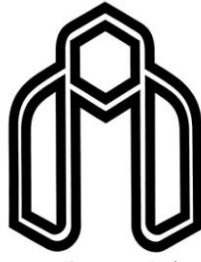


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی برق و رباتیک
گروه قدرت

عنوان:

طراحی تعداد لایه‌های ماشین شار محوری مغناطیس دائم (AFPM) چند لایه

دانشجو: سهیل عبدالهی

استاد راهنما:

دکتر احمد دارابی

پایان‌نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

شهریور ۱۳۹۲

شماره: ۶۰۸۸/آ.ت.ب
تاریخ: ۹۲/۰۶/۲۷
ویرایش: -----

بسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی
فرم شماره (۶)

فرم صورتجلسه دفاع پایان نامه تحصیلی دوره کارشناسی ارشد

با تأییدات خداوند متعال و با استعانت از حضرت ولی عصر (عج) جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای:
سهیل عبداللهی رشته: برق گرایش: قدرت
تحت عنوان: طراحی لایه های ماشین شار محور آهنربا دائم (AFPM) چند لایه
که در تاریخ ۹۲/۰۶/۲۷ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح زیر است:

قبول (با درجه: عالی)	امتیاز (۱۹,۲۲)	<input checked="" type="checkbox"/> دفاع مجدد	<input type="checkbox"/> مردود
----------------------	----------------	---	--------------------------------

۱- عالی (۲۰ - ۱۹)

۲- بسیار خوب (۱۸/۹۹ - ۱۸)

۳- خوب (۱۶ - ۱۷/۹۹)

۴- قابل قبول (۱۴ - ۱۵/۹۹)

۵- نمره کمتر از ۱۴ غیر قابل قبول

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنما	ایمن درابی	استاد	
۲- استاد مشاور	---	---	---
۳- نماینده شورای تحصیلات تکمیلی	مرتضی رصین	استاد	
۴- استاد ممتحن	امین حاجی زاده	استاد	
۵- استاد ممتحن	علیرضا الهی	استاد	

رئیس دانشکده:

تقدیم بہ:

مادر مہربان، پدر بزرگوار و خواہران عزیزم

کہ با

محبت، ہمدلی و ہمراہی ایشان این موفقیت میسر کردید.

تقدیر و تشکر:

در اینجا بر خود لازم می‌دانم از تلاش و زحمات بی‌دریغ و راهنمایی‌های ارزنده استاد گرانقدر و دلسوزم، جناب آقای دکتر احمد دارابی، در تمام مراحل انجام این پایان نامه صمیمانه تقدیر و تشکر نمایم. تشکر و قدردانی ویژه دارم از هم فکری و یاری دوستان عزیزم بویژه آقای مهندس محسن نیکخو که در به ثمر رسیدن این پایان نامه همواره یار و همراه بودند.

تعهد نامه

اینجانب سهیل عبدالهی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق/ قدرت دانشکده مهندسی برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه طراحی تعداد لایه‌های ماشین شار محوری مغناطیس دائم (AFPM) چند لایه تحت راهنمایی دکتر احمد دارابی متعهد می‌شوم .

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

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده فارسی

در بسیاری از کاربردها از جمله سیستم رانش زیردریایی‌ها، با توجه به نیاز به توان‌های مختلف در محدوده وسیع، سرعت متغیر و عملکرد در شرایط خطا، ماشین باید طوری طراحی شود که گشتاور بالا و توان مورد نیاز را با محدودیت‌هایی مانند اندازه کوچک، وزن کم، قابلیت اطمینان بالا، نگهداری آسان، لرزش و نویز کم و منبع تغذیه با چند ولتاژ، فراهم کند. مطالعه روی ساختارهای بسیار از ماشین‌ها نشان می‌دهد که ماشین‌های مغناطیس دائم چند لایه برای کاربردهای مذکور مناسب می‌باشد. موتور چند لایه این خاصیت را دارد که در سرعت‌های مختلف با توجه به میزان توان مورد نیاز با تعداد لایه متناسب با آن توان به کار گرفته شود. این عمل می‌تواند با سوئیچینگ مناسب لایه‌ها صورت پذیرد. با این کار موتور در سرعت‌های مختلف تحت بار کامل خود قرار می‌گیرد و از آنجایی که هر لایه از موتور در بار نامی خود دارای حداکثر بازده می‌باشد، باعث افزایش بازده کل سیستم می‌شود. در میان ماشین‌های مغناطیس دائم نیز ماشین‌های شار محوری به دلیل نوع ویژه ساختاری که دارند، برای بهره برداری بصورت چند لایه بسیار مناسب می‌باشند. به طراحی ساختار چند لایه‌ای ماشین‌های مغناطیس دائم در مقالات توجه کافی نشده است. در این پایان نامه به چگونگی انتخاب تعداد لایه‌های مناسب در هنگام طراحی ماشین‌های چند لایه در محدوده توان‌های بالا پرداخته شده است. همچنین با انجام شبیه سازی‌هایی، رفتار دینامیکی گذرای ماشین در شرایط قطع و وصل لایه‌های مختلف به منبع تغذیه در بارها و سرعت‌های مختلف، مورد بررسی و ارزیابی قرار خواهد گرفت. در پایان الگویی برای ترکیب لایه‌های مناسب برای تامین توان مورد نیاز در سرعت‌های مختلف برای حصول بهره بالا، تلفات انرژی کم و دیگر شاخصه‌های عملکردی مطلوب ارائه خواهد شد.

لیست مقالات مستخرج

۱- احمد دارابی، سهیل عبدالهی، محسن نیکخو، طراحی موتور شار محوری آهنربا دائم برای پیشران زیردریاییهای دیزل الکتریک و ساخت یک نمونه کوچک آزمایشگاهی، اولین همایش ملی فناوریهای نوین دریایی ۱۳۹۲.

۲- احمد دارابی، محسن نیکخو، سهیل عبدالهی، تغذیه بهینه لایه‌های موتور آهنربا دائم شار محوری چند لایه پیشران زیر دریایی بمنظور افزایش مدت زمان ماندگاری در زیر آب، اولین همایش ملی فناوریهای نوین دریایی ۱۳۹۲.

3. A. Darabi, M. Nikkhoo, S. Abdollahi and M. Noroozi, '**Optimum Arrangement for High Efficiency Operation and Load Management of Multi-Layer Multi-Phase AFPM Motor of a Submarine Propulsion**', IET Electric Power Applications Journal [Submitted].

4. A. Darabi, S. Abdollahi and M. Nikkhoo, '**Dynamic Performance Calculation of a Submarine's Variable Speed Multi-Layer AFPM Motor**', Electronic & Electrical Journal, Kaunas University of Technology [Submitted].

فهرست مطالب

۱- فصل اول.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- ماشینهای مغناطیس دائم چند لایه.....	۴
۳-۱- ماشینهای شار محوری آهنربای دائم.....	۵
۱-۳-۱- انواع ماشین <i>AFPM</i> از لحاظ ساختار.....	۸
۴-۱- ساختار انتخاب شده.....	۱۹
۲- فصل دوم.....	۲۱
۱-۲- مقدمه.....	۲۲
۲-۲- روابط ابعادی ماشین <i>AFPM</i> نوع <i>TORUS-NS</i>	۲۳
۳-۲- الگوریتم طراحی اولیه ماشین <i>AFPM</i> نوع <i>TORUS-NS</i>	۲۷
۴-۲- نتیجهگیری از فصل.....	۳۰
۳- فصل سوم.....	۳۱
۱-۳- مقدمه.....	۳۲
۲-۳- مشخصات نامی موتورهای مورد طراحی و محدودیتهای موجود.....	۳۳
۳-۳- ماشین ۵۰۰ کیلو وات.....	۳۵
۱-۳-۳- طراحی.....	۳۵
۴-۳- ماشین ۲۵۰ کیلو وات.....	۳۷
۱-۴-۳- طراحی.....	۳۷
۲-۴-۳- مدل سازی.....	۳۹
۵-۳- ماشین ۱۰۰ کیلو وات.....	۴۱
۱-۵-۳- طراحی.....	۴۱
۴- فصل چهارم.....	۴۲
۱-۴- مقدمه.....	۴۴
۲-۴- محاسبه پارامترهای مداری ماشین.....	۴۸
۱-۲-۴- معادلات ولتاژ ماشین <i>AFPM</i>	۴۸
۲-۲-۴- مقاومت در هر فاز ماشین <i>AFPM</i>	۴۸

۵۰	۳-۲-۴- عکس العمل آرمیچر و اندوکتانسهای خودی و متقابل سیمپیچهای ماشین
۵۴	۴-۲-۴- محاسبه ولتاژ القایی در هر فاز
۵۵	۳-۴- شبیه سازی دینامیکی موتور <i>AFPM</i> در حالت عملکرد اتصال مستقیم به شبکه
۵۹	۱-۳-۴- نتایج شبیه سازیها
۶۵	۴-۴- بررسی تاثیر تعداد لایههای ماشین در هنگام طراحی بر روی عملکرد آن
۶۵	۱-۴-۴- ماشین چند لایه ۵۰۰ کیلو وات
۶۷	۲-۴-۴- ماشین چند لایه یک مگا وات
۶۸	۳-۴-۴- ماشین چند لایه ۱/۵ مگا وات
۶۸	۴-۴-۴- ماشین چند لایه ۲ مگا وات
۷۰	۵-۴-۴- ماشین چند لایه ۲/۵ مگا وات
۷۰	۶-۴-۴- ماشین چند لایه ۳ مگا وات
۷۲	۵- فصل پنجم
۷۳	۱-۵- مقدمه
۷۴	۲-۵- موتور طراحی شده
۷۶	۳-۵- پارامترهای مدل مداری موتور طراحی شده
۷۶	۴-۵- شبیه سازی
۷۸	۵-۵- نتایج شبیه سازی
۹۵	۶-۵- نتیجه گیری
۹۶	۶- فصل ششم

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱ - توپولوژی و نحوه بوجود آمدن گشتاور در (a) ماشین *RFPM* (b) ماشین *AFPM*..... ۶
- شکل ۱-۲ - نمودار طبقه‌بندی انواع توپولوژیهای ماشین *AFPM*..... ۸
- شکل ۱-۳ - ساختار ماشین شار محوری آهنربای دائم یک روتور - یک استاتور [۷]..... ۹
- شکل ۱-۴ - استاتور مورق یک ماشین *AFPM* ساخته شده از یک نوار فولادی پیچیده شده به صورت دایره‌ای [۸]..... ۱۰
- شکل ۱-۵ - پیکربندی موتور شار محوری نوع *TORUS* بدون شیار با آهنربای دائم با اتصال سطحی *(TORUS-NS)* [۶]..... ۱۲
- شکل ۱-۶ - ساختار موتور شار محوری نوع *TORUS* شیاردار با آهنربای دائم با اتصال سطحی *(TORUS-S)* [۶]..... ۱۲
- شکل ۱-۷ - ساختار موتور شار محوری نوع *AFIR* بدون شیار با آهنربای دائم با اتصال سطحی *(AFIR-NS)* [۶]..... ۱۳
- شکل ۱-۸ - ساختار موتور شار محوری نوع *AFIR* شیاردار با آهنربای دائم با اتصال سطحی *(AFIR-S)* با دو مجموعه سیمپیچی رویهم در هر استاتور [۶]..... ۱۳
- شکل ۱-۹ - نمای سه بعدی از ماشین چند لایه‌ای آهنربای دائم بدون شیار برای $N=3$ [۶]..... ۱۶
- شکل ۱-۱۰ - نمایش سه بعدی جهت و مسیرهای شار در توپولوژی چند لایه ای (طرح دو روتور - سه استاتور) (a) نوع *NN* (b) نوع *NS* [۶]..... ۱۶
- شکل ۱-۱۱ - توپولوژی ماشین *MULTI-S* نوع *NN* برای $N=3$ [۶]..... ۱۷
- شکل ۱-۱۲ - توپولوژی ماشین *MULTI-S* نوع *NS* برای $N=3$ [۶]..... ۱۸
- شکل ۱-۱۳ - ماشین شار محوری چند لایه با استاتور بدون هسته..... ۱۹

- شکل ۲-۱- توزیع چگالی شار در فاصله هوایی در حالت روتور قفل شده ۲۵
- شکل ۲-۲- نمایش موقعیت نسبی روتور و استاتور در زوایای مختلف ۲۶
- شکل ۳-۱۱- مشبندی انجام شده روی یک جفت قطب از موتور مورد بررسی ۳۹
- شکل ۳-۱۲- نمایش توزیع چگالی شار بصورت نقشه رنگی در حالت مدار باز ۴۰
- شکل ۳-۱۳- توزیع برداری چگالی شار موتور در حالت مدار باز ۴۰
- شکل ۳-۱۴- ولتاژ القایی ناشی از مغناطیسه‌های دائم در سیمپیچهای سه فاز ماشین ۴۱
- شکل ۴-۱- پیکر بندی یک لایه از موتور شار محوری نوع *TORUS* بدون شیار با آهنربای دائم اتصال سطحی (*TORUS-NS*)، [۶] ۴۷
- شکل ۴-۲- اثر عکس العمل آرمیچر در ماشین سنکرون (الف) شار آرمیچر (ب) شار اصلی (ج) نتیجه شار اصلی و آرمیچر ۵۱
- شکل ۴-۳- مدار معادل ماشین *AFPM* در هر فاز ۵۳
- شکل ۴-۴- شماتیک شبیه سازی موتور سه فاز *AFPM* طراحی شده ۵۷
- شکل ۴-۵- بلوک *Back EMF* در شکل ۴-۴ ۵۸
- شکل ۴-۶- ولتاژ نامی ترمینال موتور در فرکانس نامی ۶۱
- شکل ۴-۷- ولتاژ القایی ناشی از *PM*ها در فازهای مختلف در ولتاژ و فرکانس نامی برای موتور دو لایه ۶۱
- شکل ۴-۸- جریان جاری شده در فاز *a* موتور دو لایه در ولتاژ و فرکانس نامی و در بار نامی و نصف بار نامی ۶۲

- شکل ۴-۹- جریان جاری شده در فاز a موتور یک لایه در ولتاژ و فرکانس نامی و در بار ۵۰۰ کیلووات (نصف بار نامی ماشین دو لایه)..... ۶۲
- شکل ۴-۱۰- زاویه قدرت δ موتور دو لایه در ولتاژ و فرکانس نامی و در بار ۱ مگاوات و ۵۰۰ کیلووات ۶۳
- شکل ۴-۱۱- توان اکتیو ورودی لحظهای موتور دو لایه در ولتاژ و فرکانس نامی و در بار ۱ مگاوات و ۵۰۰ کیلووات ۶۳
- شکل ۴-۱۲- توان راکتیو ورودی لحظهای موتور دو لایه در ولتاژ و فرکانس نامی و در بار ۱ مگاوات و ۵۰۰ کیلووات ۶۴
- شکل ۴-۱۳- توان ظاهری ورودی لحظهای موتور دو لایه در ولتاژ و فرکانس نامی و در بار ۱ مگاوات و ۵۰۰ کیلووات ۶۴
- شکل ۴-۱۴- ضریب قدرت (پیش فاز) موتور دو لایه در ولتاژ و فرکانس نامی و در بار ۱ مگاوات و ۵۰۰ کیلووات ۶۴
- شکل ۴-۱۹- نمودار بازده بر حسب سرعت برای ماشین چند لایه ۵۰۰ کیلو وات ۶۷
- شکل ۴-۲۰- نمودار بازده بر حسب سرعت برای ماشین چند لایه یک مگا وات ۶۸
- شکل ۴-۲۱- نمودار بازده بر حسب سرعت برای ماشین چند لایه ۱/۵ مگا وات ۶۹
- شکل ۴-۲۲- نمودار بازده بر حسب سرعت برای ماشین چند لایه ۲ مگا وات ۶۹
- شکل ۴-۲۳- نمودار بازده بر حسب سرعت برای ماشین چند لایه ۲/۵ مگا وات ۷۰
- شکل ۴-۲۴- نمودار بازده بر حسب سرعت برای ماشین چند لایه ۳ مگا وات ۷۱
- شکل ۵-۱- پیکربندی یک لایه از موتور شار محوری نوع *TORUS* بدون شیار با آهنربا دائم با اتصال سطحی (*TORUS-NS*) ۷۵

- شکل ۵-۲- شماتیک ساختار (a) استاتور (b) روتور موتور *AFPM* نوع *TORUS* ۷۶
- شکل ۵-۵- شماتیک مدار شبیه سازی شده در نرم افزار *MATLAB* ۷۸
- شکل ۵-۶- تغییرات سرعت مکانیکی محور در اثر قطع و وصل لایه‌ها ۸۲
- شکل ۵-۷- تغییرات زاویه قدرت در اثر قطع و وصل لایه‌ها ۸۲
- شکل ۵-۸- تغییرات مقدار مؤثر جریان آرمیچر در اثر قطع و وصل لایه‌ها ۸۲
- شکل ۵-۹- تغییرات جریان سه فاز لحظه‌ای آرمیچر لایه اول موتور در اثر قطع و وصل لایه‌ها ۸۳
- شکل ۵-۱۰- تغییرات فوق گذرا و گذرا جریان سه فاز لحظه‌ای آرمیچر لایه دوم موتور در اثر وصل این لایه ۸۳
- شکل ۵-۱۱- نمودار بازده بر حسب درصد سرعت نامی ۸۶
- شکل ۵-۱۲- نمودار مقدار مؤثر جریان آرمیچر بر حسب درصد سرعت نامی ۸۶
- شکل ۵-۱۳- نمودار ضریب توان بر حسب درصد سرعت نامی ۸۶
- شکل ۵-۱۴- نمودار مدت زمان ماندگاری زیر آب بر حسب درصد سرعت نامی ۸۷
- شکل ۵-۱۵- نمودار بازده بر حسب سرعت سیستم چهار لایه تغذیه شده به صورت یک، دو و چهار لایه (۳، ۶ و ۱۲ فاز) ۹۰
- شکل ۵-۱۶- نمودار تلفات آهن بر حسب سرعت موتور تغذیه شده به صورت یک، دو و چهار لایه (۳، ۶ و ۱۲ فاز) ۹۰
- شکل ۵-۱۷- نمودار تلفات اهمی بر حسب سرعت سیستم چهار لایه به صورت یک، دو و چهار لایه (۳، ۶ و ۱۲ فاز) ۹۰
- شکل ۵-۱۸- نمودار تلفات آهن، مس و تلفات کل بر حسب سرعت سیستم چهار لایه به صورت چهار لایه (۱۲ فاز) ۹۱

شکل ۵- ۱۹- تغییرات سرعت مرجع و مقدار واقعی سرعت در هنگام سوئیچینگ لایه‌ها با استفاده از

الگوریتم مراجع سرعت متغیر..... ۹۴

شکل ۵- ۲۰- سیگنال مرجع سرعت و مقدار واقعی سرعت بدست آمده با استفاده از الگوریتم مرجع

سرعت ثابت ۹۴

شکل ۵- ۲۱- تغییرات مقدار مؤثر جریان بدست آمده با دو الگوریتم مرجع سرعت ثابت و مرجع

سرعت متغیر..... ۹۴

فهرست جدول‌ها

- جدول ۳-۱- مشخصات نامی داده شده برای ماشینهای مورد طراحی ۳۴
- جدول ۳-۲- پارامترهای اختیاری انتخاب شده برای ماشینهای مورد طراحی ۳۴
- جدول ۳-۳- پارامترهای ابعادی و محاسبه شده توسط الگوریتم طراحی ۳۶
- جدول ۳-۵- پارامترهای ابعادی و محاسبه شده توسط الگوریتم طراحی ۳۸
- جدول ۳-۶- پارامترهای ابعادی و محاسبه شده توسط الگوریتم طراحی ۴۲
- جدول ۴-۱- طول متوسط یک دور سیمپیچی به همراه مقاومت هر فاز یک لایه از موتورهای طراحی شده ۴۹
- جدول ۴-۲- اندوکتانسهای خودی و متقابل به همراه راکتانس سنکرون مربوط به هر فاز از یک لایه ۵۴
- جدول ۴-۳- ولتاژهای القایی در هر فاز ماشینهای طراحی شده ۵۴
- جدول ۵-۴- الگوریتم قطع و وصل لایه‌های یک سیستم چهار لایه ۹۲

فصل اول

مقدمه

ماشین‌های مغناطیس دائم بطور فزاینده‌ای به ماشین برتری در صنعت با توجه به انرژی بالای مغناطیس‌های دائم، تبدیل شده‌اند. این ماشین‌ها دارای خصوصیات منحصر به فرد بسیاری هستند. ماشین‌های مغناطیس دائم معمولاً بازده بالایی دارند که دلیل این واقعیت، حذف تلفات مربوط به تحریک میدان در این ماشین‌ها و در نتیجه کاهش قابل توجه تلفات در روتور می‌باشد. بنابراین بازده موتور بطور عمده بهبود یافته که باعث چگالی توان بالاتری شده است. ماشین‌های PM^1 علاوه بر بازده و چگالی توان بالا، دارای حجم کوچک هستند که بطور گسترده در کاربردهای صنعتی جانشین ماشین‌های متداول شده‌اند ولی در برخی کاربردها به دلیل استقامت حرارتی مواد مغناطیس دائم، توسعه نیافته‌اند. امروزه با توسعه تکنولوژی‌های پیشرفته و کاربردهای آهنربا با حد حرارتی بالا، این ماشین‌ها در صنعت مورد توجه قرار گرفته‌اند [۱].

در گذشته ماشین‌های جریان مستقیم (DC^2) جاروبک‌دار به دلیل مشخصه‌های خوب از جمله کنترل سرعت و گشتاور راحت، در صنعت بسیار مورد استفاده قرار می‌گرفتند. وجود کموتاتور، جاروبک‌ها و نیاز به نگهداری مداوم از معایب اصلی ماشین‌های جریان مستقیم می‌باشد که این موضوع سبب محدودیت کاربرد این ماشین‌ها شده است. از آنجایی که گشتاور تولید شده توسط ماشین‌های جریان مستقیم بسیار مناسب و دارای ریپل کمی است، با وجود مشکلات بیان شده این ماشین‌ها باز هم در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. در چند دهه اخیر، پیشرفت‌های گسترده

¹ Permanent Magnet

² Direct Current

حاصل شده در زمینه تولید سوئیچ‌های قدرت، میکروپروسورها و میکرو کامپیوترها سبب بکارگیری اینورترها و سنسورها به جای کموتاتور و جاروبک‌ها شده است. به عبارت دیگر، با استفاده از اینورترها و مبدل‌های قدرت، کموتاسیون مکانیکی به کموتاسیون الکتریکی تبدیل شده و در نتیجه مشکلات مربوط به کموتاسیون مکانیکی مرتفع شده است [۲].

همگام با این پیشرفت‌ها ماشین‌هایی با مشخصاتی مشابه ماشین DC معمولی ولی به لحاظ ساختاری مشابه با ماشین سنکرون AC^1 با نام ماشین سنکرون مغناطیس دائم ($PMSM^2$) توسعه یافته است. این نوع ماشین‌ها علاوه بر دارا بودن رفتاری مشابه با ماشین DC معمولی، مشکلات مربوط به کموتاسیون مکانیکی را ندارند. همچنین در مقایسه با ماشین‌های سنکرون متداول با روتور سیم-پیچی شده، ماشین‌های $PMSM$ ، بازده، چگالی توان و نسبت گشتاور به اینرسی بالاتری دارند.

گشتاور الکترومغناطیسی در ماشین‌های مغناطیس دائم، تابعی از ابعاد ماشین می‌باشد. اگر ماشین با ابعاد کوچک طراحی شود، گشتاور مورد نیاز می‌تواند با استفاده از آرایش چند لایه‌ای بدست آید. به ساختار چند لایه‌ای ماشین‌های مغناطیس دائم در مقالات توجه کافی نشده است. ماشین‌های چند لایه به دلیل روش مونتاژ ساده‌تر و چگالی گشتاور و توان بالاتر از قابلیت رقابتی بالایی برخوردارند. به هر حال به نظر می‌رسد تنش‌های مکانیکی و تلفات بادخوری در ماشین‌های چند لایه بیشتر باشند. همچنین با توجه به این که هزینه تمام شده ماشین از اهمیت بالایی برخوردار است ماشین‌های چند لایه با آهنرباهای دائم گرانتر هستند [۳].

¹ *Alternative Current*

² *Permanent Magnet Synchronous Machine*

۱-۲- ماشین‌های مغناطیس دائم چند لایه

در بسیاری از کاربردها از جمله سیستم رانش زیردریایی‌ها، نیاز به توان‌های مختلف در محدوده وسیع، سرعت متغیر و عملکرد در شرایط خطا، ماشین باید طوری طراحی شود که ظرفیت بالا، گشتاور بالا و توان مورد نیاز را با محدودیت‌هایی مانند اندازه کوچک، وزن کم، قابلیت اطمینان بالا، نگهداری آسان، لرزش و نویز کم و منبع تغذیه با چند ولتاژ، فراهم کند. علاوه بر این، موتور باید برای عملکرد در شرایط متغیر در محدوده وسیع سرعت مناسب باشد. ماشین‌های dc با محدوده وسیع و نرم سرعت برای مدت طولانی در اینگونه کاربردها استفاده می‌شدند. اگرچه در این ماشین‌ها وجود کموتاتور به عنوان یک عیب باعث پیچیده شدن ساختار، افزایش هزینه، نگهداری سخت و ایجاد نویز می‌شود. با پیشرفت تکنولوژی الکترونیک قدرت، کنترل دیجیتال و تئوری کنترل مدرن، به ویژه تکنولوژی کنترل برداری، کنترل سرعت موتورهای AC به خوبی انجام‌پذیر است و بجای موتورهای dc گسترش یافته‌اند. همچنین با پیشرفت سریع در مواد مغناطیس دائم و ابر رسانا، ماشین‌های جدید با عملکرد عالی پدیدار شده است. ماشین‌های PM در میان ماشین AC از نظر عملکردی ارجحیت دارند. مطالعه روی ساختارهای بسیار از ماشین‌های PM نشان می‌دهد که ماشین‌های PM چند لایه برای کاربردهای مذکور مناسب می‌باشد [۴].

ماشین‌های مغناطیس دائم را می‌توان بصورت‌های مختلف دسته بندی کرد ولی دسته بندی شایع این ماشین‌ها بر اساس جهت جاری شدن شار مغناطیسی در فاصله هوایی می‌باشد که از این

نظر به سه دسته‌ی ماشین‌های مغناطیس دائم شار شعاعی ($RFPM^1$)، ماشین‌های مغناطیس دائم شار محوری ($AFPM^2$) و ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع ($TFPM^3$)، تقسیم می‌شود. از ماشین‌های شار محوری به دلیل نوع ویژه ساختاری که دارند، می‌توان بصورت چند لایه بهره برداری نمود. این ویژگی ساختاری ماشین‌های شار محوری در ماشین‌های استوانه‌ای معمول براحتی قابل دستیابی نیست. به همین منظور در این پایان‌نامه بر روی یک ساختار خاص از ماشین‌های شار محوری تمرکز شده است.

در ادامه ابتدا مروری گذرا بر ساختارهای مختلف ماشین‌های مغناطیس دائم شار محوری انجام می‌گیرد و ساختارهای چند لایه این ماشین‌ها بصورت مفصل‌تر مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۱-۳- ماشین‌های شار محوری آهنربای دائم

ماشین‌های شار محوری از نظر جهت شار که به صورت موازی با محور مکانیکی ماشین جاری می‌شود، مطابق شکل ۱-۱ با ماشین‌های الکتریکی متداول شار شعاعی تفاوت دارند. جریان عبوری از طریق هر سیم‌پیچ استاتور با شار ایجاد شده توسط آهن‌رباهای روی روتور به طور متقابل اثر می‌کند، که باعث ایجاد یک نیروی مماسی با محیط روتور می‌شود. علیرغم تنوع زیاد در وجود ماشین‌های $AFPM$ که در ادامه خواهد آمد، می‌توان برخی از ویژگی‌های مشترک را با عنوان مزایا و معایب این ماشین‌ها نسبت به ماشین‌های الکتریکی متداول نام برد [۵].

¹ Radial Flux Permanent Magnet

² Axial Flux Permanent Magnet

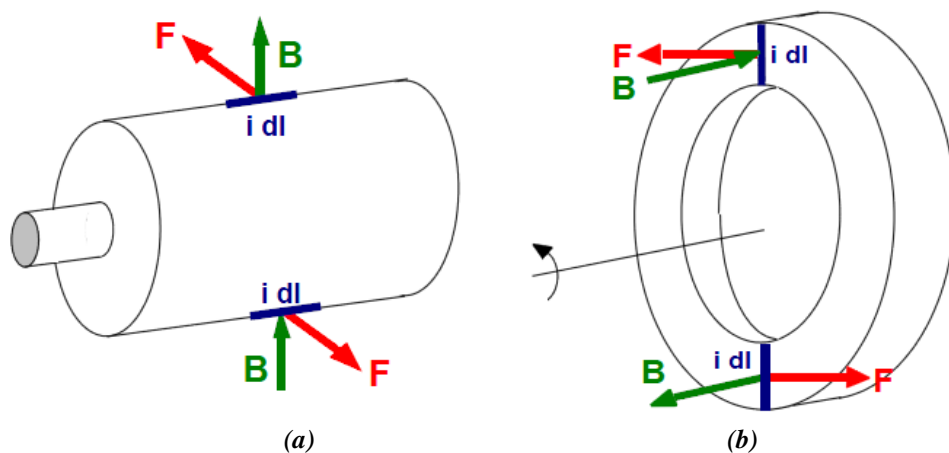
³ Transverse Flux Permanent Magnet

مزایا:

- ساختمان فشرده ماشین و طول بدنه کوتاه
- چگالی توان بالا
- راندمان بالا؛ بدون تلفات مس روتور به دلیل تحریک آهن‌ربای دائم
- دارای روتور کوتاه در جهت محوری با قابلیت ساختمان بدون فولاد روتور
- دارای ساختار مستحکم‌تر از نوع استوانه‌ای

معایب:

- تلفات بادخوری بالا در کاربردهای سرعت بالا (که می‌تواند با قرار دادن ماشین در محفظه خلأ تا حدی کاهش یابد).
- توپولوژی پیچیده ماشین با دو یا چند فاصله هوایی



شکل ۱-۱- توپولوژی و نحوه بوجود آمدن گشتاور در (a) ماشین RFPM (b) ماشین AFPM

چندین دلیل برای کنار گذاشته شدن ماشین‌های شار محوری در ابتدا وجود داشت که به صورت خلاصه در زیر آورده شده‌اند.

۱- نیروی جذب مغناطیسی محوری قوی بین استاتور و روتور

۲- مشکلات ساخت، مانند برش شیارها در هسته‌های مورق و دیگر روش‌های ساخت هسته-

های استاتور شیاردار

۳- هزینه‌های بالای مورد بحث در ساخت هسته‌های مورق استاتور

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

عموماً اعتقاد بر این است که در دسترس بودن مواد آهنربای انرژی بالا (به ویژه آهنرباهای دائم کمیاب خاکی) نیروی محرک اصلی برای بهره‌برداری از توپولوژی‌های ماشین‌های آهنربای دائم جدید است و به همین دلیل ماشین‌های شار محوری آهنربای دائم دوباره رواج پیدا کرده‌اند.

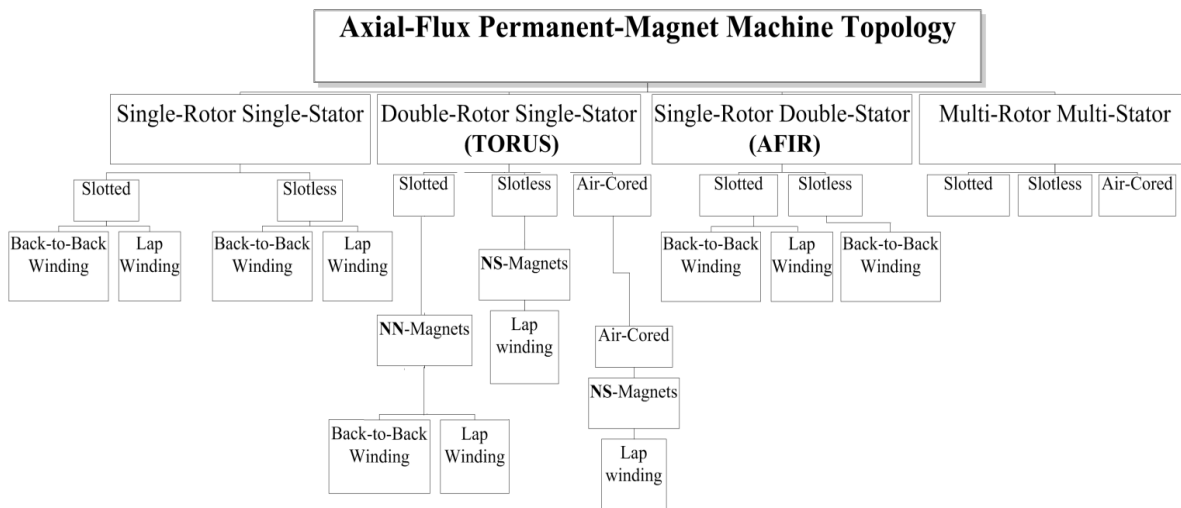
از آن جایی که قیمت آهنرباهای کمیاب خاکی از یک منحنی کاهشی پیروی می‌کنند و در اواخر قرن بیستم نیز از نظر قیمت دارای یک شیب کاهشی تند بوده‌اند، لذا با روند کاهشی قیمت و نیز با در دسترس بودن مواد آهنربای دائم، ماشین‌های *AFPM* در آینده نزدیک نقش کلیدی مهم-تری خواهند داشت [۴].

