



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده برق و رباتیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت

عنوان

تحلیل رفتار دینامیکی گذرای موتورهای پسماند در شرایط مختلف تغذیه ورودی

تهیه کننده

تیمور قنبری هاشم آبادی

اساتید راهنما

دکتر احمد دارابی

دکتر سید محمد رضا رفیعی

تابستان ۱۳۸۶

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تاریخ: ۸۶/۱۱/۱۹

شماره: ۵۹۲۱۱

پیوست: دارد

کد: FR/EA/13

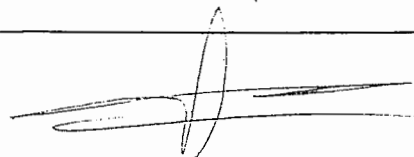
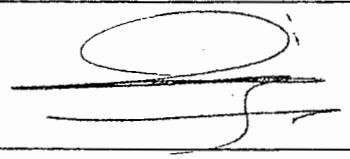
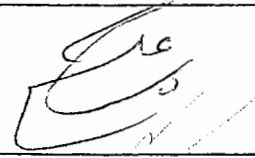

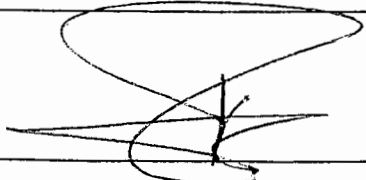
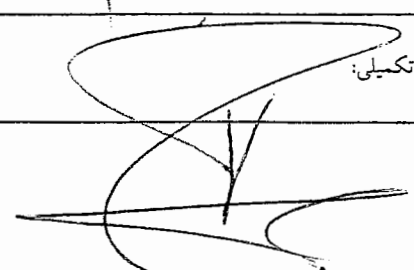
شماره ویرایش: صفر

فرم شماره ۱۰ - فرم ارزیابی پایان نامه کارشناسی ارشد
توسط اعضای هیات داوران

نام و نام خانوادگی دانشجو: میرزا محمدتقی ششم آباری

رشته تحصیلی: تعمیرات

عنوان پایان نامه: تحلیل رفتار دینامیکی گزراپی مورب در تیرهای خمیده با شایع دلتا در دردی مختلف

ردیف	نام و نام خانوادگی عضو هیات داوران	نوع مسئولیت	حداکثر امتیاز	امتیاز داده شده	امضاء
۱	<u>دکتر پرواز آباری</u>	استاد راهنمای اول	۱۰۰	۱۱	
۲	<u>دکتر رحیمی</u>	استاد راهنمای دوم	۱۰۰	۱۱	
۳	—	استاد مشاور	۳۰	—	—
۴	<u>دکتر رحمتی</u>	داور	۳۰	۲۵	
۵	<u>دکتر علی نژاد</u>	داور	۳۰	۳۵	
۶	<u>دکتر سلیمانی</u>	نماینده تحصیلات تکمیلی	۲	۲	
جمع امتیاز داده شده: به عدد: <u>۲۰</u> به حروف: <u>بیست</u>					
محل امضاء نماینده تحصیلات تکمیلی: 					

چکیده

موتورهای پسماند نوع خاصی از موتورهای سنکرون بدون جاروبک هستند که به علت خصوصیات بارز عملکرد، کاربردهای ویژه ای یافته اند. مدلسازی دقیق روتور مهمترین بخش مطالعه رفتار دینامیکی در اینگونه موتورهاست. برای این مدلسازی لازم است حلقه های پسماند ماده روتور و تاثیر آنها در تغییر پارامترهای ماشین مورد توجه بیشتر قرار گیرد. در این تحقیق معادلات توصیف کننده رفتار یک ماشین پسماند و تغییرات لحظه ای پارامترهای مدل ریاضی مورد بررسی قرار می گیرد. وابستگی پارامترهای مدار معادل به مقدار موثر ولتاژ ورودی ماشین قابل توجه است و معمولاً چشم پوشی از آن منجر به نتایج غیر واقعی می شود. شبیه سازی ارائه شده در محیط MATLAB_SIMULINK برای یک ماشین پسماند و بررسی مشخصه های دینامیکی گذرای مهم خروجی آن در شرایط مختلف، نقص مدل‌های ساده با پارامترهای ثابت را نشان داده و لزوم بحساب آوردن تغییرات لحظه ای پارامترهای ماشین را تایید می نماید. نوسانات گشتاور، پدیده هانتینگ و راه اندازی ماشین پسماند از جمله موضوعاتی است که با استفاده از مدل پارامتر متغیر بهتر و دقیقتر مدلسازی شده و در این تحقیق مورد بررسی قرار گرفته اند. از آنجاکه موتورهای پسماند معمولاً دارای تغذیه اینورتری با سطح ولتاژ و فرکانسی غیر معمول می باشند، کیفیت توان تحویلی به آنها می تواند موضوع مهمی باشد. بنابراین در این تحقیق تاثیرات مشکلات پدیده های کیفیت توان بر عملکرد موتور پسماند بررسی شد. این شرایط شامل هارمونیک بودن، عدم تعادل، اضافه ولتاژ دائمی و لحظه ای منبع تغذیه ورودی می باشند. نتایج این تحقیق نشان می دهد که این شرایط علاوه بر ایجاد مشکلات شناخته شده ای همانند نوسانی کردن گشتاور حالت دائمی، باعث ایجاد تاثیرات منفی بر مشخصه های عملکرد موتور همانند گشتاور، سرعت و ضریب قدرت می شوند. بعلاوه تشدید نوسانات هانتینگ را نیز در پی خواهند داشت. بنابراین توجه بیشتری در طراحی منابع تغذیه آنها لازم است. یک کاربرد پیشنهادی برای ماشین پسماند بعنوان شتابدهنده توربوشارژرهای ماشینهای دیزلی ارائه گردید. پایداری، سرعت و گشتاور ثابت، ساختار مستحکم در دما و سرعتهای بالا و امکان استفاده از این ماشین در دو مد موتورری و ژنراتوری از دلایل این پیشنهاد است. رفتار بازده و ضریب قدرت ماشین در این کاربرد در دو مد موتورری و ژنراتوری مورد مطالعه قرار گرفت.

تقدیم به:

پدر و مادرم

تقدیر و تشکر:

در طول دوره کارشناسی ارشد از ارشادات بی دریغ اساتید و کارکنان گروه برق این دانشگاه بهره فراوان بردم که بر خود واجب می دانم از ایشان نهایت قدردانی و سپاسگزاری را به عمل آورم. استاد ارجمند جناب آقای دکتر دارابی که دنیایی جدید در عرصه کسب علم بر من گشودند و بی شک زبان از سپاسی در خور وی قاصر است. دکتر محمد رضا رفیعی و دکتر دستفان که بدون هیچ توقعی هر آنچه نداستیم و پرسیدیم از آن ما را آگاه ساختند. دکتر مجید علومی که مظهر آمیخته شدن علم و اخلاق برای بنده بودند و پیوسته مشوق ما در طول تحصیل در این دوره بودند و آقای دکتر بانژاد که ما را در این دوره یاری فرمودند. از جناب آقای یونسیان که همواره مشکلات اداری دانشجویان را با گشاده رویی حل می نمایند تشکر و سپاس ویژه دارم.

فصل اول: مقدمه و کلیات.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ پدیده پسماند.....	۲
۳-۱ تاریخچه و انواع ساختار موتور پسماند.....	۵
۱-۳-۱ تاریخچه.....	۵
۲-۳-۱ انواع ساختار.....	۵
۴-۱ گشتاور پسماندی و نحوه عملکرد موتور پسماند.....	۷
۵-۱ نتیجه گیری.....	۱۲
فصل دوم: مدلسازی دینامیکی گذرای موتور پسماند.....	۱۳
۱-۲ مقدمه.....	۱۴
۲-۲ مدلسازی موتور پسماند.....	۱۴
۱-۲-۲ تحلیل ماشین پسماند ایده آل.....	۱۴
۲-۲-۲ مدار معادل الکتریکی ماشین پسماند ایده آل.....	۲۰
۳-۲ لحاظ کردن تلفات در مدار معادل.....	۲۱
۱-۳-۲ تلفات پارازیتیک.....	۲۱
۲-۳-۲ تلفات آهن استاتور.....	۲۲
۳-۳-۲ اشباع آهن استاتور.....	۲۲
۴-۳-۲ مدار معادل در رژیم آسنکرون.....	۲۳
۵-۳-۲ مدار معادل عمومی برای رژیم سنکرون و آسنکرون.....	۲۴
۴-۲ محاسبه پارامترهای مدار معادل موتور پسماند.....	۲۷
۱-۴-۲ روند محاسبه پارامترهای مدار معادل.....	۲۸
۲-۴-۲ شبیه سازی ماشین پسماند.....	۳۲
۵-۲ بررسی رفتار موتور پسماند در شرایط مختلف.....	۳۲
۱-۵-۲ موتور بدون بار و تغذیه با ولتاژ نامی.....	۳۳
۲-۵-۲ موتور بدون بار و تغذیه با ۶۰٪ ولتاژ نامی.....	۳۵
۳-۵-۲ تغییرات گشتاور و سرعت در هنگام اعمال یک تغییر پله ای در بار.....	۳۸
۶-۲ نتیجه گیری.....	۳۹
فصل سوم: تاثیر شرایط مختلف تغذیه ورودی بر عملکرد موتور پسماند.....	۴۱
۱-۳ مقدمه.....	۴۲

۴۲	۲-۳ شبیه سازی عملکرد موتور پسماند در شرایط مختلف تغذیه ورودی.....
۴۳	۱-۲-۳ تغذیه سینوسی سه فاز متعادل.....
۴۳	۲-۲-۳ تغذیه نامتعادل.....
۴۶	۳-۲-۳ تغذیه با اعوجاج هارمونیک در ولتاژ.....
۴۸	۴-۲-۳ افزایش و کاهش لحظه ای ولتاژ ورودی.....
۵۰	۳-۳ نتیجه گیری.....
۵۱	فصل چهارم: تاثیرات شرایط مختلف تغذیه ورودی موتور پسماند بر پدیده هانتینگ.....
۵۲	۱-۴ مقدمه.....
۵۳	۲-۴ ریشه یابی عوامل ایجاد پدیده هانتینگ.....
۵۸	۲-۲-۴ تفصیر پاسخ معادله دینامیکی در شرایط مختلف.....
۵۹	۳-۲-۴ تاثیرات پدیده هانتینگ در عملکرد سیستمها.....
۶۰	۴-۲-۴ بررسی شیوه های ممکن در کنترل پدیده هانتینگ.....
۶۲	۳-۴ بررسی پدیده هانتینگ در شرایط گوناگون تغذیه ورودی.....
۶۳	۱-۳-۴ تغذیه با ولتاژ سینوسی خالص.....
۶۳	۲-۳-۴ تغذیه هارمونیک.....
۶۴	۳-۳-۴ تغذیه نامتعادل.....
۶۵	۴-۳-۴ افزایش و کاهش طولانی مدت ولتاژ.....
۶۵	۵-۳-۴ اضافه ولتاژ لحظه ای.....
۶۶	۴-۴ نتیجه گیری.....
۶۷	فصل پنجم: بررسی رفتار مولدی ماشین پسماند در ارئه یک کاربرد پیشنهادی برای آن.....
۶۸	۱-۵ مقدمه.....
۶۸	۲-۵ توربوشارژرهای ماشینهای دیزلی.....
۷۲	۳-۵ عملکرد دینامیکی ماشین پسماند به عنوان شتابدهنده توربوشارژر.....
۷۵	۴-۵ بررسی رفتار ماشین پسماند در مد ژنراتوری.....
۷۷	۵-۵ نتیجه گیری.....
۷۸	فصل ششم: جمع بندی و پیشنهادات.....
۷۹	۱-۶ جمع بندی.....
۸۲	۲-۶ پیشنهاداتی برای ادامه تحقیق در این زمینه.....
۸۳	پیوست ها.....

پیوست الف..... ۸۴

پیوست ب..... ۸۷

۱-۱ مقدمه

خاصیت پسماند^۱ مغناطیسی از جمله خواصی است که با شنیدن آن در اکثر ماشینهای الکتریکی، ذهن به تلفات هسته معطوف می گردد. در ماشینهای پسماند این خاصیت اساس ایجاد گشتاور الکترومغناطیسی می باشد. لذا برای بررسی عملکرد این ماشینها نیاز است که این خاصیت موشکافانه مورد مطالعه قرار گیرد. در این فصل ابتدا تئوری پدیده پسماند مطرح گردیده و سپس کلیاتی در رابطه با عملکرد، انواع ساختار و کاربردهای موتور پسماند ارائه می گردد.

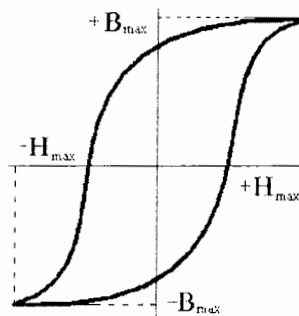
۲-۱ پدیده پسماند

هنگامیکه یک ماده مغناطیسی درون یک میدان الکترومغناطیسی متناوب با فرکانس f قرار گیرد منحنی چگالی شار B بر حسب شدت میدان مغناطیسی H در هر نقطه از این ماده یک منحنی دو مقدره حلقوی خواهد بود که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است. اگر این شدت میدان سینوسی باشد، تغییرات چگالی شار B بر حسب زمان غیر سینوسی خواهد بود. در این صورت هارمونیک اصلی چگالی شار نسبت به شدت میدان سینوسی، دارای تاخیر فاز می باشد. این اختلاف فاز را زاویه تاخیر پسماند^۲ می نامیم که میزان آن وابسته به پیک شدت میدان است و در بخش بعدی خواهیم دید که عامل ایجاد گشتاور پسماندی است. اگر مقدار پیک شدت میدان مغناطیسی (H_p) تغییر نماید، حلقه پسماند دیگری به وجود می آید و در صورتی که H_p از یک مقدار مشخص زیادتر شود، هسته به اشباع رفته و سطح حلقه پسماند، که متناسب

^۱ Hysteresis property

^۲ Hysteresis delay angle

با تلف پسماند هسته است ثابت می ماند. محل تلاقی این بزرگترین حلقه با محور H را نیروی ضد مغناطیس کننده^۱ و محل برخورد آن با محور B چگالی شار پسماند^۲ نامیده می شود. برای اندازه گیری مشخصه $B-H$ یک ماده مغناطیسی، هسته چنبره ای شکلی از آن با سطح مقطع مستطیلی و دو سیم پیچ قرار گرفته روی هسته ساخته می شود.



شکل ۱-۱ منحنی $B-H$ یک ماده پسماند

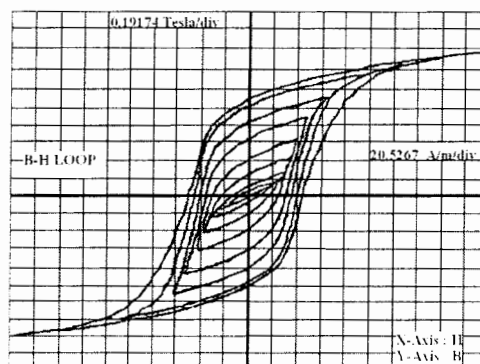
یکی از سیم پیچی ها با ولتاژهای سینوسی فرکانس پایین و دامنه های مختلف تغذیه می شود. با نمونه گیری ولتاژ و جریان سیم پیچی ها و انتقال اطلاعات به کامپیوتر و پردازش این اطلاعات، تغییرات شدت میدان مغناطیسی و چگالی شار مغناطیسی با زمان و شکل حلقه های پسماند ماده مغناطیسی مورد آزمایش بدست می آیند. اینچنین آزمایشی بر روی فولاد آلیاژی VCN آبکاری شده، که روتور یک موتور پسماند در این تحقیق از آن ساخته شده است، انجام گرفته که چندین حلقه پسماند اندازه گیری شده این ماده در شکل ۲-۱ نمایش داده شده است [۱-۲]. اطلاعات مربوط به این حلقه های پسماند در فصول بعدی مبنای شبیه سازی موتور پسماند خواهد بود.

لازم به ذکر است که هم به دلیل اینکه ماده پسماند در این آزمایش بدون حرکت فرض شده و هم به این دلیل که تغذیه سیم پیچ قرار گرفته بر روی آن سینوسی خالص فرض شده است، شکل ۲-۱ فقط مسیر

^۱ Coercive Force

^۲ Residual Flux Density

حلقه های اصلی^۱ ماده پسماند را نشان می دهد. ولی در عمل با ایجاد حلقه های فرعی^۲ که علت اصلی آنها خود خاصیت پسماند است، مواجه هستیم.



شکل ۱-۲ حلقه های پسماند اندازه گیری شده فولاد VCN [۱]

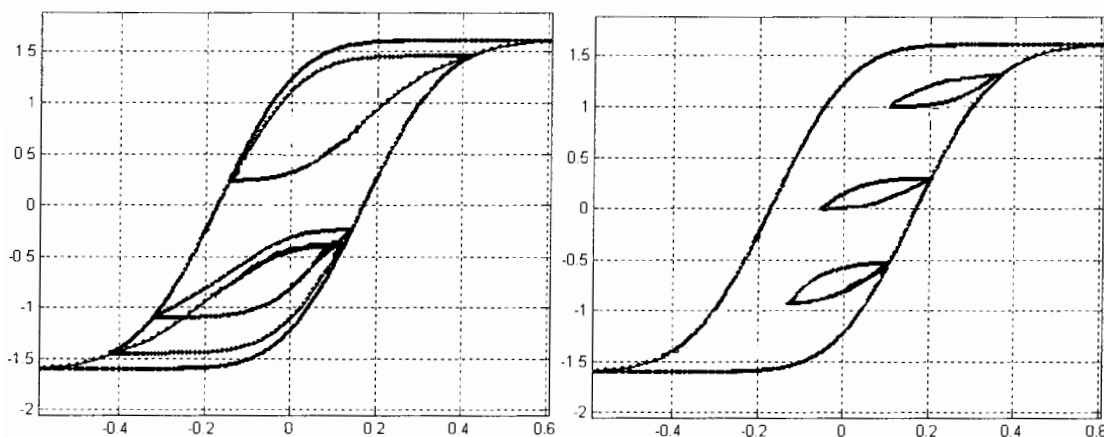
در رابطه با علل ایجاد حلقه های فرعی خصوصا در موتور های پسماند در بخشهای بعدی مفصلا بحث خواهد شد ولی در اینجا به ذکر اطلاعات کلی از چگونگی تشکیل این حلقه ها می پردازیم. حلقه های فرعی در اثر اغتشاشاتی که در جریان ورودی و به تبع آن در میدان ایجاد می شود، شکل می گیرند. اگر این اغتشاشات ناچیز باشند با تقریب مناسبی می توان آنها را بصورت خطوطی راست با شیب شاخه نزولی حلقه اصلی در محل تغییر جهت فرض کرد. اینگونه حلقه ها ی فرعی به حلقه های فرعی کوتاه^۳ معروف هستند. در شکل ۱-۳ نمونه ای از این حلقه های فرعی در این شرایط نشان داده شده است. در صورتی که اغتشاشات جریان ورودی و به تبع اغتشاشات چگالی شار میدان قابل توجه باشد، سبب ایجاد حلقه های فرعی با سطح زیاد می گردد. در این مورد دیگر فرض مذکور در مورد حلقه های فرعی نمی تواند صحیح باشد. شکل ۱-۴ نمونه ای از این حلقه های فرعی که به حلقه های فرعی بلند^۴ معروف هستند را نشان می دهد [۷] و [۱]. اگر برای مدت طولانی مسیر تغییرات شار در اینچنین حلقه های باشد این حلقه ها برای متقارن شدن نسبت به مبدا با یک ثابت زمانی به سمت مبدا مختصات حرکت می کنند.

¹ Major Loops

² Minor Loops

³ Short Minor Loops

⁴ Long Minor Loops



شکل ۴-۱ حلقه های پسماند فرعی بلند

شکل ۳-۱ حلقه های پسماند فرعی کوتاه

۳-۱ تاریخچه و انواع ساختار موتور پسماند

۳-۱-۱ تاریخچه:

موتور پسماند برای اولین بار توسط Steinmetz به عنوان وسیله ای برای تولید گشتاور مورد تحقیق قرار گرفت. مهمترین تحقیق بعدی در این زمینه توسط Teare صورت گرفت که روش محاسبه گشتاور از ساختارهای شناخته شده میدان مغناطیسی و نیروی محرکه مغناطیسی در مواد پسماند را منتشر کرد. سپس Roters نشان داد که تلفات پسماند پارازیتیک^۱ در روتور به دلیل نوسانات میدان در آنجا می تواند با استفاده از استاتورهای شیار بسته تا حدود زیادی کاهش یابد [۱۲].

استفاده از این موتورها در درایورهای قابل تنظیم و ابزارهای زمانی مختلف از کاربردهای عمومی است. همچنین در زمینه کنترل سیستمها هر روز کاربردهای تازه ای برای آنها ایجاد می شود. اگر چه موتورهای پسماند بصورت تجاری در توانهای پایین استفاده های زیادی یافته اند، ولی تا به حال تحلیل شفاف و دقیقی از عملکرد آنها ارائه نشده است.

^۱ Parasitic losses

۱-۳-۲ انواع ساختار [۴-۱]:

موتورهای پسماند نوع خاصی از موتورهای سنکرون با ساختارهای الکترومغناطیسی و مکانیکی متفاوت می باشند که بر اساس پدیده پسماند کار می کنند. این موتورها تک فاز و یا چند فاز می باشند و از نقطه نظر های متفاوت به انواع مختلف طبقه بندی می شوند.

به لحاظ ساختار مکانیکی و محل قرار گیری نسبی روتور و استاتور، ماشین های پسماند به سه نوع استوانه ای معمول، استوانه ای معکوس و نوع تخت (دیسکی) تقسیم بندی می شوند استاتور نوع معمول این موتور، همانند استاتور موتورهای القایی است اما روتور شامل یک رینگ استوانه ای از جنس مواد پسماندی است. رینگ روتور این نوع موتورها می تواند به صورت یکپارچه و یا ورقه ای باشد.

معمولا برای افزایش گشتاور آسنکرون و شتاب گیری بهتر موتور در حین راه اندازی، رینگ روتور به صورت یکپارچه ساخته می شود و با یک هادی الکتریکی خوب پوشش داده می شود. در این صورت موتور به صورت تلفیقی از ماشین القایی (آسنکرون) و ماشین پسماند عمل می نماید. در ماشین های استوانه ای چنانچه رینگ روتور روی نگهدارنده ای از مواد غیر مغناطیسی قرار گرفته باشد، ماشین را نوع شار دایروی و در صورتی که این نگه دارنده از ورقه های فرومغناطیسی ساخته شده باشد، ماشین را نوع شار شعاعی می نامند. این نوع تقسیم بندی بر اساس مسیر گذر شار در رینگ روتور صورت پذیرفته است. با تعویض جای روتور و استاتور در ساختار معمول، ساختار معکوس این ماشین شکل می گیرد.

موتورهای پسماند تخت که معمولا در سرعت های بسیار بالا بکار گرفته می شوند دارای یک یا دو دیسک از جنس مواد پسماندی به عنوان روتور می باشند. به علت فرکانس زیاد، استاتور این ماشین ها از ورقه های با کیفیت مغناطیسی بسیار خوب ساخته می شود. چون ورق های استاتور باید روی هم پیچیده شوند ایجاد شیار ها و ساخت استاتور این ماشین ها پیچیده تر از انواع دیگر می باشد. در این ماشین فاصله هوایی بر خلاف ماشین معمولی که در راستای شعاع است، در امتداد محور ماشین قرار می گیرد.

از آنجایی که شار در فاصله هوایی ماشین های تخت در امتداد محور می باشد، این نوع ماشین ها را ماشین های شار محوری نیز می نامند. در ماشین های تخت معمولا نگه دارنده ای از جنس مواد مغناطیسی پشت دیسک روتور استفاده نمی شود. در این ساختار نیز ماده پسماند روتور می تواند با یک

هادی خوب برای ایجاد گشتاور راه اندازی بالاتر پوشش داده شود. در ماشین های پسماند، هنگامی که ماده پسماند روتور تحت میدان مغناطیسی متناوب قرار می گیرد بین میدان مغناطیسی اعمالی بر روتور و القاء در آن یک تاخیر زمانی به وجود می آید. این پدیده اساس حرکت در این ماشین ها بوده و خود راه انداز بودن این دسته از ماشین های سنکرون را به عنوان یکی از مهمترین ویژگی آنها، امکان پذیر می سازد.

انتخاب ماده مغناطیسی مناسب در بهبود عملکرد موتور های پسماند بسیار موثر است. ماده پسماندی در این ماشین ها، یک ماده متوسط از نظر سختی مغناطیسی، با سطح حلقه B-H، چگالی شار باقیمانده و نیروی خنثی کننده بین مواد مغناطیسی سخت، همانند آلنیکو^۱ و مواد مغناطیسی نرم مانند فروسیلیس^۲ می باشد. فولاد های پر کربن، فولاد کبالت و فولاد آلیاژی P-6 با نیروی خنثی کننده بین ۵۰ تا ۲۵۰ اورستند از جمله مواد گران قیمت بکار رفته به عنوان ماده پسماند روتور می باشند که در مقالات به آنها اشاره شده است.

ساختار ساده و مستحکم روتور با فاصله هوایی تقریباً یکنواخت، جریان و گشتاور ثابت، کارکرد آرام و بدون لرزش از ویژگی های ممتاز ماشین های پسماند می باشد.

این موارد باعث بکار گیری این موتورها در خیلی از کاربردها، بخصوص در سرعت های بالا شده است. امروزه با پیشرفت مواد مغناطیسی این موتورها را در توان های بالا نیز می توان بکار گرفت. همچنین در تجهیزات کنترل، آکوستیک، زمان سنجی، صنایع نساجی و شیمیایی و بخصوص در صنایع نظامی و هوافضا مورد استفاده قرار می گیرند. از طرح معکوس این موتورها معمولاً با فرکانس تغذیه ۴۰۰ هرتز در وسائلی مانند ژيروسکوپ^۳ ها^۳ که به یک موتور کوچک با ممان اینرسی بالای روتور نیاز است، استفاده می گردد. ضریب توان، بازدهی و چگالی گشتاور نسبتاً پایین، از محدودیت های این ماشین ها محسوب می شود. همچنین به منظور تغذیه این دسته از ماشین ها، نیاز به درایورهای ویژه ای می باشد.

