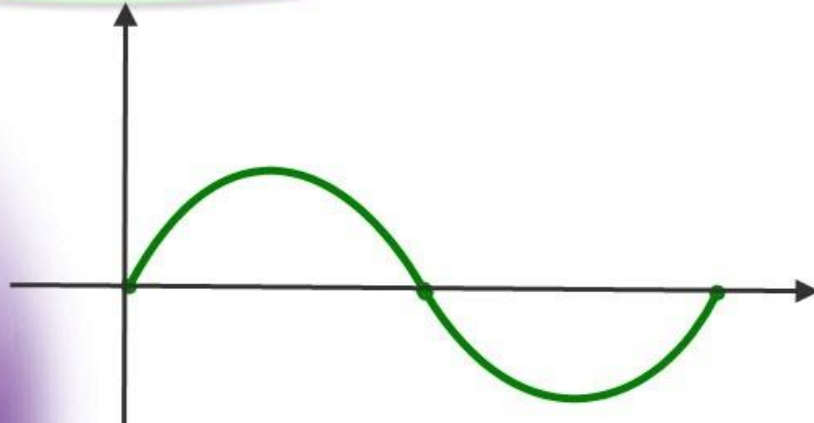


برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



برای دریافت فایل word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

موضوع پروژه:

بهینه سازی طراحی و مدلسازی مطلوب با هدف افزایش بازده

ی موتور سنکرون آهنربای دائم خطی

برای خرید فایل word این پروژه [اینجا کلیک کنید](#).

(شماره پروژه = ۲۶۲)

پشتیبانی : ۰۹۳۵۵۴۰۵۹۸۶

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

فهرست مطالب

عنوان..... صفحه

چکیده: ۶

فصل اول: کلیات

لزوم انجام تحقیق..... ۱۰

روند ارائه مطالب..... ۱۱

فصل دوم: مدلسازی به کمک مدار معادل مغناطیسی

مقدمه ۱۴

اصول روش مدار معادل مغناطیسی..... ۱۵

ضریب کارتر ۱۹

اثر شیار و دندانه..... ۲۴

جریان آرمیچر ۲۷

اثر اشباع آهن ۳۲

جریان القایی ۳۳

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

نیرو و گشتاور ۳۵

تابع توزیع چگالی شار..... ۳۶

فصل سوم: مدار معادل پیشنهادی برای محاسبه تلفات هسته

مدار معادل مغناطیسی پیشنهادی..... ۴۰

مدلسازی اولیه ۴۰

مدلسازی ثانویه..... ۴۳

مدلسازی فاصله هوایی..... ۴۴

حل مدار معادل مغناطیسی..... ۴۷

تابع توزیع چگالی شار..... ۴۹

محاسبه نیرو ۵۰

ارزیابی مدل پیشنهادی..... ۵۱

مدلسازی الکتریکی..... ۵۹

مدلسازی مکانیکی..... ۶۲

فصل چهارم: محاسبه و تحلیل تلفات موتور سنکرون آهنربای دائم خطی

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

۶۴..... تلفات آهن ماشینهای سنکرون آهنربای دائم

۶۵..... تلفات فوکوی دنداننه

۷۱..... محاسبه تلفات آهن به کمک روش اجزاء محدود

۷۴..... تحلیل تلفات موتور سنکرون آهنربای دائم خطی

تلفات مس ۷۸

فصل پنجم: بهینه سازی بازده موتور سنکرون آهنربای دائم به کمک مدار معادل مغناطیسی

۸۲..... الگوریتم ژنتیک

۸۲..... مفاهیم اولیه الگوریتم ژنتیک

۸۳..... عملگرهای ژنتیکی

۸۷..... مساله بهینه سازی

۹۱..... تحلیل اجزاء محدود

فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادها

پیشنهادها ۹۸

۸۵..... مراجع

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

چکیده:

امروزه موتورهای خطی برای تولید حرکت‌های انتقالی به طور گسترده‌ای در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این میان، موتورهای سنکرون آهنربای دائم خطی به دلیل داشتن چگالی نیرو و راندمان زیاد و عملکرد دینامیکی مناسب از اهمیت و جایگاه ویژه‌ای برخوردار است. عملکرد مناسب این موتورها نیازمند بهینه‌سازی دقیق طراحی آنها است. بهینه‌سازی طراحی خود نیازمند مدلسازی مطلوب می‌باشد. در این پژوهش مدار معادل مغناطیسی بهبود یافته‌ای با هدف تحلیل دقیق تلفات آهن ارائه شده است. به این منظور ابتدا مزایا و معایب مدار معادل‌های قبلی ارائه شده برای موتور سنکرون آهنربای دائم بررسی شده که خلاء یک مدل مناسب که دقت قابل قبولی در پیش‌بینی توزیع چگالی شار با در نظر گرفتن اثر جریان سیم پیچ‌ها، اشباع آهن و حرکت داشته باشد و در عین حال سادگی لازم برای استفاده در الگوریتم طراحی را نیز دارا باشد، در این میان احساس می‌شود. لذا در این پژوهش مدار معادل نسبتاً جدیدی برای موتور سنکرون آهنربای دائم خطی یک بر با هسته آهنی و اولیه کوتاه ارائه شده است. این مدار معادل علاوه بر قابلیت به پیش‌بینی اثر شیارها بر توزیع چگالی شار آهنربای دائم و اشباع آهن در دندان و یوغ اثر جریان سیم پیچ اولیه را نیز در نظر می‌گیرد. در نتیجه این مدار معادل می‌تواند تلفات آهن را بطور نسبتاً قابل قبولی پیش‌بینی کرده و در عین حال سادگی لازم برای استفاده در الگوریتم طراحی را دارد. یکی دیگر از مزیت‌های این مدار معادل ثابت بودن ساختار آن در هنگام حرکت است. در ادامه تلفات آهن با این روش محاسبه شد که در مقایسه با نتایج حاصل از روش اجزاء محدود تنها حدود سه درصد تفاوت دارد. در ادامه تغییرات تلفات آهن با تغییر پارامترهای موتور بررسی شد. در نهایت بهینه‌سازی طراحی با هدف افزایش بازده با در نظر گرفتن هفت پارامتر موتور انجام شد. نتایج نشان داد که بازده موتور بهینه حدود پنج درصد بیشتر از موتور نمونه است در حالیکه نیروی تولیدی تقریباً ثابت باقی ماند. صحت این نتایج به کمک تحلیل اجزاء محدود غیر خطی دینامیک تأیید شده است.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



فصل اول

مقدمه



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

کلیات

امروزه موتورهای خطی در کاربردهایی که در آنها به حرکت‌های انتقالی و رفت و برگشتی نیاز است، به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱]. علی‌رغم اینکه موتورهای گردان نیز به کمک اجزاء مکانیکی جانبی قادر به تولید حرکت خطی هستند ولی مزایای موتورهای خطی در اینگونه کاربردها سبب شده است که این موتورها در پژوهش‌های بسیاری مورد توجه قرار بگیرند. مهمترین مزیت این موتورها تولید مستقیم حرکت انتقالی و در نتیجه حذف اجزاء تبدیل‌کننده حرکت گردان به حرکت انتقالی است [۲]. حذف این اجزاء منجر به حذف تلفات و لقی ناشی از آنها شده و در نتیجه راندمان، دقت و قابلیت اطمینان سیستم افزایش می‌یابد.

موتورهای خطی نیز همانند موتورهای گردان از لحاظ اصول عملکرد به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند. با این تفاوت که ساختارهای موجود در هر نوع از موتورهای خطی به مراتب بیشتر و متنوع‌تر از ساختارهای مربوط به موتورهای گردان می‌باشند. از میان انواع مختلف این موتورها موتور سنکرون آهنربای دائم خطی به دلیل خصوصیات ویژه‌ای از قبیل، چگالی نیرو و راندمان زیاد، عملکرد دینامیکی خوب و ساختار کنترلی نه چندان پیچیده بسیار مورد توجه است [۳ و ۴].

نیاز به ادوات الکترونیک قدرت برای راه‌اندازی و کنترل این دسته از موتورها و هزینه زیاد آن از یک طرف و قیمت بالای آهنربا از سوی دیگر دو مشکل عمده تولید و استفاده از این موتورها در صنایع گوناگون بوده است. امروزه با ظهور ادوات الکترونیک سریع و ارزان و کشف منابع آهنربای دائم بسیار قدرتمند و کاهش نسبی قیمت آهنربای دائم، ساخت این موتورها و استفاده از آنها در صنعت اقتصادی و عملی شده است. هم‌اینک موتورهای سنکرون آهنربای دائم بیشترین حجم تولید تجاری و پژوهشی موتورهای خطی را به خود اختصاص داده است [۵-۹]. کاربردهای متعددی در رنج وسیعی از عملکرد برای اینگونه موتورها وجود دارد. از این جمله می‌توان به کاربردهای بسیار دقیق و با توان نسبتاً کم مانند صنایع تولید نیمه‌هادی‌ها [۱۰] تا کاربردهایی با توان‌های بالا مانند صنایع حمل و نقل [۱۱] اشاره کرد. برخی دیگر از کاربرهای اینگونه موتورها در زیر آمده است:

- ✓ میزهای متحرک برای نصب قطعات بر روی بردهای الکترونیکی
- ✓ دستگاه‌های برش دیجیتالی
- ✓ کاربردهای پزشکی مانند تخت دستگاه اسکن مغز
- ✓ پرینترها و پلاترهای بزرگ
- ✓ اتوماسیون صنعتی و اداری و ...

ساختار موتورهای سنکرون آهنربای دائم خطی بسیار متنوع و گسترده است. ماهیت خطی بودن و ساختارهای مختلف آن مانند یک‌بر، دوبر و غیره در کنار آرایش و طرق مختلف بکارگیری آهنربای دائم،

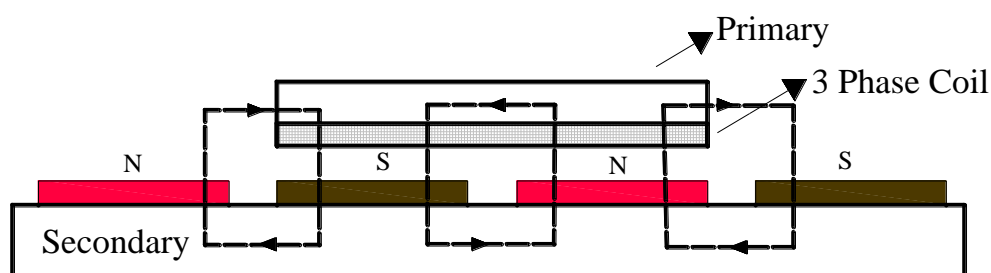
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

ساختارهای مختلفی را برای این موتورها امکان پذیر کرده است. یکی از مرسوم ترین این ساختارها ساختار یک بر اولیه کوتاه است. این ساختار مزایایی دارد که باعث شده به صورت گسترده ای در شرکت های تجاری ساخته شوند.

در این ساختار آهنربا بر روی مسیر قرار می گیرد و مسیر در قسمت هایی با طول مشخص ساخته می شود که با اتصال تعداد مناسب از آنها می توان به طول دلخواه رسید. از این گونه موتورها معمولاً در مسیرهای کوتاه استفاده می شود زیرا در مسیرهای بلندتر تغذیه اولیه آن مشکل می شود. برای تغذیه این موتورها همان طور که در شکل ۱-۱ دیده می شود سیم اتصالی به اولیه متصل است و ولتاژ را به موتور می رساند. محدودیت طول این سیم و طول مسیر شامل آهنربای دائم بازه حرکتی اولیه را محدود می کند. در شکل ۱-۲ این ساختار به همراه مسیر شار آهنربای دائم آن (موتور در حالت بی بار) دیده می شود.



شکل ۱-۱ موتور آهنربای دائم خطی سنکرون با اولیه کوتاه [۷]



شکل ۱-۲ ساختار یک بر با اولیه کوتاه و آهنربای سطحی [۳۳]

لذا در این پژوهش از این ساختار استفاده می گردد. از دیگر سو عملکرد مناسب موتورهای سنکرون آهنربای دائم خطی نیاز به طراحی و بهینه سازی دقیق آنها دارد. یکی از مهمترین مسائلی که امروزه در بهینه سازی مورد توجه قرار می گیرد مساله بازده است. با توجه به افزایش قیمت انرژی و کاهش منابع فسیلی و همچنین

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

افزایش گازهای گلخانه ای در جهان در اثر تولید انرژی که منجر به آلودگی هوا و پدیده گرم شدن جهانی شده، افزایش بازده نقش مهمی در حفاظت از منابع و محیط زیست خواهد داشت.

محاسبه بازده خود وابسته به محاسبه دقیق تلفات است. یکی از بخش های مهم تلفات در موتورهای سنکرون آهنربای دائم خطی، تلفات آهن است. محاسبه تلفات آهن مستلزم داشتن چگالی شار در نقاط مختلف است که به مدلسازی دقیق مغناطیسی موتور نیاز دارد. پس از انتخاب یک روش مناسب برای مدلسازی می توان از آن در روند بهینه سازی استفاده کرد.

شکل ۱- در نهایت نیز طراحی بهینه باید به کمک روش مناسبی تأیید شود. بهترین روش تأیید طراحی ساخت عملی موتور است ولی از آنجا که ساخت موتور هزینه زیادی دارد لذا قبل از ساخت می توان به کمک های روش های دقیق عددی صحت طراحی را مورد بررسی قرار داد. روش های عددی متعددی برای تحلیل مسائل الکترومغناطیس وجود دارد. در این میان روش اجزاء محدود به علت برخی از مزایا در مسائل فرکانس پایین عمومیت بیشتری یافته و اکثر نرم افزارها از این روش برای تحلیل مسائل الکترومغناطیسی استفاده می کنند. دلیل این امر کوچک تر شدن ماتریس ها و ساده تر شدن حل معادلات حاکم بر مسائل الکترومغناطیس فرکانس پایین است.

شکل ۲-

لزوم انجام تحقیق

همانطور که اشاره شد مدلسازی مغناطیسی یکی از مراحل مهم در طراحی است. مدلسازی مغناطیسی موتور به روش های مختلفی انجام می شود. روش های عددی مانند روش اجزاء محدود یکی از روش های قدرتمند در مدلسازی مغناطیسی است. با این حال از این روش ها، به دلیل پیچیدگی روابط و زمان بر بودن حل آن نمی توان در مراحل ابتدایی طراحی که مستلزم تکرار زیاد است استفاده کرد. روش دیگری که می توان از آن برای مدلسازی مغناطیسی استفاده کرد روش لایه ای است [۱۶-۱۲]. با این حال این روش برای موتورهای شیار دار چندان مناسب نیست. زیرا در این روش ابتدا از اثر شیارها و اشباع صرف نظر می شود و سپس برای جبران خطای ناشی از این ساده سازی ها این اثرات توسط روش هایی به معادلات اضافه می شود که منجر به پیچیدگی معادلات می گردد [۱۷ و ۱۰]. اما این روش در موتورهای بدون شیار که مساله اشباع چندان جدی نیست می تواند مورد استفاده قرار گیرد. روش دیگری برای مدلسازی مغناطیسی روش مدار معادل مغناطیسی است. مدار معادل مغناطیسی به صورت بسیار ساده در بسیاری از طراحی ها مورد استفاده قرار گرفته است [۲۱-۱۸]. در این مدارهای معادل فقط فاصله هوایی و آهنربا مدل شده و اثر شیارها با اعمال ضریب کارتر صورت گرفته است. سادگی بیش از حد این مدل باعث بروز خطای زیاد می باشد. به منظور بهبود این مدل شار ناشی بین دو آهنربای مجاور و شار ناشی خودی آهنربا نیز به مدار معادل اضافه شده است [۲۲]. تحقیقی بر روی شار ناشی زیگزاگ نیز صورت گرفته ولی منجر

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

به مدلسازی آن با یک المان مشخص در مدار معادل نشده است [۲۳]. اما مدارهای معادل مذکور شامل اشباع نبوده و آهن در آنها مدل نمی شود. یک مدل غیر خطی شامل اشباع و شارهای نشتی ارائه شده است [۲۴]. همچنین مدار معادلی شامل نشت شار بین دندانه ها مورد بررسی قرار گرفته است [۲۵]. ولی در مدارهای معادل مذکور اثر شیارها بر روی توزیع چگالی شار مورد توجه قرار نگرفته است. برای بررسی اثر شیارها مدارهای معادل پیچیده ای ارائه شده است [۲۶-۲۸]. در آنها توزیع چگالی شار ناشی از آهنربای دائم به کمک المان های زیاد در نظر گرفته شده است. اما تعداد زیاد المان ها منجر به پیچیده شدن این مدل ها می شود. در نتیجه این مدل ها برای الگوریتم طراحی مناسب نیست. استفاده از مدار معادل مغناطیسی سه بعدی و ترکیبی با روش اجزاء محدود نیز از جمله روش های مورد استفاده بوده است که این مدل ها نیز بیشتر برای تحلیل مناسب است تا طراحی [۲۹-۳۱]. یک مدار معادل که شامل شارهای نشتی و اشباع بوده و توزیع چگالی شار و اثر شیارها بر آن را در بر گیرد و در ضمن ساختار ساده داشته و قابل استفاده در طراحی موتور باشد در [۳۴] ارائه شده است. با این حال این مدار معادل نیز کمبودهایی دارد که در فصل ۲ به آن پرداخته شده و مانع از محاسبه دقیق تلفات آهن می شود. در این پژوهش مدار معادل جدیدی ارائه شده که در آن سعی شده عیوب مدار معادل [۳۴] برطرف گردد. مدار معادل پیشنهادی با هدف محاسبه تلفات آهنی و استفاده در الگوریتم های تکراری بهینه سازی طرح گردیده است.

بهینه سازی موتورهای سنکرون آهنربای دائم خطی در مقالات مختلفی انجام شده است [۳۵-۴۸]. بیشتر پژوهش ها مربوط به کاهش نیروی بازدارنده، افزایش نیرو و کاهش آهنربای مصرفی در این موتورها بوده است. با این حال موضوع بازده در پژوهش های پیشین کمتر مورد توجه بوده است و فقط در مراجع محدودی به آن پرداخته شده است. لذا بهینه سازی بازده با در نظر گرفتن پارامترهای مختلف طراحی و به کمک مدار معادل پیشنهادی در این پژوهش مورد توجه قرار گرفته است.

روند ارائه مطالب

این پروژه شامل پنج فصل است. فصل اول که فصل حاضر بوده به مقدمه و تشریح ساختار پایان نامه پرداخته است.

در فصل دوم روش مدار معادل مغناطیسی در موتور سنکرون آهنربای دائم خطی بررسی شده است. مدار معادل های مختلفی که تا بحال ارائه شده است به علاوه قابلیت های مختلفی که به مرور به این روش اضافه شده است به تشریح مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و مزایا و معایب هر گروه بررسی شده است.

در فصل سوم با توجه به کاربرد مورد نظر که محاسبه تلفات و استفاده در الگوریتم تکراری بهینه سازی است مدار معادل جدیدی ارائه شده است. این مدار معادل در واقع تکمیل روش ارائه شده در [۳۴] است که به آن

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

قابلیت های جدیدی از جمله در نظر گرفتن جریان سیم پیچها، مدلسازی بهتر حرکت و ... اضافه شده است. مدار معادل پیشنهادی شبیه سازی شده و نتایج آن به کمک روش اجزاء محدود تایید گردیده است. در پایان این فصل نیز به مدلسازی الکتریکی و مکانیکی نیز اشاره شده است.

فصل چهارم مربوط به محاسبه تلفات موتور است. در این فصل تلفات آهن بر اساس مدل پیشنهادی محاسبه شده است. ابتدا معدلات حاکم بر مولفه های مختلف تلفات آهن بررسی شده و سپس به کمک نتایج بدست آمده از روش مدار معادل مغناطیسی پیشنهادی تلفات بخش خای مختلف بدست آمده است. تلفات آهن به کمک روش اجزاء محدود نیز بدست آمده و با روش پیشنهادی مقایسه شده است. در ادامه تحلیل تغییرات تلفات آهن با تغییر پارامترها به کمک نمودارهای متعدد مورد تحقیق قرار گرفته است. تلفات الکتریکی نیز در نهایت محاسبه شده و رابطه بازده ارائه گردیده است.

فصل پنجم مربوط به بهینه‌سازی موتور می‌باشد. در این فصل ابتدا پیشینه پژوهش در بهینه‌سازی این موتور مورد بررسی قرار گرفته است. سپس بهینه‌سازی با افزایش بازده به کمک مدار معادل مغناطیسی و الگوریتم ژنتیک انجام شده است. صحت طراحی بهینه به کمک روش اجزاء محدود غیر خطی دینامیک بررسی و تأیید شده است. در فصل ششم نتایج بدست آمده در این پروژه به طور خلاصه جمع بندی و بررسی شده و در ادامه پیشنهادهایی جهت ادامه کار ارائه شده است.

WikiPower.ir

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



فصل دوم

پیشینه مدلسازی به کمک مدار معادل مغناطیسی



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

مقدمه

مدلسازی یکی از مهمترین بخش ها در بررسی، تحلیل و طراحی موتورهای الکتریکی می باشد. مدلسازی به منظور محاسبه پارامترهای موتور و ارزیابی عملکرد موتور صورت می پذیرد. مدلسازی یک موتور معمولاً به چهار بخش زیر تقسیم می شود:

- مدلسازی مغناطیسی
- مدلسازی الکتریکی
- مدلسازی مکانیکی
- مدلسازی حرارتی

در مدلسازی مغناطیسی در واقع هدف اصلی مشخص کردن چگالی شار در نقاط مختلف ماشین ناشی از آهنربا یا سیم پیچ است. مدلسازی الکتریکی شامل مشخص کردن رابطه ولتاژها و جریانها و بدست آوردن نیروها بر اساس جریانها و شارهاست. مدلسازی مکانیکی، مشخص کردن معادله حرکت ماشین است. مدلسازی حرارتی نیز شامل تشکیل مدار حرارتی ماشین و تعیین توزیع حرارت و دمای نقاط مختلف ماشین می باشد. در این فصل مدلسازی مغناطیسی موتورهای سنکرون آهنربای دائم خطی مورد بررسی قرار می گیرد.

برای مدلسازی مغناطیسی موتورهای سنکرون آهنربای دائم خطی سه دسته روش عمده وجود دارد که عبارتند از روش های تحلیلی، روش مدار معادل مغناطیسی و روش های عددی.

در روش های تحلیلی، از حل معادلات ماکسول در لایه های مختلف ماشین، چگالی شار در نقاط مختلف ماشین محاسبه می شود. این روش برای تحلیل پارامتری مناسب می باشد. با این حال از این روش در مراحل طراحی ابتدایی کمتر استفاده می شود زیرا با تغییر در ساختمان ماشین معادلات باید تغییر کند. در نتیجه این روش بیشتر برای ساختارهای مشخص و ابعاد با تغییرات محدود مناسب است. در نتیجه این روش برای تحلیل ماشین و یا بهینه سازی آن مناسب تر است. این روش عیب دیگری هم دارد که در آن اثر اشباع را نمی توان در نظر گرفت. هرچند که در پژوهش هایی اثر اشباع وارد این مدل شده است ولی ماهیت تحلیلی بودن آن از بین رفته و نیاز به حل عددی معادلات می باشد.

روش های عددی و در راس آنها روش اجزاء محدود به طور عمده ای در تحلیل میدان های مغناطیسی استفاده می شوند. این روش ها از دقت بسیار بالایی برخوردارند. با این حال مشکل این روش ها زمان بر بودن آن است. بنابر این کاربرد آن ها در مراحل ابتدایی طراحی که تغییرات زیادی در متغیرها وجود دارد امکان پذیر نیست.

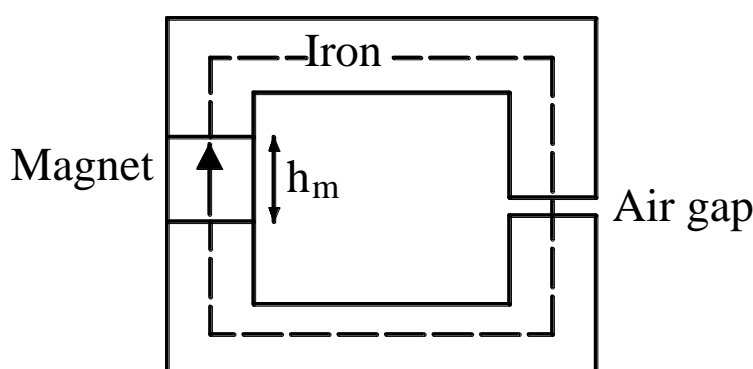
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

روش مدار معادل مغناطیسی به دلیل ساده تر بودن تشکیل آن و قابلیت انعطاف بالاتر در مراحل طراحی اولیه مورد استفاده قرار می گیرد. در این روش با تغییر ساختار و ابعاد ماشین، با اعمال تغییرات ساده ای می توان مدار معادل مغناطیسی جدید را تشکیل داد. این روش بسیاری از پدیده های حاکم بر ماشین های الکتریکی را در بر می گیرد. با گذشت زمان این روش رشد زیادی داشته و هنوز هم تلاش برای ارائه مدار معادل های کاملتر و فشرده تر و اضافه کردن قابلیت های مختلف به آن ادامه دارد. در این فصل مروری به اصول و قابلیت های این روش خواهیم داشت.

اصول روش مدار معادل مغناطیسی

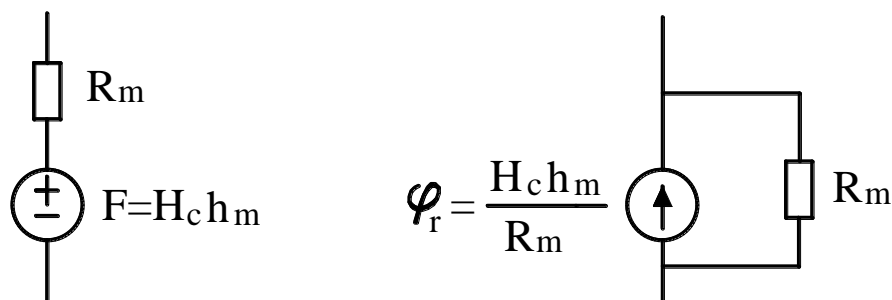
این روش بر تقسیم فضا به بخش های مختلف و مدل کردن مسیرهای عبور شار به کمک مقاومت مغناطیسی استوار است. منابعی که شار را تولید می کنند مانند جریان ها یا آهنربا به کمک منابع شار یا منابع نیرو محرکه مغناطیسی مدل می شوند.

برای مدل کردن مسیر های شار از مقاومت مغناطیسی و یا رسانایی مغناطیسی بسته به نوع تحلیل استفاده می شود. روش معروف لوله های شار به این منظور مورد استفاده قرار می گیرد. در شکل ۱-۲ یک مدار مغناطیسی ساده شامل آهنربای دائم نشان داده شده است. آهنربای دائم منبع تولید شار است لذا آن را می توان به دو صورت معادل نورتن یا معادل تونن مدلسازی کرد. این مدل ها در شکل ۲-۲ دیده می شوند. در اینجا R_m مقاومت مغناطیسی معادل آهنربا است و H_c نیروی اجباری آهنربای دائم می باشد. بر اساس اصول حاکم بر مقاومت مغناطیسی مقدار مقاومت مغناطیسی معادل آهنربا از رابطه ۱-۲ حاصل می شود.



شکل ۳- شکل ۱-۲ مداری شامل آهنربای دائم

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۴-۲- معادل مغناطیسی آهنربای دائم

$$R_m = \frac{h_m}{\mu_{rm} \mu_0 A_m} \quad (1-2)$$

در رابطه فوق μ_{rm} گذردهی مغناطیسی نسبی آهنربا و A_m سطح مقطع آهنربا می باشد. با در نظر گرفتن آهن و فاصله هوایی مدار معادل کل به صورت ارائه شده در شکل ۲-۳ خواهد بود. در این شکل مقاومت مغناطیسی هوا و آهن از روابط زیر حاصل می شود.

$$R_g = \frac{g}{\mu_0 A_g} \quad (2-2)$$

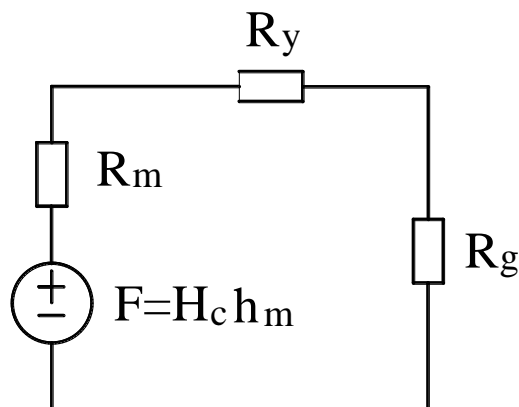
$$R_m = \frac{l}{\mu_{ri} \mu_0 A_m} \quad (3-2)$$

در این روابط μ_{rm} ، g ، A_g ، l ، به ترتیب گذردهی مغناطیسی نسبی آهن، طول فاصله هوایی، سطح فاصله هوایی و طول مسیر آهن است. در حالت ساده و بدون وقوع پدیده اشباع می توان از مقاومت مغناطیسی آهن در مقابل مقاومت مغناطیسی هوا صرف نظر کرد و در نتیجه چگالی شار فاصله هوایی از رابطه زیر حاصل خواهد شد.

$$B_g = \frac{H_c h_m}{(R_g + R_m) A_g} \quad (4-2)$$

چگالی شار نقطه کار آهنربای دائم نیز از رابطه زیر حاصل می شود:

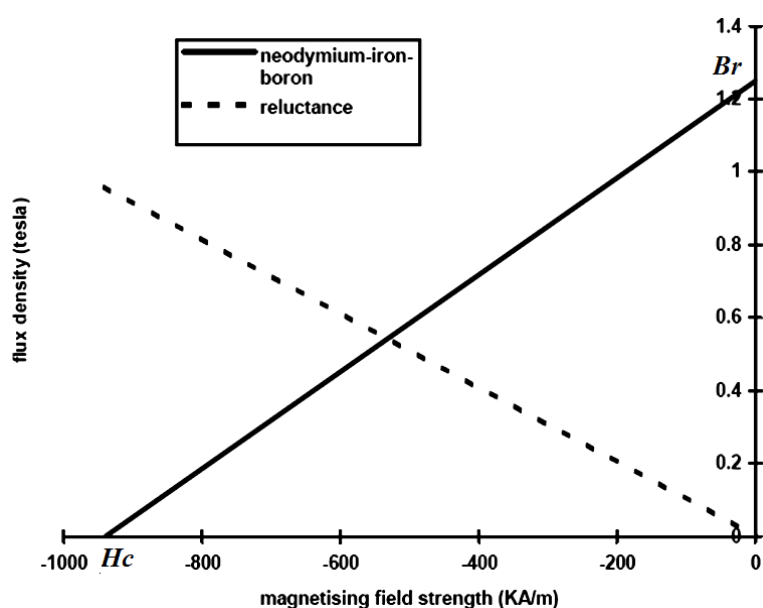
برای دریافت فایل word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۲-۳ مدار معادل مغناطیسی شکل ۲-۱

$$B_m = \frac{B_r}{1 + \frac{g}{h_m} \frac{A_m}{A_g} \frac{\mu_m}{\mu_0}} \quad (5-2)$$

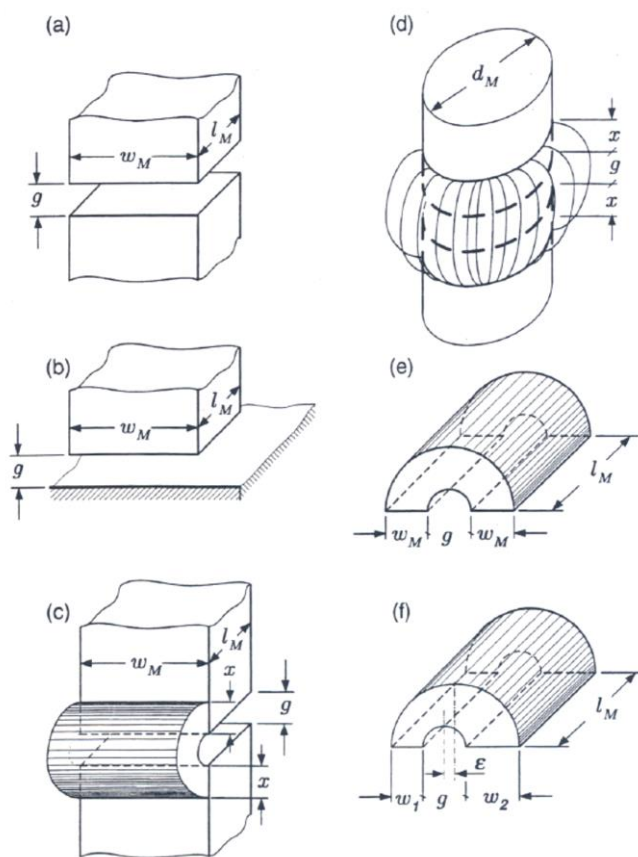
در رابطه فوق B_r چگالی پسماند آهنربای دائم است که در شکل ۲-۴ مربوط به مشخصه مغناطیسی آهنربا دیده می شود. نقطه کار آهنربای دائم در این مدار مغناطیسی هم در این شکل دیده می شود که در واقع محل برخورد منحنی مغناطیسی آهنربا با منحنی مغناطیسی مسیر شار است. در ادامه به مشخصه واقعی آهنربا و تعیین مقاومت مغناطیسی مسیرهای غیر مکعبی اشاره می نمایم.