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

بسیار مناسب برای ماشین‌های شار شعاعی متداول استفاده شده است [۶].

۱-۳-۱- انواع ماشین AFPM از لحاظ ساختار

از نظر ساختاری، ماشین‌های AFPM می‌توانند به صورت ماشین‌های "یک وجهی"^۱، "دو وجهی"^۲، یا "چند لایه (چند دیسکی)"^۳ طراحی شوند. در پیکربندی‌های دو وجهی، هر دو آرایش استاتور خارجی یا روتور خارجی می‌توانند در نظر گرفته شوند. به طور کلی طبقه‌بندی انواع توپولوژی‌های ماشین AFPM به صورت نمودار شکل ۱-۲ می‌باشد [۴].



شکل ۱-۲- نمودار طبقه‌بندی انواع توپولوژی‌های ماشین AFPM

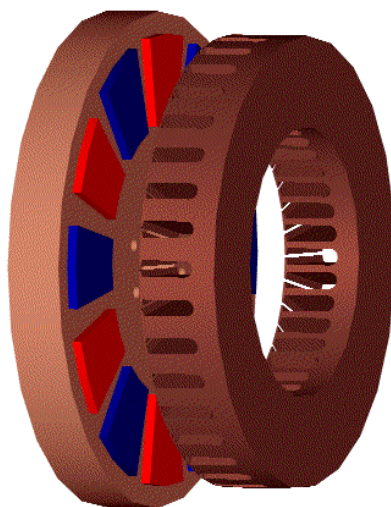
¹ - Single-sided

² - double-sided

³ - multi-stage (multi-disc)

۱-۳-۱-۱- ماشین‌های AFPM یک وجهی

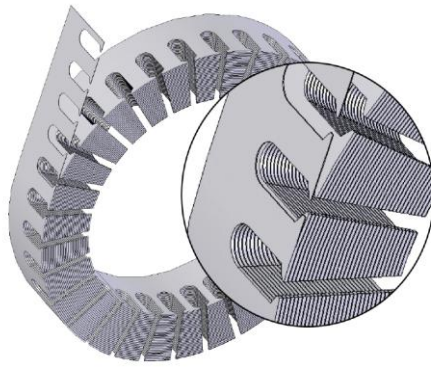
ابتدائی‌ترین، ساده‌ترین و ارزان‌ترین ساختار ماشین شار محوری، ساختار "یک روتور- یک استاتور"^۱ است که در شکل ۱-۳ دیده می‌شود. استاتور شامل یک سیم‌پیچی نوع حلقه‌ای جای گرفته در یک ماده شبه اپوکسی و یک دیسک آهنی که از یک "هسته آهنی پیچانده شده نواری"^۲ مطابق شکل ۱-۴ ساخته شده است [۵]، [۶]. روتور نیز از یک صفحه فولادی یک‌پارچه که آهن‌ریاها روی آن نصب شده‌اند تشکیل شده است. از آنجایی که این ساختار هنوز هم از نیروی محوری نامتعادل بین روتور و استاتور رنج می‌برد به طوری که پیامد آن آرایش یا طاقان‌های پیچیده‌تر و نیاز به صفحه روتور نازک‌تر می‌باشد و از طرف دیگر به واسطه تولید گشتاور نسبتاً پایین این نوع ماشین خیلی رواج ندارد [۵]، [۷].



شکل ۱-۳- ساختار ماشین شار محوری آهن‌ریای دائم یک روتور- یک استاتور [۷]

¹ - single-rotor-single-stator

² - tape wound iron core



شکل ۱-۴- استاتور مورق یک ماشین *AFPM* ساخته شده از یک نوار فولادی پیچیده شده به صورت دایره‌ای [۸]

۱-۳-۱-۲- ماشین‌های *AFPM* دو وجهی

همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد مشکل ساختار یک وجهی وجود نیروی محوری نامتعادل بین روتور و استاتور آن می‌باشد، که این نیروی جذب قوی بین روتور و استاتور می‌تواند با استفاده از استاتور (یا روتور) دوم که به صورت قرینه اولی قرار می‌گیرد متعادل شود. این ساختار آرایش "دو وجهی" نامیده می‌شود [۵].

به طور کلی ماشین‌های *AFPM* بر حسب موقعیت قرار گرفتن روتور(ها) و استاتور(ها) به دو نوع کلی گروه‌بندی می‌شوند که یکی ساختار "روتور خارجی - استاتور داخلی" می‌باشد که ماشین‌های دارای این ساختار به طور کلی دارای N استاتور و $N+1$ روتور (برای $N \geq 1$) می‌باشند. لذا برای ساختار آرایش دو وجهی اگر $N=1$ انتخاب شود ماشین دارای ساختار "دو روتور - یک استاتور" خواهد بود که یک استاتور سیم‌پیچی شده بین دو روتور حامل آهن‌رباهای دائم قرار می‌گیرد و به اختصار به ماشین نوع "*TORUS*"^۱ معروف است [۱]. اشین‌های نوع *TORUS* بر حسب نوع ساختار استاتور به

^۱ - *Two-Rotor-One-Stator*

دو نوع ماشین *TORUS* بدون شیار "*TORUS-NS*"^۱ و *TORUS* شیاردار "*TORUS-S*"^۲ ساخته می-شوند. پیکربندی این دو ساختار در شکل ۱-۵ و شکل ۱-۶ نشان داده شده است. توپولوژی *TORUS* بدون شیار به خاطر دارا بودن طول محوری کوتاه، نسبت توان به وزن یا گشتاور به وزن بالایی دارد. اثرات ناشی از وجود شیارها مانند: ریپل شیار، گشتاور دندانگی^۳، تلفات فرکانس بالای روتور و اشباع در دندانه‌های استاتور حذف می‌شوند و این ویژگی منجر به یک ماشین با نویز پایین می‌شود. ماشین *TORUS* با وجود شیارهای آرمیچر بسیار مقاوم‌تر است و از طرفی نیز فاصله هوایی مؤثر آن خیلی کوچکتر است. همچنین در رابطه با آرایش آهن‌رباها بر روی روتور نیز می‌تواند تغییراتی ایجاد شود به طوری که آرایش آهن‌رباها بر روی مسیر شار اصلی در روتور یا استاتور ماشین به همان اندازه ساختار سیم‌پیچی تأثیر دارد. دو نوع مختلف ماشین *TORUS* شیاردار، *TORUS-S* نوع *NN*^۴ و *TORUS-S* نوع *NS*^۵ می‌توانند با توجه به جهت شار اصلی به دست آیند [۶].

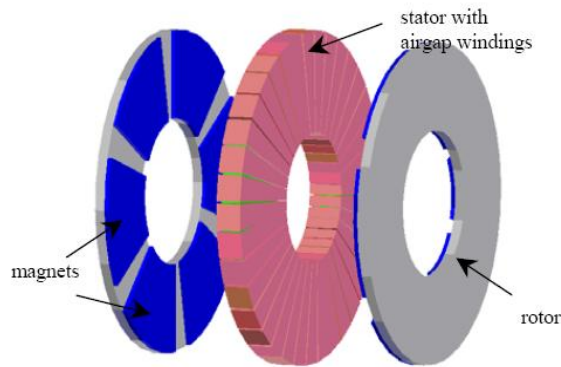
^۱ - *TORUS-Non Slotted*

^۲ - *TORUS-Slotted*

^۳ - *Cogging Torque*

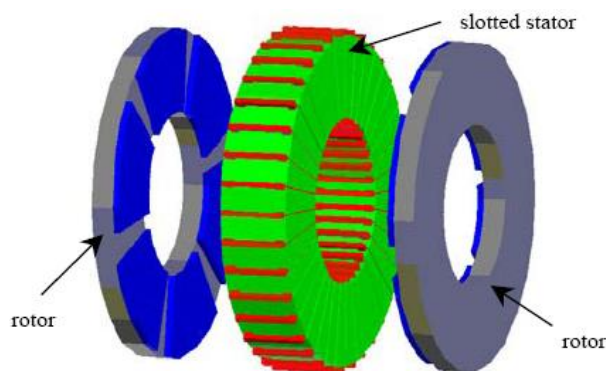
^۴ - *North-North*

^۵ - *North-South*



شکل ۱-۵- پیکربندی موتور شار محوری نوع TORUS بدون شیار با آهنربای دائم با اتصال سطحی (TORUS-NS)

[۶]

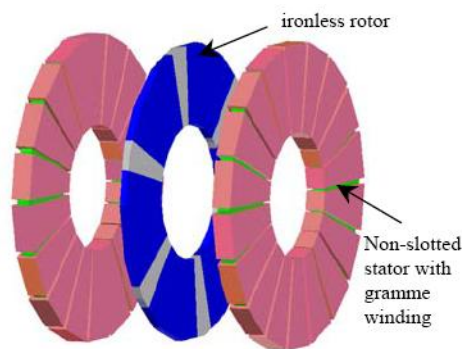


شکل ۱-۶- ساختار موتور شار محوری نوع TORUS شیاردار با آهنربای دائم با اتصال سطحی (TORUS-S) [۶]

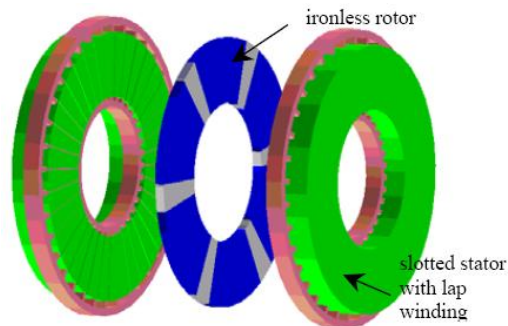
ساختار دیگر "روتور داخلی - استاتور خارجی" می باشد که ماشین‌های دارای این ساختار نیز به طور کلی دارای $N+1$ استاتور و N روتور (برای $N \geq 1$) می باشند. و لذا برای ساختار آرایش دو وجهی اگر $N=1$ انتخاب شود ماشین دارای ساختار "دو استاتور- یک روتور" خواهد بود که یک روتور حامل آهنرباهای دائم بین دو استاتور سیم‌پیچی شده قرار می‌گیرد و به آن ساختار روتور داخلی نیز می‌گویند و به اختصار به ماشین نوع "AFIR" معروف است.

¹ - Axial Flux Interior Rotor Permanent Magnet

این ماشین‌ها دارای ساختار ساده، راندمان نسبتاً بالا و هزینه پایین می‌باشند. این ماشین‌ها می‌توانند برای کاربردهایی که چگالی توان و گشتاور بالا، راندمان بالا و نویز پایین با استفاده از آهن-ربای $NdFeB$ نیاز دارند استفاده شوند. این ماشین‌ها به دو صورت روتور داخلی - استاتور خارجی بدون شیار^۱ ($AFIR-NS$) و روتور داخلی - استاتور خارجی شیاردار ($AFIR-S$) وجود دارند [۷]، [۹]. ساختار این ماشین‌ها در شکل ۱-۷ و شکل ۱-۸ نشان داده شده است.



شکل ۱-۷- ساختار موتور شار محوری نوع $AFIR$ بدون شیار با آهن‌ربای دائم با اتصال سطحی ($AFIR-NS$) [۶]



شکل ۱-۸- ساختار موتور شار محوری نوع $AFIR$ شیاردار با آهن‌ربای دائم با اتصال سطحی ($AFIR-S$) با دو

مجموعه سیم‌پیچی رویهم در هر استاتور [۶]

¹ -Axial Flux Interior Rotor-Non Slotted

² -Axial Flux Interior Rotor- Slotted

۱-۳-۱-۳- ماشین‌های شار محوری چند لایه (چند دیسکی)

در ماشین‌های شار محوری گشتاور الکترومغناطیسی تابعی از قطر بیرونی می‌باشد. اگر ماشین با قطر بیرونی کوچک طراحی شده باشد، گشتاور مورد نیاز می‌تواند با استفاده از آرایش چند لایه‌ای به دست آید. به ساختار چند لایه‌ای ماشین‌های شار محوری در مقالات توجه کافی نشده است. ماشین‌های چند لایه به خاطر مونتاژ ساده‌تر و حتی چگالی گشتاور و توان بهتر قابل رقابت می‌باشند. دلیلش این است که سطح فاصله هوایی در ماشین‌های شار شعاعی آهن‌ربای دائم (RFPM) چند لایه با پیش رفتن به سمت روتورهای داخلی کوچکتر می‌شود در حالی که سطح فاصله هوایی در ماشین‌های شار محوری آهن‌ربای دائم یکسان می‌ماند که چگالی توان یا گشتاور بزرگتری نسبت به RFPM ایجاد می‌کند و مونتاژ ماشین نیز ساده‌تر است [۶]. از طرف دیگر ظاهراً تنش‌های مکانیکی و تلفات بادخوری در ماشین‌های چند لایه بیشتر هستند. همچنین با توجه به این که هزینه تمام شده ماشین از اهمیت بالایی برخوردار است ماشین‌های چند لایه با داشتن دیسک‌های روتور زیاد با آهن‌رباهای دائم گران‌قیمت از لحاظ قیمت گران تمام خواهند شد [۵]. هر دو نوع ماشین‌های TORUS و AFIR که قبلاً ذکر شدند می‌توانند به صورت مدل چند لایه ساخته شوند. به طور کلی ساختار ماشین چند لایه دارای N استاتور و $N+1$ دیسک روتور می‌باشد که در آن N تعداد لایه‌های استاتورها است. محور مکانیکی روتورها مشترک است. سیم‌پیچی‌های استاتور N استاتور می‌توانند هم به صورت موازی و هم به صورت سری متصل شوند. هسته روتور تنها برای روتور بیرونی استفاده شده باید به دقت انتخاب شود زیرا آنها مسیر شار اصلی را ایجاد می‌کنند. همچنین ماشین‌های شار محوری چند لایه نیز بر

حسب عدم وجود یا وجود شیارهای استاتور به دو نوع توپولوژی شار محوری چند لایه بدون شیار^۱ (*MULTI-NS*) و توپولوژی شار محوری چند لایه شیاردار^۲ (*MULTI-S*) ساخته می‌شوند [۶].

۱-۳-۱-۳-۱- ماشین شار محوری چند لایه بدون شیار (*MULTI-NS*)

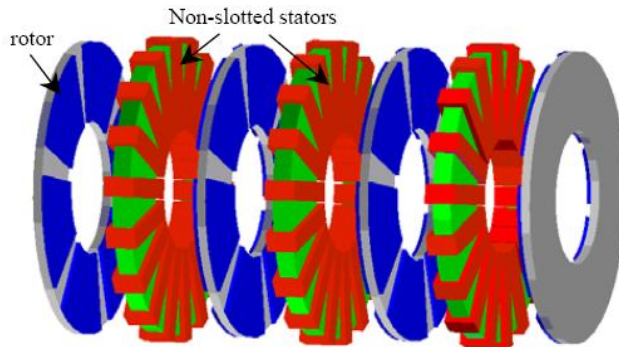
یک طرح ساده از توپولوژی ماشین شار محوری چند لایه بدون شیار (*MULTI-NS*) برای $N=3$ در شکل ۱-۹ نشان داده شده است. استاتورها با نوارهای فولادی رول شده ساخته شده اند. سیم پیچی‌های فاصله هوایی نوع گرامه با اتصال پشت به پشت در اطراف هسته استاتور قرار گرفته اند. دیسک‌های روتور بیرونی توسط هسته روتور و آهنرباهای با اتصال سطحی مغناطیس شده محوری همانند دیگر توپولوژی‌های نوع *TORUS* ساخته می‌شوند. روتورهای داخلی به وسیله دیسک‌های روتور با آهنربای دائم در هر دو طرف هسته استاتور ساخته می‌شوند. بخش‌های سیم پیچی مورد استفاده برای تولید گشتاور همان قسمت‌هایی از وجه‌های داخلی استاتورها می‌باشند که روبروی روتورها قرار می‌گیرند. بنابراین سیم پیچی‌های انتهایی در توپولوژی *MULTI-NS* بسیار کوتاه می‌باشد که این خود باعث کاهش تلفات مس و افزایش راندمان ماشین می‌گردد. همچنین از آنجایی که طول ماشین *MULTI-NS* بلندتر از ماشین شار محوری یک لایه است مساحت سطح بدنه استاتور برای انتقال گرمای تولید شده بیشتر است [۶].

مسیر شار ماشین‌های *MULTI-NS* اساساً مشابه مسیر شار در ساختار نوع *TORUS* یا *AFIR* است. همانطور که از شکل ۱-۱۰ مشاهده می‌شود شار از یک روتور با آهن پشت بیرونی به روتور

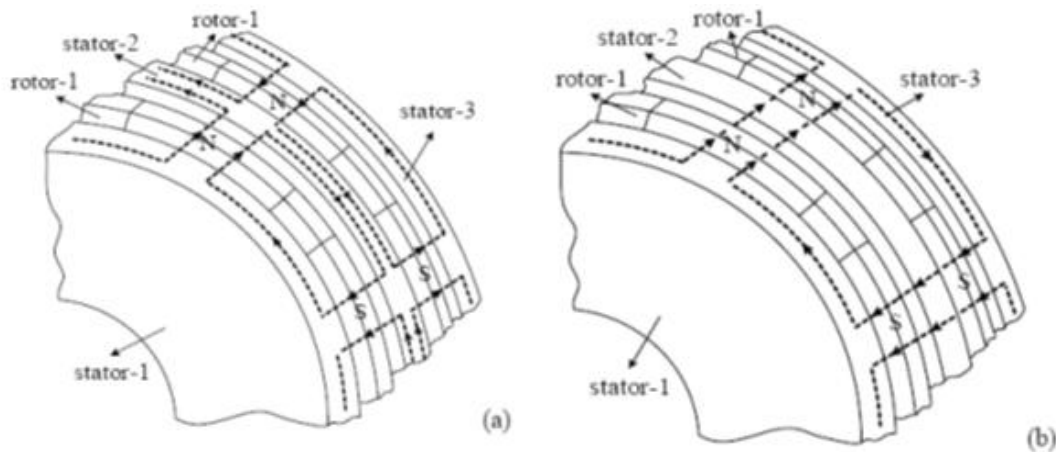
¹ -Multi-Non Slotted

² -Multi-Slotted

بیرونی دیگر از طریق N استاتور، $N-1$ روتور بدون هسته و $2N$ فاصله هوایی در هر کدام از دو ساختار ماشین عبور می کند.



شکل ۱-۹- نمای سه بعدی از ماشین چند لایه‌ای آهنربای دائم بدون شیار برای $N=3$ [۶]



شکل ۱-۱۰- نمایش سه بعدی جهت و مسیرهای شار در توپولوژی چند لایه‌ای (طرح دو روتور- سه استاتور) (a) نوع

(b) نوع NS [۶]

۱-۳-۱-۳-۲- ماشین چند لایه شیاردار ($MULTI-S$)

ساختار ماشین چند لایه شیاردار $MULTI-S$ دارای N استاتور و $N+1$ روتور، شبیه توپولوژی

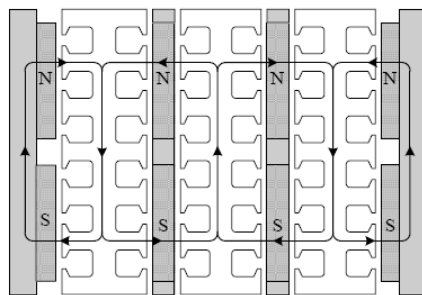
$MULTI-NS$ می باشد. در اینجا نیز دو ساختار متفاوت برای ماشین $MULTI-S$ می توانند در نظر

گرفته شوند. یکی توپولوژی نوع NN ($MULTI-S$ نوع NN) و دیگری توپولوژی نوع NS ($MULTI-S$)

نوع NS) است [۶].

۱-۳-۱-۲-۱- ماشین چند لایه شیاردار نوع NN ($MULTI-S$ نوع NN)

در ماشین چند لایه شیاردار نوع NN ($MULTI-S$ نوع NN) شار اصلی به صورت محیطی از استاتور عبور می‌کند بنابراین آهن پشته ($Back-Iron$) در هر استاتور مورد نیاز است. ساختار موتور در شکل ۱-۱۱ نشان داده شده است. استاتورهای $MULTI-S$ نوع NN توسط نوارهای فولادی رول شده شیاردار ساخته می‌شوند. هسته استاتور شیاردار ماشین توسط سیم پیچی با اتصال پشت به پشت توزیع شده سینوسی در شیارهای استاتور احاطه می‌شود. ساختار روتور در هر دو ماشین $MULTI-S$ یکسان و همانند ماشین $MULTI-NS$ می‌باشد. همچنین یک ماده غیر مغناطیسی مانند رزین اپوکسی یا فولاد غیر مغناطیسی برای افزایش استحکام ساختار روتور استفاده می‌شود [۶].

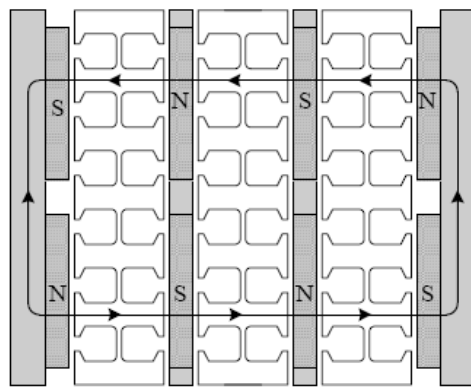


شکل ۱-۱۱- توپولوژی ماشین $MULTI-S$ نوع NN برای $N=3$ [۶]

۱-۳-۱-۲-۲- ماشین چند لایه شیاردار نوع NS ($MULTI-S$ نوع NS)

در ماشین چند لایه شیاردار توپولوژی نوع NS ($MULTI-S$ نوع NS) شار اصلی در جهت محوری از استاتور عبور می‌کند. از آنجایی که شار هسته استاتور را بطور محیطی دور نمی‌زند نیاز به آهن پشته ($Back-Iron$) نیست و ساختار استاتور می‌تواند در چنین حالتی به گونه ای طراحی شود که فقط شامل تعدادی دندانه استاتور باشد. دندانه‌ها روی یک صفحه از جنس مواد مغناطیسی و روی یک مسیر دایره‌ای شکل با فاصله‌های یکسان توزیع و محکم می‌شوند. در این صورت یک آهن پشته ($Back-Iron$) خیلی کوچک می‌تواند در استاتور برای تحقق بخشیدن به یک ساختار صلب و محکم

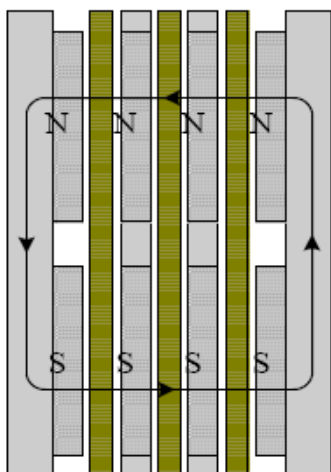
استفاده شود. ساختار روتور همانطور که در قسمت قبل نیز بیان شد در هر دو ماشین *MULTI-S* و ماشین *MULTI-NS* یکسان می‌باشد. همچنین یک ماده غیر مغناطیسی مانند رزین اپوکسی یا فولاد غیر مغناطیسی برای افزایش استحکام ساختار روتور استفاده می‌شود. مزیت استفاده از ماشین *MULTI* نوع *NS*، که در شکل ۱-۱۲ نشان داده شده است، مشابه مزیت بکارگیری ماشین *TORUS* نوع *NS* است. به دلیل اینکه در ساختار استاتور ماشین *MULTI* نوع *NS* از آهن پشتی (*Back-Iron*) استفاده نمی‌شود لذا اندازه ماشین می‌تواند کوچکتر و راندمان و چگالی توان بیشتر از ماشین‌های چند لایه ای نوع *NN* باشد. به هر حال چون در توپولوژی‌های بدون شیار، ورقه‌های آهن برای ایجاد شیار بریده نمی‌شوند هیچگونه ضایعات مواد هسته در ماشین *MULTI* نوع *NS* وجود ندارد [۶].



شکل ۱-۱۲- توپولوژی ماشین *MULTI-S* نوع *NS* برای $N=3$ [۶]

۱-۳-۱-۳-۳- ماشین شار محوری چند لایه با استاتور بدون هسته

یک ساختار دیگر از ماشین شار محوری چند لایه، طرح استاتور بدون هسته است. این نوع ماشین می‌تواند با روتورهای چندتایی و سیم پیچی‌های آرمیچر بدون آهن استاتور ساخته شوند. بطوری که در شکل ۱-۱۳ مشاهده می‌شود شار مغناطیسی از طریق روتورها و فاصله‌های هوایی از یک طرف ماشین به طرف دیگر طی مسیر می‌کند [۶].



شکل ۱-۱۳- ماشین شار محوری چند لایه با استاتور بدون هسته

۴-۱- ساختار انتخاب شده

پس از معرفی ساختارهای مختلف ماشین‌های شار محوری و بررسی انواع ماشین‌های چند لایه و با بررسی مقالات و منابع مختلف ساختار *TORUS* بدون شیار که از نظر مشخصه‌های مختلف از جمله چگالی توان، بازده و سطح نویز نسبت به سایر ساختارها از برتری نسبی برخوردار بود، برگزیده شد [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]. در فصل دوم یک الگوریتم طراحی جامع برای این ساختار ارائه می‌گردد و سپس یک ماشین با مشخصات نامی معین، با استفاده از این الگوریتم، طراحی می‌شود. برای اعتبارسنجی الگوریتم طراحی تدوین شده، با استفاده از نرم افزار روش اجزاء محدود (*FEM*) ماشین طراحی شده مدل‌سازی می‌شود و مشخصه‌های مغناطیسی بدست آمده از نرم‌افزار با مقادیر بدست آمده توسط الگوریتم طراحی مورد مقایسه قرار می‌گیرد. پس از اطمینان از صحت الگوریتم طراحی، ماشین‌های متعددی در توان‌های مختلف و تعداد لایه‌های متفاوت با در نظر گرفتن قیده‌های مسئله طراحی می‌شود. این طراحی‌ها با استفاده از یک برنامه کامپیوتری بهینه شده برای پارامترهای اختیاری طراحی نسبت به چگالی توان و بازده ماشین صورت می‌پذیرد. به عبارت دیگر از میان تعداد زیاد طراحی ممکن برای یک توان و تعداد لایه مشخص، بهینه‌ترین طرح با توجه به توابع هدف مذکور

و قیود موجود، برگزیده می‌شود. در ادامه پس از مدلسازی طرح‌های بدست آمده در نرم افزار اجزاء محدود و استخراج ماتریس اندوکتانس، هر طرح در نرم افزار متلب شبیه سازی می‌شود تا رفتار دینامیکی گذرای آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد. با این کار مشخصه‌های دینامیکی و دائمی ماشین‌ها در شرایط عملکردی مختلف بدست می‌آید و در نتیجه می‌توان تصمیم‌گیری کرد که در هر توان ماشین بصورت چند لایه طراحی شود که بهترین عملکرد را داشته باشد.

سر انجام در یک فصل بصورت جداگانه یکی از ماشین‌های چند لایه طراحی شده در فضای سیمولینک شبیه سازی خواهد شد و رفتار دینامیکی گذرای ماشین در شرایط قطع و وصل لایه‌های مختلف به منبع تغذیه در بارها و سرعت‌های مختلف، مورد بررسی و ارزیابی قرار خواهد گرفت. در پایان الگویی برای ترکیب لایه‌های مناسب برای تامین توان مورد نیاز در سرعت‌های مختلف برای حصول بهره بالا، تلفات انرژی کم و دیگر شاخصه‌های عملکردی مطلوب ارائه خواهد شد.

فصل دوم

تدوین الگوریتم طراحی ماشین *AFPM*

ساختار *TORUS-NS*

در فصل اول در مورد اهمیت ماشین‌های مغناطیس دایم چند لایه در کاربردهای سرعت و توان متغیر گفته شد و نتیجه گرفته شد که ماشین‌های مغناطیس دائم شار محوری با توجه به شکل ساختاری که دارند برای ساختارهای چند لایه مناسب هستند. سپس عملکرد و انواع ساختارهای این نوع ماشین مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت با توجه به مشخصه‌های عملکردی و ویژگی‌های هر یک از آنها، ساختار *TORUS-NS* برای ادامه برگزیده شد. در این فصل با استفاده از معادله توان خروجی و با توجه به روابط فیزیکی موجود و با تدوین یک الگوریتم طراحی جامع برای ساختار انتخاب شده، به استخراج پارامترهای ابعادی ماشین پرداخته می‌شود. پس از بدست آمدن الگوریتم طراحی به مدلسازی مغناطیسی ماشین بر اساس مدارهای مغناطیسی پرداخته می‌شود و یک مدل تقریباً دقیق با در نظر گرفتن شارهای نشتی برای ماشین ارائه می‌گردد. لازم بذکر است که ارائه الگوریتم طراحی برای یک لایه از ماشین ضروری است و برای بررسی عملکرد ماشین چندلایه به شبیه سازی دینامیکی گذرایی نیاز است. در پایان این فصل یک برنامه کامپیوتری برای طراحی بهینه و دقیق ماشین ارائه می‌شود.

۲-۲- روابط ابعادی ماشین *AFPM* نوع *TORUS-NS*

در این بخش طراحی و استخراج پارامترهای ابعادی یک ماشین شار محوری آهنربا دائم نوع *TORUS-NS* با سیم‌پیچی تروئیدال براساس قوانین فیزیکی حاکم ارائه می‌شود. میان ابعاد و توان خروجی ماشین رابطه‌ای موجود است که براساس آن پارامترهای ابعادی ماشین استخراج می‌شوند. برای هر ماشین الکتریکی می‌توان با صرف نظر از مقاومت و اندوکتانس نشتی استاتور معادله توان خروجی را به صورت رابطه (۱-۲) بیان نمود [۱۳]، [۱۴]، [۱۵].

$$P_{out} = \eta m \frac{1}{T} \int_0^T e(t) i(t) dt = \eta m K_p E_p I_p \quad (1-2)$$

در رابطه (۱-۲) ضریب عبارت ηm متوسط توان لحظه‌ای یا توان حقیقی مربوط به هر فاز در فاصله هوایی، P_{out} توان خروجی کل، η راندمان، m تعداد فازهای ماشین، $e(t)$ و E_p به ترتیب مقدار لحظه‌ای و حداکثر نیروی محرکه الکتریکی القایی در سیم‌پیچی آرمیچر ناشی از آهنرباهای دائم یا *back emf* مربوط به هر فاز، $i(t)$ و I_p به ترتیب مقدار لحظه‌ای و حداکثر جریان هر فاز، T دوره تناوب یک سیکل *back emf* و K_p ضریب شکل موج توان الکتریکی^۱ نام دارد که به صورت رابطه (۲-۲) تعریف می‌شود.

$$K_p = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{e(t)}{E_p} \frac{i(t)}{I_p} dt \quad (2-2)$$

برای بوجود آمدن ارتباط میان معادله توان خروجی و پارامترهای ابعادی ماشین باید روابط E_p

¹ *Electrical Power Waveform Factor*

و I_P را بر حسب پارامترهای ابعادی ماشین بیان نمود. برای این منظور ابتدا دیفرانسیل شار تولید شده توسط هر یک از آهنرباهای دائم بصورت رابطه (۳-۲) بیان می‌شود.

$$d\varphi_{pole} = B_{avg} dA_{pole} \quad (3-2)$$

در این رابطه B_{avg} متوسط چگالی شار زیر هر قطب، φ_{pole} شار تولیدی توسط هر یک از قطبها و A_{pole} سطح مقطع مربوط به مسیر عبور شار تولیدی توسط هر یک از قطبها می‌باشد. با فرض توزیع سینوسی چگالی شار زیر هر جفت قطب در فاصله هوایی، داریم:

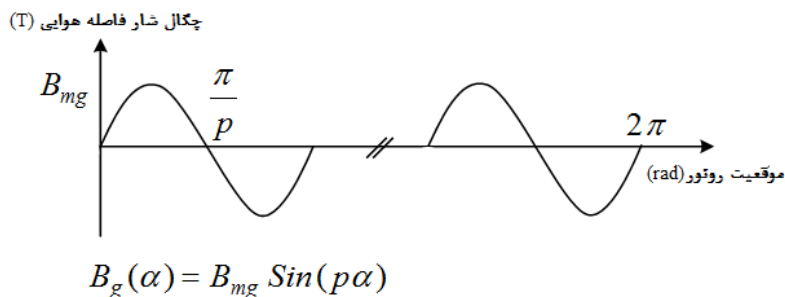
$$B_{avg} = \frac{1}{\pi/p} \int_0^{\pi/p} B_{mg} \sin \alpha d\alpha = \frac{2}{\pi} B_{mg} \quad (4-2)$$

در رابطه (۴-۲) B_{mg} حداکثر چگالی شار زیر هر قطب و p تعداد جفت قطبهای ماشین می‌باشد. در رابطه با پارامتر B_{mg} باید به این نکته توجه داشت که به علت بزرگ بودن فاصله هوایی مؤثر در ماشینهای *TORUS-NS* بیشینه چگالی شار فاصله هوایی از ۰/۶۵ تسلا فراتر نمی‌رود [۴]. رابطه (۴-۲) با فرض توزیع چگالی شار سینوسی در فاصله هوایی حاصل می‌شود. در حالت کلی، با فرض توزیع چگالی شار غیر سینوسی زیر هر جفت قطب، متوسط چگالی شار زیر هر قطب از رابطه $\alpha_i B_{mg}$ حاصل می‌شود. برای محاسبه شار تولیدی زیر هر قطب از سیستم تحریک، مطابق با شکل (۲-۱) از طرفین رابطه (۳-۲) زیر یک قطب از سیستم تحریک انتگرال گرفته می‌شود.

