

۱۳۰۷

دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان نامه کارشناسی ارشد
گرایش ماشین های الکتریکی

عنوان:

طراحی بهینه و شبیه سازی موتور ورنیر با آهنربای دائم فریت و مقایسه آن با
موتور آهنربای دائم داخلی آهنربای نئودیمیم

استاد راهنما:

دکتر محمد اردبیلی

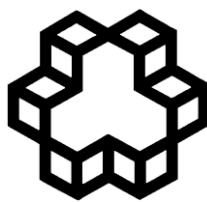
نگارش:

محمد سیاه تیری

بهمن 1398



الحمد لله الذي
خلقنا من
الحمم



۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی و علم مواد

تأییدیه هیأت داوران

هیأت داوران پس از مطالعه پایان‌نامه با عنوان طراحی بهینه و شبیه سازی موتور ورنیر با آهنربای دائم فریت و مقاسیه آن با موتور آهنربای دائم داخلی آهنربای نئودیمیم نگارش محمد سیاه تیری و شرکت در جلسه دفاع از پایان‌نامه مذکور مورخ **---/--/----**، تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق گرایش ماشین‌های الکتریکی مورد تأیید قرار دادند.

امضاء استاد راهنما: دکتر نام کامل استاد راهنما

امضاء استاد مشاور: دکتر نام کامل استاد مشاور (در صورتی که استاد مشاور ندارید این قسمت حذف گردد)

امضاء استاد ممتحن خارجی: دکتر نام کامل استاد ممتحن

امضاء استاد ممتحن خارجی: دکتر نام کامل استاد ممتحن (فقط برای دانشجویان دکتری)

امضاء استاد ممتحن داخلی: دکتر نام کامل استاد ممتحن

امضاء استاد ممتحن داخلی: دکتر نام کامل استاد ممتحن (فقط برای دانشجویان دکتری)

امضاء نماینده تحصیلات تکمیلی: دکتر نام کامل نماینده تحصیلات تکمیلی





۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی و علم مواد

اظهارنامه دانشجو

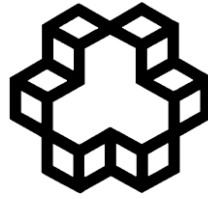
اینجانب **محمد سیاه تیری** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق گرایش ماشین‌های الکتریکی دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در پایان‌نامه با عنوان:

طراحی بهینه و شبیه سازی موتور ورنیر با آهنربای دائم فریت و مقاسیه آن با موتور آهنربای دائم داخلی آهنربای نفوذیمیم

با راهنمایی استاد محترم **جناب آقای دکتر محمد اردبیلی** توسط شخص اینجانب انجام شده است. صحت و اصالت مطالب نگارش شده در این پایان‌نامه مورد تأیید اینجانب می‌باشد. در مورد استفاده از کار سایر محققین به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. همچنین گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا فرد دیگری در هیچ جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب مصوب دانشگاه به طور کامل رعایت شده است.

امضاء دانشجو:

تاریخ:



۱۳۰۷
دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی و علم مواد

حق طبع، نشر و مالکیت نتایج

1. حق چاپ و تکثیر این پایان‌نامه متعلق به نویسنده و استاد/استادان راهنمای آن می‌باشد. هرگونه تصویربرداری از کل یا بخشی از پایان‌نامه تنها با موافقت نویسنده یا استاد/استادان راهنما یا کتابخانه دانشکده مهندسی مواد دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می‌باشد.
2. کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی می‌باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.
3. استفاده از اطلاعات و نتایج موجود پایان‌نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

تقدیم

به او که با وجود نبودنش همواره کنارم بود...

تشکر و قدردانی

از استاد بزرگوارم دکتر محمد اردبیلی تشکر می‌کنم چرا که ایشان با در اختیار گذاشتن زمان با ارزششان در حق بنده لطف نمودند.

چکیده

امروزه تامین انرژی با استفاده از سوخت‌های فسیلی دیگر به صرفه نیست چرا که محدودیت‌های جدی منابع سوخت‌های فسیلی در چند سال آینده بر همگان روشن شده است از طرفی دولت‌ها تحت فشار مردم دیگر نمی‌توانند به راحتی محیط زیست را با استفاده از این منابع انرژی آلوده سازند، تمام این موارد سبب شده تامین انرژی برق و از آن مهم‌تر نحوه روش‌های مصرف انرژی تغییر چشمگیری داشته باشند.

در این میان خودروهای برقی و نیروگاه‌های بادی نسبت به سال‌های گذشته بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند با این حال در خودروهای برقی و نیروگاه بادی شاهد بازده کم خروجی به دلیل استفاده از ماشین‌های مرسوم القایی و همچنین محدودیت‌های خاص به دلیل سرعت کاری پایین و البته حجم بالای ماشین می‌باشیم.

در این تحقیق به منظور ارائه راه حل برای مشکلات فوق به مقوله استفاده از ماشین‌های ورنیر پرداخته می‌شود و پس از بررسی انواع آنها مدل مدنظر انتخاب شده و سپس با در نظر گرفتن بازده به عنوان تابع هدف و با استفاده از الگوریتم ژنتیک، نسبت به بهینه‌سازی طراحی اقدام شده است. در پایان نیز ماشین بهینه با استفاده از روش اجزای محدود شبیه سازی و پارامترهای آن مورد بحث قرار خواهد گرفت.

لازم به ذکر است در این پایان نامه از نرم افزار MATLAB 2018b به منظور بهینه‌سازی از روش الگوریتم ژنتیک و نیز از نرم افزار Ansys Maxwell 16 برای شبیه سازی از روش اجزای محدود استفاده شده است.

واژه‌های کلیدی: موتور ورنیر، دایرکت درایو، الگوریتم ژنتیک، روش اجزای محدود.