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

شکل ۲-۴ نقطه کار آهنربای دائم

در محاسبات قبلی از اثر شکستگی شار صرف نظر شده بود. در شکل ۲-۵ حالت های مختلف قطب های ماشین الکتریکی نسبت به هم نشان می دهد که رسانایی مغناطیسی برای هر حالت به ترتیب از روابط ۲-۶ تا ۲-۱۵ بدست می آید [۴۹].



شکل ۲-۵ حالت های مختلف برای محاسبه مقاومت و رسانایی مغناطیسی

$$G = \mu_0 \frac{w_M l_M}{g} \quad (a) \quad (6-2)$$

$$\text{if } g/w_M < 0.1 \text{ \& } g/l_M < 0.1$$

$$G = \mu_0 \frac{1}{g} (w_M + 0.614 g/\pi)(l_M + 0.614 g/\pi) \quad (b) \quad (7-2)$$

$$\text{و یا } G = \mu_0 \frac{w_M x}{0.17g + 0.4x} \quad (c) \quad (8-2)$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

$$G = \mu_0 \frac{w_M}{\pi} \ln \left[1 + 2 \sqrt{\frac{x + (x^2 + xg)}{g}} \right] \quad (c) \quad (9-2)$$

$$G = \mu_0 \frac{\pi d_M^2}{g} \quad (d) \quad (10-2)$$

و به صورت دقیق تر

$$G = \mu_0 d_M \left[\frac{\pi d_M}{4g} + \frac{0.36 d_M}{2.4 d_M + g} + 0.48 \right] \quad (d) \quad (11-2)$$

for $g/d_M < 0.2$

$$G = \mu_0 \frac{1}{2\pi} \ln \left[2m^2 - 1 + 2m\sqrt{m^2 - 1} \right] l_M \quad (e) \quad (12-2)$$

و یا

$$G = \mu_0 \frac{1}{\pi} \ln \left[\frac{2w_M}{g} + 1 \right] l_M \quad (e) \quad (13-2)$$

$$G = \mu_0 \frac{1}{\pi} \ln \left[\frac{\Delta^2 - (\varepsilon + x)^2}{\Delta(g - x)} + \frac{\varepsilon + x}{\Delta} \right] l_M \quad (f) \quad (14-2)$$

که در آن

$$\varepsilon = \frac{w_1 - w_2}{2} \quad \Delta = \frac{w_1 + w_2 + g}{2} \quad (15-2)$$

$$x = \frac{1}{2\varepsilon} \left(\Delta^2 - (g/2)^2 - \varepsilon^2 - \sqrt{\Delta^2 - (g/2)^2 - \varepsilon^2 - \varepsilon^2 g^2} \right)$$

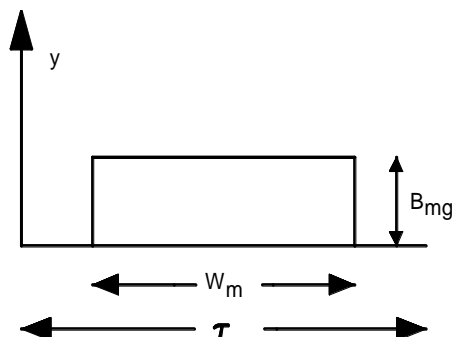
ضریب کارتر

یکی از روش های معمول برای طراحی مغناطیسی ماشین های آهنربای دائم استفاده از مدار معادل مغناطیسی موتور بدون در نظر گرفتن مستقیم دندانه های اولیه است. در این روش اثر دندانه ها و شیارها به طور غیر مستقیم و با افزایش طول فاصله هوایی با اعمال ضریب کارتر (k_C) بر روی طول فاصله هوایی مکانیکی منظور می شود [۱۸ و ۱۹ و ۵۰-۵۲]. این روش هنوز هم در بسیاری از پژوهش ها برای طراحی اولیه استفاده می شود. مقاومت مغناطیسی فاصله هوایی (R_g) و ثابت کارتر از روابط زیر بدست می آیند:

$$\begin{cases} R_g = R_{gm} k_C \\ k_C = \left[1 - \frac{w_s}{\tau_s} + \frac{4g}{\pi \tau_s} \ln \left(1 + \frac{\pi w_s}{4g} \right) \right]^{-1} \end{cases} \quad (16-2)$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

در این رابطه R_{gm} مقاومت مغناطیسی فاصله هوایی مکانیکی، g طول فاصله هوایی مکانیکی، w_s پهنای شیار و τ_s گام شیار اولیه ماشین است. چگالی شار مغناطیسی در این روش به صورت مستطیلی در نظر گرفته می شود که در شکل ۶-۲ دیده می شود.



شکل ۵- شکل ۶-۲ شکل موج چگالی شار بدست آمده از روش ضریب کارتر در این شکل τ گام قطبی و w_m پهنای آهنربا است. حداکثر مقدار چگالی شار در این روش از رابطه زیر حاصل می شود:

$$B_{mg} = \frac{F}{R_g + R_{mo}} \frac{1}{k_s} \quad (17-2)$$

در رابطه فوق F نیرو محرکه آهنربای دائم، R_g مقاومت مغناطیسی فاصله هوایی و R_{mo} مقاومت مغناطیسی آهنربا است. k_s نیز اثر اشباع را نشان می دهد مقدار آن در حدود ۱/۱ است [۵۰]. در نهایت مولفه اصلی چگالی شار از رابطه زیر محاسبه می شود.

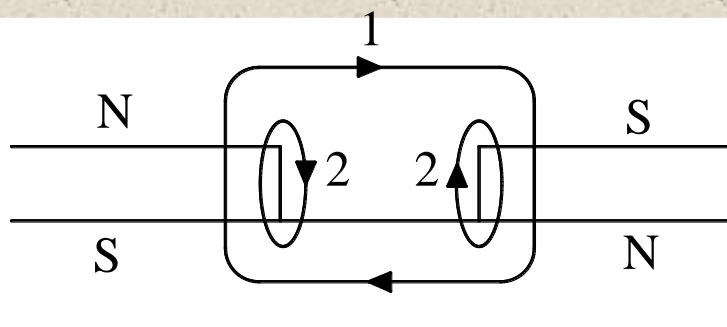
$$B_{mg1} = \frac{4}{\pi k_\sigma} B_{mg} \sin\left(\frac{w_m \pi}{2\tau}\right) \quad (18-2)$$

در این رابطه k_σ ضریب نشت است و مقدار آن بین ۱/۱ تا ۱/۳ می باشد [۵۰]. این روش علیرغم کارایی نسبی در تعیین دامنه مولفه اصلی چگالی شار، قادر به مدلسازی توزیع چگالی شار در گام قطبی نیست.

مقاومت های مغناطیسی نشتی

در مدار معادل های پیشین برای موتور های آهنربای دائم مسیرهای شار در جهت مغناطیس شدگی آهنربا در نظر گرفته می شد و از شارهای عرضی و نشتی صرف نظر شده بود. در یک سری از پژوهش ها شارهای عرضی نیز در نظر گرفته شده است. مثلاً برای آهنربا دو مسیر شار نشتی فرض شده است که در شکل ۷-۲ دیده می شود.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۶- شکل ۲-۷ مسیره های نشت شار: ۱- نشت شار بین دو آهنربای مجاور ۲- نشت شار خودی هر آهنربا [۳۴]

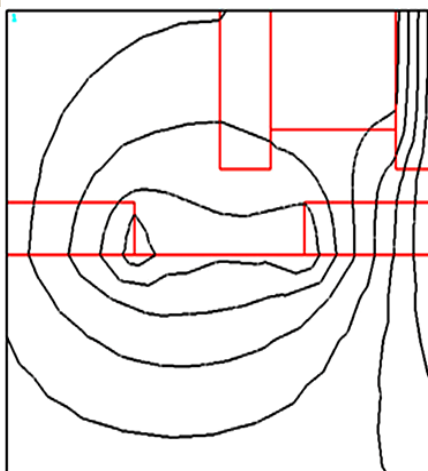
شکل ۲-۸ نیز این نشت را به کمک رسم خطوط شار توسط روش اجزاء محدود نشان داده است. این مسیره ها به صورت یک مقاومت مغناطیسی موازی هر آهنربا و یک مقاومت مغناطیسی بین دو آهنربا مدل می شود. مدار معادلی برای موتور سنکرون آهنربای دائم در یک گام قطبی ارائه شده است که در شکل ۲-۹ دیده می شود [۲۲]. در این مدل شار نشتی بین دو آهنربای مجاور و شار نشتی خودی هر آهنربا نیز در مدار معادل منظور شده است. در این مدلسازی آهنربا به وسیله یک منبع شار (Φ_r) و یک مقاومت مغناطیسی (R_{mo}) مدل شده است. R_s ، R_r و R_g به ترتیب مقاومت مغناطیسی هوا، استاتور و روتور می باشند. مقاومت مغناطیسی مسیر شار نشتی بین دو آهنربای مجاور و شار نشتی خودی آهنربا به ترتیب با R_{mr} و R_{mm} نمایش داده شده است. در این مدل اثر دندانها و شیارها به طور مجزا در نظر گرفته نشده است. مقاومت مغناطیسی دندانها با مقاومت مغناطیسی استاتور جمع شده است رسانایی مغناطیسی مسیره های نشتی از روابط زیر محاسبه می شوند [۲۲].

$$P_{mr} = \frac{\mu_0 L}{\pi} \ln \left[1 + \frac{\pi \min(g_e, w_f / 2)}{h_m} \right] \quad \& \quad R_{mr} = \frac{1}{P_{mr}} \quad (19-2)$$

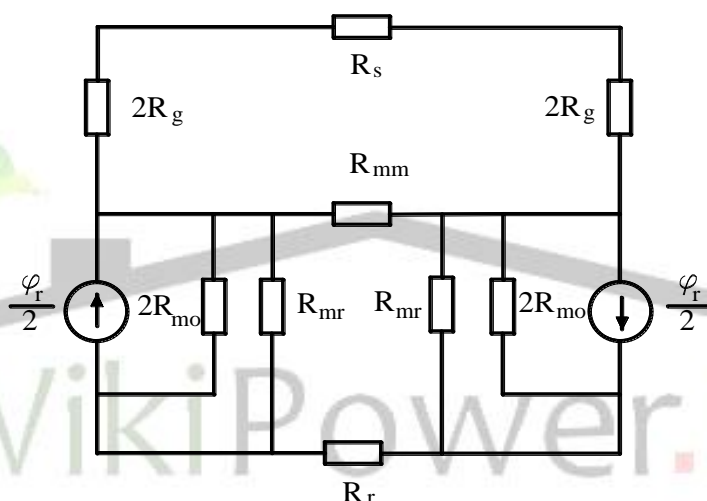
$$P_{mm} = \frac{\mu_0 L}{\pi} \ln \left[1 + \frac{\pi g_e}{w_f} \right] \quad \& \quad R_{mm} = \frac{1}{P_{mm}} \quad (20-2)$$

در این رابطه g_e طول فاصله هوایی موثر با در نظر گرفتن ضریب کارتر، L عرض موتور و w_f فاصله بین دو آهنربای مجاور است. مدلسازی فوق نیز در تعیین توزیع چگالی شار همانند روش ابتدایی عمل می کند. مدل های مشابهی نیز ارائه شده و در آن اثر شار نشتی زیگزاگ نیز بررسی شده است [۲۳].

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۲-۸ شارهای ناشی آهنربای دائم [۳۴]



شکل ۷-۲- شکل ۹-۲ مدار معادل موتور سنکرون آهنربای دائم با در نظر گرفتن شار ناشی [۲۲]

در مدل بالا فضای بین دو آهنربا مدلسازی نشده است. گاهی ممکن است یک دندان در فاصله بین آهنرباها

قرار گیرد. این حالت در شکل ۲-۱۰ نمایش داده شده است. تحلیل اجزاء محدود این حالت نیز در شکل ۲-۱۱

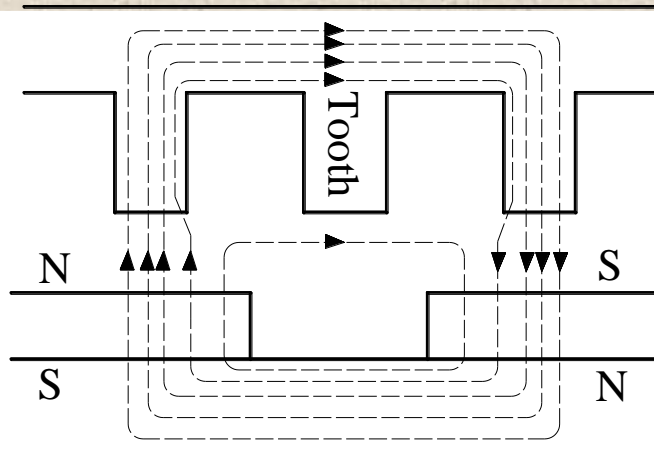
دیده می شود که موید مطالب گفته شده است. در این صورت از این دندان شار چندانی عبور نمی کند. برای

مدلسازی این حالت در [۳۴] فضای میانی آهنرباها با مقاومت مغناطیسی R_{mg} جایگزین شده است. دندانهای که

در میان دو آهنربا قرار می گیرند در مدار معادل مغناطیسی به این مقاومت متصل می گردند. در نتیجه مدار معادل به

صورت شکل ۲-۱۲ خواهد شد.

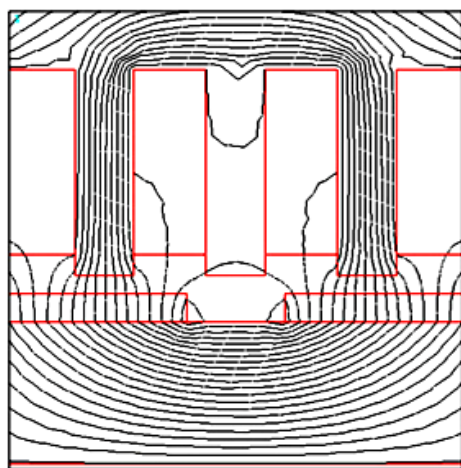
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۸-

شکل ۹- شکل ۲-۱۰ قرار گرفتن دندانه بر روی فاصله میان دو آهنربای مجاور [۳۴]

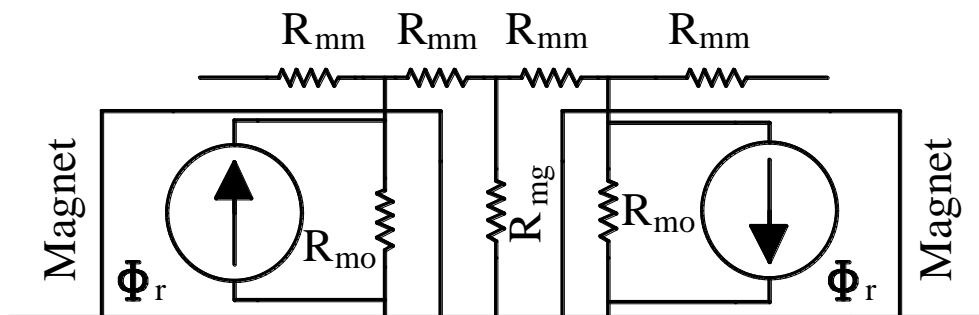
شکل ۱۰-



شکل ۱۱-

شکل ۱۲- شکل ۲-۱۱ قرار گرفتن دندانه بر روی فاصله میان دو آهنربای مجاور: تحلیل اجزاء محدود

[۳۴]

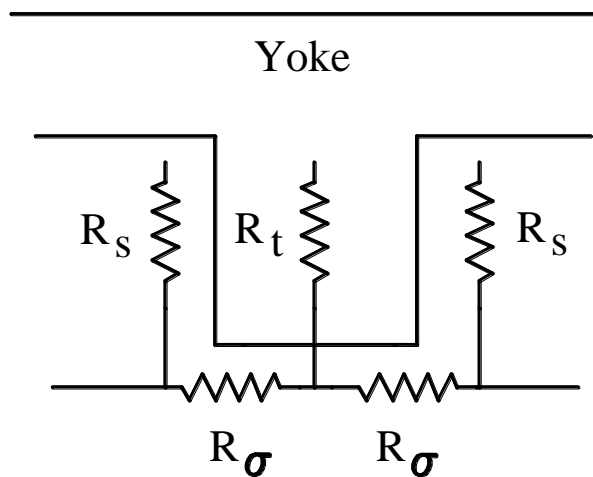


شکل ۱۳- شکل ۲-۱۲ مدار معادل مغناطیسی ثانویه با در نظر گرفتن فاصله هوایی بین دو آهنربای

مجاور [۳۴]

برای دریافت فایل word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

نشت دیگری که در مقالات مدل شده است، نشت بین دو دندان می باشد. این نشت هم به صورت یک مقاومت مغناطیسی عرضی بین دو دندان در نظر گرفته شده است. در شکل ۲-۱۳ این مقاومت مغناطیسی با R_{σ} نشان داده شده است [۲۵ و ۳۴].



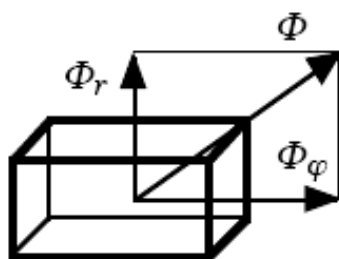
شکل ۱۴- شکل ۲-۱۳ مدلسازی نشت بین دندان [۳۴]

اثر شیار و دندان

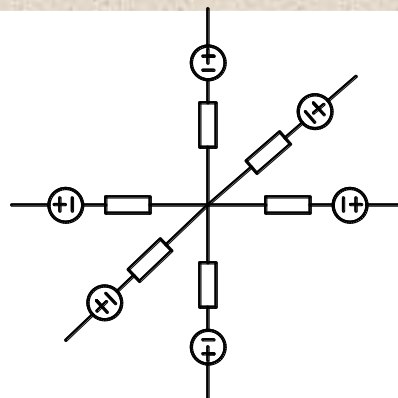
اثر دندانها بر روی توزیع چگالی شار در تعدادی از کارهایی که از مدار معادل مغناطیسی های پیشرفته و با تعداد المان زیاد استفاده کرده اند مدل شده است. مدار معادل هایی که تا به حال بررسی شد جزء دسته ای از مدار معادلها بود که دارای اجزاء کم با حل آسان و سریع بود که چگونگی توزیع چگالی شار را مشخص نمی کرد. اما در برخی از مقالات مدار معادل مغناطیسی پیچیده ای ارائه شده است که دارای اجزاء زیادی در زیر هر قطب بوده و در نتیجه مقدار چگالی شار در محدوده های کوچک قابل تعیین است [۲۶-۲۸]. در نتیجه روش های مزبور قادر به پیش بینی نحوه توزیع چگالی شار نیز می باشد. در [۲۶ و ۲۷] مدار معادل مغناطیسی سه بعدی موتور آهنربای دائم خطی ارائه شده است.

در این مدل که پیچیدگی آن از روش اجزای محدود چندان هم کمتر نیست موتور به المان های حجمی متعددی تقسیم می شود و هر جزء با رسانایی مغناطیسی و منابع نیرو محرکه مغناطیسی جایگزین می شود. نتیجه یک شبکه بزرگ مقاومتی است که به کمک تئوری مدارها قابل حل می باشد. تنها حسن این مدل نسبت به مدل اجزاء محدود، سرعت بالاتر حل معادلات آن است. شکل ۲-۱۴ یک جزء و مدل معادل آن را نشان می دهد. در این مدل سازی، مقاومت های مغناطیسی و منابع نیرو محرکه مغناطیسی براساس مباحث بیان شده در قسمت های قبلی محاسبه می شوند. در نهایت با نوشتن ماتریس سیستم، شارها در نقاط مختلف موتور محاسبه می شود.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



ب

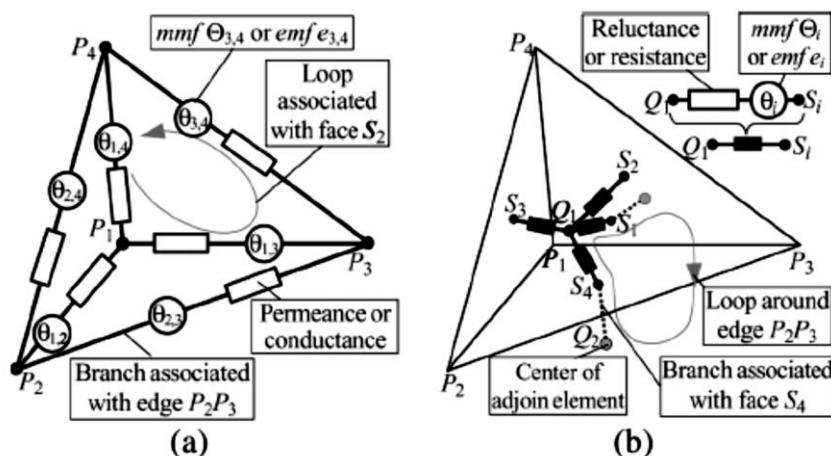


الف

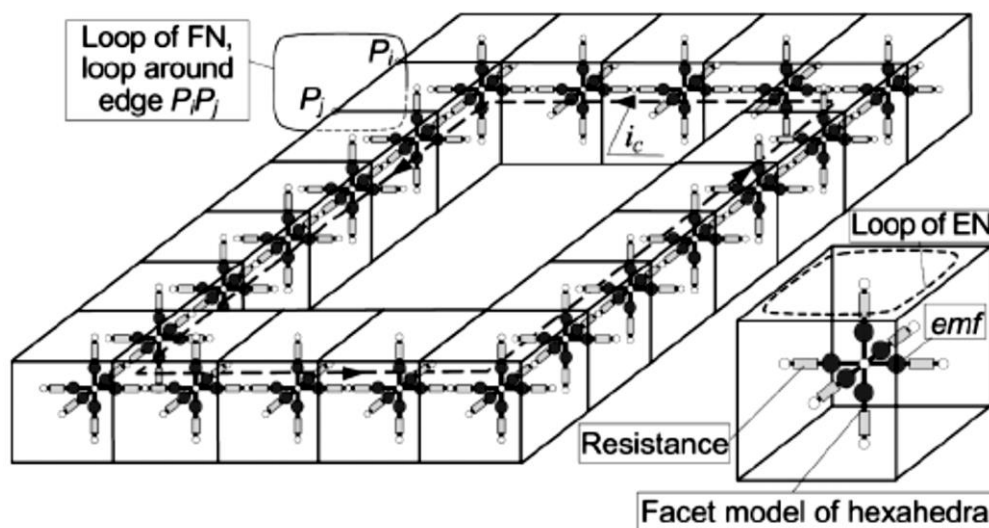
شکل ۱۵- شکل ۲-۱۴ الف- المان حجمی تشکیل دهنده موتور ب- مدار معادل مغناطیسی المان [۲۶] در [۲۸] نیز مدار معادل مغناطیسی دوبعدی به بیش از ۱۲۰ نوع المان در هر قطب موتور ارائه شده است. این مدار معادل نیز قادر به پیشبینی نحوه توزیع چگالی شار است. اما روش های فوق به دو دلیل برای مراحل ابتدایی طراحی مناسب نیست.

✓ تشکیل ماتریس های سیستم با بالا رفتن اجزاء و با تغییر مداوم ابعاد و شکل ماشین، دشوار است.
 ✓ با زیاد شدن تعداد اجزاء و در نتیجه بزرگ شدن ماتریس های سیستم، حل ماتریس های سیستم که مستلزم عمل معکوس کردن و گاه شامل اجزاء غیر خطی است مشکل و زمان بر می شود.
 این روش ها برای آنالیز یک ماشین معین پیشنهاد شده است و از لحاظ زمان محاسبه و پیچیدگی با روش اجزاء محدود مقایسه شده است و در مسائل طراحی و بهینه سازی که مستلزم تکرار زیاد است مناسب نمی باشد. در فرآیندهای طراحی و بهینه سازی که فرآیندهای تکراری است سادگی مدل از اهمیت ویژه ای برخوردار است. در روند طراحی موتور نیز نمی توان از مدل های پیچیده برای مشخص کردن چگالی شار در فاصله هوایی استفاده کرد. یکی از عوامل مهم در تعیین شکل چگالی شار وجود دندانه هاست. مدل های مطرح شده در قسمت های قبلی که دارای اثر دندانه ها بود تماماً در آنالیز عملکرد یک موتور موجود استفاده شده است. این مدل ها برای استفاده در فرآیند طراحی یا پیچیده و زمان گیر است یا به داده هایی نیاز دارد که در روند طراحی در دسترس نیست.
 در [۲۹-۳۲] نیز مدار معادل های سه بعدی با همکاری روش اجزاء محدود ارائه شده است. این روش ترکیبی دقت بسیار بالایی دارد ولی همانند روش های پیشین دارای المان های زیاد است. المان های مورد استفاده در این روش که به دو روش گره ای و لبه ای پیاده سازی می شوند و همچنین بخشی از موتور که به روش گره ای مدل شده است در شکل های ۲-۱۵ و ۲-۱۶ دیده می شود.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۱۶- شکل ۲-۱۵ الف- مدل سازی گره ای ب- مدل سازی لبه ای [۳۱]

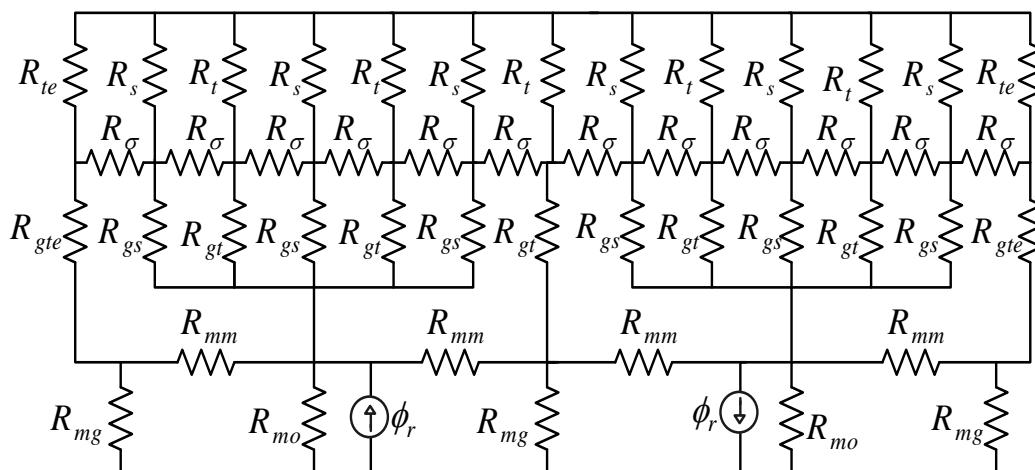


شکل ۱۷- شکل ۲-۱۶ مدل سازی بخشی از موتور به روش گره ای [۳۱]

این روش هم باری طراحی پیچیده است. لذا در طراحی و بهینه سازیها از مدل های مغناطیسی ساده شده استفاده می شود و اثر دندانه ها به وسیله افزایش طول موثر فاصله هوایی مدل می گردد. ولی این روش دارای خطا در محاسبه دامنه مولفه اصلی چگالی شار و هارمونیک های آن است.

برای رفع این مشکل یک مدار معادل مغناطیسی برای موتور آهنربای دائم در [۳۴] ارائه شده که در آن دندانه ها و شیارها به طور مجزا مدل شده است. با استفاده از نتایج حاصل از این مدل تابعی برای محاسبه چگالی شار در یک گام قطب پیشنهاد شده است. مدار مغناطیسی معادل و تابع پیشنهادی به سادگی توسط تئوری مدارها و با حجم محاسباتی پایین قابل شبیه سازی است و در نتیجه می توان از آن در الگوریتم های طراحی و بهینه سازی استفاده کرد. مدار معادل مغناطیسی ارائه شده در [۳۴] در شکل ۲-۱۷ دیده می شود.

برای دریافت فایل word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۱۸-

شکل ۱۷-۲ مدار معادل مغناطیسی موتور سنکرون آهنربای دائم خطی [۳۴]

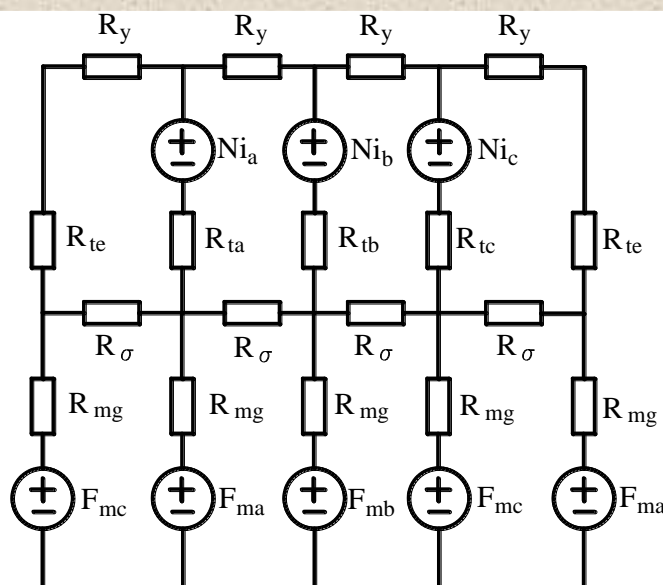
شکل ۱۹-

جریان آرمیچر

جریان آرمیچر به صورت منابع شار یا نیرو محرکه مغناطیسی در برخی مدل ها مورد بررسی قرار گرفته است. بیشتر مدارهای ساده تنها سیم پیچ های متمرکز را مدل کرده اند. در شکل ۱۸-۲ سیم پیچ به صورت منبع نیرو محرکه مغناطیسی روی هر دندان مدل شده است.