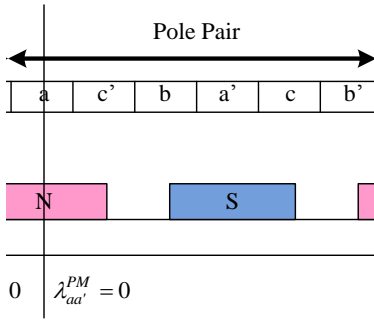
$$\varphi_{pole} = B_{avg} \int_0^{\pi/p} \int_{D_i/2}^{D_o/2} r dr d\alpha = \frac{\pi}{8p} B_{avg} D_o^2 (1 - \lambda^2) \quad (5-2)$$

در رابطه (۵-۲) D_i و D_o به ترتیب قطر داخلی و قطر خارجی محیطی آهنرباهای دائم و λ نسبت قطر داخلی به قطر خارجی می‌باشد. حال فرض کنیم روتور توسط یک محرک با سرعت سنکرون به چرخش درآید و ترمینال ماشین در حالت مدار باز باشد. در این صورت توزیع فضایی

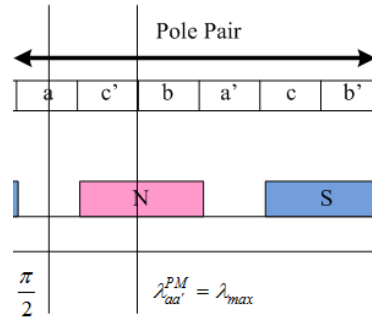
چگالی شار نشان داده شده در شکل ۱-۲ با سرعت سنکرون در فاصله هوایی به گردش در خواهد آمد. در یک لحظه خاص ($\omega t=0$) مطابق شکل ۲-۲-الف، قطب N زیر پیچک اولیه فاز a و قطب S زیر پیچک ثانویه فاز a قرار می‌گیرد. در این لحظه سیم‌پیچی فاز a هیچ شاری تولید شده توسط آهنرباها (تحریک) را حلقه نمی‌کند. یعنی شار پیوندی سیم‌پیچی فاز a ناشی از آهنرباهای دائم برابر صفر خواهد بود. در موقعیت $\omega t=90^\circ$ مطابق شکل ۲-۲-ب تمامی شار تولید شده توسط قطب‌های تحریک سیم‌پیچی فاز a را قطع نموده و شار پیوندی سیم‌پیچی فاز a ناشی از آهنرباهای دائم حداکثر خواهد بود. در موقعیت $\omega t=180^\circ$ مطابق شکل ۲-۲-ج قطب N زیر پیچک ثانویه فاز a و قطب S زیر پیچک اولیه فاز a قرار گرفته و شار پیوندی سیم‌پیچی فاز a ناشی از آهنرباهای دائم صفر خواهد بود. حال اگر روتور در موقعیت $\omega t=270^\circ$ قرار گیرد حداکثر شار تولیدی توسط آهنرباها سیم‌پیچی فاز a را در جهت عکس قطع خواهد نمود و شار پیوندی سیم‌پیچی فاز a ناشی از آهنرباهای دائم حداکثر ولی با علامت منفی خواهد بود.



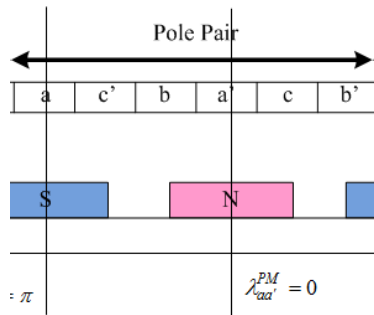
شکل ۱-۲- توزیع چگالی شار در فاصله هوایی در حالت روتور قفل شده



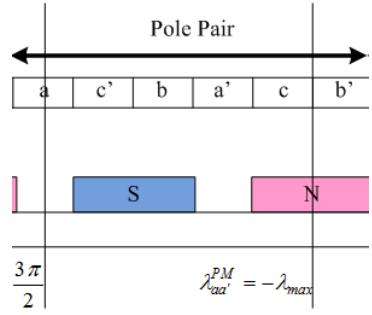
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۲-۲- نمایش موقعیت نسبی روتور و استاتور در زوایای مختلف

با توجه به توضیحات ارائه شده می‌توان رابطه شار پیوندی مربوط به فاز a را به صورت رابطه

(۶-۲) بیان نمود.

$$\lambda_a^{PM}(t) = K_w N_S \varphi_{pole} \sin(\omega_e t) = K_w N_S \frac{\pi}{8p} B_{avg} D_o^2 (1 - \lambda^2) \sin(\omega_e t) \quad (6-2)$$

۳-۲- الگوریتم طراحی اولیه ماشین *AFPM* نوع *TORUS-NS*

در این بخش یک الگوریتم طراحی اولیه ماشین‌های مغناطیس دائم بدون شیار با یک استاتور و دو دیسک روتور ارائه می‌شود. مشخصات نامی ماشین در شش ردیف اول الگوریتم لیست شده است.

۱. توان خروجی نامی موتور $P_{out} [W]$
۲. تعداد فازها m
۳. ولتاژ موثر فاز $V_{ph} [V]$
۴. فرکانس $f [Hz]$
۵. سرعت نامی موتور $n_s [RPM]$
۶. اتصال موتور Δ یا Y
۷. تعداد زوج قطبها $p = 60f/n_s$
۸. بارگذاری الکتریکی کل $12000 < A < 60000$ A $\left[\frac{A}{m} \right]$
۹. چگالی جریان $3(10^6) < J_s < 10(10^6)$ J_s $\left[\frac{A}{m^2} \right]$
۱۰. تعداد مسیرهای موازی جریان a_p
۱۱. چگالی شار فاصله هوایی $B_{avg} [T]$
۱۲. نسبت قطر داخلی به قطر خارجی $\lambda = \frac{D_i}{D_o}$
۱۳. ضریب شکل موج توان الکتریکی K_p
۱۴. ضریب شکل موج جریان K_i
۱۵. ضریب نیروی محرکه الکتریکی $K_e = \frac{\pi^2}{2} K_w$
۱۶. ضریب پر شوندگی مس K_{cu}
۱۷. نسبت قوس قطب به گام قطب α_i

۱۸. ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی آهنربای μ_{rPM}
۱۹. چگالی شار پس ماند آهنربای دائم B_r [T]
۲۰. شدت میدان مغناطیس زدا H_c [A/m]
۲۱. فاصله هوایی g [m]
۲۲. دامنه چگالی شار هسته روتور $B_{cr} = 1.6 \text{ to } 1.8$ [T]
۲۳. ضریب نشت شار K_d
۲۴. ضریب شکستگی شار K_f
۲۵. دامنه چگالی شار هسته استاتور $B_{cs} = \begin{cases} 5.47 f^{-0.32} & f > 40 \text{ Hz} \\ 1.7 \text{ to } 1.8 & f \leq 40 \text{ Hz} \end{cases}$ [T]
۲۶. راندمان η
۲۷. چگالی شار در سطح آهنربا $B_u = \frac{B_{avg}}{K_d}$ [T]
۲۸. قطر خارجی $D_o = \left(\frac{4p P_{out}}{\pi K_e K_i K_p \eta B_{avg} A f (1 - \lambda^2)(1 + \lambda)} \right)^{\frac{1}{3}}$ [m]
۲۹. قطر داخلی $D_i = \lambda D_o$ [m]
۳۰. قطر متوسط فاصله هوایی $D_g = \frac{D_o + D_i}{2} = \frac{1 + \lambda}{2} D_o$ [m]
۳۱. طول محوری هسته استاتور $L_{cs} = \frac{B_{avg} \pi D_o (1 + \lambda)}{B_{cs} 4p}$ [m]
۳۲. ضخامت سیم پیچی انتهایی در قطر داخلی $W_{cui} = \frac{\sqrt{D_i^2 + \frac{4A_s D_g}{K_{cu} J_s}} - D_i}{2}$ [m]
۳۳. ضخامت سیم پیچی انتهایی در قطر خارجی $W_{cwo} = \frac{\sqrt{D_o^2 + \frac{4A_s D_g}{K_{cu} J_s}} - D_o}{2}$ [m]
۳۴. ضخامت محوری سیم پیچی در فاصله هوایی $L_w = \frac{W_{cwo} + W_{cui}}{2}$ [m]

۳۵. طول محوری استاتور $L_s = L_{cs} + 2L_w$ [m]
۳۶. طول محوری هسته روتور $L_{cr} = \frac{\pi B_{avg} D_o (1 + \lambda)}{8 B_{cr} p}$ [m]
۳۷. طول محوری آهنربای دائم $L_{PM} = \frac{B_{avg}}{\frac{1}{\mu_{rPM}} (K_f B_r - \frac{1}{K_d} B_u)} (g + L_w)$ [m]
۳۸. طول محوری روتور $L_r = L_{cr} + L_{PM}$ [m]
۳۹. طول محوری ماشین $L_e = L_s + 2L_r + 2g$ [m]
۴۰. عرض آهنربا در قطر متوسط $w_{PMg} = \frac{\pi D_g}{2p} \alpha_i$ [m]
۴۱. تعداد دور سیم‌پیچی سری هر فاز $N_s = \frac{p E_p}{K_e B_{avg} f (1 - \lambda^2) D_o^2}$
۴۲. پیک جریان سیم‌پیچی هر فاز $I_p = \frac{P_{out}}{\eta m K_p E_p}$ [A]
۴۳. جریان موثر سیم‌پیچی هر فاز $I_{rms} = \frac{\pi D_g A_s}{2m N_s}$ [A]
۴۴. سطح مقطع هادی سیم‌پیچی $S_a = \frac{I_{rms}}{J_s}$ [mm²]
۴۵. طول شعاعی آهنربا دائم $L_i = (D_o - D_i) / 2$ [m]

۲-۴- نتیجه‌گیری از فصل

پس از اینکه در فصل اول با توجه به مزایا و معایب انواع موتورهای شار محوری، ساختار ماشین *AFPM* نوع *TORUS-NS* برای استفاده در سیستم‌های چند لایه انتخاب گردید در این فصل به استخراج الگوریتم طراحی آن پرداخته شد. الگوریتم طراحی با استفاده معادله توان ماشین و روابط فیزیکی حاکم، گام به گام بدست آمد. با دریافت مشخصات نامی مورد نظر ماشین و با استفاده از این الگوریتم طراحی، پارامترهای ابعادی ماشین حاصل می‌شود. در بین پارامترهای دخیل در الگوریتم طراحی چگالی شار متوسط فاصله هوایی، ضریب نشت شار و ضریب شکستگی شار جزو آن دسته از پارامترهایی هستند که در هنگام شروع طراحی باید بصورت معقول حدس زده شوند. بدین منظور برای طراحی دقیق‌تر ماشین لازم است که تمامی المان‌های یک جفت قطب ماشین که شار تولیدی هر قطب از آنها عبور می‌کند با دقتی قابل قبول مدل سازی شوند تا مدل مدار مغناطیسی ماشین حاصل شود. سپس با استفاده از تحلیل مش در مدل پیشنهاد شده و به روش تکرار مقادیر مناسب این سه پارامتر و پارامترهای ابعادی ماشین طراحی شده، به روز می‌شوند. این فرایند در برنامه‌ای که برای طراحی ماشین تهیه شده است صورت می‌پذیرد.

فصل سوم

طراحی موتورهای مورد نیاز

پس از انتخاب ساختار مناسب برای سیستم چند لایه در فصل اول و تدوین الگوریتم طراحی برای این ساختار در فصل دوم، در این فصل به طراحی ماشین‌های مورد نیاز برای تحلیل سیستم چند لایه پرداخته می‌شود. از آنجایی که سیستم‌های چندلایه برای کاربردهای توان بالا مطرح می‌شود، از این رو در این پایان نامه محدوده توان ۵۰۰ کیلو وات تا ۳ مگاوات با گام ۵۰۰ کیلو وات برای بررسی این سیستم‌ها در نظر گرفته شده است. برای این منظور هر یک از این سیستم‌ها باید با تعداد لایه‌های مختلف طراحی شوند تا پس از شبیه سازی‌های دینامیک گذرایی و بدست آمدن مشخصه‌های عملکردی هر یک، بتوان بهترین تعداد لایه را برای آن توان انتخاب کرد. با توجه به توان هر یک از سیستم‌های مورد بررسی تصمیم بر آن شد که سه ماشین ۱۰۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ کیلو وات به عنوان لایه-های سیستم چند لایه طراحی شوند. توان بیش‌تر از ۵۰۰ کیلو وات برای یک لایه به علت افزایش قطر و محدودیت‌های مکانیکی برای این ساختار توصیه نمی‌شود. همچنین توان کمتر از ۱۰۰ کیلو وات برای یک لایه نیز باعث افزایش بیش از حد تعداد لایه ها می‌شود. سپس با مونتاژ این لایه‌ها در کنار هم یک سیستم چند لایه بوجود خواهد آمد. برای مثال سیستم چند لایه ۱ مگا وات را می‌توان با سه ترکیب ۱- ۱۰ لایه هر لایه ۱۰۰ کیلو وات، ۲- ۴ لایه هر لایه ۲۵۰ کیلو وات و ۳- ۲ لایه هر لایه ۵۰۰ کیلو وات طراحی و مونتاژ نمود. بنابراین در این فصل با استفاده از الگوریتم طراحی و برنامه تهیه شده در فصل قبل سه ماشین ۱۰۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ کیلو وات طراحی می‌شوند تا پارامترهای ابعادی آن-ها بدست آیند. در نهایت با مدل سازی هر یک از طرح‌ها در نرم افزار اجزاء محدود *JMAG-Designer10.5* علاوه بر اعتبارسنجی الگوریتم طراحی، به استخراج پارامترهای مداری مورد نیاز از جمله ماتریس اندوکتانس و ولتاژ القایی پرداخته می‌شود.

۳-۲- مشخصات نامی موتورهای مورد طراحی و محدودیت‌های موجود

توان ماشین‌های چند لایه معمولاً کسری از مگاوات تا چند مگاوات می‌باشد. ولتاژ تغذیه ماشین‌های با چنین توانی معمولاً در محدوده کیلوولت و بالاتر می‌باشد اما در ماشین مورد طراحی این فصل ولتاژ تغذیه در دسترس بسیار پایین در نظر گرفته می‌شود. بنابراین به دلیل محدودیت‌های طراحی بخصوص به لحاظ تعداد دور سیم‌پیچی و محدودیت اندازه قطر خارجی، ماشین مورد نظر با این سطح توان و ولتاژ نمی‌تواند به صورت یک لایه طراحی شود. با چنین طراحی، تعداد دور سیم-پیچی بر قطب بر فاز به صورت عدد قابل قبولی بدست می‌آید. از طرفی دیگر با چند لایه در نظر گرفتن ماشین حجم آهن و مس ماشین ممکن است تا حدودی افزایش و چگالی توان مقداری کاهش یابد [۵]. به هر حال محدودیت سطوح ولتاژ پایین باعث می‌شود که طراحی ماشین چند مگاوات به صورت چند لایه طراحی شود. در حقیقت هر لایه را به لحاظ تحلیلی می‌توان یک موتور جداگانه با مشخصات دقیقاً یکسان با موتورهای لایه‌های دیگر دانست. از سوی دیگر، همانطور که قبلاً نیز بیان شد اهداف دیگر مثلاً دستیابی به راندمان و شاخصه‌های عملکردی بهتر در شرایط بار و سرعت نامی و در شرایط کسری از بار یا کسری از سرعت نامی نیز با طرح‌های کسکید راحت‌تر میسر می‌گردد. ضمن اینکه در طرح چند لایه قابلیت اطمینان بالاتر و امکان تعمیر و نگهداری راحت‌تر می‌باشد.

بدین منظور در این فصل به طراحی لایه‌های موتور چند لایه با سطح توان ۱۰۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ کیلووات پرداخته می‌شود که سایر مشخصات نامی اصلی آن‌ها مانند یکدیگر است. از مشخصات اصلی که برخی از آن‌ها معمولاً توسط کارفرما مشخص می‌شود می‌توان به مواردی مانند ولتاژ مؤثر فاز، سرعت موتور، فرکانس و تعداد فاز اشاره نمود. این پارامترها و برخی پارامترهای دیگر که در جدول ۳-۱ ارائه شده است در طراحی سه ماشین مورد نظر یکسان می‌باشد.

برخی از پارامترهای اختیاری طراحی نیز - که در فصل قبل در مورد چگونگی انتخاب آن‌ها

توضیح داده شد- در سه طراحی یکسان انتخاب شده است که در جدول ۳-۲ ارائه شده است.

جدول ۳-۱- مشخصات نامی داده شده برای ماشین‌های مورد طراحی

پارامترهای طراحی ورودی			
ردیف	پارامتر	واحد	مقدار
۱	توان خروجی نامی موتور	[kW]	۱۰۰، ۲۵۰ و ۵۰۰
۲	تعداد فازها	-	۳
۳	ولتاژ موثر فاز	[V]	۷۴/۲۵
۴	فرکانس	[Hz]	۵۵
۵	سرعت نامی موتور	[rpm]	۳۰۰
۶	اتصال موتور	ستاره Y	

جدول ۳-۲- پارامترهای اختیاری انتخاب شده برای ماشین‌های مورد طراحی

پارامترهای ماشین			
ردیف	پارامتر	واحد	مقدار
۱	تعداد زوج قطب‌ها	p	-
۲	بارگذاری الکتریکی کل	A	[A/m] ۶۰۰۰۰
۳	چگالی جریان	J	[A/mm ²] ۱۰
۴	تعداد مسیرهای موازی جریان	a_p	-
۵	ضریب شکل موج توان الکتریکی	K_p	-
۶	ضریب شکل موج جریان	K_i	-
۷	ضریب نیروی محرکه الکتریکی	K_e	$\frac{\pi^2}{2}$
۸	ضریب پر شوندگی مس	K_{cu}	-
۹	ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی آهنربای دائم (NdFeB)	μ_{rPM}	-
۱۰	چگالی شار پس ماند آهنربای دائم (NdFeB)	B_r	[T] ۱/۴
۱۱	فاصله هوایی	g	[m] ۰/۰۰۲

۱/۷۵	[T]	B_{cr}	دامنه چگالی شار هسته روتور	۱۲
۱/۵۲	[T]	B_{cs}	دامنه چگالی شار هسته استاتور	۱۳
۰/۹۵	-	η	راندمان	۱۴
۱	[mm]	d_{str}	قطر رشته هادی	۱۵

۳-۳- ماشین ۵۰۰ کیلو وات

۳-۳-۱- طراحی

در اولین طراحی این فصل ماشین ۵۰۰ کیلو وات با مشخصات نامی داده شده در جدول ۳-۱ و جدول ۳-۲ با کمک الگوریتم طراحی و برنامه تهیه شده مورد طراحی قرار می‌گیرد. نتیجه این طراحی و پارامترهای محاسبه شده در جدول ۳-۳ ارائه شده است. در این جدول پارامترهایی مانند نسبت قطر داخلی به قطر خارجی و نسبت قوس قطب به گام قطب بر اساس حداکثر کردن چگالی توان بصورت بهینه انتخاب شده است و ضرایب ناشی و شکستگی شار و چگالی شار در فاصله هوایی با استفاده از روابط تحلیلی مدل مغناطیسی ماشین تا حد زیادی دقیق‌ترین انتخاب می‌باشند. پارامترهای ابعاد ماشین و سیم‌پیچی آن نیز در این جدول ارائه شده است.

جدول ۳-۳- پارامترهای ابعادی و محاسبه شده توسط الگوریتم طراحی

پارامترهای ماشین			
ردیف	پارامتر	واحد	مقدار
۱	چگالی شار فاصله هوایی	B_{avg}	۰/۴۳۶ [T]
۲	نسبت قطر داخلی به قطر خارجی	λ	۰/۶
۳	نسبت قوس قطب به گام قطب	α_i	۰/۶۵
۴	ضریب نشت شار	K_d	۰/۹۲ -
۵	ضریب شکستگی شار	K_f	۰/۸۶ -
۶	قطر خارجی	D_o	۱/۱۲۷ [m]
۷	قطر داخلی	D_i	۰/۶۷۶ [m]
۸	قطر متوسط فاصله هوایی	D_g	۰/۹۰۲ [m]
۹	طول محوری هسته استاتور	L_{cs}	۰/۰۳۷ [m]
۱۰	ضخامت شعاعی سیم پیچی انتهایی درون قطر داخلی	W_{cui}	۰/۰۱۹۴ [m]
۱۱	ضخامت شعاعی سیم پیچی انتهایی ورای قطر خارجی	W_{cuo}	۰/۰۱۱۸ [m]
۱۲	ضخامت محوری سیم پیچی در فاصله هوایی	L_w	۰/۰۱۵۶ [m]
۱۳	طول محوری استاتور	L_s	۰/۰۶۸۳ [m]
۱۴	طول محوری هسته روتور	L_{cr}	۰/۰۱۸۵ [m]
۱۵	طول محوری آهنربای دائم	L_{PM}	۰/۰۱۶ [m]
۱۶	طول محوری روتور	L_r	۰/۰۳۴۶ [m]
۱۷	طول محوری ماشین	L_e	۰/۱۴۱۶ [m]
۱۸	عرض آهنربا در قطر متوسط	w_{PMg}	۰/۰۸۳۷ [m]
۱۹	تعداد دور سیم پیچی سری هر فاز	N_t	۱۲ turn
۲۰	جریان موثر سیم پیچی	I_{rms}	۲۳۶۳ [A]
۲۱	سطح مقطع هادی سیم پیچی	s_a	۲۱/۵ [mm ²]
۲۲	تعداد رشته های هادی	N_{str}	۲۸ -
۲۳	طول متوسط یک دور سیم پیچی	L_{lav}	۰/۵۸۸ [m]

۳-۱-۱-۱- محاسبه ماتریس اندوکتانس

برای محاسبه ماتریس اندوکتانس به این صورت عمل می‌شود که به سیم‌پیچ یک فاز جریانی اختصاص داده می‌شود و سایر فازها بدون جریان می‌باشند. همچنین تاثیر مغناطیس‌های دائم نیز باید صفر باشد. به این ترتیب شار در برگیرنده هر سیم پیچ توسط نرم افزار محاسبه می‌شود که با تقسیم این مقادیر بر جریان اعمالی به آن فاز، ماتریس اندوکتانس بدست می‌آید.

در فصل بعد در مورد روند محاسبه پارامترهای مداری بطور مفصل‌تر توضیح داده خواهد شد. با توجه به نتایج بدست آمده از آنالیز مغناطیسی ماشین مدل سازی شده و مقایسه این نتایج با نتایج بدست آمده از الگوریتم طراحی و روابط تحلیلی، مشخص می‌شود که طراحی انجام شده از دقت خوبی برخوردار است.

۳-۴- ماشین ۲۵۰ کیلو وات

۳-۴-۱- طراحی

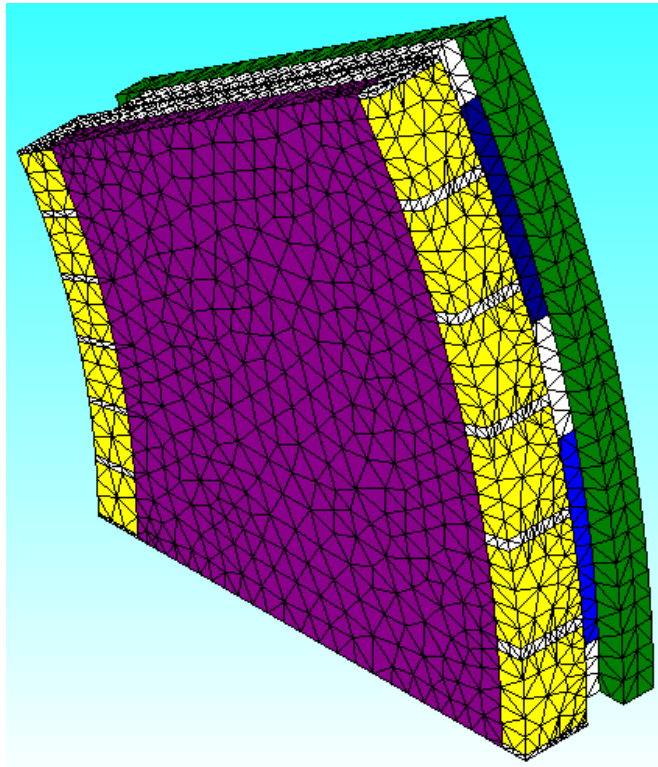
این ماشین نیز توسط الگوریتم طراحی تدوین شده و برنامه تهیه شده و مشخصات نامی و ورودی‌های جدول ۳-۱ و جدول ۳-۲ طراحی می‌شود که پارامترهای ابعادی و سایر پارامترهای محاسبه شده برای این ماشین در جدول ۳-۵ ارائه شده است.

جدول ۳-۴- پارامترهای ابعادی و محاسبه شده توسط الگوریتم طراحی

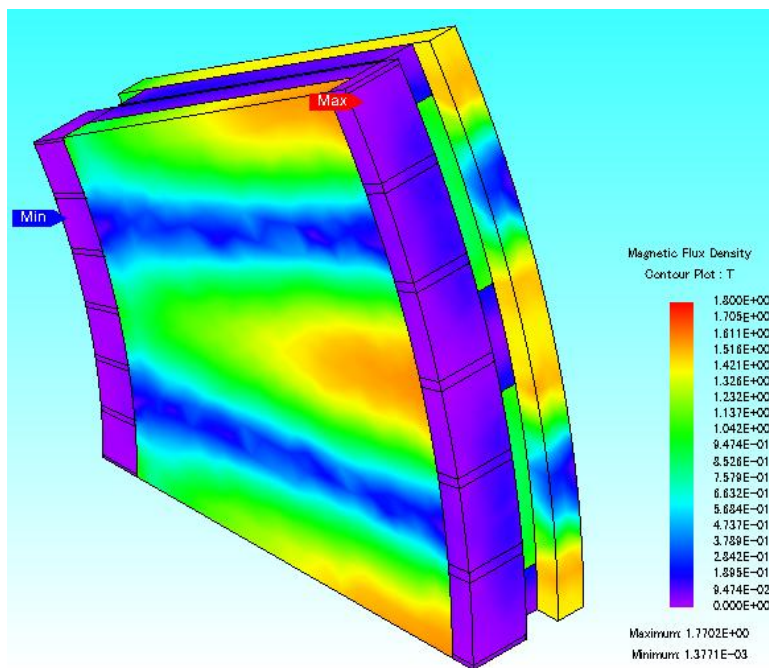
پارامترهای ماشین			
مقدار	واحد	پارامتر	ردیف
۰/۴۳۵	[T]	B_{avg}	۱ چگالی شار فاصله هوایی
۰/۶		λ	۲ نسبت قطر داخلی به قطر خارجی
۰/۶۵		α_i	۳ نسبت قوس قطب به گام قطب
۰/۸۹	-	K_d	۴ ضریب نشت شار
۰/۸۳	-	K_f	۵ ضریب شکستگی شار
۰/۸۹۷	[m]	D_o	۶ قطر خارجی
۰/۵۳۸	[m]	D_i	۷ قطر داخلی
۰/۷۱۷	[m]	D_g	۸ قطر متوسط فاصله هوایی
۰/۰۲۹	[m]	L_{cs}	۹ طول محوری هسته استاتور
۰/۰۱۹۳	[m]	W_{cui}	۱۰ ضخامت شعاعی سیم‌پیچی انتهایی درون قطر داخلی
۰/۰۱۱۸	[m]	W_{cuo}	۱۱ ضخامت شعاعی سیم‌پیچی انتهایی ورای قطر خارجی
۰/۰۱۵۶	[m]	L_w	۱۲ ضخامت محوری سیم‌پیچی در فاصله هوایی
۰/۰۶۰۴	[m]	L_s	۱۳ طول محوری استاتور
۰/۰۱۴۶	[m]	L_{cr}	۱۴ طول محوری هسته روتور
۰/۰۱۶	[m]	L_{PM}	۱۵ طول محوری آهنربای دائم
۰/۰۳۰۶	[m]	L_r	۱۶ طول محوری روتور
۰/۱۲۶	[m]	L_e	۱۷ طول محوری ماشین
۰/۰۶۶۶	[m]	w_{PMg}	۱۸ عرض آهنربا در قطر متوسط
۲۰	turn	N_t	۱۹ تعداد دور سیم‌پیچی سری هر فاز
۱۱۸۱	[A]	I_{rms}	۲۰ جریان موثر سیم‌پیچی
۱۰/۷	[mm ²]	s_a	۲۱ سطح مقطع هادی سیم‌پیچی
۱۴	-	N_{str}	۲۲ تعداد رشته‌های هادی
۰/۴۸	[m]	L_{1av}	۲۳ طول متوسط یک دور سیم‌پیچی

۳-۴-۲- مدل سازی

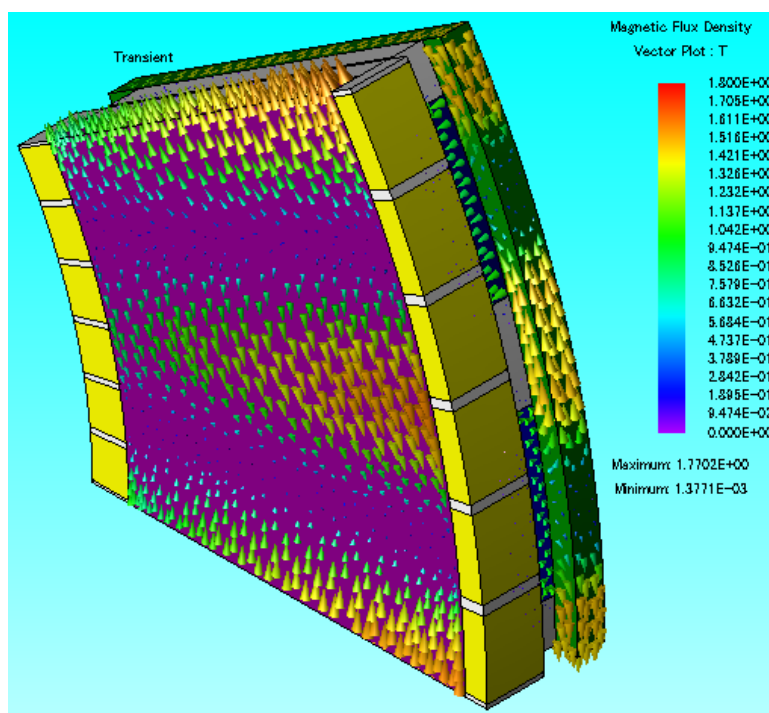
مدل سازی این ماشین نیز مانند روندی که برای ماشین ۵۰۰ کیلو وات توضیح داده شد در نرم افزار اجزاء محدود صورت گرفته است. برخی از نتایج این شبیه سازی از جمله مش بندی، توزیع چگالی شار میدان مغناطیسی بصورت طیف رنگی و برداری و همچنین ولتاژ القایی آن به ترتیب در شکل ۳-۱ تا شکل ۳-۴ نمایش داده شده است. با توجه به این شکل ها و با مقایسه آنها با مقادیر بدست آمده از الگوریتم طراحی، صحت طرح مشخص می شود.