عنوان	صفحه
فهرست شکلها	ذ
فصل اول: مقدمه	1
1-1- چالش‌های اتصال مستقیم	2
2-1- چگالی گشتاور و سرعت بالا	3
3-1- اصول ماشین ورنیر آهنربای دائم	3
فصل دوم: موتور ورنیر	9
1-2- طراحی موتور ورنیر	14
2-1-1- طراحی روتور	24
2-1-2- طراحی استاتور	25
فصل سوم: بهینه‌سازی طراحی با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک	34
1-3- انواع روش‌های بهینه‌سازی	34
1-1-3- الگوریتم‌های بهینه‌سازی قطعی و احتمالی	35
2-1-3- الگوریتم‌های بهینه‌سازی مستقیم و غیر مستقیم	36
3-1-3- الگوریتم بهینه‌سازی هیوریستیک و فراابتکاری	36
4-1-3- الگوریتم بهینه‌سازی با روش جستجوی اتفاقی	36
5-1-3- الگوریتم هوک و جیوز	37
6-1-3- روش پاول	38
7-1-3- الگوریتم ژنتیک (GA)	38
8-1-3- سردسازی (تبرید) شبیه سازی شده (SA)	39
9-1-3- الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات (PSO)	39
2-3- مقایسه و انتخاب روش بهینه‌سازی مناسب	39
1-2-3- مزایای الگوریتم ژنتیک در مقایسه با سایر روش‌های بهینه‌سازی	40
2-2-3- معایب الگوریتم ژنتیک در مقایسه با سایر روش‌های بهینه‌سازی	41
3-3- الگوریتم ژنتیک	42
4-3- بهینه‌سازی در الگوریتم ژنتیک	44
1-4-3- تابع هدف بهینه‌سازی	44
2-4-3- پارامترهای بهینه‌سازی	45
3-4-3- بهینه‌سازی تابع تک هدفه (بازده)	47

51	4-4-3- تحلیل نتایج
53	فصل چهارم: مدل سازی موتور بهینه ورنیر به روش المان محدود
53	4-1- معرفی روش اجزای محدود (FEM)
54	4-1-1- مش بندی ماشین ورنیر آهنربای دائم
54	4-1-2- فرمول بندی مساله جهت حل مساله میدان
57	4-1-3- اعمال روابط به مش ها و حصول دستگاه معادلات
59	4-2- شرایط مرزی
60	4-3- مدل سازی موتور ورنیر آهنربای دائم با استفاده از FEM
60	4-3-1- مرحله ی پیش پردازش
63	4-3-2- مرحله ی پردازش
64	4-4- تحلیل موتور ورنیر در FEM
64	4-4-1- چگالی میدان مغناطیسی در فاصله هوایی
	4-4-2- تلفات
65	
	4-4-3- گشتاور
68	
68	4-4-4- رپیل گشتاور
69	4-4-5- ولتاژ Back-emf
69	4-4-5- ضریب توان
70	4-4-6- گشتاور دندانهای
71	4-4-6- سایر مشخصات
72	فصل پنجم: مقایسه تاثیر آهنربای نئودیمیوم و فریت در موتور
72	5-1- فریت
72	5-1-1- ساختار و فرمول شیمیایی
73	5-1-2- فریت های سخت و نرم
74	5-1-3- ویژگی ها و کاربردها
75	5-2- نئودیمیوم
75	5-2-1- کاربرد نئودیمیوم
75	5-2-2- ایزوتوپ ها

76	3-5- مقایسه تاثیر نوع آهنرباها
76	3-5-1- چگالی میدان مغناطیسی در فاصله هوایی
76	3-5-2- ولتاژ القاء شده
	3-5-4-
	گشتاور
77	
77	3-5-6- توزیع چگالی میدان مغناطیسی در موتور
79	فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات
80	مراجع

فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
9	شکل 1-2: یک نوع گیربکس مغناطیسی
10	شکل 2-2: اتصال مغناطیسی هم محور
11	شکل 3-2: گیربکس مغناطیسی هم محور
12	شکل 4-2: ماشین دنده مغناطیسی با سه شکاف هوایی
12	شکل 5-2: ماشین دنده مغناطیسی با دو شکاف هوایی
13	شکل 6-2: ماشین دنده مغناطیسی با یک شکاف هوایی
13	شکل 7-2: نمودار دسته بندی کلی ماشین‌های الکتریکی
15	شکل 8-2: رابطه‌ی بین زاویه‌ی چرخش روتور و زاویه‌ی الکتریکی استاتور
15	شکل 9-2: ارتباط بین اندازه‌ی آهنربا و اندازه‌ی دندانه‌ی استاتور
19	شکل 10-2: ارتباط بین دهانه‌ی شیار و گام شیار
	w_o
20	شکل 11-2: ارتباط بین ضریب کارتر β و g
29	شکل 12-2: نحوه‌ی سیم‌پیچی فازهای مختلف استاتور
30	شکل 13-2: شکل شیار استاتور
31	جدول 1-2: مشخصات موتور ورنیر طراحی شده
33	جدول 1-3: مشخصات نامی موتور ورنیر طراحی شده
34	فصل سوم: بهینه‌سازی طراحی با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک
44	شکل 1-3: بازتولید نسل جدید با استفاده از تقاطع
46	جدول 1-3: محدودیت‌ها و الزامات بهینه‌سازی طراحی
48	شکل 2-3: مراحل بهینه‌سازی
49	جدول 2-3: نتیجه 5 مرتبه اجرای الگوریتم بهینه‌سازی
49	جدول 3-3: مشخصات موتور ورنیر طراحی شده
53	فصل چهارم: مدل‌سازی موتور بهینه ورنیر به روش المان محدود
58	شکل 1-4: مش بندی یک ناحیه دلخواه از فضا
61	شکل 2-4: نمای ساختار استاتور
61	شکل 3-4: نمای استاتور سیم‌پیچی شده
62	شکل 4-4: هسته‌ی روتور به همراه آهنرباهای مربوط به آن
62	شکل 5-4: مش بندی و نمای دوبعدی موتور ورنیر آهنربای دائم با 44 قطب و 24 شیار

63	شکل 4-6: نمونه‌ای از فضای مرزی تعریف شده در موتور ورنیر مغناطیس دائم
64	شکل 4-7: شدت میدان مغناطیسی در هر نقطه از ساختار موتور
65	شکل 4-8: چگالی میدان مغناطیسی فاصله هوایی پس از بهینه‌سازی
66	شکل 4-9: تلفات موتور قبل از بهینه‌سازی
66	شکل 4-10: تلفات موتور پس از بهینه‌سازی
68	شکل 4-11: گشتاور موتور ورنیر پس از بهینه‌سازی
69	شکل 4-12: ریبیل گشتاور موتور پس از بهینه‌سازی
69	شکل 4-13: ولتاژ Back-emf
70	شکل 4-14: گشتاور دندانه ای در موتور بهینه شده
71	شکل 4-15: Flux-Linkage در موتور بهینه شده
72	فصل پنجم: مقایسه تاثیر آهنربای نئودیمیوم و فریت در موتور
76	شکل 5-1: چگالی میدان مغناطیسی در فاصله هوایی – آهنربای فریت
77	شکل 5-2: ولتاژ القاء شده در موتور – آهنربای فریت
77	شکل 5-3: گشتاور موتور ورنیر – آهنربای فریت
78	شکل 5-6: توزیع چگالی میدان مغناطیسی در موتور ورنیر – آهنربای فریت

فصل اول: مقدمه

با توجه به محدودیت‌های جدی در منابع فسیلی و از آن مهم‌تر آلاینده‌گی که این منابع به همراه دارند نحوه تولید انرژی و در کنار آن نحوه مصرف آن به شدت مورد توجه قرار گرفته است، به گونه ای که بتوان با مصرف سوخت کمتر انرژی تولید کرد و پس از آن با بهینه سازی تلفات به بهترین شکل از آنها بهره جست. به صورت کلی تولید به سمت استفاده از انرژی‌های پاک‌تر و تجدیدپذیر سوق پیدا کرده و مصرف نیز تمایل بیشتری به داشتن بازده بالاتر از خود نشان می دهد.

