستریزیس باعث ایجاد حلقه های جزیی^۱

۱- Minor Loops

می‌شوند و در نتیجه باعث ایجاد تلفات پارازیتیک^۱ خواهد شد. در هر حلقه، شیب حلقه‌های جزئی تقریباً برابر با شیب منحنی مغناطیس‌شوندگی ماده روتور در نقطه بیشینه حلقه است. شکل ۷-۲ حلقه‌های جزئی را در حلقه هیستریزس نشان می‌دهد. هرچه شیب حلقه‌های جزئی بیشتر باشد تلفات پارازیتیک کمتر است. پس می‌توان گفت هرچه شیب منحنی مغناطیس‌شوندگی در نقطه بیشینه حلقه نرمال ماده هیستریزس بیشتر باشد تلفات پارازیتیک کمتر خواهد بود. به همین دلیل یکی از پارامترهای مهم انتخاب ماده روتور، کمتر بودن شیب منحنی مغناطیس‌شوندگی در نقطه بیشینه حلقه‌های آن ماده است.



شکل ۷-۲ منحنی هیستریزس با حلقه‌های جزئی [۳]

(۴) در هنگام راه‌اندازی، گشتاور مربوط به جریان گردابی در موتور هیستریزس با گشتاور هیستریزس جمع می‌شود؛ بنابراین هرچه گشتاور مربوط به جریان گردابی بزرگ‌تر باشد گشتاور راه‌اندازی موتور بیشتر خواهد بود. گشتاور جریان گردابی در موتور هیستریزس، به سطح حلقه هیستریزس، مقاومت ویژه ماده هیستریزس و دیگر پارامترهای طراحی بستگی دارد. از این رو با انتخاب مناسب ماده هیستریزس روتور می‌توان گشتاور راه‌اندازی را بهبود بخشید.

برخی از آلیاژهای به‌کاررفته در مواد هیستریزس مانند کبالت در عناصر کمیاب و بسیار گران‌قیمت هستند؛ بنابراین با انتخاب ماده مناسب برای روتور موتور هیستریزس شاید لازم باشد قیمت تمام‌شده

^۱- Parasitic Losses

موتور را نیز لحاظ نمود.

۲-۵ معرفی موتور هیستریزیس

موتور هیستریزیس یک نمونه جالب بهره‌گیری سودمند از پدیده‌ای است که اغلب نامطلوب شمرده می‌شود. چنانچه از نامش پیداست، کارکردش به خاطر پدیده هیستریزیس می‌باشد. موتور هیستریزیس جز موتورهای سنکرون می‌باشد که به خودی خود راه می‌افتد. روتور چنین موتوری از ماده آهنی با خاصیت هیستریزیس زیاد ساخته می‌شود و شیار، سیم‌پیچ یا قطب برجسته ندارد. با اینکه روتور موتور هیستریزیس را می‌توان از یک استوانه آهنی یکپارچه ساخت اما بیشتر روتورها از هسته‌ای پوشیده از یک لایه ماده با خاصیت هیستریزیس تشکیل شده است. هسته روتور می‌تواند آهن موق یا یک ماده غیر مغناطیسی باشد. هسته آهنی توزیع شار در پوسته هیستریزیس را شعاعی و هسته غیر مغناطیسی توزیع شار را محیطی می‌کند [۴]. استاتور این موتور معمولاً دارای یک سیم‌پیچی توزیع شده سه فاز مشابه موتور القایی می‌باشد. میدان گردان استاتور سه فاز، یکنواخت‌تر از میدان گردان استاتور تک فاز است. اگر استاتور تک فاز باشد، باید یک خازن دائمی همراه با یک سیم‌پیچی کمکی به کار برده شود تا در حد ممکن میدان مغناطیسی همواری تولید کند. این کار تلفات موتور را به شدت کم می‌کند [۵].

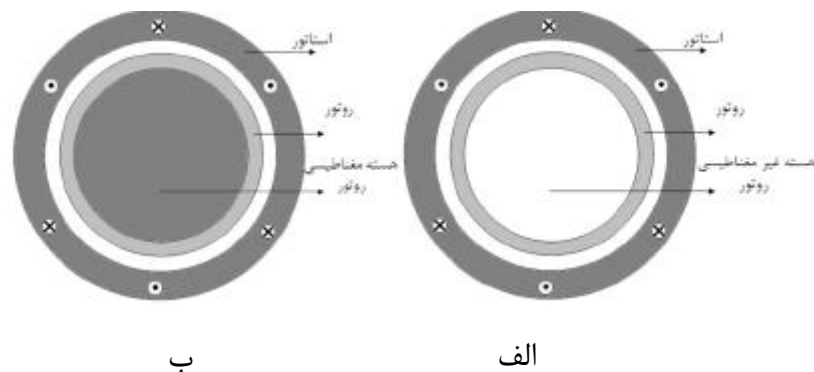
۲-۶ انواع موتورهای هیستریزیس

وجود کاربردهای متنوع و متفاوت برای موتور هیستریزیس باعث شده است که این موتور در ساختارهای متنوعی عرضه شود. هر کدام از این ساختارهای متفاوت به لحاظ عملکرد و ملاحظات طراحی، ویژگی‌های خاص خود را دارند که آن‌ها را برای استفاده در کاربردهای خاص مناسب می‌کند. به طور کلی می‌توان موتورهای هیستریزیس را در دو نوع استوانه‌ای^۱ و تخت^۲ تقسیم‌بندی نمود [۶]. روتور موتور هیستریزیس استوانه‌ای دارای یک حلقه استوانه‌ای شکل از ماده هیستریزیس می‌باشد که

1 - Cylindrical Hysteresis Motor
2 - Disk type Hysteresis Motor

هسته روتور می‌تواند از یک ماده غیر مغناطیسی (موتور هیستریزیس شار محیطی^۱) و یا یک ماده فرومغناطیس نرم (موتور هیستریزیس شار شعاعی^۲) ساخته شده باشد. استاتور این نوع موتور همانند استاتورهای موتورهای القایی می‌باشد. در واقع این نوع موتور ساده‌ترین و معمول‌ترین ساختاری است که می‌توان برای موتورهای هیستریزیس معرفی نمود.

موتور هیستریزیس نوع تخت دارای استاتوری به صورت تخت است و روتور آن یک دیسک یکپارچه از جنس ماده هیستریزیس می‌باشد (شکل ۲-۹). در صورتی که روی روتور یک نگه‌دارنده از جنس ماده فرومغناطیس قرار داشته باشد، شار عبوری از روتور محوری خواهد بود. در این حالت موتور هیستریزیس تخت از نوع شار محوری^۳ خواهد بود و در صورتی که نگه‌دارنده وجود نداشته باشد و یا از یک ماده غیر مغناطیسی ساخته شده باشد، شار عبوری از روتور محیطی است. در این صورت موتور هیستریزیس تخت را شار محیطی^۴ می‌نامند.



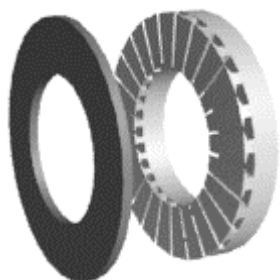
شکل ۲-۸ موتور هیستریزیس استوانه‌ای الف: شار محیطی ب: شار شعاعی [۳]

3- Circumferential Flux Cylindrical Hysteresis Motor

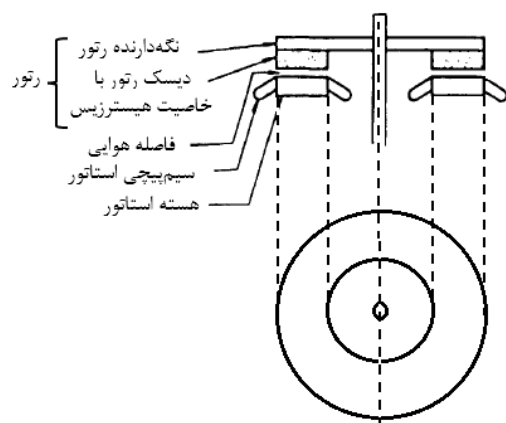
۲- Radial Flux Cylindrical Hysteresis Motor

4 - Axial-field Hysteresis Motor

5- Circumferential-field Hysteresis Motor



شکل ۹-۲ هسته روتور و استاتور موتور هیستریزیس نوع تخت [۷]



شکل ۱۰-۲ موتور هیستریزیس نوع تخت [۸]

۷-۲ مزایا و معایب موتورهای هیستریزیس

خصوصیات ذاتی ویژه موتورهای هیستریزیس باعث شده است مطالعات بر روی آنها و نیز

کاربردهایشان افزایش یابد. از مهم‌ترین مزایای این موتورها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۶]:

- ایجاد گشتاور ثابت
- دارا بودن مشخصه گشتاور-سرعت مسطح
- جریان راه‌اندازی پایین و ثابت
- عملکرد بسیار نرم و بدون لرزش و سر و صدا
- نویز پایین

در مقابل این مزایا، موتور هیستریزیس دارای معایب زیر نیز می‌باشد:

- بازده پایین

- ضریب توان پایین

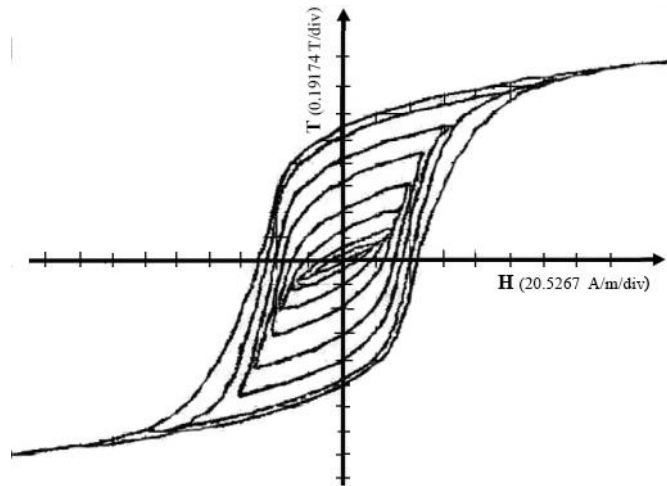
- پدیده هانتینگ

۸-۲ مشخصه مغناطیسی ماده هیستریزیس روتور

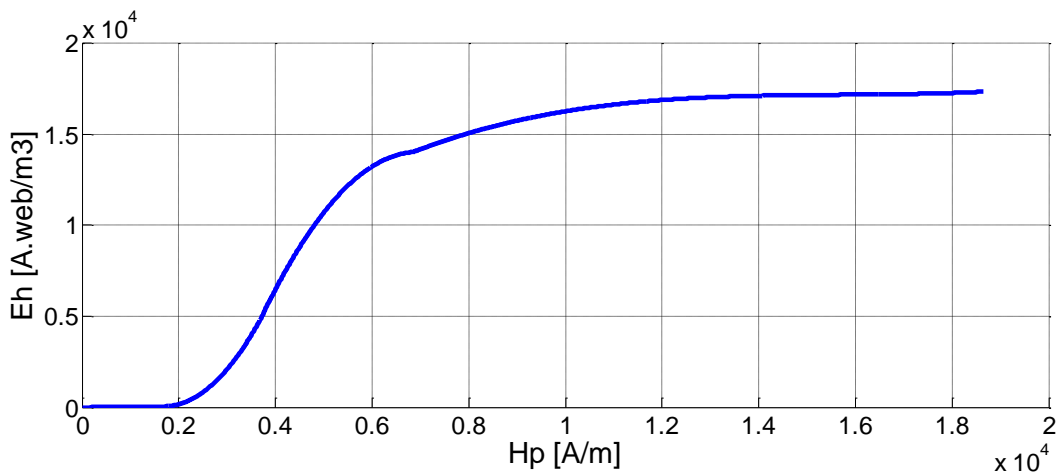
هنگامی که یک ماده با خاصیت هیستریزیس در معرض میدان سینوسی H با دامنه مشخص قرار می‌گیرد، چگالی شار B غیر سینوسی خواهد شد و منحنی $B-H$ مربوطه از یک حلقه هیستریزیس پیروی خواهد نمود [۹]. در صورت تغییر دامنه میدان سینوسی H ، منحنی $B-H$ تغییر کرده و از حلقه هیستریزیس دیگری تبعیت خواهد کرد.

یک موتور هیستریزیس نیز رفتاری مشابه با آنچه در بالا گفته شد از خود نشان می‌دهد؛ یعنی در صورت اعمال یک ولتاژ سینوسی با دامنه مشخص به موتور، منحنی $B-H$ ماده هیستریزیس روتور از یک حلقه هیستریزیس خاص تبعیت می‌کند و در صورت تغییر ولتاژ ورودی، حلقه هیستریزیس کاری موتور نیز تغییر خواهد نمود؛ بنابراین از مهم‌ترین اطلاعات مورد نیاز جهت مدل‌سازی و طراحی موتور هیستریزیس، مشخصه مغناطیسی ماده مورد استفاده در روتور می‌باشد [۷].

مشخصه مغناطیسی ماده روتور را می‌توان در آزمایشگاه طی آزمایشی مشخص به دست آورد. بعضی از حلقه‌های هیستریزیس ماده مغناطیسی روتور مرجع [۷] در شکل ۱۱-۲ نمایش داده شده است. با استفاده از این حلقه‌ها و کمک گرفتن از نرم‌افزارهای گرافیکی نظیر فتوشاپ، مساحت حلقه‌های هیستریزیس E_h بر حسب دامنه شدت میدان مغناطیسی حلقه‌ها H_p بدست می‌آید که در شکل ۱۲-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱۱-۲ حلقه‌های هیستریزیس اندازه‌گیری شده برای ماده مغناطیسی مورد استفاده در روتور [۷]



شکل ۱۲-۲ مساحت حلقه هیستریزیس برحسب دامنه شدت میدان مغناطیسی

وقتی یک موتور هیستریزیس توسط یک منبع ولتاژ سینوسی تغذیه شود، اگر هارمونیک اصلی شدت میدان مغناطیسی در روتور به صورت $H = H_p \cos(\theta)$ تعریف شود، چگالی شار غیر سینوسی بوده و

هارمونیک اصلی آن را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت [۷]:

$$B_1 = B_q \cos(\theta - \alpha) = a_1 \cos(\theta) + b_1 \sin(\theta) \quad (12-2)$$

که:

$$a_1 = B_q \cos(\alpha) \quad (13-2)$$

$$b_1 = B_q \sin(\alpha) \quad (14-2)$$

$$B_q = \sqrt{a_1^2 + b_1^2} \quad (15-2)$$

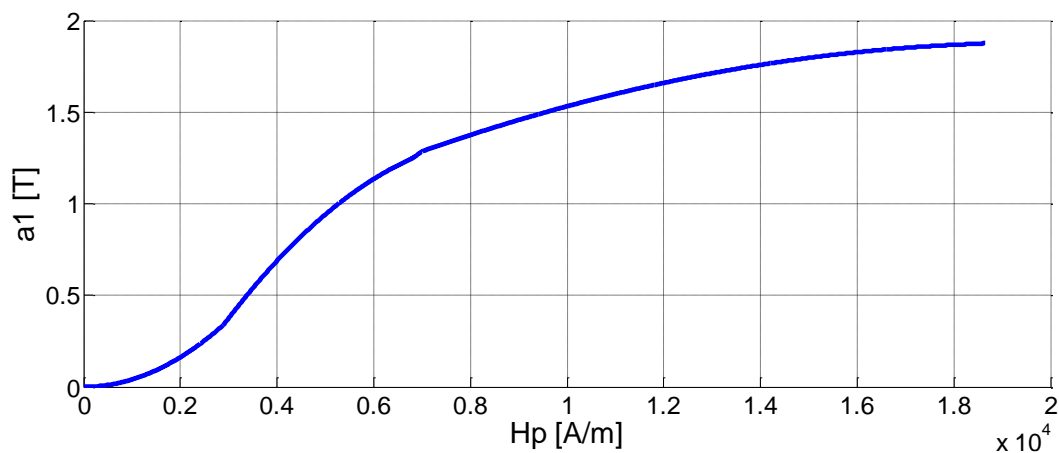
$$\alpha = \arctan\left(\frac{b_1}{a_1}\right) \quad (16-2)$$

در روابط فوق، θ موقعیت زاویه‌ای روتور، B_q دامنه هارمونیک اصلی چگالی شار و α زاویه تاخیر هیستریزیس می‌باشد. همچنین متغیر b_1 از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$b_1 = \frac{E_h}{\pi H_p} \quad (17-2)$$

با استفاده از حلقه‌های هیستریزیس اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و محاسبه مساحت هر حلقه و با استفاده از معادلات (۲-۱۳)، (۲-۱۶) و (۲-۱۷)، تغییرات a_1 برحسب H_p قابل تعیین بوده و در شکل ۲-۱۳ نشان داده شده است.

استفاده از مؤلفه اصلی چگالی شار مغناطیسی و صرف‌نظر از هارمونیک‌های دیگر آن، باعث می‌شود منحنی‌های هیستریزیس با بیضی‌های متحدالمرکز تقریب زده شوند. همچنین یکی دیگر از روش‌های تقریب منحنی‌های هیستریزیس، تقریب متوازی‌الاضلاع می‌باشد. در این گزارش جهت تقریب، از بیضی‌های متحدالمرکز استفاده شده است [۱].



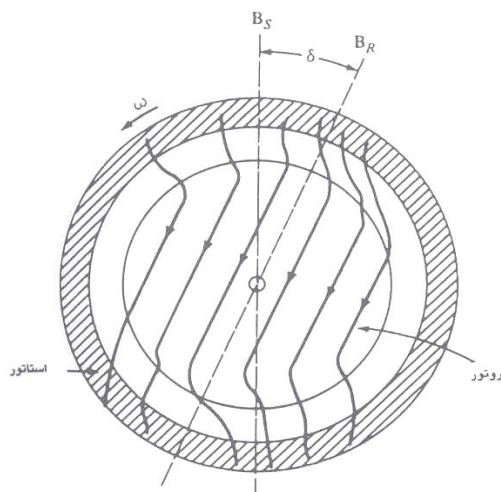
شکل ۲-۱۳ تغییرات a_1 برحسب دامنه شدت میدان مغناطیسی

در تحلیل بالا فرض شد که شدت میدان مغناطیسی کاملاً سینوسی است. اگر شدت میدان هارمونیک باشد، منحنی هیستریزیس دیگر همانند شکل ۱-۲ نبوده و دارای حلقه‌های جزئی همانند شکل ۲-۷ خواهد بود. همان‌طور که گفته شد، این حلقه‌های جزئی باعث ایجاد تلفات توان می‌شوند که تحت عنوان تلفات پارازیتیک مطرح هستند [۱۰].

۹-۲ مکانیزم تولید گشتاور در موتورهای هیستریزیس

به طور معمول در مباحث مربوط به ماشین‌های الکتریکی از پدیده هیستریزیس و جریان‌های گردابی به عنوان عوامل ایجاد تلفات نام برده می‌شود اما در ماشین‌های هیستریزیس از این دو پدیده نامطلوب، جهت ایجاد گشتاور استفاده می‌شود؛ به عبارت دیگر گشتاور موتور هیستریزیس شامل دو مؤلفه گشتاور هیستریزیس و گشتاور جریان گردابی می‌باشد که علت ایجاد این دو گشتاور کاملاً متفاوت می‌باشند.

وقتی یک جریان سه فاز به استاتور موتور هیستریزیس اعمال می‌شود، یک میدان مغناطیسی گردان در فاصله هوایی ایجاد می‌شود. این میدان گردان، فولاد روتور را مغناطیس کرده و قطب‌هایی در آن ایجاد می‌کند. شکل ۲-۱۴ جهت شار را برای یک موتور هیستریزیس با استاتور دو قطب نشان می‌دهد. محور B_s راستای شار میدان استاتور و محور B_R راستای شار روتور را نشان می‌دهد. به دلیل وجود خاصیت هیستریزیس ماده روتور، شار میدان روتور از شار میدان استاتور عقب می‌ماند و بنابراین محور B_R از محور B_s به اندازه زاویه تاخیر α عقب می‌افتد. هر چه تلفات هیستریزیس ذاتی ماده روتور بیشتر باشد، زاویه تاخیر میدان مغناطیسی روتور نسبت به میدان مغناطیسی استاتور بیشتر می‌شود. این زاویه تاخیر باعث ایجاد گشتاور هیستریزیس شده و روتور شتاب می‌گیرد. بیشتر گشتاور موتور، در اثر گشتاور هیستریزیس تولید می‌شود. اگر روتور ساکن باشد، گشتاور راه‌اندازی متناسب با حاصل ضرب مؤلفه‌های اصلی mmf استاتور و شار روتور و سینوس زاویه α می‌باشد.



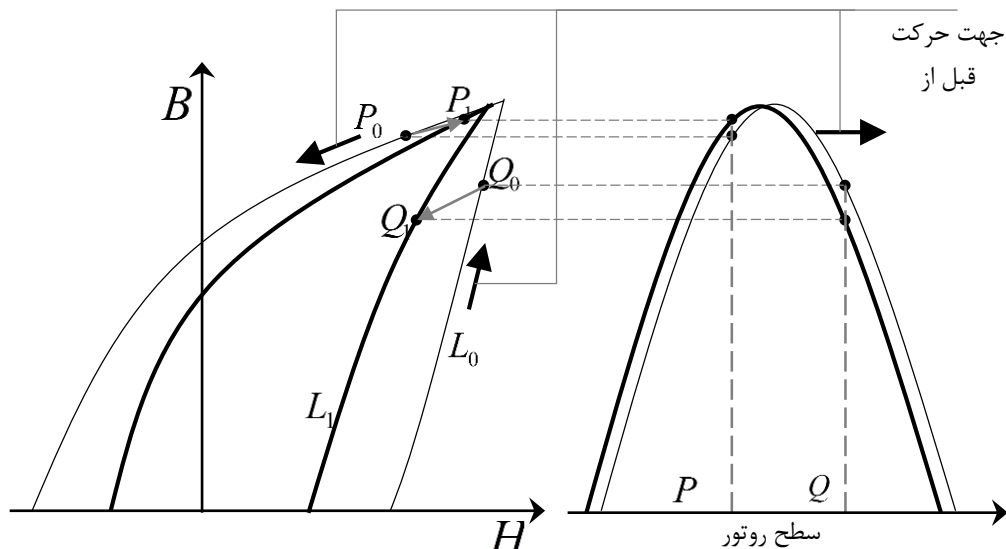
شکل ۲-۱۴ ایجاد گشتاور در موتور هیستریزیس [۴]

گشتاور جریان گردابی وابسته به لغزش است به طوری که در لحظه راهاندازی دارای بیشترین مقدار و در لحظه ورود به سنکرون صفر می‌باشد. معمولاً برای افزایش گشتاور جریان گردابی و شتاب‌گیری بهتر موتور در لحظات راهاندازی، حلقه روتور به صورت یکپارچه ساخته می‌شود.