^۱ Alnico

^۲ Ferrosilicon

^۳ Gyroscope

۴-۱ گشتاور پسماندی و نحوه عملکرد موتور پسماند

تولید گشتاور در یک موتور پسماند را می توان با استفاده از شکل ۱-۵ توصیف کرد. در این شکل مشاهده می شود که شدت میدان سینوسی یک موج چگالی شار غیر سینوسی ایجاد می کند، که هارمونیک اول آن به اندازه α نسبت به شدت میدان یا MMF موجود شیفت پیدا کرده است. این موضوع نشان می دهد که میدان درون ماده مغناطیسی از یک موج H و یک موج B جدا شده با زاویه α تشکیل شده است که شرط لازم برای تولید گشتاور است. بنابراین یک شدت میدان سینوسی $H = \bar{H} \sin \omega t$ باعث ایجاد موج چگالی شاری با هارمونیک اصلی $B = \bar{B} \sin(\omega t - \alpha)$ می شود. در اینجا ضریب نفوذ باید آنچنان انتخاب شود که داشته باشیم: $\bar{B} = \mu \bar{H}$ و با در نظر گرفتن سرعتی برابر سرعت سنکرون تغییرات فضایی چگالی شار برابر است با [۵]:

$$B(\theta) = \mu_{r1} \mu_0 H(\theta + \alpha_1) \quad (1-1)$$

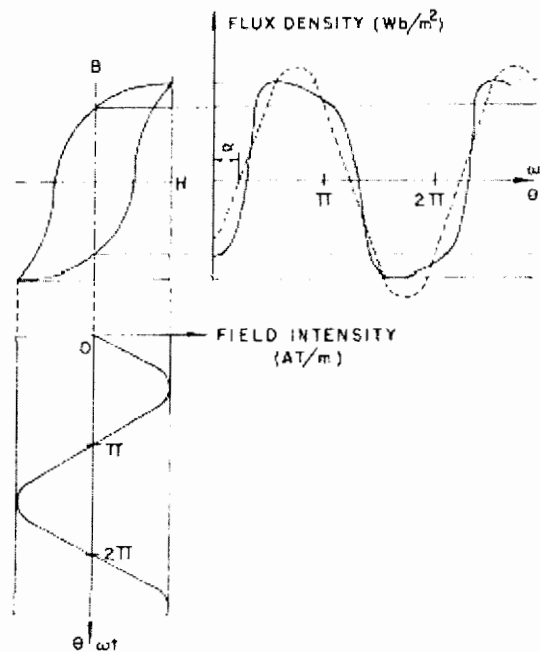
که در آن μ_{r1} و α_1 مقادیر پارامترهای مذکور برای هارمونیک اول می باشند. این مقادیر برای یک آلیاژ از آلومینیوم-نیکل توسط Wakui and Kusakari [۶] بدست آمده است که در شکل ۱-۶ نشان داده شده است.

می توانیم این منحنی را برای چند هارمونیک عمده میدان بدست آوریم. بنابراین رابطه (۱-۱) را بصورت زیر باز نویسی کنیم (m مرتبه هارمونیک است):

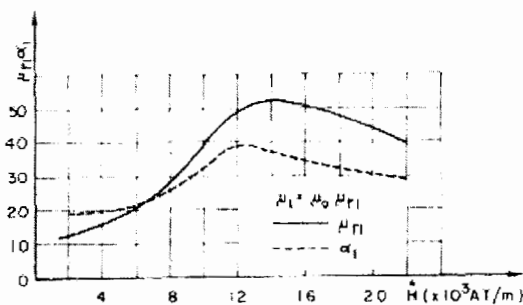
$$B(\theta) = \mu_{rm} \mu_0 H(\theta + \alpha_m) \quad (2-1)$$

در این تحلیل می توان μ_{r1} و α_1 را ثابت فرض کرد و یا اینکه با استفاده از یک فرآیند تکرار به مقادیر مختلف آن در طول تحلیل رفتار موتور برای بحساب آوردن خاصیت غیر خطی ماده پسماند در ماشین واقعی رسید. اگر روتور یک موتور پسماند ثابت فرض شود هنگامی که ماده پسماند روتور توسط میدان گردان استاتور جاروب می شود هر نقطه از روتور دارای یک میدان متغیر با زمان و نیز متغیر با مکان خواهد بود. اگر در لحظه اول از اصطکاک صرف نظر کنیم قطبهای استاتور و روتور کاملاً همراه یکدیگر حرکت خواهند کرد و گشتاوری برای چرخش روتور نمی توان متصور شد. بنابراین برای ایجاد گشتاور و چرخش نیاز است که در موتور پسماند اصطکاک وجود داشته باشد.

فرض شود که در اثر عبور شار گردان استاتور هر نقطه از روتور دارای چگالی شار و شدت میدان مغناطیسی متناظر با یکی از نقاط روی منحنی پسماند نشان داده شده در شکل ۱-۱ باشد. بنابراین در یک لحظه پس از راه اندازی تمام نقاط روتور میدان مغناطیسی متغیر متناظر با حلقه پسماند نشان داده شده در شکل ۱-۱ را تجربه می کنند. تا رسیدن موتور به سرعت سنکرون وضعیت میدان در نقاط مختلف روتور هم دارای تغییرات زمانی و هم دارای تغییرات مکانی است. بسته به اینکه تغذیه ورودی موتور چگونه است مسیر حرکت نقاط روی حلقه شکل ۲-۱ به حلقه های دیگر متفاوت خواهد بود.



شکل ۵-۱ تاثیر حلقه پسماند بر شار تولیدی توسط یک شدت میدان سینوسی [۵]



شکل ۶-۱ تغییرات ضریب نفوذ و فاز انتقالی برای یک آلیاژ آلومینیوم-نیکل [۶]

در صورتی که تغذیه هارمونیکی باشد و یا اینکه شرایط عدم سینوسی بودن توزیع فضایی سیم پیچها و اثر شیارها در نظر گرفته شود حلقه شکل ۱-۱ دارای مسیر های فرعی دیگری علاوه بر مسیر اصلی است. در اینصورت در رژیم آسنکرون و لحظات راه اندازی حرکت نقاط مختلف حلقه ها که متناظر با نقاط مختلف روی روتور هستند، از طریق این حلقه های فرعی صورت می گیرند. سطح حلقه های فرعی بیانگر تلفات پارازیتیک و سطح حلقه های اصلی ماگزیمم گشتاور پسماند خروجی را نشان می دهند.

در لحظه راه اندازی گشتاور ناشی از جریان فوکو درون ماده پسماند بیشترین سهم را در گشتاور ماگزیمم خروجی داشته و این گشتاور در حالت سنکرونیزم به صفر می رسد. میزان سهم گشتاور ناشی از خاصیت پسماند روتور در لحظه ورود به سنکرونیزم که روتور به حلقه کاری خود با بیشترین سطح می رسد، ماگزیمم مقدار خود را دارد. با در نظر گرفتن این دو گشتاور می توان نشان داد که موتور پسماند دارای گشتاور ماگزیمم تقریباً ثابتی از لحظه راه اندازی تا رسیدن به سرعت سنکرون می باشد.

اگر گشتاور بار با گشتاور ماگزیمم خروجی ماشین برابر باشد، در لحظه ورود به سنکرونیزم، نقاط روتور متناظر شده با نقاط مختلف روی حلقه کاری، از لحاظ مغناطیسی تثبیت شده و دیگر تغییرات زمانی و مکانی نخواهند داشت و موتور همانند یک ماشین PM (permanent magnet) عمل خواهد کرد. در این حالت زاویه پسماند همان زاویه بار شکل گرفته در لحظه ورود به سنکرونیزم خواهد بود. ولی اگر گشتاور بار کمتر از گشتاور ماگزیمم خروجی باشد، در لحظه ورود به سنکرونیزم حلقه پسماند اصلی یک لحظه قبل از ورود به سنکرونیزم از طریق حلقه های فرعی به حلقه ای با سطح کوچکتر (متناظر با گشتاور بار) تغییر وضعیت خواهد داد. زاویه ای که میدان روتور با میدان استاتور در این لحظه ایجاد می کند (و در همان زاویه باقی می ماند) با زاویه پسماند قبلی متفاوت است و زاویه بار نامیده می شود. به علت شناور بودن قطبها (غیر مشخص بودن مکان آنها) در لحظه ورود به سنکرونیزم مقدار این زاویه در شرایط تصادفی ایجاد خواهد شد.

در لحظه ای که روتور ساکن است کلیه انرژی منتقل شده به روتور به صورت تلفات پسماند از بین می رود (اگر از جریان فوکو صرف نظر شود). ولی با حرکت روتور کم کم بخشی از انرژی پسماند روتور صرف دوران آن خواهد شد. به عبارت دیگر تا سرعت روتور به سرعت سنکرون برسد، مقداری از انرژی منتقل

شده به روتور به صورت تلفات پسماند و مقداری دیگر به صورت انرژی چرخشی تبدیل می شود. به طور دقیقتر می توان گفت که انرژی پسماند تلف شده صرف تغییر حالت مغناطیسی قطبها شده ولی مقداری از انرژی که باید صرف تغییر حالت قطبها شود با جابجایی مکانی آنها و همنا شدن با قطبهای استاتور (بصورت دوران روتور) به انرژی دورانی تبدیل می شود. در حالت سنکرونیزم با فرض یک سری شرایط می توان گفت که تمام انرژی ورودی به روتور صرف حرکت آن خواهد شد.

با فرضیات بالا مقدر توان پسماندی موتور پسماند نوع تختی که در این تحقیق مورد بررسی قرار می گیرد از رابطه ۳-۱ قابل محاسبه است [۱].

$$P_{\bar{h}} = f[2\pi t_r(R_o - R_i)R_{av}]\pi H_p B_{\alpha} \sin\alpha \quad (3-1)$$

که در آن R_o , R_i و R_{av} به ترتیب شعاع خارجی، شعاع داخلی و شعاع متوسط روتور و استاتور ماشین پسماند تخت است و H_p و B_{α} ماگزیمم شدت میدان و چگالی شار برای مولفه اصلی آنها است. با توجه به اینکه جمله $V_p = 2\pi R_{av}(R_o - R_i)t_r$ حجم ماده پسماند روتور و جمله $E_h = \pi H_p B_{\alpha} \sin\alpha$ سطح حلقه پسماند کاری است، می توان معادله (۳-۱) را به صورت (۴-۱) بازنویسی کرد:

$$P_h = fV_r E_{\bar{h}} \quad (4-1)$$

رابطه ۴-۱ موید توضیحاتی است که در رابطه با توان پسماندی داده شد [۱۰-۸].

در اوایل، تحلیل ماشین پسماند با استفاده از تقریب بیضوی صورت می گرفت. این روش ابتدا توسط Teare و سپس توسط Roters, Robetson و Miyairi توسعه داده شد. و با حل معادله لاپلاس و فرض اینکه رفتار مغناطیسی ماده روتور خطی است، این ماشین تحلیل شد. در مراحل بعد پدیده پسماند ماده روتور را با شیفیت B به اندازه زاویه α در تحلیل دخالت دادند.

با استفاده از حل معادله لاپلاس برای میدان فاصله هوایی و ماده پسماند روتور و در نظر گرفتن شرایط مرزی مناسب، مدل تئوریک موتور پسماند پی ریزی شده است. پدیده پسماند در این تحلیل با استفاده از تقریب بیضوی برای حلقه پسماند در نظر گرفته می شود. رابطه بین دامنه هارمونیک اصلی شکل موجهای B و H خطی فرض شده و شیفیت فازی بین آنها ناشی از خاصیت پسماند ثابت فرض می شود. همچنین می توان از یک فرآیند تکرار برای بحساب آوردن اثر غیر خطی تغییرات این رابطه در ماشین واقعی

استفاده کرد. یک تقریب مشابه نیز می تواند برای وارد کردن اثر حلقه های فرعی ایجاد شده توسط اجزاء هارمونیک میدان نیز در تحلیل می تواند مورد استفاده قرار گیرد. یکی دیگر از روشهای بحساب آوردن پدیده پسماند روتور استفاده از مدل پریساج است در این روش که معمولاً تحلیل اسکالر آن برای بررسی رفتار ماشین پسماند کافی به نظر می رسد، مدل در هر لحظه و در هر نقطه از ماده پسماند روتور پارامترهای مغناطیسی ماشین را بخوبی مشخص می کند. ولی این روش بصورت کوپل با روش المان محدود می تواند روش توانمندی باشد که البته تحلیل زمانبری خواهد بود.

۱-۵ نتیجه گیری

موتور پسماند به دلیل ویژگیهای ممتاز کاربردهای خاصی یافته است. به دلیل غیر خطی بودن کامل رفتار این ماشینها هنوز تحلیل شفاف و دقیقی از عملکرد آنها ارائه نشده است. با یک سری فرضیات و ساده سازی ها مدلهایی برای تحلیل این ماشین ارائه شده است. این مدلها یا نسبتاً دقیق ولی زمانبر هستند و یا اینکه تحلیلی سریع ولی کم دقت ارائه می دهند. در فصل بعد سعی می شود که بر اساس فرضیاتی یک مدل از موتور پسماند شبیه سازی شود که هم دقت کافی در تحلیل را داشته باشد و هم از سرعت تحلیل نسبتاً بالایی برخوردار باشد.

فصل دوم

مدلسازی دینامیکی گذرای موتور پسماند

۱-۲ مقدمه

در این فصل سعی می شود که یک مدل دینامیکی گذرایی از ماشین پسماند بر اساس تحلیلهای الکترومغناطیسی و معادلات دینامیکی حاکم بر آن ارائه شود. سپس این مدل در محیط MATLAB/SIMULINK شبیه سازی شده و رفتار موتور در شرایط مختلف توسط مشاهده می شود تا هم میزان اعتبار مدل معین شود و هم تحلیلی بر این رفتارها صورت گیرد.

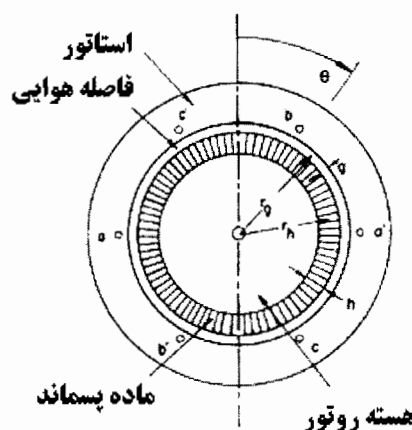
۲-۲ مدلسازی موتور پسماند

۱-۲-۲ تحلیل ماشین پسماند ایده آل [۱۳]:

برای ارائه یک مدل دینامیکی گذرایی، ابتدا با یک تحلیل ساده از موتور پسماند به مدار معادل الکتریکی این ماشین خواهیم رسید و پس از آن این مدل پایه را برای رسیدن به یک مدل دقیق تر توسعه خواهیم داد. در شکل ۱-۲ یک برش عرضی از ماشین پسماند نشان داده شده است. استاتور یک سیم پیچ سه فاز متعادل دارد و روتور از نوع شار شعاعی است که می توان فرض کرد که میدان مغناطیسی در آن از طریق ماده پسماند رینگ و هسته با ضریب نفوذ بالای آن مسیر خود را می بندد. برای ارائه یک تحلیل ایده آل از ماشین پسماند فرضیات زیر در نظر گرفته می شود:

- ۱- تعداد شیارهای استاتور خیلی زیاد است.
- ۲- شیارهای استاتور اساسا بسته هستند.
- ۳- سیم پیچی استاتور دارای توزیع سینوسی است.

- ۴- چگالی میدان در فاصله هوایی و در ماده پسماند شعاعی است.
 ۵- ضریب نفوذ استاتور و هسته روتور بینهایت است.
 ۶- حلقه های اصلی و فرعی برای ماده پسماند به شکل متوازی الضلاع با پهنای ثابت و معادل دو برابر شدت میدان ضد مغناطیس کنندگی در نظر گرفته می شوند [۱۳].



شکل ۱-۲ یک برش عرضی از موتور پسماند استوانه ای [۱۳]

یک موتور دو فاز با N_s دور در هر فاز را در نظر بگیریم که سیم پیچی آن در تعداد زیادی از شیارهای استاتور توزیع شده است. پس می توان تعداد هادی فاز a بر رادیان را با تقریب به صورت ۱-۲ نوشت.

$$N_a = (N_s/2) |\sin\theta| \text{ conductor per radian} \quad (1-2)$$

اگر جریانهای استاتور به صورت یک ست از جریانهای سینوسی با پیک \hat{I} در نظر گرفته شوند که با هم $2\pi/m$ اختلاف زاویه دارند، داریم:

$$i_a = \hat{I} \sin\omega t \quad (2-2)$$

پتانسیل مغناطیس در سراسر فاصله هوایی و ماده پسماند در زاویه θ ناشی از جریان i_a برابر است با:

$$F_{a\theta} = (N_s \hat{I} / 2) \sin\omega t \cos\theta \quad A.T \quad (3-2)$$

با اضافه کردن اثر تمام جریانهای فازها، کل پتانسیل مغناطیسی در زاویه θ برابر است با:

$$F_0 = (m/4) N_s \hat{I} \sin(\omega t - \theta) \quad A.T \quad (4-2)$$

مرحله بعد تعیین میدان مغناطیسی حاصل از این پتانسیل مغناطیسی در فاصله هوایی و ماده پسماند است. اگر H_g و H_h به ترتیب شدت میدان مغناطیسی در فاصله هوایی و در ماده پسماند باشد و g و h طول فاصله هوایی و ضخامت رینگ باشد (شکل ۲-۱) در زاویه θ خواهیم داشت:

$$F_{\theta} = gH_g + hH_h = F_{g\theta} + F_{h\theta} \quad \text{A.T} \quad (5-2)$$

بنابراین چگالی شار در فاصله هوایی برابر است با :

$$B_g = \mu_0 H_g \quad \text{Wb/m}^2 \quad (6-2)$$

در شکل ۲-۲ چگالی شار B_h ماده پسماند روتور نسبت به شدت میدان مغناطیسی آن با یک نسبت ایده‌آل شده نشان داده شده است. یک قطاع افزایشی در چرخش ماشین در زاویه θ دارای یک پهناى زاویه ای $\Delta\theta$ و طولی معادل طول موثر محور ماشین است که با l نشان داده می شود. شار بر واحد زاویه φ_{θ} توسط پتانسیل F_{θ} ایجاد می شود و به صورت پیوسته از طریق فاصله هوایی و ماده پسماند روتور مسیر خود را می بندد. پتانسیل مغناطیسی $F_{g\theta}$ موجود در فاصله هوایی و شار بر واحد زاویه φ_{θ} به رلوکتانس فاصله هوایی بر واحد فاز مربوط می شوند.

$$R_{g\theta} = g / (\mu_0 r_0 l) \quad \text{A/(Wb.rad)} \quad (7-2)$$

در ماده پسماند شار بر واحد زاویه مغناطیسی φ_{θ} به پتانسیل مغناطیسی روی این ماده مربوط می شود که با مشخصه شکل ۲-۳ نشان داده شده است. این مشخصه با مشخصه شکل ۲-۲ مشابه است و بنابراین با بیان ۲-۸ مشخص می شود [۱۳] و [۱۰].

$$\varphi_{\theta} = B_h r_h l \quad \text{Wb/rad} \quad \text{و} \quad F_{h\theta} = h H_h \quad \text{A.T} \quad (8-2)$$

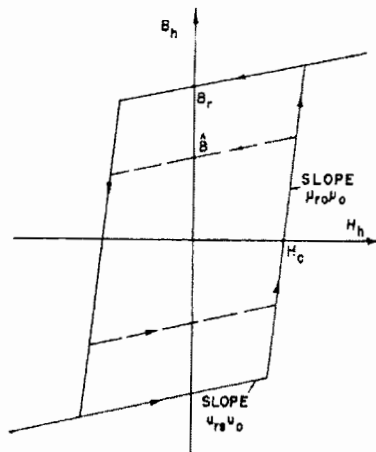
فرض می شود، هر گردش شار روی این مشخصه اگر نقطه حالت دست چپ یا راست حلقه باشد با شیب l/R_0 رخ می دهد، یا اگر این نقطه در درون کرانه های خارجی (بالا و پایین) حلقه باشد دارای شیب l/R_s خواهد بود. این رلوکتانسهای افزایشی بر واحد زاویه با بیانهای ۲-۹ داده می شوند [۱۳].

$$R_0 = h / (\mu_{r0} \mu_0 r_h l) \quad (9-2)$$

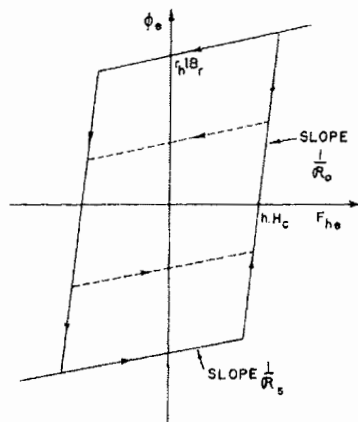
$$R_s = h / (\mu_{rs} \mu_0 r_h l) \quad (10-2)$$

$$\varphi_{\theta} = B_h r_h l \quad \text{Wb/rad} \quad \text{و} \quad F_{h\theta} = h H_h \quad \text{A.T} \quad (11-2)$$

که μ_{r0} و μ_{rs} به ترتیب ضریب نفوذ نسبی غیر اشباع و اشباع ماده پسماند است که در شکل ۲-۲ نشان داده شده است. معادله ۲-۷ و شکل ۲-۳ می توانند برای مشخص کردن توزیع شار به ازای یک توزیع پتانسیل مغناطیسی مشخص شده مورد استفاده قرار گیرند. تحلیل می تواند با تبدیل مشخصه شکل ۲-۳ به صورتی که در شکل ۲-۴ نشان داده شده است، ساده تر و عمومی تر گردد. مشخصه شکل ۲-۳ را می توان با رلوکتانس بر واحد زاویه خطی R_0 بصورت سری با مشخصه سمت عمودی ϕ/F ارائه کرد که در شکل ۲-۴(A) و ۲-۴(B) نشان داده شده اند.



شکل ۲-۲ مشخصه ماده پسماند برای یک حلقه اصلی و یک حلقه فرعی در ماشین پسماند ایده آل



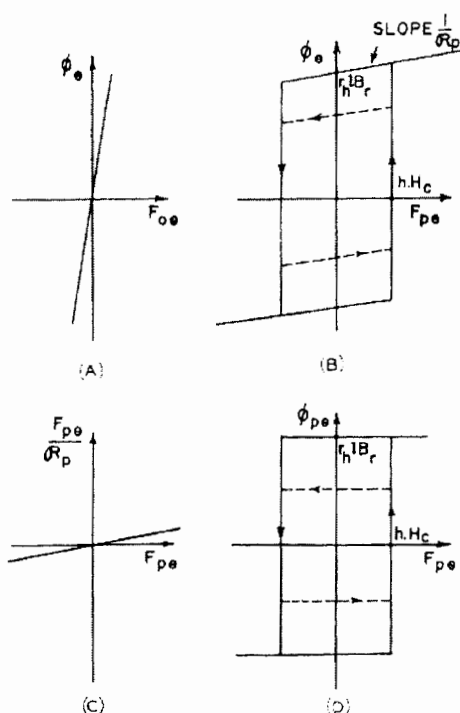
شکل ۲-۳ شار بر واحد زاویه بر حسب پتانسیل مغناطیسی برای ماده پسماند ماشین

رلوکتانس خطی R_0 شکل ۴-۲(A) دارای تاثیری برابر یک بسط از فاصله هوایی است. شیب اشباع مشخصه شکل (B) ۴-۲، $1/R_p$ است که $R_p=R_s-R_0$.

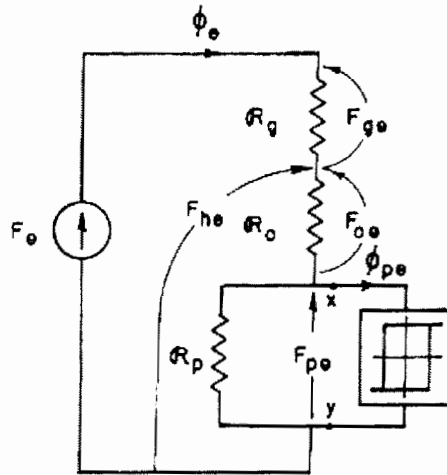
مشخصه غیر خطی شکل (B) ۴-۲ می تواند بیشتر ساده شده و بصورت یک رلوکتانس خطی بر واحد زاویه موازی با یک حلقه مستطیلی که یک المان غیر خطی است ارائه شود. این ساده سازی در شکل ۴-۲(C) و ۴-۲(D) نشان داده شده است. در شکل ۴-۲ داریم:

$$F_{h\theta} = F_{0\theta} + F_{p\theta} \text{ A.T} \quad \text{و} \quad \phi_{\theta} = \phi_{p\theta} + F_{p\theta} / R_p \text{ Wb/rad} \quad (12-2)$$

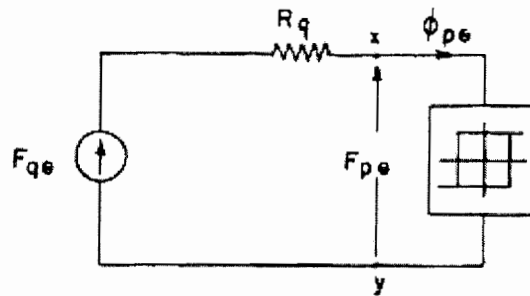
وضعیت مغناطیسی یک قطاع افزایشی زاویه ای ماشین اکنون می تواند با مدار معادل مغناطیسی همراه یک نیروی محرکه مغناطیسی F_{θ} ، چندین رلوکتانس خطی و یک المان غیر خطی حلقه مستطیلی همچنان که در شکل ۵-۲ نشان داده شده است، ارائه گردد. پارامترهای این مدار معادل $R_g, R_0, (r_h/B_r)$ و (hH_c) می باشند.



شکل ۴-۲ (A) رلوکتانس بر واحد زاویه R_0 (B) مشخصه اصلی شکل ۳-۲ که رلوکتانس سری R_0 از آن کم شده است (C) رلوکتانس بر واحد زاویه R_p (D) مشخصه شکل (B) ۴-۲ که رلوکتانس موازی R_p از آن کم شده است



شکل ۵-۲ مدار معادل مغناطیسی یک سکتور افزایشی از ماشین [۱۰]



شکل ۶-۲ ساده شده شکل ۵-۲

اگر پتانسیل مغناطیسی معلوم باشد، توزیع شار بر واحد زاویه می تواند با استفاده از مدار معادل شکل ۵-۲ پیدا شود. به هر حال بهتر است که در این مرحله قسمتهای خطی شکل ۵-۲ ساده تر گردد. با اعمال قضیه تونن به ترمینالهای X و Y عنصر غیر خطی به شکل ۶-۲ خواهیم رسید. که در آن داریم:

$$F_{q\theta} = F_{\theta} R_p / (R_p + R_0 + R_g) \quad (13-2)$$

که در آن:

$$R_q = R_p (R_0 + R_g) / (R_p + R_0 + R_g) \quad (14-2)$$

فرض شود که موتور در آغاز در حال سکون است و یک ست از جریانهای متعادل با پیک \hat{I} از سیم پیچهای استاتور می گذرد.

از معادله ۴-۲ می توان مشاهده کرد که این عامل یک توزیع پتانسیل مغناطیسی بصورت سینوسی ایجاد می کند. که در جهت مثبت θ با سرعت زاویه ای ω می چرخد.

با استفاده از معادله ۴-۲ و ۵-۲ پتانسیل مغناطیسی $F_{q\theta}$ را می توان با بیان ۱۵-۲ ارائه نمود [۱۳].

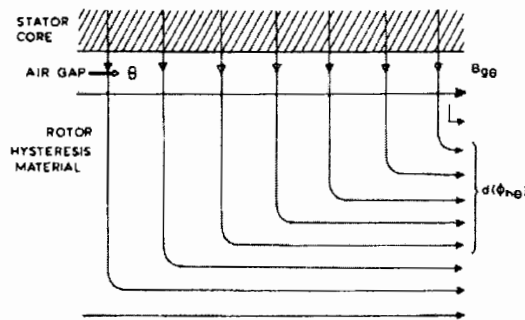
$$F_{q\theta} = \hat{F}_q \sin(\omega t - \theta)_{A.T} \quad (15-2)$$

که در آن:

$$\hat{F} = R_p m N_s \hat{I} / 4 (R_p + R_0 + R_g) \quad (16-2)$$

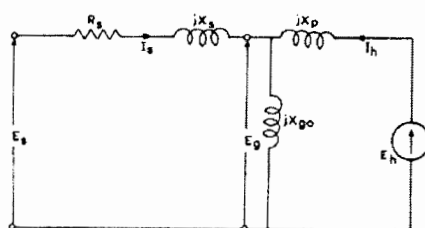
۲-۲-۲ مدار معادل الکتریکی ماشین پسماند ایده آل:

می توان با توسعه مدار معادل حالت ماندگار ماشین پسماند، این مدل را به مدلی عمومی برای مدهای سنکرون و آسنکرون موتور تبدیل کرد. اگر ماشین شار دایروی فرض شود مسیر شار در آن به صورتی خواهد بود که در شکل ۷-۲ نشان داده شده است. میدان مغناطیسی در فاصله هوایی به صورت شعاعی و در رینگ روتور به صورت محیطی می باشد [۱۱-۱۵].