با این وجود چالش‌هایی در مسیر راه وجود دارند که گاهی این چالش‌ها به دلیل یکی بودن ذات ژنراتور و موتور می توانند در یک راستا قرار بگیرند و خوشبختانه یک راه حل مشخص نیز داشته باشند.

چالشی که به صورت ویژه در این پایان نامه مدنظر قرار گرفته است حجم و بازده ماشین می باشد و قرار است راه حلی ارائه شود تا در کنار کاهش حجم ماشین شاهد افزایش بازده آن نیز باشیم.

به طور مثال یکی از مشکلات اساسی توربین‌های بادی استفاده از گیربکس‌های مکانیکی برای تبدیل سرعت کم ورودی به سرعت مدنظر ژنراتور می باشد این مسئله در حالیست که حجم ژنراتور نیز به دلیل محدودیت‌های ذاتی عملاً بالا می باشد، مورد دیگر موتورهای الکتریکی که در خودروهای برقی مورد استفاده قرار می گیرند می باشد. در این نوع خودروها به دلیل محدودیت‌های ویژه حجم موتور و چگالی گشتاور بسیار مورد توجه می باشد و با توجه به این مسائل امکان استفاده از گیربکس‌های مکانیکی عملاً فراهم نیست.

با ارائه و بهینه‌سازی ماشین ورنیر آهنربای دائم یک پاسخ مشترک برای چالش‌های مطرح شده در این پایان نامه طرح خواهد شد که در ادامه با جزئیات آن بیشتر آشنا خواهید شد.

1-1- چالش‌های اتصال مستقیم¹

با توجه به نیاز ما در استفاده از ماشین‌هایی با حجم کمتر و البته کاهش تلفات مکانیکی استفاده از ماشین‌هایی که قابلیت اتصال مستقیم را فراهم می‌کنند منطقی می‌باشد، چرا که در این ماشین‌ها گیربکس مکانیکی حذف شده و به صورت کلی حجم مدنظر کاهش چشمگیری خواهد داشت و از سوی دیگر تلفات مکانیکی ناشی از گیربکس نیز نخواهیم داشت.

با این حال چالش‌هایی در استفاده از مدل اتصال مستقیم وجود دارند که سبب شده گاهی معایب آن نسبت به مزایای آن پیشی بگیرد، به عنوان مثال در مدل اتصال مستقیم شاهد کاهش سرعت ماشین می‌باشیم و همین مسئله سبب شده تا حجم ماشین افزایش یابد و در برخی از کاربردها به دلیل افزایش بیش از حد حجم ماشین مجدداً از روش اتصال غیرمستقیم استفاده نمایند.

چگالی گشتاور و حجم ماشین

چگالی گشتاور و حجم ماشین‌های اتصال مستقیم، بزرگترین چالش پیش روی مهندسین می‌باشد که در ادامه به بررسی دلایل وجودی آن پرداخته می‌شود؛

در راستای افزایش بازده اگر گیربکس‌های مکانیکی متداول حذف شوند و از یک ماشین اتصال مستقیم استفاده شود باید چگالی گشتاور بالایی تولید گردد تا بتواند با استفاده از اتصال مستقیم پاسخگوی بار مربوطه باشد، این مسئله تحت عنوان گشتاور گریز مطرح می‌گردد و قاعدتاً برای هر ماشین متفاوت می‌باشد. طبق رابطه بنیادی $(HP = T \cdot RPM / 5252)$ با در نظر گرفتن یک موتور توان ثابت، با افزایش گشتاور شاهد کاهش سرعت خواهیم بود و با توجه به رابطه (1-1) حجم ماشین با قطر و طول ماشین رابطه مستقیم دارد، این رابطه را اگر با رابطه (2-1) ادغام نماییم رابطه سرعت با حجم ماشین مشخص می‌شود که در رابطه (3-1) مشخص شده است [2]

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 L \quad (1-1)$$

$$Q = C_0 D^2 L n_s \quad (2-1)$$

$$V = \frac{\pi}{4} \frac{Q}{C_0 n_s} \quad (3-1)$$

مشاهده می‌شود هرچه سرعت ماشین افزایش بیابد حجم ماشین کاهش خواهد یافت، C_0 نیز در رابطه (1-4) مشخص شده است.

$$C_0 = 1.11 \pi^2 B_{ave} \cdot ac \cdot k_w \quad (4-1)$$

گاهی این افزایش حجم به گونه‌ای می‌باشد که عملاً امکان استفاده از ماشین مذکور سلب شده و به ناچار از همان ماشین‌های معمولی اتصال غیرمستقیم که بازده نسبتاً خوبی نیز ندارند، استفاده می‌شود. چراکه

¹ Direct Drive

با توجه به مکان مدنظر و ابعاد آن امکان قرار دادن ماشین مذکور فراهم نمی‌گردد. این مسئله در نیروگاه های بادی بسیار حائز اهمیت می باشد.

1-2- چگالی گشتاور و سرعت بالا

با استفاده از ماشین ورنیر در کنار بهره گیری از تکنولوژی اتصال مستقیم می‌توان مشکل سرعت پایین که منجر به افزایش حجم ماشین می‌گردد را مرتفع کرد. ماشین ورنیر با استفاده از یک گیربکس مغناطیسی¹ داخلی با وجود اینکه سرعت بار همچنان پایین می‌باشد ولی سرعت میدان گردان مغناطیسی ماشین را به صورت مجازی و به دلیل استفاده از گیربکس مغناطیسی که حاصله ساختار متفاوت این ماشین می‌باشد (در فصل دوم مفصل بررسی خواهد شد)، افزایش می‌دهد. بدین ترتیب با وجود اینکه چگالی گشتاور ماشین بالا می‌باشد سرعت ماشین در معادله (1-5) نیز با توجه به نسبت گیربکس مغناطیسی بالاتر از ماشین‌های متداول غیر مستقیم می‌باشد. در نهایت ماشین ورنیر توانسته است در عین حال که یک ماشین اتصال مستقیم می‌باشد از حجم بسیار کمتری نیز برخوردار شود.