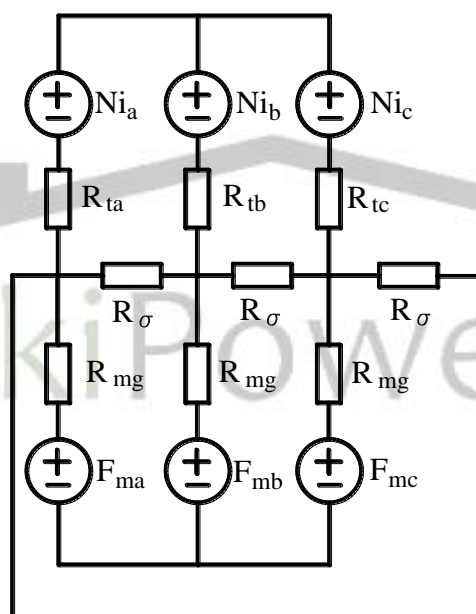
در این شکل شار ناشی از جریان با یک منبع نیروی محرکه مغناطیسی به اندازه جریان ضرب در تعداد دور سیم پیچیده شده روی هر دندان جایگزین شده است. آهنربای دائم نیز در دندانها شاری ایجاد می کند. این شار باعث ایجاد ولتاژ القایی در حالت عملکرد بی بار می شود. شکل ۱۹-۲ نیز ساده شده مدار فوق با حذف اثر دندان انتهایی است.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۲۰- شکل ۲-۱۸ مدار معادل مغناطیسی با در نظر گرفتن سیم پیچ متمرکز [۲۵]

شکل ۲۱-

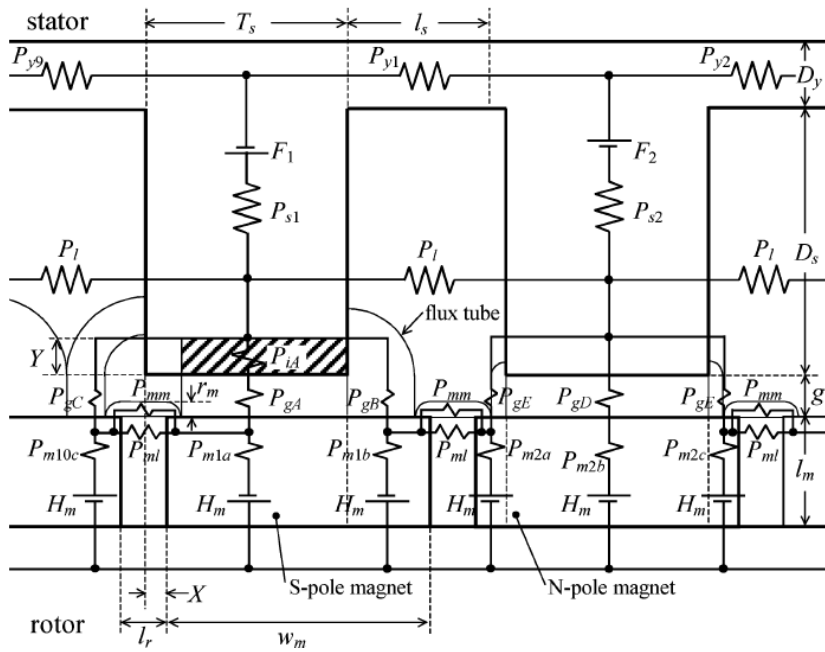


شکل ۲-۱۹ مدار معادل مغناطیسی ساده شده شکل ۲-۱۸ با حذف اثر دندان‌های انتهایی و مقاومت مغناطیسی یوغ

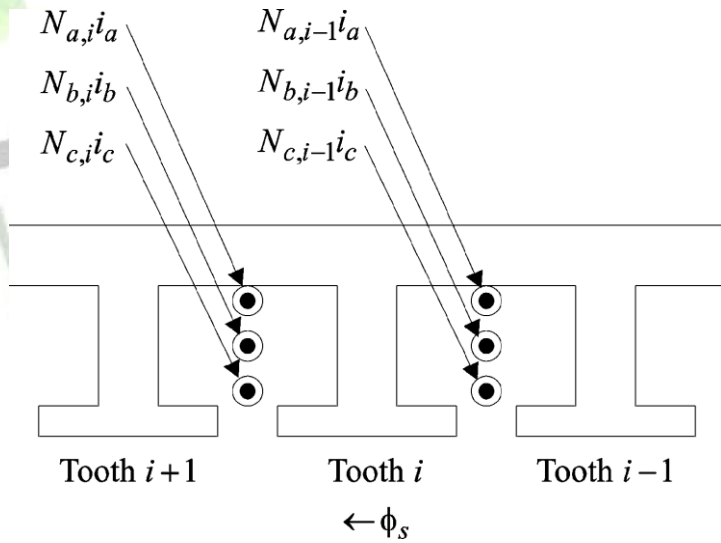
[۲۵]

در [۲۴] نیز به همین صورت سیم پیچ مدل شده است. شکل ۲-۲۰ بخشی از مدل ارائه شده در آن را نشان می دهد. با این حال سیم پیچ گسترده کمتر مورد توجه بوده است و فقط در برخی مقالات به آن اشاره شده است. در [۵۳] سیم پیچ گسترده به کمک تابع سیم پیچ مدل شده است. استاتور با سیم پیچ گسترده و مدلسازی آن توسط روش مدار معادل مغناطیسی در شکل های ۲-۲۱ و ۲-۲۲ نمایش داده شده است.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



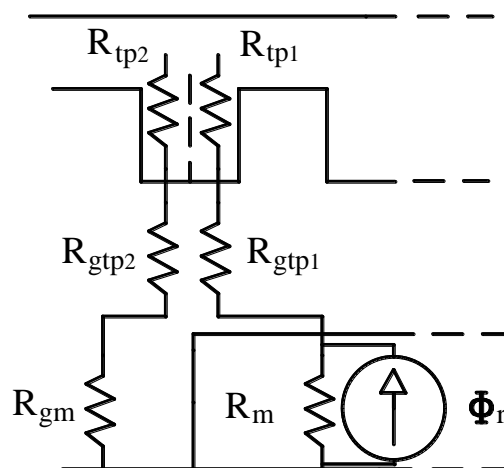
شکل ۲-۲۰ مدار معادل مغناطیسی با در نظر گرفتن سیم پیچ متمرکز [۲۴]



شکل ۲-۲۱ استاتور موتور القایی با در نظر گرفتن سیم پیچ گسترده [۵۳]

برای دریافت فایل word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

روشی که در [۳۴] ارائه شده شکستن دندان به دو بخش و اتصال هر بخش به قسمت متناظر از روتور یا ثانویه است که در شکل ۲-۲۴ دیده می شود. در این روش تعداد المان ها با حرکت تغییر کرده و ساختار و ابعاد ماتریس های شبکه را به هم می ریزد که خود به پیچیده شدن مدل می انجامد.



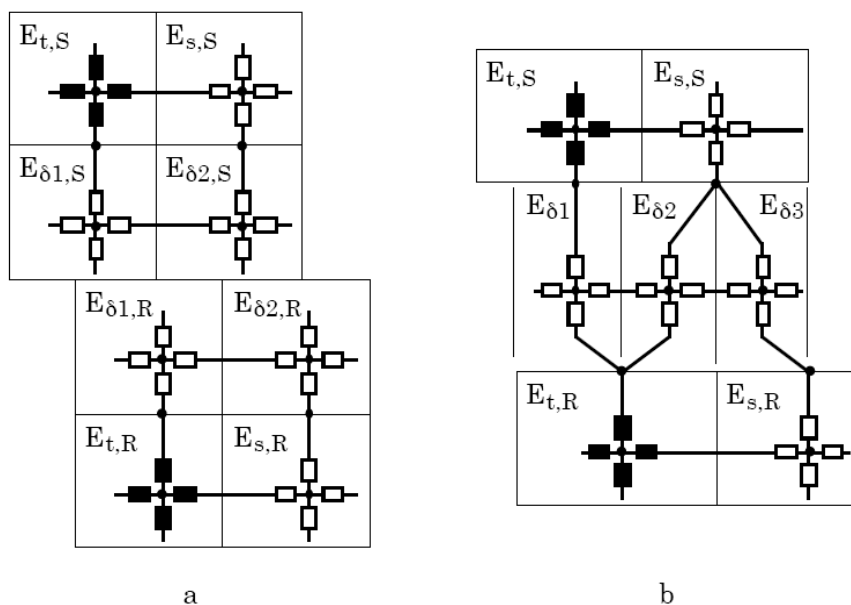
شکل ۲۳- شکل ۲-۲۴ مدلسازی حرکت با روش شکستن دندان [۳۴]

شکل ۲۴-

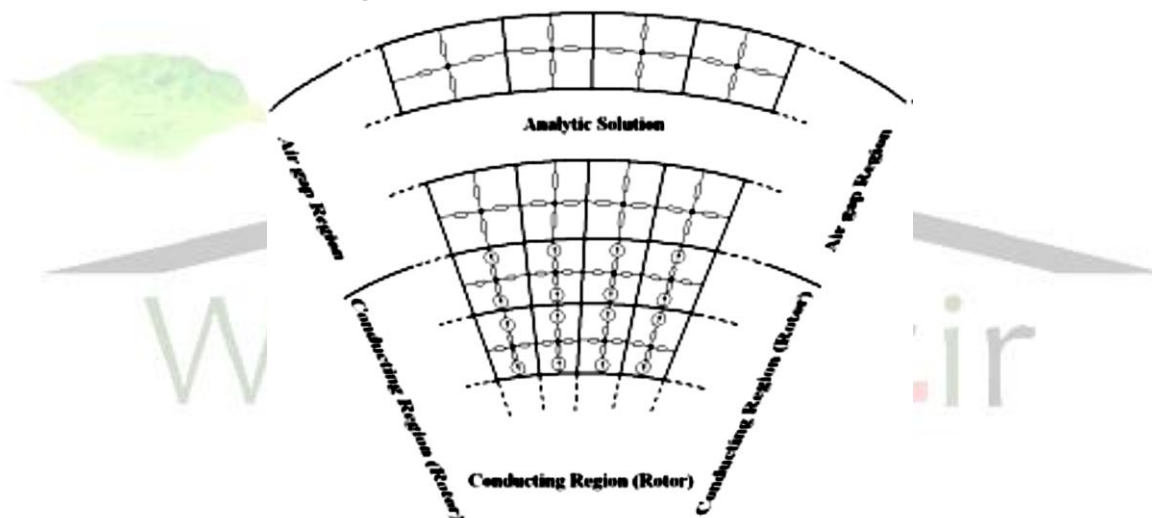
روش دیگری که برای حرکت ارائه شده است سطح لغزان است که در واقع در یک مدل کامل فاصله هوایی به سه قسمت پایینی و بالایی و میانی تقسیم شده و بخش بالایی به استاتور و بخش پایینی به روتور متصل می گردد. ارتباط بین این دو بخش به کمک لایه میانی با توجه به موقعیت بخش متحرک برقرار می گردد. در این روش نیز المان های بخش میانی تغییر می کند که منجر به تغییر ابعاد ماتریس مقاومت مغناطیسی موتور می شود. این روش در شکل ۲-۲۵ دیده می شود [۵۴ و ۵۵]. البته در این شکل لایه های استاتور و روتور با یک لایه هوایی میانی در بخش a به هم متصل شده اند. در قسمت b نیز دو لایه فاصله هوایی داریم که برای دقیق تر شدن می توان از سه لایه هو همانطور که گفته شد استفاده کرد.

روش دیگری نیز برای مدلسازی حرکت ارائه شده است که استفاده از ترکیب مدار معادل مغناطیسی و حل تحلیلی میدان است. در این روش روتور و استاتور به کمک مدار معادل مغناطیسی مدل شده و فاصله هوایی با حل معادلات ماکسول تحلیل می شود [۵۶]. مقادیر مرزی معادلات فاصله هوایی از مدار معادل مغناطیسی بدست می آید. شکل ۲-۲۶ این روش را نشان می دهد.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۲۵- شکل ۲-۲۵ مدل سازی حرکت با سطح لغزان [۵۴]



شکل ۲۶- شکل ۲-۲۶ مدل سازی حرکت با ترکیب روش مدار معادل مغناطیسی و روش تحلیلی [۵۶]

اثر اشباع آهن

اثر اشباع آهن در برخی مدل ها لحاظ شده است. دو روش عمده برای مدل سازی این اثر ارائه شده است. در روش اول برای بررسی و در نظر گرفتن اشباع منحنی BH آهن با تابعی تقریب زده می شود و H بر حسب B با تابعی که از روی برازش منحنی بدست آمده نوشته می شود. در نتیجه گذردهی نسبی آهن را می توان با تقسیم B بر H محاسبه کرد. برای مثال در [۲۵] رابطه ۲-۲۱ برای آهن بدست آمده است.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

$$H = (150B + 15B^{11}) \quad (21-2)$$

در نتیجه برای گذردهی مغناطیسی آهن رابطه زیر بدست می آید.

$$\mu_{ri} = (150 + 15B^{10})^{-1} \quad (22-2)$$

لذا با قرار دادن این گذردهی و حل عددی ماتریس ها چگالی شار در نقاط مختلف محاسبه می گردد. در روش دیگر ابتدا با یک مقدار اولیه از گذردهی مغناطیسی نسبی برای آهن معادلات حل شده و سپس با بدست آوردن چگالی شار در نقاط مختلف و مشخص کردن گذردهی مغناطیسی نسبی برای چگالی شار های بدست آمده با رابطه ۲-۲۳ گذردهی بروز شده و دو باره معادلات حل می شود این کار این قدر تکرار می شود تا تفاوت مقدار گذردهی مغناطیسی نسبی آهن در دو مرحله متوالی از مقداری که ما تعیین می کنیم کمتر شود. الگوریتم حل شامل این روش که برای یک موتور آهنربای دائم ارائه شده است در شکل ۲-۲۷ دیده می شود [۲۴].

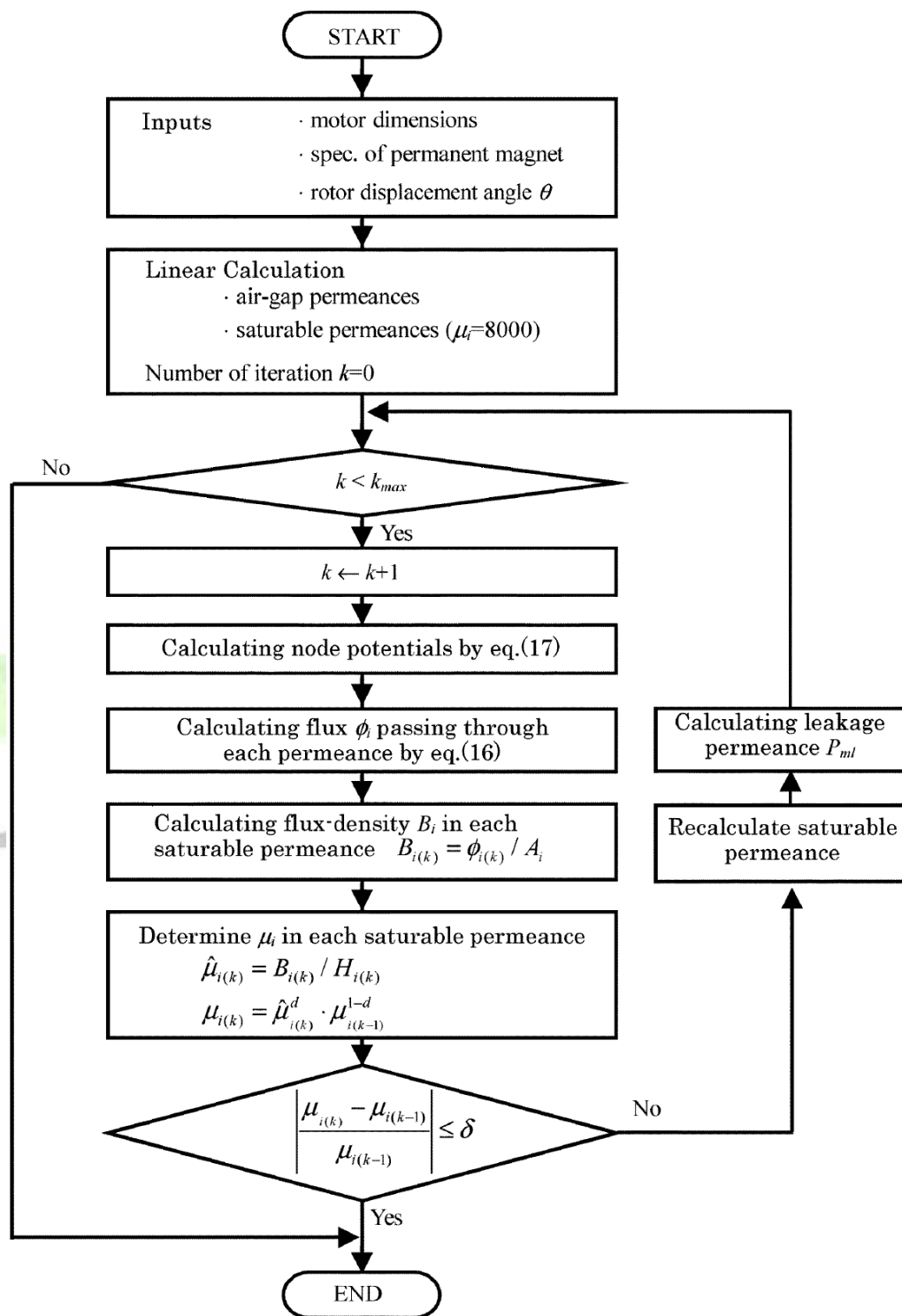
$$\begin{aligned} \mu_{ri}(k) &= \hat{\mu}_{ri}^d(k) \cdot \hat{\mu}_{ri}^{1-d}(k-1) \\ \hat{\mu}_{ri}(k) &= \frac{B_i(k)}{H_i(k)} \end{aligned} \quad (23-2)$$

که در این رابطه k نشان دهنده مرحله حل معادلات و d عدد ثابتی است که حدود ۰/۱ است.

جریان القایی

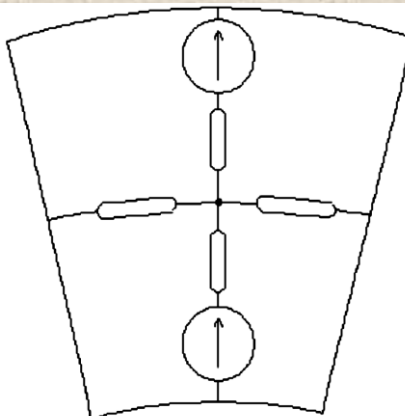
جریان القایی یکی از مشکل ترین حالت های مدلسازی به کمک مدار معادل مغناطیسی است. با این حال این پدیده نیز در چندین مقاله مدلسازی شده است [۵۶-۵۷]. اصول این روش بر پایه مدل سازی بخشی که جریان در آن القا می شود (ناحیه هادی) با یک منبع شار یا نیروی محرکه مغناطیسی همانند شکل ۲-۲۸ است. مقدار این جریان از رابطه ۲-۲۴ حاصل می شود [۵۶]. جزییات بیشتر این روش در مراجع موجود است.

برای دریافت فایل word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۲-۲۷ الگوریتم حل مدار معادل مغناطیسی با در نظر گرفتن مشخصه غیر خطی آهن [۲۴]

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۲-۲۸ مدل ناحیه هادی [۵۶]

$$\frac{\partial J_z}{\partial r} = \sigma \left[\frac{\partial B_\theta}{\partial t} + \omega_r \frac{\partial B_\theta}{\partial \theta} \right] \quad (24-2)$$

نیرو و گشتاور

نیرو و گشتاور در روش مدار معادل مغناطیسی می تواند به چندین روش محاسبه شود. روش اول محاسبه چگالی شار فاصله هوایی و استفاده از روش تحلیلی برای نیرو است که در بسیاری از مقالات استفاده می شود [۳۴]. روش دیگر که در مدار معادل های پیچیده و با المان زیاد می توان استفاده کرد، روش تنش ماکسول است. در این روش ابتدا در المان های کوچک چگالی شار تعیین می گردد و سپس با استفاده از روابط زیر چگالی نیرو محاسبه می شود.

$$dF_t = \frac{B_n B_t}{\mu_0} dl \quad (25-2)$$

$$dF_t = \frac{B_n^2 - B_t^2}{2\mu_0} dl \quad (26-2)$$

در نهایت با انتگرال گیری روی مسیر مورد نظر مقدار کل نیرو محاسبه می شود.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

روش دیگر بر اساس تغییرات انرژی و کو انرژی در اثر حرکت جزء متحرک است [۲۹]. در این روش گشتاور به کمک رابطه زیر محاسبه می شود.

$$T_{\alpha} = \left. \frac{\partial W_c(\alpha + \Delta\alpha)}{\partial(\Delta\alpha)} \right|_{\Delta\alpha=0} = \frac{1}{2\beta} [W_c(\alpha + \beta) - W_c(\alpha - \beta)] \quad (27-2)$$

که در این معادله $W_c(\alpha + \beta)$ کوانرژی در زاویه $\alpha + \beta$ است.

تابع توزیع چگالی شار

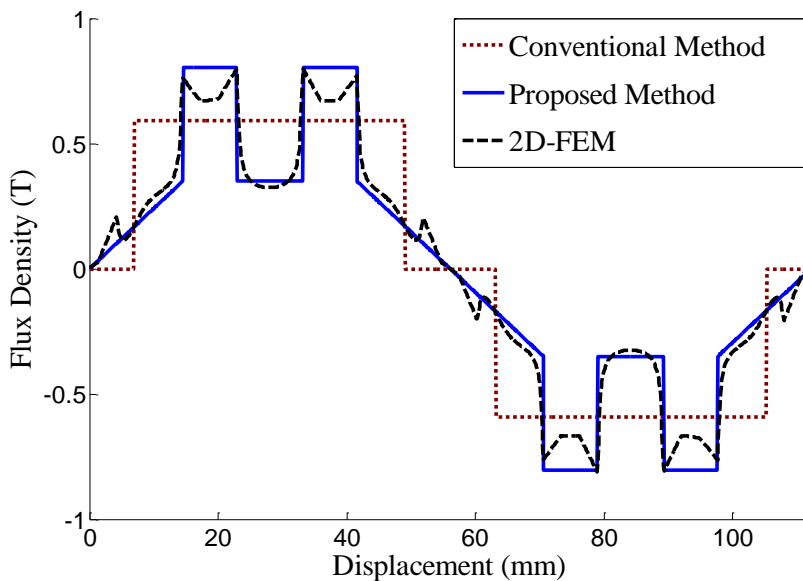
ارائه تابع توزیع چگالی شار علاوه بر کمک به بدست آوردن شکل نسبتاً دقیق تر توزیع چگالی شار و محاسبه هارمونیک های آن، می تواند به محاسبه دقیق تر نیرو نیز کمک کند. در مدل های ساده معمولاً از فرم مستطیلی برای چگالی شار استفاده می شده است.

در [۳۴] بر اساس چگالی شارهای بدست آمده از حل مدار معادل مغناطیسی تابع توزیع پیشنهادی برای یک گام قطبی موتور صورت زیر ارائه شده است:

$$B_y(x) = \begin{cases} \frac{k_{co} B_{first} x}{x_{t1}} & 0 < x < x_{t1} \\ k_{co} B_{ij} & x_{t1} < x < \tau - x_{t1} \\ k_{co} B_{last} \left(1 - \frac{(x - \tau)}{x_{t1}} \right) & \tau - x_{t1} < x < \tau \end{cases} \quad (28-2)$$

جزئیات این تابع در مرجع آن به طور کامل آمده است. در شکل های ۲-۲۹ و ۲-۳۰ چگالی شار بدست آمده و هارمونیک های آن توسط این روش با روش ساده مستطیلی و روش دقیق اجزاء محدود مقایسه شده است. نتایج نشان گر قابلیت بالای این تابع است.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

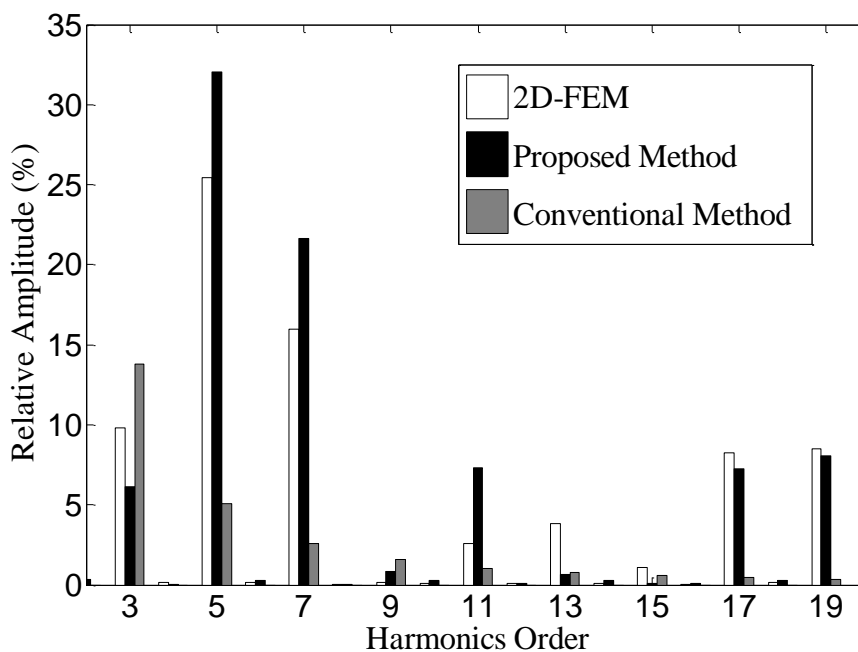


شکل ۲۷ -

شکل ۲۸ - شکل ۲۹-۲ توزیع چگالی شار فاصله هوایی به وسیله سه روش مرسوم، پیشنهادی و اجزاء

محدود [۳۴]

شکل ۲۹ -



شکل ۳۰ - شکل ۲-۳۰ مقایسه روش های مختلف از لحاظ پیش بینی هارمونیک های چگالی شار [۳۴]

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



فصل سوم

مدار معادل مغناطیسی پیشنهادی برای محاسبه تلفات هسته



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

هدف ما ارائه مدلی برای بهینه سازی بازده موتور سنکرون آهنربای دائم خطی است. از آنجا که تلفات هسته نقش مهمی در تعیین بازده دارد برآنیم تا مدلی مناسب برای طراحی و بهینه سازی با در نظر گرفتن تلفات هسته ارائه کنیم. به این منظور تلاش می شود که ضمن تامین سادگی مدل، حتی الامکان خصوصیات مثبت مدل های پیشین نیز در نظر گرفته شود. اساس مدل بر مدار معادل ارائه شده در [۳۴] است و سعی بر آن است که برخی نواقص مدل مذکور را بر طرف کرده و قابلیت هایی در جهت هدف مورد نظر که محاسبه دقیق تلفات هسته است بدست آوریم.

ابتدا به نقد مدل ارائه شده در [۳۴] پرداخته و مشکلات آن را مشخص خواهیم کرد و سپس به رفع آنها می پردازیم.

محاسن و معایب مدل مرجع [۳۴]

از مزایای این مدل می توان به موارد زیر اشاره کرد.

- ۱- سادگی و تعداد کم المان های بکار رفته در مدار معادل مغناطیسی
- ۲- ارائه تابع توزیع چگالی شار که باعث دقت محاسبه هارمونیک های چگالی شار فاصله هوایی و محاسبه بهتر نیرو می شود.
- ۳- مدلسازی اثر غیر خطی آهن
- ۴- مدلسازی شارهای ناشی دندانه و آهنربای دائم

در کنار مزایای فوق الذکر، این مدل معایبی نیز دارد که برای کاربرد ما ایجاد خطا می کند. اولین عیب این مدل عدم در نظر گرفتن جریان سیم پیچ ها در محاسبات چگالی شار است. این جریان ها در بار کامل اثر زیادی بر چگالی شار در آهن و اشباع احتمالی آن خواهد داشت.

یکی دیگر از معایب عمده عدم در نظر گرفتن یوغ است. در نتیجه تلفات آهنی یوغ را نمی توان محاسبه کرد. همچنین در صورت طراحی نامناسب از اشباع یوغ نیز مطلع نمی شویم.

عیب سوم فاصله هوایی است که مسیرهای شار عرضی در آن دیده نشده است.

چهارمین مشکل این مدل تغییر مدار معادل در اثر حرکت است. در این مدار معادل با حرکت اولیه هم تعداد المان ها و هم نحوه اتصال آنها و در نتیجه ساختار ماتریس ها تغییر خواهد کرد. در مدار معادل پیشنهادی سعی شده این مشکلات پوشش داده شود.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

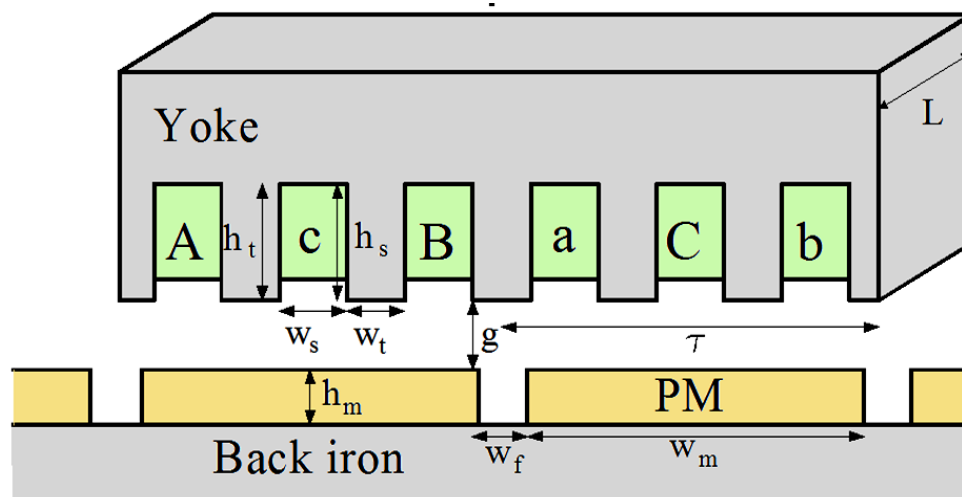
در [۳۴] الگوریتم مشخصی نیز برای حل مدار معادل با در نظر گرفتن اشباع ارائه نشده و در شبیه سازی ها نیز موتور به اشباع نرفته است لذا اثر غیر خطی بودن آهن مشخص نشده است. در مدل پیشنهادی الگوریتم مربوط به حل مدار معادل با در نظر گرفتن اشباع ارائه می گردد و اثر اشباع نیز به تفصیل مورد بررسی قرار می گیرد.