شکل ۷-۲ الگوی توزیع شار در موتور پسماند شار دایروی [۱۰]

مدار معادل الکتریکی دوال شکل ۵-۲ برای یک موتور پسماند شار دایروی همراه امپدانس استاتور به صورت شکل ۸-۲ می باشد. معادلات فیزیکی این مدار معادل بصورت ۱۷-۲ می باشد.



شکل ۲-۸ مدار معادل الکتریکی شکل ۲-۵

$$\begin{bmatrix} E_s \\ E_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + j(X_s + X_{g0}) & jX_s \\ jX_{g0} & j(X_p + X_{g0}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_h \end{bmatrix} \quad (17-2)$$

که در آن :

$$X_{g0} = j\omega \left(\frac{L_g L_c}{L_g + L_c} \right) = j\omega L_{g0} \quad (18-2)$$

۲-۳ لحاظ کردن تلفات در مدار معادل

۲-۳-۱ تلفات پارازیتیک:

تلفات پارازیتیک نقش عمده ای در کاهش بازده موتور پسماند دارد. این تلفات را می توان به دو بخش تقسیم کرد. تلفات پارازیتیک MMF، ناشی از هارمونیکهای فضایی ماشین به خاطر توزیع غیر سینوسی سیم پیچی موتور است. در حالیکه، تلفات پارازیتیک شار به خاطر موج چگالی شار در فاصله هوایی است، که بیشتر ناشی از هارمونیکهای ریلی دندانها است. اثبات شده است که تلفات پارازیتیک شار بصورت ایده آل با مجذور چگالی شار فاصله هوایی متناسب است. برای شکل موج سینوسی چگالی شار فضایی این تلف برابر است با [۱۰]:

$$P_f = K_f E_g^2 \quad (19-2)$$

K_f ثابت تلفات شار است. بنابراین تلف پارازیتیک شار را می توان با یک مقاومت با مقدار $1/K_f$ که وابسته به ولتاژ فاصله هوایی است، در مدار معادل نشان داد. به طور مشابه تلف پارازیتیک MMF با مجذور جریان استاتور متناسب است که می توان آن را با معادله ۲-۲۰ محاسبه کرد.

$$P_m = K_m I^2 \quad (20-2)$$

K_m ثابت تلف MMF است. تلف پارازیتیک MMF را نیز در مدار معادل می توان با مقاومت R_m که از نظر عددی معادل K_m است نشان داد. تخمین مقادیر K_f و K_m در [۹] با جزئیات آورده شده است. در ماشینهای پسماند معمولی تلفات پارازیتیک شار غالب بوده و حدود ۸۰٪ تلفات پارازیتیک می باشد.

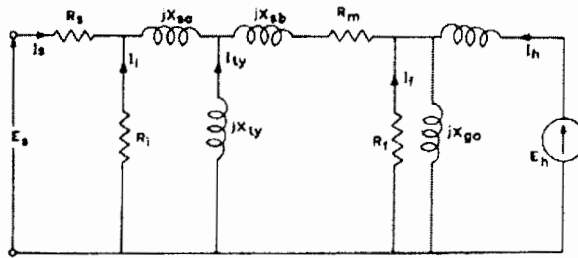
۲-۳-۲ تلفات آهن استاتور:

بهبود تلف آهن استاتور کار پیچیده ای است. فرمولهای تجربی برای محاسبه این تلفات در موتور پسماند ارائه شده است. می توان تلفات موجود در یوغ و دندانه های استاتور را با مقاومت R_i بین R_s و X_s نشان داد [۱۰].

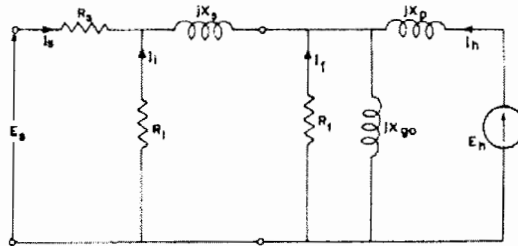
۲-۳-۳ اشباع آهن استاتور:

وقتی هسته استاتور به اشباع می رود راکتانس نشتی استاتور X_s نمی تواند پارامترهای راکتانس روتور را به طور صحیح نشان دهد. سلمون پارمترهای مجزایی برای راکتانس اشباع هسته انتخاب کرده است. که X_{sa} , X_{sb} و X_{ty} به ترتیب راکتانس انتهای سیم پیچها، راکتانس شیار، نوک دندانه و زیگزاگ و راکتانس بدنه دندانه و یوغ است. اگر این تلفات فرعی در مدار معادل الکتریکی شکل ۸-۲ لحاظ شود مدار معادلی به صورت شکل ۹-۲ خواهیم داشت. اگر فرض شود که ماشین پسماند از نوع معمولی است و ولتاژ استاتور در حدی نیست که آهن استاتور را به اشباع ببرد، در شکل ۹-۲ می توان از R_m و R_{ty} صرف نظر کرد. در این صورت با در نظر گرفتن X_s به عنوان مجموع X_{sb} و X_{sa} به مدار معادل عمومی شکل ۱۰-۲ خواهیم رسید [۱۰]. معادله ۱۷-۲ با جزئیات بیشتر به صورت ۲۱-۲ در خواهد آمد.

$$\begin{bmatrix} E_s \\ 0 \\ 0 \\ E_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + j(X_s + X_{g0}) & j(X_s + X_{g0}) & jX_{g0} & jX_{g0} \\ j(X_s + X_{g0}) & R_i + j(X_s + X_{g0}) & jX_{g0} & jX_{g0} \\ jX_{g0} & jX_{g0} & R_f + jX_{g0} & jX_{g0} \\ jX_{g0} & jX_{g0} & jX_{g0} & js(X_p + X_{g0}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_f \\ I_i \\ I_h \end{bmatrix} \quad (21-2)$$



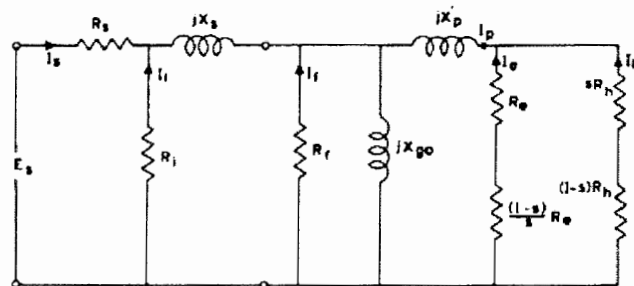
شکل ۹-۲ مدار معادل الکتریکی عمومی در رژیم سنکرون با در نظر گرفت کلیه تلفات [۱۰]



شکل ۱۰-۲ مدار معادل الکتریکی عمومی ساده شده شکل ۹-۲

۴-۳-۲ مدار معادل در رژیم آسنکرون :

می دانیم که بجز در سرعت سنکرون گشتاور موتور تلفیقی از گشتاور پسماند و گشتاور فوکو می باشد. برای تقارن مغناطیسی و ارائه یک تحلیل آسان فرض می شود که روتور در حالت آسنکرون از یک سری سیم پیچ اتصال کوتاه شده متعادل که تعداد دوری برابر تعداد دور استاتور دارند تشکیل شده باشد. مدار معادل در این شرایط بصورت شکل ۱۱-۲ خواهد بود. در این صورت معادله ۲-۲۱ با جزئیات بیشتر در ۲-۲۲ آمده است [۱۵-۱۰].

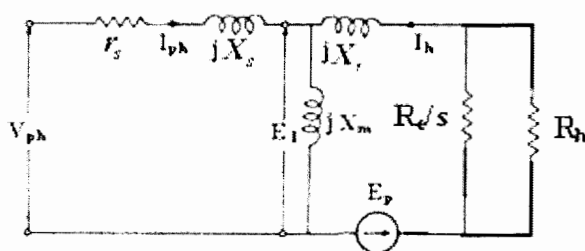


شکل ۱۱-۲ مدار معادل الکتریکی در حالت آسنکرون

$$\begin{bmatrix} E_f \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ E_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + j(X_p + X_{gc}) & j(X_p + X_{gc}) & jX_{gc} & jX_{gc} & jX_{gc} \\ j(X_p + X_{gc}) & R_s + j(X_p + X_{gc}) & jX_{gc} & jX_{gc} & jX_{gc} \\ jX_{gc} & jX_{gc} & R_f + jX_{gc} & jX_{gc} & jX_{gc} \\ jsX_{gc} & jsX_{gc} & jsX_{gc} & R_e + js(X_p' + X_{gc}) & js(X_p' + X_{gc}) \\ jsX_{gc} & jsX_{gc} & jsX_{gc} & js(X_p' + X_{gc}) & sR_h + js(X_p' + X_{gc}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_s \\ I_f \\ I_j \\ I_e \\ I_h \end{bmatrix} \quad (2-22)$$

۲-۳-۵ مدار معادل عمومی برای رژیم سنکرون و آسنکرون:

مدار معادلهای نشان داده شده در شکل‌های ۲-۱۰ و ۲-۱۱ هر کدام یک رژیم کاری موتور پسماند را پوشش می‌دهند. برای بدست آوردن یک مدار معادل عمومی فرض شود که در شکل ۲-۱۰ دو شاخه سمت راست مدار معادل شکل ۲-۱۱ نیز با منبع ولتاژ موازی است. این فرض با قضایای تحلیل مدار هماهنگ است. حال در صورتی که معادل تونن این منبع ولتاژ و دو شاخه موازی هم بدست آید، مدار معادلی بصورت شکل ۲-۱۲ خواهیم داشت که تلفیقی از دو مدار معادل قبلی است. به نظر می‌رسد که اگر پارامترهای این مدار معادل در هر دو رژیم بدرستی محاسبه شود این مدار قابلیت تحلیل رفتار موتور در هر دو رژیم کاری را خواهد داشت.



شکل ۲-۱۲ مدار معادل الکتریکی عمومی

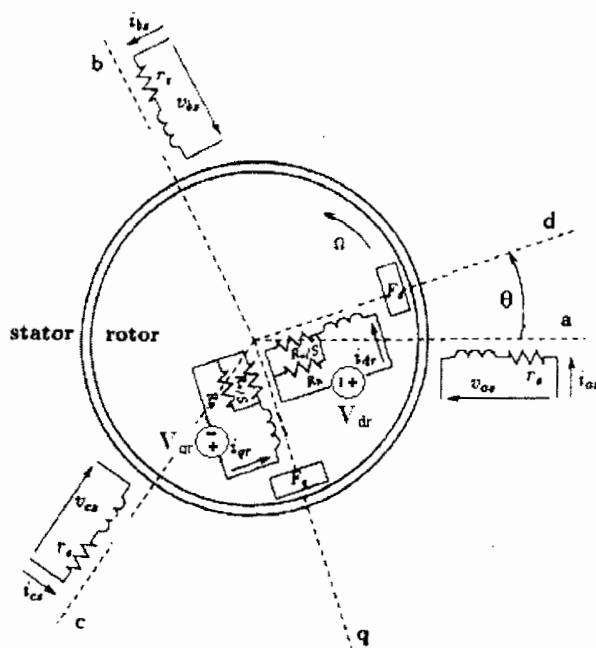
در مدار معادل بالا فرض شده است که روتور نیز دارای یک سیم پیچی با تعداد دور و فازی برابر استاتور می‌باشد. در شکل ۲-۱۳ یک مدل شماتیک از موتور پسماند سه فاز با توجه به فرضیات بالا نشان داده

شده است. اگر مدار معادل بر فاز شکل ۱۲-۲ با تبدیلات پارک به مدار معادل d-q تبدیل شود، معادلات دینامیکی حاکم بر ماشین پسماند در هر مرجعی در این حالت بصورت ۲-۲۳ خواهد بود [۱۶-۱۸]. برخی از پارامترهای معادلات که در متن تحقیق معرفی نگردیده اند در ضمیمه ب آورده شده اند.

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_r & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} + \frac{1}{\omega_b} \begin{bmatrix} X_s & 0 & X_m & 0 \\ 0 & X_s & 0 & X_m \\ X_m & 0 & X_{rr} & 0 \\ 0 & X_m & 0 & X_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_{ds} \\ \dot{i}_{qs} \\ \dot{i}_{dr} \\ \dot{i}_{qr} \end{bmatrix} +$$

$$\frac{\omega_r}{\omega_b} \begin{bmatrix} 0 & -X_{ss} & 0 & -X_m \\ X_{ss} & 0 & X_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix}$$

(۲۳-۲)



شکل ۲-۱۳ مدل شماتیک موتور پسماند سه فاز

مدار معادل d-q متناظر با این معادلات در شکل ۱۴-۲ نشان داده شده است. در این مدارات مقادیر $E_{\omega d}$ و $E_{\omega q}$ از روابط ۲۴-۲ مشخص می شوند.

$$\begin{aligned} E_{\omega d} &= (1-s)[(X_s + X_m)i_{qs} + X_m i_{qr}] \\ E_{\omega q} &= (1-s)[(X_s + X_m)i_{ds} + X_m i_{dr}] \end{aligned} \quad (24-2)$$

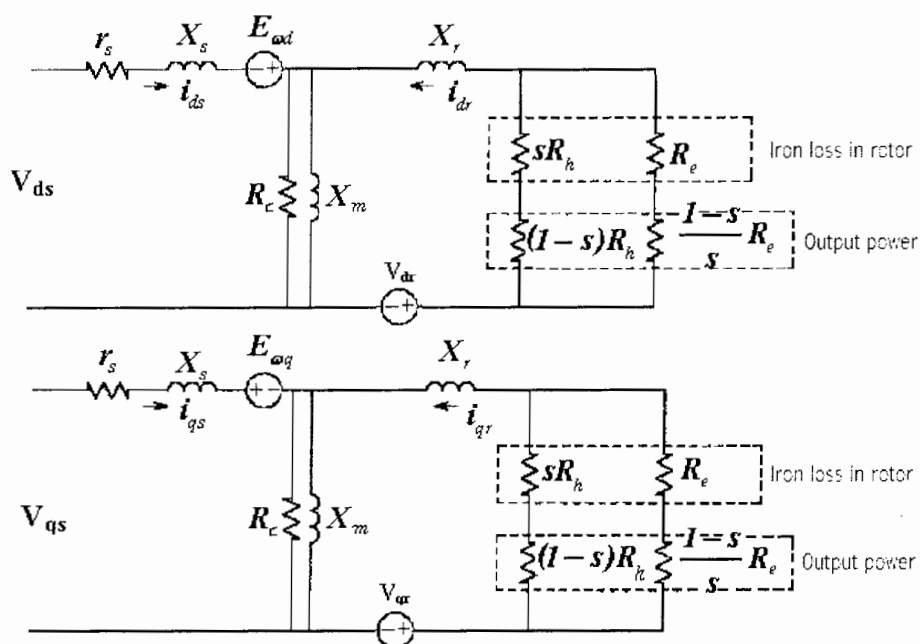
گشتاور الکترومغناطیسی یک موتور پسماند از رابطه ۲۵-۲ قابل محاسبه است.

$$T_{em} = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)(i_{qs}\lambda_{ds} - i_{ds}\lambda_{qs}) \quad (25-2)$$

که در آن داریم:

$$\begin{aligned} \lambda_{ds} &= \frac{1}{\omega_h}(X_{ss}i_{ds} + X_m i_{dr}) \\ \lambda_{qs} &= \frac{1}{\omega_h}(X_{ss}i_{qs} + X_m i_{qr}) \end{aligned} \quad (26-2)$$

و سرانجام معادله حرکت یک موتور پسماند p قطبی از معادله ۲۵-۲ حساب می شود.



شکل ۱۴-۲ مدار معادل d-q موتور پسماند

$$2H \dot{\omega} = T_{em} - T_l \quad (27-2)$$

در این معادله داریم:

$$\omega = \frac{\omega_r}{\omega_b}, \quad H = \frac{j\omega_b}{p} \quad (28-2)$$

۴-۲ محاسبه پارامترهای مدار معادل موتور پسماند

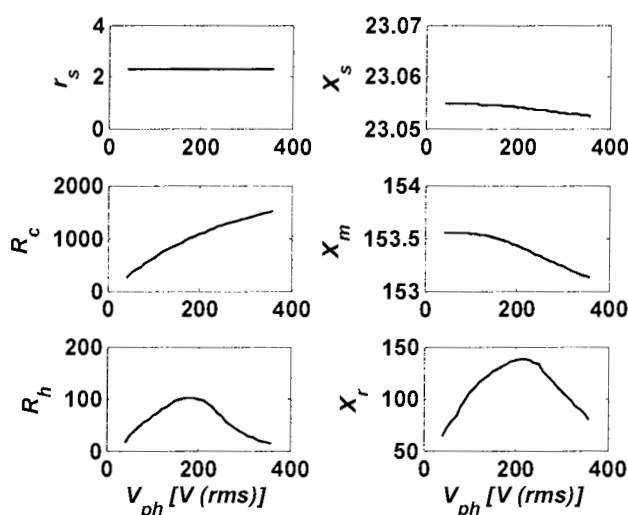
شبه سازی های انجام گرفته برای شرایط کار حالت دائمی ماشین پسماند نشان می دهد که علاوه بر سایر ماشینها که عناصر مدار معادل در رنج وسیعی از سطح تغذیه ورودی ثابت فرض می شوند، در این ماشین پارامترها در طول شرایط گذرای ماشین تغییرات قابل ملاحظه ای دارند. شکل ۲-۱۵ تغییر پارامترهای ماشین پسماند با تغییرات مقدار موثر ولتاژ ورودی را نشان میدهد. در طراحی و همچنین تحلیل دینامیکی گذرای موتور پسماند توجه به تغییر پارامترهای ماشین مهم به نظر می رسد.

همانطور که در شکل ۲-۱۵ دیده می شود پارامتر R_1 مستقل از ولتاژ ورودی است و پارامترهای X_1 و X_m را نیز در محدوده وسیعی حول نقطه کار، می توان تقریباً ثابت فرض کرد. ولی پارامترهای R_h ، X_h و R_c تغییرات قابل توجهی به ازای تغییرات ولتاژ موثر ورودی، حول نقطه کار با سطح ولتاژ موثر فاز ۲۰۰ ولت دارند.

بنابراین یک مدار معادل با عناصر ثابت هرگز نمی تواند در محدوده تغییرات وسیع ولتاژ ورودی نتایج دقیقی ارائه نماید. مقدار α نیز برای فولاد VCN حول مقدار ماگزیمم خود تغییرات قابل ملاحظه ای دارد. در صورتی که در خیلی از گزارشات ثابت فرض شده است. بنابراین در مدار معادل دینامیکی گذرای لازم است که با انجام یک تحلیل الکترومغناطیسی در هر لحظه مقادیر این پارامترها و همچنین منابع وابسته نشان داده شده در شکل ۲-۱۴ محاسبه و به مدل اعمال شوند. به عبارت دیگر المانهای مدار معادل بصورت پارامتریک بوده و بصورت لحظه ای Update می شوند. در قسمت بعد سعی می شود که روال محاسبه این منابع وابسته و پارامترها بیان شود.

۲-۴-۱ روند محاسبه پارامترهای مدار معادل:

تحلیل الکترومغناطیسی که برای تعیین پارامترهای مدار معادل به کار می رود بر مبنای اطلاعات بدست آمده از حلقه های پسماند شکل ۲-۱ برای فولاد VCN صورت می گیرد.



شکل ۲-۱۵ تغییرات پارامترهای مدار معادل به ازای تغییرات ولتاژ موثر ورودی

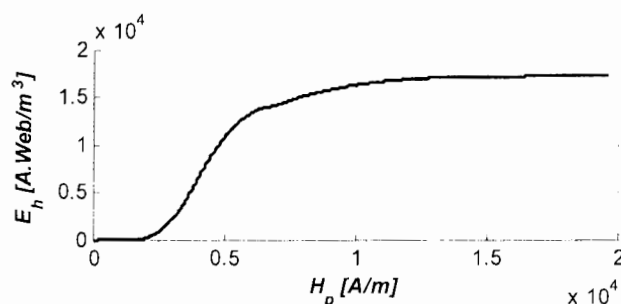
ابتدا از حلقه های پسماند شکل ۲-۱ نمودارهای شکل‌های ۲-۱۶ و ۲-۱۷ را استخراج می کنیم که به ترتیب سطح حلقه های پسماند و پیک چگالی شار حلقه ها را بر حسب H_p نشان می دهد (از بخش منفی این منحنی ها به علت تقارن صرف نظر شده است). اگر شدت میدان مغناطیسی ماشین یک تابع سینوسی بفرم $H(t)=H_p \cos(\omega t)$ فرض شود چگالی شار ماشین غیر سینوسی بوده که می توان مولفه اصلی آن را بصورت زیر در نظر گرفت [۱]:

$$B(t) = a_1 \cos(\omega t) + b_1 \sin(\omega t) = B_q \cos(\omega t - \alpha) \quad (2-29)$$

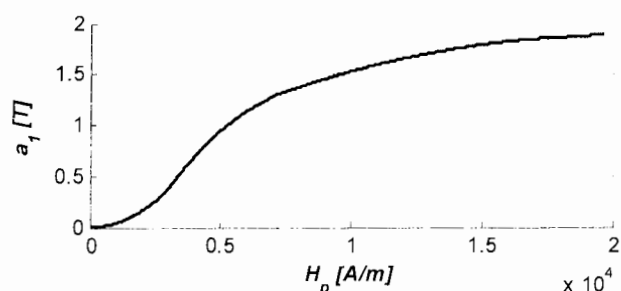
برای یک H_p فرضی اولیه مقدار a_1 و b_1 به ترتیب از منحنی شکل ۲-۱۷ و رابطه $b_1 = E_h / (\pi H_p)$ و کمک

گرفتن از منحنی شکل ۲-۱ قابل محاسبه است. مقادیر B_q و α نیز به ترتیب از روابط $B_q = \sqrt{a_1^2 + b_1^2}$

و $\alpha = \arctan\left(\frac{X_r}{R_h}\right)$ قابل تعیین می باشد. اکنون می توان مقدار مقاومت R_h و X_r را از روابط ۳۰-۲ تا ۳۴-۲ محاسبه کرد [۱]:



شکل ۲-۱۶ سطح حلقه های پسماند بر حسب پیک شدت میدان



شکل ۲-۱۷ تغییرات پیک چگالی شار حلقه ها بر حسب پیک شدت میدان

$$R_h = \frac{4mf(K_w N_{ph})^2 t_r R_{oi} K_{sf} B_q \sin \alpha}{1000 R_{av} H_p} [\Omega] \quad (30-2)$$

$$X_r = \frac{R_h}{\tan \alpha} [\Omega] \quad (31-2)$$

$$R_e = \frac{48m\rho(K_w N_{ph})^2 R_{oi}}{2\pi R_i t_r} [\Omega] \quad (32-2)$$

$$r_r = \frac{R_h R_e}{sR_h + R_e} [\Omega] \quad (33-2)$$

مقادیر Φ_g ، E_l و F_g به عنوان شار، ولتاژ القایی و نیروی محرکه مغناطیسی فاصله هوایی را می توان از روابط ۳۴-۲ تا ۳۶-۲ بدست آورد.

$$\phi_g = 2t_r K_{sf} (R_o - R_i) B_q \times 10^{-6} \quad (34-2)$$

$$E_1 = \sqrt{2} \pi K_w N_{ph} f \phi_g \quad (35-2)$$

$$(F_g = g \left(\frac{pt_r B_q}{2\mu_0 R_{av}} \right) \times 10^{-3} \quad (36-2)$$

نیروی محرکه مغناطیسی و تلفات هسته در یوغ و دندانه استاتور با انجام یک فرآیند تکرار و با توجه به مشخصه های مغناطیسی ماده هسته استاتور تعیین می گردند و از آنها می توان مقدار R_c را مشخص نمود. با فرض مبنا بودن ولتاژ ترمینال استاتور، فازور جریان ورودی از معادله ۲-۳۷ محاسبه می شود.

$$I_{eq} = \sqrt{\left(\frac{E_1}{R_c} + I_h \sin \alpha \right)^2 + \left(\frac{E_1}{X_m} + I_h \sin \alpha \right)^2} \angle -\zeta \quad (37-2)$$

که در آن داریم:

$$\zeta = \text{Arc tan} \left(\frac{\frac{1}{X_m} + \frac{\cos \alpha}{Z_r}}{\frac{1}{R_c} + \frac{\sin \alpha}{Z_r}} \right), \quad I_h = \frac{E_1}{Z_r}, \quad Z_r = \sqrt{(r_r)^2 + X_r^2} \quad (38-2)$$

ولتاژ فاز ورودی می تواند از رابطه ۲-۳۹ محاسبه شود:

$$V_{ph} = \sqrt{(E_1 \cos \zeta + Z_1 I_{eq} \cos \delta)^2 + (E_1 \sin \zeta + Z_1 I_{eq} \sin \delta)^2} \quad (39-2)$$

که در آن:

$$Z_1 = \sqrt{r_s^2 + X_s^2} \quad \text{و} \quad \delta = \text{Arctan} \left(\frac{X_s}{r_s} \right) \quad (40-2)$$

در این مرحله ولتاژ محاسبه شده از معادله ۲-۳۹ باید با ولتاژ فاز واقعی موتور برابر باشد. در غیر اینصورت مقدار فرضی H_p با یک گام مناسب تغییر کرده و روند مذکور تا برابری این دو ولتاژ با یک تقریب قابل قبول ادامه پیدا می کند. تنها پارامتری که برای محاسبه باقی مانده است منبع ولتاژ وابسته E_p است که از رابطه ۲-۴۱ قابل محاسبه است.

$$E_p = \sqrt{(X_m I_{cq} \sin \zeta + (X_r + X_m) I_h \sin \alpha)^2 + (X_m I_{cq} \cos \zeta + (X_r + X_m) I_h \cos \alpha)^2} \angle -\gamma \quad (41-2)$$

مقدار این منبع ولتاژ همانند سایر پارامترهای روتور هم به شرایط فعلی روتور و هم به شرایط قبلی آن بستگی دارد. برای محاسبه E_p روشهایی در مراجع [۹-۱۳] پیشنهاد شده است. در مرجع [۱۳] این ولتاژ با استفاده از یکسری روابط و نمودارهایی برای ضرایب این روابط و برای مواد پسماندی مشخصی محاسبه شده است. در مرجع [۱۰] روشی دیگر برای محاسبه این ولتاژ بیان شده است که در اینجا آن را بیان می‌کنیم. در این روش E_p از رابطه ۴۲-۲ محاسبه می‌گردد.

$$E_p = j(X_m + X_h) \left(\frac{B_q H_p}{\sqrt{2} p m N_p h} \right) \zeta \angle -\beta \quad (42-2)$$

که در آن β و ζ از هم ارزی ۴۳-۲ مشخص می‌شوند.

$$\frac{2}{\pi} \left[(k-2) \cos \alpha - \frac{k}{4} \sin 2\alpha - \frac{k\pi}{2} - \frac{k\pi}{4} \right] \cos \left(\omega t - \frac{p\theta}{2} \right) + \frac{2}{\pi} \left[(k-2) \sin \alpha - \frac{k}{4} \cos 2\alpha + \frac{3k}{4} \right] \sin \left(\omega t - \frac{p\theta}{2} \right) \equiv \zeta \cos \left(\omega t - \frac{p\theta}{2} - \beta \right) \quad (43-2)$$

که در آن:

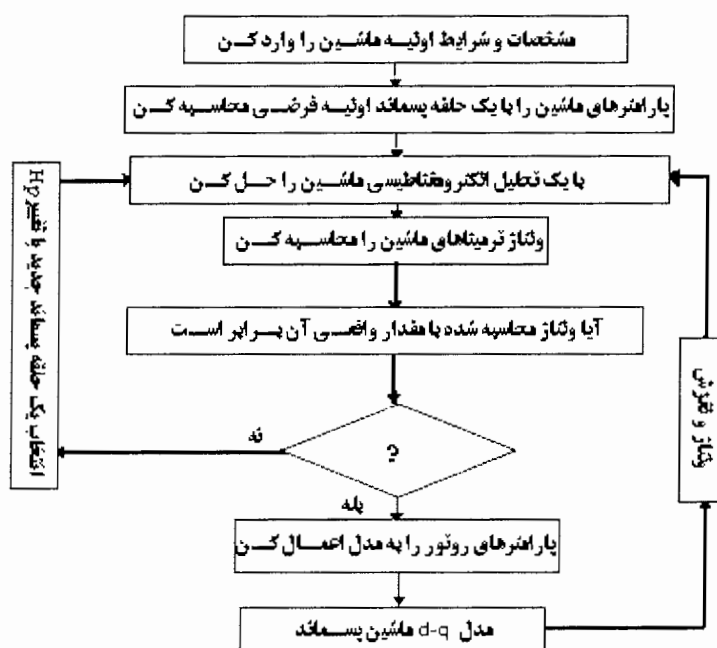
$$\alpha = \frac{2}{p} \sin^{-1}(2k-1) \quad \text{و} \quad k = \frac{\mathcal{R}_p}{\mathcal{R}_p + \mathcal{R}_0 + \left(\frac{p}{2}\right) \mathcal{R}_g} \left(\frac{\sqrt{2} m N_p h^2 p h}{4 r_h H_p} \right) \quad (44-2)$$

و داریم:

$$\mathcal{R}_g = \frac{g}{\mu_0 \pi (R_o - R_i)^2}, \quad \mathcal{R}_0 = \frac{t_r}{\mu_r \mu_0 \pi (R_o - R_i)^2}, \quad \mathcal{R}_p = \frac{t_r}{\mu_p \mu_0 \pi (R_o - R_i)^2} \quad \text{و} \quad \mu_p = \frac{\mu_r \alpha \mu_i}{\mu_r \alpha - \mu_i} \quad (45-2)$$

پس از محاسبه ولتاژ E_p آن را به یک مولفه متقارن سه متقارن بسط می‌دهیم و بعد از اعمال تبدیل پارک آن را به مدار معادل اعمال می‌کنیم. پارامترهای دیگر نیز پس از محاسبه به مدار معادل d-q اعمال می‌شوند.