1-3- اصول ماشین ورنیر آهنربای دائم

اصول عملکرد ماشین ورنیر آهنربای دائم (نوعی که در آن روتور از آهنربای دائم می‌باشد) بر پایه اثر متقابل میدان جریان آرمیچر ایجاد شده توسط استاتور و میدان آهنرباهای دائم ایجاد شده توسط روتور می‌باشد. این ماشین عموماً دارای سیم پیچی سه فاز توزیع شده است و توسط یک منبع سه فاز راه اندازی می‌گردد.

با فرض یک ماشین ورنیر که در آن 6 دندانه استاتور، 5 جفت قطب آهنربای دائم در روتور و یک جفت قطب سیم پیچی آرمیچر وجود داشته باشد [3]. پنجمین هارمونیک میدان مغناطیسی چرخشی توسط نیرو محرکه مغناطیسی سیم پیچی سه فاز آرمیچر و تغییرات پرمیانس فاصله‌ی هوایی تولید می‌شود. در این حالت روتور با پنجمین هارمونیک میدان مغناطیسی سنکرون شده و می‌چرخد. بنابراین، سرعت روتور تا یک پنجم سرعت میدان مغناطیسی چرخشی کاهش پیدا می‌کند و گشتاور نیز به همان نسبت افزایش می‌یابد. از این رو این ماشین مثل یک ماشین با گیربکس مغناطیسی کار می‌کند. بر همین اساس یک ماشین ورنیر آهنربای دائم می‌تواند عملکردی در سرعت‌های بسیار پایین ارائه دهد، که این امر با افزایش صحیح تعداد قطب‌های آهنربای دائم روتور مطابق رابطه‌ی (1-5) محقق می‌شود:

$$n_r = \left(\frac{f}{p}\right) \left(\frac{p}{Z_r}\right) = \left(\frac{f}{Z_r}\right) \quad (5-1)$$

به طوری که در رابطه‌ی (1-5)، n_r سرعت سنکرون بر حسب rev/s، Z_r تعداد قطب های رتور و f فرکانس منبع بر حسب Hz می باشد.

¹ Magnetic gearbox

برای توضیحات تکمیلی در مورد تحلیل گشتاور ماشین‌های ورنیر آهنربای دائم به مرجع [4] مراجعه شود. برای نشان دادن چگونگی تولید گشتاور پایدار دلخواه فرض‌های زیر در نظر گرفته می‌شود: [4]

- نفوذپذیری نسبی هسته‌ی آهنی بینهایت در نظر گرفته شود.
- نفوذپذیری نسبی آهنربای دائمی برابر نفوذپذیری نسبی هوا در نظر گرفته می‌شود، به طوری که آهنرباهای دائمی همانند فاصله هوایی مجازی در نظر گرفته شوند.
- تغییرات نیرو محرکه‌ی مغناطیسی، پرمیانس و چگالی شار تنها در طول محیط متفاوت در نظر گرفته شوند و در جهت شعاعی و محوری یکسان فرض شوند.

فرض می‌شود سیم پیچی آرمیچر استاتور توسط جریان سه فاز متعادلی مانند رابطه (6-1) بیان شود:

$$\begin{cases} I_a = \sqrt{2}I \cos(\omega t - \alpha) \\ I_b = \sqrt{2}I \cos(\omega t - \alpha - \frac{2\pi}{3}) \\ I_c = \sqrt{2}I \cos(\omega t - \alpha - \frac{4\pi}{3}) \end{cases} \quad (6-1)$$

به طوری که در رابطه‌ی (6-1)، I جریان هر فاز، ω سرعت زاویه‌ای و α زاویه فاز دلخواه است. در این صورت نیرو محرکه‌ی مغناطیسی تولید شده‌ی متناظر با جریان آرمیچر در فاصله هوایی، می‌تواند مطابق رابطه‌ی (7-1) مدل شود:

(7-1)

$$F_a(\theta_s, t) = \frac{3F_{a1}}{2} \left[\sum_{n=1,7,13,\dots} \frac{k_{dn}k_{pn}}{n} \cos(np\theta_s - (\omega t - \alpha)) + \sum_{n=5,11,17,\dots} \frac{k_{dn}k_{pn}}{n} \cos(np\theta_s + (\omega t - \alpha)) \right]$$

در رابطه‌ی (7-1)، n شماره هارمونیک، θ_s زاویه استاتور نسبت به بردار جریان فاز A ، k_{pn} و k_{dn} به‌ترتیب به n امین عامل هارمونیک توزیع و ضریب گام کلاف اشاره دارند. همچنین F_{a1} جزء اصلی نیرو محرکه مغناطیسی جریان آرمیچر است که طبق رابطه‌ی (8-1) به دست می‌آید:

$$F_{a1} = \frac{2\sqrt{2}N_{ph}I}{\pi p} \quad (8-1)$$

در رابطه‌ی (8-1)، پارامتر N_{ph} تعداد دور سیم پیچی آرمیچر برای هر فاز است. همچنین می‌توان پارامترهای k_{pn} و k_{dn} را به‌ترتیب از روابط (9-1) و (10-1) به دست آورد:

$$K_{dn} = \frac{\sin(n\pi/6)}{q \sin(n\pi/6q)} \quad (9-1)$$

$$K_{pn} = \sin(n\pi\xi/2) \quad (10-1)$$

در رابطه‌ی (9-1)، q تعداد شیارهای زیر هر قطب برای هر فاز استاتور و ξ نسبت گام سیم پیچی به گام قطب می باشد. نیرو محرکه مغناطیسی آهنربای دائم تولید شده در روتور برای حالتی که ماشین متوقف است از رابطه‌ی (11-1) به دست می آید:

$$(11-1)$$

$$F_{PM}(\theta_s) = \sum_{n=odd}^{\infty} \frac{F_{PM1}}{n} \cos(nZ_r \theta_r) = \sum_{n=odd}^{\infty} \frac{F_{PM1}}{n} \cos(nZ_r(\theta_s - \theta_m))$$

بطوریکه θ_r زاویه روتور نسبت به مراکز آهنربای دائم و θ_m موقعیت مکانیکی روتور می باشد که برابر $(\theta_s - \theta_r)$ در نظر گرفته می شود. همچنین F_{PM1} نیز جزء اصلی نیرو محرکه مغناطیسی آهنربای دائم محسوب می شود. تاثیر شیار و دندانه‌های استاتور، سبب می شوند تا ضریب پرمیانس فاصله‌ی هوایی در جهت شعاعی به صورت رابطه‌ی (12-1) بیان شود: [5]

$$(12-1)$$

$$P(\theta_s) = P_0 + (-1)^\varepsilon \sum_{m=1}^{\infty} P_m \cos(mZ_s \theta_s)$$