در یک ولتاژ ورودی مشخص تا زمانی که روتور در سرعتی کمتر از سرعت سنکرون می‌گردد، هر نقطه روی روتور حلقه هیستریزیس مشخصی مانند L_0 مطابق شکل ۲-۱۵ را دور می‌زند. سایر نقاط روتور نیز همین حلقه را با یک شیفت زمانی می‌پیمایند. حلقه کاری موتور هیستریزیس برای تمام لحظات راهاندازی از لحظه شروع به حرکت روتور تا لحظه ورود به سرعت سنکرون، L_0 می‌باشد [۱۱].

وقتی موتور به سرعت سنکرون می‌رسد، اگر گشتاور بار با گشتاور الکترومغناطیسی برابر باشد، تغییر حالت مغناطیسی در هر نقطه از روتور متوقف می‌شود برای مثال در شکل ۲-۱۵، حالت مغناطیسی نقطه P در محل P_0 ثابت می‌شود. به طور مشابه حالت مغناطیسی نقطه Q در محل Q_0 تثبیت می‌شود. در این حالت روتور بدون هیچ نوسانی به سرعت سنکرون می‌رسد؛ اما هنگامی که موتور به سرعت سنکرون می‌رسد، اگر گشتاور بار کمتر از گشتاور الکترومغناطیسی باشد سرعت موتور باز هم افزایش می‌یابد و روتور از موج چگالی شار جلو می‌افتد. یا به عبارت دیگر با فرض ثابت نگه داشتن نقاط P و Q روی روتور، چگالی شار از روتور عقب می‌افتد که خلاف جهت حرکت قبل از سنکرونیزم است.

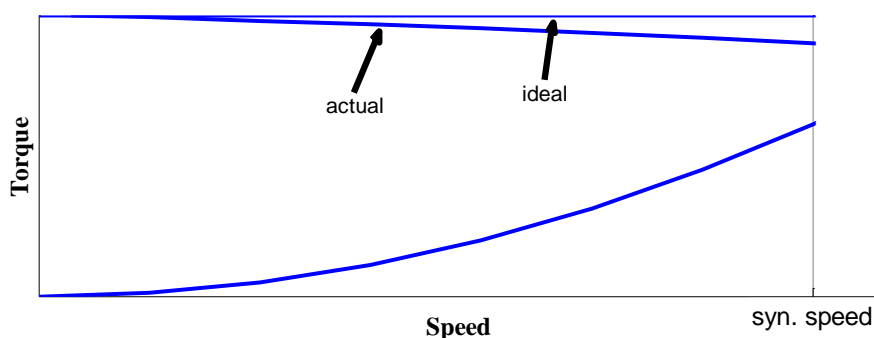
به این ترتیب، چگالی شار نقطه P که قبل از این در حال کاهش بود، افزایش می‌یابد و چگالی شار نقطه Q که قبل از این در حال افزایش بود کاهش خواهد یافت. این تغییرات حالت مغناطیسی، منجر به تغییر حلقه کاری موتور هیستریزیس می‌شود. مطابق شکل ۲-۱۵، نقاط P_0 و Q_0 به ترتیب به P_1 و Q_1 منتقل می‌شوند؛ بنابراین رابطه جدید B-H با حلقه L_1 بیان می‌شود. مساحت و زاویه تاخیر حلقه L_1 کوچک‌تر از سطح حلقه L_0 است. کاهش زاویه تاخیر طبق معادله (۳-۶۲) باعث کاهش گشتاور الکترومغناطیسی می‌شود. این کاهش زاویه تاخیر و در نتیجه تغییر حلقه هیستریزیس تا زمان برابری گشتاور الکترومغناطیسی و گشتاور بار ادامه می‌یابد [۱۱].



شکل ۲-۱۵ باریک شدن حلقه B-H در هنگام ورود به حالت سنکرون [۱۱]

مشخصه گشتاور-سرعت موتور هیستریزیس در حالت ایده‌آل در شکل ۲-۱۶ نشان داده شده است. دلیل ثابت بودن این مشخصه تا لحظه ورود به سرعت سنکرون این است که حلقه هیستریزیس کاری موتور در لحظات راه‌اندازی تغییر نکرده و ثابت می‌ماند. در رسم منحنی گشتاور-سرعت ایده‌آل، فرض بر این است که مقاومت روتور به حدی زیاد است که القای جریان‌های گردابی در آن غیرممکن یا قابل اغماض است. با این توصیف، گشتاوری که در اثر جریان‌های گردابی حاصل می‌شود، نادیده گرفته شده و گشتاور در تمام مدت رسیدن به سرعت سنکرون ثابت می‌ماند. گشتاور جریان گردابی با لغزش موتور متناسب است. این واقعیت در رسم مشخصه گشتاور-سرعت واقعی موتور به حساب آورده شده

است.



شکل ۱۶-۲ مشخصه گشتاور-سرعت موتور هیستریز [۴]

۱۰-۲ معرفی بار حداکثر و بار جزئی در موتورهای هیستریز

بار حداکثر در موتور هیستریز باری است که به محض ورود روتور به سرعت سنکرون، حلقه هیستریز لحظات راهاندازی تغییری نکند و حلقه هیستریز حالت دایمی همان حلقه هیستریز لحظات راهاندازی باشد. در صورتی که بار موتور از بار حداکثر بیشتر شود، روتور به سرعت سنکرون نخواهد رسید. نتایج نشان می‌دهد هرچه بار موتور به بار حداکثر نزدیک‌تر باشد، عملکرد موتور هیستریز بهتر خواهد بود. در بار حداکثر جریان استاتور و دامنه نوسانات پدیده هانتینگ دارای کمترین مقدار و ضریب توان و بازده موتور دارای بیشترین مقدار در بین بارهای مختلف در یک ولتاژ مشخص می‌باشد.

به بار کمتر از بار حداکثر، بار جزئی می‌گویند. در بار جزئی به محض ورود روتور به سرعت سنکرون، حلقه هیستریز لحظات راهاندازی به حلقه‌ای با زاویه تاخیر کوچکتر تغییر پیدا می‌کند. تغییرات حلقه هیستریز آن قدر ادامه می‌یابد تا گشتاور الکترومغناطیسی با گشتاور بار موتور برابر شود.

۱۱-۲ مروری بر کارهای دیگران در زمینه مدار معادل موتورهای هیستریز

موتور هیستریز اولین بار توسط Steinmetz در سال ۱۹۰۸ به عنوان یک دستگاه تولیدکننده گشتاور معرفی شد. مطالعه عمده بعدی مربوط به Teare در سال ۱۹۴۰ می‌باشد؛ او یک روش محاسبه گشتاور در ماده هیستریز ارائه نمود. سپس Roters نشان داد که تلفات پارازیتیکی در

روتور موتور هیستریزیس ناشی از نوسانات شار را می‌توان تا حد زیادی با استفاده از شیارهای استاتور بسته کاهش داد [۱۲].

Slemon و Copeland در سال ۱۹۶۳ تحلیلی از موتورهای هیستریزیس چند فاز ارائه دادند و نظریه استفاده از هارمونیک اصلی ماده روتور در پاسخ به میدان مغناطیسی را معرفی نمودند [۶]. با تعدادی فرضیات، تقریب و تجزیه تحلیلی منطقی و ساده به مدار معادل تک فاز موتور هیستریزیس دست یافته و روابطی برای پارامترهای مدار معادل و گشتاور ماشین ارائه نمودند. در نهایت نتایج حاصل از مدار معادل با داده‌های تجربی به دست آمده از یک موتور هیستریزیس کوچک مقایسه کردند [۱۲].

Miyairi و Kataoka در سال ۱۹۶۵ حلقه‌های هیستریزیس ماده روتور را با بیضی‌هایی مدل نمودند و مدار معادلی برای موتور استوانه‌ای ارائه نمودند [۶].

Ishikawa و Kataoka در سال ۱۹۸۱ برای موتورهای هیستریزیس نوع تخت تحلیلی ارائه نمودند. ارائه مدار معادل موتور هیستریزیس تخت و مقایسه بین موتورهای استوانه‌ای و تخت از جمله کارهای ایشان می‌باشد [۱۳].

یک سری دیگر از مقالات، مدار معادل‌هایی ارائه نموده‌اند که از مقالات Miyairi و Kataoka در سال ۱۹۶۵ و Miyairi و Kataoka در سال ۱۹۶۵ استفاده کرده‌اند: O'Kelly در سال ۱۹۷۱، Rahman در سال ۱۹۷۱، Rahman و Osheiba در سال ۱۹۹۰، O.M.A. Badeeb در سال ۲۰۰۵، Darabi در سال ۲۰۰۷، Darabi et al. در سال ۲۰۰۷. در واقع مقالات Miyairi و Kataoka در سال ۱۹۶۵ و Ishikawa و Kataoka در سال ۱۹۸۱ جز مراجع اصلی مقالات بعدی قرار گرفتند و مطالعات آن‌ها، پایه و اساس مقالات دیگران را شکل داد [۶].

بیشتر مدار معادل‌های ارائه‌شده تاکنون، مربوط به مدل‌سازی حالت دایمی موتور هیستریزیس می‌باشد. بعضی مدار معادل‌ها هم جهت مدل‌سازی، دو مدار معادل یکی برای رفتار گذرای و دیگری برای رفتار حالت دایمی ارائه نموده‌اند [۱۴]. اکثر مدار معادل‌هایی که تاکنون ارائه شده است، به صورت جامع و

کامل توانایی نشان دادن پدیده هانتینگ، اثر بارهای هارمونیک بر روی موتور، اثر تغییرات بار و تغذیه ورودی بر عملکرد دینامیکی گذرای و مشخصات موتور را ندارند. همچنین تاکنون مدار معادلی که عملکرد دینامیکی گذرای موتور هیستریزس را در شرایط بار جزئی پیشبینی و مدل سازی نماید، هنوز در مقالات ارایه نشده است.

۲-۱۱-۱ کاربرهای موتور هیستریزس

به دلیل استفاده از موتورهای هیستریزس در صنایع نظامی و ویژه، گزارشات کمی در مورد این نوع موتورها در دسترس است و بسیاری از پیشرفت‌ها به صورت مقالات علمی منتشر نمی‌شوند. در ادامه برخی از کاربردهای موتورهای هیستریزس آورده شده است [۱].

۲-۱۱-۱-۱ ژيروسکوپ

ژيروسکوپ‌ها از جمله تجهیزات مورد استفاده در سیستم‌های ناوبری هواپیماها، چرخ‌بال‌ها، ماهواره‌ها و موشک‌های دوربرد هستند که نقش مهمی در دقت و عملکرد خوب این سیستم‌ها ایفا می‌کنند. در ژيروسکوپ یک لختی دوار لازم است تا ژيروسکوپ بتواند تغییرات زاویه از محور افق را تشخیص دهد؛ بنابراین ژيروسکوپ‌ها دارای موتوری به عنوان محرک می‌باشند که قابلیت عملکرد در سرعت‌های بالا را داشته باشد. همچنین موتور یک ژيروسکوپ باید ساختاری یکپارچه و محکم، سرعت و گشتاور ثابت و ممان لختی بالا داشته باشد. خصوصیات منحصربه‌فرد و ساختار یکپارچه روتور موتور هیستریزس باعث شده است این موتور قابلیت عملکرد مناسب در سرعت‌های بالاتر از ۲۰۰۰۰ دور در دقیقه را داشته باشد. از این رو موتور هیستریزس به طور چشمگیری در ژيروسکوپ‌ها استفاده می‌شود.

۲-۱۱-۱-۲ سانتریفیوژ

از جداکننده‌های مولکولی یا سانتریفوژهای گازی سرعت بالا در صنایع غنی‌سازی اورانیوم برای

جداسازی ایزوتوپ‌های اورانیوم U-238 و U-235 استفاده می‌کنند. هنگامی که گاز هگزا فلوراید اورانیوم وارد محفظه سانتریفوژ می‌شود به دلیل سرعت بسیار بالای سانتریفوژ، مولکول‌های سنگین‌تر یعنی مولکول‌های ایزوتوپ U-238 از مولکول‌های ایزوتوپ U-235 جداسازی می‌شوند. البته این فرایند پس از عبور گاز هگزا فلوراید اورانیوم از تعداد زیادی سانتریفوژ که به صورت سری قرار دارند در مقیاس صنعتی انجام می‌شود. این سانتریفوژها نیاز به موتوری به عنوان محرک دارند که قابلیت عملکرد خوب در سرعت ۶۰۰۰۰ تا ۱۰۰۰۰۰ دور بر دقیقه را داشته باشد. همچنین به علت نزدیکی جرم مولکولی ایزوتوپ‌های اورانیوم، گشتاور موتور باید بسیار یکنواخت و صاف باشد؛ زیرا هرگونه نوسان یا حضور گشتاور ضربانی باعث می‌شود جداسازی به خوبی انجام نشود. موتورهای هیستریزس به طور وسیعی در سانتریفوژهای گازی استفاده می‌شوند.

۲-۱۱-۱-۳ ضبط کننده‌های ویدئویی

موتورهای هیستریزس به علت بدون سر و صدا بودن و همچنین عملکرد خیلی نرم، انتخاب مناسبی برای استفاده در ضبط کننده‌های ویدئویی و به طور کلی در سیستم‌های آکوستیک^۱ می‌باشند.

۲-۱۱-۱-۴ شتاب‌دهنده توربوشارژرها

توربوشارژرها در ماشین‌های دیزلی از دیرباز برای افزایش راندمان سوخت و کم کردن آلاینده‌های سوختی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این وسایل دارای یک مکانیزم خاص برای بهینه‌سازی و کنترل فشار شارژ کمپرسور می‌باشند. ماشین‌های الکتریکی مختلفی تاکنون به عنوان شتاب‌دهنده توربوشارژرهای وسایل نقلیه دیزلی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. ماشین مورد استفاده در توربوشارژرها باید قابلیت عملکرد مناسب در سرعت ۱۰۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰۰ دور در دقیقه و دمای ۲۰۰ درجه سانتی‌گراد را داشته باشد. موتور هیستریزس به دلیل ساختار یکپارچه و مستحکم و تغییرات کم مشخصه کاری در دماهای بالا، می‌تواند انتخاب مناسبی برای استفاده در توربوشارژرها باشد.

۲-۱۱-۱-۵ زمان سنج‌ها

از دیگر خصوصیات موتور هیستریزیس عملکرد بسیار دقیق در سرعت سنکرون می‌باشد. لذا از این نوع موتورها در ساعت‌ها و تایمرها استفاده می‌شود.

۲-۱۱-۱-۶ خودرو برقی

امروزه با افزایش نگرانی‌های محیطی و کمبود در تأمین منابع بنزین، خودرو برقی کاندیدی مناسب برای وسایل نقلیه جاده‌ای می‌باشند. موتورهای مورد استفاده در خودرو برقی باید شرایط زیر را داشته باشند:

- رنج سرعت بالا با قابلیت تولید گشتاور مناسب برای حرکت و شتاب گرفتن در سرعت بالا.
- جریان محدود به دلیل ولتاژ پایین باطری
- فضای بسیار محدود

موتور هیستریزیس آهنربای دائم، ترکیبی از دو موتور هیستریزیس و آهنربای دائم است که می‌تواند خصوصیات فوق را پوشش دهد؛ بنابراین برای کاربرد خودرو برقی بسیار مناسب می‌باشد.

فصل سوم

مدل سازی عملکرد دینامیکی گذرای موتور هیستریزیس

۳-۱ مقدمه

جهت بررسی عملکرد موتور هیستریزیس و دستیابی به مشخصه‌های آن، به داشتن یک مدل جامع تحلیل کننده عملکرد دینامیکی گذرای موتور نیازمندیم. این مدل باید دارای قابلیت‌های محاسبه پدیده هانتینگ، اثر بارهای جزئی و هارمونیکی بر روی موتور، اثر تغییرات بار و تغذیه ورودی بر عملکرد دینامیکی گذرای و مشخصات حالت دایمی متعاقب موتور باشد. تعدادی از مدار معادل‌های ارایه شده برای موتورهای هیستریزیس، تنها عملکرد حالت دایمی موتور تحت بار حداکثری را مدلسازی می‌کنند و تعدادی دیگر توانایی مدلسازی رفتار دینامیکی گذرای موتور تحت بار حداکثری می‌باشند. مدار معادلی که عملکرد دینامیکی گذرای موتور هیستریزیس را در شرایط بار جزئی و بار هارمونیکی پیشبینی و مدلسازی نماید، هنوز در مقالات ارایه نشده است.

در این فصل قصد داریم تا معادلات دینامیکی گذرای موتور هیستریزیس و مدل مداری جامع برای تمامی لحظات از لحظه راه‌اندازی تا حالت دائمی را استخراج کنیم. در فصل پنجم با پیاده‌سازی معادلات دینامیکی گذرای استخراج شده در محیط SIMULINK/MATLAB نشان خواهیم داد که این معادلات رفتار موتور را در شرایط بار جزئی و بار هارمونیکی پیشبینی خواهند نمود. همچنین توسط معادلات پیشنهادی قادر خواهیم بود اثرات پدیده هانتینگ، تغییرات بار و تغذیه ورودی بر عملکرد دینامیکی گذرای و مشخصات حالت دایمی را مشاهده و بررسی نماییم.

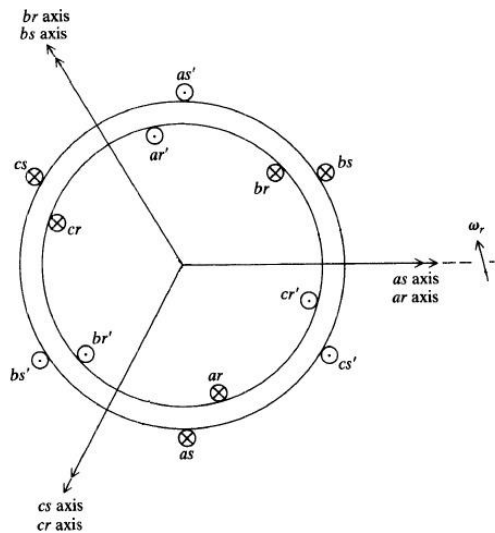
۳-۲ معادلات دینامیکی گذرای و مدل مداری

۳-۲-۱ معادله‌های ولتاژ

۳-۲-۱-۱ معادله‌های ولتاژ در متغیرهای ماشین

شکل ۳-۱ موتور هیستریزیس استوانه‌ای متقارن ۲ قطب سه فاز را نشان می‌دهد. سیم‌پیچی استاتور با توزیع سینوسی، تعداد دور معادل N و مقاومت R_s می‌باشد. به دلیل عدم وجود شیار، سیم‌پیچ یا قطب برجسته در روتور موتور هیستریزیس، جهت مدلسازی روتور سه فرض زیر را در نظر می‌گیریم:

- (۱) روتور دارای سیم‌پیچی سه فاز، تعداد دور معادل N و مقاومت R_r می‌باشد.
- (۲) سیم‌پیچی‌های روتور اتصال کوتاه بوده و با حرکت روتور، جابجا نمی‌شوند و ساکن می‌مانند.
- (۳) محورهای as و ar به ترتیب مربوط به سیم‌پیچی فاز a استاتور و فاز a روتور برهم منطبق می‌باشند.



شکل ۱-۳ موتور هیستریزیس استوانه‌ای

با توجه به مطالب فوق، معادله‌های ولتاژ در متغیرهای ماشین می‌توانند به صورت زیر بیان شوند [۱۵]:

$$v_{abcs} = R_s i_{abcs} + p \lambda_{abcs} \quad (1-3)$$

$$v_{abcr} = R_r i_{abcr} + p \lambda_{abcr} = 0 \quad (2-3)$$

که:

$$(f_{abcs})^T = [f_{as} \quad f_{bs} \quad f_{cs}] \quad (3-3)$$

در معادله‌های بالا، اندیس s نشانگر متغیرها و پارامترهای مرتبط با مدارهای استاتور و اندیس r نشانگر متغیرها و پارامترهای مرتبط با مدارهای روتور می‌باشد. R_r و R_s ماتریس‌های قطری با عناصر غیر صفر مساوی‌اند.

برای یک سیستم مغناطیسی، شارهای پیوندی می‌تواند به صورت زیر بیان شود [۱۵]:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{abcs} \\ \lambda_{abcr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ (L_{sr})^T & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{abcs} \\ i_{abcr} \end{bmatrix} \quad (۴-۳)$$

با توجه به سه فرض در نظر گرفته شده برای روتور، اندوکتانس‌های سیم‌پیچی موتور هیستریزس، شبیه اندوکتانس‌های یک موتور القایی می‌باشد با این تفاوت که به علت منطبق بودن محورهای as و ar مربوط به استاتور و روتور، در روابط مربوط به اندوکتانس‌های موتور القایی باید $\theta_r=0$ قرار داده شود. لذا ماتریس اندوکتانس‌های موتور هیستریزس به صورت زیر خواهند شد [۱۵]:

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} \\ -\frac{1}{2}L_{ms} & -\frac{1}{2}L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (۵-۳)$$

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} \\ -\frac{1}{2}L_{mr} & -\frac{1}{2}L_{mr} & L_{lr} + L_{mr} \end{bmatrix} \quad (۶-۳)$$

$$L_{sr} = L_{sr} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta_r \end{bmatrix} \quad (۷-۳)$$

$$\Rightarrow L_{sr} = L_{sr} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix}$$

در معادله‌های اندوکتانس بالا، L_{ms} و L_{ls} به ترتیب اندوکتانس‌های پراکندگی و مغناطیس کننده

استاتور و L_{lr} و L_{mr} مربوط به سیم‌پیچی‌های روتور هستند. اندوکتانس L_{sr} دامنه اندوکتانس‌های متقابل بین سیم‌پیچ‌های استاتور و روتور می‌باشد.