در شکل ۱۸-۲ فلوچارت این پروسه نشان داده شده است.



شکل ۲-۱۸ فلوجارت الگوریتم محاسبه عملکرد ماشین پسماند

۲-۴-۲ شبیه سازی ماشین پسماند:

بر اساس معادلات دینامیکی ۲-۲۳ و مدار معادل $d-q$ موتور پسماند یک مدل دینامیکی گذرای از موتور پسماند در محیط MATLAB/SIMULINK شبیه سازی شده است. در این شبیه سازی با استفاده از یک برنامه کامپیوتری که با مدار معادل شبیه سازی شده لینک است، در هر لحظه با فرض قرار گرفتن موتور موتور در حالت دائمی (شبه استاتیک) یک تحلیل الکترومغناطیسی حالت دائمی بر عملکرد موتور انجام شده و پارامترهای متغیر مدار معادل را محاسبه و به آن اعمال می کند. جزئیات بیشتر این شبیه سازی و مشخصات موتور در ضمیمه الف آورده شده است.

۲-۵ بررسی رفتار موتور پسماند در شرایط مختلف

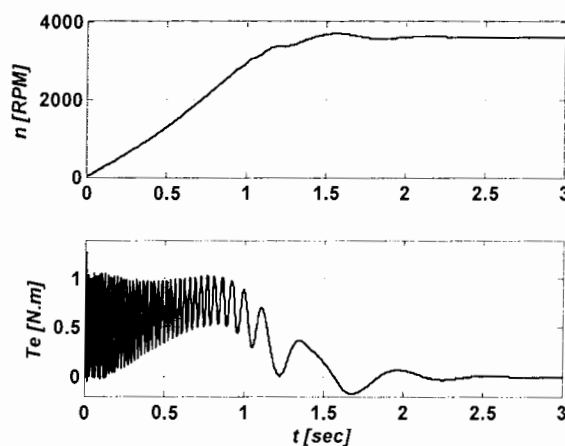
در این قسمت هم برای مشخص نمودن میزان اعتبار مدل و هم برای بررسی عملکرد دینامیکی موتور پسماند، رفتار موتور در شرایط گوناگون مورد مطالعه قرار می گیرد.

۲-۵-۱ موتور بدون بار و تغذیه با ولتاژ نامی:

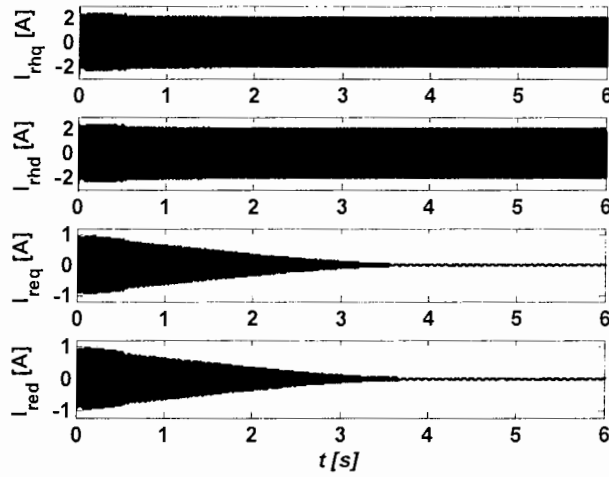
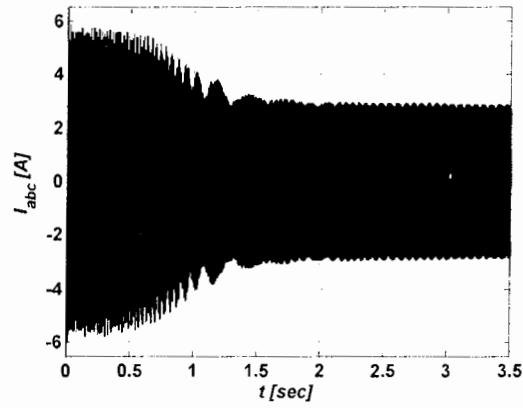
در شکل ۲-۱۹ گراف های مربوط به تغییرات سرعت، گشتاور، جریان ورودی و جریان بخش های مختلف مدار معادل روتور بر حسب زمان در حالتی که ماشین پسماند بی بار با ولتاژ نامی تغذیه می شود را نشان داده شده است. گشتاور راه اندازی حدود 1 Nm و زمان راه اندازی در این حالت حدود 2.5 ثانیه می باشد. میزان جریان راه اندازی فقط در چند لحظه اول حدود دو برابر جریان حالت سنکرون موتور است ولی بطور متوسط در طول زمان راه اندازی تا رسیدن به سرعت سنکرون جریان کمتر از دو برابر جریان در حالت سنکرون است.

همچنین در شکل ۲۰-۲ جریانهای مربوط به R_h و R_e در مبنای $d-q$ نشان داده شده است. همانطوری که مشاهده می شود جریان فوکو در هر دو محور پس از رسیدن سرعت موتور به سرعت سنکرون صفر می شوند.

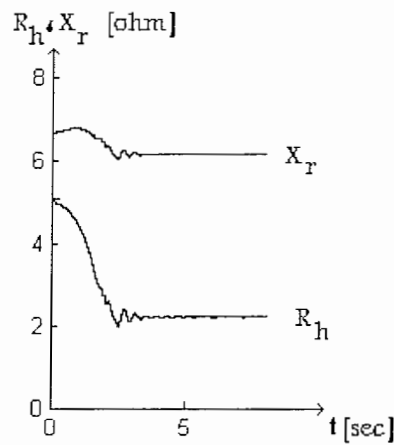
در حین راه اندازی برخی از پارامترهای موتور تغییر می کنند. تغییرات پارامترهای مقاومت معادل حلقه پسماند روتور R_h و X_r با زمان در شکل ۲۱-۲ نشان داده شده است. مقادیر این پارامترها با تغییر ولتاژ ورودی و لغزش تغییر می کنند و در رژیم سنکرون با فرض ثابت بودن ولتاژ ورودی و در نظر نگرفتن هارمونیک در تحلیل ماشین، در مقادیر مشخصی تثبیت خواهند شد.



شکل ۲-۱۹ سرعت و گشتاور در تغذیه نامی و بی باری



شکل ۲۰-۲ جریان سه فاز ورودی و جریان در بخشهای مختلف روتور در مدار معادل در بی باری و تغذیه نامی

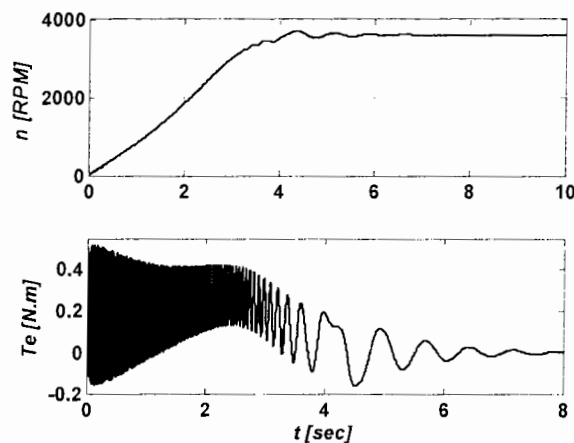


شکل ۲۱-۲ تغییرات پارامترهای روتور در تغذیه نامی و بی باری

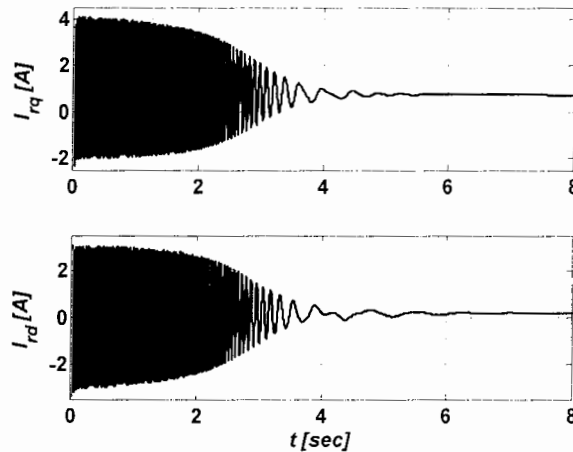
۲-۵-۲ موتور بدون بار و تغذیه با ۶۰٪ ولتاژ نامی:

برخی مشخصه های مهم عملکرد ماشین برای موتور در حالت عملکرد بی بار اما تغذیه با ۶۰٪ ولتاژ نامی در شکل ۲-۲۲ نشان داده شده است. همانطور که از این شکل مشاهده می شود موتور پسماند حتی این ولتاژ (و حتی کمتر) بدون مشکل، راه اندازی می شود و به حالت سنکرونیسم می رسد (کاری که برای خیلی از موتورهای سنکرون امکان پذیر نیست) کاهش ولتاژ سبب کم شدن گشتاور راه اندازی تا حدود 0.5 Nm و بالا رفتن زمان راه اندازی از $2/5$ ثانیه به حدود ۷ ثانیه شده است. افزایش زمان تثبیت حلقه پسماند کاری و تثبیت پارامترها در مقدار نامی خود نیز به این موضوع مرتبط می باشد.

جریانهای روتور نشان داده شده در شکل ۲-۲۰ در مرجع ساکن می باشند. وضعیت آنها در مرجع روتور برای این حالت بصورت نشان داده شده در شکل ۲-۲۳ خواهد بود. از شکل ۲-۲۳ می توان دریافت که پس از رسیدن روتور به سرعت سنکرون، موتور همانند یک ماشین آهنربای دائم عمل کرده و جریان در روتور DC خواهد بود. سطح جریانهای d و q در حالت دائمی بستگی به وضعیت مکانی روتور در حالت سنکرون دارد و چون این وضعیت تصادفی است، بنابراین دامنه آنها نیز تصادفی خواهد بود. در لحظات اول راه اندازی نوسانات سرعت در حالت تغذیه با ولتاژ کم در مقایسه با شرایط تغذیه نامی بیشتر است.



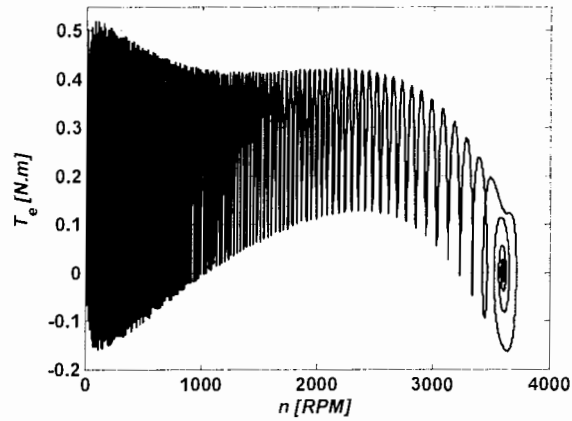
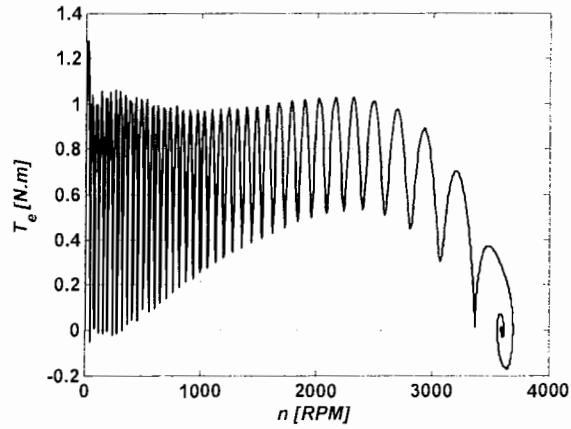
شکل ۲-۲۲ سرعت و گشتاور در ۶۰٪ تغذیه نامی و بی باری



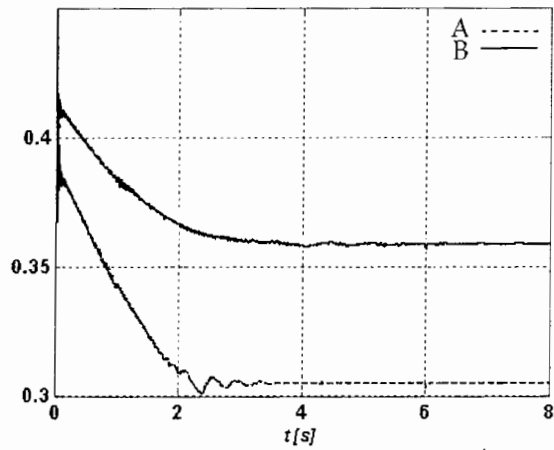
شکل ۲-۲۳ جریانهای روتور در مرجع روتور در ۶۰٪ تغذیه نامی و بی باری

در شکل ۲-۲۴ مشخصه های گشتاور بر حسب سرعت برای موتور بی بار در دو حالت تغذیه نامی و ۶۰٪ ولتاژ نامی برای مقایسه نشان داده شده است. از این شکل مشاهده می شود که برای ولتاژ کمتر در مقایسه با ولتاژ بیشتر، فرکانس نوسانات گشتاور و سرعت میرایی آن در زمان راه اندازی بیشتر می باشد. برای کاهش زمان راه اندازی، می توان در شروع کار موتور از سطح ولتاژ بیشتری نسبت به ولتاژ نامی استفاده کرد. اضافه کردن ولتاژ برای مدت کوتاه (Over Excitation) باعث بهبود عملکرد ماشین می شود. اگر بعد از یک مغناطیس سازی اولیه با ولتاژ نامی (به عنوان مثال برای چند سیکل) این ولتاژ به ۶۰٪ خود تنزل یابد هر چند که گشتاور کم می شود ولی همچنان که در شکل ۲-۲۵ نشان داده شده است، ضریب قدرت به میزان ۰/۰۵ افزایش می یابد در صورتی که این کاهش حساب شده و مناسب باشد کلیه خصوصیات ماشین از جمله بازده نیز بهتر خواهد شد. البته در هر صورت مقداری از گشتاور از دست خواهد رفت.

افزایش ولتاژ تغذیه برای مدتی کوتاه در رژیم سنکرون نیز موضوعی است که در بعضی مقالات به آن اشاره شده است در این روش کلیه خصوصیات ماشین از جمله ضریب قدرت، بازده و گشتاور خروجی افزایش پیدا خواهد کرد. از آنجا که موتور پسماند ذاتا موتوری با ضریب قدرت و بازده پایین است، اینچنین روشهایی باید مورد بررسی دقیق تر صورت گیرد.



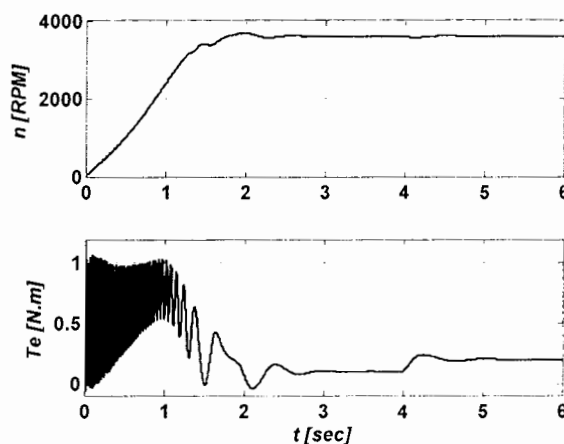
شکل ۲-۲۴ مشخصه گشتاور بر حسب سرعت برای ولتاژ نامی و ۶۰٪ ولتاژ نامی و بی باری



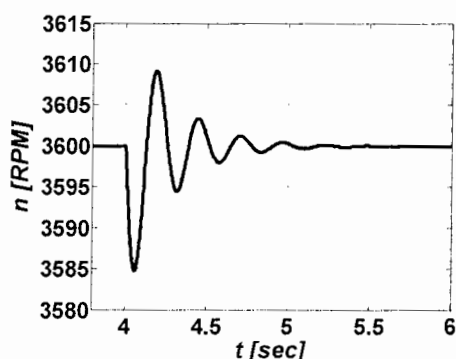
شکل ۲-۲۵ ضریب قدرت (A) ولتاژ نامی (B) 60% ولتاژ نامی

۲-۵-۳ تغییرات گشتاور و سرعت در هنگام اعمال یک تغییر پله ای در بار:

در این حالت موتور با ولتاژ نامی و بار 0.1 Nm کار می کند و در لحظه ۴ ثانیه بار موتور به 0.2 Nm افزایش می یابد در شکل ۲-۲۶ مشخصه های گشتاور و سرعت بر حسب زمان نشان داده شده است. تغییر در بار در سرعت سنکرون باعث نوسانی شدن گشتاور و سرعت می شود. در صورتی که بار از یک مقدار مشخص، بصورت آنی افزایش یابد میرایی نوسانات بشدت کاهش می یابد. این پدیده که همان پدیده هانتینگ است از جمله معایب موتور پسماند می باشد. این نوسانات معمولا با فرکانس حدود ۳ الی ۵ هرتز حول سرعت سنکرون اتفاق می افتد. تغییر سطح ولتاژ تغذیه موتور در حالت سنکرون نیز باعث ایجاد پدیده هانتینگ می شود. در شکل ۲-۲۷ بصورت واضح تر این پدیده مشاهده کرد. این پدیده در موتورهای که اینرسی بیشتری دارند، قابل ملاحظه تر است. اگر بار از یک حد مشخص زیادتر شود، بطوری که موتور دیگر توان شتابدهی آن را نداشته باشد، موتور زیر بار می خوابد. ولی در صورتی که گشتاور القایی موتور توانایی تحمل بار را داشته باشد موتور در سرعتی زیر سرعت سنکرون همانند یک موتور آسنکرون خواهد شد و در سرعتی زیر سرعت سنکرون به کار خود ادامه خواهد داد. نکته جالب دیگر در مورد افزایش بار در حالت سنکرون در این موتور ها این است که افزایش بار در حالت سنکرون در ازدیاد جریان کشیده شده توسط موتور تاثیر نسبتا کمی دارد.



شکل ۲-۲۶ سرعت و گشتاور بعد از یک پله تغییر بار در ولتاژ نامی



شکل ۲-۲۷ بزرگنمایی شده نوسانات سرعت پس از تغییر پله ای بار (پدیده هانتینگ)

پدیده هانتینگ به عنوان یکی از رفتارهای ذاتی ماشینهای سنکرون که به علت ساختار و نوع کاربردهای موتورهای پسماند در این ماشینها از اهمیت بیشتری برخوردار است، در فصول بعدی بطور دقیق تری بررسی خواهد شد. برای مشاهده بهتر این پدیده در هنگام تغییر بار یا سطح ولتاژ ورودی بار موتور باید دارای اینرسی بالایی باشد.

۲-۶ نتیجه گیری

بر اساس معادلات حاکم بر موتور پسماند و با توجه به حلقه کاری پویای پسماند روتور، مدلی دینامیکی گذرای در محیط MATLAB_SIMULINK ارائه شد و مشخصه های خروجی مدل در شرایط مختلف مورد بررسی قرار گرفت. از مقایسه ضمنی مشخصه های خروجی چهار حالتی که بررسی شد و نتایج آزمایشگاهی مشابه که در مقاله [۱۸] منعکس شده است، می توان به دقت و بالا بودن میزان اعتبار شبیه سازی صورت گرفته پی برد. در حالی که این شبیه سازی نسبت به روشهایی همچون FE (finite element) از زمانبری بسیار کمتری برخوردار است.

سرعت، گشتاور ثابت و جریان راه اندازی کم از ویژگیهای بارز موتور پسماند است که در خروجی های حالتیهای بررسی شده مشاهده شد. بالا بودن زمان راه اندازی، فرکانس بالا و میرایی کم نوسانات سرعت در زمان راه اندازی با ولتاژهای کمتر از ولتاژ نامی و همچنین پدیده هانتینگ به عنوان برخی از معایب موتور

پسماند در مشخصه های خروجی این مدل شبیه سازی شده قابل مشاهده است. میتوان با استفاده از مدل دینامیکی پریساج تاثیر حلقه های پسماند فرعی را بر عملکرد موتور پسماند، حتی در مواردی که تغذیه سینوسی خالص نباشد (مثلا تغذیه اینورتری) در مدلسازی به حساب آورد. چنین مدلسازی که تقریباً همه مشخصه ها و پدیده های موتور پسماند را می ارائه می نماید می تواند برای طراحی تغذیه و روشهای کنترلی بهبود عملکرد ماشین پسماند با اطمینان لازم بکار گرفته شود.

در فصل بعد به بررسی تاثیر پدیده های کیفیت توان بر عملکرد موتور پسماند می پردازیم.

فصل سوم

تأثیر شرایط مختلف تغذیه

ورودی بر عملکرد

موتور پسماند

۳-۱ مقدمه

در این فصل نتایج شبیه سازی عملکرد دینامیکی موتور پسماند سه فاز در شرایط تغذیه غیر ایده آل ارائه می گردد. مطالعه با استفاده از مدلسازی فصل قبل، انجام می گیرد. مبنای مقایسه، عملکرد دینامیکی یک موتور پسماند با تغذیه سینوسی خالص در نظر گرفته شده است و عملکرد موتور با منابع تغذیه نامتعادل و هارمونیک، همچنین عملکرد موتور تحت اضافه ولتاژ و کاهش ولتاژ لحظه ای مورد بررسی قرار می گیرد. نتایج ارائه شده، تاثیرات قابل ملاحظه این پدیده های کیفیت توان بر بازده، ضریب قدرت، نوسانات گشتاور و سرعت و همچنین عمر مفید موتورهای پسماند را آشکار می سازد. بدلیل اینکه موتورهای پسماند معمولاً با ولتاژها و فرکانس های متفاوت با مشخصات برق شهر تغذیه می شوند، مطالعه انجام گرفته در این فصل می تواند در طراحی بهتر تغذیه موتورها مورد استفاده قرار گیرد.

۳-۲ شبیه سازی عملکرد موتور پسماند در شرایط مختلف تغذیه ورودی

در زمینه تاثیر متقابل پدیده های کیفیت توان و عملکرد موتورهای مانند موتورهای القایی تحقیقات زیادی صورت گرفته است. این نوع بررسی ها در مورد موتورهای دیگر خصوصاً موتورهای کم قدرت کمتر مورد توجه قرار گرفته است. مدل دینامیکی گذرای پیاده سازی شده در فصل قبل با مشخصاتی جدید که در جدول ۳-۱ ارائه شده است، برای این مطالعه انتخاب می شود. با مبنای قرار دادن عملکرد موتور در حالت تغذیه سینوسی، مشخصه های مهم موتور همانند تغییرات جریان ورودی، گشتاور و سرعت در شرایط تغذیه با ولتاژهای ورودی غیر ایده آل مختلف مورد تجزیه و تحلیل و مقایسه قرار می گیرند.

جدول ۱-۳ مشخصات موتور پسماند سه فاز

$f=60$ HZ	$P_{out}=50$ W
$p=4$ poles	$R_s=2$ ohm
$H=0.4$	$L_s=0.0086$ H
$V_{ph}=60$ volt	$L_m=0.0504$ H

۱-۲-۳ تغذیه سینوسی^۱ سه فاز متعادل:

شکل ۱-۳ گرافهای مربوط به سرعت، گشتاور و جریان ورودی را بر حسب زمان در حالت تغذیه نرمال سینوسی سه فاز متعادل نشان می دهد. زمان راه اندازی موتور حدود ۶ ثانیه، گشتاور راه اندازی آن حدود ۰/۵ نیوتن متر و جریان در حالت ماندگار ۲/۵ آمپر می باشد که کمتر از دو برابر جریان راه اندازی است. ضریب قدرت موتور در این حالت حدود ۰/۳۷ است.

۲-۲-۳ تغذیه نا متعادل^۲:

عدم تعادل از جمله پدیده های متداول در سیستم تغذیه ماشین های الکتریکی بحساب می آید. در موتور پسماند عدم تعادل جزئی در ولتاژ ورودی باعث عدم تعادل شدیدی در جریان ورودی موتور می شود. گرمای ناشی از جریان زیاد علاوه بر کاهش بازده باعث کم شدن عمر مفید موتور می شود. جریان زیاد ناشی از حضور امپدانس های توالی منفی موتور در شرایط نامتعادل می باشد. این امپدانس ها دارای مقادیر کوچکتری نسبت به امپدانس های توالی مثبت^۳ (شرایط عادی) هستند (در حدود راکتانسهای زیرگذرای^۴ موتور). اثر دیگر عدم تعادل ولتاژ تغذیه ورودی ایجاد میدان چپ گرد در فاصله هوایی و روتور و ایجاد گشتاور نوسانی روی محور موتور در حالت ماندگار می باشد. این گشتاور نوسانی دارای هارمونیکهای زوج^۵ بوده و می تواند باعث لرزش و صدمه رساندن به بخشهای مکانیکی موتور شود.