در رابطه‌ی (12-1)، P_m دامنه ضریب پرمیانس در m امین هارمونیک و ε تعداد شیارهایی است که برای سیم پیچی با گام کسری استفاده شده است. بنابراین می توان چگالی شار فاصله هوایی B_{PM} را از ترکیب پارامترهای $F_{PM}(\theta_s)$ و $P(\theta_s)$ بدست آورد. با صرف نظر کردن از هارمونیک‌های مرتبه بالاتر، B_{PM} به شکل رابطه‌ی (13-1) نوشته می شود [4]:

$$(13-1)$$

$$\begin{aligned} B_{PM} &= [F_{PM1} \cos(Z_r(\theta_s - \theta_m))][P_0 + (-1)^\varepsilon P_1 \cos(Z_s \theta_s)] \\ &= (-1)^\varepsilon \frac{B_{PM1}}{2} \cos[(Z_r - Z_s)\theta_s + Z_r \theta_m] + B_{PM0} \cos(Z_r(\theta_s - \theta_m)) \end{aligned}$$

در رابطه (13-1)، پارامترهای B_{PM1} و B_{PM0} به ترتیب بصورت روابط (14-1) و (15-1) بیان می شوند:

$$B_{PM1} = F_{PM1}P_1 \quad (14-1)$$

$$B_{PM0} = F_{PM1}P_0 \quad (15-1)$$

از معادله (13-1) می‌توان دریافت که قسمت اول دارای تناوب مشابهی با جزء اصلی نیرو محرکه مغناطیسی جریان آرمیچر دارد و قسمت دوم دارای تناوب مشابهی با یکی از هارمونیک‌های شیار نیرو محرکه مغناطیسی جریان آرمیچر دارد. همچنین رابطه‌ی اساسی در ماشین‌های ورنیر وجود دارد که ارتباط بین دندانه‌های استاتور و جفت قطب‌های روی روتور را نشان می‌دهد [4] و بصورت رابطه (16-1) تعریف می‌شود:

$$Z_r - Z_s = \pm P \quad (16-1)$$

در این رابطه Z_r ، Z_s و P به‌ترتیب تعداد جفت قطب‌های روتور، تعداد دندانه‌های استاتور و تعداد جفت قطب ماشین می‌باشد. از روابط بیان شده می‌توان به این نتیجه رسید که جهت دوران عبارت اول و دوم در رابطه (13-1) یکی خواهد بود اگر Z_r برابر $Z_s + P$ باشد و جهت دوران عبارت اول و دوم در رابطه (13-1) در خلاف جهت هم خواهد بود اگر Z_r برابر $Z_s - P$ باشد.

عموماً جزء‌های هارمونیک‌های شیار مربوط به نیرو محرکه مغناطیسی جریان آرمیچر با مرتبه‌ی بالاتر، هم جهت با جزء اصلی هارمونیک می‌چرخند و بالعکس. بنابراین زمانی که جزء اصلی نیرو محرکه مغناطیس جریان آرمیچر، با عبارت اول چگالی شار فاصله‌هویی آهنربای دائم سنکرون باشد، آنگاه عبارت دوم چگالی شار فاصله‌هویی آهنرباهای دائم، با هارمونیک متناظر هارمونیک‌های شیار نیروی محرکه مغناطیسی جریان آرمیچر، سنکرون خواهد بود. بنابراین نتیجه‌ی اثر متقابل این دو هارمونیک بالا، یک گشتاور پایدار است. بر همین اساس با در نظر گرفتن تنها هارمونیک‌های اصلی و شیار نیروی محرکه مغناطیسی جریان آرمیچر، می‌توان رابطه‌ی (7-1) را به صورت رابطه‌ی (17-1) بازنویسی کرد:

$$(17-1)$$

$$F_a = \frac{3k_{d1}k_{p1}F_{a1}}{2} \left[\cos(p\theta_s - (\omega t - \alpha)) + \frac{(-1)^\varepsilon}{\frac{Z_s}{p} - 1} \cos((Z_s - p)\theta_s + (\omega t - \alpha)) \right. \\ \left. + \frac{(-1)^{\varepsilon-1}}{\frac{Z_s}{p} + 1} \cos((Z_s + p)\theta_s - (\omega t - \alpha)) \right]$$

با فرض این که تمام انرژی میدان در فاصله هوایی و آهنرباهای دائم (همانطور که گفته شد می توان آن‌ها را به عنوان فاصله هوایی مجازی در نظر گرفت) ذخیره می شود، گشتاور توسعه یافته می تواند به شکل رابطه‌ی (18-1) بیان شود [4]:

(18-1)

$$T = \frac{p\tau L_{stk}}{\pi} \int_0^{2\pi} \left\{ \frac{\partial}{\partial \theta_m} \left(\frac{1}{2} BF \right) \right\} d\theta_s = \frac{p\tau L_{stk}}{\pi} \int_0^{2\pi} P(F_a + F_{PM}) \frac{\partial F_{PM}}{\partial \theta_m} d\theta_s$$

در رابطه‌ی (18-1)، پارامتر τ گام قطب سیم پیچی آرمیچر و L_{stk} طول موثر هسته‌ی آهنی است. با جایگذاری روابط (8-1) تا (17-1) در معادله‌ی (18-1) می تون گشتاور توسعه یافته را به صورت رابطه‌ی (19-1) بیان کرد:

(19-1)

$$T = \frac{3}{2} p\tau L_{stk} Z_r k_{d1} k_{p1} F_{a1} \left(\frac{B_{PM1}}{2} \mp \frac{B_{PM0}}{\frac{Z_r}{P}} \right) \sin((\omega t - \alpha) \mp Z_r \theta_m)$$

همانطور که مشاهده می شود در رابطه‌ی (19-1) علامت‌ها با رابطه‌ی (16-1) مطابقت دارند. می توان مشاهده کرد زمانی که Z_r برابر $Z_s - P$ باشد گشتاور افزایش می یابد و زمانی که Z_r برابر $Z_s + P$ باشد گشتاور کاهش می یابد. همچنین از معادله‌های (18-1) و (19-1) می توان دریافت که گشتاور هارمونیک تاثیر بیشتری از گشتاور اصلی دارد [7-6]. واضح است که گشتاور پایدار با قرار دادن فرکانس جریان آرمیچر در رابطه (19-1) بدست می آید. همچنین فرکانس جریان آرمیچر را می توان به صورت رابطه (20-1) بیان کرد.