مرسوم است که همه متغیرهای روتور با نسبت‌های دور مناسب به طرف استاتور منتقل شوند:

$$i'_{abcr} = \frac{N_r}{N_s} i_{abcr} \quad (۸-۳)$$

$$v'_{abcr} = \frac{N_s}{N_r} v_{abcr} \quad (۹-۳)$$

$$\lambda'_{abcr} = \frac{N_s}{N_r} \lambda_{abcr} \quad (۱۰-۳)$$

با توجه به فرض برابر بودن تعداد دورهای سیم‌پیچی استاتور و روتور ($N_s=N_r=N$) داریم:

$$i'_{abcr} = i_{abcr} \quad (۱۱-۳)$$

$$v'_{abcr} = v_{abcr} \quad (۱۲-۳)$$

$$\lambda'_{abcr} = \lambda_{abcr} \quad (۱۳-۳)$$

یعنی متغیرهای روتور با متغیرهای منتقل شده روتور به سمت استاتور برابر می‌باشند. به همین علت از گذاشتن اندیس پریم در طول این گزارش خودداری می‌شود.

اندوکتانس‌های مغناطیس‌کننده و متقابل مسیره‌های شار مغناطیسی مشابهی دارند؛ بنابراین L_{ms} ، L_{mr} و L_{sr} به صورت زیر باهم مرتبط می‌شوند:

$$L_{ms} = \frac{N_s}{N_r} L_{sr} \Rightarrow L_{ms} = L_{sr} \quad (۱۴-۳)$$

$$L_{mr} = \left(\frac{N_s}{N_r} \right)^2 L_{ms} \Rightarrow L_{mr} = L_{ms} \quad (۱۵-۳)$$

بنابراین با توجه به برابری $L_{ms}=L_{sr}=L_{mr}$ ، ماتریس‌های اندوکتانس موتور هیستریزیس به صورت زیر

تبدیل می‌شوند:

$$L_s = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} \\ -\frac{1}{2} L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} \\ -\frac{1}{2} L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} & L_{ls} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (۱۶-۳)$$

$$L_r = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} \\ -\frac{1}{2} L_{ms} & L_{lr} + L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} \\ -\frac{1}{2} L_{ms} & -\frac{1}{2} L_{ms} & L_{lr} + L_{ms} \end{bmatrix} \quad (۱۷-۳)$$

$$L_{sr} = L_{ms} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 1 & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 1 \end{bmatrix} \quad (۱۸-۳)$$

۳-۲-۱-۲ معادله‌های تبدیل برای مدارهای روتور و استاتور-دستگاه مرجع اختیاری

همانطور که می‌دانیم برخی از اندوکتانس‌های ماشین‌های سنکرون و القایی تابعی از سرعت روتور هستند که این موضوع باعث ایجاد پیچیدگی در حل معادله‌های ولتاژ می‌شود. برای کاهش این پیچیدگی‌ها از تغییر متغیر استفاده می‌شود [۱۵]. همانند ماشین‌های سنکرون و القایی، برای موتورهای هیستریزیس نیز از تغییر متغیر استفاده می‌کنیم. تغییر متغیری که متغیرهای اجزای ساکن استاتور و روتور را به دستگاه مرجع اختیاری انتقال می‌دهد عبارت است از:

$$f_{qdos} = K_s f_{abcs} \quad (۱۹-۳)$$

که:

$$(f_{qdos})^T = [f_{qs} \quad f_{ds} \quad f_{os}] \quad (20-3)$$

$$(f_{abcs})^T = [f_{as} \quad f_{bs} \quad f_{cs}] \quad (21-3)$$

$$K_s = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (22-3)$$

$$\theta = \int_0^t \omega(\xi) d\xi + \theta(0) \quad (23-3)$$

که ξ یک متغیر ظاهری انتگرال گیری است. می توان نشان داد:

$$(K_s)^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (24-3)$$

در معادله‌های بالا، f می‌تواند نشانگر ولتاژ، جریان و یا شار پیوندی باشد. اندیس بالای T ، ترانهاده ماتریس را نشان می‌دهد. اندیس پایین s نیز تبدیل مرتبط با مدارهای ساکن را مشخص می‌کند. دستگاه مرجع می‌تواند در هر سرعت زاویه‌ای ثابت یا متغیری بچرخد و یا اینکه ساکن بماند. معنای اختیاری از حقیقتی ناشی می‌شود که سرعت زاویه‌ای تبدیل نامشخص بوده و می‌تواند به طور اختیاری برای حل سریع معادله‌های سیستم یا تحقق محدودیت‌های سیستم انتخاب شود.

۳-۱-۲-۳ معادله‌های ولتاژ در متغیرهای دستگاه مرجع اختیاری

می‌خواهیم معادله‌های ولتاژ را در دستگاه مرجع اختیاری به دست آوریم. طرفین معادله‌های (۱-۳) و

(۲-۳) را در K_s ضرب می‌کنیم و به جای عبارات λ_{abcs} و λ_{abcr} به ترتیب $\lambda_{qdos}^{-1}(K_s)$ و $\lambda_{qdor}^{-1}(K_s)$

قرار می‌دهیم [۱۵]:

$$K_s v_{abcs} = K_s R_s i_{abcs} + K_s p [(K_s)^{-1} \lambda_{qdos}] \quad (25-3)$$

$$K_s v_{abcr} = K_s R_r i_{abcr} + K_s p [(K_s)^{-1} \lambda_{qdor}] \quad (26-3)$$

با کمی ساده‌سازی به راحتی به روابط زیر می‌رسیم:

$$v_{qdos} = R_s i_{qdos} + p \lambda_{qdos} + \omega \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \lambda_{qdos} \quad (27-3)$$

$$v_{qdor} = R_r i_{qdor} + p \lambda_{qdor} + \omega \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \lambda_{qdor} \quad (28-3)$$

مجموعه معادلات هنگامی کامل می‌شوند که عبارت‌های شارهای پیوندی سیم‌پیچ‌ها تعیین شوند. با

ضرب K_s در طرفین رابطه (3-4) و قرار دادن جملات $(K_s)^{-1} i_{qdos}$ و $(K_s)^{-1} i_{qdor}$ به ترتیب به جای

i_{abcs} و i_{abcr} و کمی ساده‌سازی به راحتی، معادله‌های شارهای پیوندی زیر نتیجه می‌شود:

$$\begin{bmatrix} \lambda_{qdos} \\ \lambda_{qdor} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_s L_s (K_s)^{-1} & K_s L_{sr} (K_s)^{-1} \\ K_s (L_{sr})^T (K_s)^{-1} & K_s L_r (K_s)^{-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qdos} \\ i_{qdor} \end{bmatrix} \quad (29-3)$$

می‌توان ثابت نمود:

$$K_s L_s (K_s)^{-1} = \begin{bmatrix} L_{ls} + L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_{ls} + L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{ls} \end{bmatrix} \quad (30-3)$$

که:

$$L_m = \frac{3}{2} L_{ms} \quad (31-3)$$

چون شکل L_r مشابه L_s است نتیجه می‌شود که:

$$K_s L_r (K_s)^{-1} = \begin{bmatrix} L_{lr} + L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_{lr} + L_m & 0 \\ 0 & 0 & L_{lr} \end{bmatrix} \quad (32-3)$$

و همچنین می توان نشان داد که:

$$K_s L_{sr} (K_s)^{-1} = K_s (L_{sr})^T (K_s)^{-1} = \begin{bmatrix} L_m & 0 & 0 \\ 0 & L_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (33-3)$$

با تغییر نام پارامتر L_{lr} به پارامتر L_{hr} ، شکل گسترده معادله های ولتاژ و شارهای پیوندی به صورت زیر

خواهند شد:

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega \lambda_{ds} \quad (34-3)$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega \lambda_{qs} \quad (35-3)$$

$$v_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\lambda_{os}}{dt} \quad (36-3)$$

$$0 = v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} + \omega \lambda_{dr} \quad (37-3)$$

$$0 = v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} - \omega \lambda_{qr} \quad (38-3)$$

$$0 = v_{or} = R_r i_{or} + \frac{d\lambda_{or}}{dt} \quad (39-3)$$

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_m (i_{qs} + i_{qr}) \quad (40-3)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + L_m (i_{ds} + i_{dr}) \quad (41-3)$$

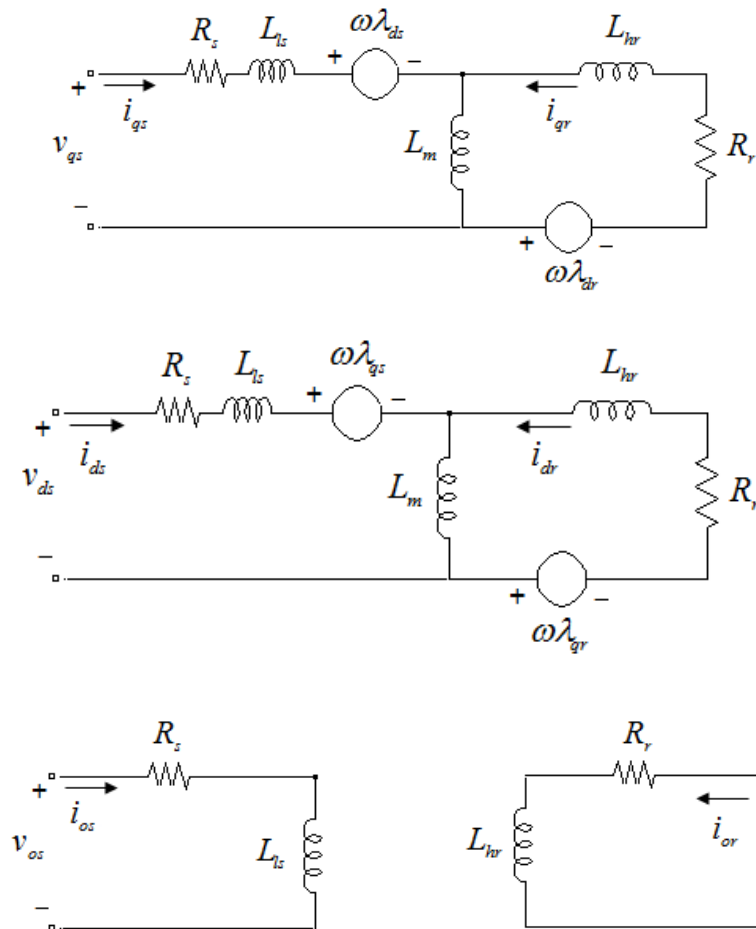
$$\lambda_{os} = L_{ls} i_{os} \quad (42-3)$$

$$\lambda_{qr} = L_{hr} i_{qr} + L_m (i_{qr} + i_{qs}) \quad (43-3)$$

$$\lambda_{dr} = L_{hr} i_{dr} + L_m (i_{dr} + i_{ds}) \quad (44-3)$$

$$\lambda_{or} = L_{hr} i_{or} \quad (45-3)$$

معادله‌های ولتاژ و شار پیوندی مدارهای معادلی را که در شکل ۲-۳ نشان داده شده، پیشنهاد می‌کند:



شکل ۲-۳ مدار معادل الکتریکی موتور هیستریزیس سه فاز در مختصات qd0 در دستگاه مرجع اختیاری

جهت مدل‌سازی تلفات هسته کافی است تا در مدار معادل شکل ۲-۳، مقاومت R_c را موازی با اندوکتانس L_m قرار دهیم. معادلات (۳۴-۳)-(۳۹-۳) تغییری نمی‌کنند؛ تنها معادلات شارهای پیوندی به صورت زیر تبدیل می‌شوند:

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_m (i_{qs} + i_{qr} - i_{qc}) \quad (46-3)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + L_m (i_{ds} + i_{dr} - i_{dc}) \quad (47-3)$$

$$\lambda_{os} = L_{ls} i_{os} - L_m i_{oc} \quad (48-3)$$

$$\lambda_{qr} = L_{lr} i_{qr} + L_m (i_{qr} + i_{qs} - i_{qc}) \quad (49-3)$$

$$\lambda_{dr} = L_{lr} i_{dr} + L_m (i_{dr} + i_{ds} - i_{dc}) \quad (50-3)$$

$$\lambda_{or} = L_{lr} i_{or} - L_m i_{oc} \quad (51-3)$$

که معادلات مربوط به جریان تلفات هسته به صورت زیر می‌باشند:

$$L_m \omega i_{dc} + L_m \frac{d}{dt} i_{qc} = L_m \omega (i_{ds} + i_{dr}) + L_m \frac{d}{dt} (i_{qs} + i_{qr}) - R_c i_{qc} \quad (52-3)$$

$$-L_m \omega i_{qc} + L_m \frac{d}{dt} i_{dc} = -L_m \omega (i_{qs} + i_{qr}) + L_m \frac{d}{dt} (i_{ds} + i_{dr}) - R_c i_{dc} \quad (53-3)$$

$$L_m \frac{d}{dt} i_{oc} = L_m \frac{d}{dt} (i_{os} + i_{or}) - R_c i_{oc} \quad (54-3)$$

۲-۲-۳ معادله گشتاور الکترومغناطیسی موتور

در شکل ۳-۳ الف مدار معادل بر فاز موتور هیستریزس نشان داده شده است. جهت دستیابی به رابطه گشتاور الکترومغناطیسی موتور، مقاومت R_r روتور را همانند شکل ۳-۳ ب، به دو مؤلفه sR_r و $(1-s)R_r$ تبدیل نموده و توان ورودی به روتور را به دو قسمت توان تلفاتی در روتور و توان خروجی تقسیم می‌نماییم. به عبارتی توان خروجی را می‌توان به صورت زیر بیان نمود [۱۶]:

$$P_o = P_{ir} - P_l = mI_r^2 R_r - mI_r^2 (sR_r) \quad (55-3)$$

که در این صورت گشتاور الکترومغناطیسی موتور از رابطه زیر به دست می‌آید:

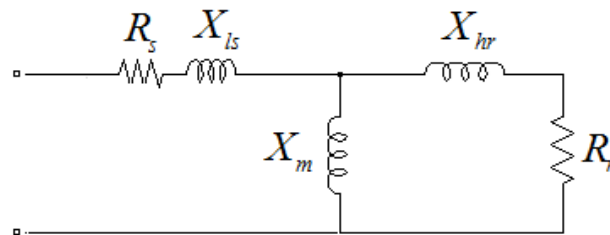
$$T_e = \frac{P_o}{\omega_{rm}} = \frac{mI_r^2(1-s)R_r}{(1-s)\omega_b / p} \quad (56-3)$$

مقادیر R_r و I_r برای یک موتور هیستریزس نوع تخت از روابط زیر به دست می‌آیند [۸]:

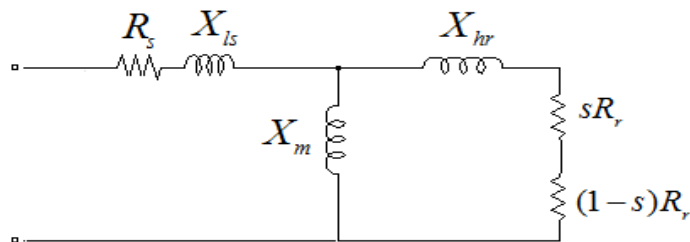
$$R_r = \frac{\omega_b m K_w^2 N_{ph}^2 V_r \mu}{\pi^2 R_{av}^2} \sin(\alpha) \quad (57-3)$$

$$I_r = \frac{\pi R_{av} B_q}{\sqrt{2} m K_w N_{ph} \mu} \quad (58-3)$$

که I_r مقدار مؤثر جریان روتور، ω_b سرعت زاویه‌ای الکتریکی میدان گردان استاتور، ω_{rm} سرعت زاویه‌ای مکانیکی روتور و $p=P/2$ تعداد زوج قطب‌ها می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۳-۳ مدار معادل بر فاز موتور هیستریزس [۱۶]

در صورتی که روابط (۵۷-۳) و (۵۸-۳) را در رابطه (۵۶-۳) قرار دهیم، خواهیم داشت:

$$T_e = \frac{pV_r B_q^2}{2\mu} \sin(\alpha) = \frac{pV_r S_H}{2\pi} \quad (59-3)$$

که S_H مساحت حلقه هیستریزیس و V_r حجم حلقه روتور از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$S_H = \frac{\pi B_q^2}{\mu} \sin(\alpha) \quad (60-3)$$

$$V_r = 2\pi R_{av} t_r R_{oi} \quad (61-3)$$

گشتاور الکترومغناطیسی یک موتور هیستریزیس از هر نوعی از رابطه زیر نیز محاسبه می‌شود [۶]:

$$T_e = \frac{m}{2} p L_m (\sqrt{2} I_g) (\sqrt{2} I_r) \sin(\alpha) \quad (62-3)$$

مقادیر I_g و L_m برای یک موتور هیستریزیس نوع تخت از روابط زیر به دست می‌آیند [۸]:

$$L_m = \frac{2m K_w^2 N_{ph}^2 \mu_0 R_{av} R_{oi}}{\pi p^2 g} \quad (63-3)$$

$$I_g = \frac{\pi p^2 g t_r B_q}{\sqrt{2m K_w N_{ph} \mu_0 R_{av}}} \quad (64-3)$$

اگر عبارات L_m ، I_g و I_r به ترتیب از روابط (۶۳-۳)، (۶۴-۳) و (۵۸-۳) در رابطه (۶۲-۳) جایگزین شوند، خواهیم دید معادله (۵۹-۳) حاصل خواهد شد.

مرجع [۶]، جملات $\sqrt{2} I_r$ (دامنه جریان روتور) و $\sqrt{2} I_g$ (دامنه جریان فاصله هوایی) موجود در معادله

(۶۲-۳) را ثابت نموده است که می‌توان به صورت زیر تعریف نمود:

$$\sqrt{2} I_r = \sqrt{i_{dr}^2 + i_{qr}^2} \quad (65-3)$$

$$\sqrt{2} I_g = \sqrt{i_{dg}^2 + i_{qg}^2} \quad (66-3)$$

که جریان‌های فاصله هوایی، به صورت مجموع جریان‌های روتور و استاتور مربوطه تعریف می‌شوند:

$$i_{dg} = i_{ds} + i_{dr} \quad (67-3)$$

$$i_{qg} = i_{qs} + i_{qr} \quad (۶۸-۳)$$

بنابراین رابطه (۶۲-۳) بر حسب متغیرهای مختصات qdo به صورت زیر تبدیل خواهد شد:

$$T_e = \frac{m}{2} p L_m \sqrt{(i_{ds} + i_{dr})^2 + (i_{qs} + i_{qr})^2} \sqrt{i_{dr}^2 + i_{qr}^2} \sin(\alpha) \quad (۶۹-۳)$$

جهت شبیه‌سازی رفتار دینامیکی گذرای موتور هیستریزس در مختصات qdo از رابطه (۶۹-۳) استفاده خواهیم کرد.

در صورتی که بار موتور کمتر از بار حداکثری باشد، به محض ورود روتور به سرعت سنکرون، به علت عدم برابری گشتاور الکترومغناطیسی و گشتاور بار، حلقه هیستریزس لحظات راه‌اندازی به حلقه‌ای با زاویه تاخیر (α) کوچکتر تغییر پیدا می‌کند. با کاهش زاویه تاخیر، عبارت $\sin(\alpha)$ در معادله (۶۹-۳)، گشتاور الکترومغناطیسی را کاهش می‌دهد. کاهش زاویه تاخیر و در نتیجه کاهش گشتاور الکترومغناطیسی تا زمان برابری گشتاورهای الکترومغناطیسی و بار ادامه می‌یابد.

۳-۲-۳ معادله سرعت روتور

معادله حرکت موتور برای سرعت زاویه‌ای الکتریکی روتور ω_{re} به صورت زیر بیان می‌شود [۱۷]:

$$J \left(\frac{2}{P} \right) \frac{d\omega_{re}}{dt} = T_e - T_L \quad (۷۰-۳)$$

ممان لختی J ، جمع ممان لختی بار خارجی و روتور می‌باشد. گشتاور بار خارجی T_L ، تابعی از سرعت زاویه‌ای ω می‌باشد. رابطه بین سرعت زاویه‌ای الکتریکی روتور ω_{re} و سرعت زاویه‌ای مکانیکی روتور ω_{rm} به صورت زیر می‌باشد:

$$\omega_{re} = \left(\frac{P}{2} \right) \omega_{rm} \quad (۷۱-۳)$$

که در این صورت معادله حرکت موتور به صورت زیر خواهد شد:

$$J \frac{d\omega_{rm}}{dt} = T_e - T_L \quad (۷۲-۳)$$

۴-۲-۳ معادله زاویه تاخیر α

به علت عدم تغییر حلقه هیستریزیس روتور در تمام لحظات شتاب‌گیری (از لحظه شروع به حرکت روتور تا لحظه ورود روتور به سرعت سنکرون)، زاویه تاخیر α در لحظات شتاب‌گیری دارای مقدار ثابتی بوده که توسط الگوریتم ارائه‌شده در فصل بعد به دست می‌آید. این زاویه تاخیر را با α_{max} تعریف می‌کنیم.

اگر بار موتور بار حداکثری باشد، در لحظه ورود روتور به سرعت سنکرون، گشتاور الکترومغناطیسی و گشتاور بار باهم برابر بوده و حلقه هیستریزیس لحظات شتاب‌گیری تغییر نخواهد نمود؛ یعنی از ابتدای شروع به حرکت روتور تا حالت دائمی، موتور روی یک حلقه هیستریزیس کار می‌کند.

در صورتی که بار موتور از بار حداکثری کمتر باشد، در لحظه ورود روتور به سرعت سنکرون، گشتاور بار از گشتاور الکترومغناطیسی موتور کمتر بوده لذا موتور حلقه هیستریزیس خود را تغییر داده و به حلقه‌ای با زاویه تاخیر کوچک‌تر خواهد رفت تا با این کاهش زاویه تاخیر، گشتاور الکترومغناطیسی را کم نماید. این کاهش زاویه تاخیر تا زمان برابری گشتاور الکترومغناطیسی و گشتاور بار ادامه می‌یابد. به علت لختی روتور، ممکن است برای لحظاتی گشتاور بار از گشتاور الکترومغناطیسی بیشتر شود که این باعث افزایش سرعت روتور از مقدار سرعت سنکرون خواهد شد اما سریعاً با افزایش کوچکی در زاویه تاخیر، گشتاورها باهم برابر می‌شوند. به همین علت در موتورهای هیستریزیس با پدیده نوسانات سرعت^۱ مواجه هستیم.