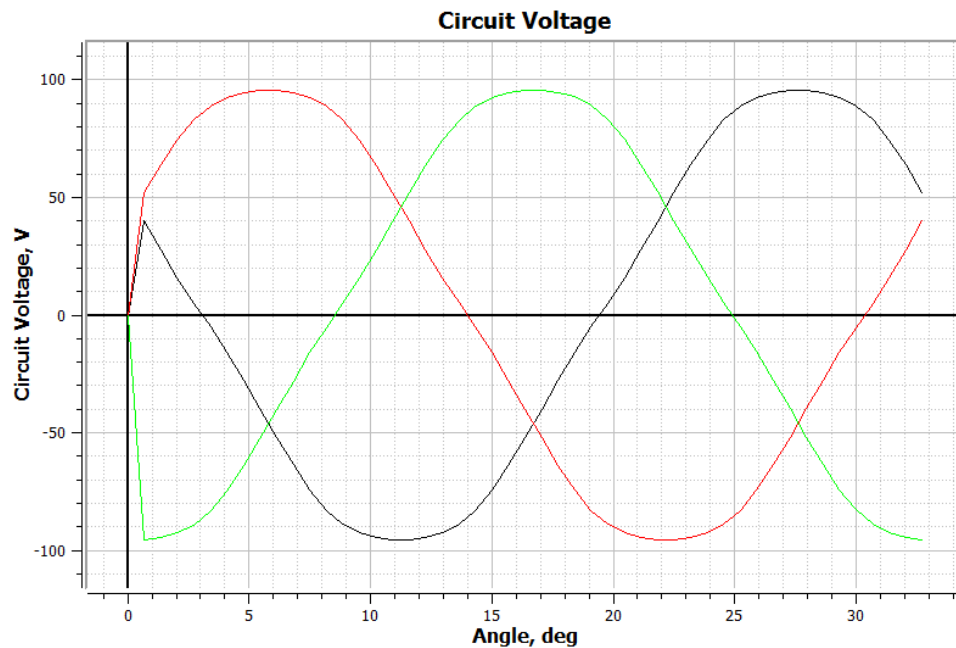
شکل ۳-۱- مش بندی انجام شده روی یک جفت قطب از موتور مورد بررسی



شکل ۳-۲- نمایش توزیع چگالی شار بصورت نقشه رنگی در حالت مدار باز



شکل ۳-۳- توزیع برداری چگالی شار موتور در حالت مدار باز



شکل ۳-۴- ولتاژ القایی ناشی از مغناطیس‌های دائم در سیم‌پیچ‌های سه فاز ماشین

۳-۵- ماشین ۱۰۰ کیلو وات

۳-۵-۱- طراحی

این ماشین نیز توسط الگوریتم طراحی تدوین شده و برنامه تهیه شده و مشخصات نامی و ورودی‌های جدول ۳-۱ و جدول ۳-۲ طراحی می‌شود که پارامترهای ابعادی و سایر پارامترهای محاسبه شده برای این ماشین در جدول ۳-۶ ارائه شده است. همچنین مدلسازی این ماشین نیز مانند ماشین‌های دیگر انجام شده است که برای جلوگیری از تکرار نتایج در این قسمت ارائه نشده است.

جدول ۳-۵- پارامترهای ابعادی و محاسبه شده توسط الگوریتم طراحی

پارامترهای ماشین			
مقدار	واحد	پارامتر	ردیف
۰/۴۲۹	[T]	B_{avg}	۱ چگالی شار فاصله هوایی
۰/۶		λ	۲ نسبت قطر داخلی به قطر خارجی
۰/۶۵		α_i	۳ نسبت قوس قطب به گام قطب
۰/۸۴	-	K_d	۴ ضریب نشت شار
۰/۷۹	-	K_f	۵ ضریب شکستگی شار
۰/۶۶۵	[m]	D_o	۶ قطر خارجی
۰/۳۹۹	[m]	D_i	۷ قطر داخلی
۰/۵۳۲	[m]	D_g	۸ قطر متوسط فاصله هوایی
۰/۰۲۱	[m]	L_{cs}	۹ طول محوری هسته استاتور
۰/۰۱۹۱	[m]	W_{cui}	۱۰ ضخامت شعاعی سیم‌پیچی انتهایی درون قطر داخلی
۰/۰۱۱۸	[m]	W_{cuo}	۱۱ ضخامت شعاعی سیم‌پیچی انتهایی ورای قطر خارجی
۰/۰۱۵۴	[m]	L_w	۱۲ ضخامت محوری سیم‌پیچی در فاصله هوایی
۰/۰۵۲۱	[m]	L_s	۱۳ طول محوری استاتور
۰/۰۱۰۶	[m]	L_{cr}	۱۴ طول محوری هسته روتور
۰/۰۱۵۹	[m]	L_{PM}	۱۵ طول محوری آهنربای دائم
۰/۰۲۶۵	[m]	L_r	۱۶ طول محوری روتور
۰/۱۰۹	[m]	L_e	۱۷ طول محوری ماشین
۰/۰۴۹۴	[m]	w_{PMg}	۱۸ عرض آهنربا در قطر متوسط
۳۶	turn	N_t	۱۹ تعداد دور سیم‌پیچی سری هر فاز
۴۷۳	[A]	I_{rms}	۲۰ جریان موثر سیم‌پیچی
۴/۳	[mm ²]	s_a	۲۱ سطح مقطع هادی سیم‌پیچی
۶	-	N_{str}	۲۲ تعداد رشته‌های هادی
۰/۳۷	[m]	L_{1av}	۲۳ طول متوسط یک دور سیم‌پیچی

فصل چهارم

تعیین تعداد لایه‌های مناسب برای

سیستم چند لایه

همانطور که در فصل‌های گذشته نیز به آن اشاره شد یکی از مهم‌ترین کاربردهای سیستم‌های چند لایه، استفاده از آنها در زیردریایی‌های دیزل الکتریک می‌باشد. زیردریایی‌های نوع دیزل الکتریک متداول به عنوان یک بخش اساسی از استراتژی دفاعی بیشتر نیروهای دریایی در بسیاری از کشورها از دو منبع انرژی بهره می‌گیرند: ۱- دیزل ژنراتور برای شارژ بانک عظیم باتری‌ها و ذخیره سازی انرژی در ساحل و یا سطح آب قبل از شروع ماموریت زیردریایی در زیر آب ۲- باتری‌ها برای تغذیه موتور پیشران و مصارف داخلی هنگام ماموریت و عملکرد زیردریایی در زیر آب [۲۴].

یک سیستم پیشران از نوع دیزل الکتریک اصولاً شامل چهار بخش موتور پیشران، سیستم درایو، باتری‌ها و دیزل ژنراتور می‌باشد [۲۵]. در این نوع ساختار، بدلیل دشارژ باتری‌ها لازم است که زیردریایی هر چند گاهی به سطح آب آمده و با عمل نفس‌گیری، موتورهای دیزل خود را برای شارژ مجدد باتری‌ها بکار گیرد. سیستم پیشران زیردریایی یکی از فاکتورهای مهم تعیین اندازه زیردریایی است. به عنوان مثال حدود ۳۵ درصد وزن و ۵۰ درصد حجم کل یک زیردریایی به تولید و ذخیره انرژی در زیردریایی اختصاص می‌یابد [۲۶]. موضوعات بسیار مهم در ارتباط با سیستم پیشران الکتریکی زیردریایی‌ها از قبیل بهبود بازده انرژی، دوره زمانی طولانی نیاز به شارژ مجدد باتری‌ها و امکان افزایش زمان ماموریت و ماندگاری بیشتر زیردریایی در زیر آب و راحتی تعمیر و نگهداری، در سال‌های اخیر بطور قابل ملاحظه‌ای مورد توجه قرار گرفته اند [۲۷].

در زیردریایی‌ها داشتن سرعت بالا موسوم به سرعت فرار از اهمیت قابل توجهی در مواقع فرار از دسترس دشمن و یا نزدیک شدن سریع به هدف، برخوردار است. اما عملکرد در این سرعت مستلزم مصرف انرژی بیشتر و در نتیجه تخلیه سریع باتری‌ها می‌باشد. به همین دلیل زیردریایی‌ها در شرایط عادی با سرعت‌های کمتر موسوم به سرعت کروز حرکت می‌کنند [۲۶]. سیستم رانش زیر دریایی باید

در هر دو محدوده سرعت‌های فرار و کروز بیشترین بازده را داشته باشد تا مدت زمانی که زیردریایی می‌تواند زیر آب بماند افزایش یابد.

موتورهای مغناطیس دائم با اندازه کوچک، وزن کم، نویز کم، نگهداری آسان و بویژه بازده بالا در سرعت پایین به عنوان موتورهای الکتریکی پیشران زیردریایی‌ها بسیار مناسب هستند [۲۸]. از بین این ماشین‌ها، موتور شار محوری آهنربا دائم (*AFPM*) چند لایه این امکان را ایجاد می‌کند که در سرعت‌های مختلف با تغذیه مناسب لایه‌ها، بیشترین بازده در سرعت‌های مختلف فراهم شود. همچنین این ماشین‌ها به علت شکل دیسکی روتور و استاتور، ساختار فشرده‌تر و نیاز به فضای کمتر نسبت به ماشین‌های شار شعاعی، چگالی توان بالاتری دارند [۱]. تاکید می‌شود به علت امکان ساخت به صورت چند لایه و تغذیه قابل برنامه‌ریزی لایه‌ها، این موتورها بطور خاص برای کاربردهای سرعت و توان متغیر بسیار مناسب می‌باشند. بطور خلاصه از مسائل مهم در طراحی موتور پیشران یک زیر دریایی و تعداد لایه‌های آن، مصرف بهینه انرژی به منظور افزایش مدت زمان ماندگاری زیردریایی در زیر آب می‌باشد. هدف مصرف انرژی بهینه نیز، با طراحی مناسب یک موتور چند لایه و تغذیه لایه-های آن در زمان مناسب توسط یک سیستم درایو اینورتری می‌تواند تحقق یابد.

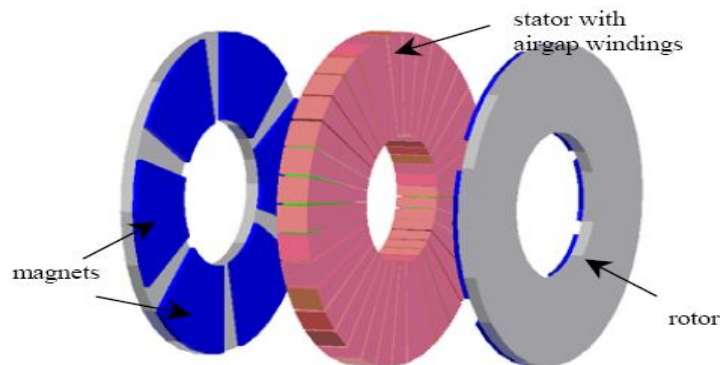
در فصل اول انواع توپولوژی‌ها و ساختارهای مختلف ماشین‌های *AFPM* به همراه ویژگی‌ها و مزایای مربوط به هر ساختار معرفی و با توجه به پارامترهای مهم در سیستم جلو برندگی زیر دریایی، ساختار *TORUS* برای ماشین *AFPM* انتخاب گردید. پس از معرفی الگوریتم طراحی در فصل دوم و مدل اجزاء محدود در فصل سوم به طراحی سه موتور یک لایه با توان‌های ۵۰۰، ۲۵۰ و ۱۰۰ کیلووات به صورت سه فاز با سطح ولتاژ $V_{ph} = 74.23$ [V] و فرکانس نامی $f = 55$ [Hz] پرداخته شد. همچنین در فصل سوم ماشین‌های طراحی شده در نرم افزار *JMAG-Designer* شبیه سازی شدند و الگوریتم طراحی مورد ارزیابی و تایید قرار گرفت. همه این موتورها در کاربردهای رانش زیر سطحی با

توان بالاتر می‌توانند به صورت چند لایه بکار گرفته شوند. لازم به ذکر است که ماشین شار محوری یک لایه با طول محوری بسیار کوچک طراحی شده است تا به آسانی به صورت چند لایه و با تغذیه ترکیبی اختیاری لایه‌ها برای فراهم نمودن توان از چند کیلووات تا چند مگاوات با بهره‌ی بالا بکار گرفته شوند. به هر حال به منظور بررسی عملکرد و صحت از طراحی‌های صورت گرفته، در این فصل مدلسازی و بررسی رفتار دینامیکی با تمرکز بر روی یکی از موتورها به عنوان مثال تحت شرایط مختلف عملکرد در حالت اتصال مستقیم به شبکه ارائه می‌شود.

در هنگام تدوین الگوریتم طراحی و ارائه طراحی اولیه، برآورد دقیق مقدار امپدانس سنکرون بر فاز ماشین و اعمال آن در الگوریتم طراحی کار آسانی نیست. در واقع می‌توان گفت اثر عکس‌العمل آرمیچر در طراحی ماشین و بررسی تاثیر آن بسیار حائز اهمیت است. چه بسا در بسیاری از موارد، ماشین طراحی شده به دلیل مقدار واقعی بزرگتر عکس‌العمل آرمیچر و راکتانس سنکرون، حتی توانایی تامین توان و بازده مطلوب پیش‌بینی شده را ندارد که این امر سبب عدم اطمینان به طرح اولیه می‌گردد. به این دلیل و به دلایلی دیگر اکیدا لازم است بعد از طی مراحل طراحی و قبل از اقدام به ساخت، برای اطمینان از طرح ارائه شده، مدلسازی دینامیکی گذرای ماشین انجام گیرد و رفتار حالت گذرای و حالت دائمی آن در شرایط عملکرد مختلف مورد بررسی و ارزیابی قرار گیرد. برای مدلسازی ماشین نیاز است تا شارهای پیوندی و یا ولتاژهای القایی توسط PM ها در سیم‌پیچی فازهای آرمیچر، اندوکتانس‌های خودی و متقابل سیم‌پیچی‌های فازها و مقدار تخمینی بهینه راکتانس سنکرون در فرکانس نامی محاسبه شوند. با استفاده از مدلسازی ماشین به روش اجزاء محدود پارامترهای فوق حاصل می‌گردد. در این مرحله برای اطمینان اولیه از صحت طرح‌های ارائه شده، مقادیر پیونیت این پارامترها با هم و با پارامترهای چند نمونه از ماشین‌های ساخته شده توسط مراکز و شرکت‌های معتبر نیز مورد مقایسه قرار می‌گیرند. سپس در این فصل با استفاده از پارامترهای

بدست آمده از تحلیل FE ، نحوه مدل‌سازی موتورهای طراحی شده سه فاز دولایه و یک لایه ۲۴/۲۴ ولتی برای نمونه در فضای $SIMULINK$ نرم افزار $MATLAB$ و نتایج حاصل از شبیه سازی‌ها تحت شرایط عملکردی مختلف، مورد بررسی و ارزیابی دقیق قرار می‌گیرد. در این مرحله در صورت فراهم نشدن نسبی خواسته‌ها، طراح می‌تواند طرح ارائه شده را بازبینی و اصلاح نماید.

در پایان فصل نیز نتایج حاصل از شبیه سازی برای حالت‌های مختلف ماشین با تعداد لایه‌ها و توان‌های مختلف که در فصل‌های قبل در مورد آن توضیح داده شد، بصورت جداولی ارائه خواهد شد و با مقایسه این نتایج تعداد لایه مناسب برای هر توان مشخص می‌شود.



شکل ۴-۱- پیکر بندی یک لایه از موتور شار محوری نوع $TORUS$ بدون شیار با آهنربای دائم اتصال سطحی

($TORUS-NS$)، [۶]

۲-۴- محاسبه پارامترهای مدارهای ماشین

۱-۲-۴ معادلات ولتاژ ماشین AFPM

معادلات ولتاژ در یک ماشین سه فاز سنکرون با قطبهای دائم را می توان به صورت زیر نشان

داد:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \lambda_{apm} \\ \lambda_{bpm} \\ \lambda_{cpm} \end{bmatrix} \quad (۱-۴)$$

به هر حال معادلات ماشین چند فاز را بطور کلی می توان به صورت خلاصه زیر بیان کرد:

$$[V] = [R][I] + \frac{d}{dt}([L][I]) + \frac{d}{dt}[\lambda_{pm}] \quad (۲-۴)$$

معادلات ولتاژ هر فاز ماشین شامل سه بخش است؛ بخش اول افت ولتاژ بر روی مقاومت آن فاز

آرمیچر، بخش دوم افت ولتاژ بر روی اندوکتانس خودی سیم پیچی آن فاز و افت ولتاژها بر روی

اندوکتانسهای متقابل بین سیم پیچی آن فاز و سیم پیچی های فازهای دیگر آرمیچر و بخش سوم ولتاژ

القایی حاصل از PMها در آن فاز [۲۹].

با استفاده از اصل جمع آثار ابتدا با در نظر گرفتن اثر جریان یک فاز و بدون تاثیر آهنرباهای

دائم ماتریس L و سپس با در نظر گرفتن اثر آهنرباهای دائم و صفر در نظر گرفتن جریانها ماتریس

λ_{pm} بدست می آید [۴].

۲-۲-۴ مقاومت در هر فاز ماشین AFPM

مقاومت سیم پیچی هر فاز استاتور از رابطه زیر بدست می آید [۴]:

$$R_s = \frac{N_t l_{av} \rho_{cu,\theta}}{a_p a_w s_a} \quad (3-4)$$

که در آن l_{av} طول متوسط یک دور سیم پیچی پیچیده شده به دور هسته استاتور، a_p تعداد مسی‌های موازی جریان، a_w تعداد هادی‌های موازی، s_a سطح مقطع یک رشته هادی و $\rho_{cu,\theta}$ مقاومت ویژه مس در دمای θ می‌باشد. مقاومت ویژه مس در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد $\rho_{cu,20^\circ C} = 1.678 \times 10^{-8} [\Omega.m]$ و مقدار آن در دمای θ از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\rho_{cu,\theta} = \rho_{cu,20^\circ C} (1 + \alpha(\theta - 20^\circ C)) \quad (4-4)$$

که در رابطه بالا α ثابت دما می‌باشد و مقدار آن برابر $\alpha = 0.0039$ بر هر $^\circ C$ می‌باشد. l_{av} طول متوسط یک دور سیم پیچی است که مقدار آن به عنوان مثال برای ماشین ۵۰۰ کیلو وات با $l_{av} = 0.588$ [m] می‌باشد. مقاومت سیم پیچی یک فاز از هر لایه این ماشین نیز در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد برابر است با:

$$R_s = \frac{N_s l_{av} \rho_{cu,60^\circ}}{a_p N_{str} s_a} = \frac{12 \times 0.588 \times 1.94 \times 10^{-8}}{11 \times 28 \times 0.785 \times 10^{-6}} = 0.000566 [\Omega] \quad (5-4)$$

مقاومت سیم پیچی یک فاز از هر لایه برای هر سه ماشین در جدول ۴-۱ ارائه شده‌اند.

جدول ۴-۱ - طول متوسط یک دور سیم پیچی به همراه مقاومت هر فاز یک لایه از موتورهای طراحی شده

	موتور ۵۰۰ کیلو وات	موتور ۲۵۰ کیلو وات	موتور ۱۰۰ کیلو وات
طول متوسط یک دور سیم پیچی بر حسب متر = l_{av}	۰/۵۸۸	۰/۴۸	۰/۳۷
مقاومت هر فاز از یک لایه بر حسب اهم = R_s	۰/۰۰۰۵۶۶	۰/۰۰۱۵۴	۰/۰۰۵

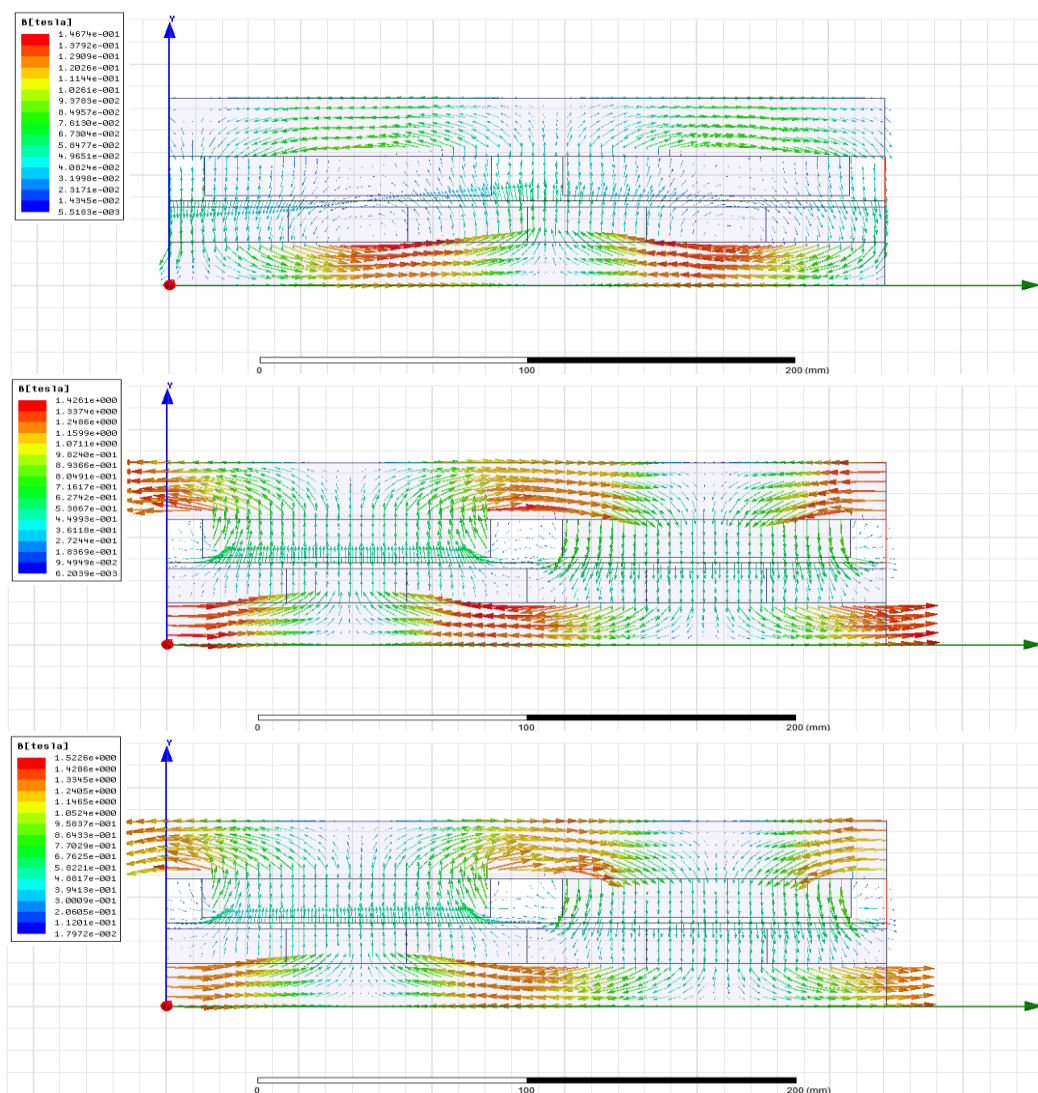
۴-۲-۳- عکس العمل آرمیچر و اندوکتانس های خودی و متقابل سیم پیچ های ماشین

هنگامی که روتور یک ماشین سنکرون مغناطیس دائم چند فاز با سرعت سنکرون می چرخد، در سیم پیچ های آرمیچر آن ولتاژی توسط PM ها القاء ($Back\ EMF$) می شود. حال اگر ترمینال های سیم پیچی های آرمیچر ماشین سنکرون به یک منبع ولتاژ چند فاز وصل شود در حالت عملکرد موتوری و در حالت دائمی جریانی از منبع کشیده می شود. این جریان باعث بوجود آمدن یک میدان مغناطیسی دیگر می شود که مطابق شکل ۴-۲، شکل میدان مغناطیسی اصلی روتور را تغییر می دهد. این اثر نیروی محرکه مغناطیسی آرمیچر بر روی توزیع فضایی شار میدان اصلی در فاصله هوایی، عکس العمل آرمیچر نامیده می شود و آن را معمولاً با یک المان سلفی (یا راکتانس سنکرون) مدل می کنند. نیروی محرکه مغناطیسی آرمیچر معمولاً دو اثر نامطلوب بر شار میدان اصلی می گذارد که عبارتند از:

(۱) کاهش و یا افزایش شار میدان اصلی

(۲) ایجاد اعوجاج در شکل موج شار میدان اصلی در فاصله هوایی [۳۰]

شکل ۴-۲-الف شار ایجاد شده در اثر عبور جریان از سیم پیچ های آرمیچر بدون در نظر گرفتن اثر میدان آهنرباهای دائم را برای ماشین ۵۰۰ کیلو واتی نشان می دهد. شکل ۴-۲-ب شار اصلی ایجاد شده توسط آهنرباهای دائم روتور در حالتی که جریان سیم پیچ های آرمیچر این ماشین صفر است را نشان می دهد. وقتی جریان در سیم پیچی های آرمیچر عبور می کند و اثر آهنرباهای دائم نیز در نظر گرفته شود، شار منتهی از جمع دو شار شکل ۴-۲-الف و ب بدست می آید که در شکل ۴-۲-ج مشاهده می شود.



شکل ۴-۲- اثر عکس العمل آرمیچر در ماشین سنکرون (الف) شار آرمیچر (ب) شار اصلی (ج) منتجه شار اصلی و

آرمیچر

در اینجا به محاسبه‌ی اندوکتانس‌های خودی و متقابل سیم‌پیچ‌های ماشین‌های طراحی شده می‌پردازیم. در یک سیستم الکترومغناطیسی خطی، اندوکتانس خودی هر سیم‌پیچ عبارت است از نسبت شار پیوندی سیم‌پیچ به جریانی که از همان سیم‌پیچ عبور می‌کند، در حالی که جریان سیم‌پیچ‌های دیگر صفر است. اندوکتانس متقابل دو سیم‌پیچ عبارت است از نسبت شار پیوندی یکی از سیم‌پیچ‌ها به جریانی که از سیم‌پیچ دوم عبور می‌کند، در شرایطی که جریان سیم‌پیچ‌های دیگر از

جمله همان سیم‌پیچی که شار پیوندی برای آن تعیین می‌شود، صفر باشد [۳۰].

در فصل قبل نحوه مدلسازی ماشین‌ها در نرم افزار اجزاء محدود *JMAG-Designer* بطور کامل شرح داده شد. با استفاده از آن شبیه سازی و با حذف اثر *PM* ها و اعمال جریان به سیم‌پیچی یکی از فازها در یک لایه، اندوکتانس خودی و اندوکتانس‌های متقابل بین آن سیم‌پیچی و سیم‌پیچی‌های دیگر آن لایه بدست می‌آیند. ماتریس اندوکتانس یک لایه سه فاز ۵۰۰ کیلوواتی ماشین ۲۴/۲۴ ولتی به صورت زیر بدست می‌آید:

$$L = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.026 & -0.0094 & -0.0094 \\ -0.0094 & 0.026 & -0.0094 \\ -0.0094 & -0.0094 & 0.026 \end{bmatrix} [mH] \quad (۶-۴)$$

به روش مشابه ماتریس‌های اندوکتانس دو موتور دیگر نیز بدست می‌آیند که در جدول ۴-۲ اندوکتانس‌های خودی و متقابل حاصل برای ماشین‌های طراحی شده ارائه شده است. از آنجایی که تراوایی مغناطیسی آهنربای دائم و هوا بسیار به هم نزدیک می‌باشند و همچنین به علت عدم وجود برجستگی در قسمت استاتور، اندوکتانس‌های ماشین‌ها تابعی از زاویه‌ی چرخش روتور نبوده و مستقل از موقعیت روتور می‌باشند. حال برای یافتن راکتانس سنکرون در هر فاز ماشین معادله‌ی افت پتانسیل بر روی اندوکتانس‌های خودی و متقابل در فاز *a* را می‌نویسیم. به عنوان مثال برای ماشین چند فاز داریم:

$$V_{xs} = L_{aa} \frac{di_a}{dt} + L_{ab} \frac{di_b}{dt} + L_{ac} \frac{di_c}{dt} + \dots \quad (۷-۴)$$

در صورتی که نقطه‌ی صفر اتصال فازها به زمین منبع تغذیه وصل نباشد خواهیم داشت:

$$i_a + i_b + i_c + \dots = 0 \quad (۸-۴)$$

از طرف دیگر داریم:

$$L_{ab} = L_{ac} = \dots \quad (9-4)$$

حال با تلفیق معادلات ۷-۴ تا ۹-۴ خواهیم داشت:

$$V_{xs} = (L_{aa} - L_{ab}) \frac{di_a}{dt} \quad (10-4)$$

در نتیجه راکتانس سنکرون فاز a از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$X_s = 2\pi f(L_{aa} - L_{ab}) \quad (11-4)$$

به عنوان مثال راکتانس سنکرون هر فاز از یک لایه ماشین سه فاز ۵۰۰ کیلو واتی برابر می‌شود

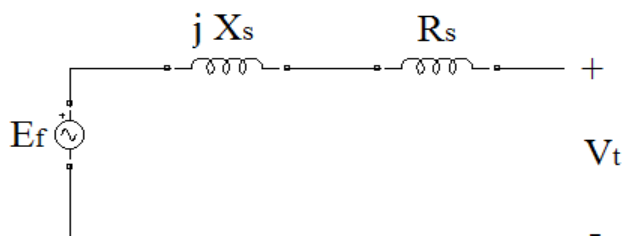
با:

$$X_s = 2\pi f(L_{aa} - L_{ab}) = 110\pi(0.026 + 0.0094) \times 10^{-3} = 0.0122 \Omega \quad (12-4)$$

راکتانس‌های سنکرون بر فاز برای یک لایه از ماشین‌های طراحی شده به روش مشابه بدست

آمده و در جدول ۴-۲ ارائه شده است. حال با توجه به معادلات بالا می‌توان مدار معادل حالت دائمی

هر فاز ماشین $AFPM$ را به صورت زیر در نظر گرفت:



شکل ۴-۳- مدار معادل ماشین $AFPM$ در هر فاز

در مدار معادل بالا E_f ولتاژ القایی توسط PM ها در سیم‌پیچی هر فاز ماشین، R_s مقاومت هر فاز سیم‌پیچی استاتور، X_s راکتانس سنکرون مربوط به هر فاز و V_t ولتاژ ترمینال ماشین سنکرون می‌باشد.

جدول ۴-۲- اندوکتانس‌های خودی و متقابل به همراه راکتانس سنکرون مربوط به هر فاز از یک لایه

	موتور ۵۰۰ کیلو وات	موتور ۲۵۰ کیلو وات	موتور ۱۰۰ کیلو وات
اندوکتانس خودی هر فاز از یک لایه بر حسب میلی هانری	۰/۰۲۶	۰/۰۵۴	۰/۱۳۶
اندوکتانس متقابل بین فازهای یک لایه بر حسب میلی هانری	-۰/۰۰۹۴	-۰/۰۱۹۳	-۰/۰۴۷
راکتانس سنکرون هر فاز هر لایه بر حسب اهم	۰/۰۱۲۲	۰/۰۲۵۳	۰/۰۶۳

۴-۲-۴- محاسبه ولتاژ القایی در هر فاز

در نرم افزار اجزاء محدود مورد استفاده با وارد کردن اطلاعات بصورت صحیح به نرم افزار از جمله چگونگی ترکیب شدن سری و موازی سیم‌پیچ‌ها و سایر شرایط مرزی و تقارنی موجود در مدلسازی صورت گرفته، می‌توان ولتاژ القایی ناشی از آهنرباها در سیم‌پیچ‌ها را در شرایطی که جریان آن‌ها صفر است بصورت نقطه به نقطه با توجه به تعداد گام‌هایی که انتخاب شده است، بدست آورد [۲۳]. در فصل قبل نمودارهای حاصل از شبیه سازی نمایش داده شد که در جدول ۴-۳ دامنه ولتاژ القایی برای ماشین‌های طراحی شده ارائه شده است.