$$\omega = \pm Z_r \omega_m \quad (20-1)$$

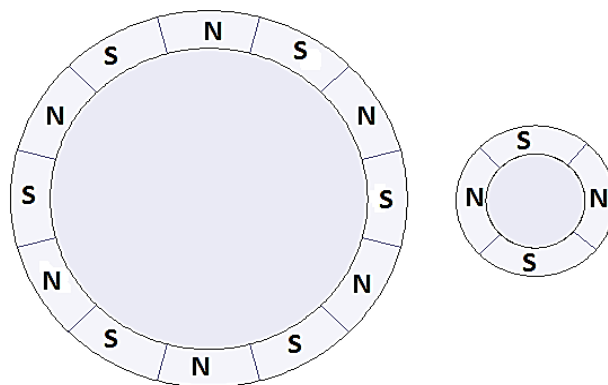
در رابطه‌ی (20-1) نیز علامت‌ها با رابطه‌ی (16-1) هم خوانی دارند. همچنین در این رابطه $\omega_m = \frac{\theta_m}{t}$ ، سرعت زاویه‌ای چرخش روتور است. با جایگذاری (8-1) و (20-1) در معادله (19-1) و با فرض $\alpha = \pm \frac{\pi}{2}$ ، ماکزیمم گشتاور پایدار (T_m) از رابطه‌ی (21-1) به دست می آید:

$$T_m = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \tau L_{stk} Z_r k_{d1} k_{p1} N_{ph} I \left(\frac{B_{PM1}}{2} \mp \frac{B_{PM0}}{\frac{Z_r}{P}} \right) \quad (21-1)$$

در ادامه به صورت تخصصی‌تر به بحث موتور ورنیر پرداخته می شود.

فصل دوم: موتور ورنیر

ماشین ورنیر بدلیل دارا بودن توانایی ذاتی تولید گشتاور بالا در سرعت‌های پایین بخوبی شناخته شده است. در حالی که برای اجتناب از افزایش تعداد جفت قطب‌های سیم‌پیچی آرمیچر به منظور بهبود چگالی توان، از آهنرباهای دائمی‌سطحی به عنوان تامین کننده‌ی تحریک در ماشین رلوکتانسی ورنیر استفاده شده است. بدین ترتیب ماشین ورنیر رلوکتانسی به ماشین ورنیر آهنربای دائم¹ تبدیل می‌شود. اساس کار ماشین‌های ورنیر بر پایه‌ی استفاده از گیربکس مغناطیسی می‌باشد. بر همین اساس ابتدا به شرح مختصری از گیربکس‌های مغناطیسی پرداخته می‌شود. گیربکس مغناطیسی از روی گیربکس مکانیکی تقلید شده است به طوری که سطح هر دو چرخ دنده توسط آهنربای دائم پوشیده شده است. شکل 1-2 یک نوع گیربکس مغناطیسی را نشان می‌دهد.

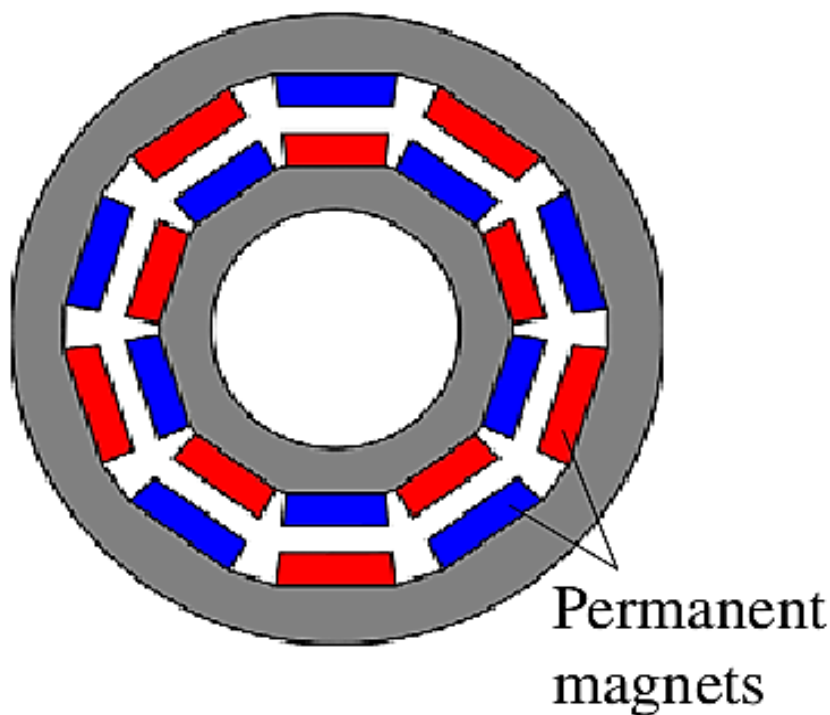


شکل 1-2: یک نوع گیربکس مغناطیسی [31]

در این حالت مزیت نصب آهنربای دائم برای تولید گشتاور بالا، کم می‌باشد. بر همین اساس از توپولوژی اتصال مغناطیسی هم محور² استفاده می‌شود. اتصال مغناطیسی هم محور در شکل 2-2 نشان داده شده است.

¹ Vernier Permanent Magnet Machine

² - Coaxial Magnetic Coupler



شکل 2-2: اتصال مغناطیسی هم محور [31]

جهت کارایی بهتر اتصال مغناطیسی هم محور، از گیربکس مغناطیسی هم محور¹ استفاده می‌شود. اولین بار مفهوم گیربکس مغناطیسی هم محور توسط K Atallah در سال 2001 میلادی ارائه شده است [31].

شکل 2-3، یک گیربکس مغناطیسی هم محور را نشان می‌دهد که شامل سه قسمت اصلی می‌باشد:

روتور درونی²

حلقه مدولاسیون³

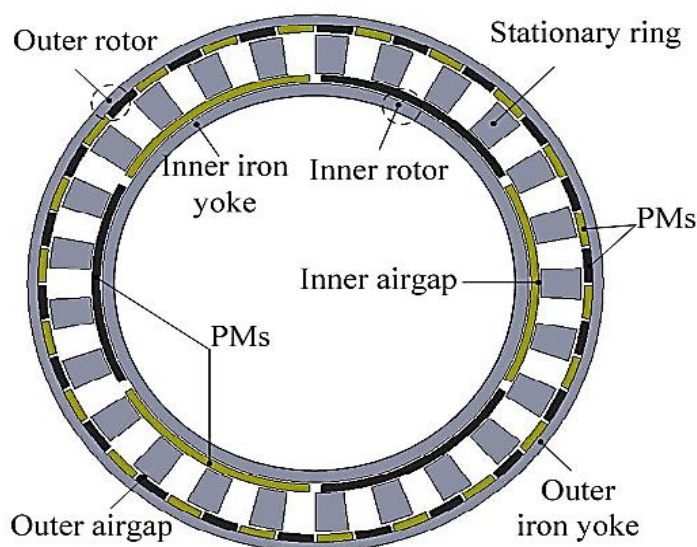
روتور بیرونی⁴

¹ - Coaxial Magnetic Gear

² - Inner Rotor

³ - Modulation Ring

⁴ - Outer Rotor



شکل 2-3: گیربکس مغناطیسی هم محور [32]

حلقه مدولاسیون شامل چندین قسمت فرومغناطیس متقارن توزیع شده می‌باشد که به صورت فشرده و ثابت بین دو روتور قرار دارد. سطح روتور درونی و روتور بیرونی با آهنربای دائم پوشیده شده است. هنگامی که یکی از روتورها، توسط نیروی خارجی به حرکت در می‌آید، حلقه مدولاسیون، روتور دیگر را بر اساس قوانین خاص خود در خلاف جهت به چرخش در می‌آورد [32].