مدار معادل مغناطیسی پیشنهادی

همانند [۳۴] مدل پیشنهادی شامل دو بخش است. بخش اول مدار معادل مغناطیسی است. بخش دوم تابع توزیع چگالی شار آهنربای دائم در دندانه و فاصله هوایی مبتنی بر نتایج حاصل از حل مدار معادل را می دهد.

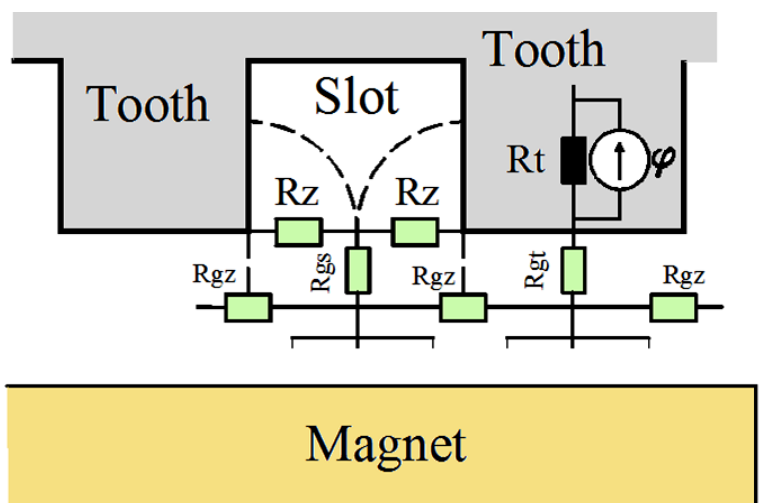
مدلسازی اولیه

مدار معادل مغناطیسی را در سه جزء اولیه، ثانویه و فاصله هوایی به طور مجزا تشکیل داده و سپس ارتباط بین اجزاء آنها را برقرار می نمایم. موتور مورد بررسی در شکل ۱-۳ دیده می شود. مدلسازی بخشی از اولیه در شکل ۲-۳ دیده می شود. این بخش شامل مقاومت مغناطیسی دندانه ها، شیارها و مسیر نشت شار میان دندانه ها می باشد. به دلیل امکان بروز اشباع، مدلسازی دندانه ها با مقاومت مغناطیسی معادل الزامی است. برای مدل کردن دندانه در حالت اشباع، مقاومت مغناطیسی دندانه با رابطه غیر خطی در نظر گرفته می شود. برای یوغ نیز مقاومت مغناطیسی بین دو دندانه در نظر گرفته می شود که این مقاومت مغناطیسی نیز غیر خطی است و در شکل ۳-۳ دیده می شود.

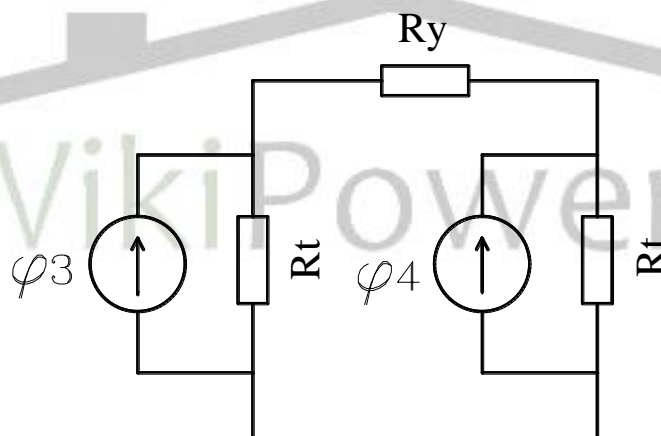


برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

شکل ۱-۳ نمای موتور سنکرون آهنربای دائم خطی



شکل ۲-۳ مدار معادل مغناطیسی بخشی از اولیه



شکل ۳-۳ مدلسازی یوغ

مقاومت های مغناطیسی تشکیل دهنده اولیه موتور از روابط زیر محاسبه می شوند:

$$R_t = \frac{h_t}{\mu_0 \mu_{ri}(B_t) w_t L} \quad (1-3)$$

$$R_z = \frac{w_s}{\mu_0 h_s L} \quad (2-3)$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

$$R_y = \frac{\tau_s}{\mu_0 \mu_{ri} (B_y) h_y L} \quad (۳-۳)$$

در این روابط w_s عرض شیار، w_t عرض دندانه، h_s عمق شیار، h_t ارتفاع دندانه، h_y ارتفاع دندانه، L عرض موتور و μ_{ri} گذردهی مغناطیسی نسبی آهن می باشند. مدلسازی سیم پیچ ها به کمک مقدار شاری که هر فاز از هر دندانه عبور می دهد انجام می شود. برای دندانه های مختلف شاری که از دندانه می گذرد به صورت معادلات زیر است. شماره دندانه ها در شکل ۳-۴ نمایش داده شده است.

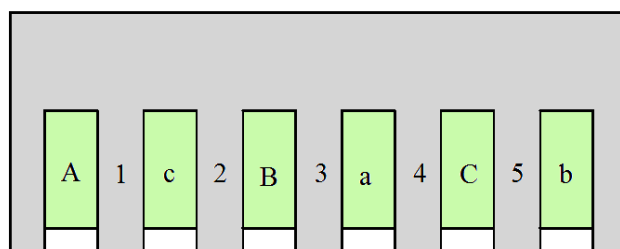
$$\begin{aligned} \varphi_1 &= -\frac{1}{3} n_c i_A R_{t1}^{-1} \\ \varphi_2 &= \frac{1}{3} n_c (-i_A + i_C) R_{t2}^{-1} \\ \varphi_3 &= \frac{1}{3} n_c (-i_A + i_C - i_B) R_{t3}^{-1} \\ \varphi_4 &= \frac{1}{3} n_c (-i_B + i_C) R_{t4}^{-1} \\ \varphi_5 &= -\frac{1}{3} n_c i_B R_{t5}^{-1} \end{aligned} \quad (۳-۳)$$

در این روابط φ_i شار گذری از دندانه i ام، R_{ti} مقاومت مغناطیسی دندانه i ام، i_A ، i_B و i_C جریان فازهای مختلف و n_c تعداد دور در هر شیار است. جریان های فازهای مختلف نیز به صورت معادله ۳-۴ ارائه شده است.

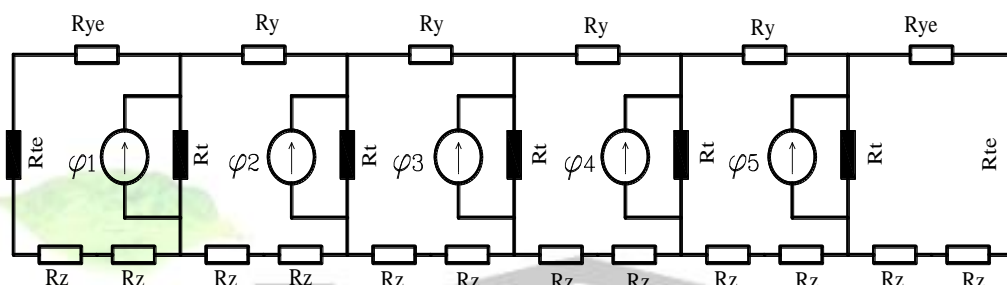
$$\begin{aligned} i_A &= i_m \sin\left(\frac{x\pi}{\tau} + \phi_0\right) \\ i_B &= i_m \sin\left(\frac{x\pi}{\tau} - \frac{2\pi}{3} + \phi_0\right) \\ i_C &= i_m \sin\left(\frac{x\pi}{\tau} + \frac{2\pi}{3} + \phi_0\right) \end{aligned} \quad (۴-۳)$$

در رابطه فوق x ، i_m و ϕ_0 به ترتیب مکان اولیه، دامنه جریان و فاز اولیه است. به این ترتیب تمام اجزاء اولیه مدلسازی شد و دو مورد از عیوب مدار معادل مرجع [۳۴] که عدم مدلسازی سیم پیچ اولیه و مقاومت مغناطیسی یوغ بود رفع شده است. البته تا اینجا ۱۱ المان به مدار قبلی اضافه شده است که اجتناب ناپذیر است. مدار کامل اولیه در شکل ۳-۵ دیده می شود.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۳-۴ شماره گذاری دندانه ها



شکل ۳-۵ مدار معادل کامل اولیه

مدلسازی ثانویه

در مدل سازی ثانویه، آهنربا با منبع شار Φ_r و مقاومت مغناطیسی R_{mo} مدل شده است. دو مسیر نشت وجود دارد که عبارتند از مسیر شار نشتی بین دو آهنربای مجاور و مسیر شار نشتی خودی هر آهنربا. شار نشتی خودی هر آهنربا به وسیله کاهش مقاومت مغناطیسی آهنربا و شار نشتی بین دو آهنربای مجاور با مقاومت مغناطیسی R_{mm} مدل سازی می شود. برای مدل سازی این حالت فضای میانی آهنرباها با مقاومت مغناطیسی R_{mg} جایگزین شده است. دندانه های که در میان دو آهنربا قرار می گیرند در مدار معادل مغناطیسی به این مقاومت متصل می گردند. مدار معادل بخشی از ثانویه در شکل ۳-۶ دیده می شود. مقاومت های مغناطیسی بخش ثانویه از زیر بدست می آید:

$$R_{mm} = \left[\frac{\mu_0 L}{\pi} \ln \left(1 + \frac{\pi g}{w_f} \right) \right]^{-1} \quad (18-3)$$

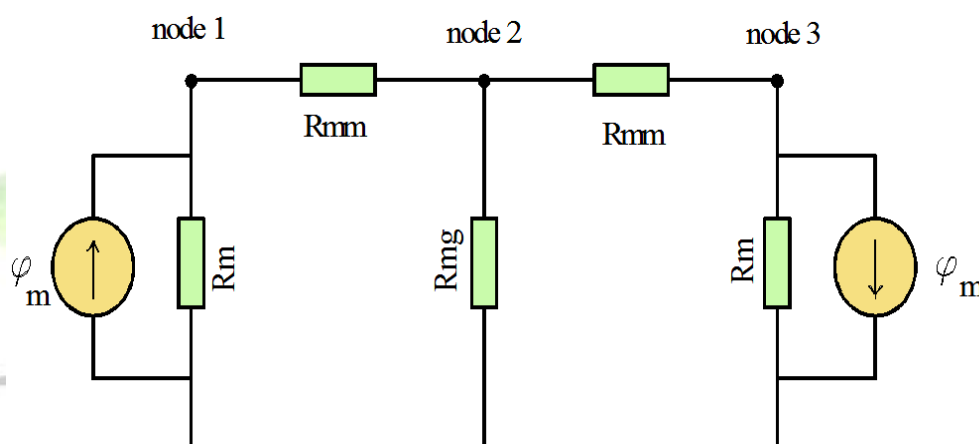
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

$$R_m = \frac{h_m}{\mu_0 \mu_{rm} w_m L} \quad \& \quad \Phi_r = \frac{H_C h_m}{R_m} \quad (19-3)$$

$$R_{mg} = \frac{h_m}{\mu_0 w_f L} \quad (20-3)$$

در این روابط w_f فاصله میان آهنرباها و h_m ارتفاع آهنربا است.

مدار معادل ثانویه کاملاً مطابق با مرجع [۳۴] است. سه گره در این مدار معادل مشخص شده که در هنگام اتصال به فاصله هوایی مورد بحث قرار می گیرد.



شکل ۳-۶ مدار یک گام قطب از ثانویه

مدلسازی فاصله هوایی

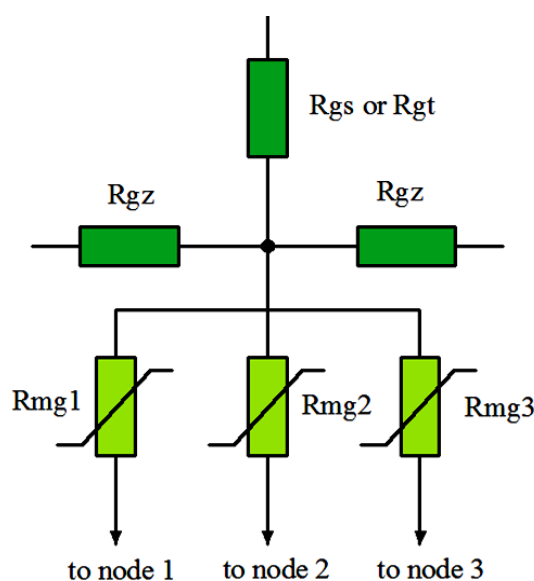
فاصله هوایی پل ارتباطی میان اولیه و ثانویه است. در مدل پیشنهادی فاصله هوایی به دو بخش بالایی و پایینی تقسیم می شود. با این کار چگالی شار وسط فاصله هوایی نیز قابل دسترسی است. در ادامه فاصله هوایی بالایی در زیر شیارها و زیر دندانه‌ها از هم مجزا شده است. هر ناحیه مجزا شده از بالا به شیار یا دندانه متناظر و از پائین به مقاومت مغناطیسی عرضی و فاصله هوایی پایینی متصل می گردد.

بخشی از فاصله هوایی در شکل ۳-۷ دیده می شود. هر شیار یا دندانه از طریق سه مقاومت مغناطیسی متغیر به آهنرباها و ناحیه بین دو آهنربا متصل می گردد. هر مقاومت به یک گره که در شکل ۳-۶ هم نمایش داده شده بود وصل می گردد. این مقاومت ها همیشه موجودند ولی اگر تماس بین جزء هاس مربوطه نباشد مقدار آنها بی نهایت فرض می شود. به این صورت نحوه اتصال المان ها تغییر نکرده و در صورت حرکت نیز ساختار کلی

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

شبکه ثابت می ماند و فقط مقدار مقاومت های مغناطیسی فاصله هوایی پایینی تغییر می کند. به این صورت مدلسازی حرکت و تعیین ماتریس مقاومت یا رسانایی مغناطیسی برای سیستم بسیار ساده می شود. به این صورت چند بهبود در مدل مرجع [۳۴] داده شد که عبارتند از:

- ۱- بهبود مدلسازی حرکت بدون به هم ریختن شبکه
- ۲- بدست آوردن چگالی شار وسط فاصله هوایی
- ۳- در نظر گرفتن مسیر های عرضی شار در فاصله هوایی که برای فاصله هوایی های بزرگ به افزایش دقت می انجامد.



شکل ۳-۷ مدار فاصله هوایی

مقاومت مغناطیسی ناحیه زیر دندانه، و مقاومت مغناطیسی ناحیه زیر شیار و مقاومت های عرضی از رابطه

زیر بدست می آید:

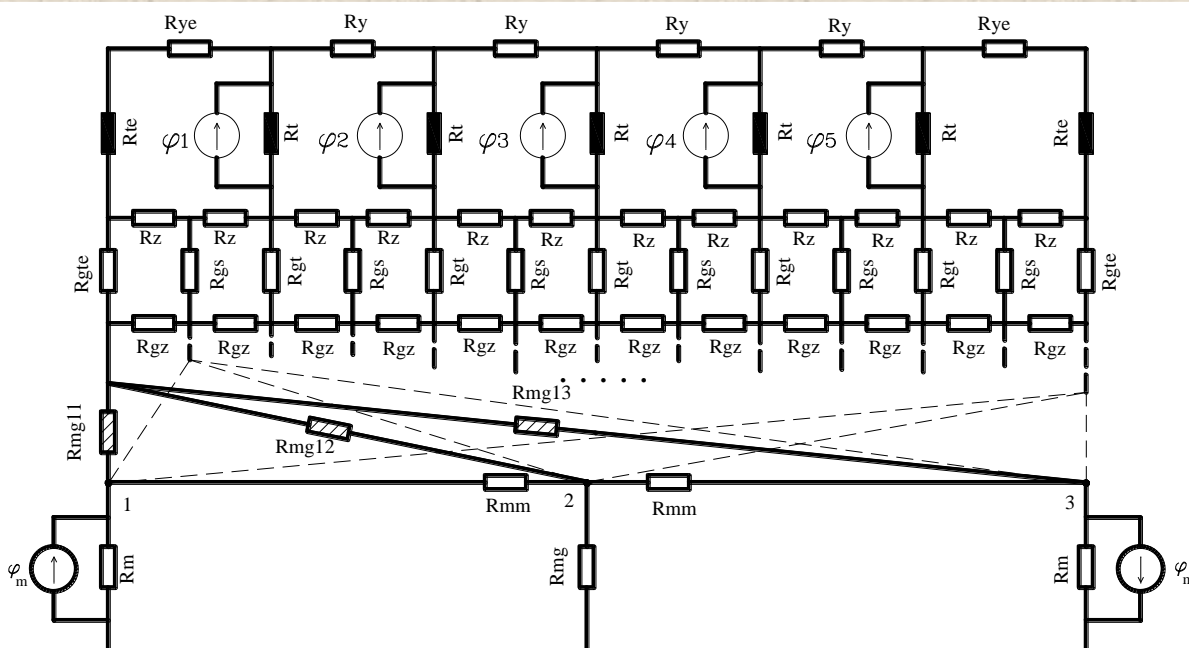
$$R_{gs} = \frac{g}{2\mu_0 w_s L} \quad (21-3)$$

$$R_{gt} = \frac{g}{2\mu_0 w_t L} \quad (22-3)$$

$$R_{gz} = \frac{\tau_s}{\mu_0 L g} \quad (23-3)$$

مقاومت های متغیر هم با رابطه زیر محاسبه می شود:

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۳-۹ شمای کلی مدار معادل مغناطیسی پیشنهادی

حل مدار معادل مغناطیسی

مدار معادل مغناطیسی را می توان با کمک تئوری مدارها بسهولت و در زمان کوتاه حل کرد. با توجه به نحوه مدل سازی منابع دو روش گره و حلقه قابل پیاده سازی است. در این پژوهش از روش گره استفاده شده است. ابتدا گره ها شماره گذاری شده و سپس با حل معادلات، چگالی شار را در نواحی دندانه ها، شیارها و ما بین دو قطب آهنربا محاسبه نمود. معادله تشکیل شده برای مدار معادل به صورت زیر است.

$$[\mathcal{I}] = [P]^{-1}[\phi] \quad (25-3)$$

در این رابطه $[P]$ ماتریس پرمانس گره، $[\mathcal{I}]$ ماتریس نیروی محرکه مغناطیسی گره و $[\phi]$ بردار منابع شار می باشد. از آنجا که فقط هفت منبع جریان در مدل داریم، بردار منابع شار دارای هفت عضو غیر صفر است:

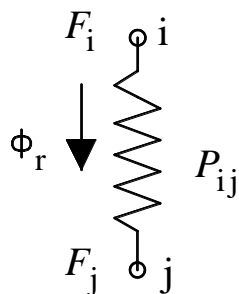
$$[\phi] = [\phi_m \quad 0 \quad -\phi_m \quad 0 \quad \dots \quad \phi_1 \quad \dots \quad \phi_5 \quad \dots \quad 0]^T \quad (26-3)$$

در نتیجه نیروی محرکه مغناطیسی هر گره از رابطه زیر بدست می آید.

شکل ۳-۱۰ شاخه ای از مدار معادل را بین گره i ام و j ام را نشان می دهد. چگالی شار در این شاخه از رابطه زیر بدست می آید.

$$B_{ij} = \frac{(F_i - F_j) P_{ij}}{A_{ij}} \quad (27-3)$$

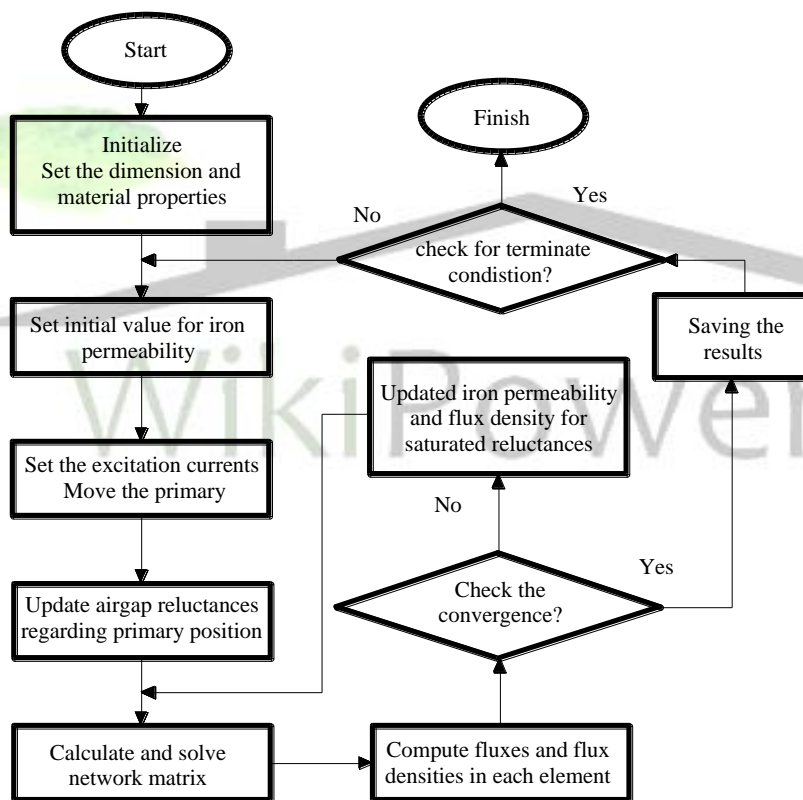
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۳۱- شکل ۳-۱۰ شاخه ای از مدار معادل

شکل ۳۲-

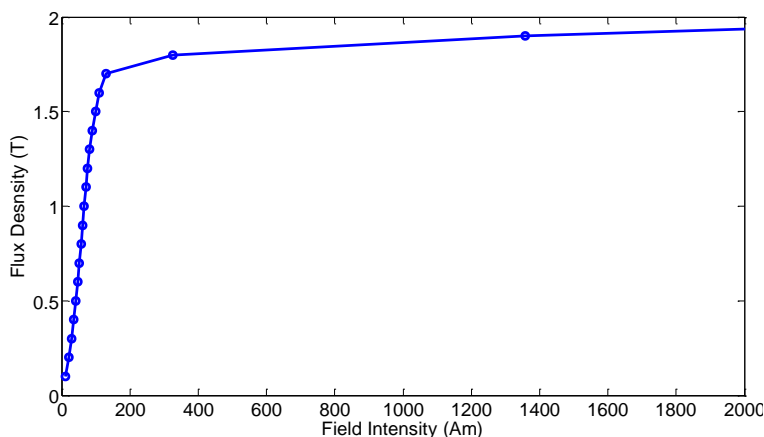
شکل ۳۳- برای حل غیر خطی این معادلات از الگوریتم ارائه شده در شکل ۳-۱۱ استفاده می شود. برای مدلسازی آهن نیز از منحنی مغناطیسی مربوط به آهن M36 که در شکل ۳-۱۲ دیده می شود استفاده گردیده است. در هر مرحله هم قابلیت گذردهی جدید بر اساس رابطه زیر محاسبه می گردد.



شکل ۳۴-

شکل ۳۵- شکل ۳-۱۱ الگوریتم حل مدار معادل مغناطیسی

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۳۶-

شکل ۳۷-

شکل ۳۸- شکل ۳-۱۱ مشخصه مغناطیسی آهن

شکل ۳۹-

$$\mu_{ri}(k) = \hat{\mu}_{ri}^{0.1}(k) \cdot \hat{\mu}_{ri}^{0.9}(k-1)$$

$$\hat{\mu}_{ri}(k) = \frac{B_i(k)}{H_i(k)}$$

شکل ۴۰- (۳-۲۸)

شکل ۴۱-

تابع توزیع چگالی شار

مقادیر چگالی شار در نواحی معینی از طول ماشین در تعریف تابع ریاضی مبین توزیع چگالی شار استفاده می شود. تابع مذکور مقدار چگالی شار را در هر نقطه از طول ماشین بدست می دهد. در این پژوهش دو تابع یکی برای فاصله هوایی و دیگری برای وسط دندانها ارائه می شود. تابع دوم برای محاسبه تلفات آهن کاربرد دارد. تابع توزیع چگالی شار در وسط دندانها برای یک گام قطبی موتور به صورت زیر پیشنهاد می شود:

$$B_y = \begin{cases} B_{ti} & \text{Tooth} \\ 0 & \text{Slots} \end{cases} \quad (۳-۲۹)$$

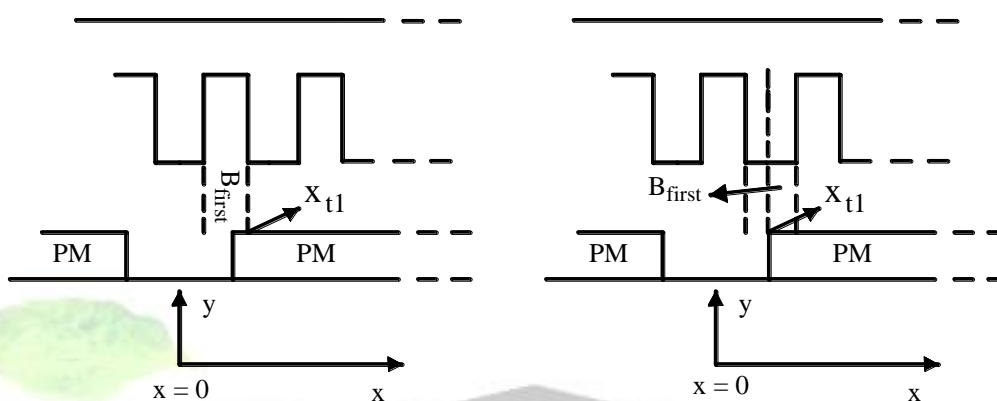
که در آن B_{ti} چگالی شار دندان i ام است.

برای چگالی شار فاصله هوایی همانند مرجع [۳۴] از آخرین دندانهای که به آهنربا متصل است تا نقطه میانی دو آهنربا چگالی شار به صورت یک تابع شیب از مقدار چگالی شار آخرین قطعه که جزئی از آن بر روی آهنربا قرار گرفته است به سمت صفر میل می کند. ولی در قسمت میانی به دلیل عدم اتصال شیارها به ثانویه فقط مقادیر چگالی دندانها در تابع ظاهر می گردد. تابع توزیع چگالی شار فاصله هوایی پیشنهادی برای یک گام قطبی موتور صورت زیر خواهد بود:

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

$$B_y(x) = \begin{cases} \frac{B_{\text{first}} \cdot x}{X_{t1}} & 0 < x < X_{t1} \\ B_{ti} & X_{t1} < x < \tau - X_{t1} \\ B_{\text{last}} \left(1 - \frac{(x - \tau)}{X_{t1}} \right) & \tau - X_{t1} < x < \tau \end{cases} \quad (30-3)$$

نقاط شروع و X_{t1} در شکل ۱۹-۳ مشخص شده اند.



شکل ۴۲- شکل ۳-۱۲ نقاط مهم در تشکیل تابع توزیع چگالی شار فاصله هوایی [۳۴]

محاسبه نیرو مهمترین مشخصه یک موتور خطی نیروی افقی آن می باشد. در موتور سنکرون آهنربای دائمی خطی این نیرو به صورت زیر بیان می شود:

$$F_{\text{thrust}}(x_0) = F_{\text{avg}}(x_0) + F_{\text{ripple}}(x_0) \quad (31-3)$$

که در آن x_0 مکان اولیه را نسبت به ثانویه نشان می دهد. این نیرو شامل دو بخش است. بخش اول و اصلی آن میانگین نیروی افقی می باشد. بخش دوم نوسانات نیرو است که میانگین آن صفر است و فقط موجب کاهش دقت سیستم می گردد. با استفاده از روابط حاکم بر موتورهای گردان و با ایجاد تغییرات مناسب بخش اصلی نیروی افقی برای یک موتور سه فاز از رابطه زیر محاسبه می گردد [۳۳]:

$$F_{\text{avg}} = 3\hat{B}_p \hat{I}_p L N_{ph} K_w \cos \beta + \frac{3\pi}{\tau} (L_q - L_d) \hat{I}_p^2 \sin 2\beta \quad (32-3)$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

در رابطه فوق در این رابطه \hat{B} دامنه مولفه اصلی چگالی شار ناشی از آهنربای دائم، \hat{I}_p دامنه جریان فاز، L عرض موتور، N_{ph} تعداد دور سیم پیچ در هر فاز، K_w ضریب سیم پیچی، τ گام قطب، L_q اندوکتانس محور عمودی، L_d اندوکتانس محور افقی و β زاویه بین جریان فاز و ولتاژ القایی است. برای موتور آهنربای سطحی حداکثر این نیرو به صورت زیر خواهد بود:

$$\max [F_{avg}] = 3\hat{B}\hat{I}_p L N_{ph} K_w \quad (33-3)$$

این رابطه را می توان به صورت دیگری هم نوشت که در زیر دیده می شود [۳۳]:

$$\max [F_{avg}] = \hat{S} \cdot \hat{B} p \tau L K_w \quad (34-3)$$

که در این رابطه \hat{S} دامنه چگالی خطی جریان و p زوج قطب ماشین است. مقدار \hat{S} نیز از رابطه زیر محاسبه می گردد [۳۳]:

$$\hat{S} = \frac{\sqrt{2} J_{rms} h_s w_s K_{fill}}{\tau_s} \quad (35-3)$$

در رابطه فوق J_{rms} چگالی جریان موثر سیم پیچ، h_s ارتفاع شیار، w_s عرض شیار، τ_s گام شار و K_{fill} ضریب پر شدن شیار می باشد.

ارزیابی مدل پیشنهادی

برای ارزیابی صحت مدلسازی، این مدل با روش اجزاء محدود برای یک برای یک موتور دو قطبی که مشخصات آن در جدول ۳-۱ آمده است مقایسه شده است.

جدول ۳-۱ پارامترهای موتور مورد بررسی

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
گام قطب (mm)	۴۲	پهنای آهنربای دائم (mm)	۳۱/۵

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

۴	ارتفاع آهنربای دائم (mm)	۱۴	گام شیار (mm)
۸۴۰	H_c آهنربای دائم (KA/m)	۶	پهنای دندانهای میانی (mm)
۱/۰۸۹	گذردهی مغناطیسی نسبی آهنربای دائم	۳	پهنای دندانهای انتهایی (mm)
۸۴	عرض موتور (mm)	۸	پهنای شیار (mm)

شبهه سازی موتور سنکرون آهنربای دائم خطی به روش اجزاء محدود را می توان به دسته استاتیکی و دینامیکی در این بخش حالت دو بعدی استاتیکی مورد بررسی قرار گرفته است در نتیجه تنها مولفه Z پتانسیل برداری مغناطیسی وجود دارد. در حالت استاتیک موتور ساکن فرض شده و از جریان ها گردابی، اثر پوستی صرف نظر می شود. در این حالت می توان توزیع چگالی شار ناشی از آهنربای دائم و سیم پیچ های سه فاز را محاسبه کرد. همچنین مشخصه نیروی استاتیک نیز در این حالت قابل محاسبه و ترسیم است. فرمول بندی اجزاء محدود با فرض اینکه موتور توسط یک منبع جریان کنترل شده مانند اینورتر جریان تغذیه می شود انجام شده است. در این صورت داریم:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -(J_0 + J_m) \quad (36-3)$$

که در آن، A_z مولفه Z بردار پتانسیل مغناطیسی، J_0 چگالی جریان سیم پیچی و J_m چگالی جریان مغناطیس کننده معادل آهنربا می باشد. با توجه به اینکه منحنی مغناطیسی آهنربای مورد استفاده که نئودیمی (NdFeB) است، در نقطه کار موتور با تقریب بسیار خوبی خطی می باشد، در نتیجه چگالی جریان مغناطیس کننده آهنربا را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$J_m = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times M \quad (37-3)$$

که در آن، M شدت مغناطیس کنندگی آهنربا می باشد. به این ترتیب بردار پتانسیل مغناطیسی در سرتاسر موتور محاسبه می شود. با استفاده از آن می توان چگالی شار را در موتور معین نمود. برای حل این معادله از روش استاتیک استفاده می شود.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

قابل ذکر است که تحلیل اجزاء محدود بکار رفته در این پژوهش با مواد دارای مشخصه غیر خطی می باشد.