معادله (۷۳-۳) با شرط اولیه $\alpha(0) = \alpha_{max}$ به همراه شرایط و روابط (۷۴-۳) - (۷۸-۳)، قابلیت محاسبه زاویه تاخیر α ، در تمام لحظات از لحظه راه‌اندازی تا لحظه حالت دائمی را دارد [۶]:

۱- Hunting

$$\frac{d\alpha}{dt} = \left(\frac{2}{P}\right)(\omega_b - \omega_{re})$$

(۷۳-۳)

$$\alpha(0) = \alpha_{\max}$$

به شرط اینکه:

$$|\alpha| \leq \alpha_{\max}$$

(۷۴-۳)

اگر زاویه α محاسبه شده از رابطه (۷۳-۳) در شرط زیر صادق باشد:

$$\alpha > \alpha_{\max}$$

(۷۵-۳)

آنگاه:

$$\alpha = \alpha_{\max}$$

(۷۶-۳)

و اگر زاویه α محاسبه شده از رابطه (۷۳-۳) در شرط زیر صادق باشد:

$$\alpha < -\alpha_{\max}$$

(۷۷-۳)

آنگاه:

$$\alpha = -\alpha_{\max}$$

(۷۸-۳)

از لحظه شروع به حرکت روتور تا لحظه قبل از ورود روتور به سرعت سنکرون، اختلاف بین سرعت‌های ω_b و ω_{re} زیاد بوده و زاویه α محاسبه شده از رابطه (۷۳-۳)، شرط (۷۴-۳) را برآورده نمی‌کند و تنها شرط (۷۵-۳) برقرار می‌باشد پس $\alpha = \alpha_{\max}$. در لحظه ورود به سرعت سنکرون، زاویه α محاسبه شده از رابطه (۷۳-۳)، شرط (۷۴-۳) را برآورده خواهد کرد که این یعنی زاویه α محاسبه شده از رابطه (۷۳-۳)، دارای زاویه تأخیری کوچک‌تر از زاویه تاخیر حلقه هیستریزس در هنگام شتاب گیری (α_{\max}) می‌باشد و این به این معنی است که در هنگام ورود به سنکرونیزم، حلقه‌ای با زاویه تاخیر کوچک‌تر

انتخاب می‌شود و زاویه تاخیر کوچک‌تر به معنی کوچک شدن گشتاور الکترومغناطیسی موتور می‌باشد. در صورتی که گشتاور الکترومغناطیسی موتور از گشتاور بار بیشتر (کمتر) باشد، این کاهش (افزایش) زاویه تاخیر در بازه $\alpha_{max} \leq \alpha \leq -\alpha_{max}$ آن قدر ادامه می‌یابد که گشتاور الکترومغناطیسی موتور با گشتاور بار برابر شود.

معادلات (۳۴-۳)-(۳۹-۳)، (۴۶-۳)-(۵۴-۳)، (۶۹-۳)، (۷۲-۳) و (۷۳-۳)، مجموعه کامل معادلات دینامیکی گذرای موتور هیستریزیس می‌باشند. جهت حل مجموعه معادلات فوق، به تعیین حلقه هیستریزیس لحظات راه‌اندازی و محاسبه مقادیر $R_s, X_{ls}, X_m, R_c, R_r$ و X_{hr} نیاز می‌باشد. تعیین حلقه هیستریزیس لحظات راه‌اندازی و محاسبه مقادیر پارامترهای مدار معادل در فصل بعد انجام می‌گیرد.

فصل چهارم

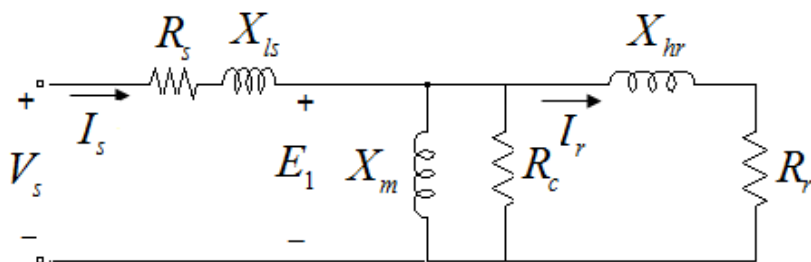
محاسبه حلقه هیستریزیس زمان شتاب‌گیری
و پارامترهای مدار معادل در لحظه ورود به سنکرون

در یک ولتاژ ورودی مشخص، سه پارامتر B_q ، H_p و α_{max} حلقه هیستریزیس با بیشترین مساحت را مشخص می‌کند [۶]. در واقع این حلقه، حلقه هیستریزیس لحظات راه‌اندازی می‌باشد. با مشخص بودن ولتاژ استاتور، حلقه هیستریزیس لحظات راه‌اندازی توسط روش سعی و خطا تکرار شونده و با استفاده از مدار معادل بر فاز و پارامترهای طراحی (شامل ابعاد موتور و مشخصات سیم‌پیچی) قابل تعیین می‌باشد [۳]. در این فصل قصد داریم تا الگوریتم محاسبه حلقه هیستریزیس لحظات راه‌اندازی ارایه شده در مرجع [۷] را معرفی نموده و با انتخاب موتور هیستریزیس تخت همان مرجع به عنوان موتور مورد مطالعه، حلقه هیستریزیس لحظات راه‌اندازی و پارامترهای مدار معادل در لحظه ورود روتور به سرعت سنکرون در ولتاژ نامی را محاسبه نماییم.

۴-۲ الگوریتم محاسبه حلقه هیستریزیس لحظات راه‌اندازی

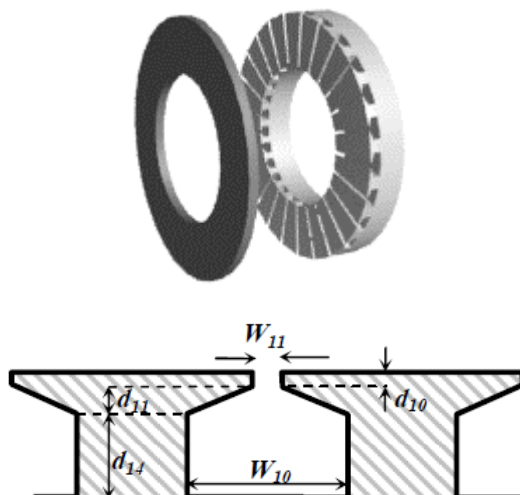
جهت تعیین حلقه هیستریزیس لحظات راه‌اندازی، از مدار معادل بر فاز شکل ۴-۱ استفاده می‌کنیم. در این مدار معادل، R_s مقاومت سیم‌پیچی استاتور، X_{ls} راکتانس نشتی سیم‌پیچی استاتور، X_m راکتانس مغناطیس‌کنندگی، X_{hr} راکتانس روتور و R_r مقاومت معادل حاصل از موازی شدن مقاومت R_h و مقاومت R_e/s می‌باشند. در واقع تأثیر جریان فوکو روتور، با مقاومت معادل R_e که وابسته به لغزش است، مدل شده است و تأثیر هیستریزیس روتور با مقاومت معادل R_h که مستقل از لغزش است نمایش داده شده است. لغزش به عنوان تفاوت بین سرعت سنکرون و سرعت واقعی، به سرعت سنکرون تعریف می‌شود [۱۸].

$$R_r = R_h \parallel \frac{R_e}{s} = \frac{R_e R_h}{sR_h + R_e} \quad (۴-۱)$$



شکل ۱-۴ مدار معادل الکتریکی بر فاز موتور هیستریز [۱۶]

موتور هیستریز تخت مرجع [۷]، به عنوان موتور مورد مطالعه در این پایان نامه انتخاب می شود. ساختار استاتور، روتور و شیار استاتور و همچنین پارامترهای طراحی موتور هیستریز مورد نظر به ترتیب در شکل ۲-۴ و جدول ۱-۴ آورده شده اند.



شکل ۲-۴ ساختار استاتور، روتور و شیار استاتور موتور هیستریز تخت مرجع [۷]

جدول ۱-۴ پارامترهای موتور هیستریز تخت مرجع [۷]

ردیف	نام پارامتر	علامت اختصاری	واحد	مقدار
۱	فرکانس	f	[Hz]	۱۰۰۰
۲	تعداد فازها	m	[-]	۳
۳	تعداد قطبها	P	[-]	۲
۴	ولتاژ مؤثر فاز	V _p	[V]	۲۰۰
۵	توان خروجی	P _{out}	[W]	۳۰۰
۶	شعاع داخلی روتور و استاتور	R _i	[mm]	۲۶/۹

۵۰	[mm]	R_o	شعاع خارجی روتور و استاتور	۷
۲۳/۱۰	[mm]	R_{oi}	اختلاف شعاع خارجی و داخلی استاتور و روتور	۸
۴/۳۱۶	[mm]	t_r	ضخامت دیسک روتور	۹
۲۵	[mm]	d_y	عمق یوغ استاتور	۱۰
۱/۹۹	[mm]	g	فاصله هوایی محوری بین استاتور و روتور	۱۱
۲۴	[-]	S	تعداد شیارهای استاتور	۱۲
۰/۸۳	[-]	K_{pp}	نسبت گام سیم‌پیچی استاتور به گام قطب	۱۳
۱/۱۱	[mm]	W_{10}	عرض شیار استاتور	۱۴
۵	[mm]	W_{11}	عرض دهانه شیار استاتور	۱۵
۵/۰۶	[mm]	T	میانگین قوس دندان شیار استاتور	۱۶
۱/۵	[mm]	d_{10}	عمق دهانه شیار استاتور	۱۷
۲	[mm]	d_{11}	ارتفاع محوری بخش دوزنقه‌ای شیار استاتور	۱۸
۶/۷۳	[mm]	d_{14}	ارتفاع بخش مستطیلی شیار استاتور	۱۹
۰/۷۱	[mm]	d	قطر سیم سیم‌پیچی استاتور	۲۰
۲۰	[°C]	T_{em}	دمای عملکرد موتور	۲۱
۳۸	[-]	CSL	تعداد هادی‌های هر شیار استاتور	۲۲
۱۰	[-]	ACT	میانگین پرتاب سیم‌پیچی	۲۳
۰/۰۰۰۳	[Kg.m ²]	J	ممان لختی کل	۲۴

الگوریتم محاسبه حلقه هیستریزیس لحظات راه‌اندازی در شکل ۳-۴ نشان داده شده است. این الگوریتم در پیوست به طور کامل توضیح داده شده است.



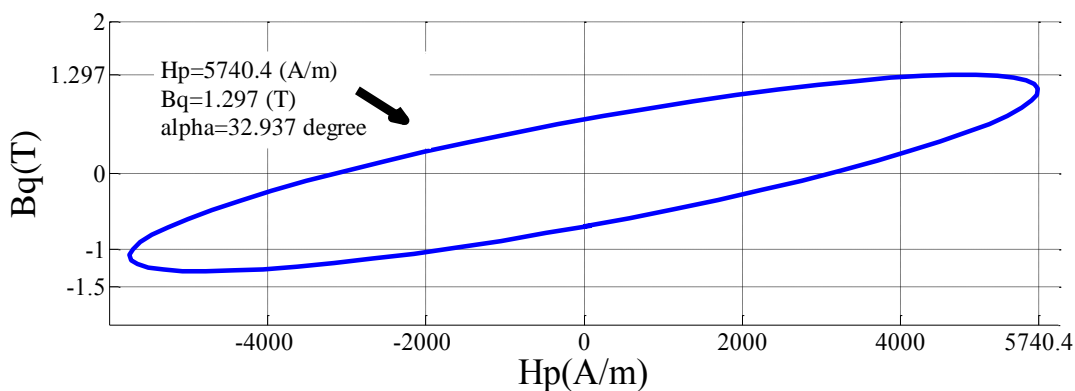
شکل ۴-۳ الگوریتم محاسبه حلقه هیستریزیس لحظات راه اندازی [۷]

خروجی های الگوریتم شکل ۴-۳، در جدول ۴-۲ یک جا آورده شده است. این خروجی ها شامل حلقه هیستریزیس لحظات راه اندازی و پارامترهای مدار معادل در لحظه ورود روتور به سرعت سنکرون برای موتور نمونه در ولتاژ نامی می باشد.

جدول ۲-۴ خروجی الگوریتم شکل ۳-۴

ردیف	نام پارامتر	علامت اختصاری	واحد	مقدار
۱	دامنه شدت میدان مغناطیسی	H_p	[A/m]	۵۷۴۰/۴
۲	دامنه هارمونیک اول چگالی شار مغناطیسی	B_q	[T]	۱/۲۹۷
۳	زاویه تاخیر	α_{max}	[degree]	۳۲/۹۳۷
۴	مقاومت سیم پیچ استاتور	R_s	[Ω /phase]	۲/۰۷۴
۵	راکتانس نشتی سیم پیچ استاتور	X_{ls}	[Ω /phase]	۱۸/۷۸۵
۶	راکتانس مغناطیس کننده	X_m	[Ω /phase]	۱۲۳/۳۲۹
۷	راکتانس روتور	X_{hr}	[Ω /phase]	۱۱۶/۳۸۲
۸	مقاومت معادل هیستریزس روتور	R_h	[Ω /phase]	۷۵/۳۹۸
۹	مقاومت تلفات هسته	R_c	[Ω /phase]	۸۰۰

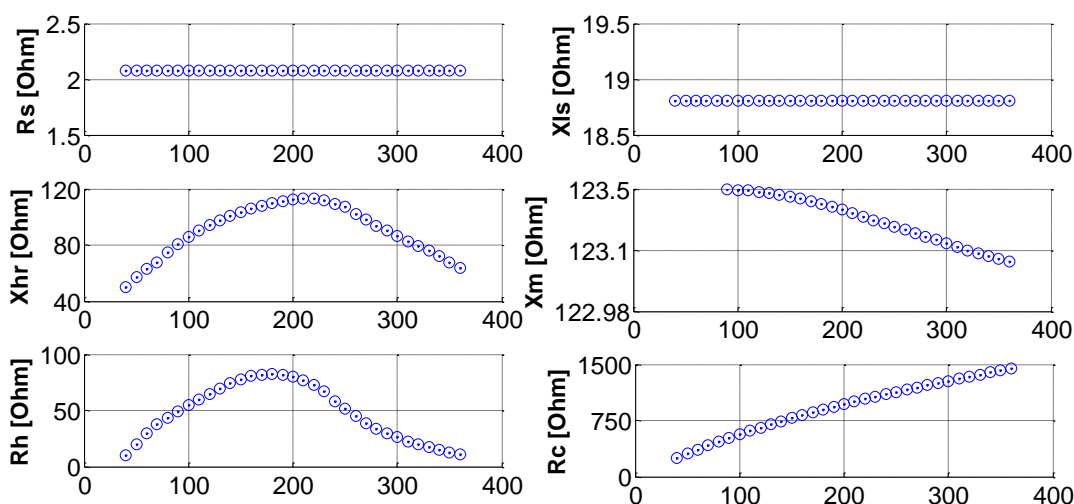
حلقه هیستریزس محاسبه شده توسط الگوریتم شکل ۳-۴ در شکل ۴-۴ نمایش داده شده است. همان طور که قبلاً گفته شد، این حلقه فقط برای لحظات شتاب گیری موتور می باشد و به محض ورود روتور به سرعت سنکرون، در صورتی که بار موتور بار حداکثری باشد، حلقه هیستریزس موتور تغییری نخواهد کرد اما اگر بار موتور از بار حداکثری کمتر باشد، حلقه هیستریزس به حلقه‌ای با زاویه تاخیر کوچک تر تغییر پیدا می کند.



شکل ۴-۴ حلقه کاری هیستریزس لحظات راه اندازی موتور هیستریزس مورد مطالعه

۳-۴ تغییرات عناصر مدار معادل در اثر تغییرات ولتاژ

یک مدار معادل با عناصر ثابت، نمی‌تواند برای همه شرایط کارکرد استفاده شود. به طور مثال، بعضی از عناصر مدار معادل به شدت وابسته به دامنه ولتاژ ورودی هستند. شکل ۴-۵ تغییرات پارامترهای مدار معادل در ازای تغییرات مقدار مؤثر ولتاژ ورودی حول نقطه کار با سطح ولتاژ ۲۰۰ ولت را نشان می‌دهد. همان طور که از شکل مشاهده می‌شود پارامتر R_s مستقل از ولتاژ ورودی می‌باشد و پارامترهای X_{ls} و X_m را نیز در محدوده وسیعی حول نقطه کار، می‌توان ثابت فرض کرد. ولی پارامترهای X_{hr} ، R_h و R_c تغییرات قابل توجهی دارند؛ بنابراین برای کاربردهای ولتاژ متغیر، یک مدار معادل با پارامترهای ثابت معتبر نخواهد بود.

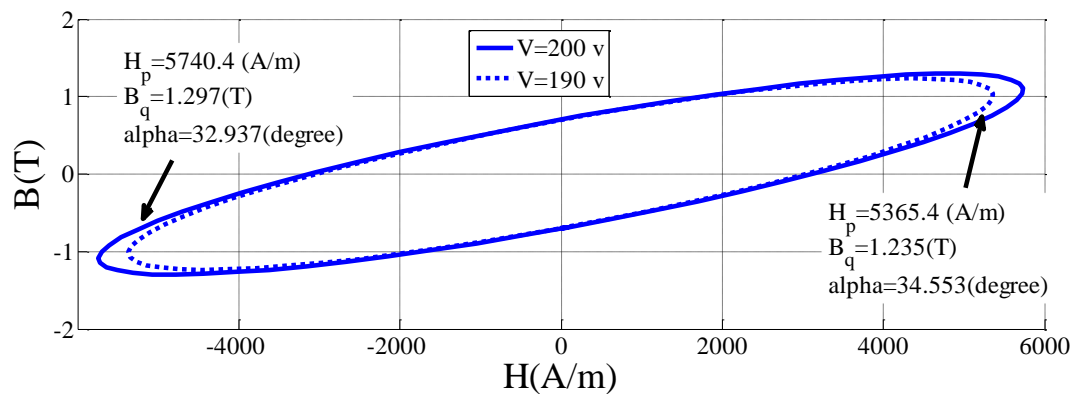


شکل ۴-۵ تغییرات پارامترهای مدار معادل برحسب مقدار مؤثر ولتاژ فاز ورودی

در جدول ۳-۴ و شکل ۴-۶ مقایسه‌ای بین حلقه‌های هیستریزس کاری و مقادیر پارامترهای مدار معادل موتور هیستریزس در هنگام شتاب گیری در ولتاژهای مؤثر ۱۹۰ و ۲۰۰ ولت انجام شده است. ملاحظه می‌شود که حتی با تغییر اندکی در ولتاژ ورودی، حلقه هیستریزس و به تبع پارامترهای مدار معادل، تغییرات قابل ملاحظه‌ای می‌نمایند.

جدول ۳-۴ مقایسه حلقه‌های هیستریزس کاری و مقادیر پارامترهای مدار معادل موتور هیستریزس در هنگام شتاب-گیری در ولتاژهای مؤثر ۱۹۰ و ۲۰۰ ولت

نام پارامتر	علامت اختصاری	واحد	$V_{rms}=190v$	$V_{rms}=200v$
دامنه شدت میدان مغناطیسی	H_p	[A/m]	۵۳۶۵/۴	۵۷۴۰/۴
دامنه هارمونیک اول چگالی شار	B_q	[T]	۱/۲۳۵	۱/۲۹۷
زاویه تاخیر	α	[degree]	۳۴/۵۵۳	۳۲/۹۳۷
مقاومت سیم‌پیچ استاتور	R_s	[Ω /phase]	۲/۰۷۴	۲/۰۷۴
راکتانس نشتی سیم‌پیچ استاتور	X_{ls}	[Ω /phase]	۱۸/۷۸۶	۱۸/۷۸۵
راکتانس مغناطیس کننده	X_m	[Ω /phase]	۱۲۳/۴۷۹	۱۲۳/۳۲۹
راکتانس روتور	X_{hr}	[Ω /phase]	۱۰۹/۷۴	۱۱۲/۳۰
مقاومت معادل هیستریزس روتور	R_h	[Ω /phase]	۸۰/۱۰۶	۷۵/۳۹۸
مقاومت تلفات هسته	R_c	[Ω /phase]	۷۵۰	۸۰۰



شکل ۴-۶ مقایسه حلقه‌های هیستریزس کاری در هنگام شتاب‌گیری در ولتاژهای مؤثر ۱۹۰ و ۲۰۰ ولت

فصل پنجم

نتایج شبیه‌سازی موتور هیستریزیس تخت نمونه

موتورهای هیستریزیس مورد استفاده در صنایع خاص، در بعضی شرایط باری کمتر از بار نامی را به حرکت در می‌آورند. در این مواقع جهت بهبود شرایط عملکردی موتور می‌توان ولتاژ تغذیه طراحی شده برای بار نامی را با توجه به بار موجود، به میزان بهینه‌ای کاهش داد تا باعث کاهش جریان استاتور و دامنه نوسانات سرعت (پدیده هانتینگ) و افزایش ضریب توان و بازده موتور شود. همچنین بارهای هارمونیکی یا تغییرات آنی بار از مشکلاتی است که اخیراً در برخی از کاربردها گزارش شده است. به عنوان مثال در موتورهای هیستریزیس مورد استفاده در صنایع هسته‌ای، حجم مایع یا گاز تزریقی به داخل سیلندرهای دوار متغیر بوده و باعث تخریب یا تاقان‌ها و از کار افتادن این نوع موتورهای سرعت بالا می‌شود.