گیربکس مغناطیسی هم محور با به کار بردن حلقه مدولاسیون جهت مدولاسیون میدان مغناطیسی تحریک، قابل اعتماد است و می‌تواند علاوه بر تولید گشتاور ثابت و بالا، موجب افزایش بازدهی، قابلیت اطمینان بالا، حذف نویز، لرزش پایین و نگهداری کم گردد و همچنین در کاهش وزن و حجم ماشین به دلیل پیاده سازی امکان استفاده از اتصال مستقیم موثر باشد.

مفهوم اتصال مستقیم در ماشین‌های الکتریکی بدین معنی است که قسمت مکانیکی ماشین به طور مستقیم به بار مکانیکی متصل شود که این عمل نیازمند گشتاور بالا در سرعت‌های پایین می‌باشد. این دو مشخصه متفاوت و توأم توسط گیربکس مغناطیسی هم محور ارائه می‌شود که موجب حذف گیربکس مکانیکی و کاهش تعداد

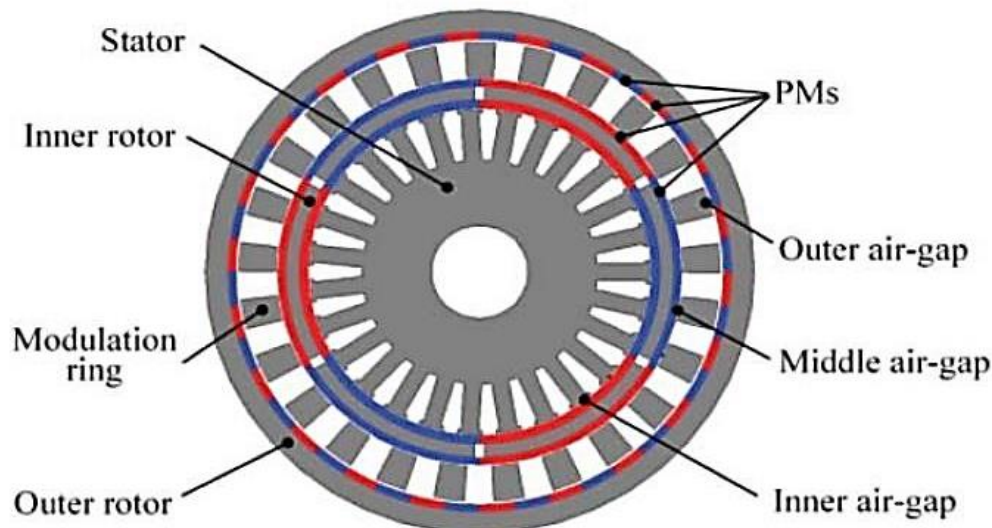
قطب ماشین‌های الکتریکی می‌شود.

از طرفی ماشین دنده مغناطیسی¹ (MG) ترکیبی صنعتی از یک گیربکس مغناطیسی هم محور و یک ماشین آهنربای دائم بدون جاروبک است که می‌تواند به طور همزمان سرعت پایین را برای کاربردهای درایو مستقیم و سرعت بالا، در طراحی ماشین فراهم کند. به طور طبیعی، یک ماشین آهنربای دائم بدون جاروبک روتور بیرونی می‌تواند با یک گیربکس مغناطیسی هم محور ترکیب شود و یک روتور به اشتراک بگذارند (یعنی روتور درونی گیربکس مغناطیسی و روتور بیرونی ماشین آهنربای دائم بدون جاروبک) و تبدیل به یک ماشین دنده مغناطیسی شوند.

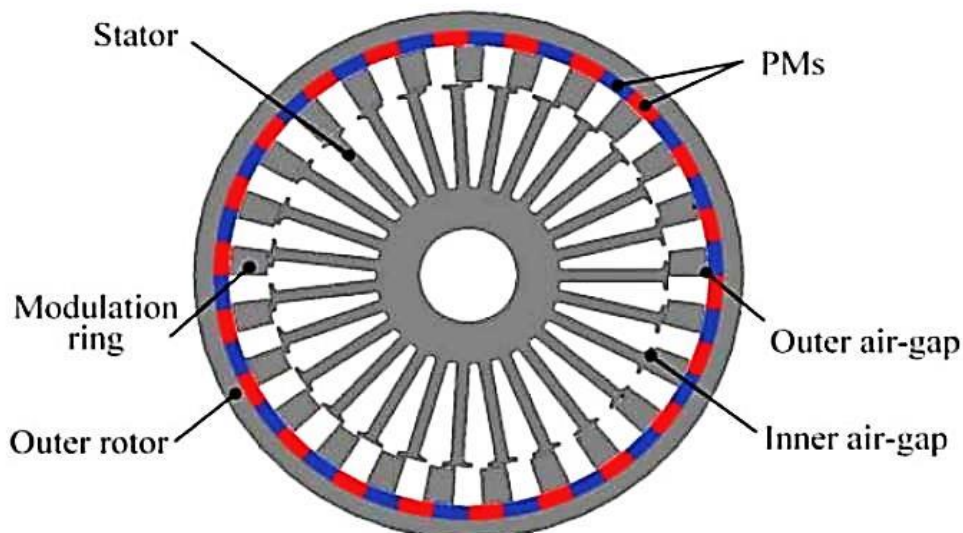
همانطور که در شکل 2-4 نشان داده شده است این توپولوژی شامل سه فاصله‌ی هوایی و دو روتور می‌باشد که تنظیم و دقت مورد نیاز مربوط به آن بسیار پیچیده و دشوار است. می‌توان به جای استفاده از

¹ - Magnetic-Geared Machine

روتور بیرونی ماشین آهنربای دائم بدون جاروبک، به عنوان ورودی فیزیکی دنده مغناطیسی هم محور، از میدان دوار سرعت بالای ناشی از سیم‌پیچی آرمیچر استاتور به طور مستقیم استفاده کرد. در نتیجه ماشین دنده مغناطیسی شامل تنها دو فاصله‌ی هوایی می‌باشد که در شکل 2-5 نشان داده شده است. در این صورت یک آرمیچر ثابت به جای روتور درونی سرعت بالا در دنده مغناطیسی هم محور استفاده شده است. از این رو باعث کاهش اندازه و وزن کلی آن می‌شود. چون استاتور ثابت می‌باشد، دیگر نیازی به استفاده از یک فاصله‌ی هوایی برای جدا کردن آرمیچر ثابت و حلقه مدولاسیون ثابت وجود ندارد [33].