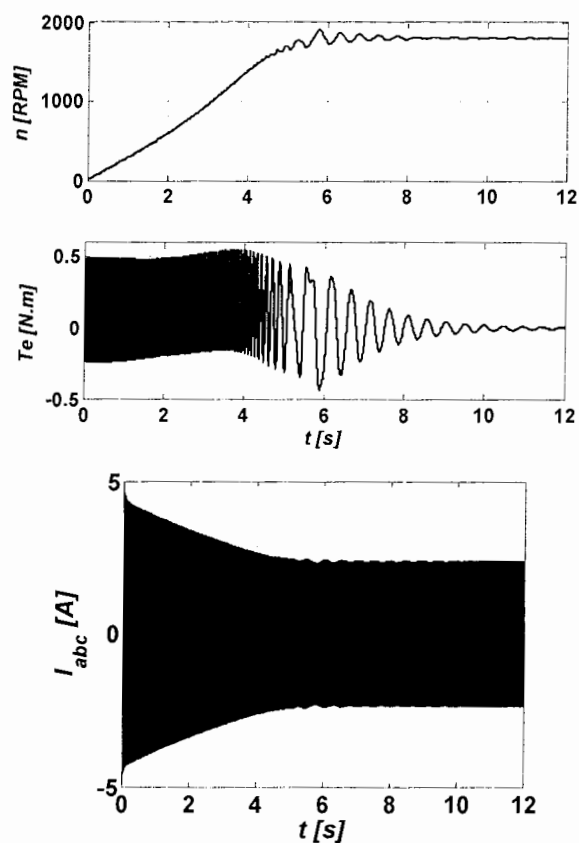
¹ Pure Sinusoidal

² Unbalance Supply

³ Positive sequence impedances

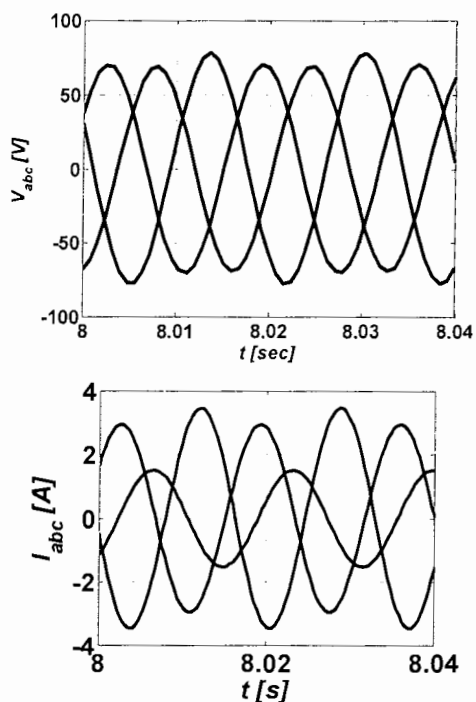
⁴ Sub-transient Reactance's

⁵ Even Harmonics

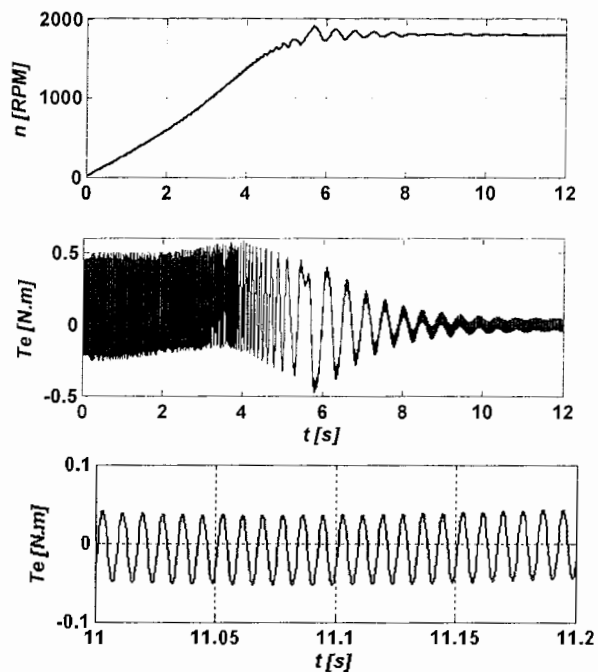


شکل ۳-۱ سرعت، گشتاور و جریان ورودی در حالت تغذیه سینوسی

در شبیه سازی انجام گرفته در این بخش یک شیفت فاز ۵ درجه ای در دو فاز و اضافه ولتاژی در فاز دیگر ایجاد می شود طوری که برآیند آنها صفر شود. این شیفت فاز باعث ایجاد عدم تعادل ولتاژهای خط و نتیجتاً عدم تعادل شدیدتری در جریان های خط می شود. شکل ۳-۲ جریان ها و ولتاژهای سه فاز خط را در این شرایط برای حالت ماندگار عملکرد ماشین نشان می دهد. شکل ۳-۳ نیز گرافهای سرعت، گشتاور و بزرگنمایی شده گشتاور حالت ماندگار را نشان می دهد. همانطوری که از شکل ۳-۳ مشاهده می شود گشتاور حالت ماندگار نوسانی بوده و دامنه نوسانات پیک تا پیک آن 0.05 نیوتن متر می باشد. دقت شود که در این شبیه سازیها به علت کوچک بودن سایز موتور مقاومت R_e مقدار نسبتاً بزرگی انتخاب شده به طوریکه مقدار گشتاور پسماندی در همه شرایط نسبت به گشتاور القایی چشمگیر تر است.



شکل ۲-۳ ولتاژها و جریانهای خط در حالت ۵ درجه عدم تقارن در دو فاز تغذیه ورودی



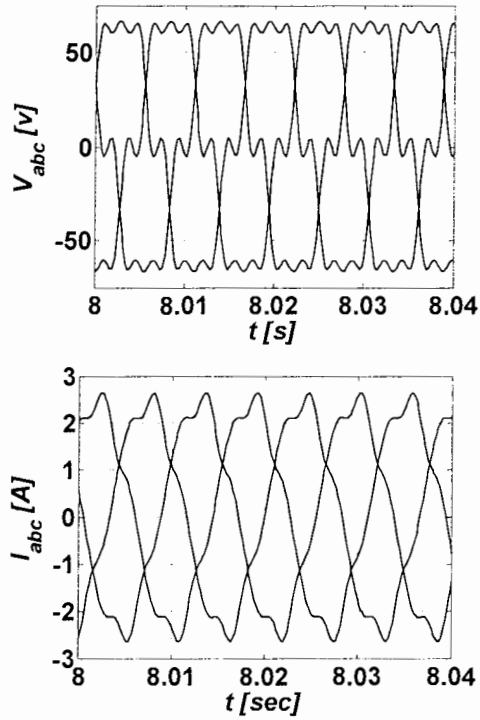
شکل ۳-۳ سرعت، گشتاور و بزرگنمایی شده گشتاور ماندگار در حالت ۵ درجه عدم تقارن در دو فاز ولتاژ ورودی

با آنالیز هارمونیکی گشتاور حالت ماندگار می توان به وجود هارمونیکهای زوج در آن پی برد بطوریکه دامنه هارمونیک دوم گشتاور حالت دائمی قابل ملاحظه است. از جمله تاثیرات دیگر عدم تعادل افزایش دامنه نوسانات هانتینگ در شرایط گذرا و ماندگار است. پدیده هانتینگ، همانطور که قبلا ذکر شد همان نوسانات سرعت حول سرعت سنکرون است که دارای فرکانسی در حدود ۳ الی ۵ هرتز می باشد.

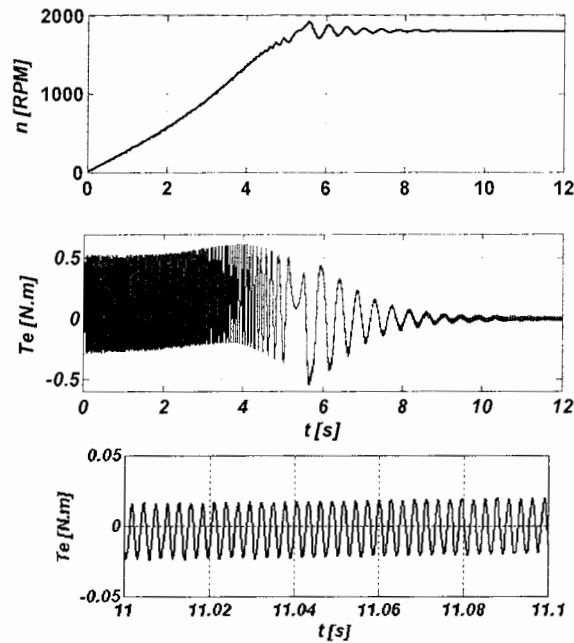
۳-۲-۳ تغذیه با اعوجاج هارمونیکی^۶ در ولتاژ:

برای ارائه نمونه ای از شرایط تغذیه هارمونیکی در این مقاله، فرض می شود که تغذیه ورودی علاوه بر هارمونیک اصلی، دارای هارمونیکهای پنجم و هفتم با دامنه های به ترتیب ۱۴/۳٪ و ۱۱٪ هارمونیک اصلی می باشد. این درصدهای هارمونیک، باعث ایجاد اعوجاج هارمونیکی کل ۱۸٪ در ولتاژ ورودی می شود (THD_v=%۱۸). همانند حالت ولتاژ تغذیه ورودی نامتعادل در وضعیت کار هارمونیکی نیز گشتاور حالت دائمی و جریان ورودی نوسانی خواهند شد. در این شرایط هارمونیکهای زوج همانند ۶ و ۱۲ در گشتاور حالت دائمی وجود دارند. ضریب قدرت نیز در این حالت کاهش یافته و به حدود ۰/۲۸ می رسد. شکل ۳-۴ جریان ها و ولتاژهای خط حالت ماندگار را و شکل ۳-۵ گرافهای سرعت، گشتاور و بزرگنمایی شده گشتاور حالت دائمی را برای موتور پسماند با شرایط کار تغذیه هارمونیکی نشان می دهد. همانطور که از مقایسه شکل های ۳-۳ و ۳-۵ مشاهده می شود فرکانس نوسانات دائمی گشتاور حالت تغذیه هارمونیکی بیشتر از فرکانس نوسانات حالت عدم بالانس تغذیه است.

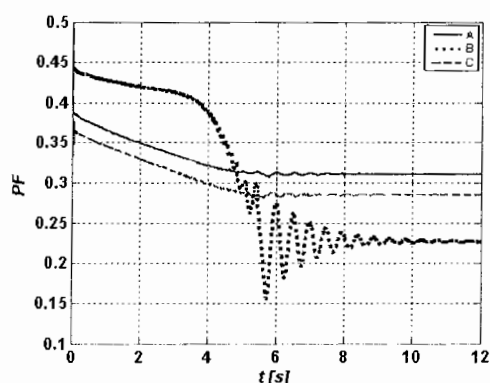
^۶ Harmonic distorted Supply



شکل ۳-۴ ولتاژها و جریانهای خط با ۱۸ درصد اعوجاج هارمونیک در ولتاژ ورودی



شکل ۳-۵ سرعت، گشتاور و بزرگنمایی شده گشتاور ماندگار با $THD_1=18\%$ در تغذیه



شکل ۳-۶ ضریب توان در (A) تغذیه سینوسی (B) تغذیه نامتعادل (C) تغذیه هارمونیک

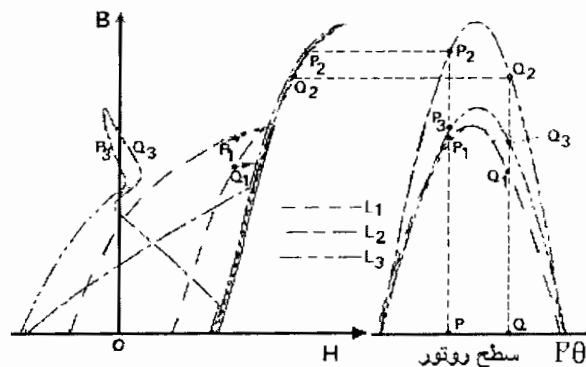
تغذیه هارمونیک موتور پسماند مخصوصا در بارهای با اینرسی زیاد باعث تشدید نوسانات هانتینگ حالت ماندگار و جریان ورودی می شود. در شکل ۳-۶ ضریب قدرت گذرا و ماندگار متوسط موتور برای هارمونیک اول سه حالت کار مختلف تغذیه سینوسی، تغذیه با عدم تعادل ولتاژ ورودی و تغذیه با ولتاژ هارمونیک موتور پسماند برای مقایسه نشان داده شده است. همانطور که از شکل ها مشاهده می شود عدم تعادل باعث کاهش شدید ضریب توان حالت دائمی شده است.

۳-۲-۴ افزایش و کاهش لحظه ای ولتاژ ورودی:

برای درک اثرات افزایش و یا کاهش موقت ولتاژ ورودی، باید ابتدا رفتار دینامیکی ماده پسماند روتور را در این شرایط مورد بررسی قرار داد. زمانیکه موتور در رژیم آسنکرون کار می کند هر نقطه از روتور چگالی شاری با تغییرات سینوسی را تجربه می کند.

در این حالت برای هر لحظه، میدان هر نقطه از روتور را می توان با یک نقطه از حلقه کاری L متناظر دانست. بنابراین میدان مغناطیسی روتور هم دارای تغییرات زمانی و هم دارای تغییرات فضایی می باشد. می توان گفت که سطح حلقه پسماند کاری در لحظه ورود به سنکرونیزم با حداکثر توان و گشتاور پسماند خروجی ماشین متناسب است. در رژیم سنکرون وضعیت گذرای زمانی مغناطیس نقاط روتور تثبیت شده است و روتور در یک حلقه پسماند کاری مشخص مطابق شکل ۳-۷ کار می کند [۱۹]. به عنوان مثال

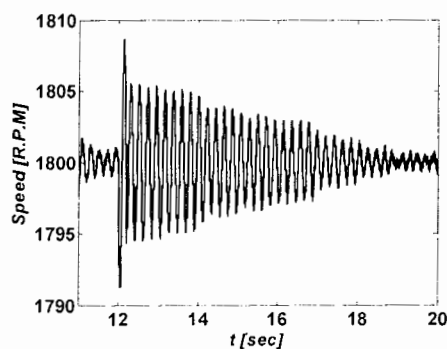
نقاط P و Q روی سطح روتور متناظر با P_1 و Q_1 در حلقه پسماند کاری L_1 می باشند. در صورتی که ولتاژ استاتور افزایش یابد این تغییر ولتاژ از طریق شار فاصله هوایی به روتور اعمال شده و چگالی شار روتور افزایش می یابد. بنابراین نقاط P_1 و Q_1 روی حلقه L_1 به نقاط P_2 و Q_2 و سایر نقاط حلقه L_1 به نقاط متناظر روی حلقه L_2 صعود می کنند. با فرض اینکه بار ثابت است جهت حلقه L_2 همانند جهت حلقه L_1 است و با همین فرض می توان نتیجه گرفت که سطوح حلقه های L_1 و L_2 باید برابر باشند. اگر ولتاژ دوباره به مقدار قبلی بازگردد، چگالی شار کم شده و نقاط P_2 و Q_2 به نقاط P_3 و Q_3 در حلقه L_3 نزول می کنند. سطح این حلقه نیز با سطح حلقه های L_1 و L_2 برابر است. در صورتی که بار افزایش یابد سرعت موتور کاهش یافته و جابجایی روتور در این حالت با در نظر گرفتن جهت چرخش شار برعکس می شود و جهت تغییرات چگالی شار عوض خواهد شد [۱۹].



شکل ۳-۷ تغییرات حلقه پسماند کاری در هنگام افزایش و کاهش لحظه ای ولتاژ ورودی [۱۹]

نحوه تعویض حلقه های پسماند روتور در شرایط افزایش و کاهش موقت ولتاژ در مواد پسماند مختلف روتور متفاوت می باشد. به گونه ای که در برخی مواد پسماند روتور، حلقه های پسماند کاری قبل و بعد از اعمال اضافه ولتاژ و برگشت به حالت اول می توانند خیلی مشابه باشند. در برخی مواد دیگر افزایش ولتاژ برای مدتی کوتاه در حالت سنکرون باعث بهبود مشخصات مغناطیسی روتور شده و سبب کاهش جریان ورودی موتور و در نتیجه کاهش تلفات مس و افزایش گشتاور خروجی و بازده کاری ماشین می شود. در اینچنین موتور هایی می توان در حالت سنکرون با اضافه کردن ولتاژ ورودی به $1/5$ برابر ولتاژ نامی (برای

مدت کوتاهی) به میزان قابل ملاحظه ای بازده و گشتاور خروجی موتور را افزایش داد. این موضوع به OVER EXCITATION موتور پسماند معروف است. بدیهی است که در هنگام اضافه ولتاژ و کاهش ولتاژ لحظه ای پارامترهای موتور تغییر کنند و نوسانات سرعت ایجاد شود. این نوسانات سرعت در بارهای با اینرسی زیاد محسوس تر است. شکل ۳-۸ نوسانات سرعت (هانتینگ) حول سرعت سنکرون هنگامی که اضافه ولتاژی به میزان ۱۰٪ و به مدت ۰.۲sec (معادل پریود نوسانات هانتینگ) رخ داده را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۸ نوسانات سرعت در اضافه ولتاژ ۱۰ درصدی به مدت ۰.۲ ثانیه

۳-۳ نتیجه گیری

در این فصل عملکرد یک موتور در شرایط وجود مشکلات کیفیت توان در ولتاژ ورودی مورد بررسی قرار گرفت. عدم تعادل و هارمونیکی بودن تغذیه ورودی باعث کاهش بازده و ضریب قدرت موتور شده و زمان راه اندازی موتور را افزایش می‌دهند. شرایط هارمونیکی باعث تشدید نوسانات هانتینگ در حالت ماندگار نیز می‌شود. با اضافه کردن ولتاژ ورودی به میزان ۱.۵ برابر ولتاژ نامی در حالت سنکرون برای مدت کوتاهی می‌توان مشخصات مغناطیسی برخی مواد پسماند روتور را بهبود بخشیده و در نتیجه بازده و گشتاور خروجی موتور را افزایش داد. از آنجاییکه موتور پسماند از راندمان و ضریب قدرت پایینی برخوردار است بنابراین اینچنین مطالعاتی می‌تواند به دقت بیشتر در طراحی تغذیه های مناسبتر برای موتور های پسماند منجر شود.

فصل چهارم

تأثيرات شرایط مختلف تغذیه
ورودی موتور پسماند بر
پدیده هانتینگ

۴-۱ مقدمه

هر چند که سرعت ماندگار در موتورهای سنکرون معمولاً ثابت در نظر گرفته می شود، اما این موتورها دارای نوساناتی بصورت دائمی حول سرعت سنکرون بوده که به پدیده هانتینگ^۱ معروف است. فرکانس این نوسانات حدود ۳ الی ۵ هرتز بوده و دامنه آنها در صورتی که تغییری در بار یا ولتاژ موتور در حالت سنکرونیزم ایجاد شود، با یک پوش نمایی^۲ به دامنه در حالت ماندگار می رسد. این پدیده در موتورهای سنکرونی که دارای گشتاور بالا بوده و میزان ویسکوزیته بودن ساختار مکانیکی و بار موتور نسبت به اینرسی آن قابل ملاحظه است کمتر مطرح است و خود ساختار موتور و بار باعث میرایی این نوسانات می شوند. ولی موتورهای همانند موتور پسماند که عموماً برای قدرتهای کم با گشتاور پایین و همراه بارهای با اینرسی بالا مورد استفاده قرار می گیرند، نسبت به نویزهای مکانیکی و الکتریکی بیشتر حساسیت نشان داده و پدیده هانتینگ در آنها مشهودتر است [۲۰].

پدیده هانتینگ باعث ایجاد نوسان در گشتاور و ریپلی شدن جریان ورودی موتور می شود که خود باعث ایجاد نویز توسط موتور سنکرون می شود. این پدیده می تواند در دستگاههایی اندازه گیری همانند ژيروسکوپها که موتور سنکرون عامل محرک آنهاست باعث ایجاد خطا در محاسبات گردد. برای کنترل و میرا نمودن نوسانات هانتینگ روشهای کنترلی و ملاحظات طراحی در برخی مقالات مطرح شده است [۲۵].

در این فصل ابتدا به طور ریشه ای عوامل ایجاد پدیده هانتینگ و روشهایی میرا نمودن این نوسانات بررسی می شوند و در ادامه تاثیر شرایط مختلف تغذیه خروجی بر این پدیده به عنوان یکی از رفتارهای مهم موتور پسماند مورد مطالعه قرار می گیرد.

^۱ Hunting Phenomenon

^۲ Exponential Trend Line

۲-۴ ریشه یابی عوامل ایجاد پدیده هانتینگ

۱-۲-۴ بررسی پدیده هانتینگ بوسیله معادله دینامیکی سیستم :

در موتورهای پسماند وضعیت قطبهای مغناطیسی روی روتور به صورت جزئی با گشتاور تغییر می کند. در طول پدیده پسماند برخی عوامل طبیعی در میرا نمودن آن نقش دارند که از آن جمله می توان به تاثیر خطی جریان فوکو و تاثیر غیر خطی خاصیت پسماند اشاره کرد. عامل اساسی پوش نمایی میرایی نوسانات در پدیده هانتینگ به جریان فوکو بر می گردد. این عامل در جسم صلب روتور نیز وجود دارد ولی برای زیاد کردن آن به این منظور و همچنین بالا بردن گشتاور راه اندازی می توان از یک پوشش هادی در روتور موتور پسماند استفاده کرد. در حالی که عامل غیر خطی سبب ایجاد Q نوسانی می شود که نسبت به حرکت زاویه ای به صورت معکوس تغییر می کند. زمانی که موتور باری با گشتاور ثابت را می گرداند ممکن است که بر سرعت سنکرون حالت ماندگار یک چرخش نامنظم از زاویه فاز روتور (حول بردار میدان با سرعت ثابت) سوار شده باشد. این چرخش معمولاً بصورت نوسانی و پریودی بوده اما دارای دامنه و فازی است که بصورت تصادفی تغییر می کنند. به هر حال پدیده هانتینگ در موتور های پسماند به علت ساختارهای مختلف این ماشین و نیز ابهاماتی که در نحوه عملکرد آن وجود دارد، دارای عوامل فرعی (علاوه بر مواردی که در سایر موتورهای سنکرون وجود دارد) نیز می باشد.

همانطور که در بخشهای قبلی ذکر شد دینامیک روتور را می توان با معادله مرتبه دوم زیر بیان کرد [۲۳]:

$$j \frac{d^2\theta}{dt^2} + B \frac{d\theta}{dt} + 2MI_r I_s \sin(\omega_s t - 2\gamma) = T_L(t) \quad (1-4)$$

سمت چپ معادله ۱-۴ یک سیستم نوسانی مرتبه دوم با میرایی B را نشان می دهد. یک تغییر در T_L باعث می شود که سیستم تحریک شده و نوسانی گردد.

فرض شود که اغتشاش خارجی وجود نداشته باشد ($T_L(t)=0$). در اینصورت با توجه به $\theta = \Omega t - \gamma$ خواهیم داشت:

$$j \frac{d^2}{dt^2} (\Omega t - \theta) + B \frac{d}{dt} (\Omega t - \theta) + 2MI_r I_s \sin(\omega_s t - 2(\Omega t - \theta)) = 0 \quad (2-4)$$

با حل معادله ۲-۴ خواهیم داشت:

$$B\Omega = -2MI_s I_r \sin((\omega_s - 2\Omega)t + 2\theta) \quad (3-4)$$

اهمیت معادله ۳-۴ در این است که نشان می دهد که اینرسی ز در میزان تغییر زاویه روتور تأثیری ندارد و از آنجا که B و Ω ثابت هستند، سمت راست معادله ۳-۴ ثابت است پس بخش متغیر با زمان آن نیز باید برابر صفر قرار گیرد. بنابراین داریم $\Omega = \omega_s/2$ که یک بیان از پیش شناخته شده است و نشان می دهد که سرعت مکانیکی نصف سرعت الکتریکی است. می توان دریافت که در صورت عدم حضور گشتاور خارجی و جایگذاری Ω عبارت گشتاور به صورت ۴-۴ در خواهد آمد.

$$T = 2MI_s I_r \sin 2\theta \quad (4-4)$$

یا به عبارت دیگر داریم:

$$\theta = \frac{1}{p} \sin^{-1} \left[\frac{-B\Omega}{pMI_s I_r} \right] \quad (5-4)$$

رابطه ۵-۴ نشان می دهد که اگر B زیاد شود زاویه عقب افتادگی میدانهای استاتور و روتور نیز زیادتر می شود و در صورتی که با افزایش جریان، شدت میدان مغناطیسی روتور و استاتور افزایش یابد، این زاویه کاهش می یابد. می توان از معادله ۵-۴ نامساوی ۶-۴ را نتیجه گرفت:

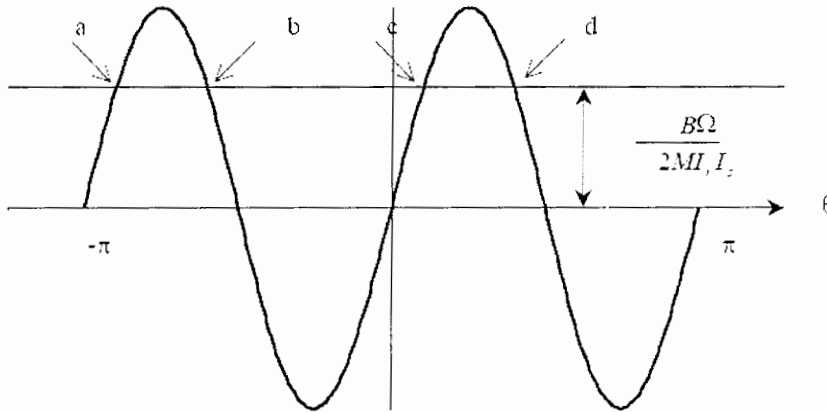
$$\left| \frac{-B\Omega}{pMI_s I_r} \right| \leq 1 \quad (6-4)$$

در شکل ۱-۴ می بینیم که برای یک سیکل مکانیکی، موتور از معادله ۵-۴ چهار جواب برای θ خواهد داشت. این زوایا باید برای موتور در شرایط وجود اغتشاش مورد بررسی قرار گیرند [۲۳].

اگر موتور با سرعت سنکرون بچرخد و زاویه θ در مقدار نامی خود باشد. یک اغتشاش ناگهانی در بار یا بخش مکانیکی موتور سبب تحت تغییر θ به اندازه θ' خواهد شد. افزایش ناگهانی اصطکاک باعث زیاد شدن θ شده و موتور با افزایش گشتاور خروجی در این وضعیت عکس العمل نشان خواهد داد. این موضوع سبب ایجاد یک فراجهدش در سرعت موتور شده و نوساناتی حول θ نامی در سرعت ایجاد خواهد شد. تا

تأثیرات شرایط مختلف تغذیه ورودی موتور پسماند بر پدیده هانتینگ

این که نوسانات در اثر اصطکاک سیستم و جریان گردابی و نیز خاصیت پسماند به θ حالت ماندگار می‌رسند.