برای بدست آوردن نیرو سه راه عمده وجود دارد:

✓ قانون نیروی لورنتز

✓ روش تنش ماکسول

✓ روش کار مجازی

در روش اول از قانون نیروی آمپر استفاده می شود. به این ترتیب که اگر چگالی شار در یک منطقه برابر B بوده و

یک هادی با چگالی جریان J در آن واقع شود، نیروی وارد بر هادی برابر است با:

$$d\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \quad (38-3)$$

به این ترتیب نیرو در هر المان از هادی محاسبه شده و از جمع برداری این نیروها، نیروی کل حاصل می شود. در

روش تنش ماکسول نیروهای عمودی و افقی از روابط زیر بدست می آیند:

$$dF_t = \frac{B_n B_t}{\mu_0} dl \quad (39-3)$$

$$dF_n = \frac{B_n^2 - B_t^2}{2\mu_0} dl \quad (40-3)$$

در نهایت با انتگرال گیری روی مسیر مورد نظر مقدار کل نیرو محاسبه می شود.

روش کار مجازی نیرو را از تغییرات انرژی همزاد محلی محاسبه می کند. در نتیجه مقدار نیرو در جهت S برابر است

با:

$$F_s = \frac{W_2' - W_1'}{\Delta S} \quad (41-2)$$

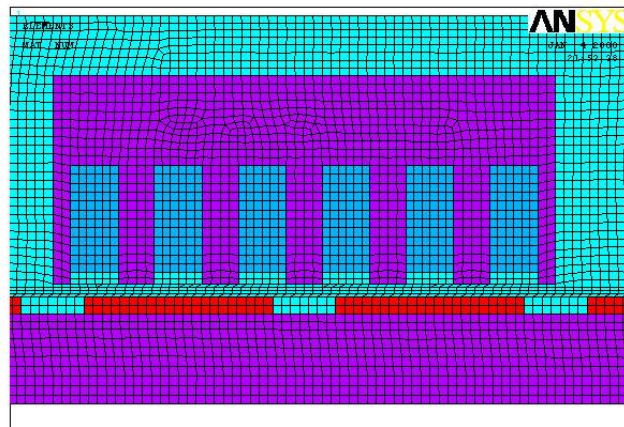
در این پژوهش از روش کار مجازی به دلیل حساسیت کمتر به مش بندی و دقت بالاتر استفاده شده است.

هر دو روش بر روی موتور انتخابی اعمال می گردد. نحوه مش بندی موتور، خطوط شار بدست آمده توسط روش

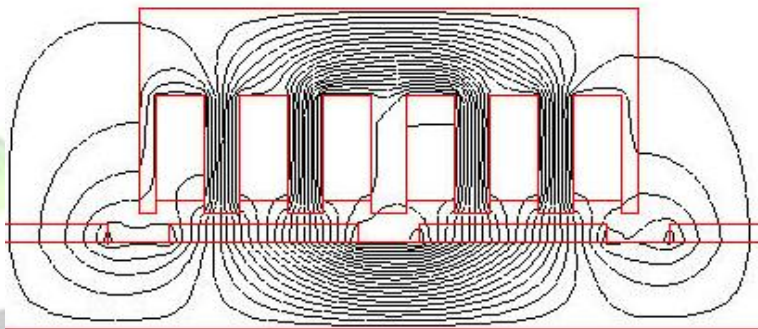
اجزاء محدود در حالت بی بار و توزیع مولفه های عمودی و طولی چگالی شار در شکل های ۳-۱۳ تا ۳-۱۶ دیده

می شود.

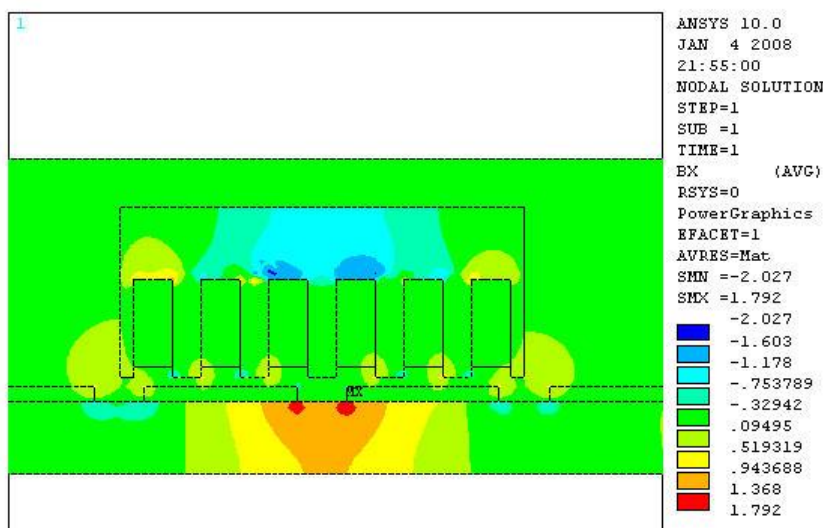
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۳-۱۳ مش بندی موتور

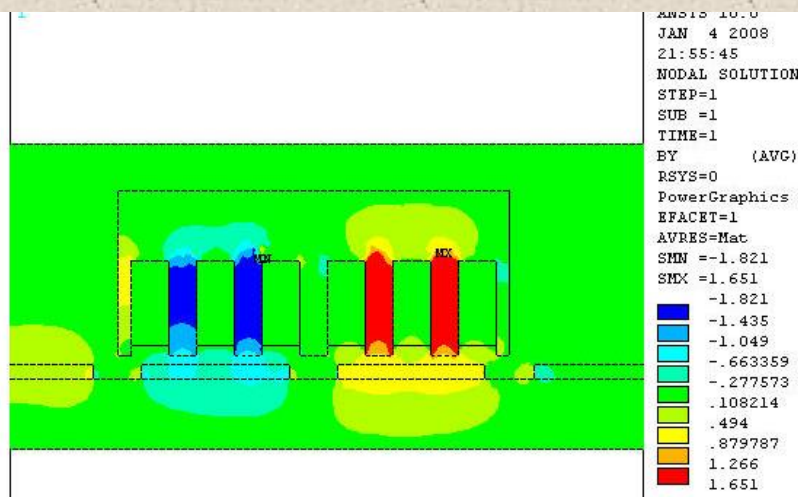


شکل ۳-۱۴ خطوط شار در حالت بی بار



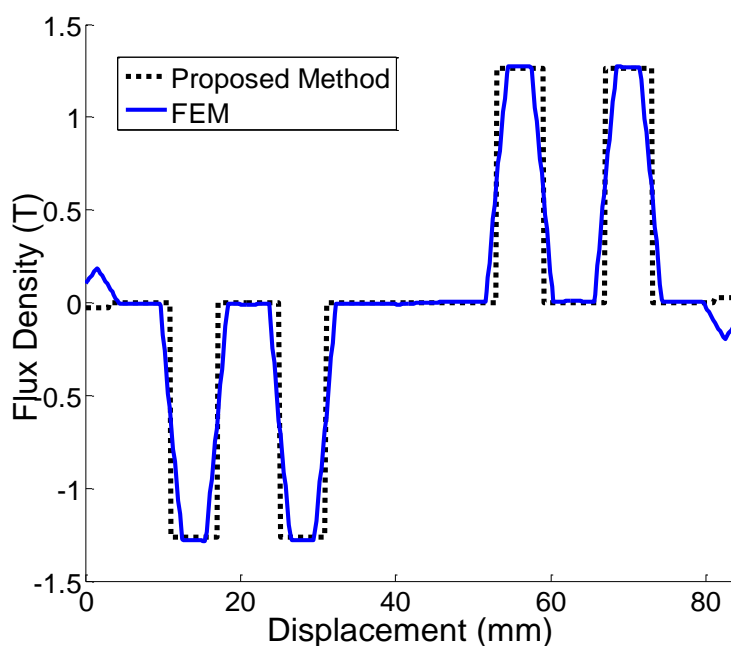
شکل ۳-۱۵ توزیع مولفه طولی چگالی شار در حالت بی بار

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم



شکل ۳-۱۶ توزیع مولفه عمودی چگالی شار در حالت بی بار

چگالی شار در وسط دندانه ها در حالت بی باری توسط دو روش مدار معادل مغناطیسی پیشنهادی و روش اجزاء محدود در شکل ۳-۱۷ دیده می شود. ملاحظه می شود که نتایج تطابق خوبی با هم دارند. فقط در دندانه های انتهایی به علت نشت شار از دیواره دندانه خطا وجود دارد که به دلیل کم بودن چگالی شار در هدف ما که محاسبه تلفات آهن است خطای قابل ملاحظه ای ایجاد نمی کند. چگالی شار در وسط دندانه ها در حالت وجود جریان اولیه نیز توسط دو روش مدار معادل مغناطیسی پیشنهادی و روش اجزاء محدود در شکل ۳-۱۸ دیده می شود. ملاحظه می شود که مدار معادل پیشنهادی به خوبی اثر جریان آرمیچر را مدل می کند.

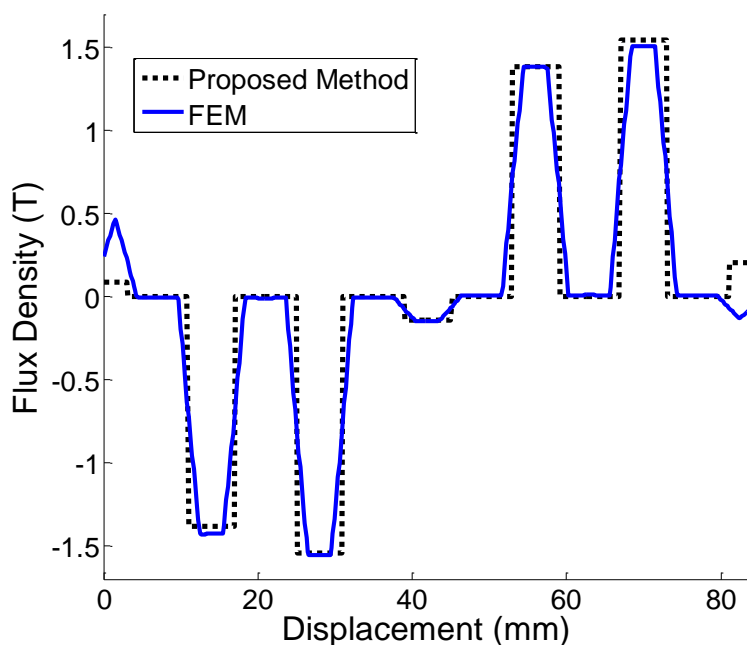


شکل ۳-۱۷ چگالی شار وسط دندانه ها در طول موتور در حالت بی بار

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

در این شکل مشاهده می شود که با وجود جریان در اولیه باعث می شود که دیگر چگالی شار دندان وسط که بین دو آهنربا قرار گرفته صفر نشود. در این حالت هنوز اشباع وجود ندارد این مساله با توجه به مقادیر چگالی شار و همچنین منحنی اشباع آهن مشخص است. در شکل ۳-۱۹ حالتی نمایش داده شده که به دلیل بالا بودن شار آهنربای دائم کاملاً به اشباع رفته اند. در این حالت مدار معادل مغناطیسی با المان های خطی، مدار معادل مغناطیسی غیر خطی و روش اجزاء محدود مقایسه شده اند. همانطور که ملاحظه می شود مدار معادل مغناطیسی غیر خطی به خوبی اشباع را مدل می کند در حالی که در حالت خطی خطای تخمین داریم.

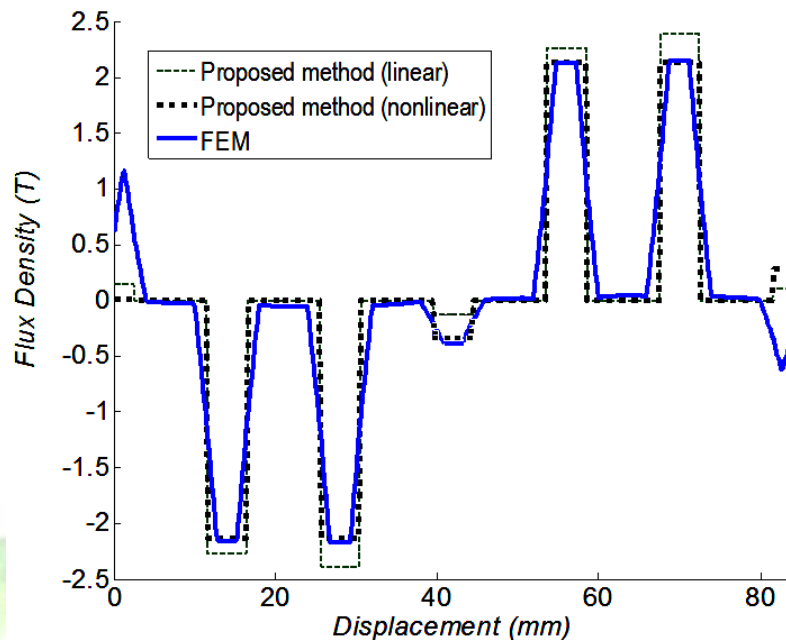
در ادامه چگالی شار هر دندان به منظور بررسی دقیق اثر اشباع در اثر افزایش جریان اولیه با سه روش مدار معادل مغناطیسی با المان های خطی، مدار معادل مغناطیسی غیر خطی و روش اجزاء محدود در شکل های ۳-۲۰ تا ۳-۲۲ مقایسه شده اند. شماره دندانها از روی شکل ۳-۴ انتخاب شده است. نکته اول که از مقایسه شکل های ۳-۲۰ و ۳-۲۱ مشخص می شود این است که دیگر چگالی شار دندانهای روی یک آهنربا به هم نزدیک نیست و جریان اولیه تقارن و تعادل را کمی برهم می زند. مشاهده می شود که دندان شماره دو با افزایش جریان به اشباع رفته و تفاوت نتایج مدار معادل مغناطیسی خطی و غیر خطی بیشتر می شود. همچنین دقت روش پیشنهادی در مقایسه با روش اجزاء محدود ثابت شده است.



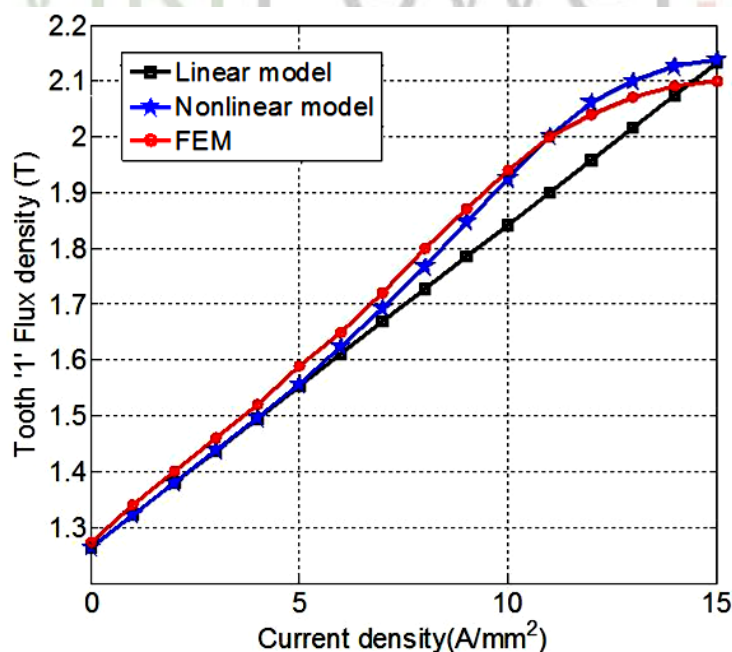
شکل ۳-۱۸ چگالی شار وسط دندانها در طول موتور در حالت وجود جریان در اولیه

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

دندانه شماره یک ابتدا به علت اشباع دندانه دو در حالت غیر خطی شار بیشتری را از خود عبور می دهد ولی در ادامه خود به اشباع رفته و افزایش پگالی شار محدود می شود این نکته به خوبی در شکل ۳-۲۰ دیده می شود.



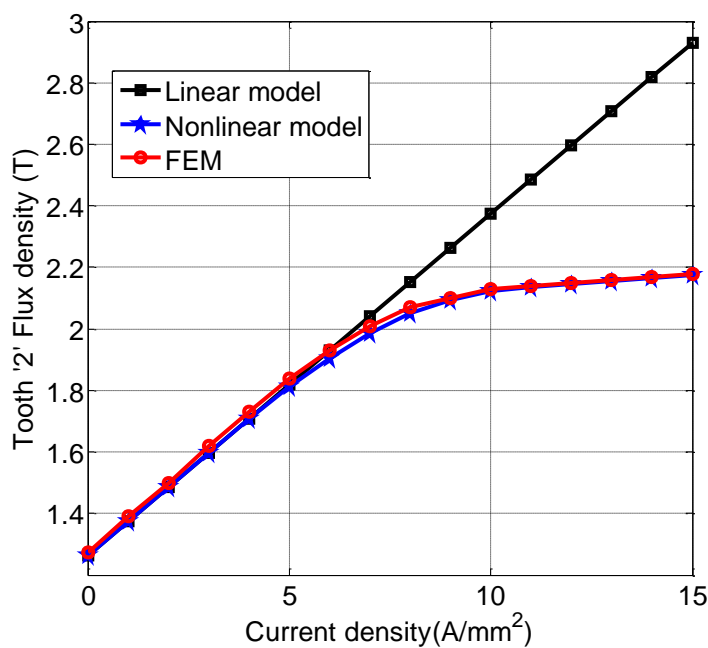
شکل ۳-۱۹ چگالی شار وسط دندانه ها در طول موتور در حالت اشباع



شکل ۳-۲۰ چگالی شار دندانه شماره یک بر حسب چگالی جریان سیم پیچ اولیه

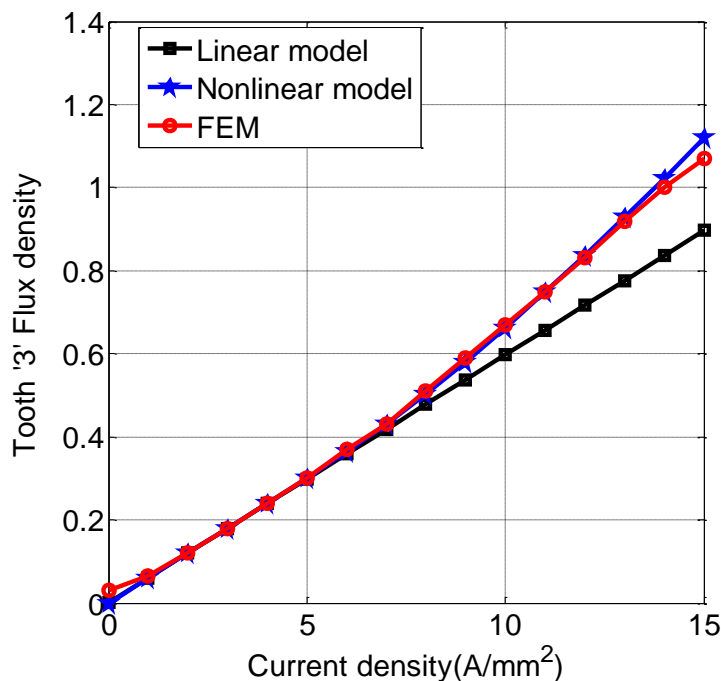
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

در شکل ۳-۲۲ نیز چگالی شار دندانان ای که در وسط دو آهنربا قرار گرفته است دیده می شود. مشاهده می شود که بر خلاف دو دندان قبلی چگالی شار از صفر شروع می گردد. این موضوع بخاطر آن است که در این دندانان شار ناشی از آهنربا وارد نمی شود. همانطور که مشاهده می شود به علت اشباع دیگر دندانان ها شار عبوری از این دندانان در حالت غیر خطی بیشتر از حالت خطی است.



شکل ۳-۲۱ چگالی شار دندانان شماره دو بر حسب چگالی جریان سیم پیچ اولیه

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

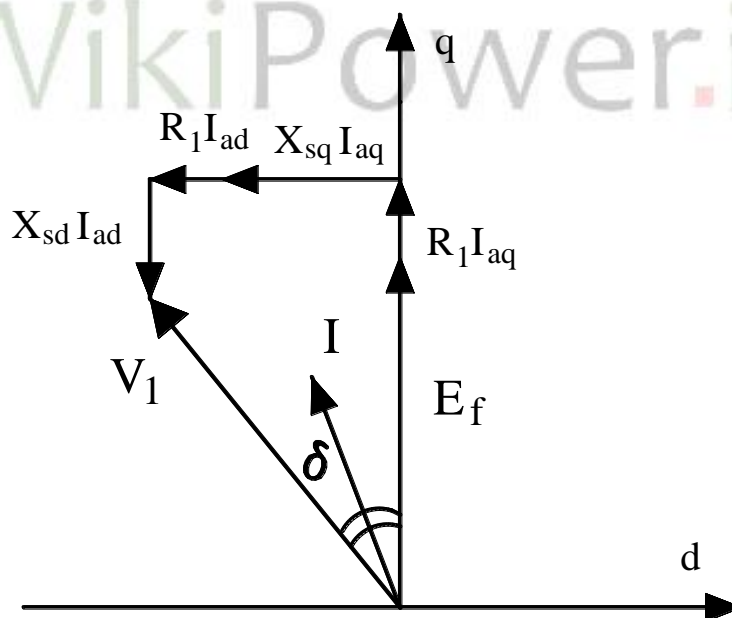


شکل ۳-۲۲ چگالی شار دندان شماره سه بر حسب چگالی جریان سیم پیچ اولیه

مدلسازی الکتریکی

منظور از مدلسازی الکتریکی، مشخص کردن معادلات حاکم بر جریان ها و ولتاژهای موتور و بدست آوردن

روابط نیرو و توان به کمک آنها است. نمودار برداری موتور سنکرون آهنربای دائم در شکل ۳-۲۳ دیده می شود.



شکل ۴۳-

شکل ۴۴- نمودار برداری موتور سنکرون آهنربای دائم

شکل ۴۵-

شکل ۴۶-

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

با توجه به نمودار شکل ۳-۲۳ داریم:

$$V_1 \sin \delta = -I_{ad}R_1 + I_{aq}X_{sq} \quad (۴۲-۳)$$

$$V_1 \cos \delta = I_{aq}R_1 + I_{ad}X_{sd} + E_f \quad (۴۳-۳)$$

که در آن δ ، زاویه بار، زاویه بین ولتاژ ترمینال (V_1) و نیرو محرکه الکتریکی برگشتی (E_f) است. در نتیجه جریان های محور d و q از روابط زیر بدست می آیند.

$$I_{ad} = \frac{V_1 (X_{sq} \cos \delta - R_1 \sin \delta) - E_f X_{sq}}{X_{sd} X_{sq} + R_1^2} \quad (۴۴-۳)$$

$$I_{aq} = \frac{V_1 (R_1 \cos \delta + X_{sd} \sin \delta) - E_f R_1}{X_{sd} X_{sq} + R_1^2} \quad (۴۵-۳)$$

مقدار موثر جریان از روابط فوق به صورت زیر در می آید:

$$(۴۶-۳)$$

$$I_a = \sqrt{I_{ad}^2 + I_{aq}^2} = \frac{V_1}{X_{sd} X_{sq} + R_1^2} \sqrt{\left[(X_{sq} \cos \delta - R_1 \sin \delta) - E_f X_{sq} \right]^2 + \left[(R_1 \cos \delta + X_{sd} \sin \delta) - E_f R_1 \right]^2}$$

توان ورودی سیستم نیز از رابطه زیر بدست می آید:

$$P_{in} = mV_1 I_a \cos \varphi = mV_1 (I_{aq} \cos \delta - I_{ad} \sin \delta) \quad (۴۷-۳)$$

بنابراین داریم:

$$P_{in} = m \left[I_{aq} E_f + I_{ad} I_{aq} X_{sd} + I_{aq}^2 R_1 - I_{ad} I_{aq} X_{sq} + I_{ad}^2 R_1 \right] = m \left[I_{aq} E_f + I_a^2 R_1 + I_{ad} I_{aq} (X_{sd} - X_{sq}) \right] \quad (۴۸-۳)$$

^۱ Back EMF

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

با صرف نظر کردن از تلفات هسته توان الکترومغناطیسی ماشین از رابطه زیر حاصل می شود:

$$P_{elm} = P_{in} - \Delta P_w = m \left[I_{aq} E_f + I_{ad} I_{aq} (X_{sd} - X_{sq}) \right] \quad (49-3)$$

که در آن ΔP_w تلفات مس است و برابر است با:

$$\Delta P_w = m I_a^2 R_1 = m (I_{ad}^2 + I_{aq}^2) R_1 \quad (50-3)$$

در نتیجه توان الکترومغناطیسی به صورت زیر خواهد شد:

(51-3)

$$P_{elm} = \frac{m \left[V_1 (R_1 \cos \delta + X_{sd} \sin \delta) - E_f R_1 \right]}{(X_{sd} X_{sq} + R_1^2)^2} \times$$

$$\left[V_1 (X_{sq} \cos \delta - R_1 \sin \delta) (X_{sd} - X_{sq}) + E_f (X_{sd} X_{sq} + R_1^2) - E_f X_{sq} (X_{sd} - X_{sq}) \right]$$

با صرف نظر از مقاومت سیم پیچ اولیه ($R_1 = 0$) داریم:

WikiPower.ir

(52-3)

نیروی موتور نیز از رابطه زیر حاصل می گردد:

$$F_{dx} = \frac{P_{elm}}{v_s} \quad (53-3)$$

در رابطه v_s فوق سرعت سنکرون است. این نیرو شامل دو بخش است. بخش اول نیروی الکترومغناطیسی سنکرون و دیگری نیروی رلوکتانسی است.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

$$F_{dxsyn} = \frac{m}{v_s} \frac{V_1 E_f}{X_{sd}} \sin \delta \quad (54-3)$$

$$F_{dxrel} = \frac{m}{v_s} \frac{V_1^2}{2} \left(\frac{1}{X_{sq}} - \frac{1}{X_{sd}} \right) \sin 2\delta \quad (55-3)$$

قسمت رلوکتانسی در موتورهای با آهنربای دائم سطحی ناچیز و قابل صرف نظر کردن است.

مدلسازی مکانیکی

مدلسازی مکانیکی موتور در واقع همان معادلات مکانیکی حاکم بر حرکت موتور است. در این پژوهش از معادله درجه دو حرکت استفاده شده است. محاسبات مربوط به مقاومت مکانیکی، تنشهای مکانیکی و نویز صوتی مورد توجه نمی باشد. معادله حرکت به صورت زیر خواهد بود:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + \mu_v \frac{dx}{dt} + K_s x = F_{dx} \quad (56-3)$$

در این رابطه F_{dx} نیروی تولیدی موتور، m جرم متحرک، x مکان متحرک، μ_v ضریب اصطکاک چسبندگی سطح و K_s ضریب فنری است. مقدار K_s معمولاً صفر می باشد.

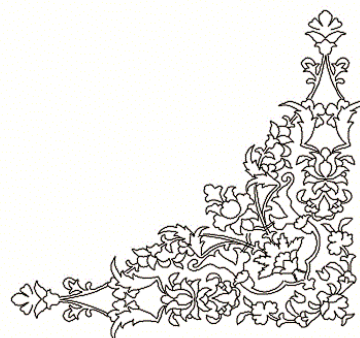
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



فصل چهارم

محاسبه و تحلیل تلفات

موتور سنکرون آهنربای دائم خطی



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

تلفات آهن ماشین های سنکرون آهنربای دائم

تلفات آهن از دو مولفه تشکیل شده است. یک مولفه آن با فرکانس متناسب است و مولفه دیگر با مجذور فرکانس. مولفه اول تلفات جریان هیستریزیس و مولفه دوم با تلفات جریان فوکو مربوط می شود. برای یک شکل موج سینوسی در رنج فرکانس عملکرد چگالی تلفات کل آهن از مجموع تلفات هیستریزیس و تلفات جریان فوکو بدست می آید.

$$P_t = P_h + P_e = k_h B^\beta f + k_e B^2 f^2 \quad (\text{W/m}^3) \quad (1-4)$$

که در آن

B : چگالی شار حداکثر آهن

P_t : چگالی تلفات آهن

P_h : چگالی تلفات هیستریزیس آهن

P_e : چگالی تلفات جریان فوکو آهن

f : فرکانس زاویه ای

k_h : ضریب تلفات هیستریزیس (۰,۰۴-۰,۰۷)

k_e : ضریب تلفات جریان فوکو (۴۰-۵۵)

β : ثابت Steinmetz و مقدار آن (۱,۸-۲,۲) است

در ماشین های سنکرون آهنربای دائم خطی با آهنربای سطحی تلفات آهن عمدتاً در اویه وجود دارد و از تلفات آهن ثانویه که بسیار ناچیز است می توان صرف نظر کرد. رابطه شکل موج چگالی شار نیز غیر سینوسی است این شکل موج غیر سینوسی چگالی شار بر روی تلفات هیستریزیس تاثیری ندارد زیرا این تلفات تنها به حداکثر چگالی شار وابسته است. اما بر روی تلفات جریان فوکو اثر قابل توجهی دارد. در این حالت تلفات بدست آمده با استفاده از هارمونیک اول چگالی شار ممکن است از مقدار اندازه گیری شده آن بسیار کمتر باشد. در روشهای دیگر با استفاده از آنالیز اجزاء محدود می توان اثر سایر هارمونیک ها را نیز بدست آورد اما استفاده از آنالیز اجزاء محدود پیچیده و بسیار زمان بر است.

چگالی تلفات جریان فوکو برای شکل موج های مختلف چگالی شار بصورت زیر است.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

$$P_e = 2k_e \left| \frac{dB}{dt} \right|^2 \quad (\text{W/m}^3) \quad (2-4)$$

در رابطه فوق مشتق زمانی بردار چگالی شار برای محاسبه چگالی تلفات جریان فوکو استفاده شده است این رابطه تلفات جریان فوکو ناشی از تغییرات میدان چه بصورت دوار و چه بصورت پالسی نشان می دهد. تلفات جریان فوکو نه تنها به اندازه چگالی شار وابسته است بلکه به روش تغییر مولفه های عمود بر هم آن نیز بستگی دارد. برای شکل موجهای دوره ای چگالی متوسط جریان فوکو را می توان از رابطه زیر بدست آورد.