جدول ۴-۳- ولتاژهای القایی در هر فاز ماشین‌های طراحی شده

	موتور ۵۰۰ کیلو وات	موتور ۲۵۰ کیلو وات	موتور ۱۰۰ کیلو وات
مقدار موثر ولتاژ القایی در هر فاز بر حسب ولت E_f	۹۱/۳	۹۵/۱	۹۸/۴

است. بطور خلاصه:

$E_f \cos \delta > V_t \rightarrow$ فوق تحریک

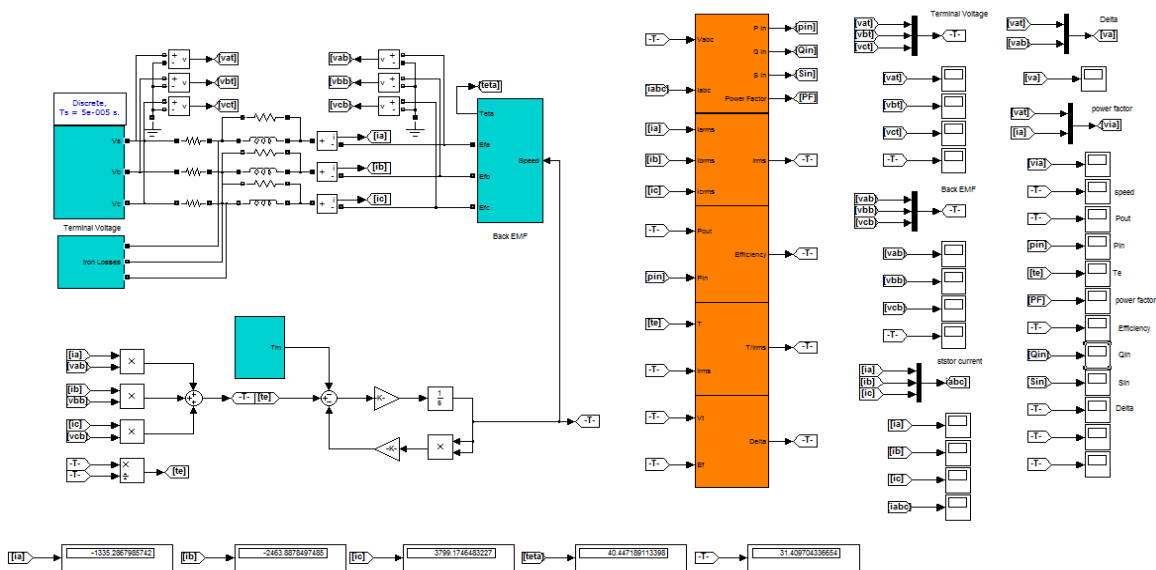
$E_f \cos \delta < V_t \rightarrow$ زیر تحریک

یک ماشین PM فوق تحریک، ضریب توان پیش فاز و مقدار آن در بار نامی بیش تر از نصف بار نامی است. در این حالت معمولا راندمان در بار نامی نسبت به راندمان در نصف بار نامی بیشتر می-باشد. نکته‌ای که قابل توجه می‌باشد این است که مقدار ضریب توان کوچک بدست آمده برای بار کم باعث کشیده شدن جریان زیاد در بارهای سبک می‌شود. علت این جریان زیاد کوچک بودن زاویه قدرت و $E_f \sin \delta$ می‌باشد. با توجه به اینکه به ازای توان خروجی مشخص، $I_a \cos \theta$ و $E_f \sin \delta$ نیز تقریبا مشخص می‌باشد، بنابراین ضریب توان کم و جریان پیش فاز زیاد در بارهای کم نتیجه بدیهی E_f بزرگ غیر قابل تنظیم می‌باشد. بررسی مقادیر پریونیت ارائه شده در **Error! Reference source not found.** نشان می‌دهد که هر سه موتور طراحی و بررسی شده در تمامی بارهای کمتر و یا مساوی با بار کامل در رژیم عملکردی فوق تحریک خواهند بود.

۳-۴- شبیه سازی دینامیکی موتور $AFPM$ در حالت عملکرد اتصال مستقیم به شبکه

در این بخش مدل دینامیکی موتور $AFPM$ طراحی شده، در فضای $SIMULINK$ نرم افزار $MATLAB$ شبیه سازی می‌شود. برای اختصار و پرهیز از اضافه گویی، مدلسازی‌ها و مشخصه‌های عملکردی مختلف ماشین ۵۰۰ کیلو واتی به عنوان نمونه‌ای از کارها و نتایج شبیه‌سازی‌ها در این بخش به تفصیل ارائه می‌شود. در حالت کلی مشخصه‌های حالت دائمی از اهمیت فوق‌العاده‌ای به لحاظ طول دوره عملکرد، بهره، نوسانات حالت دائمی سرعت، لرزش، حد پایداری حالت دائمی و ... برخوردار است. همچنین مشخصه‌های دینامیکی گذرای ماشین از قبیل تغییرات سرعت، توان لحظه-ای، گشتاور، ولتاژ و جریان در حین شرایط مختلف سویچینگ، تغییرات ولتاژ و فرکانس شبکه،

بارگذاری، بارزدایی و ... نیز حائز اهمیت هستند. هر دو این رژیم‌های عملکردی در حد حوصله و مجال این فصل مورد تحقیق و بررسی قرار می‌گیرند. به منظور بررسی عملکرد موتور چند لایه، در این قسمت شبیه سازی بر روی موتور *AFPM* دو لایه با توان نامی یک مگاوات صورت می‌گیرد. در این طرح، به منظور تامین توان در بارهای معادل با نصف بار نامی و یا کمتر از آن می‌توان از هر دو لایه یا تنها یک لایه استفاده نمود. بر اساس نتایج حاصل از شبیه سازی می‌توان ادعا کرد که بازده و ضریب قدرت موتور در بارهای معادل با نصف بار نامی و یا کمتر در صورتی که از یک لایه موتور برای تامین توان استفاده شود، بهبود می‌یابد. جداسازی هر لایه از منبع تغذیه و وصل مجدد آن به راحتی با یک کلید قدرت بطور دستی و یا خودکار در زمان‌های مقتضی بدون کمترین مسئله به لحاظ پایداری و دیگر مسائل الکتریکی و مکانیکی قابل انجام است. به این موضوع در فصل بعدی پرداخته خواهد شد. فعلا در این فصل عملکرد حالت دائمی و به دنبال آن رفتار حالت دینامیکی گذرای ماشین در حالت‌های بارگذاری و بارزدایی فرضی شبیه سازی می‌شوند و نتایج مورد بررسی قرار می‌گیرند. سپس شبیه‌سازی‌های حالت دائمی، بارگذاری و بارزدایی برای حالتی که فرکانس منبع تغذیه و نتیجتاً سرعت موتور به نصف سرعت نامی تنزل می‌یابد تکرار می‌شود. در پایان فصل نیز نتایج حاصل از شبیه سازی برای حالت‌های مختلف ماشین با تعداد لایه‌ها و توان‌های مختلف بصورت جداولی ارائه خواهد شد و با مقایسه این نتایج تعداد لایه مناسب برای هر توان مشخص می‌شود. شکل ۴-۴ شماتیک شبیه سازی موتور *AFPM* سه فاز طراحی شده را نشان می‌دهد.

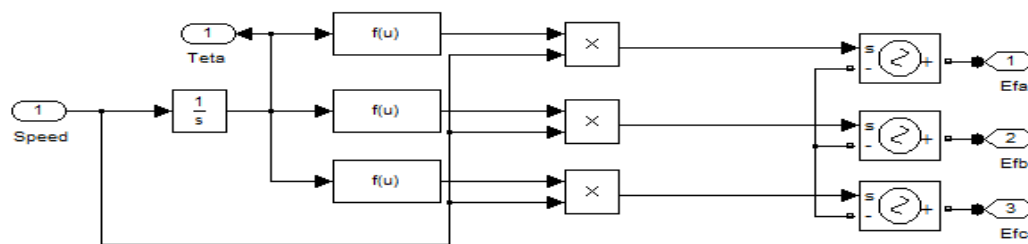


شکل ۴-۴- شماتیک شبیه سازی موتور سه فاز AFPM طراحی شده

در ابتدا به بررسی هر یک از بلوک‌های شبیه‌سازی پرداخته می‌شود و سپس نتایج شبیه‌سازی -ها نشان داده شده و مورد بررسی قرار می‌گیرند.

بلوک *Terminal Voltage* شامل منبع سه فاز با فرکانس 55 Hz است که به مدل اعمال می‌شود. بلوک *Iron Losses* تلفات آهن ماشین را مدل می‌کند. مدل دقیق تلفات آهن در رفتار دینامیکی گذرای ماشین تاثیر عمده‌ای ندارد بنابراین لازم نیست تلفات آهن در شبیه‌سازی‌های رفتار دینامیکی گذرای با وسواس و بسیار دقیق مدل شود.

بلوک‌های *Voltage and Current Measurement* برای اندازه‌گیری جریان‌ها و ولتاژهای فاز در مدار بکار گرفته شده‌اند. مقاومت هر فاز آرمیچر و اندوکتانس سنکرون هر فاز به صورت سری با منبع ولتاژ ورودی، پارامترهای ماشین سنکرون را مدل می‌کنند. بلوک *Back emf* که در شکل ۴-۵ نشان داده شده است مربوط به ولتاژهای القایی توسط PMها می‌باشند.



شکل ۴-۵- بلوک Back EMF در شکل ۴-۴

حاصلضرب لحظه‌ای ولتاژ القایی و جریان هر فاز، توان لحظه‌ایی خروجی هر فاز را نشان می‌دهد و با جمع توان فازها در هر لحظه، توان لحظه‌ای کل خروجی بدست می‌آید. توان لحظه‌ای کل خروجی را می‌توان توسط بلوک *Instantaneous Power* مشاهده کرد. مقدار گشتاور الکترومغناطیسی تولیدی موتور با تقسیم توان لحظه‌ای کل بر سرعت مکانیکی بدست می‌آید. گشتاور اصطکاکی متناسب با مجذور سرعت مدل می‌شود و در قسمت نهایی مدار شکل ۴-۴ با استفاده از معادلات دینامیکی زیر منظور شده است:

$$T_e - T_m = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m^2 \quad (24-4)$$

$$\omega_m = \frac{1}{J} \int (T_e - T_m - B\omega_m^2) dt \quad (25-4)$$

که در این معادلات، T_e گشتاور الکترومغناطیسی، T_m گشتاور مقاوم بار، J ممان اینرسی کل بخش گردان، ω_m سرعت مکانیکی روتور بر حسب رادیان بر ثانیه و B ضریب گشتاور اصطکاکی متناسب با مجذور سرعت می‌باشد. به منظور محاسبه ممان اینرسی هر کدام از دیسک‌های روتور و آهنرباهای دائم آن از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$J = 2\left(\frac{1}{2}mr_1^2\right) \quad (26-4)$$

$$m = \rho_1 V_1 + n \rho_2 V_2 = \rho_1 \pi (r_1^2 - r_2^2) L_{cr} + n \rho_2 L_{pm} \cdot w_{pmg} \cdot h \quad (27-4)$$

که در آن، r_1 و r_2 به ترتیب شعاع خارجی و داخلی دیسک‌های روتور، L_{cr} ضخامت محوری

یک دیسک روتور، ρ_1 و ρ_2 به ترتیب چگالی حجمی مربوط به ماده دیسک روتور و آهنرباهای دائم، w_{pmg} ، L_{pm} ، n و h به ترتیب تعداد، ضخامت، عرض و ارتفاع آهنرباهای دائم می‌باشند. با استفاده از رابطه‌ی (۴-۲۶) ممان اینرسی مربوط به دو دیسک روتور یک لایه ماشین طراحی شده ۵۰۰ کیلووات با سطح ولتاژ فاز ۷۴/۲۴ برابر با $J = 126.4 \text{ [Kg.m}^2\text{]}$ حاصل می‌شود. از آنجایی که شبیه سازی بر روی موتور دو لایه صورت گرفته است، در نتیجه ممان اینرسی موتور شبیه سازی شده برابر مجموع اینرسی‌های تک تک لایه‌های موتور خواهد بود ($J = 2 \times 126.4 \text{ [Kg.m}^2\text{]}$). برای هر موتور طراحی شده، اینرسی روتور با استفاده از رابطه‌ی (۴-۲۶) قابل محاسبه است.

اینرسی یکپارچه بخش گردان ماشین شار محوری با طول محوری کوتاه نقش عمده‌ای در رفتار دینامیکی گذرای موتور سنکرون دارد. مقدار بزرگتر اینرسی روتور دارای اثر مطلوب کاهش شدید نوسانات سرعت و اثر نامطلوب کاهش سرعت پاسخ موتور به ورودی‌ها و فرمان‌های کنترلی تغییر سرعت می‌شود. بنابراین در بسیاری از موارد برای محاسبه رفتار دقیق دینامیکی گذرای، اینرسی مربوط به بار و اجزاء آن نیز باید به طریقی محاسبه و یا تخمین زده شوند و به اینرسی روتور افزوده شوند. به هر حال چون برای ماشین‌های طراحی شده در این گزارش اطلاعات جامعی از تعداد لایه-های موتور، متعلقات و رابط‌های بین موتورها و پروانه در دسترس نمی‌باشد اینرسی مورد استفاده در شبیه‌سازی‌ها همان مقادیر حداقل محاسبه شده برای روتورها می‌باشند. بدین ترتیب نتایج نوسانات سیگنال‌های بدست آمده در شبیه‌سازی‌های ارائه شده در این بخش بدینانه خواهد بود و بطور قاطع می‌توان ادعا کرد که نوسانات موتور واقعی در تمامی حالت‌ها کمتر از مقادیر بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها خواهد بود.

۴-۳-۱- نتایج شبیه سازی‌ها

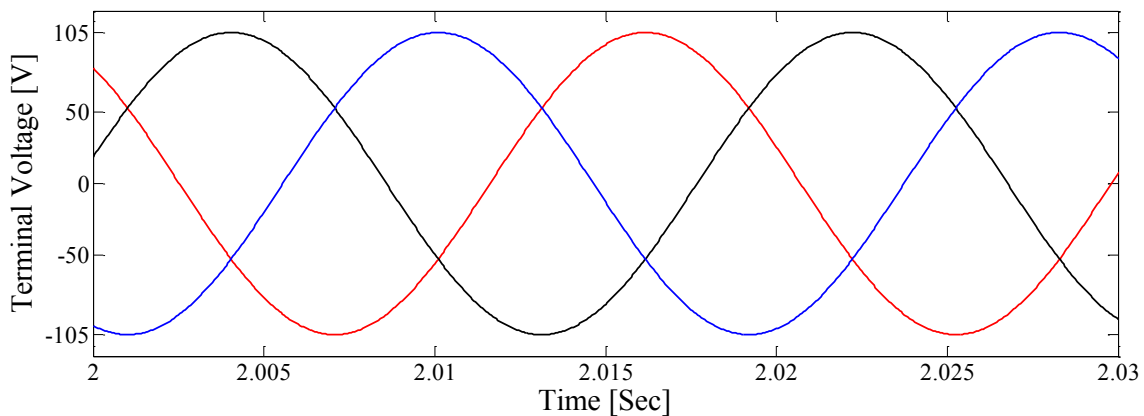
با اعمال پارامترهای ماشین در مدل سیمولینک شکل ۴-۴ نتایج شبیه سازی‌ها برای موتور

طراحی شده یک مگاوات حاصل می‌شود. در شبیه سازی ارائه شده در این قسمت، بار موتور ۷۴/۲۴ ولتی بدون در نظر گرفتن گشتاور مقاوم بار به صورت عدد ثابت، از نوع اصطکاکی با مقدار برابر با بار نامی ماشین فرض شده است. بنابراین ضریب B گشتاور اصطکاکی این موتور برابر با ۳۲/۲۵ فرض می‌شود تا بار نامی یک مگاوات را در سرعت نامی ارائه دهد. در بعضی از شبیه سازی‌ها مقادیر اولیه پارامترها نزدیک مقادیر پاسخ عملکرد حالت دائمی انتخاب شده است تا پاسخ حالت دائمی سیستم سریعاً بدست آمده و در شکل‌ها و نمودارهای حاصل از شبیه سازی قابل مشاهده باشند.

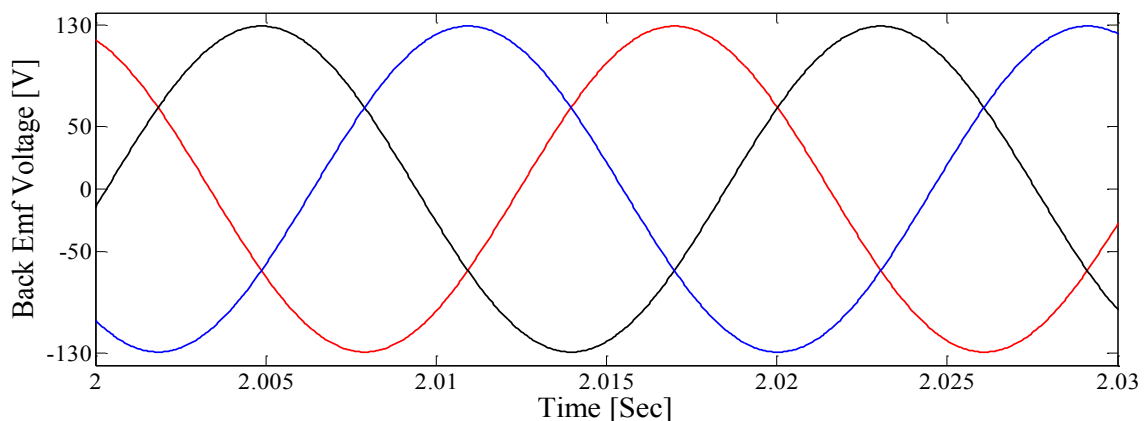
نحوه شبیه سازی به این صورت می‌باشد که ابتدا موتور در بار نامی یک مگاوات راه اندازی می‌شود و به حالت دائمی خود می‌رسد. در زمان $t = 2.5 [Sec]$ بار فرضی موتور به صورت ناگهانی به نصف مقدار نامی یعنی ۵۰۰ کیلووات با کاهش ضریب اصطکاک به نصف کاهش می‌یابد. سپس بعد از رسیدن موتور به حالت دائمی در نصف بار نامی، در زمان $t = 5 [Sec]$ بار موتور از نصف بطور ناگهانی به مقدار نامی خود افزایش می‌یابد.

همانطور که در شکل ۴-۶ نشان داده شده است یک ولتاژ سه فاز $55 Hz$ با مقدار دامنه $105 V$ به ترمینال ماشین اعمال می‌شود. با توجه به محاسبات صورت گرفته انتظار می‌رفت، ولتاژ القایی با مقدار دامنه $128 V$ برای موتور سه فاز مطابق شکل ۴-۷ تولید شود. در شکل ۴-۸ جریان فاز a موتور یک مگاواتی دو لایه نشان داده شده است. در لحظه ای که بار برداشته می‌شود مطابق شکل، جریان لحظه‌ای فاز a و در نتیجه جریان مؤثر کاهش می‌یابد. این جریان تا رسیدن به نقطه دائمی جدید دارای نوساناتی می‌باشد. در لحظه‌ای که بارگذاری می‌شود همانطور که مشاهده می‌شود، جریان لحظه‌ای فاز a و در نتیجه جریان مؤثر کلی با انجام نوساناتی افزایش می‌یابد و به مقدار نامی خود باز می‌گردد. شکل ۴-۹ نیز جریان جاری شده در فاز a استاتور را در ولتاژ و فرکانس نامی برای موتور یک لایه در بار ۵۰۰ کیلووات (نصف بار نامی ماشین دو لایه) برای مقایسه نشان می‌دهد. از مقایسه دو

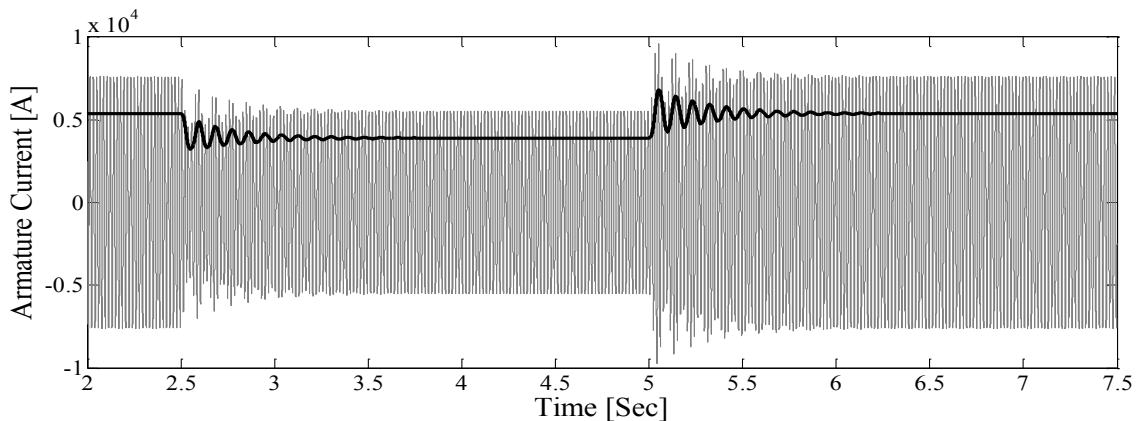
شکل ۴-۸ و شکل ۴-۹ مشاهده می‌شود که در نصف بار نامی ماشین دو لایه اگر یکی از لایه برای هم خوانی توان موتور و بار از تغذیه قطع شود مقدار موثر جریان به شدت (از مقدار حدود ۳۹۰۰ آمپر به ۲۷۰۰ آمپر) کاهش می‌یابد. این موضوع یکی از قابلیت‌های بسیار خوب ساختارهای ماشین چند لایه می‌باشد. لازم به ذکر است که قطع و وصل هر لایه ضمن کار با کلیدهای دستی و یا کلیدهای قابل برنامه‌ریزی بدون هیچگونه مشکلی قابل انجام است. این مشکلات کم قطع و وصل به دلیل کوپل بودن محور همه لایه‌ها به هم و برقرار بودن شرایط سنکرونیسم نسبی در هنگام سویچینگ می‌باشد. در این رابطه با تفصیل بیشتر در فصل بعد صحبت خواهیم کرد.



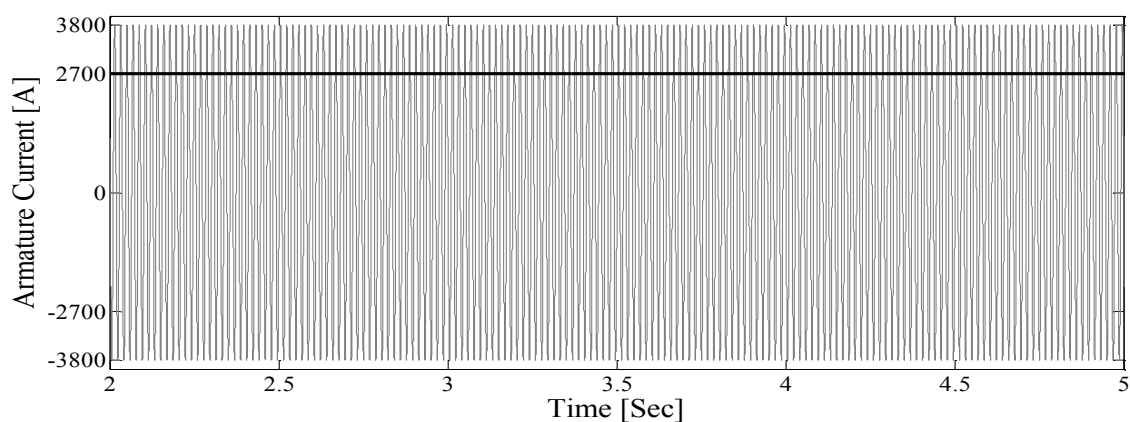
شکل ۴-۶- ولتاژ نامی ترمینال موتور در فرکانس نامی



شکل ۴-۷- ولتاژ القایی ناشی از PMها در فازهای مختلف در ولتاژ و فرکانس نامی برای موتور دو لایه



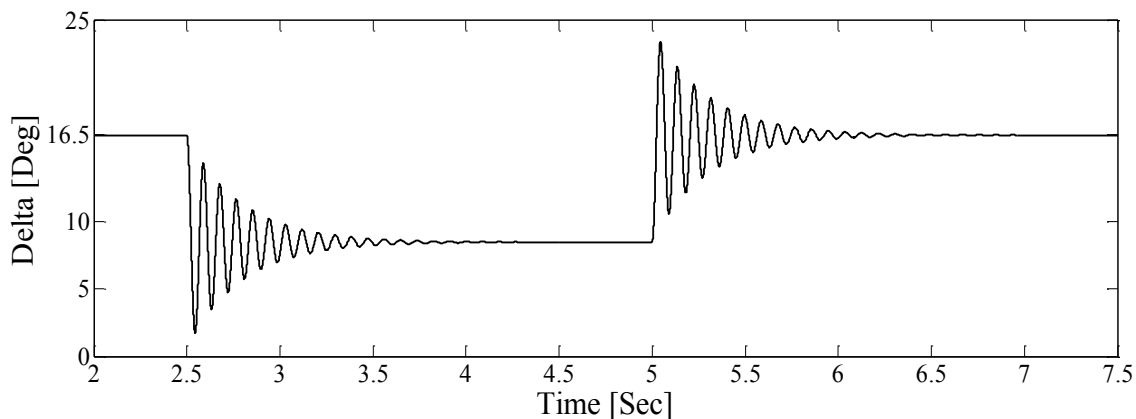
شکل ۴-۸- جریان جاری شده در فاز a موتور دو لایه در ولتاژ و فرکانس نامی و در بار نامی و نصف بار نامی



شکل ۴-۹- جریان جاری شده در فاز a موتور یک لایه در ولتاژ و فرکانس نامی و در بار ۵۰۰ کیلووات (نصف بار نامی

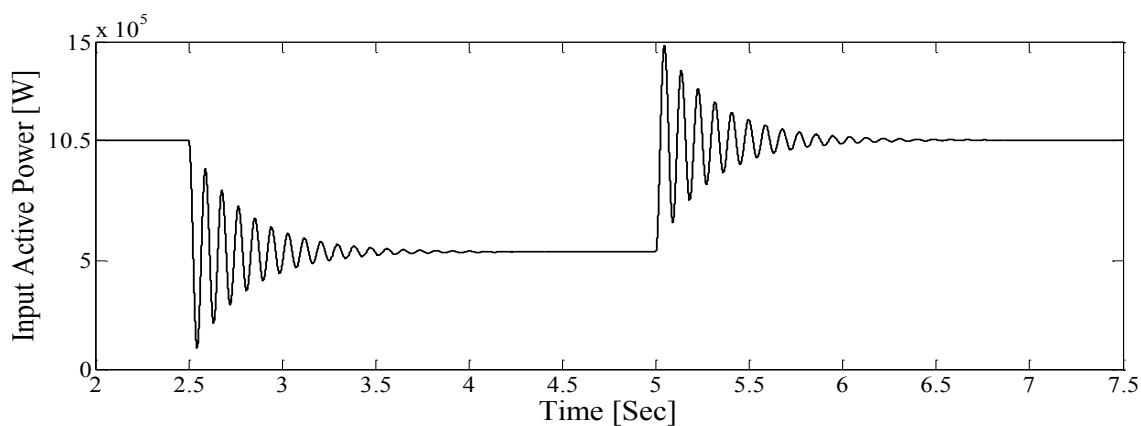
ماشین دو لایه)

زاویه قدرت یعنی اختلاف فاز ولتاژ ترمینال و ولتاژ القایی ماشین ۱ مگاواتی در شکل ۴-۱۰ مشاهده می‌شود. همانطور که از نتایج بدست آمده از شبیه سازی مشاهده می‌شود، هنگامی که بار موتور نصف می‌شود، زاویه قدرت هم افت پیدا می‌کند و پس از نوساناتی به مقدار جدید خود می‌رسد. مقدار جدید زاویه قدرت حالت دائمی را به طور مشابه می‌توان از محاسباتی که در قسمت قبل برای بدست آوردن زاویه قدرت بار کامل انجام گرفت بدست آورد. همچنین هنگامی که بار موتور به مقدار نامی خود افزایش می‌یابد، زاویه قدرت نیز افزایش پیدا می‌کند و پس از چند نوسان به مقدار جدید خود می‌رسد.

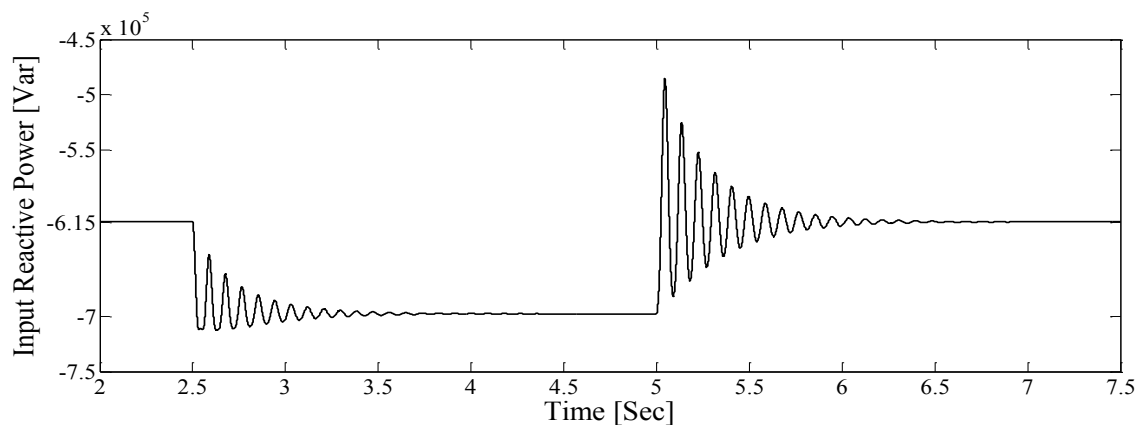


شکل ۴-۱۰- زاویه قدرت δ موتور دو لایه در ولتاژ و فرکانس نامی و در بار ۱ مگاوات و ۵۰۰ کیلووات

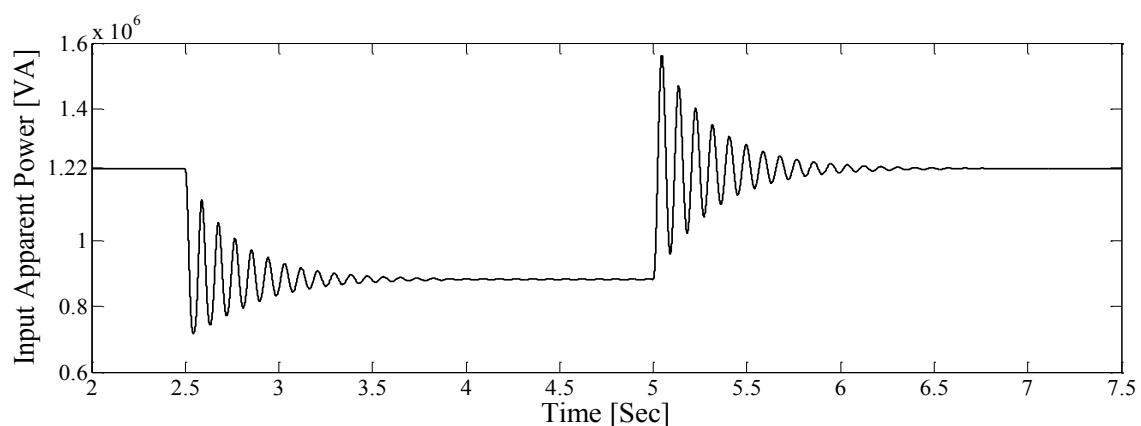
در شکل ۴-۱۱ و شکل ۴-۱۲ به ترتیب توان اکتیو و راکتیو ورودی برای ماشین دولایه در بار نامی و نصف بار نامی مشاهده می‌شود. توان ظاهری ورودی نیز با توجه به رابطه $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ بدست می‌آید (شکل ۴-۱۳). همچنین با توجه به رابطه $\cos \varphi = \frac{P}{S}$ ضریب قدرت محاسبه می‌شود (شکل ۴-۱۴). با کاهش زاویه قدرت در اثر کاهش بار، ضریب قدرت $\cos \varphi$ پیش‌فاز نیز کاهش؛ یعنی $\sin \varphi$ و توان راکتیو تولیدی موتور افزایش و توان اکتیو مصرفی موتور کاهش می‌یابد. بر خلاف حالت بارزدایی، در حالت بارگذاری و با افزایش زاویه قدرت، ضریب قدرت نیز افزایش می‌یابد؛ یعنی $\sin \varphi$ کوچک‌تر، در نتیجه توان راکتیو کاهش می‌یابد و توان اکتیو ورودی زیاد می‌شود.