شکل ۴-۱ نمودار $T=2MI_s I_s \sin 2\theta$ و مقادیر ممکن برای θ در a,b,c,d [۲۳]

در طول مدت گذرایی پدیده هانتینگ زاویه روتور با عبارت ۷-۴ قابل بیان است [۲۳]:

$$\gamma = \Omega t - \theta - \theta'(t) \quad (7-4)$$

با جایگذاری ۷-۴ در ۲-۴ داریم:

$$j \frac{d^2}{dt^2} (\Omega t - \theta - \theta'(t)) + B \frac{d}{dt} (\Omega t - \theta - \theta'(t)) + 2MI_s I_s \sin(\omega_s t - 2(\Omega t - \theta - \theta'(t))) = T_l(t) \quad (8-4)$$

در رابطه ۸-۴ ترم اول و دوم به راحتی با دیفرانسیل عبارت زاویه روتور قابل تخمین می‌باشند. ولی ترم غیر خطی سوم که بصورت یک عبارت سینوسی است باید توسط بسط تیلور تخمین زده شود.

$$f(x) = f(a) + (x-a)f'(a) + \frac{1}{2!}(x-a)^2 f''(a) + \dots \quad (9-4)$$

a نقطه مرکزی است که بسط حول آن صورت می‌گیرد. برای موتور a معادل 2θ است و متغیر x را می‌توان بصورت زیر فرض کرد

$$x = \omega_s t - 2(\Omega t - \theta - \theta'(t)) \Rightarrow x = 2\theta + 2\theta'(t) \quad (10-4)$$

پس عبارت سینوسی قابل تقریب به دو جمله اول آن بصورت زیر است:

$$2MI_r I_s \sin 2(\theta + \theta'(t)) = 2MI_r I_s [\sin 2\theta + 2\theta'(t) \cos 2\theta] \quad (11-4)$$

با در نظر گرفتن $B\Omega = -2MI_r I_s \sin 2\theta$ معادله ۴-۸ قابل تبدیل به معادله دیفرانسیل مرتبه دوم زیر است:

$$\frac{d^2}{dt^2} \theta'(t) + \frac{B}{j} \frac{d}{dt} \theta'(t) + \frac{2(2MI_r I_s \cos 2\theta)}{j} \theta'(t) = T_l(t) \quad (12-4)$$

در معادله ۴-۱۲ میتوان $2(2MI_r I_s \cos 2\theta)$ را برابر ثابت k فرض کرد.

حل معادله ۴-۱۲ را ابتدا با حل معادله همگن آن آغاز می کنیم و پس از آن جوابهای خصوصی آن را نیز حدس می زنیم. حل معادله همگن آن بصورت زیر است [۲۳]:

$$s^2 + \frac{B}{j}s + \frac{k}{j} = 0 \quad (13-4)$$

که فرکانسهای طبیعی آن می تواند به صورت زیر باشد:

$$s_1 = -\frac{B}{2j} + \sqrt{\left(\frac{B}{2j}\right)^2 - \frac{k}{j}}, \quad s_2 = -\frac{B}{2j} - \sqrt{\left(\frac{B}{2j}\right)^2 - \frac{k}{j}} \quad (14-4)$$

پس داریم:

$$\theta'_h(t) = c_1 e^{s_1 t} + c_2 e^{s_2 t} \quad \begin{cases} T_l(t \leq 0) = 0 \\ T_l(t > 0) = T \end{cases} \quad (15-4)$$

یک حدس معقول از جوابهای خصوصی معادله ۴-۱۲ برای بصورت $\theta'_h(t) = Tj/k$ می باشد.

برای تعیین ضرایب c_1, c_2 خواهیم داشت:

$$\theta'(t) = \frac{Tj}{k} + c_1 e^{s_1 t} + c_2 e^{s_2 t} \quad \begin{cases} \theta'(t=0) = 0 \\ \frac{d}{dt} \theta'(t=0) = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \frac{Tj}{k} + c_1 + c_2 = 0 \\ c_1 s_1 + c_2 s_2 = 0 \end{cases} \quad (16-4)$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$\begin{cases} c_1 = \frac{Tj}{k} \frac{s_2}{s_1 - s_2} \\ c_2 = \frac{Tj}{k} \frac{s_1}{s_2 - s_1} \end{cases} \Rightarrow \theta'(t) = \frac{Tj}{k} \left(1 + \frac{s_2}{s_1 - s_2} e^{s_1 t} + \frac{s_1}{s_2 - s_1} e^{s_2 t} \right) \quad (17-4)$$

در معادله ۱۷-۴ مقدار s_1, s_2 و نیز k به زاویه θ کاری وابسته اند.

شکل ۱-۴ نشان می‌داد که چهار امکان برای θ در یک سیکل مکانیکی وجود داشت. در اینجا ما هر یک از آنها را برای بررسی همگرایی جوابهای معادله مورد بررسی قرار می‌دهیم.

از آنجاییکه s_1, s_2 میزان افزایش یا کاهش نمایی θ را نشان می‌دهند، اولین ضرایبی هستند که مورد بررسی قرار می‌گیرند. ابتدا تأثیرات پارامتر k را بر فرکانسهای طبیعی سیستم مورد بررسی قرار می‌دهیم. واضح است که وقتی k صفر است (گشتاور تولیدی صفر است) مقدار s_1 صفر خواهد شد. و پاسخ سیستم با فرکانس نمایی $s = -B/j$ میرا خواهد شد. اینچنین حالتی با وجود اصطحاک در سیستم هرگز در عمل پیش نخواهد آمد. اگر k منفی باشد ریشه s_1 حقیقی و مثبت خواهد بود. این بدان معنی است که ترم دوم از معادله ۱۷-۴ واگرا شده و سیستم ناپایدار می‌شود. ولی اگر k مثبت باشد و داشته باشیم: $k/j > (B/2j)^2$ در این صورت جمله‌های زیر رادیکال منفی خواهد شد و s_1, s_2 مختلط خواهند شد. این جفت قطب مزدوج مختلط در عمل وجود داشته و عامل اصلی پدیده هانتینگ می‌باشند.

هر چه زیادتر شود و مقدار B کمتر گردد این جفت قطب مزدوج مختلط به مبدا مختصات نزدیکتر بوده و پدیده هانتینگ حادثر خواهد شد (همانند وضعیتی که برای کاربرد موتور های پسماند مطرح است). از آنجاییکه k با $\cos 2\theta$ متناسب است عبارت k برای $3\pi/4 < \theta < \pi/4$ منفی و برای $|\theta| < \pi/4$ مثبت خواهد بود [۲۳]. بنابراین با توجه به بحث بالا و شکل ۴ نقاط b, d غیر معتبر و نقاط a, c نقاط عملکرد پایدار سیستم را نشان می‌دهند.

در صورتی که s_1, s_2 را با اعداد مختلط با قسمت حقیقی $\alpha_{1,2}$ و قسمت موهومی $\omega_{n1,2}$ جایگزین کنیم معادله خواهیم داشت:

$$\theta'(t) = \frac{Tj}{k} \left[1 - e^{-\alpha t} \left(\cos \omega_n t + \frac{\alpha}{\omega_n} \sin \omega_n t \right) \right] \quad (18-4)$$

معادله ۴-۱۸ می تواند دید بهتری را در مورد جوابهای θ' به ازای مقادیر مختلف قسمت‌های حقیقی و موهومی جفت قطب مزدوج مختلط در اختیار ما بگذارد.

۴-۲-۲ تفسیر پاسخ معادله دینامیکی در شرایط مختلف :

در عمل نوسانات پدیده هانتینگ کاملاً سینوسی با یک پوش نمایی نیستند و دارای اغتشاشاتی می باشند. در این قسمت سعی خواهد شد علت بی نظمی های پدیده هانتینگ به طور دقیق مورد بررسی قرار گیرد. فرض شود یک اغتشاش در یک موتور پسماند که در یک وسیله ابزار دقیق مورد استفاده قرار گرفته است، رخ دهد. این اغتشاش می تواند باعث ایجاد یک سری گشتاور پالسی با زمان تناوب بسیار کوتاه نسبت به پریود نوسانات روتور (پدیده هانتینگ) شود. پالس اولی موجب ایجاد اغتشاش در گردش روتور و تحت تاثیر قرار دادن نوسانات آن گردد. اگر موتور و بار آن از نوع اینرسیال باشند وقتی پالس دومی رخ می دهد این پالس نسبت به اولی فازی تصادفی پیدا خواهد کرد. بنابراین اثر پالس دوم می تواند بصورت تقویت و یا تضعیف پالس اول باشد و این اتفاق در مورد سایر پالسها نیز می توان رخ دهد. وقتی روتور جلوتر از زاویه بار نوسان کند نیروی ضد محرکه الکتریکی افزایش می یابد طوری که موتور همانند ژنراتور قدرت تولید می کند. این موضوع سبب کاهش دامنه جریان در ترمینالهای موتور می شود. بالعکس وقتی روتور از زاویه بار نامی عقب می افتد، موتور به جریان زیادتری نیاز خواهد داشت. این موضوع عامل نوسانات جریان در اثر پدیده هانتینگ می باشد [۲۰].

اگر گشتاور حالت ماندگار موتور T_0 باشد و زاویه بار در حالت ماندگار ϕ_0 در نظر گرفته شود. وقتی گشتاور به اندازه ΔT افزایش یابد زاویه فاز روتور به اندازه $\Delta T/k_t$ افزایش خواهد یافت که در آن k_t ضریب سختی روتور است. اگر افزایش گشتاور بصورت یک تابع سینوسی باشد پاسخ جابجایی روتور در فرکانس رزونانس $\omega_n = (k_t/J)^{1/2}$ روی مقدار DC به اندازه $\Delta T/k_t$ با نسبت $Q = \zeta/2$ افزایش می یابد. که ζ در آن نسبت میرایی بحرانی است. پاسخ پس از عبور از یک فراجهدش با فرکانس رزونانس ω_n حول موقعیت حالت ماندگار خود نوسان می کند [۲۰].

۴-۲-۳ تأثیرات پدیده هانتینگ در عملکرد سیستمها:

در سیستمهای تعیین موقعیت همانند ژيروسکوپها و در تجهیزات ضبط و پخش ویدئویی و سیستمهای مشابه پدیده هانتینگ باعث ایجاد خطا در عملکرد آنها شود. در ژيروسکوپها نوسان سرعت باعث ایجاد خطای محاسباتی می گردد [۲۵].

در این قسمت به بررسی دقیقتر تأثیر پدیده هانتینگ بر عملکرد یک سیستم ضبط و پخش ویدئویی می پردازیم. در اینگونه سیستمها که عملکرد آنها بر اساس زمان بنا نهاده شده است پدیده هانتینگ می تواند باعث ایجاد خطا در عملکرد آنها شود. بدین صورت که هر اغتشاش در میزان زاویه نامی بار سبب تأثیر گذاری در مبنای زمانی سیستم خواهد شد. فرض شود که موتور در سرعت زاویه ای متوسط Ω_0 بگردد و پدیده هانتینگ نیز با زاویه چرخش φ_p و فرکانس رزنانس ω_n وجود داشته باشد. هر تغییر در گشتاور باعث شیفت زمانی به سمت جلو و یا عقب خواهد شد. یعنی ممکن است جابجایی روتور بر اثر آن در جهت یا مخالف جهت دوران روتور باشد. بنابراین زمان عبور یک نقطه مشخص از هد ویدئو بر روی فیلم می تواند افزایش یا کاهش یابد. که باعث اختلال در عملکرد سیستم خواهد شد. این موضوع به ایجاد خطای جابجایی زمانی در اثر پدیده هانتینگ معروف است.

همانطور که گفته شد گشتاور مغناطیسی توسعه یافته موتور پسماند با سطح حلقه های B-H متناسب است. برای یک موتور پسماند در حال نوسان سطح حلقه های B-H بین یک مقدار ماگزیمم و مینیمم تغییر می کند. و گشتاور نیز حول یک مقدار متوسط T_0 با یک پیک ΔT تغییر می کند. مسیر مغناطیسی B-H علاوه بر حلقه های اصلی دارای حلقه های فرعی نیز خواهد بود. اگر شدت میدان مغناطیسی روتور و میدان مغناطیسی استاتور سینوسی با مقادیر پیک H_p, B_q فرض شوند، سطح حلقه پسماند را می توان از رابطه $\pi H_p B_q \sin \alpha$ و حجم ماده مغناطیسی روتور برای از رابطه $P_{H\ out} = I V_r E_h$ و توان ماگزیمم خروجی موتور در شرایط سنکرون از $V_r = 2\pi R_{av}(R_o - R_i)t_r$ بدست می آید. بنابراین در هر نقطه از روتور با در نظر گرفتن زاویه مبنای β مقدار H بین دو مقدار

$$\begin{cases} H_1 = H_p \sin(\beta - \varphi_1) \\ H_2 = H_p \sin(\beta - \varphi_2) \end{cases}$$

تغییر می کند و انرژی تلف شده در طول مدت نوسان با سطح حلقه های

پسماند فرعی متناسب است. با بیضوی گرفتن مسیر حلقه ها می توان با تقریب مقدار انرژی تلف شده در یک سیکل را به صورت ۴-۱۹ نوشت [۲۰]:

$$W_{II} \approx \pi H_p^2 (\varphi_2 - \varphi_1) \quad (19-4)$$

۴-۲-۴ بررسی شیوه های ممکن در کنترل پدیده هانتینگ:

مشکل پدیده هانتینگ در بارهایی نمود پیدا می کند که جنبه اینرسی آنها بیشتر از جنبه ویسکوزیته آنها است. به عنوان مثال موتور پسماند موجود در ژيروسکوپها در سرعت سنکرون در معرض گشتاور زیادی نیست (اصتحکاک سیستم نیز جزعی و زاویه بار کم است). در صورتی که کوچکترین اختلالی در بلبرینگها یا بار صورت گیرد به دلیل اینرسی چرخ طیار ژيرو حرکت سیستم نوسانی خواهد شد. ولی اگر بار ویسکوزیته ای و سنگین باشد، بخش مکانیکی سیستم خود باعث میرا نمودن سریع نوسان می شود. نقطه عملکرد ماشین (مثلا زاویه بار) در اثر نویزهای مکانیکی وارده بر سیستم بر یک منحنی سینوسی سوار می گردد که ما آن را به پدیده هانتینگ می شناسیم و در شکل ۴-۱ نشان داده شد. با بررسی این وضعیت در می یابیم که دو درجه آزادی وجود دارد که می توان از آنها برای کنترل پدیده هانتینگ بهره جست [۲۳].

۱- تغییر دامنه منحنی گشتاور که به مدلاسیون دامنه معروف است (AM).

۲- تغییر فاز منحنی گشتاور که به مدلاسیون فرکانس معروف است (FM).

با یک استدلال منطقی می توان نشان داد که مدلاسیون AM تاثیر کمی در بهبود پدیده هانتینگ دارد و اصولاً مدلاسیون FM بر AM ترجیح داده می شود.

از آنجاییکه در اکثر سیستمهایی که پدیده هانتینگ در آنها مطرح است ایجاد سرعت ثابت توسط موتور محرک لازم است، انتظار بر این است که با اعمال شیوه های کنترلی سرعت را ثابت نمود و چون نوسان سرعت شاخصی از نوسان زاویه بار است بنابراین برای کنترل پدیده هانتینگ باید بر نوسانات θ فائق آمد. شکل ۴-۱ و معادله $T=2MI_s I_r \sin 2\theta$ را در نظر بگیریم. در شکل دیدیم که نقاط a, c معتبر و نقاط b, d نامعتبر می باشند. اگر دامنه و فرکانس نوسانات به گونه ای باشند که در یک سیکل کاری روتور امکان

استقرار در دو نقطه متفاوت را در یک گشتاور بار خاص داشته باشد، حتما هانتینگ رخ می دهد. اما اگر با تغییر زاویه بار و یا دامنه نوسانات کاری کنیم که در یک سیکل کاری فقط یک نقطه کاری وجود داشته باشد، دیگر پدیده هانتینگ رخ نخواهد داد. در صورتی که مدلاسیون دامنه مد نظر باشد ممکن است شخص سریعا با توجه به معادله بالا به این فکر بیافتد که با تغییر دامنه جریان ورودی می توان دامنه نوسانات را بگونه ای تغییر داد که فقط یک نقطه کاری برای روتور در هر سیکل گردش مکانیکی داشته باشیم. ولی باید دقت کرد که زاویه θ بسیار کوچک است (مخصوصا در سیستمهای مورد نظر ما) و تغییر در جریان موتور کمترین تاثیر را می تواند در تغییر دامنه گشتاور تولیدی داشته باشد. روش موثر کنترل پدیده هانتینگ استفاده از مدلاسیون FM است [۲۳].

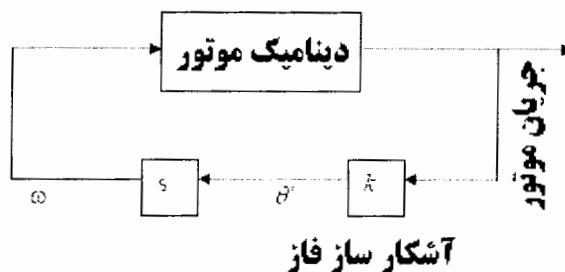
در این روش با توجه به $T=2MI_sI_r\sin(\omega_s t-2\Omega t+2\theta)$ می توان با تغییر ω_s یعنی فرکانس تغذیه ورودی زاویه θ را تغییر داده و شرایط را بگونه ای ایجاد کرد که در هر سیکل کاری فقط یک زاویه بار کاری داشته باشیم. به عبارت روشن تر با کم کردن فرکانس نوسانات در هر سیکل مکانیکی کاری فقط یک زاویه بار برای روتور ممکن خواهد بود.

یک شیوه معمول در فرونشاندن پدیده هانتینگ، نمونه گیری از جریان ورودی به عنوان شاخصه ای از زاویه بار و تغییر فرکانس تغذیه با توجه به آن است. در این روش فرکانس تغذیه وقتی که جریان افزایش می یابد، افزایش یافته و وقتی که جریان کاهش می یابد، کاهش داده می شود. در شکل ۴-۲ شماتیک این روش نشان داده شده است [۲۳].

روش مدلاسیون FM در روش کنترلی Phase lock loop یا به اختصار PLL به عنوان یک شیوه کارا در فرونشاندن نوسانات هانتینگ استفاده می شود [۲۴]. می توان به جای یک حلقه از دو حلقه کنترلی برای فرونشاندن بهتر نوسانات هانتینگ استفاده کرد. برای پیاده سازی این روش نیاز است که توسط سنسورهایی از جریان موتور نمونه گیری شود و در یک حلقه کنترلی بسته از این نمونه ها سیگنال خطایی با فرکانسی معادل فرکانس نوسانات هانتینگ استخراج شده و در اصلاح فرکانس تغذیه توسط اینورتر از آن استفاده شود. علاوه بر روشهای کنترلی می توان از شیوه های طراحی نیز در کم کردن اثرات

تأثیرات شرایط مختلف تغذیه ورودی موتور پسماند بر پدیده هانتینگ

هانتینگ استفاده کرد. به عنوان مثال استفاده از پوشش هادی روی رینگ پسماند باعث ازدیاد جریان فوکو و میرای بیشتر نوسانات هانتینگ می شود.



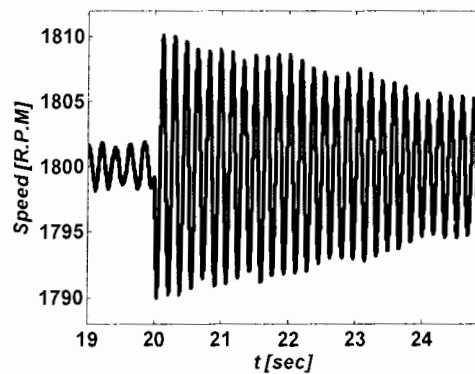
۲-۴ روش FM در فرونشاندن نوسانات هانتینگ

۳-۴ بررسی پدیده هانتینگ در شرایط گوناگون تغذیه ورودی

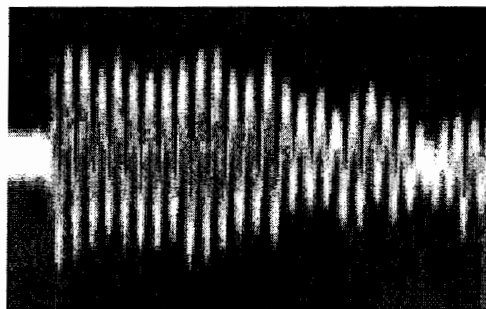
از آنجایی که در موتورهای پسماند سنکرون تغذیه معمولاً در فرکانسهایی به غیر از فرکانس برق شهر صورت می گیرد و علاوه بر آن استفاده این موتورها معمولاً در وسایلی است که اینرسیال بوده و اغتشاشات بار و بخصوص کیفیت توان تحویلی به موتور در عملکرد آن بصورت پدیده هانتینگ نمایان می شود، به این دلیل نیاز است که ما از تأثیر شرایط مختلف تغذیه ورودی بر عملکرد موتور آگاهی کافی داشته باشیم تا هم در طراحی تغذیه این موتورها و هم در طراحی سیستمهای کنترلی آنها دقت کافی به عمل آید. در این بخش سعی خواهیم کرد که به بررسی پدیده هانتینگ در شرایط مختلف تغذیه ورودی بپردازیم. برای این بررسی، حالت مبنا تغذیه سینوسی خالص فرض می شود و نوسانات هانتینگ با اعمال یک بار پله ای در سرعت سنکرون مدل می گردد. در حالتهاى دیگر شرایط گوناگون تغذیه ورودی همانند هارمونیک و عدم تعادل و ... به شرایط اولیه اضافه می شود. موتور پسماندی که در این بخش شبیه سازی شده است. یک موتور سه فاز ۶۰ Hz می باشد که برای مشاهده بهتر نوسانات هانتینگ اینرسی روتور آن زیاد و به اندازه $50 \times 10^{-7} \text{ N.m.sec}^2/\text{rad}$ در نظر گرفته شده است. و ضریب میرایی آن $B=7.5 \times 10^{-7} \text{ N.m.sec/rad}$ فرض می شود.

۳-۴-۱: تغذیه با ولتاژ سینوسی خالص:

برای مشاهده پدیده هانتینگ در حالت‌های گذرا و دائمی در رژیم سنکرون موتور از بی باری به بار 0.1 Nm می‌رسد. شکل ۳-۴ نوسانات سرعت را در تغذیه با ولتاژ نامی 20 ولت قبل و پس از اعمال بار پله‌ای نشان می‌دهد. در این شبیه‌سازی نویزهای مکانیکی با یک گشتاور پالسی تصادفی با مقدار 0.0125 Nm مدلسازی شده است. نتایج آزمایشگاهی آقای Truong در مرجع [۲۳] برای مقایسه در شکل ۴-۴ آمده است. عدم تطابق کامل این دو شکل به تفاوت موتورهای مربوط به آنها بر می‌گردد.



۳-۴ هانتینگ در اثر اعمال یک بار پله‌ای در حالت تغذیه سینوسی خالص

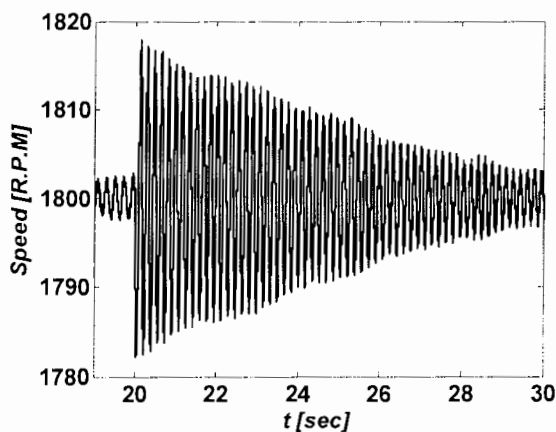


۴-۴ نتیجه آزمایشگاهی هانتینگ در اثر اعمال یک بار پله‌ای [۲۳]

۳-۴-۲ تغذیه هارمونیک: در این حالت اعوجاج هارمونیک کل که به منبع تغذیه ورودی اعمال می‌شود 18% در نظر گرفته می‌شود ($\text{THD}_v = 18\%$) که ناشی از 14.3% هارمونیک پنجم و 11% هارمونیک

تأثیرات شرایط مختلف تغذیه ورودی موتور پسماند بر پدیده هانتینگ

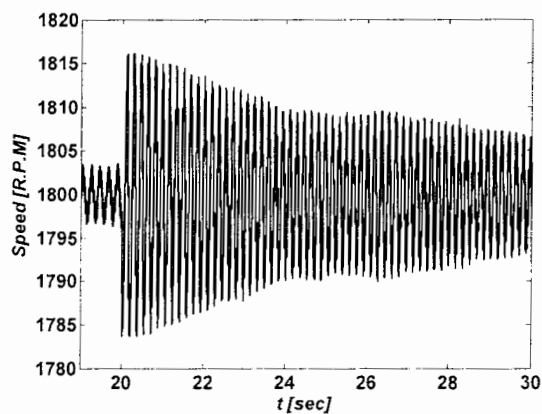
هفتم نسبت به هارمونیک اصلی است. در شکل ۴-۵ تأثیر هارمونیک بودن تغذیه در نوسانات سرعت در حالت دائمی و گذرا مشاهده می شود.



۳-۴ هانتینگ در اثر اعمال یک بار پله ای در حالت تغذیه با $THD=18\%$

۳-۳-۴ تغذیه نامتعادل:

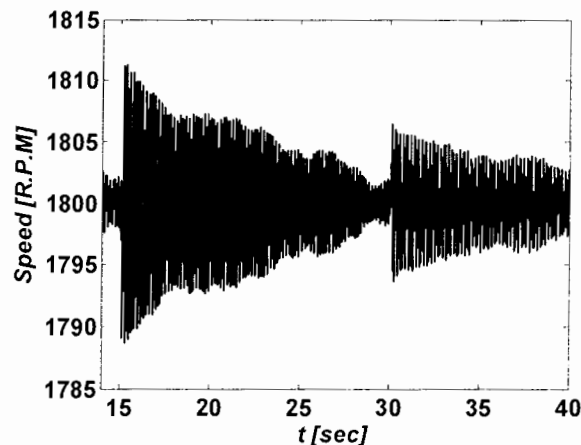
شرایط عدم تعادل با شیفت فاز ۵ درجه ای در دو فاز و اضافه ولتاژی در فاز دیگر ایجاد می شود طوری که برآیند آنها صفر شود. همانطور که از شکل ۴-۴ مشاهده می شود در این شرایط نوسانات هانتینگ هم در حالت ماندگار و هم در حالت گذرا به طور قابل ملاحظه ای تشدید یافته اند.



۴-۴ هانتینگ در اثر اعمال یک بار پله ای در حالت عدم تقارن در تغذیه ورودی

۴-۳-۴ افزایش و کاهش طولانی مدت ولتاژ:

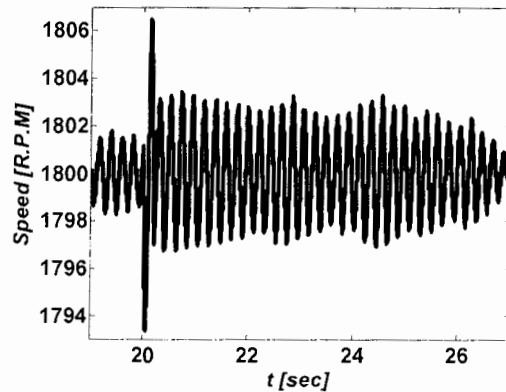
در این حالت وقتی که موتور بی بار است، در رژیم سنکرون ولتاژ تغذیه در ۱۵ ثانیه به ۳۰ ولت افزایش یافته و در ۳۰ ثانیه مجدداً به ۲۰ ولت برگردانده می شود. نتایج نشان داده شده این حالت در شکل ۴-۵ مویید این موضوع است که پدیده هانتینگ در اثر اضافه ولتاژ دارای شدت بیشتری نسبت به حالتی است که به همان اندازه ولتاژ کاهش یابد. هم فاز یا عدم هم فاز بودن اثرات اضافه یا کم شدن ولتاژ و نوسانات حالت دائمی، میزان دامنه نوسانات اولیه گذرا را مشخص می کند.