در این فصل قصد داریم تا موتور هیستریزیس تخت طراحی شده در مرجع [۷] را توسط معادلات دینامیکی گذرای پیشنهادی در این پایان‌نامه (استخراج شده در فصل سوم) و حلقه هیستریزیس لحظات راه‌اندازی و مقادیر پارامترهای مدار معادل در لحظه ورود روتور به سرعت سنکرون (محاسبه شده در فصل چهارم) در محیط SIMULINK/MATLAB شبیه‌سازی کرده تا رفتار دینامیکی گذرای موتور مورد مطالعه در شرایط مختلف از جمله تحت شرایط بار جزئی و بار هارمونیکی مشاهده و بررسی شود. در این فصل، نتایج شبیه‌سازی را در چهار بخش زیر ارائه می‌نماییم:

- نحوه شبیه‌سازی موتور هیستریزیس مرجع [۷] توسط معادلات دینامیکی گذرای پیشنهادی
- مقایسه نتایج حاصل از معادلات دینامیکی گذرای پیشنهادی با نتایج ارائه شده در مرجع [۷]
- اثرات کاهش ولتاژ تغذیه موتور هیستریزیس در بارهای جزئی
- اثرات بارهای هارمونیکی و تغییرات آنی بار بر روی مشخصات عملکردی موتور هیستریزیس

۲-۵ نحوه شبیه‌سازی موتور هیستریزیس مرجع [۷] توسط معادلات دینامیکی گذرای

پیشنهادی

موتور هیستریزیس تخت مرجع [۷] جهت مطالعه و شبیه‌سازی در این پایان‌نامه انتخاب شده است. موتور هیستریزیس مورد نظر دارای ولتاژ سه فاز ۲ قطب با اتصال ستاره و مقدار مؤثر ولتاژ ۲۰۰ ولت، فرکانس ۱۰۰۰ هرتز، سرعت ۶۰۰۰۰ دور بر دقیقه و توان خروجی ۳۰۰ وات می‌باشد.

در شبیه‌سازی رفتار دینامیکی گذرای، اثر مقاومت معادل جریان فوکو روتور R_e نیز در نظر گرفته شده است؛ یعنی R_r ، مقاومت معادل حاصل از موازی شدن مقاومت R_h و مقاومت R_e/s می‌باشد. جهت محاسبه مقاومت معادل جریان فوکو از رابطه زیر استفاده می‌کنیم [۶]:

$$R_e = \frac{48m\rho K_w^2 N_{ph}^2 R_{oi}}{2\pi R_t t_r} \quad [\Omega] \quad (1-5)$$

که در رابطه فوق ρ مقاومت مخصوص ماده هیستریزیس می‌باشد. از رابطه (۱-۵) مقدار R_e برابر ۱۰ اهم در نظر گرفته می‌شود. جهت شبیه‌سازی رفتار دینامیکی گذرای موتور هیستریزیس، معادلاتی که بایستی در محیط SIMULINK/ MATLAB پیاده‌سازی شوند یکجا در زیر آورده شده‌اند:

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\lambda_{qs}}{dt} + \omega \lambda_{ds} \quad (2-5)$$

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\lambda_{ds}}{dt} - \omega \lambda_{qs} \quad (3-5)$$

$$v_{os} = R_s i_{os} + \frac{d\lambda_{os}}{dt} \quad (4-5)$$

$$0 = v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d\lambda_{qr}}{dt} + \omega \lambda_{dr} \quad (5-5)$$

$$0 = v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d\lambda_{dr}}{dt} - \omega \lambda_{qr} \quad (6-5)$$

$$0 = v_{or} = R_r i_{or} + \frac{d\lambda_{or}}{dt} \quad (7-5)$$

$$\lambda_{qs} = L_{ls} i_{qs} + L_m (i_{qs} + i_{qr} - i_{qc}) \quad (8-5)$$

$$\lambda_{ds} = L_{ls} i_{ds} + L_m (i_{ds} + i_{dr} - i_{dc}) \quad (9-5)$$

$$\lambda_{os} = L_{ls} i_{os} - L_m i_{oc} \quad (10-5)$$

$$\lambda_{qr} = L_{hr} i_{qr} + L_m (i_{qr} + i_{qs} - i_{qc}) \quad (11-5)$$

$$\lambda_{dr} = L_{hr} i_{dr} + L_m (i_{dr} + i_{ds} - i_{dc}) \quad (12-5)$$

$$\lambda_{or} = L_{hr} i_{or} - L_m i_{oc} \quad (13-5)$$

$$L_m \omega i_{dc} + L_m \frac{d}{dt} i_{qc} = L_m \omega (i_{ds} + i_{dr}) + L_m \frac{d}{dt} (i_{qs} + i_{qr}) - R_c i_{qc} \quad (14-5)$$

$$-L_m \omega i_{qc} + L_m \frac{d}{dt} i_{dc} = -L_m \omega (i_{qs} + i_{qr}) + L_m \frac{d}{dt} (i_{ds} + i_{dr}) - R_c i_{dc} \quad (15-5)$$

$$L_m \frac{d}{dt} i_{oc} = L_m \frac{d}{dt} (i_{os} + i_{or}) - R_c i_{oc} \quad (16-5)$$

$$T_e = \frac{m}{2} p L_m \sqrt{(i_{ds} + i_{dr})^2 + (i_{qs} + i_{qr})^2} \sqrt{i_{dr}^2 + i_{qr}^2} \sin(\alpha) \quad (17-5)$$

$$J \left(\frac{2}{P} \right) \frac{d\omega_{re}}{dt} = T_e - T_L \quad (18-5)$$

$$\frac{d\alpha}{dt} = \left(\frac{2}{P}\right)(\omega_b - \omega_{re}) \quad (19-5)$$

$$\alpha(0) = \alpha_{\max}$$

به شرط اینکه:

$$|\alpha| \leq \alpha_{\max} \quad (20-5)$$

اگر زاویه α محاسبه شده از رابطه (19-5) در شرط زیر صادق باشد:

$$\alpha > \alpha_{\max} \quad (21-5)$$

آنگاه:

$$\alpha = \alpha_{\max} \quad (22-5)$$

و اگر زاویه α محاسبه شده از رابطه (19-5) در شرط زیر صادق باشد:

$$\alpha < -\alpha_{\max} \quad (23-5)$$

آنگاه:

$$\alpha = -\alpha_{\max} \quad (24-5)$$

شبيه‌سازی موتور هيستريزيس در دستگاه مرجع سنكرون صورت مي‌گيرد؛ بنابراین در معادلات (2-5)،

(3-5)، (5-5)، (6-5) و (14-5)-(16-5) مقدار ω برابر فرکانس زاویه‌ای الکتریکی میدان گردان

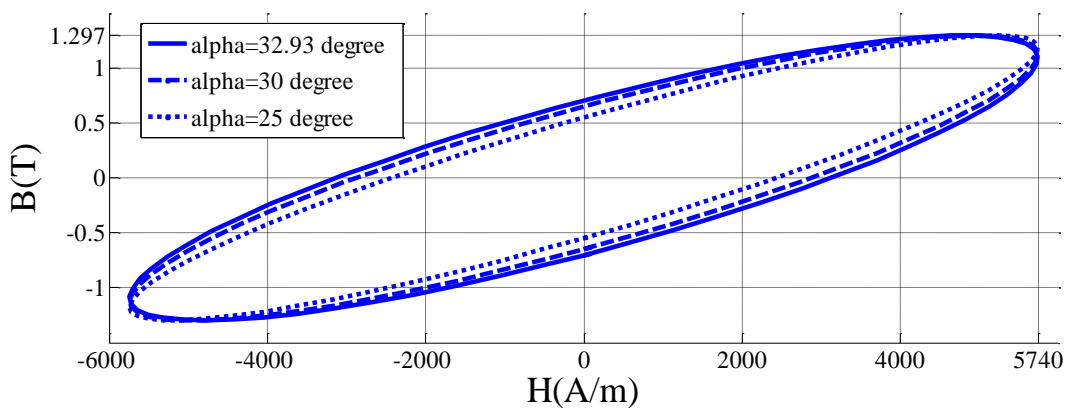
استاتور در نظر گرفته می‌شود یعنی $\omega = \omega_b$.

به خاطر عدم وابستگی پارامترهای R_s ، X_{ls} ، X_m و R_c به حلقه هيستريزيس روتور، این پارامترها در

ولتاژی مشخص، برای تمام لحظات از زمان راه‌اندازی موتور تا حالت دائمی مقداری ثابت و برابر مقدار

محاسبه شده در جدول 2-4 می‌باشند؛ اما با توجه به معادلات (الف-28) و (الف-29)، به دلیل متناسب

بودن R_h و X_{hr} بترتیب به $\sin(\alpha)$ و $\cos(\alpha)$ ، به محض ورود روتور به سرعت سنکرون و با تغییر حلقه هیستریزس لحظات راهاندازی، این پارامترها تغییر خواهند نمود. فرض می‌کنیم هنگام ورود روتور به سرعت سنکرون، بیشینه چگالی شار و شدت میدان مربوط به حلقه لحظات راهاندازی (H_p و B_q) تغییری نمی‌کنند و تغییرات حلقه هیستریزس تنها در مقدار زاویه تاخیر α می‌باشد؛ این امر به باریک شدن حلقه هیستریزس لحظات راهاندازی می‌انجامد. با مراجعه به شکل ۵-۱ این موضوع بهتر روشن می‌شود؛ بنابراین جهت محاسبه مقادیر پارامترهای R_h و X_{hr} در تمام لحظات از لحظه راهاندازی تا حالت دائمی، مقادیر زاویه تاخیر α در معادلاتشان، از معادله (۵-۱۹) دائماً به‌روز می‌شود.



شکل ۵-۱ تغییرات حلقه‌های هیستریزس تنها در مقدار زاویه تاخیر α می‌باشد و بیشینه چگالی شار و شدت میدان حلقه‌ها باهم برابر می‌باشند

۵-۳ مقایسه نتایج حاصل از معادلات دینامیکی گذرای پیشنهادی با نتایج مرجع [۷]

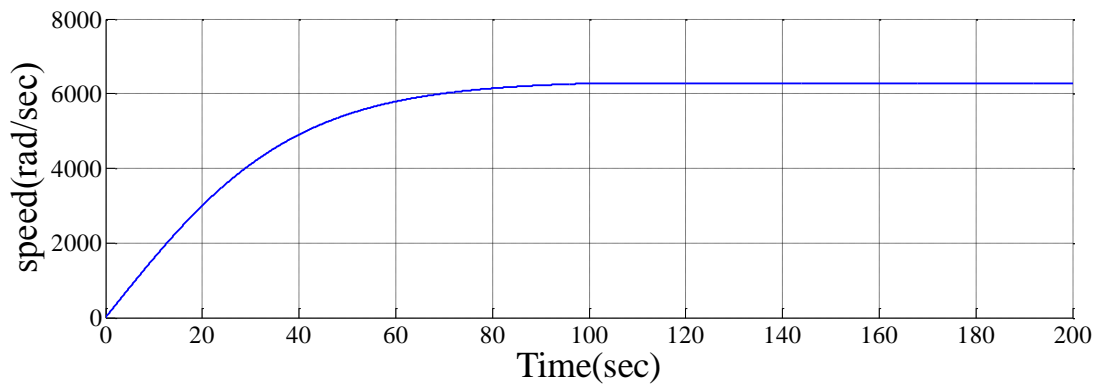
در این قسمت جهت اعتبارسنجی، نتایج حاصل از معادلات دینامیکی گذرای پیشنهادی در این پایان‌نامه را با نتایج مرجع [۷] مقایسه می‌کنیم. لازم به ذکر است که نتایج مرجع [۷] فقط مربوط به حالت دائمی موتور هیستریزس می‌باشد.

شبیه‌سازی موتور هیستریزس مورد مطالعه در این قسمت در ولتاژ موثر نامی ۲۰۰ ولت، فرکانس ۱۰۰۰ هرتز و بار نامی خروجی ۳۰۰ وات صورت گرفته است. جهت مدل‌سازی بار موتور، گشتاور بار را

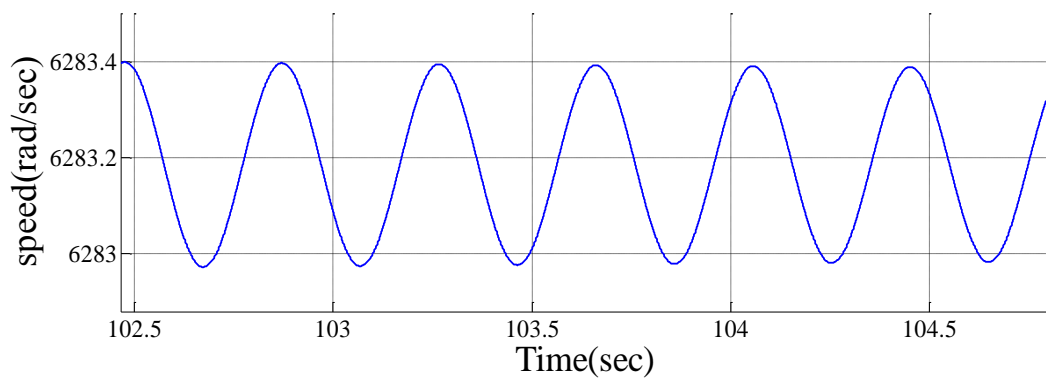
$$T_L = B\omega^2$$

متناسب با مجذور سرعت در نظر می‌گیریم یعنی به صورت

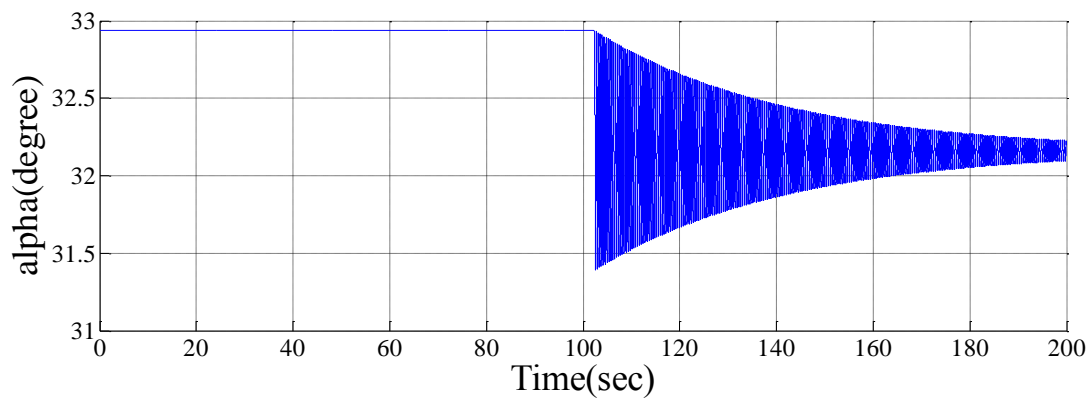
شکل ۲-۵ نمودار سرعت موتور هیستریزس مورد مطالعه را نشان می‌دهد. موتور در زمان ۱۰۲/۴ ثانیه به سرعت سنکرون می‌رسد اما به دلیل وجود پدیده هانتینگ در موتورهای هیستریزس، روتور حول سرعت سنکرون با فرکانس ۲/۵ هرتز شروع به نوسان می‌کند و بعد از مدت زمانی این نوسانات میرا می‌شوند. همان طور که از شکل ۳-۵ مشخص است، به دلیل طراحی بهینه و نزدیک بودن بار موتور به بار حداکثری، دامنه نوسانات سرعت مقداری ناچیز می‌باشد. شکل ۴-۵ تغییرات زاویه تاخیر α را نمایش می‌دهد. همان طور که قبلاً بیان شد، از ابتدای راه‌اندازی تا لحظه ورود روتور به سرعت سنکرون، تمام نقاط روتور تنها یک حلقه هیستریزس مشخصی را دور می‌زنند. به محض ورود روتور به سرعت سنکرون به علت عدم برابری گشتاور الکترومغناطیسی و گشتاور بار، حلقه هیستریزس به حلقه‌ای با زاویه تاخیر کمتر تغییر پیدا کرده تا گشتاور الکترومغناطیسی با گشتاور بار برابر شود. شکل ۷-۵ کاهش گشتاور الکترومغناطیسی را در لحظه ورود به سنکرون نشان می‌دهد. با استفاده از فلوجارت شکل ۳-۴، حلقه هیستریزس لحظات راه‌اندازی با زاویه تاخیر ۳۲/۹۳۷ درجه و با استفاده از معادله (۳-۷۳)، حلقه هیستریزس حالت دائمی با زاویه تاخیر ۳۲/۱۶ درجه به دست خواهد آمد. این دو حلقه هیستریزس در شکل ۵-۵ نشان داده شده‌اند. به دلیل اختلاف ناچیز گشتاور الکترومغناطیسی و گشتاور بار یا به عبارتی به دلیل نزدیک بودن گشتاور بار به گشتاور حداکثری، تغییرات زاویه‌های تاخیر حلقه‌های هیستریزس لحظات راه‌اندازی و حالت دائمی بسیار ناچیز (۰/۷ درجه) می‌باشد. همانطور که قبلاً بیان شد از جمله مزایای موتورهای هیستریزس، دارا بودن مشخصه گشتاور مسطح و جریان راه‌اندازی پایین و ثابت می‌باشد. این دو ویژگی را می‌توان به ترتیب در شکل ۷-۵ و شکل ۸-۵ مشاهده نمود. در شکل ۸-۵ جریان راه‌اندازی ۲/۵۸ آمپر و جریان حالت دائمی ۲/۳۶۵ آمپر می‌باشد. مقادیر حالت دائمی ضریب توان و بهره به ترتیب ۰/۲۸۷ و ۷۳/۴ درصد می‌باشد. همچنین نتایج ارایه شده در مرجع [۷] در شکل ۹-۵ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود کلیه نتایج ارایه شده در این قسمت در حالت دائمی با نتایج ارائه‌شده در مرجع [۷] مطابقت دارد.



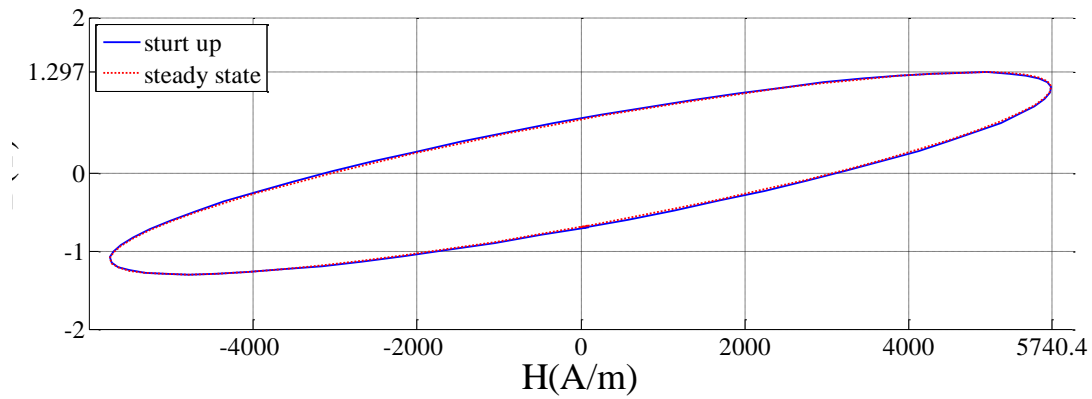
شکل ۲-۵ نمودار سرعت در شرایط ولتاژ و بار نامی



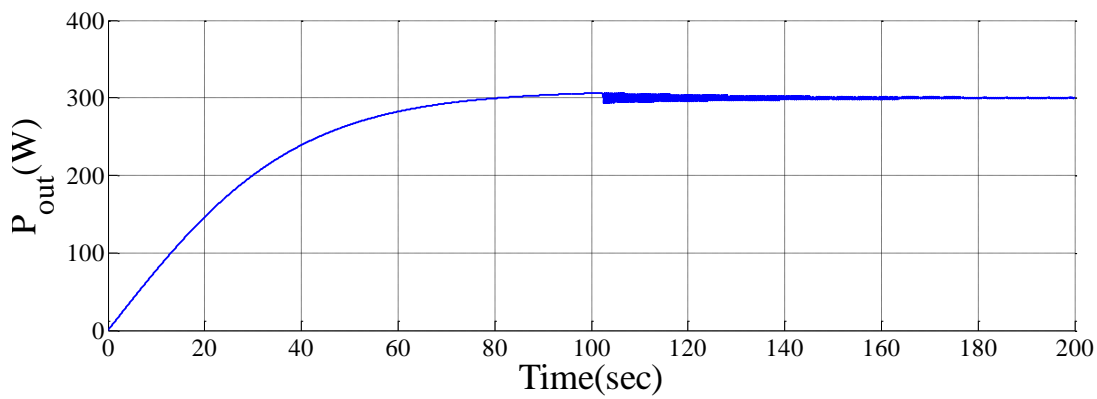
شکل ۳-۵ پدیده هانتینگ در شرایط ولتاژ و بار نامی



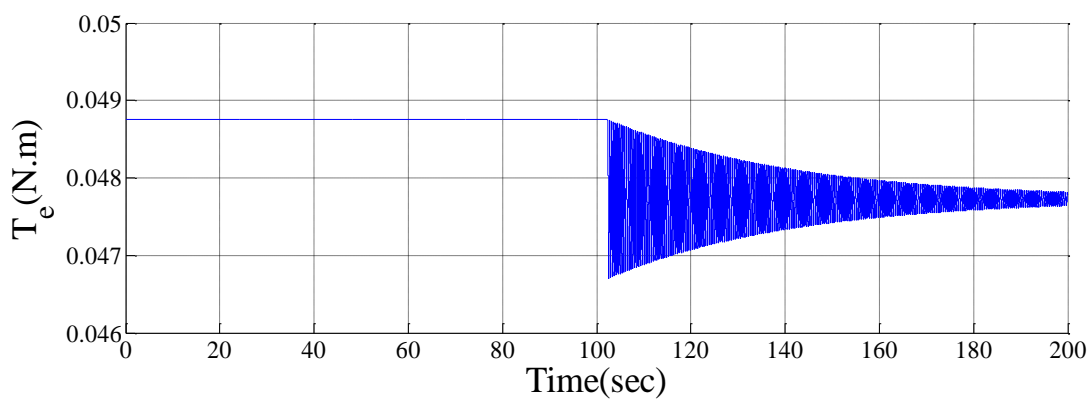
شکل ۴-۵ زاویه تاخیر موتور هیستریزس در شرایط ولتاژ و بار نامی



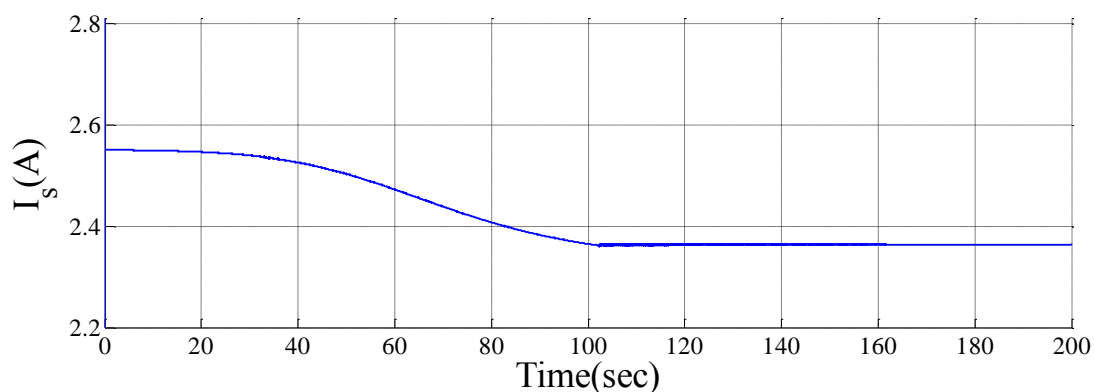
شکل ۵-۵ حلقه‌های هیستریزس لحظات راه‌اندازی و حالت دایمی موتور مورد مطالعه در مقادیر نامی