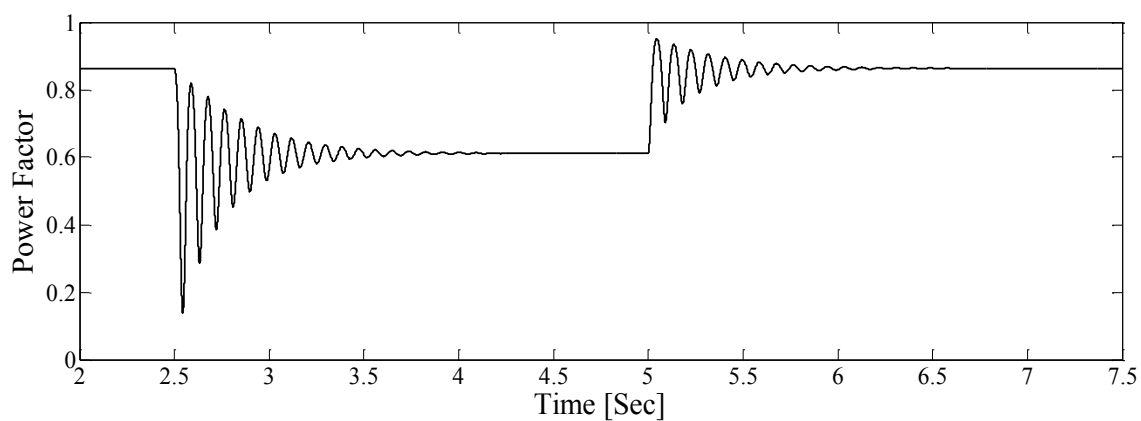
شکل ۴-۱۱- توان اکتیو ورودی لحظه‌ای موتور دو لایه در ولتاژ و فرکانس نامی و در بار ۱ مگاوات و ۵۰۰ کیلووات



شکل ۴-۱۲ توان راکتیو ورودی لحظه‌ای موتور دو لایه در ولتاژ و فرکانس نامی و در بار ۱ مگاوات و ۵۰۰ کیلووات



شکل ۴-۱۳ توان ظاهری ورودی لحظه‌ای موتور دو لایه در ولتاژ و فرکانس نامی و در بار ۱ مگاوات و ۵۰۰ کیلووات



شکل ۴-۱۴ ضریب قدرت (پیش فاز) موتور دو لایه در ولتاژ و فرکانس نامی و در بار ۱ مگاوات و ۵۰۰ کیلووات

۴-۴- بررسی تاثیر تعداد لایه‌های ماشین در هنگام طراحی بر روی عملکرد آن

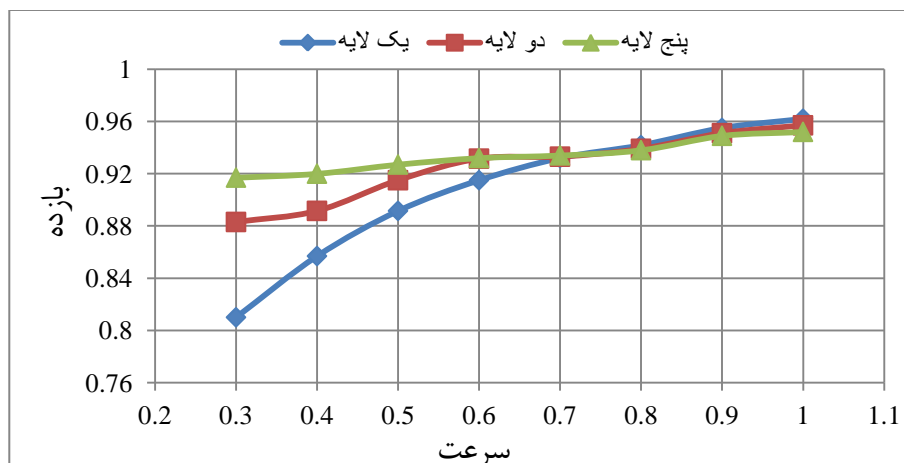
در این بخش به بررسی تاثیر تعداد لایه‌ها در هنگام طراحی ماشین بر روی عملکرد آن پرداخته می‌شود تا تعداد لایه‌های بهینه برای ماشین در سطح توان‌های مختلف بدست آید. برای این منظور به این صورت عمل شده است که برای هر ماشین چند لایه در توان‌های معین شده و تعداد لایه‌های مختلف برای همه حالات موجود، در سرعت‌های مختلف موتور، بازده بصورت نقطه به نقطه با استفاده از شبیه سازی دینامیکی گذرایی بصورت نموداری بدست آمده است. با مقایسه این نمودارها می‌توان تعداد لایه‌های مناسب و بهینه را برای آن سطح توان بدست آورد. همانطور که در فصل‌های قبل نیز به آن پرداخته شد، در این پایان نامه محدوده توان ۵۰۰ کیلو وات تا ۳ مگاوات با گام ۵۰۰ کیلو وات برای بررسی سیستم‌های چند لایه توان بالا در نظر گرفته شده است. برای این منظور هر یک از این سیستم‌ها باید با تعداد لایه‌های مختلف طراحی شوند تا پس از شبیه سازی‌های دینامیک گذرایی و بدست آمدن مشخصه‌های عملکردی هر یک، بتوان بهینه‌ترین تعداد لایه را برای آن توان انتخاب کرد. با توجه به توان هر یک از سیستم‌های مورد بررسی تصمیم بر آن شد که سه ماشین ۱۰۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ کیلو وات به عنوان لایه‌های سیستم چند لایه طراحی شوند. توان بیش‌تر از ۵۰۰ کیلو وات برای یک لایه به علت افزایش قطر و محدودیت‌های مکانیکی برای این ساختار توصیه نمی‌شود. همچنین توان کمتر از ۱۰۰ کیلو وات برای یک لایه نیز باعث افزایش بیش از حد تعداد لایه ها می‌شود. با مونتاز این لایه‌ها در کنار هم یک سیستم چند لایه بوجود خواهد آمد.

۴-۴-۱- ماشین چند لایه ۵۰۰ کیلو وات

اولین ماشین چند لایه که در این بخش مورد بررسی قرار می‌گیرد، ماشین با سطح توان ۵۰۰ کیلو وات می‌باشد. با توجه به اینکه لایه‌های طراحی شده با توان‌های ۱۰۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ کیلو وات

هستند در نتیجه ماشین ۵۰۰ کیلو وات را می‌توان بصورت یک لایه ۵۰۰ کیلو وات، ۲ لایه هر لایه ۲۵۰ کیلو وات و ۵ لایه هر لایه ۱۰۰ کیلو وات طراحی و مونتاژ کرد. نمودار بازده بر حسب سرعت برای سه حالت ممکن در شکل ۴-۱۵ نشان داده شده است. شبیه سازی برای بدست آمدن این نمودارها به این صورت انجام شده است که از سرعت ۰/۳ تا سرعت نامی با گام ۰/۱ بازده برای هر سه حالت محاسبه شده است. همانطور که از شکل مشاهده می‌شود در سرعت‌های بالا بازده سه ماشین تقریباً برابر است ولی به اندازه خیلی کمی بازده ماشین یک لایه بالاتر است. در سرعت‌های پایین وضعیت کاملاً متفاوت است و بازده ماشین ۵ لایه به طور محسوسی بهتر از بازده ماشین ۲ لایه و یک لایه است. موتور چند لایه این خاصیت را دارد که در سرعت‌های مختلف با توجه به میزان توان مورد نیاز با تعداد لایه متناسب با آن توان به کار گرفته شود. این عمل می‌تواند با سوئیچینگ مناسب لایه‌ها صورت پذیرد. با این کار موتور در سرعت‌های مختلف تحت بار کامل خود قرار می‌گیرد و از آنجایی که هر لایه از موتور در بار نامی خود دارای حداکثر بازده می‌باشد، باعث افزایش بازده کل سیستم می‌شود. پس به نظر می‌رسد که هر چه تعداد لایه‌ها بیشتر باشد در گام‌های بیشتری از سرعت موتور در شرایط بار کامل خود قرار می‌گیرد. ولی از طرف دیگر هنگامی که لایه‌ای از موتور از مدار خارج می‌شود، از آنجایی که تمام لایه‌ها هم محورند و با هم در گردشند، آن لایه از موتور مانند ژنراتور بی‌بار می‌شود. بنابراین به علت وجود ولتاژ القایی، لایه از مدار خارج شده دارای تلفات آهن می‌باشد که این تلفات بصورت یک بار اضافی برای لایه‌های روشن می‌باشد. این موضوع باعث کاهش بازده کلی سیستم می‌شود. در نتیجه افزایش بیش از حد تعداد لایه‌ها نه تنها باعث بهبود بازده سیستم نمی‌شود بلکه ممکن است آن را نیز کاهش دهد. به هر حال از آنجایی که نمی‌توان به طور قطعی در مورد تعداد لایه‌های ماشین تصمیم‌گیری کرد لازم است که شبیه سازی برای حالت‌های مختلف صورت گیرد. همانطور که مشاهده می‌شود حتی با انجام شبیه سازی نیز ممکن است نتوان به طور

کلی در مورد تعداد لایه‌ها تصمیم قاطع گرفت و با توجه به نوع کاربرد موتور بتوان تعداد لایه‌ها را انتخاب کرد. از آنجایی که کاربرد مورد نظر در این پایان نامه استفاده از موتور به عنوان پیشران زیر دریایی می‌باشد، بنابراین در این سطح توان می‌توان نظر قطعی داد که سیستم ۵ لایه مناسب‌تر است.

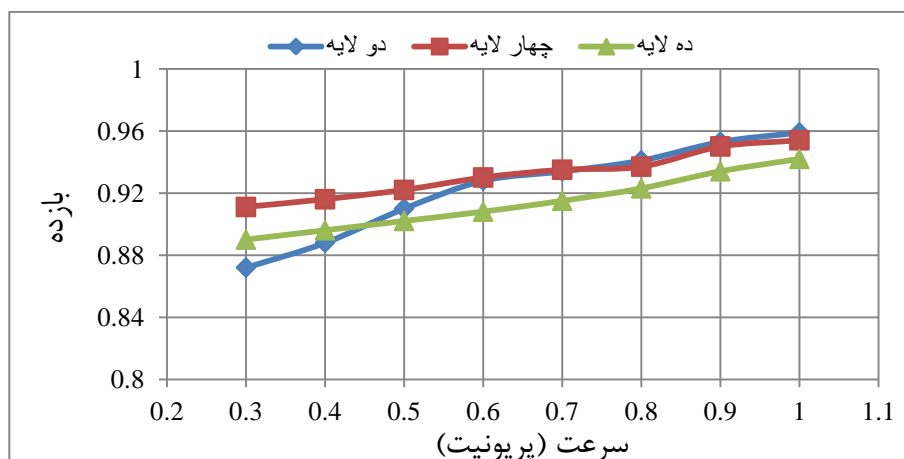


(پریونیت)

شکل ۴-۱۵- نمودار بازده بر حسب سرعت برای ماشین چند لایه ۵۰۰ کیلو وات

۴-۴-۲- ماشین چند لایه یک مگا وات

با توجه به اینکه لایه‌های طراحی شده با توان‌های ۱۰۰، ۲۵۰ و ۵۰۰ کیلو وات هستند در نتیجه سیستم چند لایه ۱ مگا وات را می‌توان با سه ترکیب ۱- ۱۰ لایه هر لایه ۱۰۰ کیلو وات، ۲- ۴ لایه هر لایه ۲۵۰ کیلو وات و ۳- ۲ لایه هر لایه ۵۰۰ کیلو وات طراحی و مونتاژ نمود. نمودار بازده بر حسب سرعت برای سه حالت ممکن در شکل ۴-۱۶ نشان داده شده است. شبیه سازی برای بدست آمدن این نمودارها نیز همانند قسمت قبل انجام شده است. همانطور که از شکل مشاهده می‌شود به طور کلی سیستم ۴ لایه دارای بازده بیشتری نسبت به دو حالت دیگر است و برای این سطح توان مناسب می‌باشد.



شکل ۴-۱۶- نمودار بازده بر حسب سرعت برای ماشین چند لایه یک مگا وات

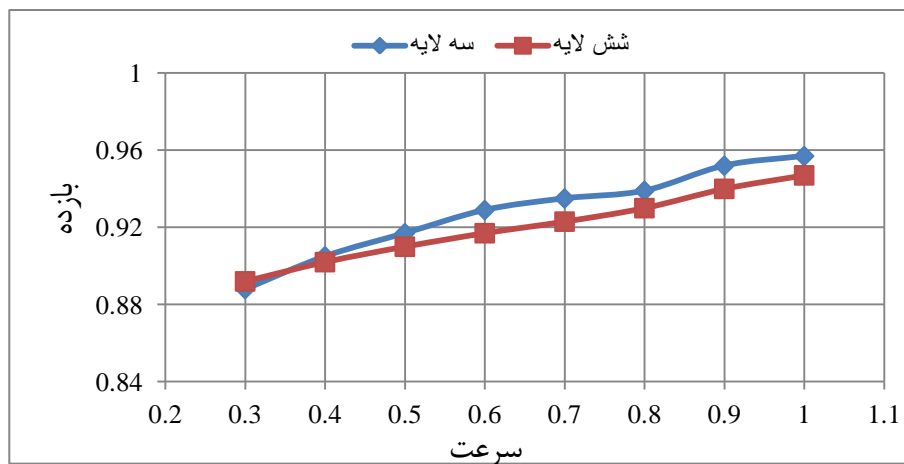
۳-۴-۴- ماشین چند لایه ۱/۵ مگا وات

ماشین چند لایه ۱/۵ مگا وات را نیز می‌توان با سه ترکیب ۱- ۱۵ لایه هر لایه ۱۰۰ کیلو وات، ۲- ۶ لایه هر لایه ۲۵۰ کیلو وات و ۳- ۳ لایه هر لایه ۵۰۰ کیلو وات طراحی و مونتاژ نمود. یکی از حالت‌های معرفی شده دارای ۱۵ لایه می‌باشد که این تعداد زیاد لایه به علت مشکلاتی از جمله پیچیده‌تر شدن سیستم کنترلی، مشکلات کوپلینگ و همچنین امکان بوجود آمدن مدهای پیچشی به علت افزایش طول محور توصیه نمی‌شود. بنابراین شبیه‌سازی‌ها برای این حالت انجام نشده است. نمودار بازده بر حسب سرعت برای دو حالت دیگر در شکل ۴-۱۷ نشان داده شده است. شبیه‌سازی برای بدست آمدن این نمودارها نیز همانند قسمت قبل انجام شده است. همانطور که از شکل مشاهده می‌شود می‌توان گفت به طور کلی سیستم سه لایه برای این سطح توان مناسب‌تر می‌باشد.

۴-۴-۴- ماشین چند لایه ۲ مگا وات

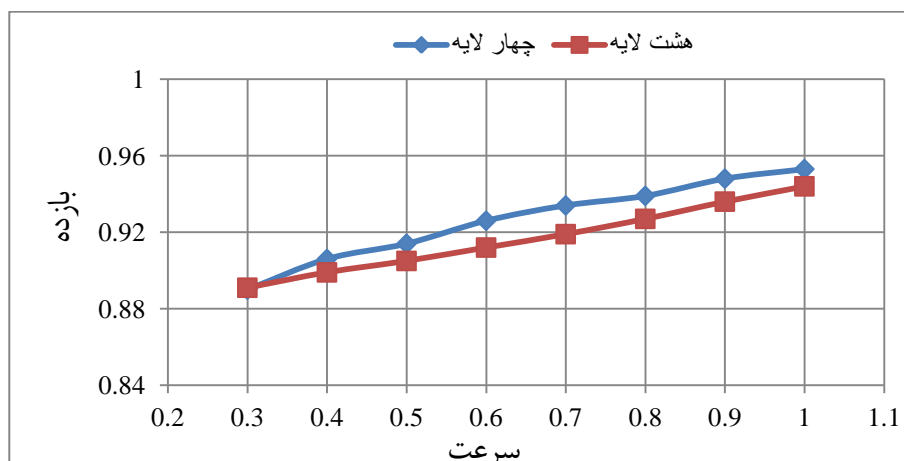
ماشین چند لایه ۲ مگا وات را نیز می‌توان با سه ترکیب ۱- ۲۰ لایه هر لایه ۱۰۰ کیلو وات، ۲- ۸ لایه هر لایه ۲۵۰ کیلو وات و ۳- ۴ لایه هر لایه ۵۰۰ کیلو وات طراحی و مونتاژ نمود. برای این

حالت نیز سیستم ۲۰ لایه به علت دلایلی که در قسمت قبل ذکر شد در نظر گرفته نمی‌شود. نمودار بازده بر حسب سرعت برای دو حالت دیگر در شکل ۴-۱۸ نشان داده شده است. شبیه سازی برای بدست آمدن این نمودارها نیز همانند قسمت قبل انجام شده است. همانطور که از شکل مشاهده می‌شود بازده سیستم چهارلایه بیشتر از حالت دیگر است و برای این سطح توان سیستم چهار لایه انتخاب می‌شود.



(پریونیت)

شکل ۴-۱۷- نمودار بازده بر حسب سرعت برای ماشین چند لایه ۱/۵ مگا وات

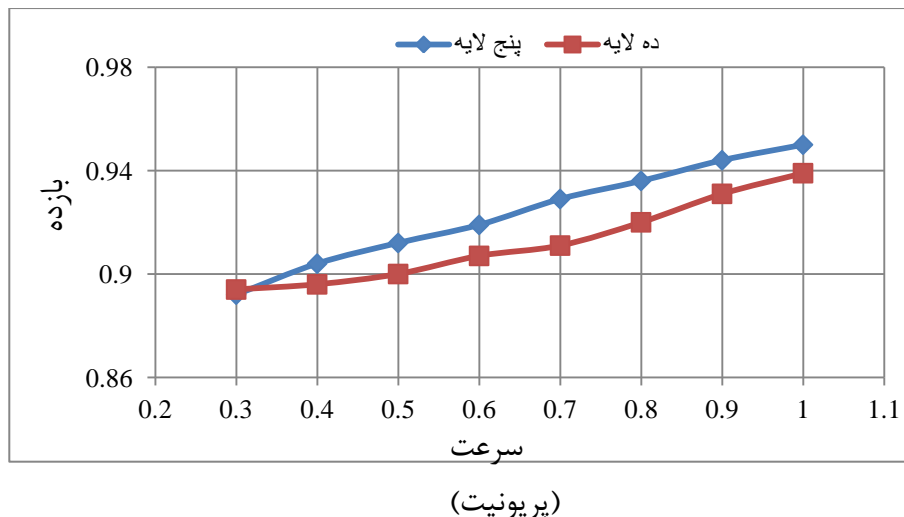


(پریونیت)

شکل ۴-۱۸- نمودار بازده بر حسب سرعت برای ماشین چند لایه ۲ مگا وات

۴-۴-۵- ماشین چند لایه ۲/۵ مگا وات

ماشین چند لایه ۲/۵ مگا وات را نیز می‌توان با سه ترکیب ۱- ۲۵ لایه هر لایه ۱۰۰ کیلو وات، ۲- ۱۰ لایه هر لایه ۲۵۰ کیلو وات و ۳- ۵ لایه هر لایه ۵۰۰ کیلو وات طراحی و مونتاژ نمود. در اینجا نیز سیستم ۲۵ لایه در نظر گرفته نمی‌شود. نمودار بازده بر حسب سرعت برای دو حالت دیگر در شکل ۴-۱۹ نشان داده شده است. شبیه سازی برای بدست آمدن این نمودارها نیز همانند قسمت قبل انجام شده است. همانطور که از شکل مشاهده می‌شود سیستم پنج لایه در این سطح توان از نظر بازده مناسب‌تر از حالت دیگر می‌باشد.



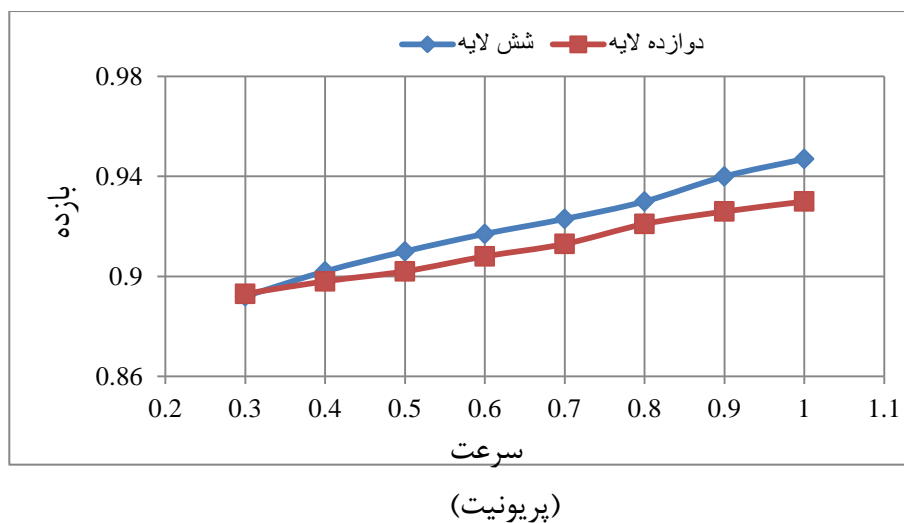
شکل ۴-۱۹- نمودار بازده بر حسب سرعت برای ماشین چند لایه ۲/۵ مگا وات

۴-۴-۶- ماشین چند لایه ۳ مگا وات

ماشین چند لایه ۳ مگا وات را نیز می‌توان با سه ترکیب ۱- ۳۰ لایه هر لایه ۱۰۰ کیلو وات، ۲- ۱۲ لایه هر لایه ۲۵۰ کیلو وات و ۳- ۶ لایه هر لایه ۵۰۰ کیلو وات طراحی و مونتاژ نمود. در این قسمت نیز ماشین ۳۰ لایه بررسی نمی‌شود. نمودار بازده بر حسب سرعت برای دو حالت ممکن در شکل ۴-۲۰ نشان داده شده است. شبیه سازی برای بدست آمدن این نمودارها نیز همانند قسمت

قبل انجام شده است. همانطور که از شکل مشاهده می‌شود در این سطح توان سیستم شش لایه مناسب‌تر است.

با انجام این شبیه‌سازی‌ها و بررسی نتایج آن و مقایسه‌هایی که صورت گرفت مشاهده شد تعداد لایه‌های سه تا شش لایه اهداف مد نظر طراح را که مهمترین آن می‌تواند بازده باشد را بر آورده می‌کند. ماشین چند لایه به یکنواخت شدن بازده در سرعت‌های مختلف کمک می‌کند ولی همانطور که قبلاً نیز بیان شد تعدد بیش از حد لایه‌ها به علت افزایش تلفات آهن باعث کاهش بازده می‌شود.



شکل ۴-۲۰- نمودار بازده بر حسب سرعت برای ماشین چند لایه ۳ مگا وات

فصل پنجم

بررسی حالت‌های گذرای در هنگام قطع و

وصل لایه‌ها و مدیریت بهینه بار

همانطور که قبلا نیز گفته شد یکی از کاربردهای مهم موتورهای چند لایه استفاده از آنها به عنوان پیشران زیر دریایی‌ها می‌باشد. به همین دلیل برای درک اهمیت عملکرد موتور چند لایه در توان‌ها و سرعت‌های مختلف با بازده بالا و بررسی حالت‌های گذرای در هنگام قطع و وصل لایه‌ها و مدیریت بار، در این فصل به بررسی یک نمونه موتور چند لایه پیشران زیر دریایی پرداخته شده است. مدت زمان ماندگاری در زیر آب و برد عملیاتی زیردریایی‌های دیزل الکتریک در ماموریت‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این زیردریایی‌ها در ماموریت‌های مختلف در سرعت‌های متفاوت کار می‌کنند و مصرف انرژی موتور پیشران آنها نیز مستقیماً به سرعت وابسته است. بنابراین موتور مورد استفاده برای این کاربرد باید در سرعت‌های مختلف عملکردی، دارای بازده بالایی باشد. طراحی موتور پیشران با بهره بالا و تغذیه مناسب آن توسط بانک باتری‌ها در بارها و یا سرعت‌های مختلف باعث کاهش مصرف انرژی، افزایش عمر یا مدت زمان تخلیه باتری‌ها و در نتیجه افزایش مدت ماندگاری زیردریایی در زیر آب می‌شود.

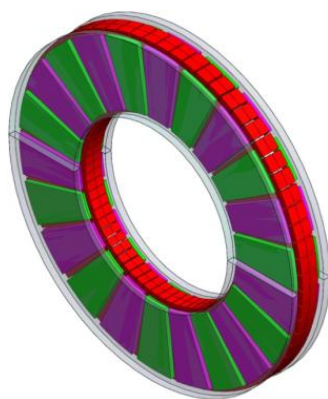
موتور نمونه مورد مطالعه در این فصل یک موتور شار محوری دو لایه با توان نامی کل یک مگا وات است که در سیستم پیشران یک زیردریایی کوچک بکار گرفته می‌شود. به علت محدودیت‌های موجود از جمله ولتاژ تغذیه پایین و ملاحظات دیگری، این موتور بصورت دو لایه با توان هر لایه برابر ۵۰۰ کیلو وات طراحی شده است. طراحی و ساخت ماشین به صورت دو لایه برای ماشین ۱ مگاوات و چند لایه برای توان‌های بالاتر به علت ساختار هندسی موتور شار محوری بویژه طول محوری کم، به راحتی انجام پذیر است. طول محوری کم و امکان طراحی ماشین به صورت چند لایه یک مزیت مهم برای موتورهای شار محوری به منظور استفاده در فضاهای کوچک محسوب می‌شود. همانطور که بیان شد، هر لایه از موتور دو لایه یک مگا وات نمونه طراحی شده توانایی تامین توان ۵۰۰ کیلو وات را

دارد که این امر سبب شده که در محدوده‌ای از توان یا سرعت بتوان از موتور بصورت یک لایه و یا دو لایه استفاده نمود. بنابراین هدف از تدوین این فصل برنامه‌ریزی تغذیه دو لایه موتور یک مگا وات می‌باشد به نحوی که طی مانورهای زیردریایی در سرعت‌های مختلف، از انرژی موجود به بهینه‌ترین شکل ممکن استفاده گردد. موضوع دیگری که در این فصل به آن پرداخته شده، بررسی پایداری سیستم دو لایه به لحاظ پدیده‌های الکترومغناطیسی و الکترومکانیکی در هنگام قطع آنی و وصل مستقیم لایه‌ها توسط یک کلید به خروجی یک اینورتر تغذیه شونده از بانک باتری‌ها طی سرعت‌های مختلف می‌باشد. در این فصل پارامترهای محاسبه شده موتور که در فصل قبل ارائه گردید در معادلات دینامیکی گذرای ماشین و در یک شبیه سازی کامپیوتری بکار گرفته می‌شوند و سناریوهای تغذیه لایه‌ها در شرایط عملکرد مختلف مورد شبیه سازی توسط نرم افزار *Matlab* قرار می‌گیرند. نتایج شبیه‌سازی‌های گذرای و دائمی ارائه شده در قالب گراف‌هایی هر دو موضوع امکان‌پذیری قطع و وصل لایه‌ها به لحاظ پایداری و استراتژی مصرف بهینه انرژی را به نمایش می‌گذارند. استراتژی ارائه شده برای تغذیه دو لایه موتور یک مگا وات طی سرعت‌های مختلف به منظور حداقل نمودن مصرف انرژی موجود برای موتورهای چند لایه با صرفه انرژی به مراتب بیشتر قابل تعمیم و توسعه می‌باشد.

۵-۲- موتور طراحی شده

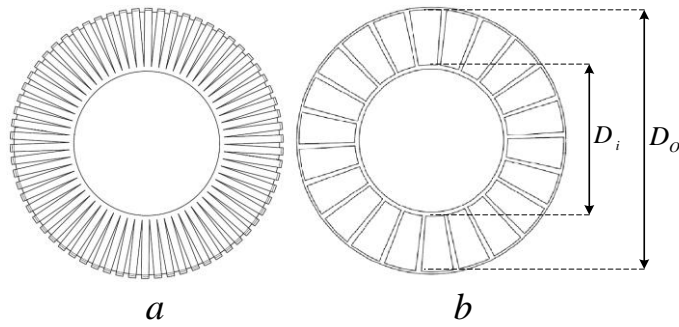
ساختار موتور انتخاب شده برای تامین نیروی رانشی زیر دریایی، یک موتور سنکرون *AFPM* چند لایه از نوع *TORUS* می‌باشد که هسته آن بدون شیار است. هر لایه این ماشین دارای دو روتور دیسکی در بیرون و یک استاتور بدون شیار در وسط است. ساختار یک لایه از ماشین در شکل ۵-۱ و شکل ۵-۲ نمایش داده شده است. موتور مورد نظر بصورت چند لایه برای چرخاندن یک بار در محدوده صفر تا چند مگاوات طراحی شده است و با یک واسط اینورتری توسط بانک باتری‌های متشکل از ۱۱۰ عدد سلول باتری سربی اسیدی ۲ ولتی (جمعا ۲۲۰ ولت DC) تغذیه می‌شود. با توجه

به محدودیت موجود در ولتاژ DC ورودی اینورتر اگر شکل موج ولتاژ خروجی اینورتر را سینوسی فرض کنیم حداکثر دامنه ولتاژ فاز ترمینال را می‌توان حدوداً برابر با ۱۰۵ ولت در نظر گرفت. در واقع موتور طراحی شده یک موتور چند لایه است که توان نامی هر لایه از موتور طراحی شده 500KW است و می‌تواند به صورت دو لایه به منظور تامین توان نامی 1MW و چند لایه برای تامین توان‌های بیشتر (تا چند مگاوات) مونتاژ شود. دلیل انتخاب این ساختار، برآورده کردن اهداف مهمی در زیردریایی از قبیل دستیابی به راندمان و شاخصه‌های عملکردی بهتر در شرایط بار و سرعت نامی و در شرایط کسری از بار یا کسری از سرعت نامی است. قطعاً چنین خواسته‌هایی با طرح‌های کسکید راحت‌تر میسر می‌گردند ضمن اینکه در طرح چند لایه قابلیت اطمینان بالاتر و امکان تعمیر و نگهداری راحت‌تر می‌باشد. همانطور که قبلاً نیز متذکر شدیم موتور طراحی شده دارای طول محوری بسیار کم می‌باشد و این خود به صورت یک مزیت محسوب می‌شود. کوتاهی طول محوری امکان استفاده از ماشین به صورت چند لایه با تغذیه اختیاری لایه‌ها و فراهم نمودن ترکیب مختلف توان‌ها با بیشترین بازده ممکن در شرایط عملکرد مختلف را فراهم می‌نماید. اطلاعات و مشخصات نامی یک لایه از موتور که بر اساس آنها طراحی انجام می‌گیرد در جدول ۵-۱ آورده شده است. ابعاد و پارامترهای اساسی طراحی موتور نمونه در جدول ۵-۲ ارائه شده است.



شکل ۵-۱- پیکربندی یک لایه از موتور شار محوری نوع TORUS بدون شیار با آهنربا دائم با اتصال سطحی

(TORUS-NS)



شکل ۵-۲- شماتیک ساختار (a) استاتور (b) روتور موتور AFPM نوع TORUS

۵-۳- پارامترهای مدل مداری موتور طراحی شده

نحوه و روند محاسبه پارامترهای مداری ماشین در فصل قبل ارائه گردید. در جدول ۵-۱ مقادیر پریونیت برخی از این پارامترهای ماشین داده شده اند.

جدول ۵-۱- مقادیر پریونیت شده برخی از پارامترهای ماشین

پارامتر	مقدار [p.u]
ولتاژ القایی در هر فاز	۱/۲۲
مقاومت هر فاز	۰/۰۲۲۹
راکتانس سنکرون	۰/۴

۵-۴- شبیه سازی

مدل دینامیکی موتور AFPM دو لایه یک مگاوات طراحی شده، مطابق شکل ۵-۳، در فضای

SIMULINK نرم افزار *MATLAB* شبیه سازی می شود.

بار موتور، عمدتاً مربوط به پروانه زیردریایی است که توسط محور موتور در محیط آب دریا می-

چرخد. تجربیات نشان می دهند که حرکت پروانه در محیط آب دریاها با یک دقت قابل قبول می تواند

به صورت بار نوع اصطکاکی با توان متناسب با مکعب سرعت زاویه ای مدل شود [۴]. بنابراین معادله

دینامیکی روتور را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$T_e - T_m = J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m^2 \quad (1-5)$$

$$\omega_m = \frac{1}{J} \int (T_e - T_m - B\omega_m^2) dt \quad (2-5)$$

که در آن T_e گشتاور الکترومغناطیسی موتور، T_m گشتاور بار اضافی در صورت وجود، J ممان اینرسی بخش گردان، ω_m سرعت مکانیکی روتور بر حسب رادیان بر ثانیه و B ضریب گشتاور اصطکاکی سیال آب دریا می‌باشد.

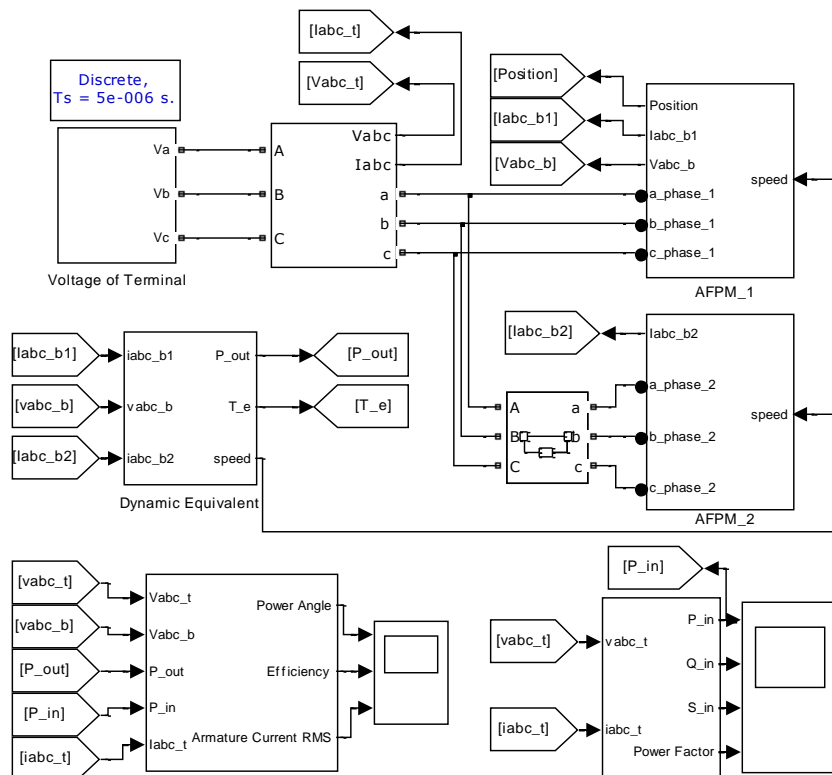
به منظور محاسبه ممان اینرسی هر کدام از دیسک‌های روتور و آهنرباهای دائم آن از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$J = 2\left(\frac{1}{2} m r_1^2\right) \quad (3-5)$$

$$\begin{aligned} m &= \rho_1 V_1 + n \rho_2 V_2 \\ &= \rho_1 \pi (r_1^2 - r_2^2) L_{cr} + n \rho_2 \frac{\pi (r_1^2 - r_2^2)}{p} \alpha_i L_{pm} \end{aligned} \quad (4-5)$$

که در آن، r_1 و r_2 به ترتیب شعاع خارجی و داخلی دیسک‌های روتور، L_{cr} ضخامت محوری یک دیسک روتور، ρ_1 و ρ_2 به ترتیب چگالی حجمی مربوط به ماده دیسک روتور و آهنرباهای دائم، n ، L_{pm} و α_i به ترتیب تعداد، ضخامت و نسبت قوس قطب به گام قطب آهنرباهای دائم و p تعداد قطب‌های موتور می‌باشند.