۴-۵ هانتینگ در اثر اضافه ولتاژ و کاهش ولتاژ طولانی مدت

۴-۳-۵ اضافه ولتاژ لحظه ای:

اثر اغتشاشات ولتاژ را با افزایش لحظه ای ولتاژ تغذیه به ۲۵ ولت در ۲۰ ثانیه برای مدت ۰.۲ ثانیه شبیه سازی می شود. این زمان تقریباً در حدود پریود نوسانات هانتینگ است. همانطور که در شکل ۴-۶ مشاهده می شود دامنه نوسان اولی از دیگر نوسانات در این حالت بیشتر است که اندازه آن به میزان افزایش ولتاژ و فاز آن بستگی دارد.



۴-۶ هانتینگ در اثر اضافه ولتاژ لحظه ای

۴-۴ نتیجه گیری

نوسانات هانتینگ یکی از پدیده های ذاتی موتورهای سنکرون می باشند که در سرعت، جریان و سایر پارامترهای ماشین نمود پیدا کرده و نوساناتی مشابه را در آنها نیز ایجاد می کند. در موتورهای پسماند این پدیده به علت نوع کاربردهای آنها مشکل آفرین تر است. روشهای کنترلی و طراحی برای فرونشادن این نوسانات ارائه شده است که از موثرترین آنها می توان به روش مدلاسیون FM و روکش هادی روی رینگ پسماند روتور اشاره کرد.

نتایج شبیه سازی های صورت گرفته در این فصل نشان داد که آلوده بودن توان تحویلی به موتور پسماند به پدیده های کیفیت توان سبب تشدید پدیده هانتینگ در موتور های پسماند می گردد.

فصل پنجم

بررسی رفتار مولدی ماشین
پسماند در ارائه یک کاربرد
پیشنهادی برای آن

۵-۱ مقدمه

موتورهای پسماند به علت ساختار مکانیکی مستحکم و مقاوم، ماشینهای مناسبی برای کاربردهای سرعتهای بالا می باشند. گشتاور این موتورها با تنظیم نسبت V/F در رنج وسیعی قابل کنترل بوده و می توان با اضافه کردن یک پوشش هادی روی ماده پسماند روتور به گشتاور راه اندازی نسبتاً خوبی برای موتور رسید [۲۶-۳۰].

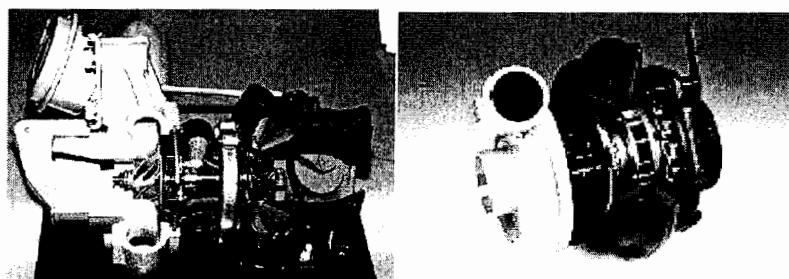
در این فصل با عملکرد دینامیکی ماشین پسماند به عنوان شتابدهنده توربوشارژر ماشینهای دیزلی^۱ مورد بررسی قرار گرفته و رفتار آن در دو مد کاری موتوری و ژنراتوری مطالعه می شود.

۵-۲ توربوشارژرهای ماشینهای دیزلی

توربوشارژرها در ماشینهای دیزلی از دیرباز برای افزایش راندمان سوخت و کم کردن آلاینده های سوختی، مورد استفاده قرار می گیرند. این وسایل دارای یک مکانیزم برای بهینه سازی کنترل فشار شارژ کمپرسور می باشند بطوریکه در سرعتهای کم ماشین، با بسته کردن نازل پره های قرار گرفته در طرف توربین، فشار شارژ زیاد شده و در نتیجه سرعت ماشین بالا می رود و در سرعتهای زیاد عکس این عمل صورت می گیرد. در نتیجه مصرف سوخت، کیفیت گازهای خروجی و گشتاور ماشین بهبود می یابد [۳۱]. بهبود پاسخ گذرا یکی از موضوعات مهم کارایی توربوشارژهاست. فشار شارژ پس از اعمال یک پله شتاب فورا افزایش نمی یابد بلکه شتابگیری با یک تاخیر زمانی کوچک همراه است. بنابراین، در طول مدت گذرای پاسخ توربوشارژر مقدار هوای در دسترس کافی نبوده و عمل احتراق بخوبی انجام نمی شود. روشهای برای

^۱ Diesel Engine Turbocharger

حل این مشکل ارائه شده است که از جمله آنها استفاده از توربین Twin-Scroll است. در شکل ۵-۱ نمونه ای از توربوشارژر نوع TF08L-VG ساخت شرکت میتسوبیشی^۱ نشان داده شده است [۳۱].



شکل ۵-۱ توربوشارژر نوع TF08L-VG

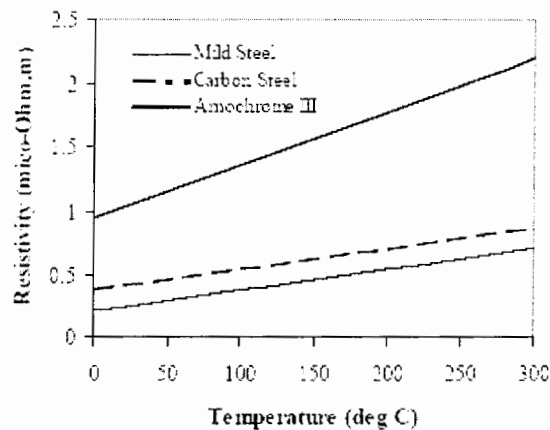
ماشین های الکتریکی مختلفی تا کنون به عنوان شتابدهنده توربوشارژرهای وسایل نقلیه دیزلی مورد استفاده قرار گرفته اند. گشتاوری حدود $1 N.m$ در سرعتی بین ۱۰۰۰۰ تا ۱۲۰۰۰۰ دور در دقیقه برای این کاربرد مورد نیاز است. دمای شرایط کاری موتور شتابدهنده بالاست زیرا دمای درونی محفظه توربوشارژر که موتور در آنجا نصب می شود تا حدود $200^{\circ}C$ بالا می رود. علاوه بر آن نیاز است که در طول مدتی که توان اضافی از ماشین محرک توربوشارژر در دسترس است این ماشین ها در مد ژنراتوری کار کنند [۳۲ و ۳۳].

ماشین های PM، سویچ رلوکتانس و القایی از جمله ماشین هایی هستند که همگی برای این منظور به کار گرفته شده اند ولی هیچکدام استحکام ماشین پسماند را در سرعت و دمای بالا ندارند. توجه به استحکام ماشین در اینچنین دما و سرعتی ضروری است زیرا این شرایط ممکن است به از هم پاشیدن قطعات روتور منجر شود. از آنجایی که روتور موتورهای پسماند عموماً بصورت یکپارچه ساخته می شود [۲۶-۳۰] بنظر می رسد که این ماشین ها می توانند انتخاب مناسبی برای این کاربرد باشند. ماشین القایی با روتور یکپارچه دارای ساختار مستحکمی است، ضمن اینکه روتور می تواند به صورت بخشی از شافت ماشین نیز عمل کند.

^۱ Mitsubishi

بررسی رفتار مولدی ماشین پسماند در ارائه یک کاربرد پیشنهادی برای آن

ولی مشخصه گشتاور چنین ساختاری بخصوص هنگام بالا رفتن دما و افزایش قابل ملاحظه مقاومت روتور نامناسب می باشد. شکل ۲-۵ تغییر مقاومت ها به ازای تغییرات دما، برای سه نوع ماده بکار رفته در روتور این نوع ماشین ها را نشان می دهد. علاوه بر آن اکثر این مواد از نظر مغناطیسی سخت بوده و تلفات پسماند بالایی نیز دارند.

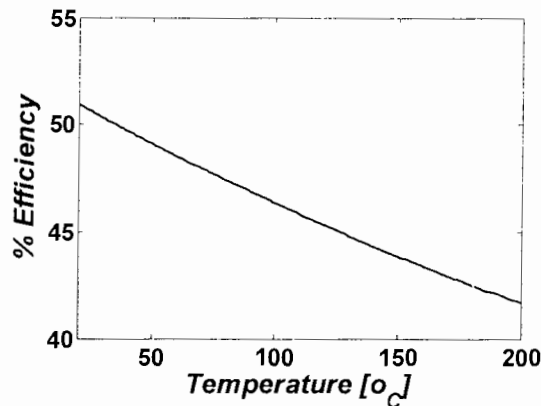


شکل ۲-۵ تغییرات مقاومت به ازای تغییرات دما

نویسندگان این مقاله بر این باورند که ماشین های پسماند با پوشش هادی روی مواد پسماند روتور و یا حتی بدون آن شاید بتوانند انتخاب مناسب تری برای این نوع کاربردها باشد. در ماشین های پسماند نیز افزایش دما سبب کاهش راندمان می شود ولی این کاهش راندمان عموماً به تغییرات مقاومت سیم پیچی های ماشین مربوط می شود. در شکل ۳-۵ تغییرات بازده یک موتور پسماند به ازای افزایش دما مشاهده می شود. از آنجا که قسمت اعظمی از عملکرد ماشین شتابدهنده در مد کاری ژنراتوری^۱ است، شاید بتوان با طراحی خوب و استفاده از ماده پسماند مناسب تلفات ماشین پسماند را حتی کمتر از مقدار تلفات ماشین های القایی با روتور یکپارچه^۲ نمود.

^۱ Generator operation Mode

^۲ Solid Rotor



شکل ۵-۳ تغییرات بازده در برابر تغییرات دما در یک موتور پسماند

برای بالا بردن بازده ماشین پسماند و بهبود ضریب قدرت می توان سطح ولتاژ تغذیه این ماشین ها را در لحظه راه اندازی بیشتر از ولتاژ نامی انتخاب کرده و پس از مغناطیس سازی اولیه آن را به ولتاژ نامی برگرداند. موتور پسماند حتی در نصف ولتاژ نامی نیز به سنکرونیزم می رسد، بنابراین در این ماشین ها این امکان نیز وجود دارد که برای بالا بردن بازده می توان ولتاژ را کمتر از ولتاژ نامی انتخاب کرد. در اینصورت مقداری از گشتاور از دست خواهد رفت و چون مقدار گشتاور در شروع راه اندازی مهم است، با افزودن یک پوشش هادی روی ماده پسماند روتور میتوان آنرا جبران نمود.

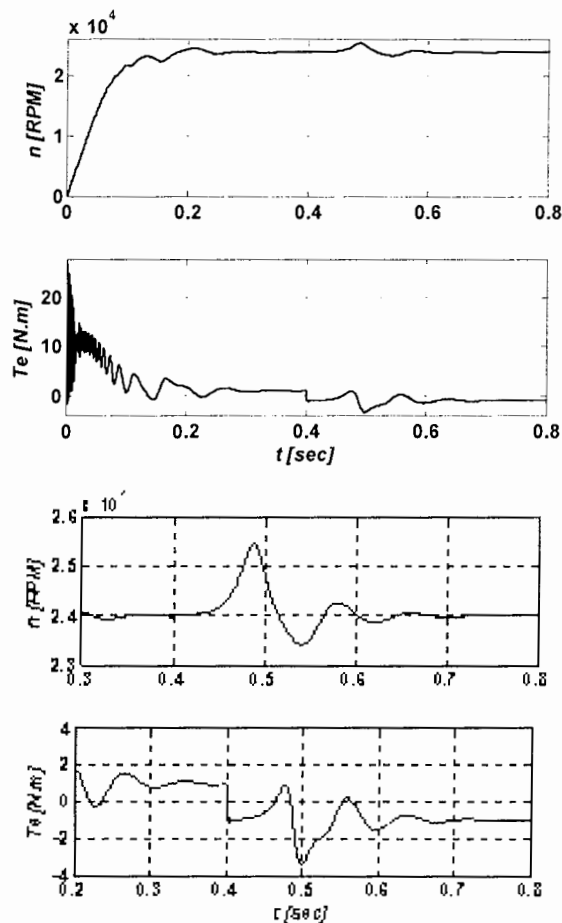
در این فصل با استفاده از مدل دینامیکی گذرابی که برای ماشین پسماند پیاده سازی شد نحوه عملکرد چنین ماشینی در شرایط راه اندازی و سنکرونیزم نشان داده می شود. بعلاوه شاید برای اولین بار عملکرد ماشین پسماند در رژیم ژنراتوری نیز مورد بررسی قرار می گیرد. محدودیتهای استفاده از این ماشین ها در کاربردهایی نظیر توربوشاررها مورد مطالعه قرار گرفته و راهکارهایی برای بر طرف کردن آنها ارائه می گردد. مشخصات ماشین پسماند شبیه سازی شده در این فصل در جدول ۵-۱ نشان داده شده است.

جدول ۵-۱ مشخصات ماشین پسماند

$f=400\ 60\text{Hz}$	$\text{Max-}P_{\text{out}}=3\ \text{Kw}$
$p=2\ \text{poles}$	$r_s=0.2\ \Omega$
$H=0.4$	$L_s=0.00\ 86\ \text{H}$
$V_{\text{ph}}=220\ \text{volt}$	$L_m=0.0\ 504\ \text{H}$

۳-۵ عملکرد دینامیکی ماشین پسماند بعنوان شتابدهنده توربوشارژر

شکل ۴-۵ گرافهای سرعت و گشتاور و بزرگنمایی شده آنها را بر حسب زمان را برای ماشین شبیه سازی شده در تغذیه با فرکانس ۴۰۰ هرتز نشان می دهد. گشتاور راه اندازی به اندازه ای زیاد است که موتور در کمتر از ۰/۲ ثانیه به سرعت سنکرون می رسد با توجه به اینکه تغذیه این موتور با یک اینورتر با دو ناحیه کاری (generation & regeneration) صورت می گیرد در لحظه ۰/۴ ثانیه گشتاور روی شافت موتور از یک به منفی یک نیوتن متر تغییر می کند و ماشین در مد ژنراتوری قرار می گیرد.



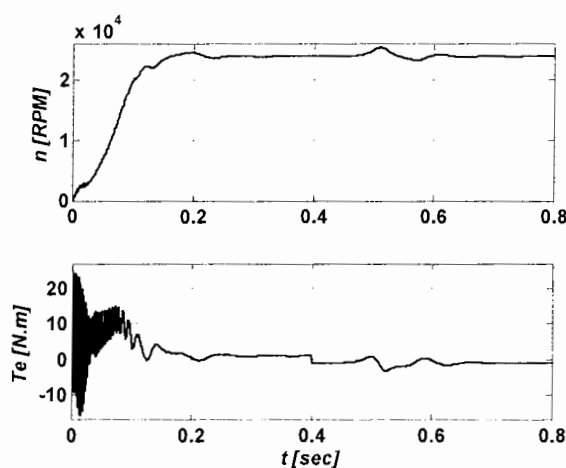
شکل ۴-۵ سرعت و گشتاور ماشین پسماند در دو مد کاری موتوری و ژنراتوری و بزرگنمایی شده ناحیه تغییر

$$R_e = 50 \Omega \text{ در مد کاری در}$$

بررسی رفتار مولدی ماشین پسماند در ارائه یک کاربرد پیشنهادی برای آن

گشتاور راه اندازی اولیه حاصل جمع گشتاور پسماند و گشتاور القایی است که گشتاور القایی سهم عمده‌ای از آن را دارد. این گشتاور ناشی از جریان فوکوی ماده پسماند و پوشش هادی روی ماده پسماند روتور است. اضافه یا کم کردن بیش از حد مقاومت این پوشش می تواند تاثیر منفی در مقدار گشتاور و زمان راه اندازی بگذارد. نقش دیگر جریان فوکو در ماشین سنکرون میرا کردن نوسانات سرعت و گشتاور است. مقاومت مدل کننده گشتاور القایی در گرافهای شکل ۵-۵ برابر ۵۰ اهم در نظر گرفته شده است. در شکل ۵-۵ گراف های مربوط به گشتاور و سرعت ماشین پسماند در صورتی که این مقاومت ۵ اهم فرض شود، نشان داده شده است. همان طور که از این شکل دیده می شود میانگین گشتاور راه اندازی به طور قابل ملاحظه ای کاهش یافته است.

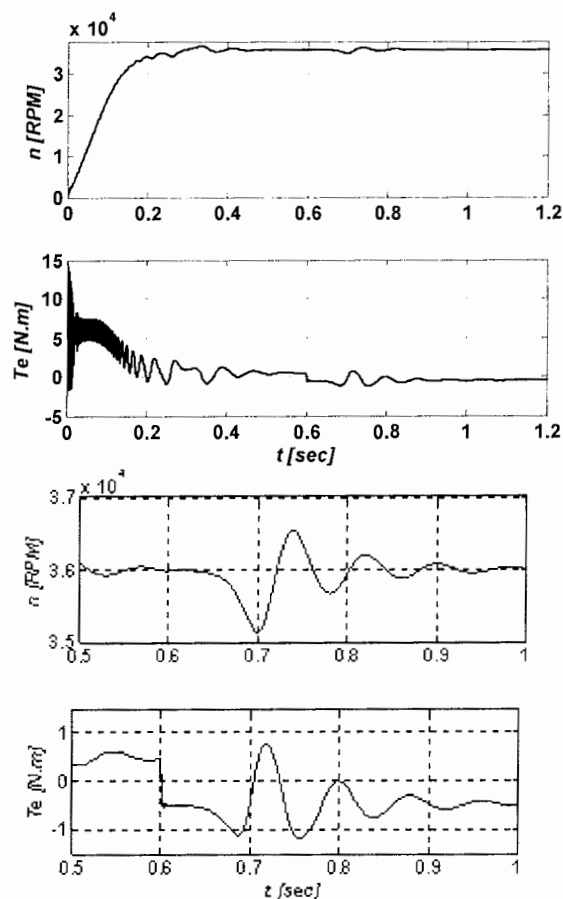
دور ماشین پسماند بکار رفته در توربوشارژرها برای سرعتهای مختلف موتور دیزل باید توسط تنظیم فرکانس تغییر کند. به عنوان مثال برای وقتی که موتور دیزل در 1500 rpm کار می کند نیاز است که توربوشارژر در دوری حدود 3000 rpm کار کند [۳۳]. تنظیم دور ماشین پسماند با کنترل نسبت V/f امکان پذیر است. توسط یک مبدل افزایشده می توان سطح DC تغذیه اینورتر را افزایش داد ولی در عمل ثابت نگه داشتن این نسبت با محدودیت افزایش ولتاژ همراه است که استفاده از ماشین در مد ژنراتوری بر این محدودیت می افزاید. به همین دلیل ما در این شبیه سازی ولتاژ ورودی را ثابت فرض می کنیم.



شکل ۵-۵ سرعت و گشتاور ماشین پسماند در دو مد کاری برای $R_e = 5 \Omega$

بررسی رفتار مولدی ماشین پسماند در ارائه یک کاربرد پیشنهادی برای آن

بنابراین در دوره‌های بالاتر با کاهش گشتاور خروجی مواجهه هستیم که عموماً ناشی از کاهش گشتاور القایی در طول مدت راه اندازی و کاهش گشتاور پسماندی در رژیم سنکرون است. البته باز هم گشتاور راه اندازی قابل ملاحظه است ولی گشتاور پسماندی که در لحظه ورود به سنکرونیزم به بیشترین مقدار خود می‌رسد ممکن است به اندازه ای کم شود که ماشین نتواند سنکرون شود. در این صورت موتور پسماند همانند یک موتور القایی در رژیم آسنکرون در سرعتی که میزان بار آنرا تعیین می‌کند به کار خود ادامه می‌دهد. پس در طراحی ماشین پسماند به این منظور باید مقدار گشتاور آن به اندازه ای باشد که در بیشترین سرعت هم بر گشتاور بار غلبه پیدا کند. در شکل ۵-۶ گرافهای سرعت و گشتاور و بزرگنمایی شده آنها در هنگام تغییر مد کاری برای فرکانس ۶۰۰ Hz و همان ولتاژ قبلی نشان داده شده است.



شکل ۵-۶ سرعت و گشتاور ماشین پسماند در دو مد کاری موتوری و ژنراتوری برای $f = 600$ Hz

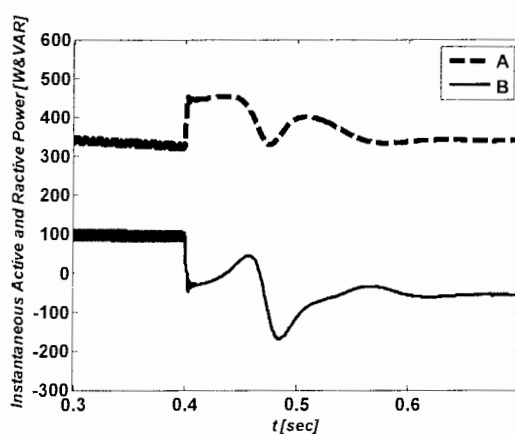
بررسی رفتار مولدی ماشین پسماند در ارائه یک کاربرد پیشنهادی برای آن

در این حالت گشتاور دائمی به 0.1 Nm کاهش یافته و زمان راه اندازی ماشین افزایش پیدا می کند. برای مرتفع نمودن این دو عیب لازم است که ولتاژ تا حد امکان افزایش یابد.

۴-۵ بررسی رفتار ماشین پسماند در مد ژنراتوری

گفته شد که ماشین شتاب دهنده توربوشارژر باید بلافاصله بعد از شتابدهی آن و رسیدن به سرعت سنکرون در مد ژنراتوری عمل کند و به منبع تغذیه کننده خود توان تحویل دهد. اینورتر تغذیه کننده ماشین باید طوری طراحی شود که در هر دو ناحیه *generative* و *regenerative* کار کند. در شکل ۴-۵ مشاهده شد که در زمان 0.4 ثانیه گشتاور ماشین 1 Nm - شده و ماشین از آن پس به صورت ژنراتور کار می کند.

شکل ۴-۵ توان اکتیو و راکتیو لحظه ای ماشین را برای هر دو مد کاری موتور و ژنراتوری برای این حالت نشان می دهد. توان اکتیو مصرفی در مد موتوری 100 W بوده و در مد ژنراتوری به میزان 70 W تولید می شود. ولی توان راکتیو در هر دو مد مصرفی بوده و علیرغم توان اکتیو که به سرعت پس از سنکرونیسم در مقدار مشخصی تثبیت می شود، بعد از مدتی که ماشین در رژیم سنکرون باقی می ماند، به مقدار ثابتی خواهد رسید. این مدت به پارامترهای ماشین بستگی دارد.



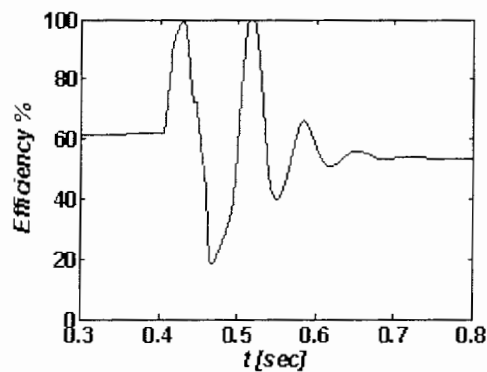
شکل ۴-۵ (A) توان راکتیو (B) توان اکتیو لحظه ای در دو مد کاری

بررسی رفتار مولدی ماشین پسماند در ارائه یک کاربرد پیشنهادی برای آن

بازده ماشین در مد ژنراتوری به دلیل اینکه اکثر اوقات ماشین در این مد کار می کند از اهمیت بیشتری برخوردار است. در شکل ۵-۸ مشاهده می شود که بازده ماشین در مد موتوری ۶۱٪ است که در مد ژنراتوری به ۵۳٪ کاهش می یابد.

عموما به علت تلفات پارازیتیک و جریان مغناطیس کنندگی بالا ماشین پسماند دارای بازده کمی است. بازده و ضریب قدرت نسبتا کم از معایب ذاتی ماشینهای پسماند است که می توان با یک طراحی مناسب مقدار آن را تا حدودی بهبود بخشید. از طرفی یکی از محاسن این ماشین این است که ضریب قدرت آن چه کم و چه زیاد باشد مقدار ثابتی خواهد ماند.

این موضوع یکی از ویژگیهای ممتاز ماشین پسماند خصوصا در مد ژنراتوری است. با توجه به ثابت بودن توان راکتیو و کم شدن توان اکتیو در مد ژنراتوری ضریب قدرت از ۰/۲۹ در مد موتوری به ۰/۲ در مد ژنراتوری تنزل می یابد.



شکل ۵-۸ بازده ماشین در دو مد کاری موتوری و ژنراتوری

یکی دیگر از مزایای ماشین پسماند در مد ژنراتوری پایداری زیاد آن در برابر اغتشاشات است. بطوریکه علیرغم ماشینهای سنکرون معمولی در صورت خروج از سنکرونیزم بصورت یک موتور القایی به کار خود ادامه می دهد.

۵-۵ نتیجه گیری

در این فصل عملکرد ماشین پسماند به عنوان ماشین شتابدهنده توربوشارژرهای وسایل نقلیه دیزلی مورد آزمایش و بررسی قرار گرفت. مقایسه ای از بهره ماشین در دو مد کاری موتور و ژنراتوری ماشین پسماند ارائه شد. گشتاور راه اندازی بالای موتورهای پسماند که ترکیبی از گشتاور القایی و گشتاور پسماند است این موتورها را در شتابدهی سریع توربوشارژر می تواند مطرح سازد. طراحی پوشش هادی روی ماده پسماند روتور از اهمیت ویژه ای در این کاربرد برخوردار است. نتایج بدست آمده از شبیه سازی با اندازه گیری های عملی که در مراجع [۳۱] آمده است مطابقت دارد.

فصل ششم

جمع بندی و پیشنهادات

۶-۱ جمع بندی

هدف اصلی این تحقیق رسیدن به یک مدل دینامیکی گذرایی از موتور پسماند معمولی بود که به وسیله آن بتوان رفتار موتور را در طول مدت راه اندازی و شرایط گذرای موتور بررسی کرد. سرعت تحلیل بالا و دقت پاسخ های مدل در شبیه سازی عملکرد موتور برای کلیه شرایط از مهمترین خواسته های تهیه کنندگان این پاینامه در طول تحقیق بوده است. برای سایر موتورهای الکتریکی نظیر این تحقیق به کرات و بصورت های گوناگون انجام گرفته است. ولی در بین مدل های انگشت شماری که برای موتور پسماند تا کنون ارائه شده است هیچکدام توانایی تحلیل نسبتا دقیق و سریعی را ندارند. این موضوع به وضعیت مغناطیسی روتور و مدلسازی دشوار آن بر می گردد. چرا که تحلیل مغناطیسی روتور در هر لحظه به شرایط مغناطیسی لحظه قبلی هم مربوط می شود.