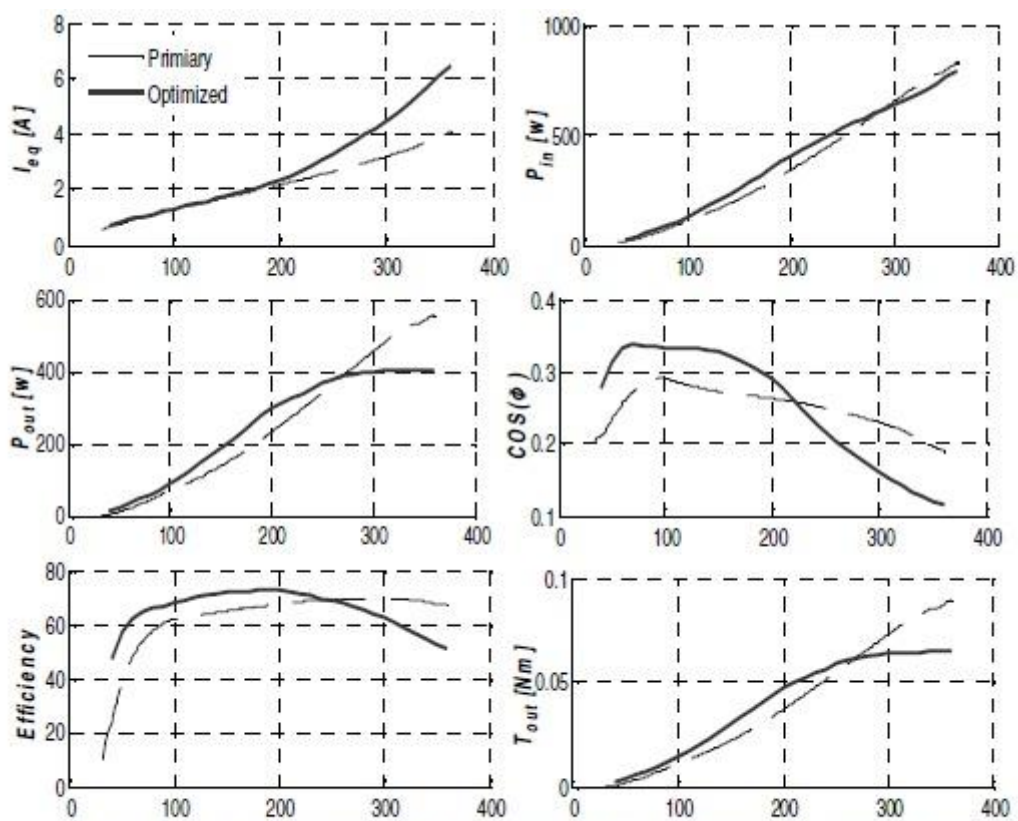
شکل ۶-۵ توان خروجی موتور در شرایط ولتاژ و بار نامی



شکل ۷-۵ گشتاور الکترومغناطیسی موتور در شرایط ولتاژ و بار نامی



شکل ۸-۵ جریان مؤثر استاتور در شرایط ولتاژ و بار نامی



Performance characteristics of initial and optimum design machines versus phase voltage

شکل ۹-۵ نتایج ارایه شده در مرجع [۷]

۴-۵ اثرات کاهش ولتاژ تغذیه موتور هیستریزس در بارهای جزئی

یکی از پارامترهای مهم در طراحی موتورهای هیستریزس، تعیین سطح ولتاژ تغذیه موتور می‌باشد.

عدم انتخاب صحیح ولتاژ تغذیه، بر عملکرد این نوع موتورها تاثیر منفی خواهد گذاشت. در صورتی که

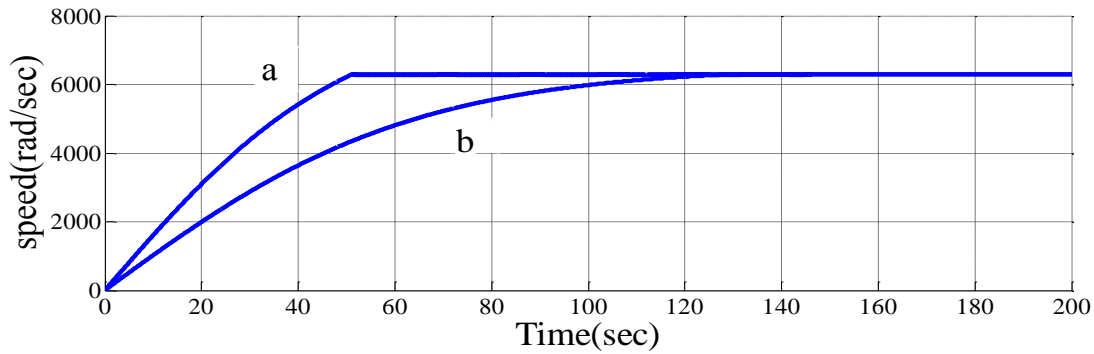
ولتاژ تغذیه موتور هیستریزیس بیشتر از مقدار بهینه انتخاب شود، ضریب توان و بازده کاهش و جریان استاتور و دامنه نوسانات پدیده هانتینگ افزایش خواهد یافت. ولتاژ بهینه در یک بار مشخص ولتاژی است که در صورت کاهش ناچیز آن، موتور به سرعت سنکرون نرسد. ولتاژ موثر نامی ۲۰۰ ولت طراحی شده برای بار خروجی ۳۰۰ وات در مرجع [۷] بهینه بوده و در صورت کاهش ۵ درصدی ولتاژ تغذیه، موتور به سرعت سنکرون نخواهد رسید.

با توجه به کاربردهای خاص موتورهای هیستریزیس در صنعت، این موتورها اغلب باری کمتر از بار نامی را به حرکت در می آورند. اعمال ولتاژ بهینه طراحی شده برای بار نامی در این شرایط، باعث کاهش ضریب توان و بازدهی و افزایش جریان استاتور و دامنه نوسانات پدیده هانتینگ خواهد شد. لذا در شرایط بار جزئی، جهت بهبود عملکرد موتور باید ولتاژ تغذیه نامی موتور را کاهش داد. مقدار بهینه ولتاژ در یک بار جزئی مشخص، ولتاژی است که در صورت کاهش جزئی آن، موتور به سرعت سنکرون نرسد.

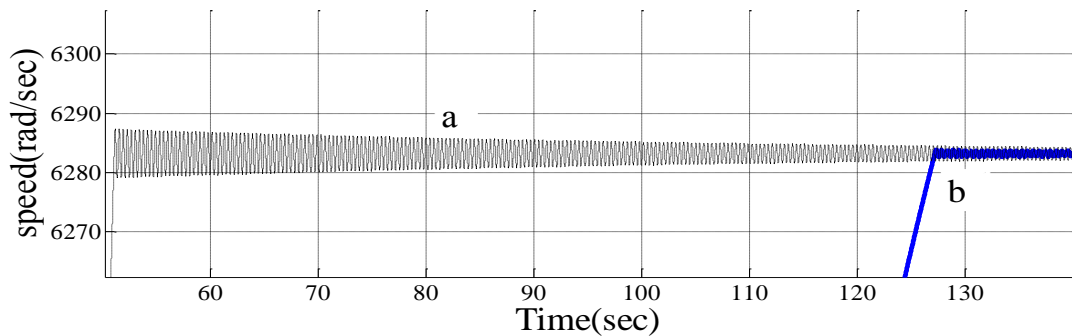
در این قسمت جهت بررسی اثرات کاهش ولتاژ تغذیه موتور هیستریزیس در بارهای جزئی فرض می کنیم که موتور هیستریزیس مورد مطالعه، در شرایط ۶۰ درصد بار نامی کار می کند. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که در صورت اعمال ولتاژ نامی ۲۰۰ ولت، جریان استاتور و دامنه نوسانات پدیده هانتینگ افزایش و ضریب توان و بازده موتور کاهش می یابد؛ اما در صورت اعمال ولتاژ موثر ۱۵۰ ولت، عملکرد موتور به طور قابل ملاحظه ای بهبود می یابد.

نمودار سرعت موتور هیستریزیس مورد مطالعه در دو حالت ولتاژ تغذیه ۲۰۰ ولت و بار ۶۰ درصد بار نامی و همچنین ولتاژ ۱۵۰ ولت و بار ۶۰ درصد بار نامی در شکل ۵-۱۰ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۵-۱۱، علت بیشتر بودن دامنه نوسانات پدیده هانتینگ در ولتاژ ۲۰۰ ولت نسبت به ولتاژ ۱۵۰ ولت این است که در ولتاژ ۲۰۰ ولت اختلاف زاویه های تاخیر لحظات راه اندازی و حالت دائمی ۱۴ درجه می باشد در حالی که این مقدار برای ولتاژ ۱۵۰ ولت ۳ درجه است. هرچه اختلاف زاویه های

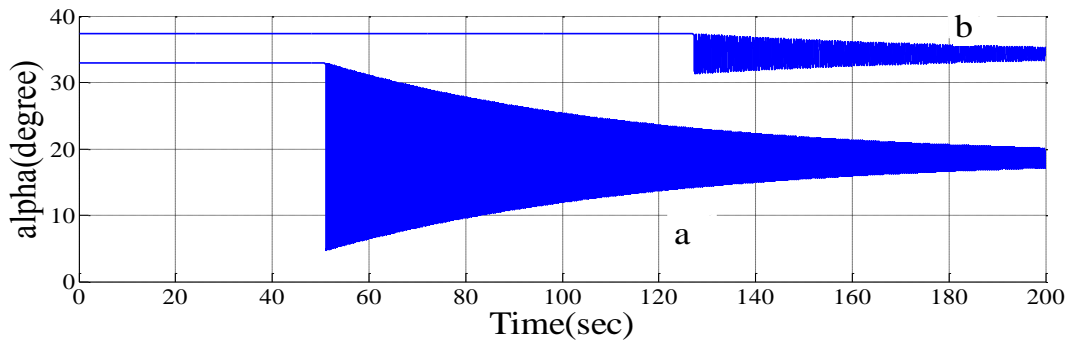
تاخیر لحظات راه‌اندازی و حالت دایمی کمتر باشد، موتور به شرایط بهینه خود نزدیکتر می‌باشد. این موضوع را این طور نیز می‌توان بیان نمود که هرچه بار موتور به بار حداکثری خود نزدیک‌تر باشد، عملکرد موتور بهتر خواهد بود؛ لذا با توجه به بار موجود، بار حداکثری را با کاهش ولتاژ به مقدار ۱۵۰ ولت به بار موتور نزدیک می‌کنیم. این موضوع از روی شکل ۵-۱۳ قابل درک می‌باشد.



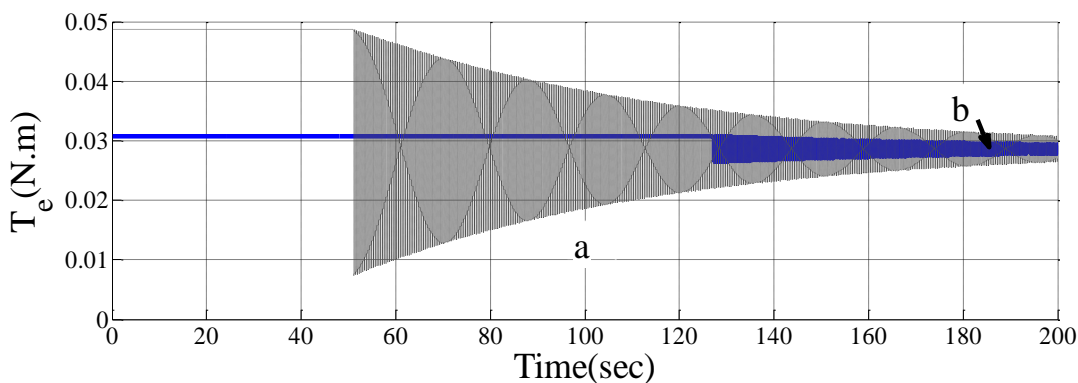
شکل ۵-۱۰ سرعت موتور a: $P_{out}=180W$ و $V=200v$ b: $P_{out}=180W$ و $V=150v$



شکل ۵-۱۱ دامنه نوسانات پدیده هانتینگ a: $P_{out}=180W$ و $V=200v$ b: $P_{out}=180W$ و $V=150v$



شکل ۵-۱۲ زاویه تاخیر موتور a: $P_{out}=180W$ و $V=150v$ b: $P_{out}=180W$ و $V=200v$



شکل ۵-۱۳ گشتاور الکترومغناطیسی a: $P_{out}=180W$ و $V=200v$ b: $P_{out}=180W$ و $V=150v$

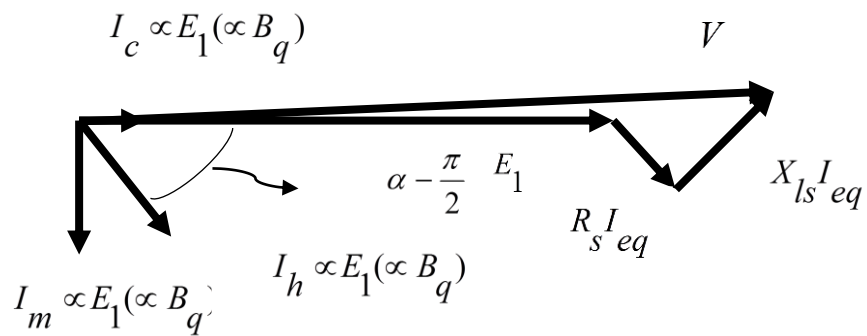
نتایج شبیه‌سازی حالت دائمی موتور هیستریزیس مورد مطالعه توسط معادلات دینامیکی گذرای پیشنهادی در این پایان‌نامه، در جدول ۵-۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در صورتی که بار موتور ۶۰ درصد بار نامی باشد، با کاهش ولتاژ تغذیه موتور از مقدار مؤثر ۲۰۰ ولت به مقدار ۱۵۰ ولت، شرایط عملکردی موتور به طور قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌یابد.

جدول ۵-۱ مقادیر حالت دائمی موتور نمونه در شرایط نامی، ولتاژ نامی و بار جزئی، ولتاژ کاهش یافته و بار جزئی

$0.75V_N$ $0.6T_{LN}$	V_N $0.6T_{LN}$	V_N T_{LN}	
0.303 (1.055 PF _N)	0.205 (0.714 PF _N)	0.287 (PF _N)	PF
74.6 (1.016 η_N)	61 (0.831 η_N)	73.4 (η_N)	$\eta(\%)$
1.765 (0.746 I _N)	2.388 (1.01 I _N)	2.365 (I _N)	I _s (A)

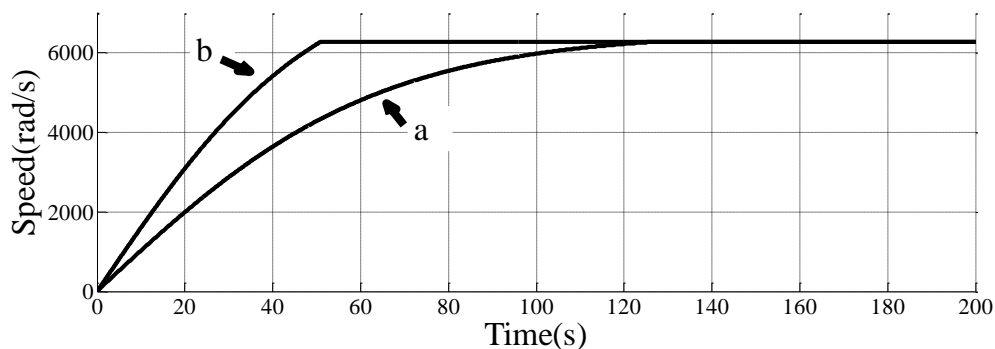
با کاهش ولتاژ استاتور، حلقه هیستریزیس به حلقه‌ای کوچک‌تر تغییر پیدا خواهد کرد؛ یعنی H_p و B_q کوچک‌تر و زاویه تاخیر α بزرگتر می‌شود. با توجه به متناسب بودن اندازه‌های E_1 و I_c و I_m به B_q و اندازه I_h به H_p ، تمامی این پارامترها با کاهش ولتاژ کوچک می‌شوند. از طرفی با افزایش زاویه تاخیر α ، فاز I_h نیز کوچک خواهد شد. کاهش اندازه‌های I_c ، I_m و همچنین کاهش فاز I_h ، اندازه جریان استاتور را کاهش و ضریب توان را افزایش می‌دهد. همچنین کمتر شدن ولتاژ و جریان استاتور و بهبود ضریب توان، افزایش بازدهی موتور را در پی خواهد داشت. دیاگرام برداری مدار معادل شکل ۴-۱ که

در شکل ۱۴-۵ نشان داده شده است، گویای مطالب فوق می‌باشد.



شکل ۱۴-۵ دیاگرام برداری مدار معادل شکل ۱-۴

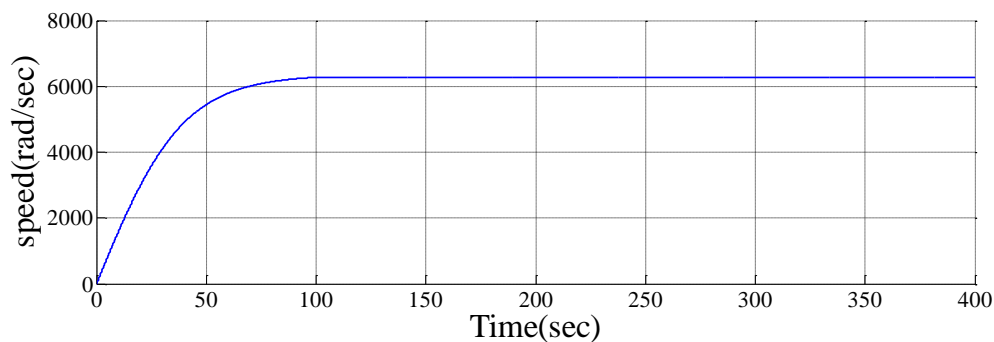
جهت کاهش زمان راه‌اندازی در ولتاژ ۱۵۰ ولت، می‌توان موتور هیستریز را با ولتاژ ۲۰۰ ولت راه‌اندازی نموده و در زمان ورود روتور به سرعت سنکرون، ولتاژ را به مقدار ۱۵۰ ولت کاهش دهیم. این نحوه راه‌اندازی در شکل ۱۵-۵ نشان داده شده است.



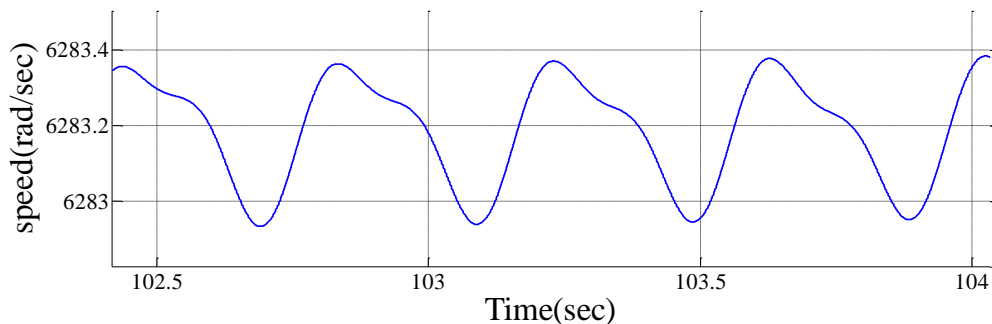
شکل ۱۵-۵ نمودار سرعت a: $P_{out}=180W$ و $V=150v$ b: $P_{out}=180W$ و $V_{syn}=200v$ و $V_{sys}=150v$

۵-۵ اثرات بارهای هارمونیک و تغییرات آنی بار بر مشخصات عملکردی موتور هیستریز
 بارهای هارمونیک و تغییرات آنی بار از جمله مشکلاتی است که اخیراً در برخی از کاربردها به خصوص در صنایع هسته‌ای گزارش شده است. با توجه به کاربرد این نوع موتورها در صنایع دفاعی، بارهای هارمونیک باعث افزایش تولید نویز شده که این موضوع مطلوب نمی‌باشد. بارهای هارمونیک و تغییرات لحظه‌ای بار، اثرات مخربی بر روی قطعات مکانیکی نظیر یاتاقان‌ها گذاشته و باعث افزایش لرزش موتور خواهد شد.

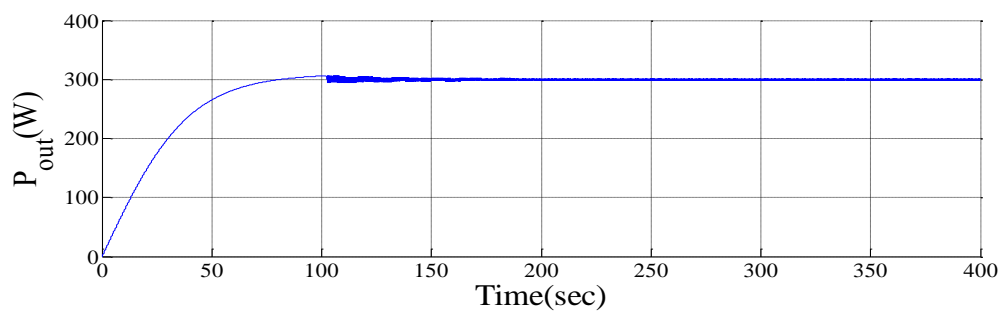
جهت مدلسازی بار هارمونیکی، رابطه گشتاور را به صورت رابطه $T_L(1+A\sin(\omega t))$ در نظر می‌گیریم. فرض می‌کنیم این بار هارمونیکی دارای فرکانس نوسانات ۵ هرتز و دامنه ۰/۰۱ نیوتن متر می‌باشد. گشتاور T_L را نیز همانند قبل متناسب با مجذور سرعت در نظر می‌گیریم. نتایج نشان می‌دهد که حتی با میرا شدن نوسانات پدیده هانتینگ، به دلیل هارمونیکی بودن بار، در مشخصه‌های موتور هیستریز نوساناتی با فرکانس ۵ هرتز وجود دارد. از دیگر اثرات نامطلوب بارهای هارمونیکی با توجه به شکل ۵-۲۱، تغییرات مداوم حلقه هیستریز در حالت دائمی می‌باشد. در صورتی که بتوانیم حلقه‌های جزئی را مدل‌سازی نماییم خواهیم دید این تغییرات مداوم حلقه‌های هیستریز در حالت دائمی، تلفات زیادی را در پی خواهد داشت.