در شبیه‌سازی‌های این مقاله، ممان اینرسی کل بخش گردان شامل اینرسی‌های دیسک‌های روتور، پروانه، شفت و رابط‌ها مجموعاً 252.8 Kg.m^2 منظور شده است.



شکل ۵-۳- شماتیک مدار شبیه سازی شده در نرم افزار *MATLAB*

۵-۵- نتایج شبیه سازی

چگونگی به وجود آمدن و حفظ شرایط سنکرونیسم در هنگام وصل یک لایه جدید موتور سنکرون در حال کار به منبع تغذیه و رعایت شدن محدوده جریان و تلفات مجاز موضوعاتی است که در اینجا شاید سبب نگرانی باشد. به هر حال شبیه‌سازی‌های بسیار نشان می‌دهند که خوشبختانه قطع و وصل هر لایه موتور در حال کار با کلیدهای دستی و یا کلیدهای قابل برنامه‌ریزی بدون هیچگونه مشکلی قابل انجام است. عدم وجود مشکلات قطع و وصل به دلیل کوپل بودن محور لایه‌ها به هم و برقرار بودن شرایط سنکرونیسم نسبی در هنگام سویچینگ می‌باشد. در شرایطی که لایه و یا لایه‌هایی از یک موتور به منبع تغذیه متصل می‌باشند و موتور در حالت عملکرد معمول می‌باشد لایه-ای از موتور که در مدار نیست، مشابه یک ژنراتور مدار باز عمل می‌کند. اما به علت اینکه در هنگام

بسته شدن کلید فازهای همنام لایه‌ها با هم موازی می‌شوند، در نتیجه ولتاژهای دو طرف کلید دارای توالی فاز مشابهی هستند. همچنین به علت اینکه دو لایه موتور با هم کوپل مکانیکی هستند و با سرعت مکانیکی مشابهی می‌چرخند ولتاژهای دو طرف کلید هر فاز دارای فرکانس‌های دقیقاً برابر اما احیاناً دامنه‌ها و فازهای کمی متفاوت می‌باشند. در نتیجه خود به خود تحت هر نوع شرایط کاری دائمی و گذرا، بهترین شرایط سنکرونیسم برای اتصال لایه‌های جدید موتور چند لایه به شبکه تغذیه و یا خروجی اینورتر بوجود می‌آید و لایه جدید بدون کشیدن یک جریان غیر عادی و بزرگتر از معمول، سهم خود را در تامین توان بار در یک بازه زمانی کوتاه ایفا می‌کند. لایه‌های موجود دیگر نیز بدون تحمل هیچگونه تنش غیر عادی با شرایط جدید تطبیق پیدا می‌کنند. شرایط قطع یک لایه از تغذیه نیز برای آن لایه ماشین مشابه شرایط معمول قطع موتور سنکرون از شبکه و برای لایه‌های دیگر مشابه شرایط بارگذاری معمول یک موتور سنکرون می‌باشد. در این شرایط سهم بار لایه قطع شده از شبکه بین لایه‌های دیگر تقسیم می‌شود. بنابراین شرایط قطع یک لایه و یا وصل لایه جدید در هر رژیم عملکردی گذرا و دائمی می‌تواند بدون هیچگونه نگرانی از وقوع یک شرایط غیر قابل قبول، با یک برنامه ساده از قبل مشخص شده و یا به صورت دستی در زمان مناسب و اختیاری انجام گیرد.

برای تایید آنچه گفته شد با شبیه سازی موتور طراحی شده یک مگاوات که ترکیبی از دو لایه ۵۰۰ کیلو واتی است توسط نرم افزار *SIMULINK* شرایط مختلف عملکردی مورد بررسی قرار گرفته است. در اینجا به منظور بررسی رفتار دینامیکی گذرای و پایداری موتور در هنگام کلیدزنی، یک نمونه از شرایط بار مجاز که می‌توان از موتور به دلخواه به هر دو صورت یک لایه و دو لایه استفاده نمود بررسی می‌شود. در این نمونه شرایط کار فرض می‌شود که ابتدا موتور در $0/8$ سرعت نامی بصورت دو لایه و در حالت دائمی کار می‌کند. در این حالت با توجه به اینکه توان موتور با مکعب

سرعت متناسب است توان خروجی موتور برابر ۵۰۰ کیلو وات خواهد بود. سپس در لحظه $t = 3.5$ [Sec] یکی از لایه‌های موتور به صورت ناگهانی با استفاده از یک سوئیچ قدرت از مدار خارج می‌شود و موتور پس از آن برای مدتی بصورت یک لایه به کار خود ادامه می‌دهد. بعد از رسیدن موتور یک لایه به شرایط عملکرد حالت دائمی، در لحظه $t = 5.75$ [Sec] با استفاده از همان سوئیچ قدرت، لایه دوم دوباره وارد مدار شده و موتور به صورت دو لایه به عملکرد خود ادامه می‌دهد. شکل ۵-۴ سرعت مکانیکی محور موتور را در طول بازه زمانی سه مرحله عملکرد دولایه ابتدایی، یک لایه و دو لایه نهایی نمایش می‌دهد. در هنگام قطع یک لایه، بار لایه قطع شده بطور ناگهانی در یک بازه زمانی کوتاه به بار لایه دیگر اضافه می‌شود. همانطور که در شکل ۵-۴ مشاهده می‌شود، در اثر قطع یک لایه موتور در بار ۵۰۰ کیلو وات سرعت موتور ابتدا کاهش یافته و سپس بعد از طی حالت گذرا در همان سرعت اولیه تثبیت می‌شود. مشابه همان استدلال هنگامی که لایه دوم دوباره وارد مدار می‌شود، بار موتور بین دو لایه تقسیم می‌شود و در اثر کاهش بار لایه اول، سرعت در سیکل اول گذرایی ابتدا افزایش می‌یابد و پس از نوساناتی با فرکانس گذرایی بیشتر نسبت به حالت قبل به مقدار نامی خود بازمی‌گردد. این تفاوت در فرکانس‌های نوسانات به دلیل تفاوت عمده موجود در پارامترهای ماشین دو لایه و ماشین یک لایه می‌باشد. پارامترهای مقاومت و اندوکتانس سری معادل ماشین دو لایه نصف مقادیر پارامترهای ماشین یک لایه می‌باشند.

در شکل ۵-۵ تغییرات زاویه قدرت در اثر قطع و وصل شدن لایه‌ها ارائه شده است. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که در هنگام تغییر عملکرد موتور از دو لایه به یک لایه زاویه قدرت افزایش می‌یابد. علت این امر را نیز می‌توان اینگونه شرح داد که در حالت تغذیه دو لایه نیمی از بار توسط لایه اول و بقیه بار توسط لایه دوم تامین می‌شد. در حالی که در حالت یک لایه تمام بار توسط یک لایه باید تامین شود و تامین توان بیشتر توسط یک لایه به معنی افزایش زاویه قدرت می‌باشد. در این

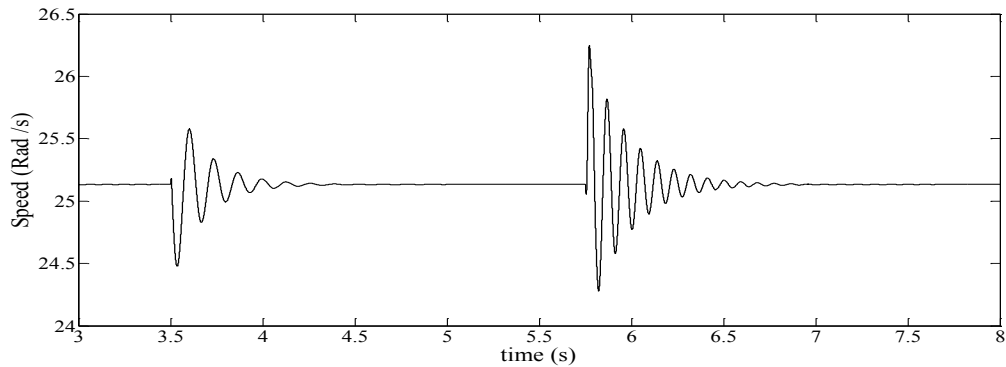
شکل نیز همانند سرعت مکانیکی فرکانس نوسانات گذرابی در حالت تغییر وضعیت موتور از حالت یک لایه به دو لایه بیشتر از همین فرکانس در حالت قطع یکی از لایه‌ها است.

شکل ۵-۶ تغییرات مقدار مؤثر جریان کشیده شده از اینورتر را در طول بازه زمانی شبیه سازی قطع و وصل لایه‌ها نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که در حالت یک لایه، موتور جریان به مراتب کمتری را نسبت به حالت دو لایه از منبع تغذیه می‌کشد. این تفاوت فاحش در جریان‌ها علیرغم یکسان بودن توان خروجی و فرکانس تغذیه به دلیل تفاوت عمده در ضریب توان موتور می‌باشد. ضریب توان پیشفاز موتور یک لایه در بار حدود ۵۰۰ کیلووات، بیشتر از موتور دو لایه می‌باشد. در نمودار جریان مؤثر نوسانات گذرای مشابه نمودارهای قبل قابل مشاهده می‌باشد.

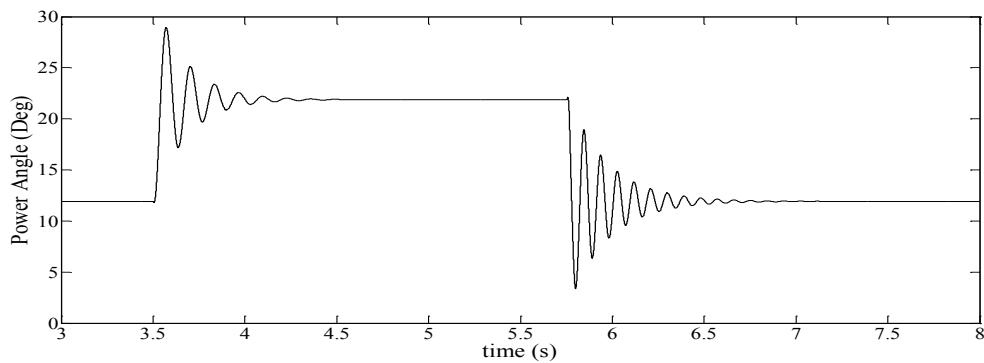
در شکل ۵-۷ تغییرات جریان لحظه‌ای سه فاز آرمیچر لایه‌ای از موتور که در این شبیه سازی همیشه در مدار وجود دارد در طول زمان شبیه سازی ارائه شده است. در این شکل نحوه تغییرات و نوسانات گذرای جریان‌ها در حالت قطع و وصل شدن لایه‌ها و همچنین تفاوت این نوسانات مشاهده می‌شود. شکل ۵-۸ نیز تغییرات جریان لحظه‌ای هر سه فاز آرمیچر لایه‌ای از موتور که در این شبیه سازی ابتدا قطع بوده سپس وصل و دوباره قطع می‌شود را در طول بازه زمانی کمی قبل از وصل تا مدتی بعد از وصل شدن به مدار را نشان می‌دهد. با دقت در این شکل مشاهده می‌شود که در لحظه وصل شدن لایه جریان آن از صفر بطور ناگهانی افزایش می‌یابد. تغییرات و نوسانات جریان را در این شکل می‌توان به سه بازه زمانی تقسیم کرد. دو سیکل اول، نوسانات فوق گذرا که برای مدت زمان بسیار اندک جریان قابل توجهی از منبع کشیده می‌شود و با شیب زیادی میرا می‌شود. پس از نوسانات فوق گذرا، از سیکل سوم به بعد نوسانات گذرا اتفاق می‌افتد. این نوسانات دارای دامنه کمتر بوده و با شیب پوش ملایمی نوسان می‌کند تا پس از مدتی بازه سوم عملکرد یعنی حالت دائمی فرا می‌رسد.

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل‌های ۶ تا ۱۰ می‌توان بطور قاطع ادعا کرد که در اثر

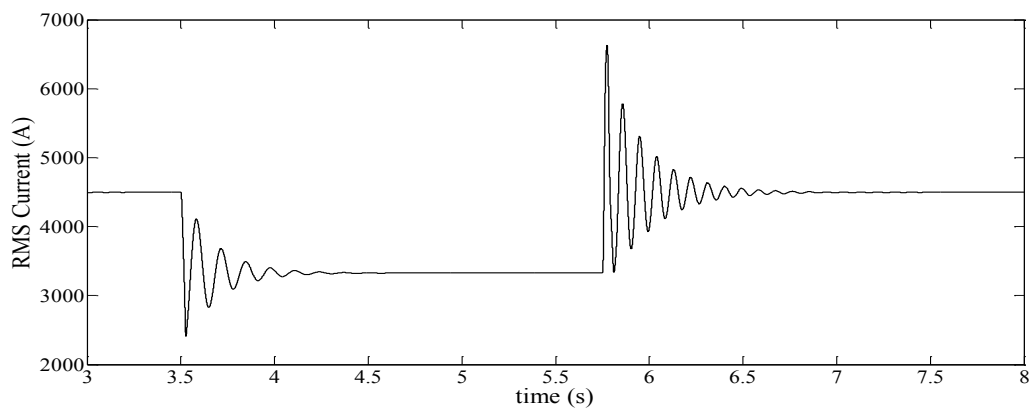
سوئیچینگ لایه‌ها در شرایط عملکردی مختلف، هیچ تنش قابل ملاحظه‌ای به سیستم وارد نمی‌شود. بنابراین برای دستیابی به حداکثر بازده حالت دائمی می‌توان با اطمینان به یک برنامه‌ریزی دقیق برای سوئیچینگ بین لایه‌ها در شرایط عملکرد سرعت و توان مختلف اقدام کرد.



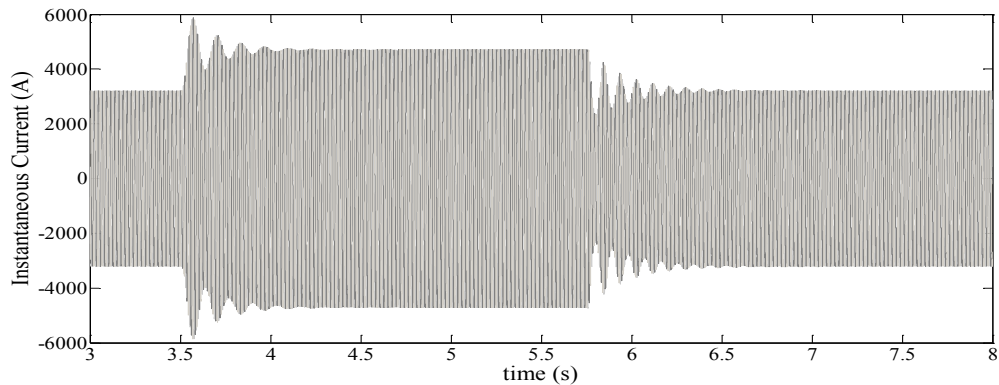
شکل ۵-۴- تغییرات سرعت مکانیکی محور در اثر قطع و وصل لایه‌ها



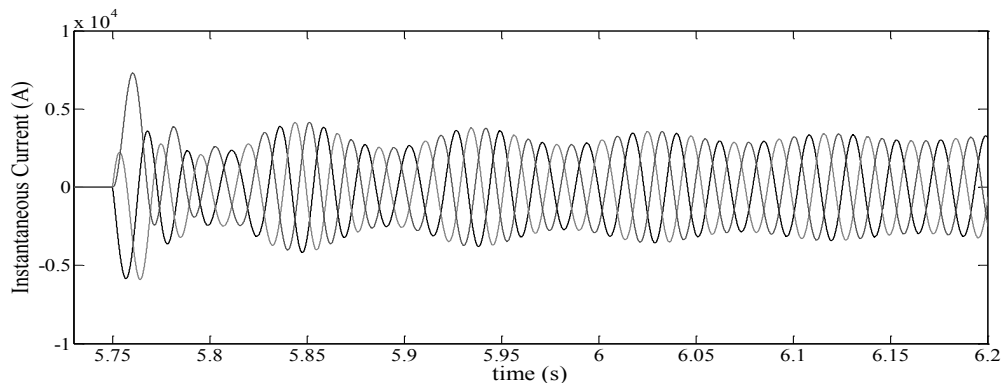
شکل ۵-۵- تغییرات زاویه قدرت در اثر قطع و وصل لایه‌ها



شکل ۵-۶- تغییرات مقدار مؤثر جریان آرمیچر در اثر قطع و وصل لایه‌ها



شکل ۵-۷- تغییرات جریان سه فاز لحظه‌ای آرمیچر لایه‌ی اول موتور در اثر قطع و وصل لایه‌ها

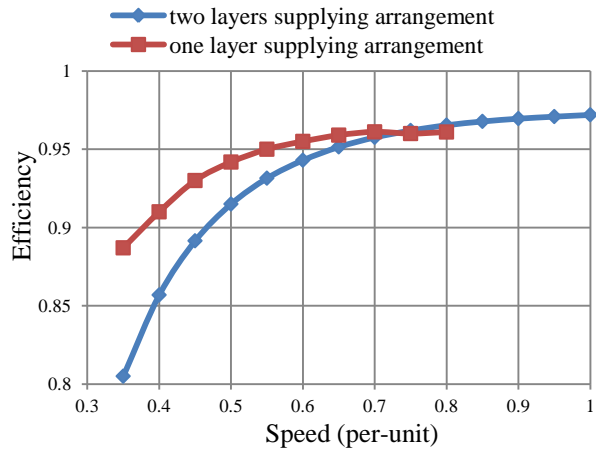


شکل ۵-۸- تغییرات فوق گذرا و گذرا جریان سه فاز لحظه‌ای آرمیچر لایه‌ی دوم موتور در اثر وصل این لایه

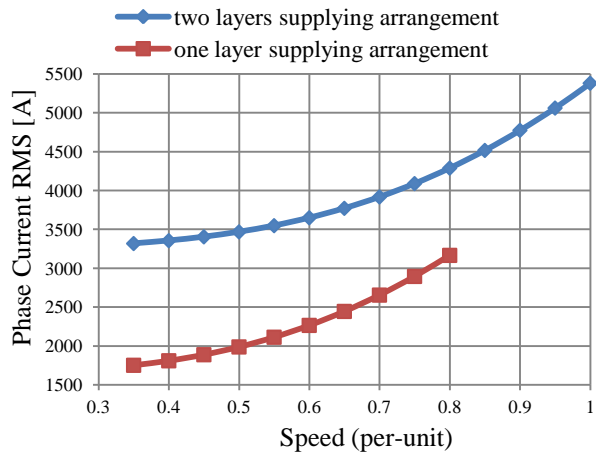
در اینجا به برنامه ریزی تغذیه لایه‌های ماشین دو لایه مورد مطالعه پرداخته می‌شود. هر چند سناریوهای تغذیه لایه‌ها در یک ماشین با تعداد لایه‌های زیاد، گسترده و برنامه ریزی آنها مفصل تر و بهره حاصل از آن بیشتر می‌باشد ولی در اساس با برنامه‌ریزی تغذیه ماشین دو لایه متفاوت نمی‌باشد. برای ماشین دو لایه یکی از نکات جالب و قابل بررسی این است که در شرایط نصف بار نامی و کم‌تر از آن، آیا موتور بصورت یک لایه تغذیه شود یا دو لایه؟ برای پاسخ به این سؤال به بررسی و مقایسه برخی از مشخصه‌های مهم از قبیل بازده، ضریب توان و جریان موثر آرمیچر در دو حالت ممکن پرداخته می‌شود. برای این کار، شبیه سازی به این صورت انجام می‌گیرد که در سرعت‌های مختلف در دو حالت دو لایه و یک لایه، از سرعت نامی تا $0/35$ سرعت نامی با گام $0/05$ ، مقادیر حالت دائمی بازده، ضریب قدرت و جریان در هر نقطه بدست می‌آید. سپس نقاط بدست آمده برای هر یک از

مشخصه‌های مذکور، در نمودارهایی جداگانه بر حسب سرعت رسم می‌شوند. لازم به ذکر است در این شبیه‌سازی‌ها، تغییر سرعت با تغییر توام فرکانس و ولتاژ انجام می‌گیرد بطوریکه قاعده نسبت V_i/f ثابت و بنابراین شار فاصله هوایی ثابت رعایت می‌شود. همچنین با توجه به این موضوع که بار اصطکاکی موتور با مکعب سرعت متناسب است، موتور در سرعتی معادل $0/8$ سرعت نامی دارای توان خروجی نصف توان نامی یعنی 500 کیلو وات خواهد بود و از این سرعت به پایین می‌توان از موتور هم بصورت دو لایه و هم بصورت یک لایه استفاده کرد. در سرعت‌های بیش از $0/8$ سرعت نامی برای رعایت حد مجاز جریان و تلفات قطعا ماشین باید به صورت دولایه کار کند. شکل ۵-۹، نمودارهای بازده را بر حسب سرعت‌های مختلف عملکردی که بصورت درصدهایی از سرعت‌های نامی بیان شده‌اند، برای دو حالت تغذیه موتور بصورت دولایه و یک لایه را نشان می‌دهد. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که برای سرعت‌های بیش از $0/8$ سرعت نامی، نتایج شبیه‌سازی فقط برای موتور در حالت تغذیه همزمان هر دو لایه ارائه شده‌اند ولی به ازای سرعت‌های کمتر از این مقدار نتایج برای هر دو حالت عملکرد دو لایه و یک لایه، نمایش داده شده‌اند. با توجه به این شکل مشخص است، از سرعت بیش از $0/75$ سرعت نامی (توان بیش از 420 کیلووات)، بازده موتور دو لایه از بازده موتور یک لایه بیش‌تر است و در سرعت‌های پایین‌تر بهره ماشین یک لایه بالاتر می‌باشد. این نتیجه دور از انتظار نیست زیرا هر لایه موتور برای توان نامی 500 کیلو وات طراحی شده است و این توان در سرعت برابر با $0/8$ سرعت نامی حاصل می‌شود. به هر حال علت این اختلاف در نتیجه شبیه‌سازی و محاسبات طراحی را می‌توان اینگونه بیان کرد که وقتی موتور بصورت یک لایه تغذیه می‌شود، لایه‌ای که ولتاژ به ترمینال آن اعمال نمی‌شود بصورت ژنراتور بی‌بار عمل می‌کند و توان تلف شده در آهن استاتور این لایه توسط لایه دیگر تامین می‌شود. به عبارت دیگر به علت اینکه هر لایه موتور دو لایه بصورت موازی به تغذیه متصل می‌شوند در نتیجه بازده یک لایه در حالت قطع لایه دیگر تعیین

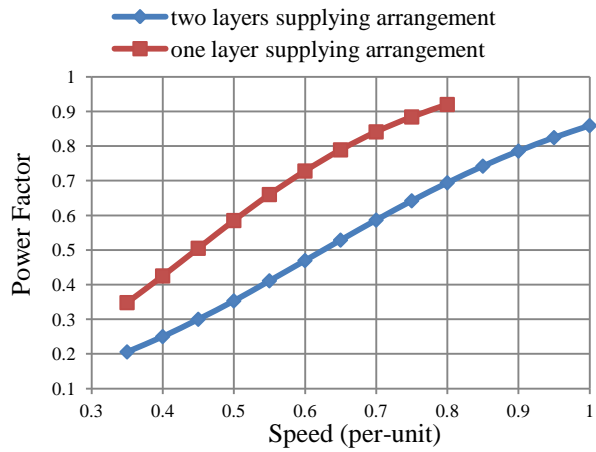
کننده بازده کل موتور است. در تمامی شرایط کاری که هر دو لایه موتور تغذیه می‌شوند هر کدام از لایه‌ها در نیمی از جریان کشیده شده از منبع سهیم هستند. با توجه به شکل ۵-۱۰ یعنی نمودارهای جریان بر حسب سرعت موتور در دو حالت تغذیه دو لایه و تغذیه یک لایه مشاهده می‌شود که در هر سرعت کار، نصف جریان موتور در حالت تغذیه هر دو لایه یعنی جریان هر لایه از موتور، از جریان موتور در حالت تغذیه یک لایه کمتر است. بنابراین در بازه سرعت $0/75$ تا $0/8$ سرعت نامی نیز به دلیل تفاوت در جریان‌ها، تلفات مس در حالت تغذیه دو لایه کمتر و بهره ماشین بالاتر از حالت تغذیه یک لایه می‌باشد. به هر حال همانطور که قبلاً گفته شد در سرعت‌های کمتر از $0/75$ سرعت نامی، بازده کلی در حالت تغذیه یک لایه از حالت تغذیه همزمان هر دو لایه بیشتر می‌باشد. در شکل ۵-۱۱، نمودارهای ضریب توان بر حسب سرعت‌های مختلف عملکردی، برای دو حالت تغذیه موتور بصورت دو لایه و یک لایه، ارائه شده‌اند. با توجه به این شکل مشاهده می‌شود که مقدار ضریب توان بطور قابل توجهی برای حالت تغذیه یک لایه بیشتر از حالت تغذیه دو لایه است. در باره اهمیت بررسی بیشتر این مشخصه باید به این مطلب اشاره کرد که چون برای تغذیه موتور از منبع تغذیه اینورتری استفاده می‌شود لذا جریان زیاد کشیده شده از منبع در حالت تغذیه اختیاری هر دو لایه در سرعت‌های پایین باعث افزایش بیهوده تلفات سوئیچینگ نیز خواهد شد. بنابراین با وجود اینکه بازده موتور در حالت دو لایه در بازه $0/8$ تا $0/75$ سرعت نامی بیشتر است، ولی با توجه به بحث تلفات سوئیچینگ، شاید بهتر باشد که موتور در این بازه نیز بصورت تغذیه یک لایه استفاده شود. شکل ۵-۱۲، نمودارهای مدت زمان ماندگاری زیردریایی در زیر آب را برای دو شرایط تغذیه نشان می‌دهد. این نمودارها بر اساس مشخصه‌های تخلیه باتری‌های سربی اسیدی بدست آمده‌اند. با توجه به این نمودارها، مشاهده می‌شود که در سرعت‌های پایین، زمان ماندگاری زیر دریایی در زیر آب برای حالتی که موتور بصورت یک لایه تغذیه می‌شود بطور قابل توجهی بیشتر از حالتی است که هر دو لایه تغذیه می‌شوند.



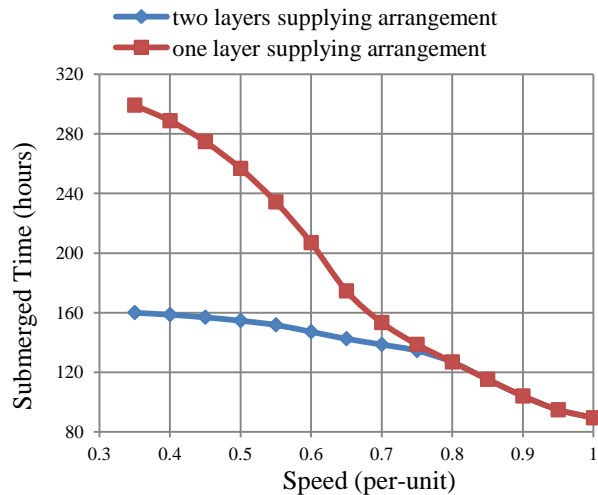
شکل ۵-۹- نمودار بازده بر حسب درصد سرعت نامی



شکل ۵-۱۰- نمودار مقدار موثر جریان آرمیچر بر حسب درصد سرعت نامی



شکل ۵-۱۱- نمودار ضریب توان بر حسب درصد سرعت نامی



شکل ۵-۱۲- نمودار مدت زمان ماندگاری زیر آب بر حسب درصد سرعت نامی

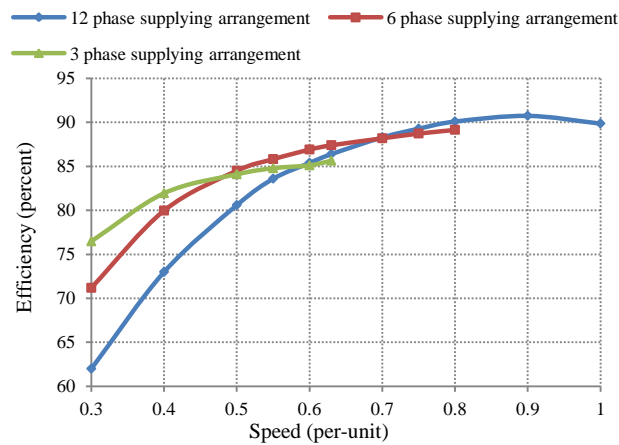
شبیه سازی‌های فوق برای یک سیستم چهار لایه ۲ مگاوات با توان نامی هر لایه ۵۰۰ کیلو وات نیز انجام شده است که نتایج آن در ادامه ارائه شده است.