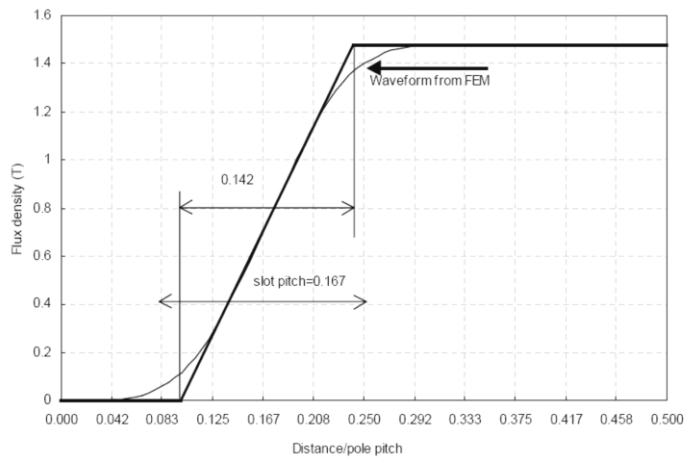
$$P_e = \frac{2k_e}{T} \int_0^T \left| \frac{dB}{dt} \right|^2 dt \quad (\text{W/m}^3) \quad (3-4)$$

تلفات فوکوی دندان

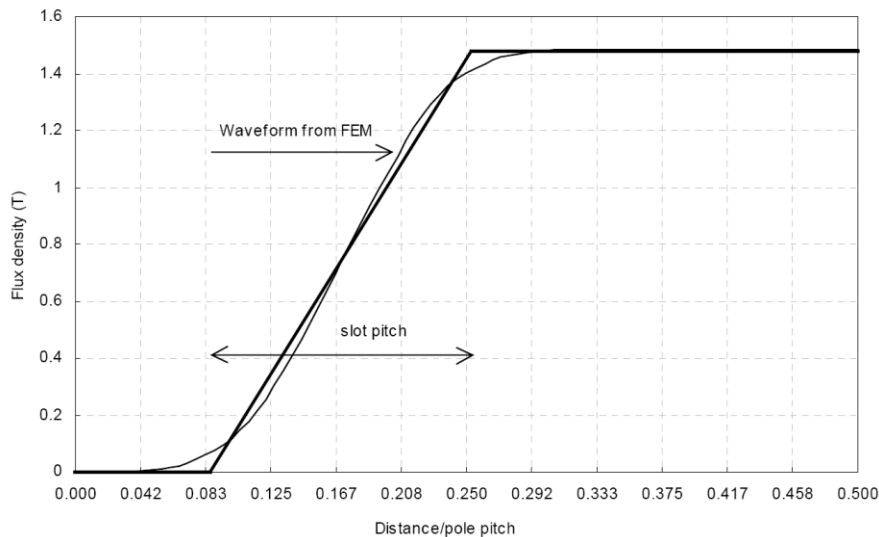
به منظور دستیابی به رابطه تحلیلی برای چگالی شار، شکل موجهای چگالی شار در یک موتور سنکرون خطی آهنربای دائم در شکل ۱-۳ نشان داده شده است. همانطور که در شکل ۱-۳ دیده می شود در حالتیکه دندان بین قطبهای آهنربای دائم قرار می گیرد چگالی شار صفر است. وقتیکه دندان به لبه قطب آهنربا می رسد چگالی شار شروع به افزایش می کند و چگالی شار در حین عبور دندان از لبه آهنربا افزایش می یابد. وقتیکه دندان بطور کامل از مقابل لبه آهنربا عبور کرد چگالی شار به مقدار حداکثر خود می رسد و وقتیکه دندان در مقابل آهنربا قرار دارد چگالی شار در مقدار خود ثابت می ماند.

مولفه عمودی چگالی شار بدست آمده از آنالیز اجزاء محدود در مرکز دندان در شکل ۱-۳ در کنار نمودار خطی آن نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود افزایش چگالی شار دارای یک الگوی خطی است مگر در ابتدا و انتهای تغییر. شکل ۱-۴ این فرض را نشان می دهد که زمان لازم برای افزایش چگالی شار با توجه شکل موج به دست آمده از آنالیز اجزاء محدود تقریباً برابر با یک گام شیار است نه به اندازه پهنای دندان که معمولاً استفاده می شود [۵۸]. با در نظر گرفتن این موضوع تخمین خطی نسبت به روش اجزاء محدود دقیق تر می شود که در شکل ۲-۴ مشاهده می گردد. در نتیجه شکل کلی چگالی شار عمودی دندان در طول یک گام قطب به صورت ارائه شده در شکل ۳-۴ خواهد بود.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۴-۱ مقایسه مدل خطی ارائه شده برای چگالی شار دندانه در [۵۹] و روش اجزاء محدود [۵۸]



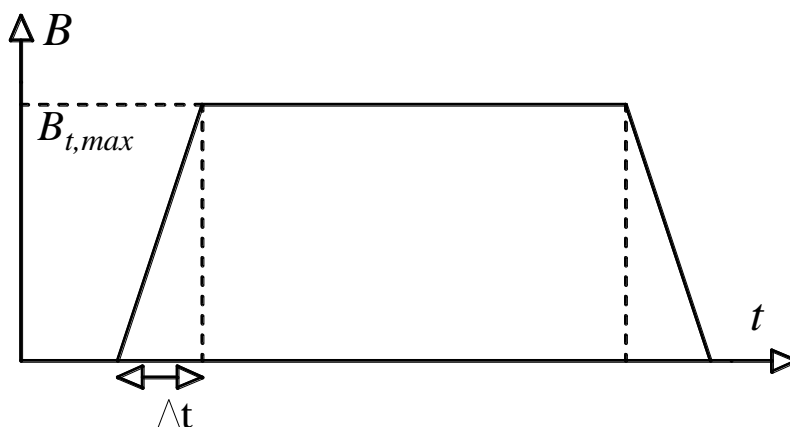
شکل ۴-۲ مقایسه مدل خطی ارائه شده برای چگالی شار دندانه در [۵۹] و روش اجزاء محدود [۵۸]

اگر زمان افزایش چگالی شار را Δt بگیریم، با توجه به اینکه تغییر چگالی شار چهار بار در هر پریود زمانی اتفاق می افتد، تلفات جریان فوکوی ناشی از مولفه عمودی چگالی شار برابر است با:

$$P_{etr} = \frac{2k_e}{T} V_t \int_0^T \left| \frac{dB}{dt} \right|^2 dt = \frac{2k_e}{T} \left(\frac{B_{th}}{\Delta t} \right)^2 (4\Delta t) V_t = \frac{8k_e}{T} \frac{B_{th}^2}{\Delta t} V_t \quad (\text{W}) \quad (5-4)$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

که V_t حجم دندان و B_{th} مقدار نهایی مولفه نرمال چگالی شار دندان است که اساسا این مقدار همان مقدار چگالی شار دندان است. از رابطه ۴-۵ می توان نتیجه گرفت که تلفات جریان فوکو با زمان خیز چگالی شار رابطه معکوس دارد یعنی با کاهش زمان خیز تلفات جریان فوکو افزایش می یابد.



شکل ۴-۳ شکل مولفه عمودی چگالی شار دندان

با توجه به بخش قبلی شکل موج مولفه نرمال چگالی شار دندان در موتور سنکرون خطی آهنربای دائم را می توان با شکل موج دوزنقه ای مشابه با شکل ۳-۵ با شیار باز تقریب زد. و مدت زمان لازم برای مولفه نرمال چگالی شار دندان برای افزایش از مقدار صفر تا مقدار حداکثر آن تقریباً برابر با زمان لازم برای لبه قطب آهنربا برای طی یک گام شیار است.

یک موتور سنکرون آهنربای دائم خطی با m فاز و q شیار در قطب در فاز دارای $m q$ شیار در قطب است بنابراین زمان لازم برای لبه آهنربا برای عبور از یک گام شیار برابر است با:

$$\Delta t = \frac{T}{2mq} \quad (6-4)$$

با جایگزینی رابطه (۶-۴) در رابطه (۵-۴) تلفات جریان فوکوی مولفه نرمال در یک موتور سه فاز برابر است با:

$$P_{etr} = 12qk_e \left(\frac{v_s}{\tau} B_{th} \right)^2 V_t \quad (W) \quad (7-4)$$

که در آن

$$v_s = 2\tau f \quad (8-4)$$

از رابطه (۷-۴) می توان نتیجه گرفت:

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

- تلفات جریان فوکو مولفه نرمال چگالی شار متناسب است با تعداد شیار در قطب در فاز. نابراین افزایش تعداد شیار در قطب در فاز باعث افزایش تلفات می شود.
- در سرعت نامی تلفات جریان فوکو مولفه نرمال چگالی شار با نسبت شیار در قطب در فاز بر مجذور گام قطب متناسب است.

علاوه بر مولفه عمودی چگالی شار، مولفه طولی چگالی شار نیز باعث تلفات جریان فوکو می گردد. از آنجائیکه مولفه طولی چگالی شار دنداندار دارای الگوی پیچیده ای تخمین خطی مولفه طولی آن و همچنین تلفات جریان فوکوی آن مشکل است. کل تلفات جریان فوکوی دنداندار را می توان با رابطه زیر بیان کرد [۵۸].

$$P_{et} = P_{etr} + P_{etc} = P_{etr} \left(1 + \frac{P_{etc}}{P_{etr}} \right) = k_c P_{etr} \quad (W) \quad (9-4)$$

که در آن k_c ضریب اصلاح مربوط به مولفه تلفات جریان فوکو مولفه طولی چگالی شار دنداندار است که مقدار آن بین ۱/۱ تا ۱/۲ متغیر است. شکل زیر شکل موج چگالی شار مولفه طولی چگالی شار دنداندار را نشان می دهد [۵۸].

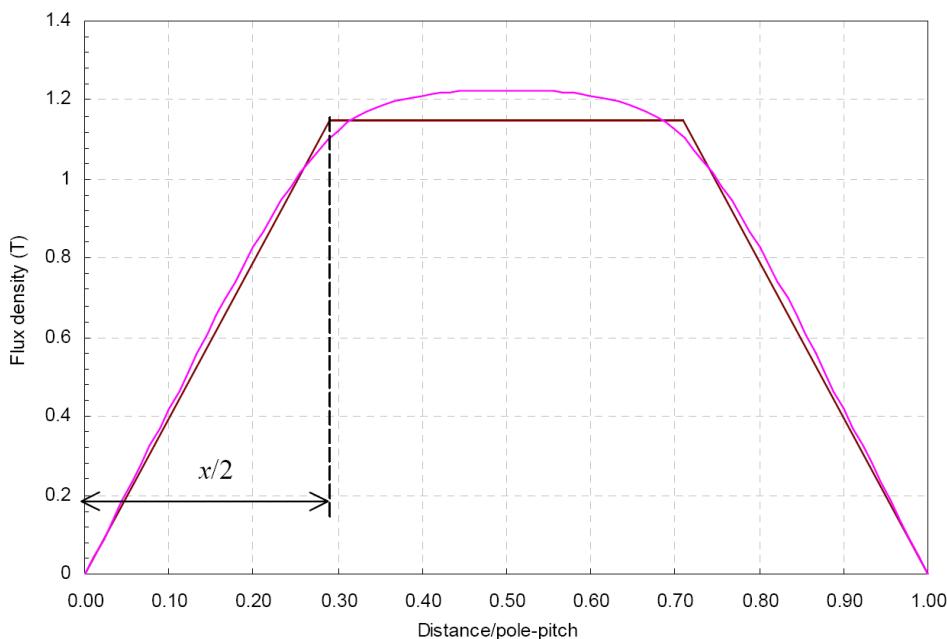
تلفات فوکوی یوغ

در [۵۹] فرض شده است که چگالی شار یوغ می تواند با یک شکل موج دوزنقه ای تقریبی زده شود و تلفات جریان فوکو یوغ را با استفاده از چگالی شار متوسط یوغ محاسبه کرد. برای آزمایش این فرضیات شکل موج های چگالی شار برای یک موتور سنکرون خطی آهنربای دائم با استفاده از آنالیز اجزاء محدود بدست آمده است [۵۸].

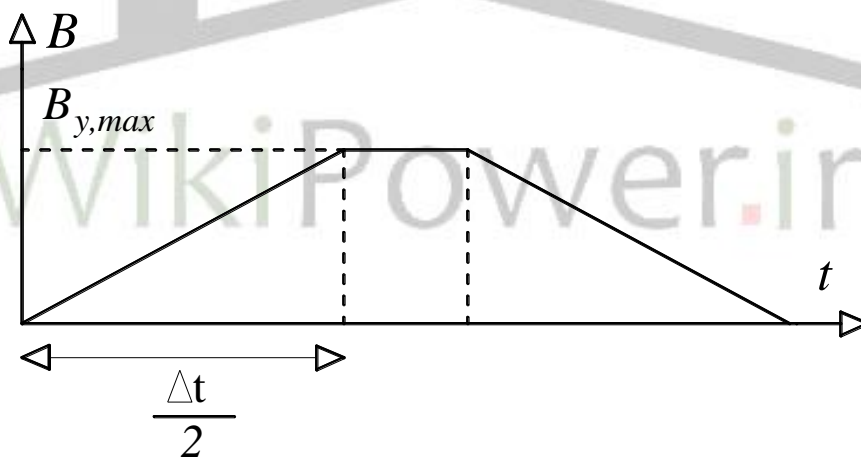
شکل ۴-۴ شکل موج های چگالی شار یوغ یک موتور سنکرون خطی آهنربای دائم محاسبه شده با استفاده از آنالیز اجزاء محدود را نشان می دهد. در این شکل دیده می شود که مولفه طولی چگالی شار دارای یک شکل موج دوزنقه ای است مقدار نهایی چگالی شار در کل ضخامت یوغ تقریباً یکسان است.

در [۵۹] فرض شده است که چگالی شار از مرکز قطب آهنربا تقریباً بصورت خطی تا لبه آهنربا افزایش می یابد. سپس مقدار چگالی شار در بخشی از یوغ که بالای آهنربا نیست ثابت می ماند. زمان لازم برای افزایش چگالی از صفر تا مقدار حداکثر آن یا کاهش آن از مقدار حداکثر تا مقدار صفر تقریباً برابر با زمان عبور یک نقطه از یوغ از نصف عرض آهنربا است. در نتیجه تخمین این چگالی شار برای یک گام قطبی به صورت ارائه شده در شکل ۴-۵ خواهد بود.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آریم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۴-۴ مقایسه شکل مولفه عمودی چگالی شار دندان با روش [۵۹] و اجزاء محدود [۵۸]



شکل ۴-۵ شکل مولفه عمودی چگالی شار یوغ

چگالی شار مولفه طولی در هر نقطه از یوغ هنگامیکه مرکز قطب آهنربا به این نقطه می رسد شروع به افزایش می کند وقتی لبه قطب آهنربا به این نقطه می رسد چگالی شار آن در مقدار نهایی خود می رسد چگالی شار در این مقدار ثابت باقی می ماند تا زمانی که فاصله بین دو قطب آهنربا را طی می نماید وقتی که این نقطه به لبه قطب مخالف می رسد چگالی شار شروع به کاهش می کند چگالی شار وقتی که این نقطه به وسط قطب مخالف می رسد

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

به مقدار صفر می رسد سپس در جهت مخالف شروع به افزایش می کند. برای ماشین های خطی مدت زمان لازم برای آهنربا با عرض برای عبور از یک نقطه از یوغ استاتور (یا تغییر چگالی شار از مقدار تا برابر برابر است با:

$$\Delta t = \frac{w_M}{v_s} = \frac{w_M}{2\tau f} \quad (10-4)$$

آهنگ تغییر زمانی مولفه چگالی شار برابر است با:

$$\frac{dB}{dt} = \frac{2B_{y,max}}{\Delta t} \quad (11-4)$$

تغییر مولفه طولی چگالی شار دوبار در هر پریود زمانی اتفاق می افتد. تلفات کل جریان فوکوی مولفه طولی چگالی شار یوغ عبارت است از:

$$P_{ey} = 8k_e \frac{\tau}{w_m} \left(\frac{v_s}{\tau} B_{y,max} \right)^2 V_y \quad (W) \quad (12-4)$$

از رابطه فوق نتیجه می شود که تلفات جریان فوکوی مولفه طولی چگالی شار با مقدار رابطه معکوس دارد و به تعداد شیار در قطب در فاز بستگی ندارد.

با توجه به روابط بدست آمده تلفات فوکوی کل از رابطه زیر بدست می آید:

$$P_e = 8k_e k_c \frac{\tau}{w_m} \left(\frac{v_s}{\tau} B_{y,max} \right)^2 V_y + 12qk_e k_c \left(\frac{v_s}{\tau} B_{th} \right)^2 V \quad (W) \quad (13-4)$$

مدل تلفات هیستریزیس

تلفات هیستریزیس دندانه و یوغ را با فرض سینوسی بودن چگالی شار آن دو می توان از روابط زیر بدست آورد. همانطور که بیان شد این فرض با تقریب خوبی برای تلفات هیستریزیس صادق است.

$$P_{ht} = k_h \omega_s (B_{th})^\beta V_t \quad (W) \quad (14-4)$$

$$P_{hy} = k_h \omega_s (B_{y,max})^\beta V_y \quad (W) \quad (15-4)$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

که مقادیر B_{th} و $B_{y,max}$ مقدار حداکثر چگالی شار دندانه و یوغ هستند.

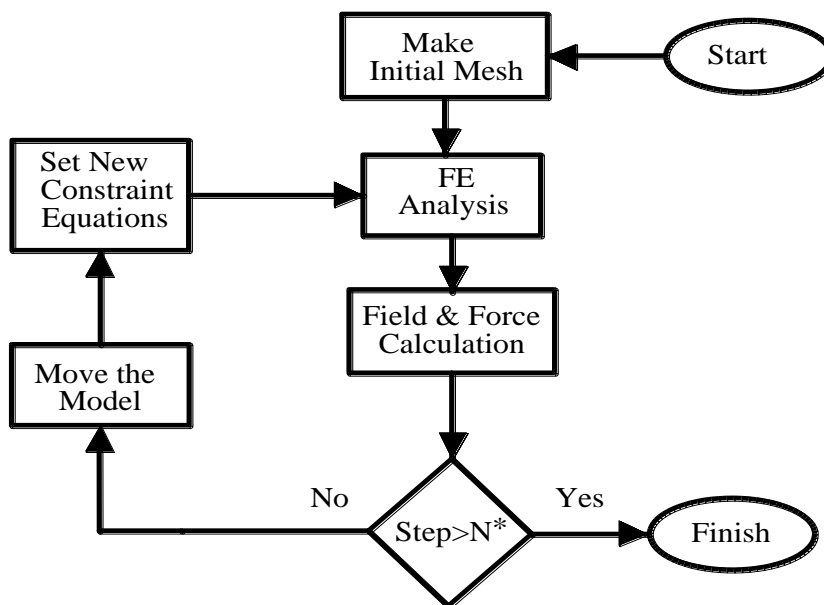
محاسبه تلفات آهن به کمک روش اجزاء محدود

برای حل این معادله و مدلسازی حرکت روتور از روش گام زمانی استفاده شده است. با استفاده از این روش می توان حالت گذرا و دینامیکی موتور را مورد بررسی قرار داد. مدت زمان مورد نظر جهت تحلیل موتور به تعداد محدودی فاصله زمانی اعم از مساوی یا نامساوی تقسیم می شود. پس از اعمال شرایط اولیه، پارامترهای لازم در انتهای بازه زمانی اول بدست آمده و به عنوان شرایط اولیه بازه بعدی مورد استفاده قرار می گیرد. با تکرار همین روش برای بازه های زمانی بعدی کلیه پارامترهای مطلوب برای زمان های مختلف بدست می آید. در این پژوهش برای حرکت از روش سطح لغزان یا ضرایب لاگرانژ استفاده شده است. در این روش المان هایی که برای فاصله هوایی در نظر گرفته می شوند برای کوپل کردن مش ثابت استاتور با مش متحرک روتور استفاده می شود. بدین منظور مش بندی بخش متحرک به صورت مجزا از بخش ثابت انجام شده و در محل برخورد دو مش معادلات قید^۱ بین گره های بخش ثابت و متحرک نوشته شده و ارتباط این دو بخش با هم برقرار می گردد. فلوچارت روش اجزاء محدود دو بعدی استفاده شده به صورت شکل ۴-۶ می باشد. با حل معادلات، مولفه های عمودی و طولی چگالی شار در المان های مختلف بدست می آید. به کمک این اطلاعات تلفات بخش های آهنی قابل محاسبه است. تلفات فوکو و تلفات هیستریزیس در روش اجزاء محدود توسط روابط ۴-۱۶ و ۴-۱۷ بدست می آید [۶۰].

$$P_e = 2pNk_e L f^2 \times \sum_{m=1}^M \left\{ A_m \sum_{n=1}^N (B_{mx,n} - B_{mx,n-1})^2 + \sum_{n=1}^N (B_{my,n} - B_{my,n-1})^2 \right\} \quad (W) \quad (16-4)$$

^۱ constraint equations

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۴۷- شکل ۴-۹ فلوجارت روش اجزاء محدود دینامیک

$$P_h = 2\pi f k_h L \sum_{m=1}^M [A_m B_{m,\max}^\beta] \quad (W) \quad (17-4)$$

در این روابط M تعداد المان بخش مورد مطالعه و N نیز تعداد پله های زمانی حل معادله است که از رابطه زیر بدست می آید:

$$N = 2f(dt) \quad (18-4)$$

در این رابطه dt اندازه پله زمانی مورد استفاده در حل مساله اجزاء محدود است. در ادامه برای موتوری که مشخصات آن در جدول ۳-۱ آمده بود تلفات آهن به دو روش مدار معادل مغناطیسی پیشنهادی و روش اجزاء محدود محاسبه و مقایسه شده اند. نتیجه این مقایسه در جدول ۴-۱ دیده می شود. قابل ذکر است که مقادیر مورد استفاده برای ضرایب تلفات به صورت زیر استفاده شده است:

$$k_h = 50 \quad k_e = 0.05 \quad \beta = 1.9 \quad (19-4)$$

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

با توجه به جدول ۴-۱ مشاهده می شود که نتایج حاصل از مدار معادل مغناطیسی با نتایج حاصل از روش اجزاء محدود به هم نزدیکند. نکته قابل ذکر این است که خطای موجود در تلفات فوکو با خطای موجود در تلفات هیستریزیس در جهت مخالفند و این باعث شده که خطای مجموع تلفات از خطای تک تک تلفات کمتر باشد. خطا با معادله زیر در جدول لحاظ شده است.

$$er = \frac{P_{L,FEM} - P_{L,MEC}}{P_{L,FEM}} \times 100 \quad (20-4)$$

جدول ۴-۱ مقایسه تلفات حاصل از روش مدار معادل مغناطیسی و روش اجزاء محدود

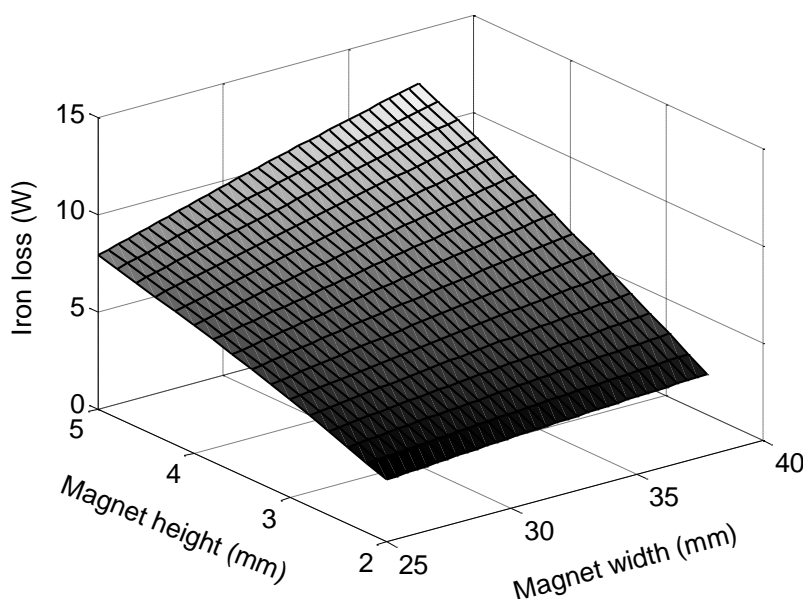
تلفات آهن (وات)					
هیستریزیس		جریان گردابی (فوکو)		کل	
MEC	FEM	MEC	FEM	MEC	FEM
۷/۷	۸/۲۷	۲/۳۷	۲/۱۳	۱۰/۱	۱۰/۴
خطا (درصد)		خطا (درصد)		خطا (درصد)	
۶/۹		-۱۱/۳		۲/۹	

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

فصل ۱- تحلیل تلفات موتور سنکرون آهنربای دائم خطی

در ادامه به کمک روش مدار معادل مغناطیسی تغییرات تلفات آهن با تغییر پارامترهای موتور را بررسی می نماییم. نتایج این تحلیل ها راهنمایی برای طراحی مناسب موتور به منظور کاهش تلفات آهن است. در ابتدا اثر ابعاد آهنربا بر تلفات آهن کل موتور بررسی می گردد. تغییرات تلفات آهن بر حسب ارتفاع و پهنای آهنربا در حالت بی بار در شکل ۴-۱۰ مشاهده می شود. همانطور که در شکل دیده می شود افزایش ابعاد آهنربا به افزایش تلفات می انجامد دلیل این امر نیز افزایش شار و طبعاً چگالی شار در بخش های آهنی موتور است. نکته دیگر اینکه شیب این تغییرات با افزایش ارتفاع آهنربا بیشتر از شیب هنگام افزایش پهنای آهنربا است. در حالت بار کامل نیز این تغییرات در شکل ۴-۱۱ نمایش داده شده است. مشاهده می شود که شکل کلی همانند حالت بی بار است با این تفاوت که اولاً مقدار تلفات افزایش یافته که این به دلیل افزایش چگالی شار بخصوص در دندانها طبیعی است. ثانیاً در قسمت های بالایی نمودار منحنی تغییرات از حالت خط راست به حالت قوسی تبدیل شده که این اثر اشباع آهن است.

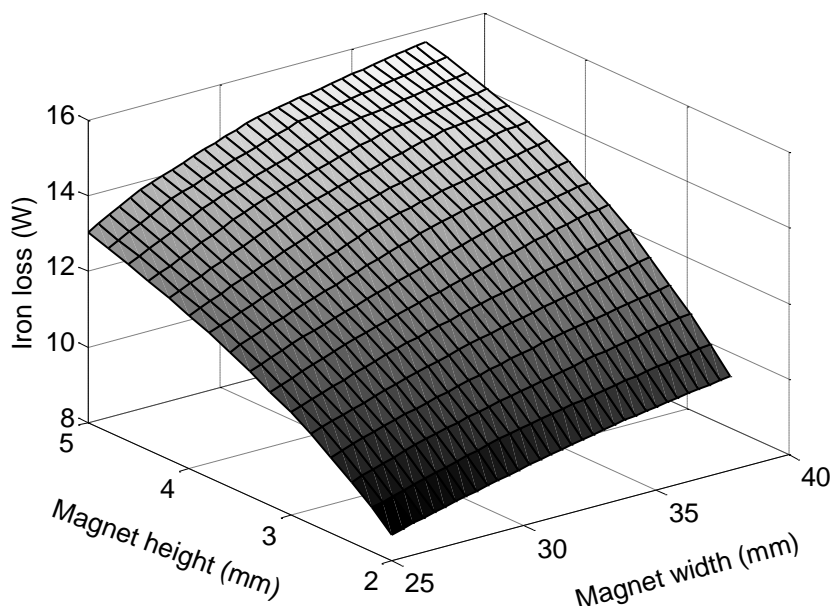
No load iron loss variation versus magnet dimensions



شکل ۴-۱۰ تغییرات تلفات آهن با ابعاد آهنربا در حالت بی بار

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرتم سایت و به همراه فونت های لازم

Full load iron loss variation versus magnet dimensions



شکل ۴-۱۱ تغییرات تلفات آهن با ابعاد آهنربا در حالت بار کامل

در شکل ۴-۱۲ تغییرات تلفات آهن بر حسب عرض دندانه و ارتفاع یوغ در سطح ثابت شیار و همچنین گام شیار ثابت در حالت بی بار رسم شده است.

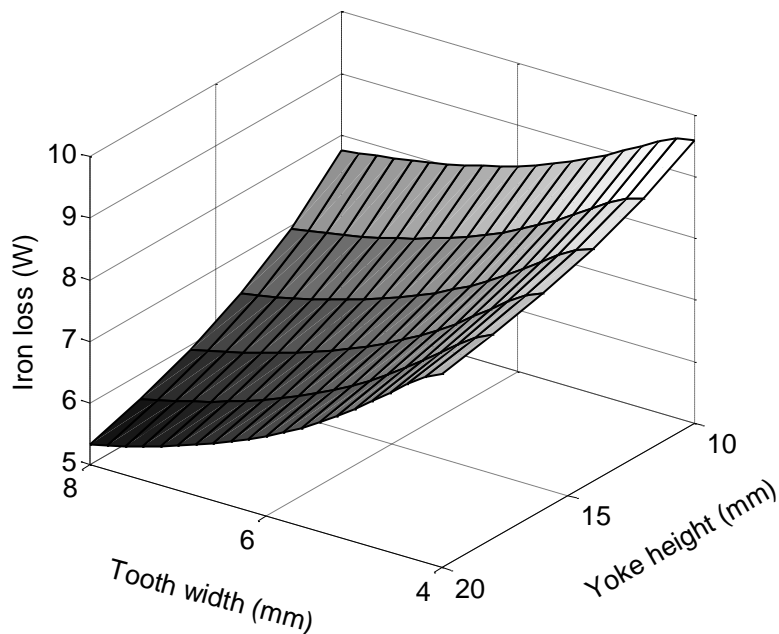
یعنی اگر دندانه باریکتر شود و در نتیجه پهنای شیار زیاد شود باید ارتفاع شیار و به تبع آن ارتفاع دندانه به همان نسبت کاهش یابد تا سطح شیار ثابت بماند. همانطور که در شکل ۴-۱۲ نیز مشاهده می شود حساسیت تلفات آهن به مقدار عرض دندانه در حالت بی بار زیاد بوده و بیشتر از حساسیت آن به ارتفاع یوغ می باشد. این تغییرات شدید تلفات با کاهش عرض دندانه به علت افزایش سریع چگالی شار است. در شکل ۴-۱۳ همان تغییرات این بار در حالت بار کامل مشاهده می شود. از این شکل نتایج جالبی می توان گرفت. اول اینکه دیگر با کاهش عرض دندانه تغییرات تلفات شدید نیست زیرا با وجود جریان دندانه در همه حالات در چگالی شار بالاست و کاهش شیب مشخصه آهن که ناشی از اشباع است تغییرات چگالی شار و در نتیجه تغییرات تلفات را محدود می کند. دوم اینکه ارتفاع یوغ نیز اثر کمتری بر این حالت نسبت به حالت قبلی دارد.