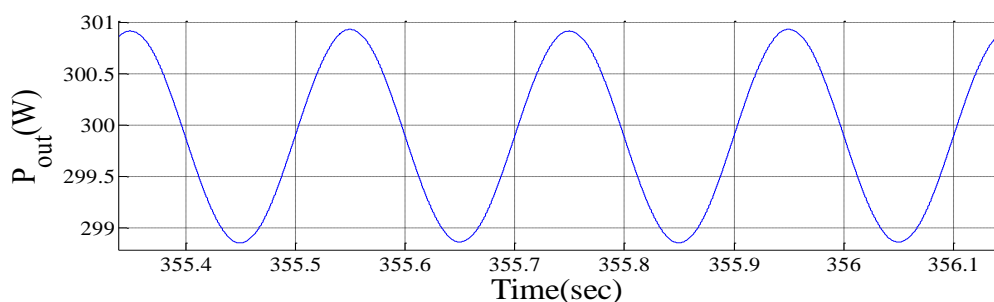
شکل ۵-۱۶ نمودار سرعت در بار هارمونیکی با فرکانس ۵ هرتز و دامنه ۰/۰۱ نیوتن متر



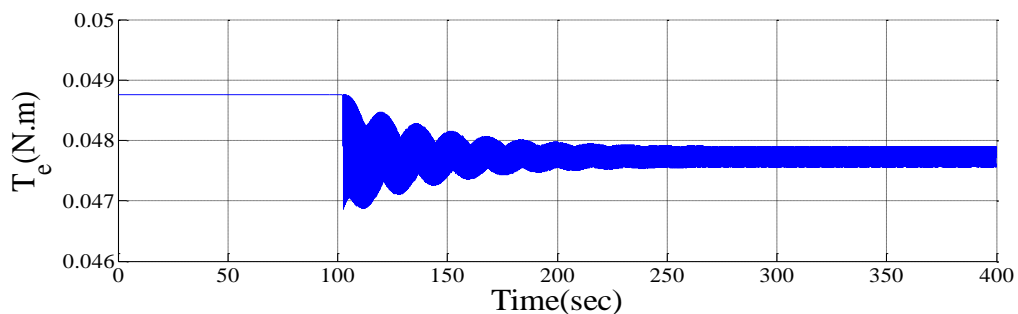
شکل ۵-۱۷ پدیده هانتینگ در بار هارمونیکی با فرکانس ۵ هرتز و دامنه ۰/۰۱ نیوتن متر



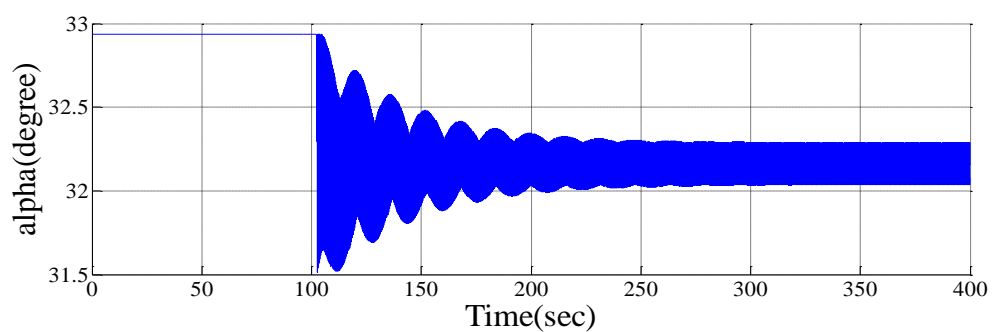
شکل ۵-۱۸ توان خروجی در بار هارمونیک با فرکانس ۵ هرتز و دامنه ۰/۰۱ نیوتن متر



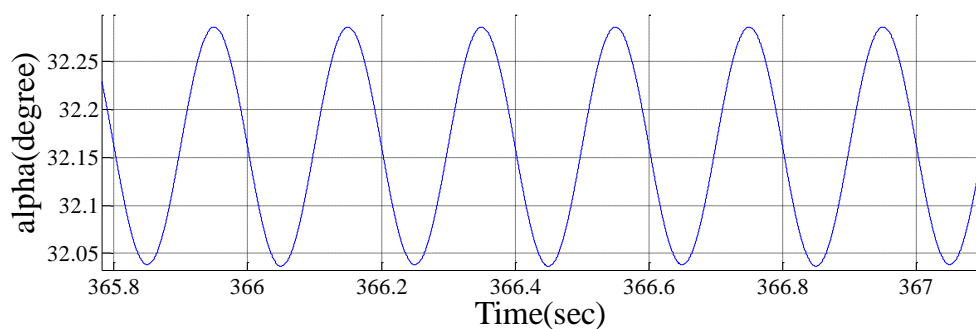
شکل ۵-۱۹ بزرگ‌نمایی توان خروجی در بار هارمونیک با فرکانس ۵ هرتز و دامنه ۰/۰۱ نیوتن متر



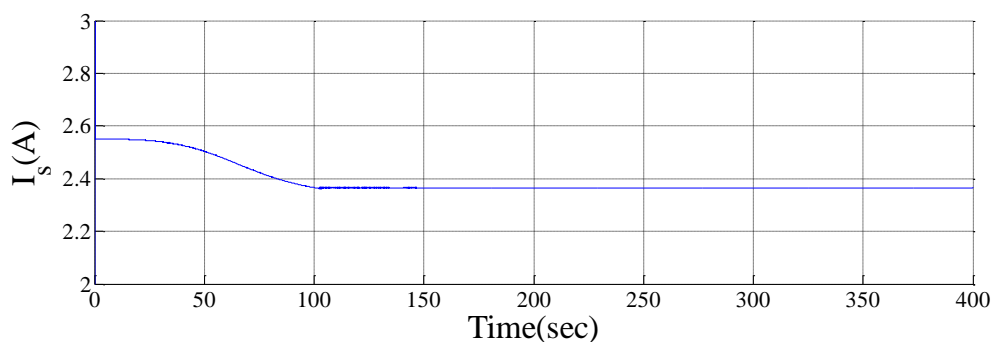
شکل ۵-۲۰ گشتاور الکترومغناطیسی در بار هارمونیک با فرکانس ۵ هرتز و دامنه ۰/۰۱ نیوتن متر



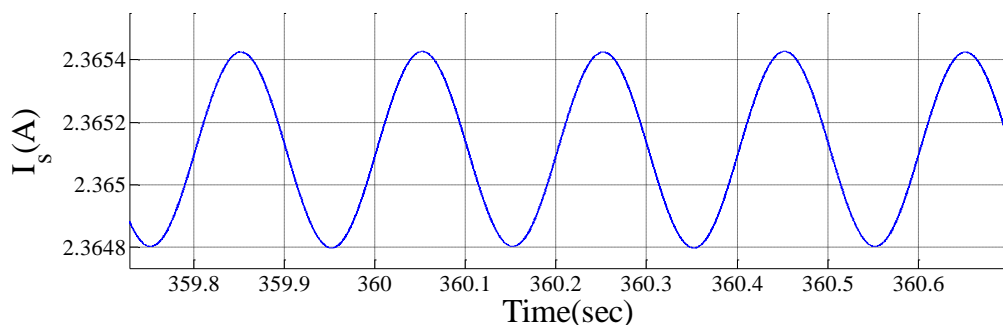
شکل ۵-۲۱ زاویه تاخیر در بار هارمونیک با فرکانس ۵ هرتز و دامنه ۰/۰۱ نیوتن متر



شکل ۵-۲۲ بزرگ‌نمایی زاویه تاخیر در بار هارمونیک با فرکانس ۵ هرتز و دامنه ۰/۰۱ نیوتن متر



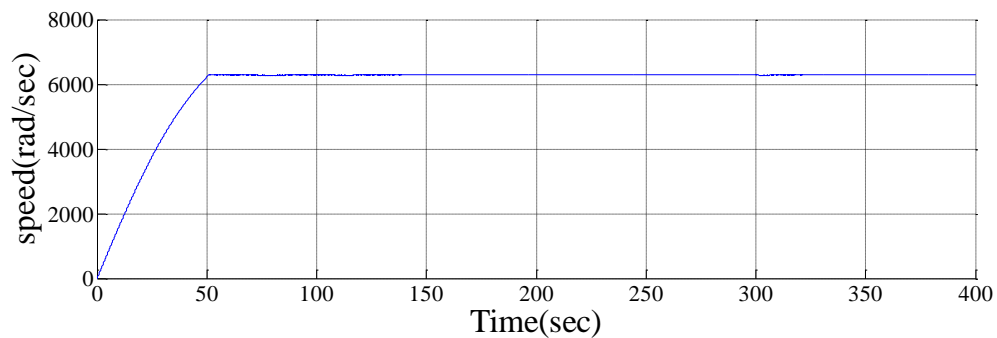
شکل ۵-۲۳ جریان مؤثر استاتور در بار هارمونیک با فرکانس ۵ هرتز و دامنه ۰/۰۱ نیوتن متر



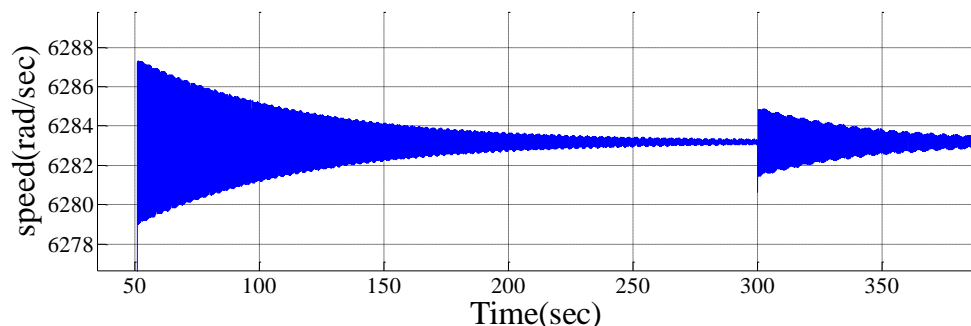
شکل ۵-۲۴ بزرگ‌نمایی جریان استاتور در بار هارمونیک با فرکانس ۵ هرتز و دامنه ۰/۰۱ نیوتن متر

در این قسمت اثر تغییر آنی بار در حین حرکت موتور را بررسی خواهیم نمود. فرض می‌کنیم موتور هیستریزیس مورد مطالعه با اعمال ولتاژ نامی ۲۰۰ ولت و ۶۰ درصد بار نامی شروع به حرکت نموده و بعد از ۳۰۰ ثانیه، بار به مقدار ۸۵ درصد بار نامی افزایش می‌یابد. همچنین فرض می‌کنیم گشتاور بار هارمونیک (با فرکانس ۵ هرتز و دامنه ۰/۰۱ نیوتن متر) بوده و متناسب با مجذور سرعت می‌باشد.

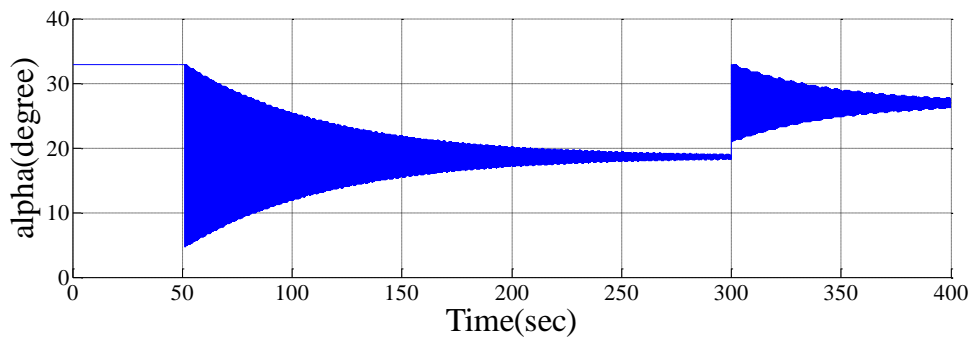
همان‌طور که از شکل ۵-۲۶ مشاهده می‌شود، در صورت تغییر آنی بار به دلیل تغییرات حلقه هیستریزیس، دامنه نوسانات هانتینگ افزایش می‌یابد و مدت زمانی طول خواهد کشید تا این دامنه نوسانات میرا شود. البته به دلیل هارمونیکی بودن بار، سرعت در حالت دایمی دارای نوساناتی با فرکانس نوسانات بار هارمونیکی خواهد بود. به دلیل تغییرات حلقه هیستریزیس بلافاصله بعد از تغییر آنی بار، مشخصات عملکردی موتور تغییر پیدا خواهند نمود. ضریب توان موتور قبل از ثانیه ۳۰۰ برابر $0/۲۱$ و بعد از تغییرات آنی بار در حالت دایمی برابر $0/۲۶$ خواهد شد. همچنین بازده موتور قبل از ثانیه ۳۰۰ برابر $0/۶۱$ و بعد از تغییرات بار در حالت دایمی برابر $0/۷$ خواهد شد. جریان استاتور نیز بعد از تغییرات آنی بار کاهش پیدا می‌کند. بنابراین افزایش بار در ثانیه ۳۰۰ باعث بهبود عملکرد موتور می‌شود؛ زیرا با افزایش بار، بار موتور به بار حداکثری نزدیک‌تر خواهد شد.



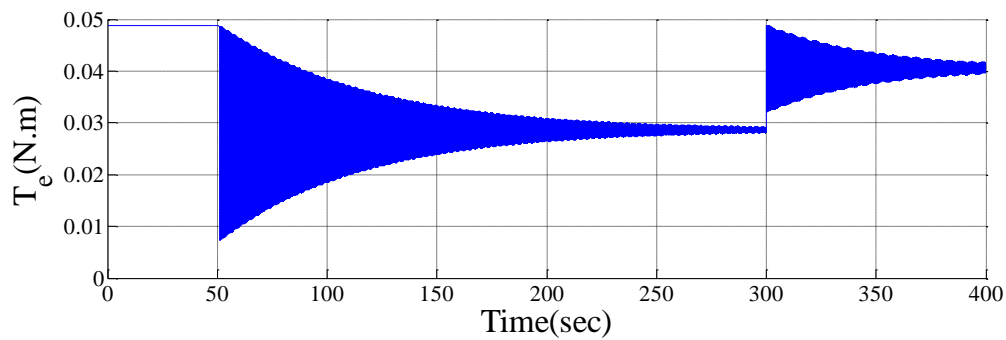
شکل ۵-۲۵ نمودار سرعت در شرایط بار هارمونیکی و تغییر آنی بار در زمان ۳۰۰ ثانیه



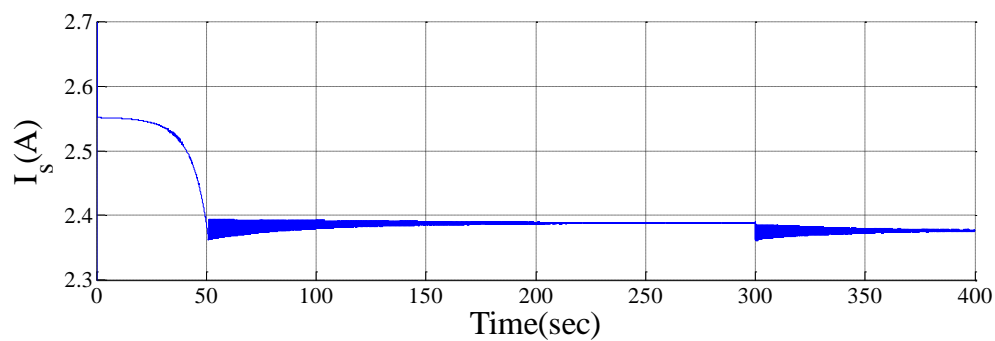
شکل ۵-۲۶ بزرگ‌نمایی سرعت در شرایط بار هارمونیکی و تغییر آنی بار در زمان ۳۰۰ ثانیه



شکل ۵-۲۷ زاویه تاخیر در شرایط بار هارمونیک و تغییر آنی بار در زمان ۳۰۰ ثانیه



شکل ۵-۲۸ گشتاور الکترومغناطیسی در شرایط بار هارمونیک و تغییر آنی بار در زمان ۳۰۰ ثانیه



شکل ۵-۲۹ جریان مؤثر استاتور در شرایط بار هارمونیک و تغییر آنی بار در زمان ۳۰۰ ثانیه

فصل ششم

نتیجه‌گیری و آرایه پیشنهادات

۶-۱ جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف از نگارش این پایان‌نامه، استخراج معادلات دینامیکی گذرای موتور هیستریزیس جهت بررسی عملکرد این نوع خاص از موتورهای الکتریکی بوده است. همان‌طور که گفته شد معادلات دینامیکی گذرای و همچنین مدار معادل‌های ارایه شده تاکنون، توانایی مدل‌سازی رفتار دینامیکی گذرای موتور هیستریزیس در بارهای جزئی را ندارند. معادلات دینامیکی گذرای پیشنهادی در این پایان‌نامه قادر به توصیف و نمایش پدیده هانتینگ، اثر بارهای جزئی و هارمونیکی بر روی موتور، اثر تغییرات بار و تغذیه ورودی بر عملکرد دینامیکی گذرای و مشخصات حالت دائمی متعاقب موتور می‌باشد. مدل‌سازی ارایه شده در این پایان‌نامه مدار معادلی در دستگاه qdo معرفی می‌نماید که با محاسبه پارامترهای مدل مداری موتور به صورت لحظه‌ای، قادر به شبیه‌سازی موتور هیستریزیس از لحظه راه‌اندازی تا حالت دائمی تحت شرایط مختلف می‌باشد.

در این پایان‌نامه موتور هیستریزیس طراحی شده در مرجع [۷] مورد شبیه‌سازی‌های لازم قرار گرفت و نتایجی استخراجی به صورت یک‌جا و خلاصه در زیر ارایه گردیده است:

- هرچه بار موتور هیستریزیس به بار حداکثری نزدیک‌تر باشد عملکرد موتور بهتر خواهد بود.
- در بارهای جزئی جهت بهبود عملکرد موتور هیستریزیس، ولتاژ موتور باید از مقدار نامی کاهش پیدا نماید.
- ولتاژ بهینه در هر بار مشخص (چه بار حداکثری و چه بار جزئی) ولتاژی است که در صورت کاهش ناچیز آن، موتور به سرعت سنکرون نرسد. موتور مورد مطالعه تحت بار نامی ۳۰۰ وات، در ولتاژ نامی ۲۰۰ ولت بهینه می‌باشد و در صورت کاهش ۵ درصدی ولتاژ، موتور به سرعت سنکرون نخواهد رسید.
- در صورتی که بار موتور مورد مطالعه ۶۰ درصد بار نامی باشد اعمال ولتاژ نامی باعث افزایش جریان استاتور و دامنه نوسانات هانتینگ و کاهش ضریب توان و بازده خواهد شد.

- ولتاژ بهینه برای موتور مورد مطالعه در باری برابر با ۶۰ درصد بار نامی، ۱۵۰ ولت می‌باشد. عملکرد موتور در ولتاژ ۱۵۰ ولت در مقایسه با ولتاژ ۲۰۰ ولت به صورت چشم‌گیری بهبود می‌یابد.
- در بارهای هارمونیک، حتی با میرا شدن نوسانات پدیده هانتینگ، مشخصات موتور نوسانی با فرکانس نوسانات بار هارمونیک خواهد بود.
- از جمله اثرات مهم نامطلوب بارهای هارمونیک، تغییرات مداوم حلقه هیستریزس در حالت دایمی می‌باشد. در صورت که بتوانیم حلقه‌های جزئی را در مدل ارایه شده مدل‌سازی نماییم خواهیم دید این تغییرات مداوم حلقه‌های هیستریزس در حالت دایمی، تلفات زیادی را در پی خواهد داشت.

۲-۶ پیشنهادات

- ✓ ساخت نمونه آزمایشگاهی موتور هیستریزس مرجع [۷] و مقایسه نتایج آزمایش‌ها با نتایج حاصل از شبیه‌سازی موتور توسط معادلات دینامیکی گذرای پیشنهادی
- ✓ مدل‌سازی تلفات پارازیتیک و حلقه‌های جزئی
- ✓ در نظر گرفتن اثرات تحریک اضافی موقت
- ✓ اثرات فرکانس و عدم تعادل ولتاژهای تغذیه بر روی عملکرد موتور هیستریزس
- ✓ اقدامات مؤثر در جهت کاهش اثرات پدیده هانتینگ
- ✓ اثرات هارمونیک‌های ولتاژ و جریان ناشی از اینورتر تغذیه کننده موتور هیستریزس بر روی عملکرد موتور
- ✓ افزایش ضریب قدرت و بازده موتورهای هیستریزس
- ✓ استفاده از نرم‌افزارهای اجزا محدود جهت بالابردن دقت مدل‌سازی موتورهای هیستریزس

پیوست

مرحله مربوط به «محاسبه پارامترهای مدار معادل، جریان و ولتاژ ورودی» از الگوریتم شکل ۳-۴، در این قسمت شرح داده می‌شود.