در این راستا در فصل اول به بررسی پدیده پسماند مغناطیسی به عنوان عامل ایجاد گشتاور در موتور های پسماند پرداخته شد. حلقه های اصلی و فرعی ماده پسماند بصورت تئوریک مطالعه گردید. و اطلاعات مربوط به حلقه های اصلی در یک ماده پسماند نوعی بنام تجاری VCN استخراج شد. سپس تاریخچه اختراع موتور پسماند و سیر مطالعاتی آن ارائه گردید. در بخش بعدی این فصل انواع ساختار، مزایا، معایب و کاربردهای موتور های پسماند مورد بررسی اجمالی قرار گرفت. پس از آن نحوه ایجاد گشتاور پسماندی و عملکرد موتور پسماند با جزئیات نسبتا کاملی ارائه گردید.

در فصل دوم روش مدلسازی موتور پسماند معمولی بررسی شد. برای این کار ابتدا یک تحلیل ساده ولی قوی از ماشین پسماندی که ماده پسماند آن بشکل ایده آلی مدلسازی شده است مطرح شد. حلقه پسماند در این روش با استفاده از تقریب متوازی الاضلاع به رلوکتانسهای که بر اساس پارامترهای فیزیکی و

مغناطیسی روتور محاسبه می شوند، مدلسازی شد. و پس از انجام یکسری عملیات و ساده سازیها مدار معادل مغناطیسی ماشین نتیجه گرفته شد. در مرحله بعد با استفاده از قضیه دوگان، مدار معادل الکتریکی مربوط به مدار معادل مغناطیسی ارائه گردید. از این مدار معادل الکتریکی دو مدار معادل ساده تر در دو رژیم سنکرون و آسنکرون استنتاج گردید. این بخش نتیجه از اولین تحقیقات صورت گرفته در زمینه تحلیل موتور پسماند می باشد. هر کدام از این مدار معادلها فقط توانایی تحلیل رفتار ماشین پسماند را برای یک رژیم کاری دارند. در بخش بعدی با استفاده از یکسری ساده سازیها مدار معادل عمومی ماشین پسماند ارائه گردید. با استفاده از این مدار معادل و بر پایه معادلات دینامیکی موتور پسماند مدل d-q این موتور استنتاج شد.

در ادامه همین فصل مدل مذکور در محیط MATLAB/SIMULINK شبیه سازی شد. کاری بعدی در بهبود دقت شبیه سازی، بررسی تغییرات پارامترهای مدار معادل به ازای تغییرات سایر پارامترهای ماشین همانند ولتاژ و لغزش بود که در نهایت به مدلسازی این تغییرات در شبیه سازی صورت گرفته از موتور پسماند انجامید. برای این کار فرض گردید که در هر لحظه (حتی در طول مدت راه اندازی) موتور به شرایط دائمی کار خود رسیده است و با استفاده از یک تحلیل الکترو مغناطیسی به صورت لحظه ای عملکرد ماشین بررسی شده و بر اساس این تحلیل پارامترهای مدار معادل در هر لحظه استخراج و در مدل Update می شوند. با این کار مدلی حاصل شد که هم دقت کافی را در نشان دادن رفتار ماشین در شرایط مختلف کاری دارد و هم از سرعت قابل قبول تری نسبت به روشهایی همانند المان محدود برخوردار است. در انتهای این فصل هم به منظور نشان دادن میزان اعتبار مدل و هم برای تحلیل برخی رفتارهای موتور پسماند در چندین حالت، مهمترین مشخصه های ماشین پسماند همچون سرعت و گشتاور استخراج شد. مطابقت نتایج بدست آمده از مدل با نتایج عملی ارائه شده در سایر تحقیقات میزان بالای اعتبار مدل را نشان می دهد. همچنین پدیده هایی همانند هانتینگ و افزایش بهره و ضریب قدرت موتور در حالت Over Excitation از مواردی بود که بخوبی توسط مدل نشان داده شد.

موتورهای پسماند عموماً در ولتاژها و فرکانسهای متفاوت با مشخصات برق شهر کار می کنند. تغذیه این موتورها معمولاً اینورتری است که لزوم بررسی شرایط مختلف تغذیه را بر عملکرد موتور نشان می دهد.

در فصل سوم با تقسیم بندی شرایط مختلف تغذیه ورودی به چندین حالت و مبنا فرض کردن حالت تغذیه سینوسی خالص سعی شد که تاثیر این شرایط در مشخصه های مهم ماشین همانند سرعت و گشتاور و همچنین ضریب قدرت مورد مطالعه قرار گیرد. این قسمت از تحقیق نشان داد که تغذیه موتور با ولتاژ سینوسی خالص باعث ایجاد بهترین مشخصه های عملکردی برای ماشین می گردد. نوسانات سرعت و گشتاور در حالت دائمی و کاهش بازده و ضریب قدرت از نتایج تغذیه هارمونیک و نامتعادل بود که از تحقیق صورت گرفته در این فصل استنتاج گردید.

پدیده هانتینگ به عنوان یکی از رفتارهای ذاتی موتورهای سنکرون به واسطه نوع کاربرد موتورهای پسماند در این ماشین از اهمیت نسبتا بیشتری برخوردار است. در فصل چهارم این پدیده بطور عمیقی مورد بررسی قرار گرفت و به تفاوت های این رفتار در موتورهای پسماند نسبت به سایر موتورهای سنکرون اشاره شد. در ادامه تاثیر شرایط مختلف تغذیه ورودی بر تشدید این پدیده شبیه سازی و مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان می دهند که هارمونیک بودن، عدم تعادل و تغییرات لحظه ای ولتاژ باعث تشدید نوسانات هانتینگ می شود. همچنین افزایش ولتاژ نسبت به کاهش ولتاژ به همان اندازه تاثیر بیشتری بر پدیده هانتینگ دارد.

شاید برای اولین بار در فصل پنجم این تحقیق رفتار مولدی ماشین پسماند در ارائه یک کاربرد پیشنهادی برای این ماشین مورد بررسی قرار گرفت. در این فصل استفاده از موتور پسماند به عنوان شتابدهنده توربوشارژرهای ماشینهای دیزلی برای افزایش بهره سوخت و کم کردن آلاینده های سوختی پیشنهاد شد. ساختار مستحکم، گشتاور راه اندازی کافی و کارایی نسبتا خوب در مد ژنراتوری امکان استفاده از این ماشینها را برای شتابدهی توربوشارژرهای دیزلی در سرعت های بالا و دمای زیاد فراهم می آورد. شبیه سازی های صورت گرفته در این فصل تثبیت تقریبی بازده ماشین را در هر دو مد کاری نشان می دهد.

۶-۲ پیشنهاداتی برای ادامه تحقیقات در این زمینه

در تکمیل روند این تحقیق می توان موارد زیر را انجام داد:

- ۱- لحاظ کردن اثر حلقه های فرعی در مدلسازی با تقریب زدن آنها بصورت خطوطی با شیب شاخه نزولی حلقه اصلی، در مواردی که این حلقه ها از نوع حلقه های فرعی کوتاه هستند.
- ۲- مدلسازی حلقه های فرعی در شبیه سازی با استفاده از مدل پریسچ اسکالر.
- ۳- ارائه روشی برای محاسبه دقیق تر E_{H_1} در مدل ماشین پسماند.
- ۴- در نظر گرفتن مولفه صفر در مدل d-q.
- ۵- بررسی بیلان توان در موتور پسماند به ازای شرایط مختلف تغذیه ورودی.
- ۶- بررسی روشهای طراحی در فرونشاندن نوسانات هانتینگ.
- ۷- مقایسه روشهای کنترلی در فرو نشانندن پدیده هانتینگ.
- ۸- مطالعه رفتار ژنراتوری ماشین پسماند در شرایطی که به شبکه وصل است و یا بطور جداگانه کار می کند و ارائه یک تحلیل شفاف از عملکرد ماشین پسماند در مد ژنراتوری.
- ۹- آنالیز هارمونیک رفتار موتور پسماند در اتصال به یک اینورتر.

پیوست ها

مراجع

- [1] Ahmad Darabi, "Modeling & Designing of Hysteresis Motors and Manufacturing a Prototype", M.Sc Thesis, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran, 1992.
- [2] P.T. Jowiet and D.I. Macinnes, "Computerized Magnetic Test and Evaluation of Hysteretic Materials", Industry Applications Society Annual Meeting, 1989., Page(s):285 – 288 Vol. 1, No. 10.1109/IAS.1989.96665, 1-5 Oct IEEE Conference, 1989.
- [3] Tacho Ishikawa and Teruo Kataoka,"Basic Analysis Of Disk Type Hysteresis Motor", Electrical Engineering in JAPAN, Vol 101, No.6, 1982.
- [4] C. G. Veinott, "Theory and design of small induction motors", McGraw-Hill Book Co., New York, 1959.
- [5] Stuart. D.T Robertson, Safwat. Z.G.Zaky, "Analysis of the Hysteresis Machine-Part I", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, APRIL 1969, pp.474 483
- [6] G.Wakui, "Optimum Conditions in Design Of Hysteresis Motor", Electrical Engineering in Japan, Vol 86, Part 11, P. 95-105 1966.
- [7] D. O'Kelly, "Computation of hysteresis motor performance including negative sequence excitation", IEE Proc.-Electu. Power Appl. Vol 143, No. 2, March 1996.
- [8] P. Walker, "A Method For Designing and Analyzing Hysteresis Motor", IEEE Conference Paper, Winter Meeting, 1968, No. 6830P36-PWR.
- [9] M.Azizur Rahman, Miles A. Copeland, and Gordon R.Slemon, "An Analysis Of Hysteresis Motor", Part 3, Parasitic Losses, IEEE.
- [10] M. Azizur Rahman, "Analytical Models for Polyphase Hysteresis Motor", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, December 10, 1970, pp.237-242
- [11] M. A. Rahman, "Minor Loop Losses in Hysteresis Torque Devices Using Permanent Magnet Materials", Paper 2,5, presented at the 1970 INTERMAG Conference, Washington, D. C., April 21-24.
- [12] M.A.copland,G.R.selemon,"Analysis of hysteresis motor', part one, AIEE Fall General Meeting, pp,34-41, April 1964.
- [13] M. A. Copland, G. R. Slemon, "An Analysis of the Hysteresis Motor I- Analysis of the Idealized Machine", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, August 1, 1963, pp.34-41.

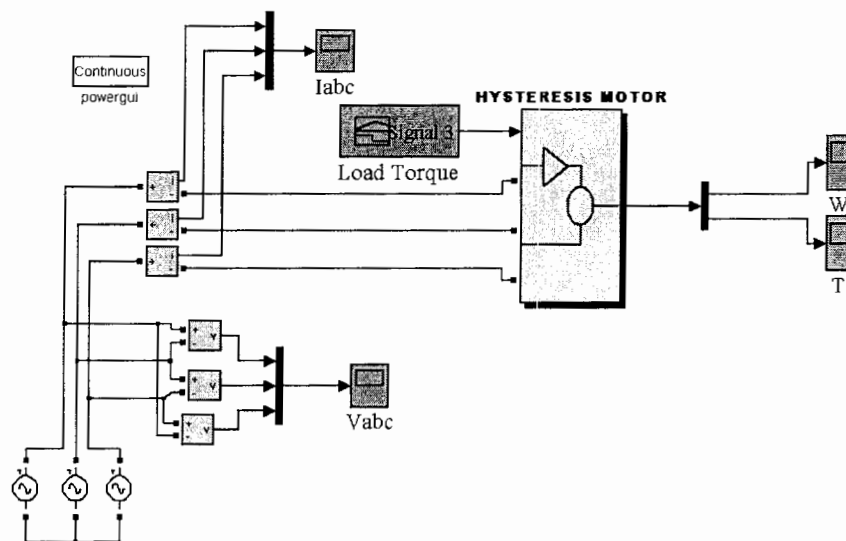
- [14] P. H. Trickey, "Test Analysis and Calculation of Polyphase Hysteresis Motors", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, November 4, 1971, pp.2743-2749.
- [15] M. Azizur Rahman, "Field Analysis of Polyphase Hysteresis Motor", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99, No. 3 May/June 1980, pp.1164-1171.
- [16] Kazaumi Kurihara and Azizur Rahman, "Transient performance analysis synchronous motor", IEEE Transaction on Industry Application, Vol 4, No. 1, January /February 2004.
- [17] M. Azizur Rahman and Ruifeng Qin, "Starting And synchronization of Permanent Magnet Hysteresis Motors, " IEEE Transaction on Industry Applications, Vol 32, No. 5, September/October 1996.
- [18] M. A. Rahman and A. Osheibba, "Dynamic Performance Prediction of Poly phase Hysteresis Motors", IEEE Transaction. Industry Applications, Vol 26, No. 6, Nov/Dec, 1990 .
- [19] T. Kataoka, T. Ishikawa, and T. Takahashi, "Analysis of a Hysteresis Motor with Overexcitation", IEEE transactions on magnetic, vol. Mag-18, NO. 6, November 1982.
- [20] Stanley P. Clurman, "On Hunting in Hysteresis Motors and New Damping Techniques", IEEE Transaction on Magnetics, September, 1971, pp. 512-517
- [21] S. Takata, R. Ueda, " a Dual mode excitation control of synchronous machine for suppression of hunting", IEEE Power Generation Conf, July 14, 1970.
- [22] I.R. Smit, V.V. Vaher, J.G. Kettle, " small oscillation stability of synchronous machine", IEEE international conf on advance on power system, no. 991 .
- [23] Cang Kim Truong, "Analysis of Hunting in Synchronous Hysteresis Motor", Thesis for the Degrees of Master of Engineering in Electrical Engineering and Computer Science at the Massachusetts Institute of Technology February 2004.
- [24] Gerald T. Volpe, "A Phase-Locked Loop Control System for synchronous motor", IEEE TRANSACTIONS ON AUTOMATIC CONTROL, FEBRUARY 1970.
- [25] K. R. Rajagopal *IEEE*, "Design of a Compact Hysteresis Motor Used in a Gyroscope", IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 39, NO. 5, SEPTEMBER 2003.
- [26] G.R. Selemon, R.D. Jackson, and M.A. Rahman, "Performance Predictions for Large Hysteresis Motor", IEEE Transaction on Power Apparatus And Systems, Vol. PAS-96, No. 6, November/ December 1977.

- [27] Hong- Kyo, Kim, Hyun-Kyo Jung, and Sun-Ki Hong, "finite Element Analysis of Hysteresis Motor Using the Vector Magnetization-Dependent Method", IEEE Transaction on Magnetics, Vol 36, No 4, July 2000.
- [28] S.Nakamura; K.Okawa and T.Kato, "Design Of Hysteresis Motors", Electrical Engineering in Japan, Vol. 88, No. 6, 1968.
- [29] Herbet C. Roters, "The Hysteresis Motor-Advances Which Permit Economical Fractional Horsepower Rating", AIEE Transactions, Vol 66, 1947.
- [30] A.K Das Gupta, "New Method to Improve the Efficiency and Design of Hysteresis Motors", IE(I) Journal-EL, Vol 51, June 1971.
- [31] M. Ebisu, Y. Terakawa, S. Ibaraki, "Mitsubishi Turbocharger for Lower Pollution Cars", Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. Technical Review Vol.41 No.1 (Feb. 2004).
- [32] G. Richard, G. Farinole, "Performances of Turbocharger at low speed", Ciepłne Maszyny Przeplyowe, Turbomachinery, No.122 2002.
- [33] G.Theotokatos, N.P. kyrtatos, "Disel Engine Transient Operation with Turbocharger Compressor Surging", Copyright © 2001 Society of Automotive Engineers, Inc, 2001-01-1241.
- [34] AK. Sawhney, "A Course in Electrical Machines Design", Dhanpat Rai, 4th Edition, 1977.
- [35] R.D. Jackson, M.A. Rahman, G.R. Slemon, "Analysis and Determination of Ring Flux Distribution in Hysteresis Motors", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102 No. 8, August 1983.
- [36] Omer M. A Wed Badeb, "Investigation of the Dynamic Performance of Hysteresis Motors Using MATLAB/SIMULINK", Journal of Electrical Engineering, Vol 56, No.3-4, 2005, 106 109
- [37] Metals Handbook, "Properties And Selection of Metals", 8th Edition, ASM International, V. 1, 1961.
- [38] Zahra Nasiri gheidari, " Analysis of synchronous Hysteresis Motor", MSc Thesis , University of Tehran, Tehran, Iran, August 2006.
- [39] Teare, jr., Benjamin Richard, "Theory of Hysteresis Motor Torque", Yale university Microfilms, Inc, Ann Arbor, Michigan, 1937.
- [40] I. D. Mayergoyz, *Mathematical Models of Hysteresis*. New York: Springer-Verlag, 1991.

- [41] G. Wakui and Y. Kusakari, "Synchronous pull-out torque of the hysteresis motor," J. IEE (Japan), vol. 85, pp. 31-41, June 1965.
- [42] H. C. Roters, "Hysteresis Synchronous Motors Embody New Design Principles," Electrical Manufacturing, pp. 102-106 , December 1947.
- [43] P. C. Krause, "Method of multiple reference frames applied to the analysis of symmetrical induction machinery," IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-87, pp. 218 227 January 1968.
- [44] P. C. Sen, Principles of Electric Machines and Power Electronics. New York: Wiley, 1997.
- [45] Chee Mun Ong, "Dynamic Simulation of Electric Machinery Using Matlab/Simulink", Prentice Hall, ISBN 0-13-7237785-5.

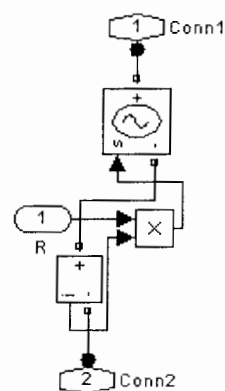
پیوست الف

در این بخش نحوه شبیه سازی موتور پسماند معمولی با جزئیات ارائه شده است. شکل ۱ شماتیک کلی این شبیه سازی را نشان می دهد.

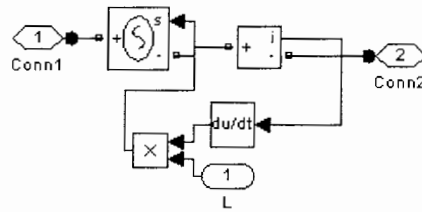


شکل ۱ شماتیک کلی شبیه سازی موتور پسماند

در شکل ۲ و ۳ نحوه ایجاد عناصر سلف و خازن متغیر برای Update شدن لحظه ای نشان داده شده است.

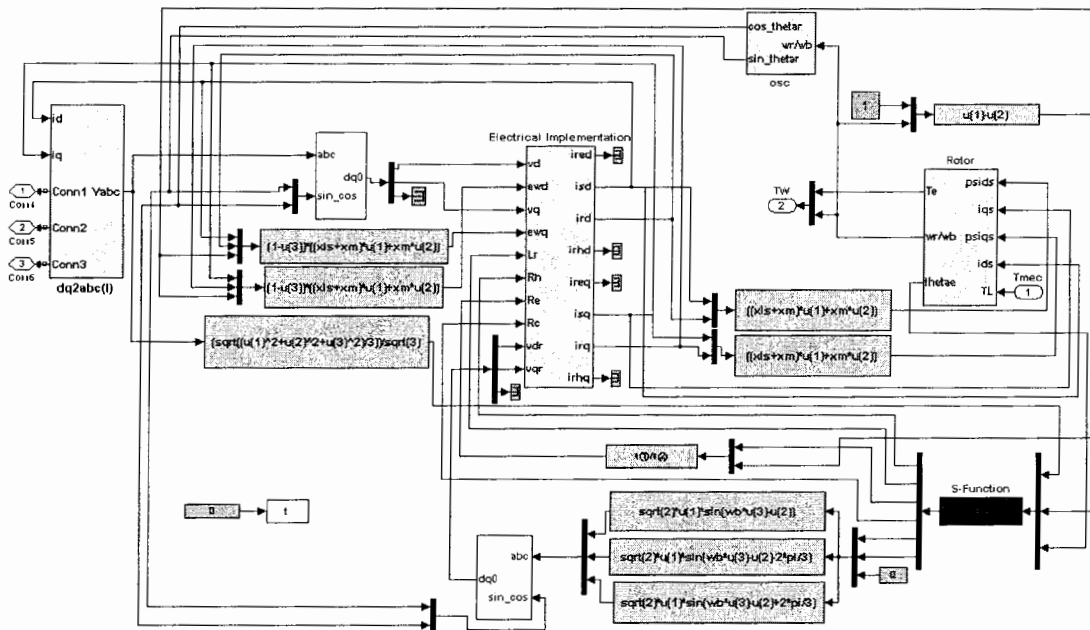


شکل ۲ مقاومت متغیر

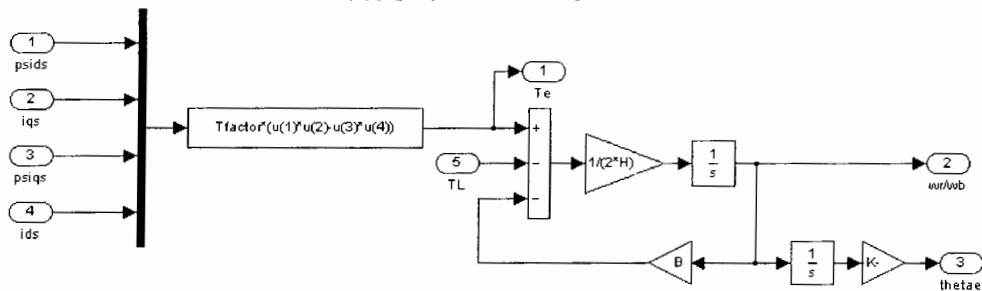


شکل ۳ سلف متغیر

در شکل ۴ نحوه شبیه سازی موتور پسماند نشان داده شده است. و در شکل ۵ جزئیات بلوک روتور نشان داده شده است.

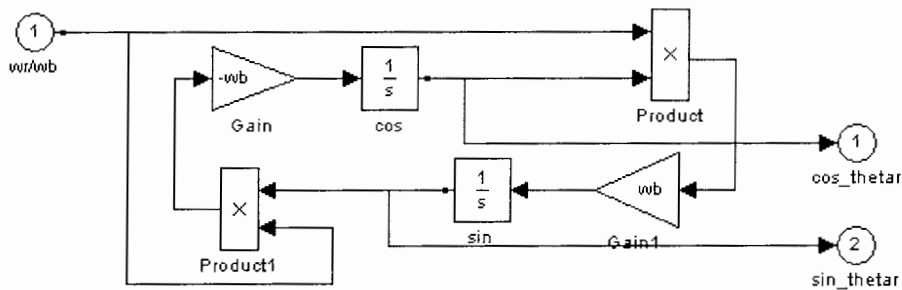


شکل ۴ شبیه سازی موتور پسماند



شکل ۵ جزئیات بلوک روتور

و سرانجام شکل ۸ جزئیات بلوک osc را نشان می دهد.



شکل ۸ جزئیات بلوک osc

جدول مشخصات موتور پسماند سه فاز

f=60 HZ	Pout=50 W
p=4 poles	Rs=2 ohm
H=0.4	Ls=0.0086 H
Vph=60 volt	Lm=0.0504 H

پیوست ب

فهرست علائم و نشانه ها

V_{Ds}, V_{Qs}	ولتاژ محور d-q استاتور
V_{dr}, V_{qr}	ولتاژ محور d-q روتور
r_s, r_r	مقاومت استاتور و مقاومت روتور
X_{ss}, X_{rr}	راکتانس خودی استاتور و روتور
X_{sr}	راکتانس متقابل بین استاتور و روتور
i_{Ds}, i_{Qs}	جریان محور d-q استاتور
i_{dr}, i_{qr}	جریان محور d-q روتور
ω_r	سرعت زاویه ای روتور
ω_b	سرعت زاویه ای مبنا

T_{em}	گشتاور الکترومغناطیسی
λ_D, λ_Q	شار دور پیوستی استاتور در محور d-q
T_L	گشتاور بار
H	ثابت اینرسی روتور
s	لغزش
ρ	مقاومت ویژه ماده پسماند
K_{sf}	ضریب انباشتگی ورق های استاتور
t_r	ضخامت دیسک روتور [mm]
K_{wl}	ضریب سیم پیچی
N_{ph}	تعداد دور سیم پیچی هر فاز
m	تعداد فازها
R_{oi}	تفاضل شعاع خارجی و شعاع داخلی روتور و استاتور [mm]
A_h	سطح مقطع رینگ روتور
f	فرکانس تغذیه ورودی
B_q	دامنه ماگزیمم مولفه اصلی چگالی شار
R_{av}	شعاع متوسط دیسک و فاصله هوایی در موتور پسماند
H_f	دامنه ماگزیمم شدت میدان مغناطیسی
L_h	راکتانس معادل روتور
p	تعداد جفت قطبهای موتور
j	ممان اینرسی
θ	زاویه بار
θ'	زاویه بار پس از اغتشاش
M	اندوکتانس متقابل موتور
B	ضریب اصطحکاک سیستم
Ω	سرعت زاویه ای موتور
k_t	سختی روتور
I_s	جریان استاتور
I_r	جریان روتور

g	طول فاصله هوایی
μ_{r0}	ضریب نفوذ نسبی غیر اشباع ماده روتور
μ_{rs}	ضریب نفوذ نسبی اشباع ماده روتور
\mathcal{R}_g	رلوکتانس فاصله هوایی
\mathcal{R}_0	رلوکتانس افزایشی غیر اشباع ماده روتور
\mathcal{R}_p	رلوکتانس افزایشی اشباع ماده روتور
V_r	حجم رینگ پسماند روتور
$\varphi_{1,2}$	زاویه پسماند در دو حلقه کاری متفاوت
$P_{H out}$	توان ماگزیمم پسماند خروجی در شرایط سنکرونیزم
Q	نسبت میرایی

Abstract

Hysteresis motors are self starting brushless synchronous motors which are widely employed due to their interesting features. Accurate modeling of these motors is crucial to successful investigating the dynamic performances. For this purpose the hysteresis loops of material used in the rotor and their influences on the parameters of the machine are necessary to be taken into consideration adequately. In this investigation complete analysis of a hysteresis motor in start up and steady state regimes are carried out based on a developed $d-q$ model of the motor with time-varying parameters being updated during the simulation. The equivalent circuit of the motor is presented taking into account the major effect of input voltage. Simulation results performed in *Matlab-Simulink* environment prove the superiority of the proposed model in comparison to the existing simple models with constant parameters. Swings of torque, hunting phenomenon, improvement of power factor by increasing temporarily of stator voltage and start up scenario of the hysteresis machine are some important issues which can accurately be analyzed by the proposed modeling approach.

Hunting in synchronous motor is the continuous speed oscillation with a frequency around 3 to 5 Hz which arises from voltage or load distortions. This oscillation descends with exponential trend-line to steady state relative lower amplitude. Since the hysteresis motors are generally fed by inverters with unusual voltage and frequencies, their input power quality is important. Therefore in this investigation influences of input power quality problems on motor operation are investigated. Performances of the hysteresis motor are studied when the machine is supplied by harmonic content and unbalanced voltage sources and also during short term and long term over voltage operating conditions. The results presented in this investigation show that these supply power quality problems in addition of many known undesirable effects on the machine performances may also cause to another problems. The simulation results reveal that the power quality problems are evidently influenced the operational characteristics of motor such as torque, speed and power factor, furthermore reinforced the hunting phenomenon. Therefore more attentions need to be paid on designing of a supply for the hysteresis motors.

A new application for hysteresis machine as accelerator of diesel engine turbocharger is suggested. Stability constant speed and torque, firm structure in high speed and temperature and machine capability for used in motor and generator mode are the results of this suggestion. In this application, machine behavior, efficiency and power factor in motor and generator mode is analyzed.