در نهایت در شکل ۴-۱۴ تغییرات تلفات بر اساس طول فاصله هوایی و چگالی جریان سیم پیچ اولیه رسم شده است. همانطور که دیده می شود افزایش فاصله هوایی به کاهش شدید تلفات منجر می گردد. با این حال افزایش فاصله هوایی گزینه مناسبی برای کاهش تلفات نیست زیرا منجر با کاهش شدید نیرو تولیدی نیز می گردد. ضمناً مشاهده می شود که تغییرات تلفات بر حسب طول فاصله هوایی در حالت بی بار خیلی بیشتر از حالت بار کامل

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرچساییت و به همراه فونت های لازمه

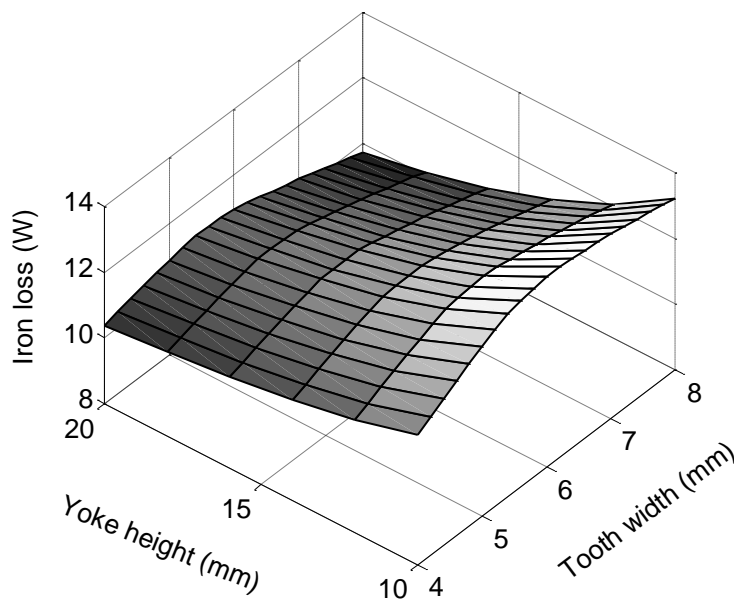
است. زیرا در حالت بار کامل موتور نزدیک اشباع کار می کند و خم شدگی گوشه منحنی نیز حکایت از اشباع قسمت هایی از موتور به ویژه دندانه ها دارد.

No load iron loss variation versus yoke height and teeth width



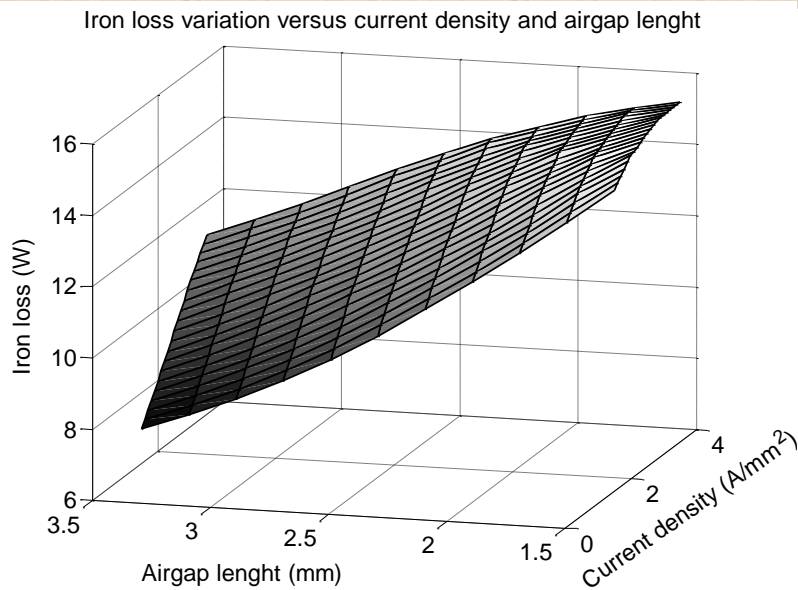
شکل ۴-۱۲ تغییرات تلفات آهن با ابعاد آهنربا در حالت بار کامل

Full load iron loss variation versus yoke height and teeth width



شکل ۴-۱۳ تغییرات تلفات آهن با ابعاد آهنربا در حالت بار کامل

برای دریافت فایل word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۴-۱۴ تغییرات تلفات آهن با ابعاد آهنربا در حالت بار کامل



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

فصل ۲ - تلفات مس

بجز تلفات آهن تلفات مس نیز در موتور وجود دارد که ناشی از جریان در سیم پیچ هاست. معمولاً تلفات مسی سهم عمده تلفات را به خود اختصاص می دهند. تلفات مس در حالت کلی به صورت زیر بیان می شود:

$$P_{cu} = 3R_s I_{ph}^2 \quad (21-4)$$

مقاومت سیم پیچ چه در هسته هوایی و چه در هسته آهنی از رابطه زیر بدست می آید [۱]:

$$R_s = \frac{2(L + l_e) T_{ph}}{\sigma a s_1 a_p} \quad (22-4)$$

که در آن σ رسانایی هادی، s_1 سطح مقطع سیم، a_p تعداد هادی های موازی شده و a تعداد مسیرهای موازی جریان هستند و l_e طول بخش انتهایی است که از رابطه زیر بدست می آید.

$$l_e = k_{end} \tau \quad (23-4)$$

که k_{end} ضریبی افزایش طول اتصال انتهایی است و بسته به ابعاد و توان موتور بین ۱/۲ تا ۲ متغیر است [۱]. رابطه دیگر برای توان تلف شده در هادی ها به صورت زیر می باشد [۶۱]:

$$P_{cu} = \frac{\rho_c p \tau L_e S_1^2}{d_e k_w^2} \quad (24-4)$$

در رابطه فوق L_e طول موثر هادی ها و ρ_c مقاومت ویژه هادی است. مقدار L_e و d_e از روابط زیر بدست می آیند:

$$L_e = L + k_{end} \tau \quad (25-4)$$

$$d_e = k_{fill} \frac{A_s}{\tau_s} \quad (26-4)$$

$$\hat{S}_1 = \frac{q n_s \hat{I}_s}{\tau_s} \quad (27-4)$$

در این رابطه \hat{I}_s دامنه جریان فاز سیم پیچ، q تعداد شیاربر فاز بر قطب و n_s تعداد هادی در هر شیار است. سایر تلفات از جمله تلفات مکانیکی و تلفات اضافی را به صورت کسری از توان خروجی در نظر می گیریم:

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

$$P_{add} = k_{add} P_{out} \quad (28-4)$$

که مقدار k_{add} برای توان های مختلف متفاوت است و در این تحقیق ما این ضریب را ۰/۰۳ در نظر گرفته ایم. در نتیجه راندمان موتور را می توان به صورت زیر بیان کرد:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{add} + P_{cu} + P_{iron} + P_{out}} \quad (29-4)$$

که در آن

$$P_{out} = F_x v_s \quad (30-4)$$



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



فصل پنجم

بهینه سازی بازده

موتور سنکرون آهنربای دائم خطی

به کمک مدار معادل مغناطیسی



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

هر چند که بازده موتورهای سنکرون آهنربای دائم خطی ذاتاً زیاد است ولی با توجه به افزایش سطح بازده در استانداردهای جدید و کاهش منابع فسیلی در سال های اخیر، بهینه سازی بازده این موتورها ضروری است. بهینه سازی موتور سنکرون آهنربای دائم خطی در مقالات زیادی مورد توجه قرار گرفته است [۳۵-۴۸]. مسائل مختلفی از قبیل کاهش ریپل نیرو که بیشترین حجم پژوهش را به خود اختصاص داده است، افزایش نیروی تولیدی، افزایش چگالی نیرو، کاهش حجم آهنربا و قیمت موتور و ترکیب های مختلفی از این اهداف مورد بررسی قرار گرفته است. با این حال کاهش تلفات و به تبع آن افزایش بازده کمتر مورد توجه بوده است. در [۴۲] بازده یک موتور سنکرون آهنربای دائم خطی به کمک روش اجزاء محدود و شبکه عصبی بهینه شده است. در این مقاله فقط عرض آهنربا و شکل شیار مد نظر قرار گرفته است و به دلیل زمان بر بودن روش اجزاء محدود بازه کوچکی برای تغییرات این متغیرها امکان پذیر بوده است. در این مقاله بازده در حدود ۲ درصد بهبود داده شده است.

در این بخش از مدار معادل مغناطیسی پیشنهادی در فصول قبلی در بهینه سازی استفاده می شود. همانطور که دیده شد به کمک این مدار معادل، تلفات آهن را با دقت خوبی محاسبه می کنیم. از آنجا که حل معادلات این مدار معادل بسیار سریع تر از روش اجزاء می توان از آن در روش های بهینه سازی تکراری مانند الگوریتم ژنتیک استفاده کرد. همچنین در نظر گرفتن تعداد بیشتری از پارامترهای موتور با بازه وسیع تری از تغییرات امکان پذیر خواهد بود.

در ادامه با در نظر گرفتن تعدادی از پارامترهای موتور به عنوان متغیر، بازده موتور را بهینه می نماییم. به منظور بررسی دقت و صحت روش ارائه شده، نتایج حاصل از این بهینه سازی با نتایج حاصل از روش اجزاء محدود مقایسه می گردد.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یکی از روشهای بهینه سازی است که در آن از تکامل و توارث موجودات زنده الهام گرفته شده است و به کمک روشهای ریاضی و کامپیوتری بر قدرت آن افزوده می شود. این الگوریتم که از الگوریتمهای جستجوی تصادفی تلقی می شود، دارای این مزیت است که بجای اینکه از یک نقطه اولیه شروع به جستجو نماید، یک جمعیت از نقاط فضای جستجو را به عنوان فرض اولیه برای شروع در نظر می گیرد و با عملگرهای ژنتیکی سعی در بهبود نسلهای بعدی دارد و نیازی به یک تخمین اولیه مناسب ندارد.

مفاهیم اولیه الگوریتم ژنتیک

ژن : به هر متغیر مستقل یک ژن می گویند که به طور مستقیم استفاده می شود یا اینکه از مقدار رمزگذاری شده ای که مبین آن متغیر مستقل باشد استفاده می شود. در اینجا هر ژن بیانگر یکی از پارامترهای طراحی است. کروموزوم : مجموعه یا آرایه ای از ژنهای رمزگذاری شده که به صورت یک پاسخ مساله بهینه سازی می باشند و ممکن است در کلیه محدودیتها صدق نماید و یا برخی محدودیتها را رعایت نکند. جمعیت : جمعیت اولیه شامل تعداد مشخصی از کروموزومها است. این کروموزومها از کل فضای جستجو انتخاب شده و یا به صورت تصادفی تولید می شوند. نسلهای بعدی جمعیت در هر مرحله تکرار الگوریتم ژنتیک با اعمال عملگرهای ژنتیکی ایجاد می شوند. در الگوریتم ژنتیک بکار رفته در این پژوهش جمعیت اولیه به تعداد ۱۵ تا ۴۵ کروموزوم به طور تصادفی تشکیل می شود. تابع برازندگی کروموزوم : در حل مساله بهینه سازی تعیین معیار بهینه بودن امری ضروری می باشد. معیار بهینه بودن (تابع برازندگی) می تواند خود تابع هدف باشد و یا به نحوی با تابع هدف رابطه داشته باشد. تابع برازندگی وسیله ای جهت ارزیابی هر کروموزوم می باشد و به هر کروموزوم عددی را نسبت می دهد که کیفیت آن کروموزوم را در مقایسه با سایر کروموزومها مشخص می کند. معمولاً تابع برازندگی را بصورت صعودی تعریف می کنند تا بتوان تکنیکهایی مانند انتخاب تصادفی با چرخ رولت را به سادگی پیاده کرد. چنانچه تابع هدف (F) ، بصورت تابعی باشد که کمینه کردن آن اهمیت دارد، می توان تابع برازندگی (f) را مطابق رابطه $f = \frac{1}{F}$ تعریف کرد. لذا هرچه مقدار تابع برازندگی (f) بیشتر باشد، بیانگر این است که کیفیت کروموزوم بهتر است. برای اینکه کروموزومهای بهتر دارای مقدار برازندگی بالاتری باشند، می توان از توابع پیچیده تری به عنوان تابع برازندگی استفاده کرد. به عنوان نمونه می توان از رابطه زیر استفاده نمود:

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

$$f_r = \frac{1}{F}$$

$$f_s = \frac{1}{1 + k(1 - \frac{f_r}{f_{max}})} \quad (1-5)$$

که در آن، k عدد ثابتی است که هر چه به آن مقدار بزرگتری اختصاص یابد، سبب می شود کروموزومهایی که مقدار برازندگی خام مناسبی ندارند، مقدار برازندگی اصلی آنها در مقایسه با کروموزومهای بهتر، خیلی کمتر شود، F تابع هدف، f_r تابع برازندگی خام، f_s تابع برازندگی اصلی، f_{max} حداکثر برازندگی خام در جمعیت فعلی است.

در الگوریتم ژنتیک پیشنهادی اگر کروموزومی خارج از محدوده مناسب باشد، برازندگی آن صفر در نظر گرفته می شود.

عملگرهای ژنتیکی

۲-۱- تکثیر : روندی است که طی آن متناسب با مقدار برازندگی هر کروموزوم، تعدادی از کروموزومهای نسل فعلی انتخاب شده و کروموزومهای نسل میانی را تشکیل می دهند. بنابراین احتمال اینکه از کروموزومهایی که مقدار برازندگی بیشتری دارند کپی های بیشتری در نسل جدید ایجاد شود، بیشتر است. لذا هدف از این مرحله تکثیر کروموزومهای برتر و حذف کروموزومهای با برازندگی کم می باشد. استفاده از چرخ رولت روش مناسبی برای اجرای عملگر تکثیر می باشد. سطح چرخ رولت به بخشهایی تقسیم می شود که تعداد آنها برابر اعضای جمعیت است و اندازه هر بخش متناسب با عدد برازندگی آن کروموزوم است. حالت نمایشی این روش به این صورت است که چرخ رولت چرخانده می شود تا به تصادف در نقطه ای از چرخش باز ایستد و لذا کروموزومی که آن بخش از چرخ رولت را به خود اختصاص داده است، انتخاب می شود. بنابراین هرچه برازندگی یک کروموزوم بیشتر باشد آن کروموزوم سطح بیشتری را روی چرخ رولت به خود اختصاص می دهد و لذا شانس بیشتری برای انتخاب شدن دارد. جهت برنامه

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

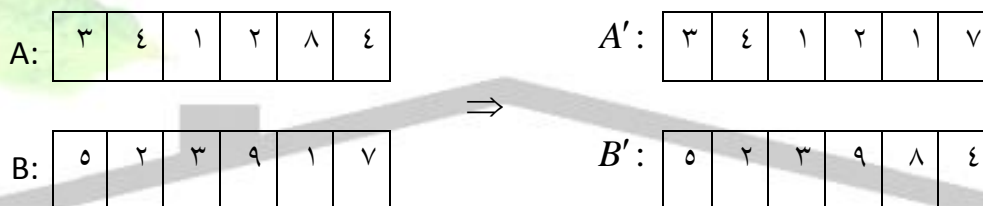
نویسی چرخ رولت ابتدا مقادیر برازندگی کلیه کروموزومها نرمالیزه شده و سپس از فراوانی تجمعی برازندگی استفاده می شود.

جابجایی یا تزویج: پس از عمل تکثیر و تشکیل کروموزوم های خام نسل جدید عمل جابجایی انجام می شود. عملگر جابجایی بع دو روش اعمال می شود:

(۱) عدد تصادفی n بین ۱ تا مقدار طول کروموزوم (تعداد ژنهای کروموزوم) انتخاب می شود و لذا در این جفت کروموزومها n امین عنصر آرایه مربوط به هر دو کروموزوم به بعد با هم جابجا می شوند.

(۲) دو عدد تصادفی n و m بین ۱ تا مقدار طول کروموزوم (تعداد ژنهای کروموزوم) انتخاب می شود و لذا در این جفت کروموزومها آرایه های میان m و n مربوط به هر دو کروموزوم با هم جابجا می شوند.

شکل (۳) نحوه عملکرد این اپراتور را نشان می دهد. دو کروموزوم A و B که هر کدام شامل ۶ عنصر هستند از محل عنصر پنجم به بعد شکسته شده و ادامه کروموزومها از محل شکسته شده با یکدیگر تعویض می شوند و کروموزومهای A' و B' حاصل می شوند.



شکل ۵-۱ اعمال عملگر جابجایی روی کروموزومهای A و B از عنصر پنجم به بعد

عملگر جابجایی با احتمال P_c روی کروموزومهای نسل میانی انجام می شود. در این پژوهش این احتمال برابر $0/7$ انتخاب شده است.

جهش: عمل جهش پس از انجام عمل تکثیر و جابجایی انجام می شود. با توجه به فرآیند انتخاب توسط چرخ رولت مشخص است که جمعیت پس از چندین تکرار به سمت یکنواختی پیش می رود و لذا عامل مهمی که موجب می شود که الگوریتم در نقاط مختلف به جستجو بپردازد، عملگر جهش می باشد. این عملگر از همگرایی زودرس الگوریتم به سمت اکستریم نسبی جلوگیری می کند. از آنجا که انجام عمل جهش منجر به جستجوی کاملاً تصادفی می شود، لذا برای اطمینان بیشتر از گم نشدن کروموزومهای مناسب، معمولاً احتمال جهش (P_m) بسیار کم می باشد. در این پژوهش این احتمال بین $0/05$ تا $0/1$ انتخاب شده است. اپراتور جهش بصورت تصادفی با احتمال یکنواخت یک کروموزوم از جمعیت میانی انتخاب می کند. در این کروموزوم با طول L (تعداد

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

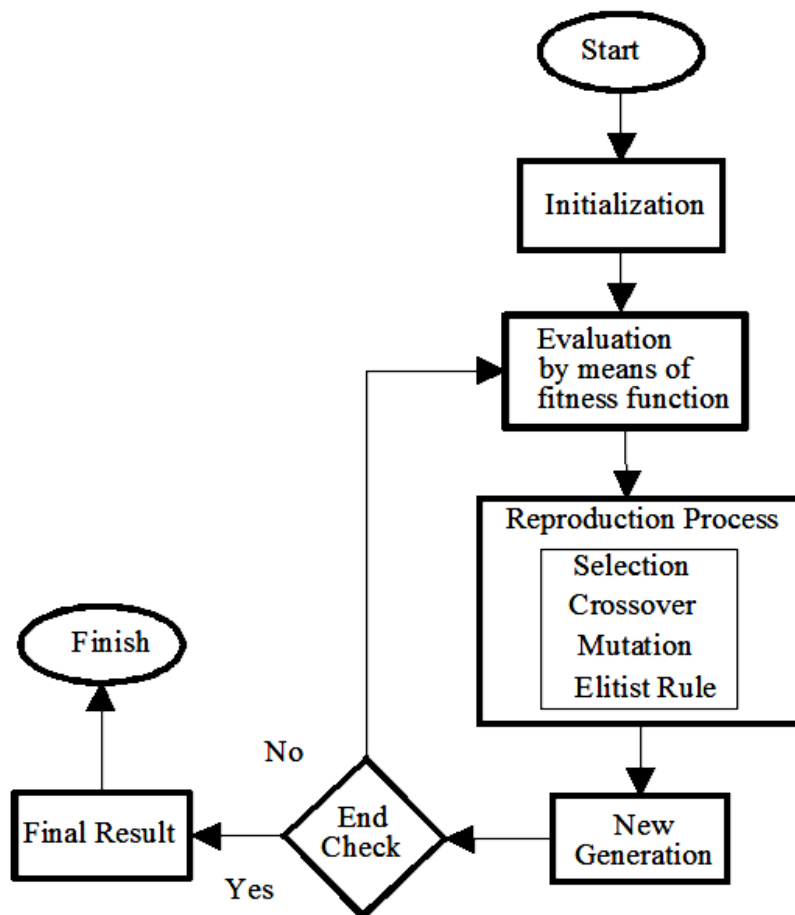
ژنهای کروموزوم) که در مبنای n کدگذاری شده است عدد تصادفی m با احتمال یکنواخت بین 1 تا L انتخاب می شود و عدد تصادفی k بین 0 تا $n-1$ انتخاب می شود و لذا مقدار m امین عنصر کروموزوم برابر k می شود. در صورت کم بودن احتمال جهش جستجو و کشف فضاهای جدید کمتر شده و جمعیت یکنواخت می شد. لذا الگوریتم دچار همگرایی زودرس خواهد شد و از طرف دیگر احتمال از بین رفتن برزنده ترین کروموزومها کاهش خواهد یافت. با افزایش احتمال جهش، اکتشاف بیشتری در فضاهای جستجو صورت گرفته و ممکن است به یافتن بهترین اعضای فضای جستجو منجر شود و مشکل همگرایی زودرس به سمت نقطه اکسترمم محلی کمتر می شود ولی در عین حال احتمال از بین رفتن کروموزومهای خوب نیز وجود دارد. بنابراین یک راه حل مناسب در تعیین مقدار احتمال جهش، استفاده از تکنیک « شبیه سازی سرد شدن تدریجی فلزات » می باشد. براساس این روش می توان به عنوان نمونه از سه مقدار مختلف برای P_m استفاده کرد و بصورت زیر در حالات مختلف از آنها استفاده کرد:

۱. در ابتدای جستجو که هنوز مسیرهای منتهی به نقطه بینه پیدا نشده اند، برای داشتن یک جستجوی وسیع در کل فضاهای جستجو و پیدا کردن نقاط مناسب، احتمال جهش برابر مقدار متوسط در نظر گرفته می شود و این مقدار N_1 تکرار الگوریتم ژنتیک ثابت می ماند.
۲. پس از اتمام N_1 تکرار اول نرخ جهش به « مقدار حداقل » کاهش می یابد تا مسیرهای بینه و کروموزومهای مناسبی که تا N_1 تکرار ایجاد شده اند از بین نروند و این حالت ممکن است تا پایان همگرایی ادامه یابد.
۳. در دو حالت فوق الذکر هرگاه بهترین کروموزوم و یا متوسط برزندگی کروموزومها پس از N_2 تکرار تغییر نکند مبین این است که جمعیت کروموزومها یکنواخت شده است و نیاز به استفاده از نرخ جهش با « مقدار حداکثر » می باشد. با اعمال احتمال جهش بزرگ، الگوریتم از این نقطه بینه محلی عبور کرده و فضاهای جدید ایجاد می شود. نرخ جهش در نسلهای بعدی به تدریج تا مقدار حداقل آن کاهش می یابد. بنابراین در این تکنیک از سه نرخ کم، متوسط و زیاد برای عملگر جهش استفاده می شود.

نخبه گرایی : مجموعه قواعدی است که منتهی به نگهداری کروموزومهای برتر یعنی کروموزومهای با برزندگی بزرگ می شود. روش های مختلفی برای این کار وجود دارد. در این پژوهش در هر مرحله تولید، بهترین کروموزوم مستقیماً به جمعیت بعدی راه می یابد. به این ترتیب همیشه بهترین کروموزوم باقی خواهد ماند. فلوچارت الگوریتم ژنتیک استفاده شده در این پژوهش در شکل ۵-۲ دیده می شود. تمام مراحل فوق در این فلوچارت دیده می شود. در این طراحی ما از الگوریتم ژنتیک با کدینگ باینری استفاده می کنیم. مراحل اصلی این الگوریتم شبیه الگوریتم Holland می باشد. در الگوریتم بکار رفته در هر مرحله بهترین عضو هر جمعیت

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

مستقیماً به مرحله بعد منتقل می شود. ضمناً در مرحله تزویج، این عمل فقط در محل اتصال ژن ها در کروموزوم صورت می گیرد و در عمل تزویج هیچ ژنی شکسته نمی شود.



شکل ۵-۲ فلوجارت الگوریتم ژنتیک بکار رفته در پروژه

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

فصل ۳- مساله بهینه سازی

تابع هدف به صورت زیر تعریف می شود:

$$F(\bar{x}) = \eta(\bar{x}) \quad (1-5)$$

که \bar{x} بردار پارامترهای متغیر هستند و $\eta(\bar{x})$ بازدهی می باشد. به علت اینکه تابع هدف می بایست حداکثر

شود، برازندگی را نیز به همان تابع هدف تعریف می کنیم.

موتوری با مشخصات داده شده در جدول ۱-۵ برای بهینه سازی انتخاب می گردد. عرض موتور، عرض و ارتفاع آهنربا، عرض دندان، طول فاصله هوایی، ارتفاع شیار و یوغ و چگالی جریان به عنوان متغیرهای طراحی انتخاب می شوند. به منظور داشتن یک طراحی واقعی تغییر متغیرها به بازه ای معقول محدود می گردد. در الگوریتم بکار رفته محدودیت‌هایی به صورت زیر اعمال شده است:

$$\begin{aligned} h_{M_Demagnetization} &\leq h_M \leq h_{max} \\ L_{min} &\leq L \leq L_{max} \\ g_{min} &\leq g \leq g_{max} \\ J_{min} &\leq J \leq J_{max} \\ F_{min} &\leq F \leq F_{max} \\ h_{y\ min} &\leq h_y \leq h_{y\ max} \\ h_{t\ min} &\leq h_t \leq h_{t\ max} \\ w_{t\ min} &\leq w_t \leq w_{t\ max} \end{aligned} \quad (2-5)$$

همانطور که ملاحظه می شود ارتفاع آهنربا باید از حداقل مقدار برای دی مغناطیس نشدن بیشتر باشد. عرض

موتور نیز نمی تواند تغییرات زیادی بکند زیرا با کاهش زیاد آن اثر شکستگی شار در لبه های عرضی افزایش یافته

و با افزایش بیش از حد عرض موتور تلفات مس افزایش و راندمان موتور کاهش می یابد. لذا عرض موتور

در محدوده ای مناسب بین مقدار اولیه آن تغییر داده می شود. طول فاصله هوایی نیز از پایین به محدودیت های

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

مکانیکی و ساخت محدود می گردد. مقدار زیاد طول فاصله هوایی نیز سبب کاهش قابل توجه نیرو و در نتیجه افزایش بیش از حد آهنربای مصرفی می گردد. با توجه به این نکته اندازه فاصله هوایی مکانیکی در محدوده کوچکی تغییر می کند. حداقل عرض آهنربا نیز برای جلوگیری از کاهش بیش از حد چگالی نیرو محدود می - گردد و حداقل فاصله ای بین دو آهنربا برای کاهش نشت بین آن دو و مسائل ساخت در نظر گرفته می شود. مقدار نیروی تولیدی نیز که باتوجه به کاربرد و نیازهای آن تعیین می شود و نیرو در یک رنج کوچک حول آن می تواند تغییر کند. مقدار چگالی جریان به کمک حد حرارتی محدود می گردد و همچنین نباید از مقدار خاصی کمتر باشد زیرا منجر با کاهش چگالی نیرو می گردد. برای ارتفاع یوغ و ارتفاع دندان هم اعداد معقولی انتخاب می گردد. عرض دندان از طرف پایین به مسائل مکانیکی و استقامتی محدود می شود و از طرف بالا به علت کاهش فضای سیم پیچ محدود می گردد. مقدار عددی محدودیت ها در این پژوهش به صورت جدول ۴-۲ نمایش داده شده است. همچنین نیروی تولیدی موتور بین دو مقدار ۱۰۰ و ۱۰۲ محدود می گردد. این کار به کمک اعمال تابع زیر بر روی تابع هدف در الگوریتم ژنتیک صورت می گیرد.

WikiPower.ir

$$F(\bar{x}) = \begin{cases} \eta(\bar{x}) & 100 < F_x < 102 \\ 0.01 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (3-5)$$

جدول ۵-۱- مشخصات موتور نمونه

متغیر	مقدار	واحد
فرکانس	۵۰	هرتز
گام قطبی	۴۲	میلی متر
ارتفاع آهنربا	۲	میلی متر
عرض آهنربا	۳۱/۵	میلی متر

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

عرض موتور	۸۴	میلی متر
طول فاصله هوایی	۲	میلی متر
گام شیار	۱۴	میلی متر
پهنای دندانه	۶	میلی متر
ارتفاع شیار	۳۰	میلی متر
ارتفاع یوغ	۱۰	میلی متر
چگالی جریان	۵	آمپر بر میلی متر مربع
نیروی افقی	۱۰۱/۴	نیوتن
راندمان	۸۶/۳	درصد

جدول ۵-۲- محدوده تغییر متغیرها

متغیر	محدوده	واحد
ارتفاع آهنربا	۶-۲	میلی متر
عرض آهنربا	۴۱-۲۷/۵	میلی متر
عرض موتور	۱۰۰-۷۰	میلی متر
طول فاصله هوایی	۴-۲	میلی متر
پهنای دندانه	۸-۴	میلی متر
ارتفاع شیار	۵۰-۱۰	میلی متر
ارتفاع یوغ	۲۵-۵	میلی متر
چگالی جریان	۶-۳	آمپر بر میلی متر مربع
نیروی افقی	۱۰۵-۱۰۳	نیوتن

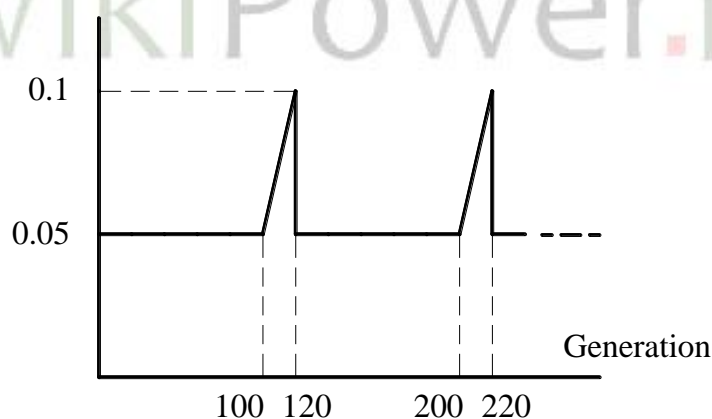
در ادامه الگوریتم ژنتیک با مشخصات ارائه شده در جدول ۴-۳ به موتور نمونه اعمال می گردد تا مقادیر بهینه متغیرها بدست آید. مقدار جهش به صورت متغیر با تعداد نسل ها و به صورت نشان داده شده در شکل ۵-۳ می باشد. با انجام بهینه سازی ابعاد و بازده موتور بهینه همانند جدول ۵-۴ بدست می آید. شکل ۵-۴ نیز نمایش دهنده روند بهبود بازده در نسل های مختلف است. از مقایسه موتور بهینه سازی شده با موتور نمونه می توان به نتایج مفیدی برای طراحی رسید. مشاهده می شود که ابعاد آهنربا در موتور بهینه بیشتر شده است. هم پهنای و هم

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

ارتفاع آهنربا و در نتیجه مقدار حجم آهنربای مصرفی بیشتر شده است. این هزینه ایست که ما برای یک موتور با راندمان بالا باید بپردازیم. و با توجه به اینکه تقریباً ۹۷ درصد هزینه تمام عمر موتور انرژی مصرفی آن و فقط دو درصد آن قیمت اولیه و یک درصد مربوط به نگهداری است این هزینه در طول عمر ماشین جبران می گردد.