از آنجایی که تئوری و توصیف برخی از عناصر مدار معادل موتور هیستریزیس با موتور القایی مشترک می‌باشد، تئوری موتور القایی را می‌توان با مقداری تغییرات، در طراحی و محاسبه بعضی پارامترهای مدار معادل موتور هیستریزیس استفاده نمود. جهت محاسبه پارامترهای مدار معادل، جریان و ولتاژ ورودی شکل ۴-۱، از روش ارائه شده در مرجع [۷] استفاده خواهیم نمود:

محاسبه R_s : جهت محاسبه R_s ، ابتدا تعداد دور بر فاز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$N_{ph} = \frac{S \times CSL}{2m} \quad (\text{الف-۱})$$

سپس متوسط طول یک هادی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$LMC = R_{oi} + \frac{2\pi R_{av} \gamma \times ACT}{S} \quad [mm] \quad (\text{الف-۲})$$

که $R_{av} = (R_o - R_i)/2$ و γ برای ماشین دو قطب $1/3$ و برای ماشین چهار قطب $1/5$ در نظر گرفته می‌شود. بعد از تعیین N_{ph} و LMC ، طول سیم بر فاز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$L_{ph} = 2N_{ph} \times LMC \quad [mm] \quad (\text{الف-۳})$$

سپس می‌توان سطح مقطع سیم را از رابطه زیر محاسبه نمود:

$$q_1 = \pi \left(\frac{d}{2} \right)^2 \quad [mm^2] \quad (\text{الف-۴})$$

در نهایت مقاومت بر فاز از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$R_s = \frac{0.001 L_{ph}}{\sigma q_1} \quad [\Omega / phase] \quad (\text{الف-۵})$$

که σ رسانایی الکتریکی ویژه مس سیم پیچی استاتور در دمای ماشین می باشد که برابر با مقدار زیر می باشد:

$$\sigma = 57 \text{ m}/(\Omega \cdot \text{mm}^2) \quad (\text{at } 20^\circ\text{C}) \quad (\text{الف-۶})$$

محاسبه X_{ls} : مقدار X_{ls} وابسته به نقطه کار ماشین، راکتانس نشتی شیاری X_{slot} ، راکتانس نشتی اتصال انتها X_{end} و راکتانس نشتی کمر بند X_{belt} می باشد:

$$X_{ls} = X_{slot} + X_{end} + X_{belt} \quad [\Omega / phase] \quad (\text{الف-۷})$$

راکتانس نشتی شیاری X_{slot} توسط معادله زیر به دست می آید:

$$X_{slot} = \frac{0.001 \mu_0 m R_{oi} C_x K_x \lambda_s}{s} \quad [\Omega / phase] \quad (\text{الف-۸})$$

که λ_s ثابت شیاری بوده و برای شیاری نشان داده شده در شکل ۴-۲، با استفاده از رابطه زیر محاسبه می شود:

$$\lambda_s = \phi \frac{d_{14}}{W_{11}} + \frac{2d_{11}}{W_{11} + d_{11}} + \frac{d_{10}}{W_{10}} \quad [mm] \quad (\text{الف-۹})$$

در معادله (الف-۸)، C_x ثابت توزیع بوده و از جدول (الف-۱) به دست می آید. در جدول (الف-۱)، K_{pp} پریونیت گام سیم پیچی استاتور بوده و مقدارش از تقسیم گام سیم پیچی بر گام قطب حاصل می شود. همچنین ثابت K_x در معادله (الف-۸) برابر مقدار زیر می باشد:

$$K_x = 2\pi f (2N_{ph} K_w)^2 \quad (\text{الف-۱۰})$$

که ضریب سیم پیچی K_w از رابطه زیر به دست می آید:

$$K_w = \frac{\sin\left(\frac{q\alpha_s}{2}\right)\sin\left(\frac{K_{pp}\pi}{2}\right)}{q\sin\left(\frac{\alpha_s}{2}\right)} \quad (\text{الف-۱۱})$$

جدول (الف-۱) ثابت توزیع برحسب پریونیت گام سیم پیچی های استاتور [۷]

K_{pp}	C_x
$0.33 \leq K_{pp} < 0.67$	$0.25(6K_{pp} - 1)$
$0.67 \leq K_{pp} < 1$	$0.25(3K_{pp} + 1)$
$1 \leq K_{pp} \leq 1.33$	$0.25(7 - 3K_{pp})$

در رابطه فوق q تعداد شیارهای بر قطب بر فاز می باشد و α_s گام شیار برحسب رادیان الکتریکی بوده و برابر مقدار زیر می باشد:

$$\alpha_s = \frac{\pi}{mq} \quad (\text{الف-۱۲})$$

X_{end} در معادله (الف-۷) از رابطه زیر حاصل می شود:

$$X_{end} = \frac{0.482 K_x \mu_0 m (2R_{av}) ACT}{1000 p S} \quad [\Omega / phase] \quad (\text{الف-۱۳})$$

همچنین X_{belt} از رابطه زیر توسط روش تکرار به دست می آید:

$$X_{belt} = 0.4646 m K_m K_b K_x \times 10^{-9} \quad [\Omega / phase] \quad (\text{الف-۱۴})$$

جهت محاسبه X_{belt} ابتدا باید مقادیر ضرایب K_m و K_b محاسبه شوند. K_b در معادله (الف-۱۴) یک ضریب تجربی بوده که برحسب تعداد شیارهای بر قطب N_{sp} از شکل (الف-۱) تعیین می شود. جهت

محاسبه K_m ، نیاز به طول مؤثر فاصله هوایی می‌باشد که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$g_e = K_c g \quad [mm] \quad (\text{الف-۱۵})$$

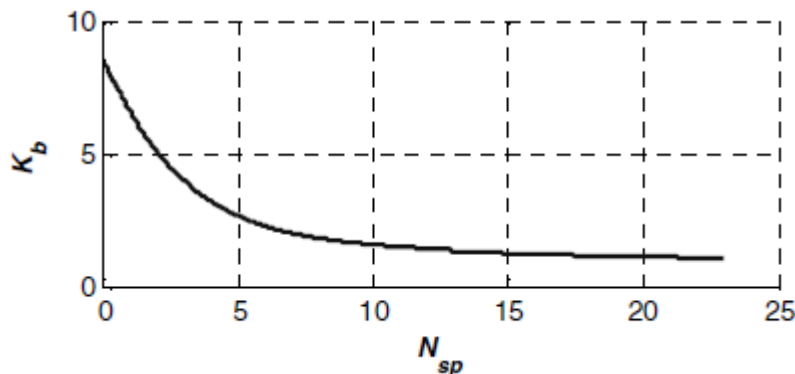
که ضریب کارتر K_c با استفاده از رابطه زیر و شیار شکل ۴-۲ محاسبه می‌شود:

$$K_c = \frac{(2\pi R_{av} / S)(5g + W_{10})}{(2\pi R_{av} / S)(5g + W_{10}) - W_{10}(0.5g + W_{10})} \quad (\text{الف-۱۶})$$

و K_m از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$K_m = \frac{0.001 A_g}{\left(g_e p \frac{F_{ytg}}{F_g} \right)} \quad (\text{الف-۱۷})$$

که A_g مساحت فاصله هوایی یک قطب به میلی‌متر مربع، F_g آمپر دور فاصله هوایی، F_{ytg} مجموع آمپر دور دندانه و یوغ (F_{yt}) و آمپر دور فاصله هوایی F_g که به نقطه کار ماشین بستگی دارند.



شکل (الف-۱) K_b برحسب تعداد شیارهای بر قطب [۷]

با مشخص بودن ولتاژ استاتور، حلقه کاری هیستریزیس در لحظات شتاب‌گیری توسط روش سعی و خطا تکرارشونده قابل تعیین می‌باشد. برای این منظور یک حلقه هیستریزیس با H_p معین جهت حدس اولیه به‌عنوان حلقه هیستریزیس کاری لحظات شتاب‌گیری ماشین انتخاب می‌شود. با استفاده از شکل ۲-۱۲ و شکل ۲-۱۳ و روابط (۲-۱۷)، (۲-۱۵) و (۲-۱۶) به ترتیب مقادیر E_h ، b_1 ، a_1 ، B_q و α برای چگالی شار اصلی محاسبه می‌شوند. سپس مقادیر Φ_g ، E_1 ، H_g ، F_g و B_y و B_t به ترتیب به‌عنوان شار

فاصله هوایی بر قطب، ولتاژ القایی بر فاز سیم‌پیچی استاتور، شدت شار فاصله هوایی، آمپر دور بر قطب فاصله هوایی و چگالی شار یوغ و دندانه از روابط به دست می‌آیند:

$$\phi_g = 2t_r K_{sf} R_{oi} B_q 10^{-6} \quad [web] \quad (\text{الف-۱۸})$$

$$E_1 = \sqrt{2} \pi f K_w N_{ph} \phi_g \quad [V] \quad (\text{الف-۱۹})$$

$$H_g = \frac{t_r B_q p}{2\mu_0 R_{av}} \quad [At/m] \quad (\text{الف-۲۰})$$

$$F_g = 0.001 g_e H_g \quad [At/pole] \quad (\text{الف-۲۱})$$

$$B_y = \frac{\phi_q \times 10^6}{K_p A_y} \quad [T] \quad (\text{الف-۲۲})$$

$$B_t = \frac{\pi \phi_q \times 10^6}{2K_p A_t} \quad [T] \quad (\text{الف-۲۳})$$

که A_t و A_y به ترتیب سطح مقطع یوغ و دندانه می‌باشند و مقدار ضریب K_p در مرحله اول از حلقه تکرار داخلی برابر ۱ در نظر گرفته می‌شود اما برای تکرارهای بعدی از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$K_p = \frac{X_m}{X_m + X_{ls}} \quad (\text{الف-۲۴})$$

وقتی چگالی شار به دست آمد، آمپر دور بر متر یوغ و دندانه استاتور و همچنین آمپر دور بر قطب یوغ و دندانه استاتور از مشخصه مغناطیسی آهن قابل محاسبه می‌باشد. با استفاده از این مقادیر، مقدار K_m توسط معادله (الف-۱۷) محاسبه شده و سپس مقدار X_{belt} از معادله (الف-۱۳) و مقدار X_{ls} از معادله (الف-۷) محاسبه خواهند شد. آن‌گاه می‌توان جریان مغناطیس‌شوندگی را از معادله زیر به دست آورد:

$$I_m = \frac{\pi p \times F_{yfg}}{2\sqrt{2} m N_{ph} K_w} \quad [A] \quad (\text{الف-۲۵})$$

محاسبه X_m : مقدار X_m از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$X_m = \frac{E_1}{I_m} \quad (\text{الف-۲۶})$$

با استفاده از مقادیر مشخص شده X_m و X_{ls} ، یک مقدار جدید برای K_p توسط معادله (الف-۲۴) به دست خواهد آمد. سپس محاسبات از معادله (الف-۲۲) به عنوان یک حلقه تکرار داخلی تکرار می‌شود تا زمانی که K_p به مقدار نهایی با خطای مشخص همگرا شود.

محاسبه R_c : تلفات آهن بر وزن ماده مغناطیسی معمولاً به عنوان یک منحنی برحسب چگالی شار یوغ و دندانه استاتور در دسترس می‌باشد. توسط این مشخصه و حجم هر قسمت از ماشین، تلفات کل آهن بر فاز P_{ir} به دست آمده و R_c از رابطه زیر حاصل خواهد شد:

$$R_c = \frac{E_1^2}{P_{ir}} \quad [\Omega / \text{phase}] \quad (\text{الف-۲۷})$$

محاسبه R_h و X_{hr} : مقدار مقاومت معادل تأثیر هیستریزیس روتور R_h و اندوکتانس هیستریزیس X_{hr} برای یک موتور هیستریزیس تخت به ترتیب از روابط زیر حاصل می‌شوند [۱۱]:

$$R_h = \frac{\omega_b m K_w^2 N_{ph}^2 V_r B_q}{1000 \pi^2 R_{av}^2 H_p} \sin \alpha \quad [\Omega] \quad (\text{الف-۲۸})$$

$$X_{hr} = \frac{\omega_b m K_w^2 N_{ph}^2 V_r B_q}{1000 \pi^2 R_{av}^2 H_p} \cos \alpha \quad [\Omega] \quad (\text{الف-۲۹})$$

که $\omega_b = 2\pi f$ و $V_r = 2\pi R_{av} t R_{oi}$ به ترتیب حجم حلقه روتور و سرعت زاویه‌ای الکتریکی میدان گردان استاتور می‌باشند.

محاسبه R_e : مقاومت معادل تأثیر جریان فوکو روتور R_e یا به عبارتی مقاومت مدل کننده گشتاور جریان فوکو، به علت وابستگی به لغزش موتور، فقط در شرایط راه‌اندازی وجود دارد. به همین خاطر

جهت مدل‌سازی مقاومت معادل تأثیر جریان فوکو روتور، از عبارت R_e/s در مدار معادل استفاده می‌کنیم تا با صفر شدن لغزش، عبارت R_e/s بینهایت می‌شود تا عملاً اثرش از مدار معادل حذف شود. از آنجایی که این الگوریتم در لحظه ورود به سنکرون $s=0$ صادق می‌باشد، لذا در این الگوریتم R_e نقشی ندارد و باید از آن صرف‌نظر نماییم.

اکنون با حلقه هیستریزس فرضی، پارامترهای مدار معادل به‌طور کامل مشخص شدند. با استفاده از پارامترهای مدار معادل تعیین‌شده و با فرض مبنا بودن ولتاژ E_1 ، جریان ورودی به موتور از رابطه زیر به دست حاصل می‌شود:

$$I_s = \sqrt{\left(\frac{E_1}{R_c} + I_h \sin(\alpha)\right)^2 + \left(\frac{E_1}{X_m} + I_h \cos(\alpha)\right)^2} \angle -\zeta \quad (\text{الف-۳۰})$$

که:

$$\zeta = \text{Arc tan} \left(\frac{\frac{1}{X_m} + \frac{\cos(\alpha)}{Z_r}}{\frac{1}{R_c} + \frac{\sin(\alpha)}{Z_r}} \right), I_h = \frac{E_1}{Z_r}, Z_r = \sqrt{(R_r)^2 + (X_{hr})^2} \quad (\text{الف-۳۱})$$

همچنین ولتاژ موتور از روابط زیر به دست می‌آید:

$$V_s = \sqrt{(E_1 \cos(\zeta) + Z_s I_s \cos(\delta))^2 + (E_1 \sin(\zeta) + Z_s I_s \sin(\delta))^2} \quad (\text{الف-۳۲})$$

که:

$$Z_s = \sqrt{(R_s)^2 + (X_{ls})^2}, \delta = \text{Arc tan} \left(\frac{X_{ls}}{R_s} \right) \quad (\text{الف-۳۳})$$

در صورتی که $V_{error} = \left| 1 - \left(\frac{V_s}{V_{ph}} \right) \right|$ کمتر از خطای قابل قبول باشد (مثلاً کمتر از 3-10)، حلقه

هیستریزس فرضی که محاسبات بر اساس آن صورت گرفته درست بوده است. در غیر این صورت باید

مقدار H_p اصلاح شده و محاسبات با حلقه کاری جدید از مرحله تعیین X_{ls} تکرار شود. این اصلاح H_p آن قدر صورت می‌گیرد تا V_{error} کمتر از خطای قابل قبول شود.

مراجع

- [۱]. صنعتی مقدم م.، (۱۳۸۷)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "طراحی و مدل‌سازی موتور سنکرون پسماند نوع تخت دو روتوره"، دانشکده مهندسی برق و رباتیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [2]. O'Kelly D. (1971) "Equivalent circuits and singlephase induction and hysteresis motors", IEEE Trans. Power App. and Sys., PAS-90, 1, pp 279-288.
- [۳]. صادقی حداد زواره م. ح.، (۱۳۸۹)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "بهینه‌سازی ماشین‌های پسماند تخت چندطبقه، طراحی و شبیه‌سازی"، دانشکده مهندسی برق و رباتیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [4]. O'Kelly D. (1969) "Eddy-current and hysteresis effects in rotating machines", Proc. Inst. Elec. Eng., 116, 3, pp 391-395.
- [۵]. Badeeb O. M. A. (2005) "Investigation of the dynamic performance of hysteresis motors using Matlab/SIMULINK", J. Elec. Eng., 56, pp 106-109.
- [6]. Nitao J. J., Scharlemann E. T. and Kirkendall B. A. (2009) "Equivalent Circuit Modeling of Hysteresis Motors", Lawrence Livermore National Laboratory.
- [7]. Darabi A., Lesani H., Ghanbari T. and Akhavanhejazi A. (2007) "Modeling and optimum design of disk type hysteresis motors", Proc. Inter. Conf. Elect. Mach. and Sys., pp 998-1002, Seoul, Korea.
- [8] Ishikawa T. and Kataoka T. (1981) "Basic analysis of disc-tape hysteresis motors", Elec. Engng. Japan, 101, 6, pp 659- 666.
- [9]. Darabi T., Ghanbari M., Rafiei H., Lesani H. and Sanati-Moghadam M. (2008) "Dynamic performance analysis of hysteresis motors by a linear time-varying model", Iranian Journal of Electrical and Electronic Engineering, 4, 4, pp 202-215.
- [10]. Wakui G. and Tomita M. (1982) "Effect of harmonic flux density on the characteristics of hysteresis motor", Trans. IEE Jpn., 102-B, 1, pp 25-32.
- [11]. Kataoka T., Ishikawa T., and Takahashi T. (1982) "Analysis of a Hysteresis Motor with Overexcitation", IEEE Transactions on Magnetics, 18, 6, pp 1731-1733.
- [12]. Copeland M. A. and Slemon G. R. (1963) "An analysis of the hysteresis motor I – analysis of the idealized machine", IEEE Trans. Power App. Sys., 82, 65, pp 34-42.
- [13]. Ishikawa T. and Kataoka T. (1981) "Basic analysis of disc-type hysteresis motors", Elec. Engng. Japan, 101, 6, pp 659-666.

-
- [14]. Rahman M. A. (1971) "Analytical models of polyphase hysteresis motors", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, PAS-92, 1, pp 237-242.
- [15]. Krause P. C. (1986) "Analysis of Electric Machinery", New York, Mc-Graw-Hill, p. 142.
- [16]. Miyairi S. and Kataoka T. (1965) "A basic equivalent circuit of the hysteresis motor", Elect. Engng. Japan (USA). 85, pp 41-50.
- [17]. Azizur Rahman M. and Osheiba A. M. (1990) "Dynamic Performance Prediction of Polyphase Hysteresis Motors", IEEE Transaction on Industry Applications. 26(6), pp 1026-1033.
- [۱۸]. نصیری قیداری ز، لسانی ح، دارابی ا. و توتونچیان ف.، (۱۳۸۶) "تحلیل دینامیکی موتور هیستریزس آهنربای دائم با در نظر گرفتن اثر فوکو"، مجله فناوری و آموزش، سال دوم، جلد ۲، شماره ۱.
- [۱۹]. قنبری هاشم آبادی ت.، (۱۳۸۶)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد: "تحلیل رفتار دینامیکی گذرای موتورهای پسماند در شرایط مختلف تغذیه ورودی"، دانشکده مهندسی برق و رباتیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [۲۰]. دارابی ا.، لسانی ح، قنبری ت. و صنعتی مقدم م.، (۱۳۸۶)، "کاربرد ماشین پسماند در شتاب‌دهنده توربوشارژرها"، بیست و دومین کنفرانس بین‌المللی برق تهران، ایران.
- [21]. Chee Mun Ong, (1998) "Modeling and Dynamic Simulation of Electric Machinery Using MATLAB/SIMULINK", Prentice Hall.
- [22]. Darabi A., Ghanbari T. and Moghadam M. S. (2010) "Coreless Dual-rotor Disc Hysteresis Motor, Modeling, and Performance Prediction", Electric Power Components and Systems, 33, 10, pp 575–591.
- [23]. Darabi A., Ghanbari T. and Moghadam M. S. (2009) "Slotless axial flux hysteresis motor, modelling and performance calculation", IET Elec. Pow. App., pp 1-11.
- [24]. Cyril. G. Veinott, "Theory and design of small induction motors", 1th edition 1986.
- [25]. Darabi A., Rafiei M. and Ghanbari T. (2007b) "Hunting in Hysteresis Motors, Impact of Supply", Proc. Inter. Conf. Elect. Mach. and Sys., pp 1715-1718, Seoul, Korea.
- [26]. Ishikawa T. and Kataoka T. (1985) "Stability analysis of voltage source inverter-fed hysteresis motor", Elec. Engng. Japan, 105, 1, pp 417- 424.
- [27]. Miyairi S. and Kataoka T. (1966) "Analysis of hysteresis motors considering eddy current effects", Elect. Engng. Japan (USA), 86, 6, pp 67-77.

-
- [28]. Copeland M. A. and Slemon G. R. (1964) "An analysis of the hysteresis motor II – the circumferential-flux machine", IEEE Trans. Power App. Sys., 83, 6, pp 619-625.
- [29]. Potter I. and Schmulian R. J. (1971) "Self-Consistently Computed Magnetization Patterns in Thin Magnetic Recording Media", IEEE Trans. Magnetics, MAG-7, 4, pp 873-880.
- [30]. Robertson S. D. T. and Zaky S. Z. G. (1969) "Analysis of the hysteresis machine - Part I", IEEE Trans. Power App. Sys., PAS-88, 4, pp 474-484.
- [31]. Rahman M. A. and Qin R. (1997) "A permanent magnet hysteresis hybrid synchronous motor for electrical vehicles", IEEE Trans. Indust. Elec., 44, 1, pp 46-53.



Abstract

Hysteresis motors are of self-starting synchronous motors operating based on hysteresis property of the magnetic materials. Based on available references, there are still a lot of questions regarding these motors that are either unanswered or their answers are not inclusive and complete. The effects of partial and harmonic load on motors and low power factor and efficiency are among these questions, to name a few. A proper and inclusive model for motor is needed for answering the questions on Hysteresis motors, their performance analysis and achieving their technical specifications. This model should sufficiently describe the motor's behavior in all situations such as starting and acceleration regime, steady state operation, dynamic and transient performance as a result of variation in load and input voltage. Hence this thesis aims at modeling and investigating dynamic and transient performance of hysteresis motor. In this work, we derive dynamic and transient equations and provide equivalent circuit of Hysteresis motors then represents the algorithm and updating procedures of equivalent circuit parameters. With choosing Disk-Type Hysteresis Motors of reference [7] as the benchmark motor, dynamic and transient equations are implemented in MATLAB/SIMULINK with the use of proposed method and the simulated results are compared with the result of reference [7]. This comparison shows the consistency of the results with each other. Finally, we will analyze the desirable effects of lowering input voltage on Power factor, efficiency and stator current of Hysteresis motor in Non-nominal load situations and the undesirable effects of Harmonic loads on motor's performance.

Keywords: *Hysteresis Motor, Modeling, Variable Parameters, Equivalent Circuit, Delay Angle, Hunting Phenomena.*