برای بررسی این موضوع که در بازه‌های توانی مختلف از کدام توپولوژی تغذیه یک لایه، دو لایه و یا چهار لایه استفاده شود به بررسی و مقایسه برخی از مشخصه‌های مهم از قبیل بازده کل ماشین و تلفات در حالت‌های ممکن پرداخته می‌شود. با توجه به این موضوع که بار اصطکاکی موتور با مکعب سرعت متناسب است، موتور در سرعتی معادل $0/63$ سرعت نامی دارای توان خروجی برابر ۵۰۰ کیلو وات و در سرعت $0/8$ سرعت نامی دارای توان خروجی برابر ۱ مگاوات خواهد بود. بنابراین موتور برای رعایت حد مجاز جریان و تلفات ماشین می‌تواند در شرایط عملکرد با سرعت‌های حدودی زیر $0/63$ سرعت نامی با هر سه توپولوژی تغذیه، در سرعت‌های بین $0/63$ تا $0/8$ سرعت نامی به صورت دو لایه و چهار لایه و در سرعت‌های بالای $0/8$ سرعت نامی فقط به صورت چهار لایه مورد بهره برداری قرار گیرد. این مقادیر حدی با توجه به داده‌های طراحی مربوط به توان هر لایه ارائه شده است که طبیعی است با مقادیر بهینه متفاوت باشند. برای تعیین مقادیر بهینه دقیقتر، شبیه سازی‌های لازم به این صورت انجام می‌گیرند که برای سه حالت چهار، دو و یک لایه، در محدوده سرعت از

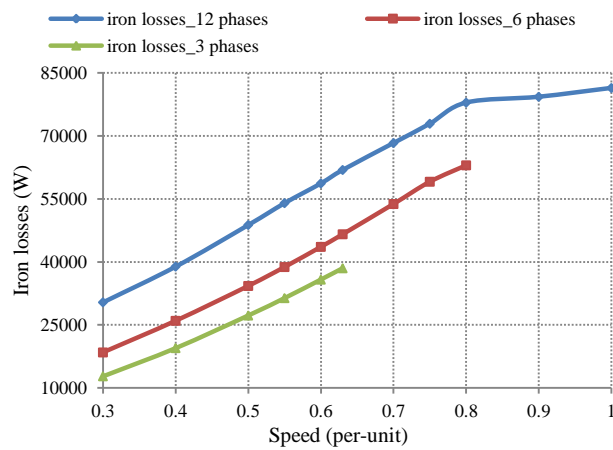
۰/۳ سرعت نامی با گام ۰/۰۵ تا سرعتی که جریان ماشین از حد حرارتی مجاز سیم‌پیچی‌ها خیلی فراتر نرود، مقادیر حالت دائمی بازده کلی سیستم و جریان موثر هر فاز بدست می‌آیند. سپس مقادیر بازده و تلفات برای هر سه توپولوژی به صورت نمودارهایی بر حسب سرعت رسم شده و با هم مقایسه می‌شوند. شکل ۵-۱۳، نمودارهای بازده را بر حسب سرعت که بصورت پریونیت بیان شده‌اند، برای سه حالت تغذیه موتور بصورت چهار، دو و یک لایه را نشان می‌دهد. در این شکل برای رعایت جریان مجاز سیم‌پیچی‌ها نمودارهای مربوط به نتایج شبیه‌سازی‌ها برای توپولوژی‌های تغذیه متفاوت در محدوده‌های سرعت متفاوت رسم شده‌اند. با توجه به این نمودارها مشاهده می‌شود که از سرعت بیش از ۰/۷ پریونیت (توان بیش از ۶۸۶ کیلووات)، بازده موتور چهار لایه از بازده سیستم دو لایه بیش‌تر است و در سرعت‌های پایین‌تر بهره ساختار دو لایه بالاتر می‌باشد. همچنین از سرعت بیش از ۰/۵ پریونیت (توان بیش از ۲۵۰ کیلووات)، بازده سیستم دو لایه از توپولوژی یک لایه بیشتر است. یادآوری می‌شود که با توجه به داده‌های طراحی موتور انتظار می‌رفت که در شرایط عملکرد با توان‌های در بازه ۰ تا ۵۰۰ کیلووات ماشین یک لایه، در بازه ۵۰۰ تا ۱۰۰۰ کیلووات ماشین دو لایه و در بازه ۱ تا ۲ مگاوات ماشین چهار لایه دارای بهره‌های ماکزیمم باشند. علت این اختلافات در نتایج شبیه‌سازی‌ها و محاسبات طراحی را می‌توان در تلفات آهن و تلفات اهمی سیستم جستجو کرد. تلفات عمده سیستم مورد بررسی تلفات آهن موتور و تلفات اهمی موتور و اینورتر می‌باشد. تلفات آهن با مربع ولتاژ اعمالی به موتور و تلفات مس موتور و تلفات اینورتر (تلفات اهمی) با مربع جریان رابطه مستقیم دارند. در سرعت‌ها و توان‌های پایین به علت پایین بودن سطح جریان، تلفات آهن نقش تعیین‌کننده در تلفات کل را دارد. تقریباً در تمامی بازه‌های سرعت و همانطور که در شکل ۵-۱۴ مشاهده می‌شود تلفات آهن سیستم چهار لایه از سیستم دو لایه و سیستم دو لایه از سیستم یک لایه بیشتر است. این موضوع را شاید به زاویه قدرت کوچکتر ماشین چهار لایه مرتبط دانست. در یک

توان ثابت زاویه قدرت سیستم چهار لایه از دو لایه و سیستم دو لایه از یک لایه کوچکتر می‌باشد. در یک زاویه توان کوچک با توجه به رابطه توان در ماشین‌های سنکرون برای تامین توان مورد نیاز، ولتاژ ترمینال و در نتیجه تلفات آهن بزرگتر خواهد بود. به هر حال از یک سرعت و توان مشخص بالاتر، به علت افزایش سطح جریان تلفات اهمی سیستم، تلفات غالب و تعیین کننده می‌شود. برعکس تلفات آهن، تلفات مس در کل بازه سرعت برای ماشین چهار لایه به دلیل تعداد شاخه‌های بیشتر و جریان فاز کمتر آن از تلفات مس ماشین‌های یک لایه و دو لایه کمتر است (شکل ۵-۱۵). به هر حال در هر سه حالت تا سرعت‌های خاصی تلفات آهن موتورها از تلفات اهمی سیستم بیشتر است و از آن سرعت‌ها به بعد تلفات اهمی از تلفات آهن موتورها بیشتر می‌شود. برای مثال به شکل ۵-۱۶ که تلفات آهن، تلفات مس و تلفات کل سیستم چهار لایه را نمایش داده است توجه نمایید.

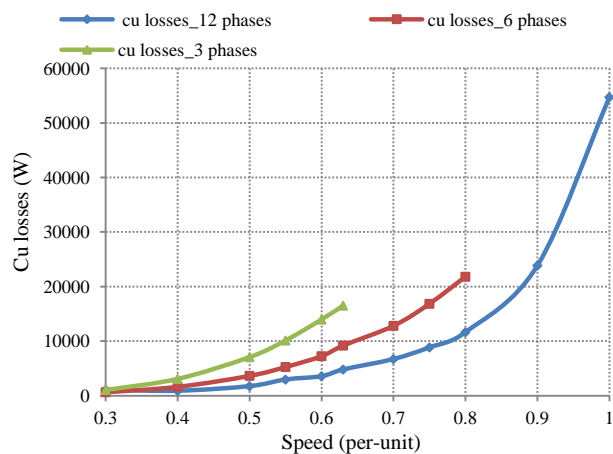
به عنوان جمع بندی بحث بازده توپولوژی‌های مختلف تغذیه می‌توان با توجه به نتایج شبیه سازی‌ها چنین گفت که تلفات آهن و اهمی سیستم بنحوی تغییر می‌کنند که در سرعت‌های بالاتر از ۰/۵ پریونیت، تلفات کل سیستم دو لایه کمتر از تلفات کل سیستم یک لایه می‌شود. به همین ترتیب در سرعت‌های بالاتر از ۰/۷ پریونیت نیز تلفات کل سیستم چهار لایه از دو لایه کمتر می‌شود. بنابراین نتایج شبیه سازی‌ها برای بازده نشان می‌دهند که اگر از ماشین در بازه سرعت ۰ تا ۰/۵ پریونیت یا توان ۰ تا ۲۵۰ کیلووات بصورت یک لایه، در بازه سرعت ۰/۵ تا ۰/۷ پریونیت یا توان ۲۵۰ تا ۶۸۶ کیلووات بصورت دو لایه و در سرعت‌های بالاتر از ۰/۷ پریونیت یا توان‌های بیشتر از ۶۸۶ کیلووات بصورت چهار لایه بهره برداری شود بیشترین بازده و زمان مدت ماندگاری زیر دریایی در زیر آب برآورده خواهد شد.



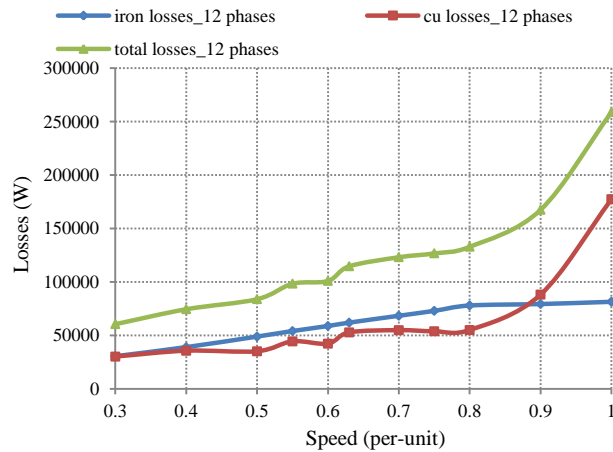
شکل ۵-۱۳- نمودار بازده بر حسب سرعت سیستم چهار لایه تغذیه به صورت یک، دو و چهار لایه (۳، ۶ و ۱۲ فاز)



شکل ۵-۱۴- نمودار تلفات آهن بر حسب سرعت موتور تغذیه شده به صورت یک، دو و چهار لایه (۳، ۶ و ۱۲ فاز)



شکل ۵-۱۵- نمودار تلفات اهمی بر حسب سرعت سیستم چهار لایه به صورت یک، دو و چهار لایه (۳، ۶ و ۱۲ فاز)



شکل ۵-۱۶- نمودار تلفات آهن، مس و تلفات کل بر حسب سرعت سیستم چهار لایه به صورت چهار لایه (۱۲ فاز)

برای برنامه ریزی خودکار قطع و وصل لایه‌ها در بازه‌های سرعت مختلف می‌توان دو الگوریتم کمی متفاوت از هم متصور شد. الگوریتم اول، به این صورت است که هنگامی که سرعت مرجع توسط اپراتور به سیستم وارد می‌شود، سرعت موتور هنگام عبور از سرعت‌های مرزی بدون هیچ وقفه‌ای با قطع یا وصل شدن لایه‌ها، برای رسیدن به سرعت مرجع کم یا زیاد می‌شود. الگوریتم دوم به این صورت است که پس از اعمال فرمان سرعت مرجع، با توجه به اینکه سرعت واقعی و سرعت دلخواه مرجع موتور در کدامیک از محدوده‌های سرعت قرار دارند تصمیم‌گیری می‌شود که آیا لایه یا لایه-های جدید به مدار وصل و یا از مدار خارج شوند. بدین ترتیب که ابتدا اگر این دو مقدار در یک محدوده نباشند، مرجع جدید سرعت روی سرعت مرزی آن ناحیه تنظیم و به روز می‌شود. سپس هنگامی که سرعت موتور به مقدار مرزی می‌رسد در صورت لزوم پس از یک وقفه کوتاه لایه یا لایه-هایی به مدار وصل و یا از مدار خارج می‌شوند و مقدار مرجع سرعت در یک مقدار جدید تثبیت می‌شود. در غیر اینصورت هنگامی که مقدار سرعت موتور و سرعت مرجع اصلی در یک محدوده سرعت قرار می‌گیرند، مرجع سرعت در مقدار اصلی خود قرار داده شده و بدون قطع و وصل لایه‌ای نهایتاً موتور به سرعت مورد نظر همگرا می‌شود. در الگوریتم اول در زمان قطع و وصل لایه‌ها و اعمال و یا حذف ناگهانی بار لایه‌های موتور، تنش‌ها و فراجهش‌هایی در مشخصه‌های عملکردی موتور از جمله

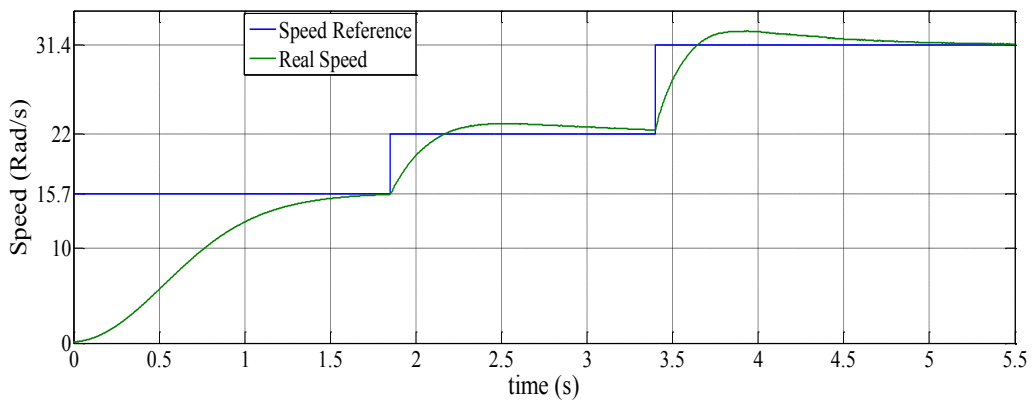
سرعت و جریان، بوجود می‌آید. ولی در الگوریتم دوم ابتدا با رساندن سرعت موتور به مقادیر مرزی در هر محدوده و در نهایت به سرعت مرجع، از وقوع چنین تنش‌هایی جلوگیری می‌شود. جدول ۵-۱ فلوجارت مربوط به الگوریتم دوم را که برای موتور چهار لایه انتخاب شده است، نشان می‌دهد. در این فلوجارت ω_1 سرعت اندازه گیری شده واقعی موتور و ω_2 سرعت مرجع یا سرعت دلخواه نهایی می‌باشند. جدول ۵-۱ با توجه به محدوده نسبتاً دقیق سه ناحیه کاری ارائه شده است و خواسته‌های عملکرد مطلوب موتور را با دقت خوبی برآورده می‌سازد. محدوده دقیق سه ناحیه کاری برای تحقق راندمان ماکزیمم در تمامی شرایط عملکردی توسط یک شبیه سازی دقیق بدست آمده است و در الگوریتم به جای محدوده‌های تقریبی بکار گرفته شده است.

جدول ۵-۱- الگوریتم قطع و وصل لایه‌های یک سیستم چهار لایه

سرعت لحظه‌ای	سرعت مرجع مورد نظر	سرعت مرجع لحظه‌ای	عملکرد موتور
$0 < \omega \leq 0.5$	$0 < \omega_{ref} \leq 0.5$	$\omega_{ref}^* = \omega_{ref}$	۱ لایه
	$\omega_{ref} > 0.5$	$\omega_{ref}^* = 0.5$	۱ لایه
$0.5 < \omega < 0.7$	$0 < \omega_{ref} \leq 0.5$	$\omega_{ref}^* = 0.5$	۲ لایه
	$0.5 < \omega_{ref} < 0.7$	$\omega_{ref}^* = \omega_{ref}$	۲ لایه
	$\omega_{ref} \geq 0.7$	$\omega_{ref}^* = 0.7$	۲ لایه
$\omega \geq 0.7$	$\omega_{ref} < 0.7$	$\omega_{ref}^* = 0.7$	۴ لایه
	$\omega_{ref} \geq 0.7$	$\omega_{ref}^* = \omega_{ref}$	۴ لایه

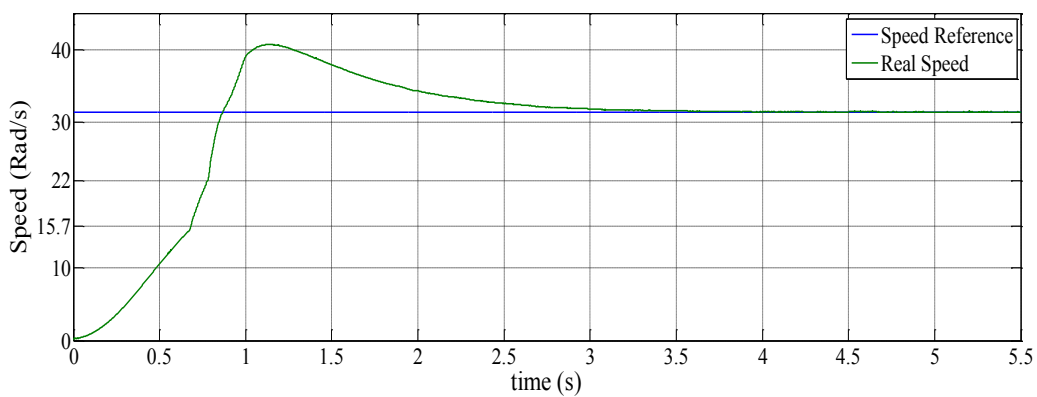
اکنون پس از مشخص شدن بازه کاری هر یک از حالت‌های تغذیه، الگوریتم جدول ۵-۱ برای به مدار آوردن و خروج لایه‌ها طراحی شده است و در شبیه سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این شبیه سازی سرعت موتور از سرعت ω_1 به سرعت ω_2 تغییر می‌کند. برای اینکه در هنگام سوئیچ زنی

لایه‌ها کم‌ترین استرس به موتور وارد شود، الگوریتم به این صورت تنظیم شده است که با توجه به اینکه ω_1 و ω_2 در کدام بازه قرار گرفته باشند، مرجع سرعت در هر بازه بروزرسانی شود تا در نهایت موتور به سرعت مدنظر برسد. برای مثال مطابق شکل ۵-۱۷ اگر موتور بخواهد از سرعت $\omega_1 = 0$ به سرعت $\omega_2 = 1$ پریونیت برسد، ابتدا موتور بصورت یک لایه به سرعت $0/5$ پریونیت می‌رسد. بعد از این سرعت لایه دوم وارد مدار می‌شود و موتور بصورت دو لایه به سرعت $0/7$ می‌رسد و در نهایت در این سرعت دو لایه دیگر وارد مدار می‌شوند و موتور با چهار لایه به آرامی و بدون تنش به سرعت ۱ پریونیت می‌رسد. همانطور که گفته شد برای قطع و وصل لایه‌ها، الگوریتم دیگری را نیز می‌توان اجرا کرد که در آن مرجع سرعت همواره ثابت و برابر با مقدار نهایی سرعت دلخواه بوده و سویچینگ لایه‌ها در مرز بازه‌های سرعت انجام می‌گیرد. به هر حال شبیه سازی‌ها انجام گرفته نشان می‌دهد که اجرای این الگوریتم ممکن است باعث ایجاد تنش‌هایی در موتور شود. به عنوان مثال در شکل ۵-۱۸ منحنی سرعت بدست آمده با این الگوریتم برای شرایط عملکرد مشابه با نمودار شکل ۵-۱۷ برای مقایسه نمایش داده شده است. با مقایسه شکل ۵-۱۷ و شکل ۵-۱۸ مشاهده می‌شود که در شکل ۵-۱۸ سرعت دارای فراجهدش بیشتری می‌باشد. همچنین در شکل ۵-۱۹ مقدارهای موثر جریان یک لایه از موتور برای دو الگوریتم در کنار هم ارائه شده است. از این شکل مشاهده می‌شود که در جریان بدست آمده با الگوریتم مرجع ثابت و سویچینگ بلادرنگ در مرز بازه‌های سرعت فراجهدش قابل توجهی ایجاد می‌شود که این افزایش جریان شاید در بعضی شرایط عملکرد از حد مجاز جریان سوئیچ‌های اینورتر و سیم‌پیچ‌های آرمیچر تجاوز کند و باعث سوختن آنها شود.

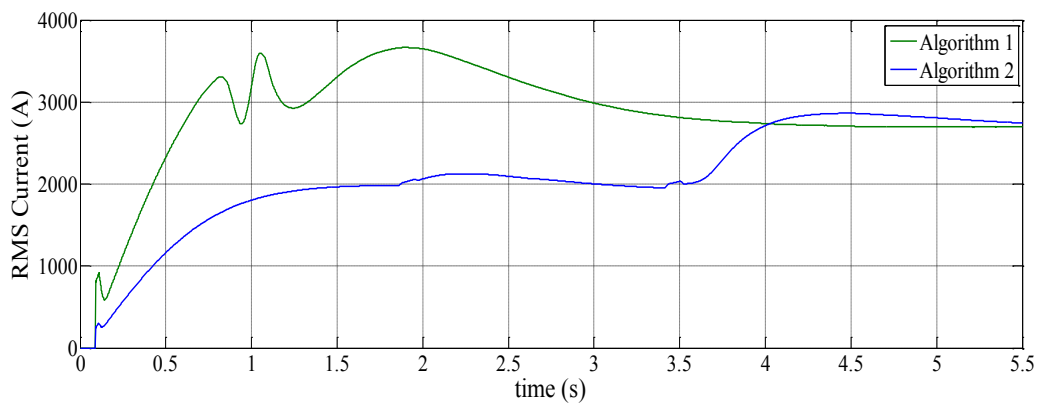


شکل ۵-۱۷- تغییرات سرعت مرجع و مقدار واقعی سرعت در هنگام سوئیچینگ لایه‌ها با استفاده از الگوریتم مراجع

سرعت متغیر



شکل ۵-۱۸- سیگنال مرجع سرعت و مقدار واقعی سرعت بدست آمده با استفاده از الگوریتم مرجع سرعت ثابت



شکل ۵-۱۹- تغییرات مقدار مؤثر جریان بدست آمده با دو الگوریتم مرجع سرعت ثابت و مرجع سرعت متغیر

۵-۶- نتیجه گیری

در این فصل با توجه به داده‌های طراحی، مدل‌سازی و شبیه‌سازی یک موتور *AFPM* بدون شیار نوع *TORUS* دو لایه به عنوان موتور پیشران یک زیردریایی دیزل الکتریک ارائه شد. با مدل‌سازی و اعتبار سنجی موتور طراحی شده به روش اجزاء محدود، پارامترهای مداری موتور بدست آمد و با شبیه‌سازی موتور دو لایه ۱ مگاواتی در فضای نرم افزار *MATLAB/SIMULINK*، رفتار حالت دائمی و گذرای موتور طراحی شده در شرایط قطع و وصل لایه‌ها مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. رفتار گذرای پارامترهای ورودی و خروجی موتور در هنگام سوئیچینگ لایه‌ها نمایش داده شد و اینها نشان دادند که قطع و وصل لایه‌ها در محدوده‌ای که توان لایه‌های تغذیه شونده از توان بار کمتر نباشد بدون هیچگونه مسئله پایداری و یا تجاوز از محدوده حرارتی موتور به راحتی قابل انجام است. چگونگی تغذیه لایه‌های موتور دو لایه و چهار لایه به منظور عملکرد بهینه حداکثر بازده تحت سرعت‌های مختلف زیردریایی به منظور ماندگاری بیشتر در زیر آب ارائه شد. مشخصه‌های جریان، ضریب توان و مدت ماندگاری ماشین در دو حالت تغذیه برای موتور دو لایه نیز نمایش داده شد. در این فصل برای موتور دو لایه نشان داده شد که در سرعت‌های کمتر از حدود $0/8$ سرعت نامی امکان استفاده از موتور به دو صورت یک لایه و دو لایه فراهم است ولی با توجه به نتایج شبیه‌سازی‌ها بازده موتور در حالت تغذیه دو لایه برای سرعت‌های بیش از $0/75$ سرعت نامی از حالت تغذیه یک لایه بیشتر است. این روش برنامه‌ریزی و تغذیه لایه‌های مختلف در بارها و سرعت‌های متفاوت قابل توسعه و پیاده‌سازی برای ماشین‌های با تعداد لایه‌های بیشتر و طبیعتاً با صرفه انرژی به مراتب بیشتر از ماشین دو لایه می‌باشد.

فصل ششم

نتیجه گیری

در این پایان نامه در فصل اول پس از مطرح شدن اهمیت ماشین‌های چند لایه، معرفی ساختارهای مختلف ماشین‌های شار محوری و بررسی انواع ماشین‌های چند لایه و با بررسی مقالات و منابع مختلف ساختار *TORUS* بدون شیار که از نظر مشخصه‌های مختلف از جمله چگالی توان، بازده و سطح نویز نسبت به سایر ساختارها از برتری نسبی برخوردار بود، برگزیده شد. در فصل دوم یک الگوریتم طراحی جامع برای این ساختار ارائه گردید. پس از تدوین الگوریتم طراحی، ماشین‌های متعددی در توان‌های مختلف و تعداد لایه‌های متفاوت با در نظر گرفتن قیده‌های مسئله طراحی شد. این طراحی‌ها با استفاده از یک برنامه کامپیوتری بهینه شده برای پارامترهای اختیاری طراحی نسبت به چگالی توان و بازده ماشین صورت می‌پذیرد. به عبارت دیگر از میان تعداد زیاد طراحی ممکن برای یک توان و تعداد لایه مشخص، بهینه‌ترین طرح با توجه به توابع هدف مذکور و قیود موجود، برگزیده می‌شود. برای اعتبارسنجی الگوریتم طراحی تدوین شده، با استفاده از نرم افزار روش اجزاء محدود (*FEM*) ماشین‌های طراحی شده مدل‌سازی شدند و مشخصه‌های مغناطیسی بدست آمده از نرم‌افزار با مقادیر بدست آمده توسط الگوریتم طراحی مورد مقایسه قرار گرفت. در ادامه پس از مدل‌سازی طرح-های بدست آمده در نرم افزار اجزاء محدود و استخراج ماتریس اندوکتانس، هر طرح در نرم افزار متلب شبیه سازی شد تا رفتار دینامیکی گذرای آن‌ها مورد بررسی قرار گیرد. با این کار مشخصه‌های دینامیکی و دائمی ماشین‌ها در شرایط عملکردی مختلف بدست آمد و در نتیجه تصمیم‌گیری شد که در هر توان ماشین بصورت چند لایه طراحی شود که بهترین عملکرد را داشته باشد. با انجام این شبیه سازی‌ها و بررسی نتایج آن و مقایسه‌هایی که صورت گرفت مشاهده شد تعداد لایه‌های سه تا شش لایه اهداف مد نظر طراح را که مهمترین آن می‌تواند بازده باشد را بر آورده می‌کند. مشاهده شد که ماشین چند لایه به یکنواخت شدن بازده در سرعت‌های مختلف کمک می‌کند ولی همانطور که بیان شد تعدد بیش از حد لایه‌ها به علت افزایش تلفات آهن باعث کاهش بازده می‌شود.

سر انجام در یک فصل بصورت جداگانه یکی از ماشین‌های چند لایه طراحی شده در فضای سیمولینک شبیه سازی شد و رفتار دینامیکی گذرای ماشین در شرایط قطع و وصل لایه‌های مختلف به منبع تغذیه در بارها و سرعت‌های مختلف، مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. در پایان الگویی برای ترکیب لایه‌های مناسب برای تامین توان مورد نیاز در سرعت‌های مختلف برای حصول بهره بالا، تلفات انرژی کم و دیگر شاخصه‌های عملکردی مطلوب ارائه شد. رفتار گذرای پارامترهای ورودی و خروجی موتور در هنگام سویچینگ لایه‌ها نشان دادند که قطع و وصل لایه‌ها در محدوده‌ای که توان لایه‌های تغذیه شونده از توان بار کمتر نباشد بدون هیچگونه مسئله پایداری و یا تجاوز از محدوده حرارتی موتور به راحتی قابل انجام است. چگونگی تغذیه لایه‌های موتور دو لایه و چهار لایه به منظور عملکرد بهینه حداکثر بازده تحت سرعت‌های مختلف زبردربایی به منظور ماندگاری بیشتر در زیر آب ارائه شد. مشخصه‌های جریان، ضریب توان و مدت ماندگاری ماشین در دو حالت تغذیه برای موتور دو لایه نیز نمایش داده شد. این روش برنامه‌ریزی و تغذیه لایه‌های مختلف در بارها و سرعت‌های متفاوت قابل توسعه و پیاده سازی برای ماشین‌های با تعداد لایه‌های بیشتر و طبیعتاً با صرفه انرژی به مراتب بیشتر از ماشین دو لایه می‌باشد.

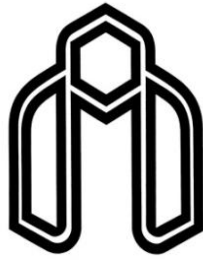
- [1] A. Bellara, Y. Amara, G. Barakat and P. Reghem , “Analytical Modeling of the Magnetic Field in Axial Flux Permanent Magnet Machines with Semi-Closed Slots at No Load” XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, Rome.
- [2] Fabrizio Marignetti, Giovanni Tomassi, Piergiacomo Cancelliere, Vincenzo Delli Colli, Roberto Di Stefano, Maurizio Scarano , “Electromagnetic and Mechanical design of a Fractional-slot-windings Axial-flux PM synchronous machine with Soft Magnetic Compound Stator”, Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE.
- [3] A. Parviainen, J. Pyrhönen, M. Niemelä, “AXIAL FLUX INTERIOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR WITH SINUSOIDALLY SHAPED MAGNETS” ISEF 2001 - 10th International Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical Engineering Cracow, Poland, September 20-22, 2001.
- [4] Jacek F. Gieras, Rong-Jie Wang and Maarten J. Kamper, "Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines", Publisher: Springer; Second edition, 2008.
- [5] Funda Sahin, “DESIGN AND DEVELOPMENT OF A HIGH-SPEED AXIAL-FLUX PERMANENT- MAGNET MACHINE”, PhD thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 2001.
- [6] M. Aydin, S. Huang and T. A. Lipo, “Axial Flux Permanent Magnet Disc Machines: A Review”, Research Report, University of Wisconsin-Madison 2004.
- [7] Asko Parviainen, “DESIGN OF AXIAL-FLUX PERMANENT-MAGNET LOW-SPEED MACHINES AND PERFORMANCE COMPARISON BETWEEN RADIAL-FLUX AND AXIAL-FLUX MACHINES” ”, PhD thesis, Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland, 2005.
- [8] Janne Kinnunen, “DIRECT-ON-LINE AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR STATIC AND DYNAMIC PERFORMANCE”, PhD thesis, Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland, 2007.
- [9] M. Aydin, S. Huang and T. A. Lipo, “Optimum Design and 3D Finite Element Analysis of Non-slotted and Slotted Internal Rotor Type Axial Flux PM Disc Machines”, Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2001.
- [10] S. Huang, M. Aydin, and T. A. Lipo, “Comparison of (Non-Slotted and Slotted) Surface Mounted PM Motors and Axial Flux Motors for Submarine ship Drives”, University of Wisconsin-Madison, 3rd Naval Symposium on Electrical Machines, 2000.
- [11] Metin Aydin, Surong Huang, and Thomas A. Lipo, “Torque Quality and Comparison of Internal and External Rotor Axial Flux Surface-Magnet Disc Machines”, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 53, No. 3, June 2006.
- [12] S. Huang, M. Aydin, and T. A. Lipo, “Torque Quality Assessment and Sizing Optimization for Surface Mounted Permanent Magnet Machines”, Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE.

- [13] S. Huang, J. Luo, F. Leonardi and T.A. Lipo, "A Comparison of Power Density for Axial Flux Machines Based on General Purpose Sizing Equations," IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 2, pp. 185-192, 1999.
- [14] S. Huang, J. Luo, F. Leonardi and T.A. Lipo, "A General Approach to Sizing and Power Density Equations for Comparison of Electrical Machines," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 34, No. 1, pp. 92-97, 1998.
- [15] Huang, S., Aydin, M., Lipo, T.A., "TORUS Concept Machines: Pre-Prototyping Design Assessment for Two Major Topologies". In Proceedings of IEEE Industry Applications Conference, Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Vol. 3, p. 1619-1625, 2001.
- [16] M. Aydin, "Axial Flux Surface Mounted Permanent Magnet Disc Motors For Smooth Torque Traction Drive Application", PhD Thesis, Wisconsin Madison University, 2004.
- [17] Campbell, P.; "The magnetic circuit of an axial field D.C. electrical machine";IEEE Transactions on Magnetics; Volume 11, Issue 5, Sep 1975,pp.:1541 – 1543.
- [18] Caricchi, F.; Crescimbin, F.; Fedeli E.; Noia, G.; "Design and Construction of a Wheel-Directly-Coupled-Axial-Flux PM Motor Prototype for Evs", Industry Applications Conference, Thirty-First IAS Annual Meeting, Oct. 1994, pp.:254 – 261.
- [19] F. Libert, "Design, Optimization and Comparison of Permanent Magnet Motors for a Low-Speed Direct-Driven Mixer", Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm 2004.
- [20] E. Spooner and B. J. Chalmers, "Torus: A slotless, toroidal-stator, permanent-magnet generator," Proc. Inst. Elect. Eng., vol. 139, pt. B, no. 6, pp. 497–506, Nov. 1992.
- [21] Parker, R. J.; "Advances in Permanent Magnetism", Wiley-Interscience, New York,1994
- [22] Wu, W.; Spooner, E.; Chalmers, B.J.; "Design of slotless TORUS generators with reduced voltage regulation", IEE Proceedings, Electric Power Applications, Volume 142, Issue 5, Sept. 1995, pp.:337 – 343
- [23] JMAG Designer 10.5 Online Help, [2011].
- [24] Leigh Piper and Sumedha Rajakaruna, "Comparison of Performance of Diesel and Fuel Cell based Submarine Power Supplies", IEEE ICSET 2010.
- [25] . Benjamin A. Skinner, Patrick R. Palmer, and Geoffrey T. Parks, "Multi-Objective Design Optimisation of Submarine Electric Drive Systems", 2007 IEEE.
- [26] . David
- [27] . David Williams and Anders Folbert, "Energy Considerations for a Long Range Diesel Electric Submarine", 2011 IEEE.
- [28] . Yin Binchuan, Zou Yunping and Wang Jing, "Studies on New High-Effective Power System of Conventional Submarine", 2003 IEEE.
- [29] Paul C.Krause. Analysis of Electric Machinery.

[۳۰] ماشین‌های الکتریکی تئوری، عملکرد و کاربردها، تالیف: پروفیسور بیم بهارا، ترجمه: دکتر سلطانی، دکتر لسانی، انتشارات قائم، چاپ پنجم ۱۳۸۷.

Abstract

In many applications such as submarine propulsion systems, need for different powers in wide range, various speeds and operating in fault conditions, the machine must be designed that is provided high torque and required power at constraints such as low size and weight, high reliability, easy maintenance, low noise and vibration and multi voltage power supply. The study on many machine structures shows that multi-layer permanent magnet machines are appropriate for these applications. These motors can be used in different speeds proportional to required power which is performed through layer switching appropriately. So, the motor operates in the rated power which is caused to increase efficiency. Among permanent magnet machines, axial flux machines due to type of their special structure are appropriated for operating as multi-layer system. In previous papers, has not been enough attention about multi-layer permanent magnet machines designing. This thesis will discuss how to choose the number of layers during multi-layer machine designing in high power range. Also, transient-dynamic performance of the machine is investigated in the layer switching conditions in different loads and speeds via performing simulations. In the end of this thesis, a pattern is offered to appropriate layer combinations for providing required power in the various speeds to reach good performance indexes.



Shahrood University of Technology
Faculty of Electrical & Robotic Engineering

Design of number of multi-layer axial flux permanent magnet layers

Soheil Abdollahi

Supervisor:

Dr. Ahmad Darabi

A thesis submitted in partial fulfillment of the
requirements for the degree of
Master of Science in Electrical Engineering

September 2013