عرض موتور و ارتفاع شیار تقریباً ثابت مانده است. عرض دندانها نیز طیار شده است که به کاهش سطح شیار و کاهش مس مصرفی می انجامد. به این ترتیب تلفات در دندانها با زیاد شدن شار آهنربای دائم کنترل شده است. چگالی جریان با توجه به مقادیر بدست آمده مهمترین عامل در تعیین راندمان است. دلیل آن تلفات زیاد الکتریکی در موتور نمونه است. در موتور بهینه چگالی جریان تا حد پایین آن کاهش یافته است. ارتفاع یوغ نیز بیشتر شده است که به کاهش تلفات آهن انجامیده است. در کل می توان گفت که انتخاب بارگذاری ویژه الکتریکی و مغناطیسی در موتور بهینه تغییر کرده است تا تعادل بین تلفات الکتریکی و آهن بیشتر برقرار شده و بازده افزایش یابد.

Mutation rate



شکل ۳-۵ تابع انتخابی برای ضریب جهش

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

فصل ۴- تحلیل اجزاء محدود

از آنجا که بهینه سازی انجام شده بر اساس روابط مدل تحلیلی می باشد لذا صحت این نتایج می بایست توسط روش دقیق تری ارزیابی شود. در این بخش از روش اجزاء محدود دو بعدی غیر خطی دینامیک برای بررسی صحت نتایج استفاده شده است.

جدول ۳-۵- پارامترهای الگوریتم ژنتیک

متغیر	مقدار
جمعیت اولیه	۲۵
تعداد نسل	۴۰۰
روش انتخاب	چرخ رولت
ضریب توزیع	۰/۷
ضریب جهش	متغیر مانند شکل ۳
نخبه گرایی	حفظ بهترین کروموزوم نسل قبل

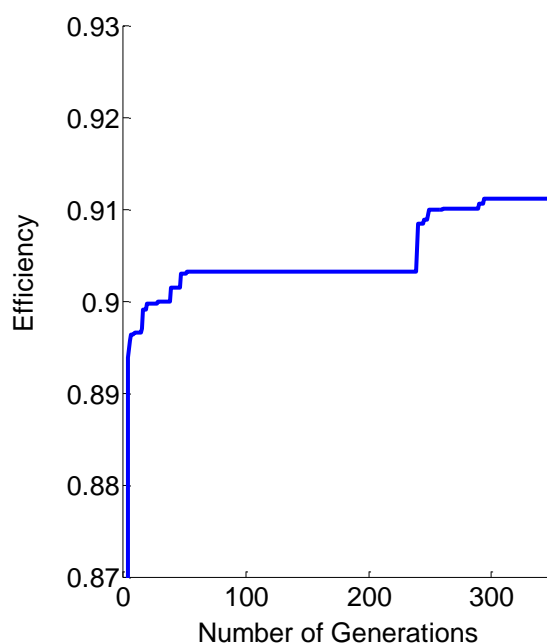
جدول ۴-۵- مشخصات موتور بهینه

متغیر	مقدار	واحد
ارتفاع آهنربا	۵/۸	میلی متر
عرض آهنربا	۳۹/۱	میلی متر
عرض موتور	۸۵	میلی متر
طول فاصله هوایی	۲	میلی متر
پهنای دندان	۶/۸	میلی متر
ارتفاع شیار	۳۰	میلی متر

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

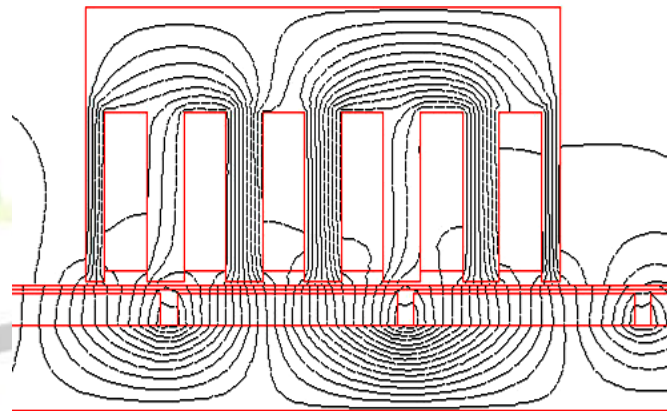
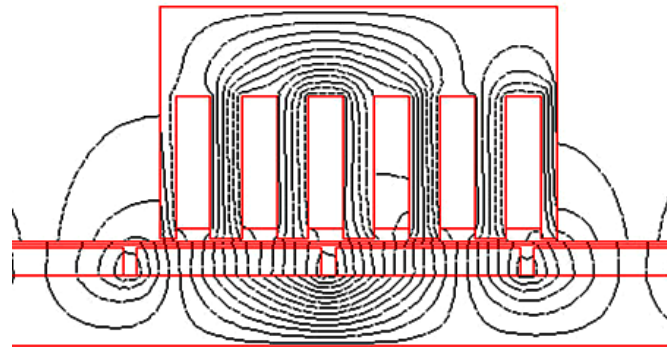
ارتفاع یوغ	۱۸/۸	میلی متر
چگالی جریان	۳	آمپر بر میلی متر مربع
نیروی افقی	۱۰۰/۴	نیوتن
راندمان	۹۱/۳	درصد

موتور بهینه سازی شده توسط روش اجزاء محدود در نرم افزار نرم افزار ANSYS 11.0 شبیه سازی شده است. خطوط شار بدست آمده توسط روش اجزاء محدود و توزیع چگالی شار در دو مکان مختلف در شکل های ۵-۵ تا ۷-۵ دیده می شود. در نهایت بازده و نیروی تولیدی موتور بهینه سازی شده با روش اجزاء محدود محاسبه و با روش تحلیل مقایسه شده است. نتایج این مقایسه در جدول ۵ آمده است که صحت طراحی تحلیلی را تایید می کند.

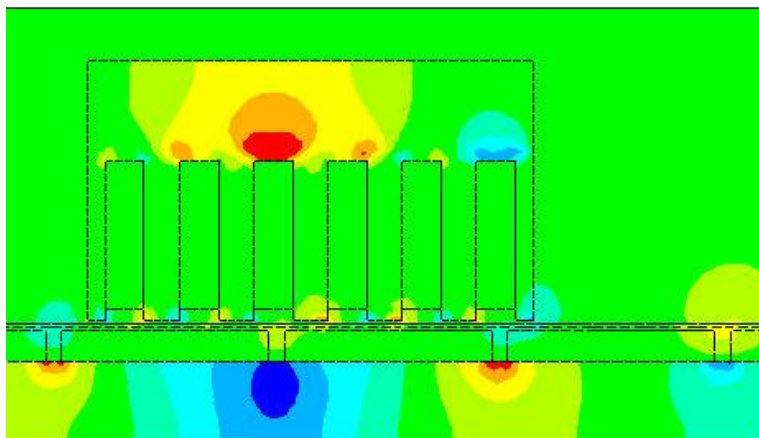


شکل ۵-۴- بهبود بازده در نسل های مختلف

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

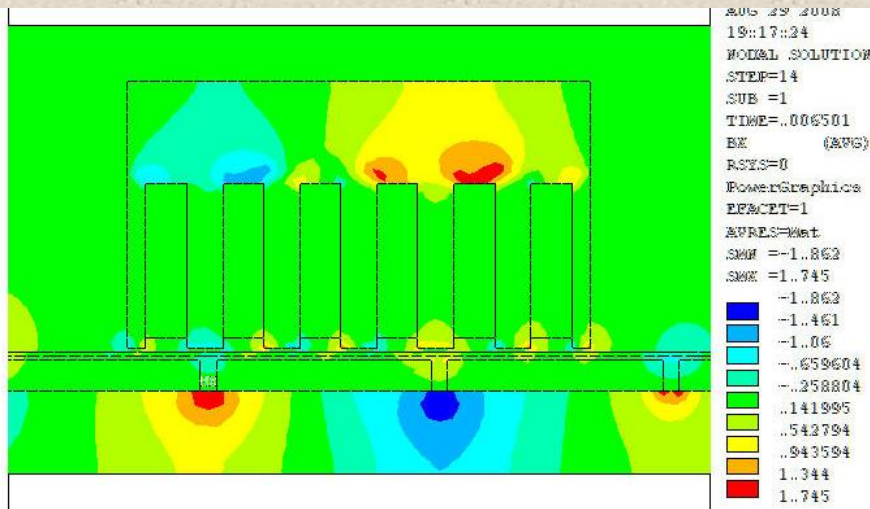


شکل ۵-۵- خطوط شار در موتور در دو مکان مختلف

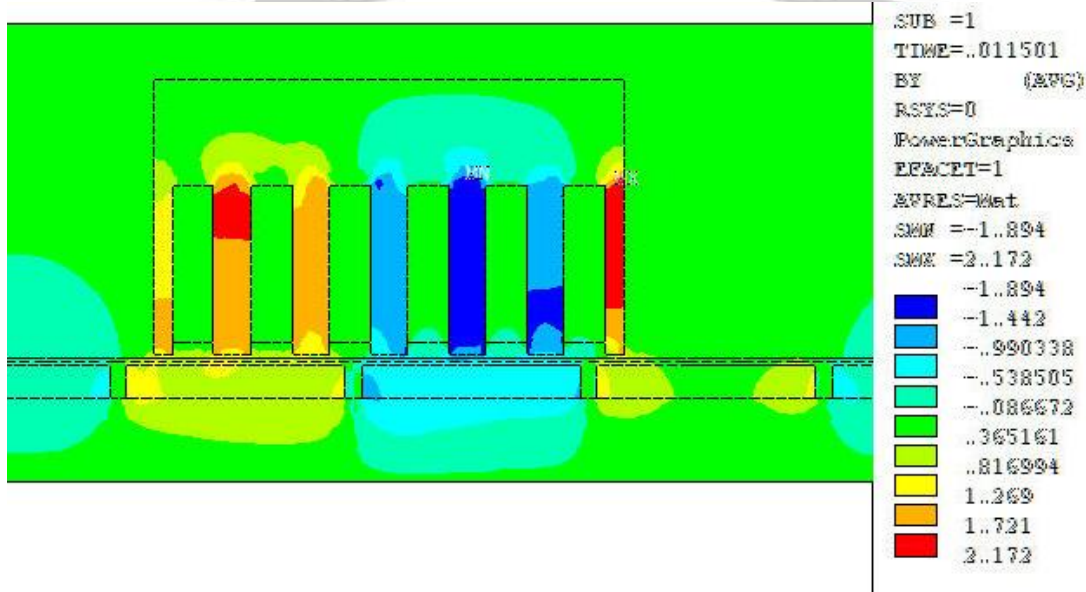


SUB =1
 TIME=.011501
 BX (AVE)
 RSYS=0
 PowerGraphics
 EFACET=1
 AXPRES=Max
 SMN =-1.864
 SMX =1.784
 -1.864
 -1.458
 -1.053
 -.647795
 -.242536
 .163734
 .567984
 .973244
 1.379
 1.784

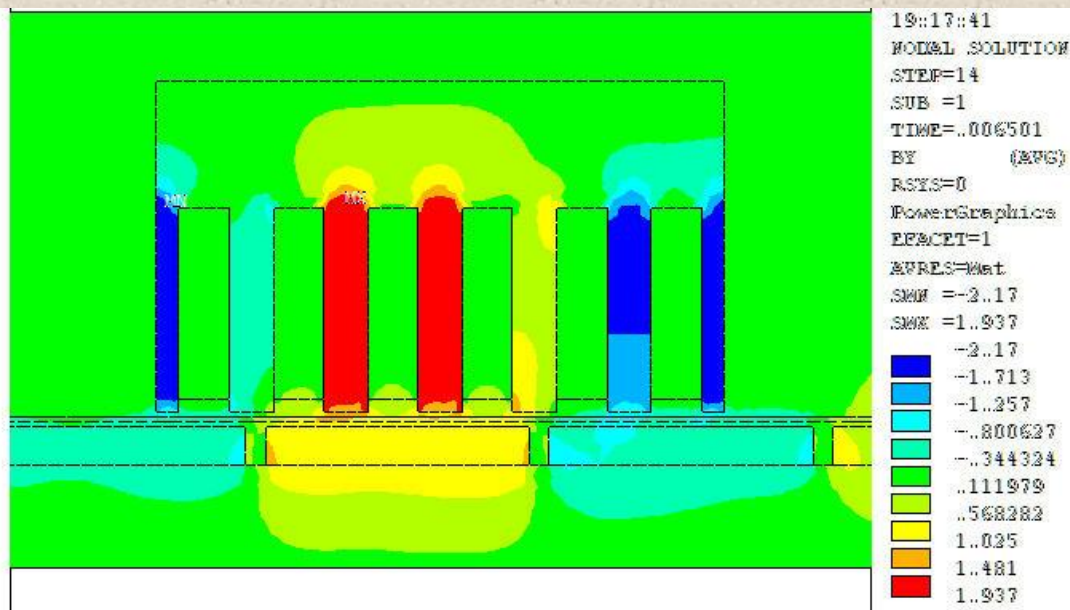
برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



شکل ۵-۶- مولفه طولی چگالی شار در موتور در دو مکان مختلف



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

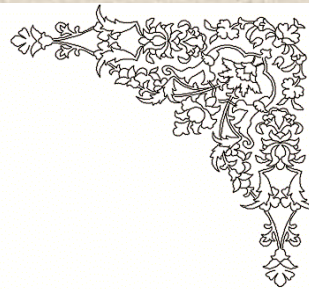


شکل ۷-۵- مولفه عمودی چگالی شار در موتور در دو مکان مختلف

جدول ۵-۵- مقایسه نتایج با روش اجزاء محدود

متغیر	روش مدار معادل	روش محدود	اجزاء
نیروی میانگین افقی	۱۰۰/۴	۹۸/۴۶	محدود
راندمان	۹۱/۳	۹۱/۲	

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت **ویکی پاور** مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه



فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادات



برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

در این پروژه مدلسازی و بهینه سازی موتور سنکرون آهنربای دائم خطی انجام شد. به این منظور ابتدا مدل مناسبی برای تحلیل و محاسبه تلفات آهن برای موتور سنکرون خطی آهنربای دائم یک بر با اولیه کوتاه و آهنربای سطحی ارائه شد. مدل مذکور ضمن داشتن سادگی لازم برای استفاده در کاربردهای طراحی از مزایای زیادی نیز برخوردار است که در ادامه به آن اشاره شده است. در ادامه الگوریتم حل غیر خطی مدار معادل مغناطیسی موتور و محاسبه تلفات تهیه شد و تلفات آهن مورد تحلیل قرار گرفت و تغییرات آن با تغییر پارامترهای طراحی به کمک نمودارهای مناسب بررسی شد. سپس یک موتور نمونه با هدف افزایش بازده به کمک مدار معادل مغناطیسی پیشنهادی و الگوریتم ژنتیک بهینه سازی گردید. نتایج عمده بدست آمده در این پژوهش به شرح زیر است:

۱. بررسی جامع مدار معادل مغناطیسی های مختلف ارائه شده برای موتور سنکرون آهنربای دائم خطی انجام شد و روند تکامل آنها و قابلیت هایی که در طول زمان به این روش اضافه شده تحلیل گردید و مزایا و معایب مدل های پیشین تبیین شد.
۲. در بخش مدلسازی مغناطیسی مدار معادل مغناطیسی نسبتاً جدیدی ارائه شد که برای محاسبه تلفات آهن مناسب بود و در ضمن از سادگی لازم برای استفاده در الگوریتم های طراحی و بهینه سازی برخوردار می باشد. این مدل شامل اثر جریان سیم پیچ ها، اشباع و حرکت ساده اولیه است. الگوریتمی برای حل غیر خطی این مدار معادل مبتنی بر روش گره ارائه شد و نتایج آن مورد بررسی قرار گرفت.
۳. روش محاسبه تلفات آهن توسط مدار معادل پیشنهادی ارائه شد و به کمک آن تغییرات تلفات آهن با تغییر برخی از پارامترهای موتور مانند ابعاد آهنربا، ابعاد دندان، ارتفاع یوغ، طول فاصله هوایی و چگالی جریان سیم پیچ اولیه در حالت های بی بار و بار کامل مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل نشان داد که تلفات آهن با دقت بالایی به کمک مدار معادل مذکور قابل محاسبه است. خطای محاسبه تلفات آهن در مقایسه با روش اجزاء محدود فقط ۳ درصد بود. البته تلفات هیستریزس حدود ۷ درصد و تلفات فوکو در حدود ۱۱ درصد خطا داشت ولی از آنجا که این دو خطا در جهت مخالف هم بود اثر یکدیگر را به ۳ درصد کاهش داد. نتایج نشان داد که ابعاد آهنربا بیشترین اثر را بر روی تلفات دارد که البته با ورود ماشین به ناحیه اشباع تاثیر تغییرات ابعاد آهنربا بر مقدار تلفات نیز کمتر می شود.
۴. بهینه سازی موتور با هدف افزایش بازده موتور به کمک مدار معادل مغناطیسی پیشنهادی و الگوریتم ژنتیک انجام شد. در این بهینه سازی ابتدا تابع هدف مناسبی انتخاب شد و سپس مقدار آن بهینه گردید. پارامترهای مختلفی از موتور برای این بهینه سازی انتخاب شد که منجر به افزایش ۵ درصدی راندمان بدون کاهش مقدار نیروی تولیدی موتور گردید.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

۵. بهینه سازی نشان داد که نسبت به موتور نمونه باید چگالی جریان کاهش یابد و ابعاد آهنربا ثابت بماند. همچنین افزایش نسبی پهنای دندانه و ارتفاع یوغ نیز صورت گرفت. در مقابل سطح شیار و مس مصرفی کم شد. عرض موتور و ارتفاع شیار و طول فاصله هوایی نیز مقادیری بودند که تقریباً ثابت ماندند.
۶. تمام نتایج به کمک روش اجزاء محدود غیرخطی استاتیک و دینامیک مقایسه و صحت کار تأیید گردید.

۲-۶ پیشنهادها

برای ادامه و تکمیل این پژوهش پیشنهادهای زیر ارائه می شود:

۱. تحلیل اجزاء محدود سه بعدی جهت بررسی اثر واقعی نشت شار در موتور با عرض کم جهت انتخاب حد پایین عرض موتور در بهینه سازی و همچنین برای داشتن تحلیلی کامل تر انجام گردد.
۲. مدلسازی حرارتی موتور به کمک تلفات محاسبه شده با روش پیشنهادی و ارائه یک مدار معادل کوپل مغناطیسی و حرارتی و تحلیل کامل حرارتی موتور به کمک روش اجزاء محدود به منظور تأیید مدل انجام شود.
۳. حتی الامکان توابع هدف بیشتری به کمک بهینه سازی چند منظوره در نظر گرفته شود مثلاً قیمت تمام شده و ریپل نیرو و چگالی نیرو می تواند با بازده ترکیب شود.
۴. بهینه سازی موتور با تغذیه ولتاژ و با اضافه کردن پارامترهای لازم مثل تعداد دور سیم پیچی و معادلات الکتریکی موتور انجام شود.
۵. حتی الامکان تلفات درایو و نقطه کار نیز در بهینه سازی وارد گردد تا یک بسته موتور درایو بهینه داشته باشیم.
۶. تحلیل اجزاء محدود با تغذیه ولتاژ و اتصال به مدار خارجی انجام شود.
۷. تعمیم مدلسازی پیشنهادی و بهینه سازی انجام شده برای ساختارهای دیگر موتور سنکرون آهنربای دائم خطی مورد بررسی قرار گیرد.
۸. حتی الامکان یک نمونه از موتور ساخته شود و نتایج با نتایج عملی مقایسه شده و در صورت مشاهده خطای زیاد دلایل آن و راه کارهای کاهش خطا بررسی و تحلیل شود.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

منابع:

- [1]. J. F. Gieras and Z. J. Piech, *Linear synchronous motors: Transportation and automation systems*. Boca Raton, FL: CRC Press, 2000.
- [2]. J. Wang, and D. Howe "Design optimization of radially magnetized, iron-cored, tubular permanent-magnet machines and drive systems," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40, pp. 3262-3277, Sept. 2004.
- [3]. A. Boldea, S. Nasar, *Linear Electromagnetic Devices*, Taylor & Francis, 2001.
- [4]. S. A. Nasar and I. Boldea, *Linear electric actuators and generators*, Cambridge University Press, 1997.
- [5]. Online Available: www.compumotor.com
- [6]. Online Available: www.ruchservomotor.com
- [7]. Online Available: www.h2wtech.com
- [8]. Online Available: www.trilogysystems.com
- [9]. Online Available: www.beckhoff.com
- [10]. M. J. Chung, D. G. Gweon, "Modeling of armature slotting effect in magnetic filed disturbtion of linear permanent magnet motor, " *Electrical Engineering Journal*, Vol. 84, pp.101-108, Springer-verlag, 2002.
- [11]. D. B. Montgomery, "Overview of the 2004 Magplane design," Magplane Technology, Inc, Tech. Rep., 2004.
- [12]. A. B. Proca, A. Keyhani and A. El-Antably, "Analytical model for permanent magnet motors with surface mounted magnets," *IEEE Eng. Conv.*, vol. 18, pp. 386-391, Sept. 2003.
- [13]. Z. Q. Zhu and D. Howe, "Instantaneous magnetic field distribution in permanent magnet brushless DC motors, Part III: Effect of slotting," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 29, pp.143-151, Jan 1993.
- [14]. Z. Q. Zhu and D. Howe, "Instantaneous magnetic field distribution in permanent magnet brushless DC motors, Part I: Open-Circuit field," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 29, pp. 124-136, Jan 1993.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

- [15]. Z. Q. Zhu and D. Howe, "Instantaneous magnetic field distribution in permanent magnet brushless DC motors, Part II: Armature-Reaction field," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 29, pp.136-142, Jan 1993.
- [16]. Z. Q. Zhu and D. Howe, "Instantaneous magnetic field distribution in permanent magnet brushless DC motors, Part IV: Magnetic field on load," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 29, pp. 152-158, Jan 1993.
- [17]. K. C. Lim, J. P. Hong, G. T. Kim, "The novel technique considering slot effect by equivalent magnetizing current, ", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 35, pp. 3691-3693, Sept. 1999.
- [18]. Y. M. Chen, S. Y. Fan and W. S. Lu, "Performance analysis of linear permanent magnet motors for optimal design considerations," in *Proc. Applied Power Electronics Conference and Exposition*, Anaheim, California, Feb. 2004, pp. 1584-1589.
- [19]. M. A. Jabbar, A. M. Khambadkone, and L. Qinghua, "Design and analysis of exterior and interior type high-speed permanent magnet motors," National University of Singapore, Tech. Rep., 2001.
- [20]. J.R. Hendershot, and T. J. E. Miller, *Design of Brushless Permanent Magnet Motors*, Oxford Science Publications, 1994.
- [21]. M. A. Rahman, T. A. Little, and G. R. Slemon, "Analytical model for interior-type permanent magnet synchronous motors," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 21, pp. 1741- 1743, Sept. 1985.
- [22]. C. C. Hwang and Y. H. Cho, "Effects of leakage flux on magnetic fields of interior permanent magnet synchronous motors," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, pp. 3021-3025, July 2001.
- [23]. R. Qu, and T. A. Lipo, "Analysis and modeling of air-gap and zigzag leakage fluxes in a surface-mounted permanent magnet machine," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 40, pp. 121-127, Jan/Feb. 2004.
- [24]. Y. Kano, T. Kosaka, and N. Matsui, "Simple non-linear magnetic analysis for permanent magnet motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 41, pp. 1205-1214, Sept./Oct. 2005.
- [25]. H. Polinder, J. G. Slootweg, M. J. Hoeijmakers, and J. C. Compter, "Modeling of a linear PM machine including magnetic saturation and end effects: Maximum force-to-current ratio," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 39, pp. 1681-1688, Nov./Dec. 2003.
- [26]. I. S. Jung, J. Hur, and D. S. Hyun, "3-D Analysis of permanent magnet linear synchronous motor with magnet arrangement using equivalent magnetic circuit network method," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 35, pp. 3736-3738, Sept. 1999.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازم

- [27]. J. Hur, S. B. Yoon, D. Y. Hung, and D. S. Hyun, "Analysis of PMLSM Using Three Dimensional Equivalent Magnetic Circuit Network Method," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 33, pp. 4143-4145, Sept. 1997.
- [28]. C. B. Rasmussen, "Modeling and simulation of Surface Mounted PM Motors", Phd thesis, Alborg University, Alborg, Denmark, 1997.
- [29]. A. Demenko and D. Stachowiak, "Electromagnetic torque calculation using magnetic network methods," *COMPEL*, vol. 28, no. 1, pp. 17-26, 2008.
- [30]. Andrzej Demenko and Jan K. Sykulski, "Network equivalents of nodal and edge elements in electromagnetics," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 38, pp. 1305-1308, Mar. 2002.
- [31]. A. Demenko, J. Sykulski, and R. Wojciechowski, "Network representation of conducting regions in 3-D finite-element description of electrical machines," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 44, pp. 714-717, June 2008.
- [32]. A. Demenko, "Three dimensional eddy current calculation using reluctance-conductance network formed by means of FE method," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, pp. 741-745, July 2000.
- [۳۳]. آرش حسن پور اصفهانی، "مدلسازی، طراحی و بهینه سازی موتور سنکرون آهنربای دائم خطی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تهران ۱۳۸۴.
- [34]. S. Vaez-Zadeh, and A. H. Isfahani, "Enhanced modeling of linear permanent magnets synchronous motors," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 43, pp. 33-39, Jan. 2007.
- [35]. K. C. Lim, J. K. Woo, G. H. Kang, J. P. Hong, and G. T. Kim, "Detent force minimization techniques in permanent magnet linear synchronous motors," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 38, pp. 1157-1160, Mar. 2002.
- [36]. I. S. Jung, J. Hor and D. S. Hyun, "Performance analysis of skewed PM linear synchronous motor according to various design parameters," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, pp. 1157-1160, Sept. 2002.
- [37]. G. H. Kang, J. P. Hong, and G. T. Kim, "A novel design of an air-core type permanent magnet linear brushless motor by space harmonics field analysis," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, pp. 3732-3736, Sept. 2001.
- [38]. M. Andriollo, and et al, "Design optimisation of slotless linear PM motors," in *Proc. of 4th international symposium on linear drives for industry applications*, LDIA 2003, Birmingham, UK, 8-10 Sept. 2003, pp. 203-206.
- [39]. J. Kim, and et al, "Static characteristics of linear BLDC motor using equivalent magnetic circuit and finite element method," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40, pp. 742-745. Mar. 2004.

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

- [40]. J. Wang, D. Howe and G. W. Jewell, "Analysis and design optimization of an improved axially magnetized tubular permanent magnet machine," *IEEE Trans. Eng. Conv.* vol. 19, pp. 289-295, Jun. 2004.
- [41]. M. Inoue, and K. Sato, "An approach to suitable stator length for minimizing the detent force of permanent magnet linear synchronous motors," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, pp. 1890-1893, Jul. 2000.
- [42]. D. Y. Lee, C. G. Jung, K. J. Yoon and G. T. Kim, "A study on the efficiency optimum design of a permanent magnet type linear synchronous motor," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 41, pp. 1860-1863, May 2005.
- [43]. M. J. Chung, M. G. Lee, S. Q. Lee, M. Kim, and Dae-Gab Gweon, "A method of optimal design for minimization of force ripple in linear brushless permanent magnet motor," in *Proc. Electric Machines and Drives Conference, IEMDC, 2000*, pp.36-39.
- [44]. M. J. Chung, M. G. Lee, S. Q. Lee, and Dae-Gab Gweon, "Optimal design and development of linear brushless permanent magnet motor," in *Proc. Electric Machines and Drives Conference, IEMDC, 2001*, pp.436-441.
- [45]. J. S. Chun, J. P. Lim, S. Y. Jung and H. K. Jung, "Multiresolution optimization of permanent magnet linear synchronous motor for high thrust and acceleration operation," in *Proc. Electric Machines and Drives Conference, IEMDC, 1999*, pp.57-59.
- [46]. T. Ishikawa, C. Chen, S. Hashimoto and M. Matsunami, "Optimal design of thrust characteristic of permanent magnet type linear motor using orthogonal table and multiregression analysis," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 40, pp. 1220-1223, May 2004.
- [47]. S. Vaez-Zadeh, and A. Hassanpour Isfahani, "Multi-objective design optimization of air-core linear permanent magnet synchronous motors for improved thrust and low magnet consumption", *IEEE Trans. Magn.* vol. 42, pp. 446-452, March 2006.
- [48]. A. Hassanpour Isfahani, and S. Vaez-Zadeh, "Design optimization of a linear permanent magnet synchronous motor for extra low force pulsations," *J. Energy Conversion and Management*, vol 48, pp. 443-449, 2007.
- [49]. J. F. Gieras, R. J. Wang, and M. J. Kamper, *Axial flux permanent magnet brushless machines*, Second Ed., Springer, 2008.
- [50]. S. A. Nasar, I. Boldea, and L. E. Unnewehr, *Permanent magnet, Reluctance and self-synchronous Motors*, Boca Raton, FL: CRC Press, 1993.
- [51]. Y. K. Chin, W. M. Arshad, T. Backstrom, and C. Sadarangani, "Design of a compact BLDC motor for transient application," in *Proc. International*

برای دریافت فایل Word پروژه به سایت ویکی پاور مراجعه کنید. فاقد آرم سایت و به همراه فونت های لازمه

conference on electrical engineering and technology, ICEET, Dar es Salaam, Tanzania, Sept. 2001, pp. 451-455.

[52]. M. A. Rahman, T. A. Little, and G. R. Slemon, "Analytical model for interior-type permanent magnet synchronous motors," *IEEE Trans. Magn.*, vol. MAG-21, pp. 1741-1743, Sept. 1985.

[53]. S. D. Sudhuf, B. T. Kuhn, K. A. Corzine, and B. T. Branecky, "Magnetic circuit modeling of induction motors," *IEEE Trans. Energy Conv.*, vol. 22, pp. 259-270, June 2007.

[54]. J. Perho, "Reluctance network for analyzing induction machines," PhD Dissertation, Helsinki Univ. Tech., Finland, Dec. 2002.

[55]. S. Han, T. M. Jahns, and W. L. Soong, "A magnetic circuit model for an IPM synchronous machine incorporating moving airgap and cross-coupled saturation effects," in *Proc. Int. Conf. Electrical machines and drives, IEMDC2007, Antalya, Turkey, 3-5 May 2007*, pp. 21-26.

[56]. H. Gholizad, M. Mirsalim, M. Mirzayee, and W. Cheng, "coupled magnetic equivalent circuits and the analytical solution in the air-gap of squirrel cage induction machines," *J. Applied Electromagnetic and Mechanics*, vol. 25, pp. 749-754, 2005.

[57]. J. Hur, H. Toliyat, and J. P. Hong, "3-D time stepping analysis of induction motor by new equivalent circuit network method," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, pp. 3225-3228, Sept. 2001.

[58]. C. Mi, "Modeling of iron losses of permanent magnet synchronous motors," PhD Dissertation, University of Toronto, Toronto, Canada.

[59]. Slemon G. R. and Liu X., "Core Losses in Permanent Magnet Motors", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 26, pp.1653-1655, 1990.

[60]. C. Mi, G. R. Slemon, and R. Bonert, "Modeling of iron losses of permanent-magnet synchronous motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 39, pp. 734-742, May/June 2003.

[61]. G. R. Slemon, "On the design of high-performance surface-mounted PM motors," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, Vol. 30, pp. 134-140, Jan/Feb 1994.