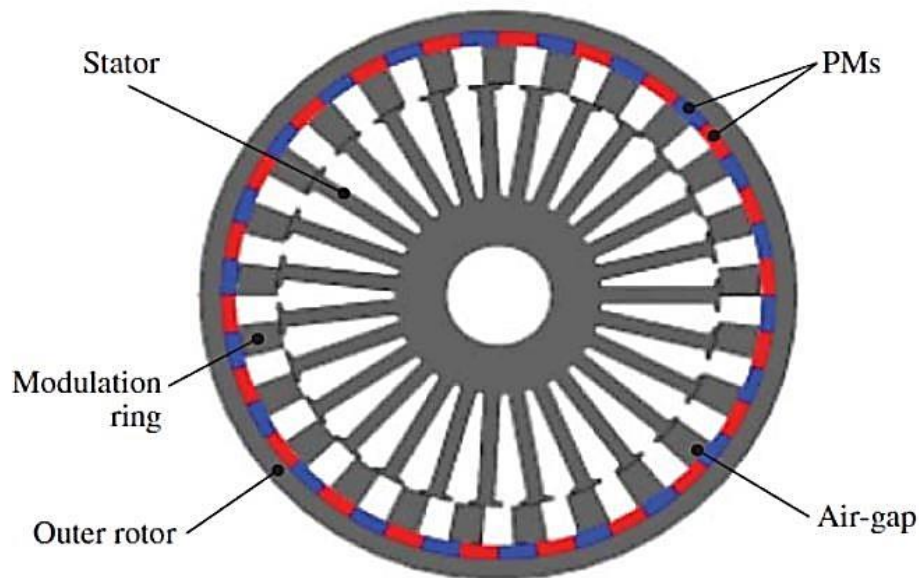
شکل 2-4: ماشین دنده مغناطیسی با سه شکاف هوایی [33]



شکل 2-5: ماشین دنده مغناطیسی با دو شکاف هوایی [33]

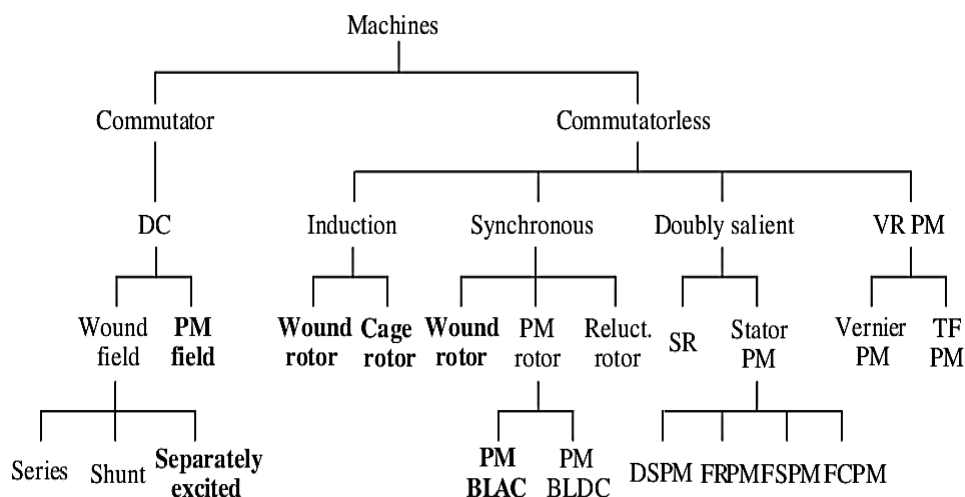
بنابراین برداشتن این فاصله‌ی هوایی منجر به ماشین دنده مغناطیسی شامل تنها یک شکاف هوایی می‌شود که در شکل 2-6 نشان داده شده است. هنگامی که تعداد بخش‌های فرومغناطیسی در حلقه مدولاسیون مضرب صحیحی از تعداد دندان‌های استاتور باشد، آنگاه ماشین دنده مغناطیسی با یک فاصله‌ی هوایی

تبدیل به یک ماشین ورنیر آهنربای دائم می‌شود که تمام آهنرباهای دائم سطحی واقع در روتور را شامل می‌شود [34-35].



شکل 2-6: ماشین دنده مغناطیسی با یک شکاف هوایی [34]

در تقسیم بندی ماشین‌های الکتریکی، ماشین ورنیر آهنربای دائم زیر مجموعه ماشین‌های بدون کموتاتور با آهنربای دائم محسوب می‌شود [36]. شکل 2-7 نمودار دسته بندی کلی ماشین‌های الکتریکی را نشان می‌دهد.



شکل 2-7: نمودار دسته بندی کلی ماشین‌های الکتریکی [36]

این ماشین را می‌توان در کلاس ماشین‌های آهنربای دائم بدون جاروبک¹ دسته بندی کرد و برای کاربردهای با درایو مستقیم استفاده نمود.

ساختار ورنیر، یکی از ساختارهای طراحی شده برای ماشین‌های الکتریکی و توربین‌های بادی می‌باشد. در این ساختار از مفهوم وسیله اندازه‌گیری ورنیر استفاده شده است. وسیله‌اندازه گیری ورنیر توسط پیر

¹ - Brushless Permanent-Magnet (BPM) Machine

ورنیر در سال 1631 میلادی مطرح شد که با دو مقیاس، یکی مقیاس اصلی و دیگری مقیاس مدرج مخصوص به کار رفته است. توسط مقیاس مدرج مخصوص، توانایی خواندن کسری از مقیاس اصلی وجود دارد [36].

1-2- طراحی موتور ورنیر

دلیل استفاده از ساختار ماشین ورنیر بخاطر اثر دنده مغناطیسی آن می‌باشد که سبب می‌شود تا در سرعت‌های پایین، گشتاور (توان) بالایی در موتور به وجود بیاید. رابطه‌ی اساسی که بین دندانه‌های استاتور و جفت قطب‌های روی روتور وجود دارد، بصورت رابطه‌ی (2-1) تعریف می‌شود:

$$Z_r - Z_s = \pm P \quad (1-2)$$

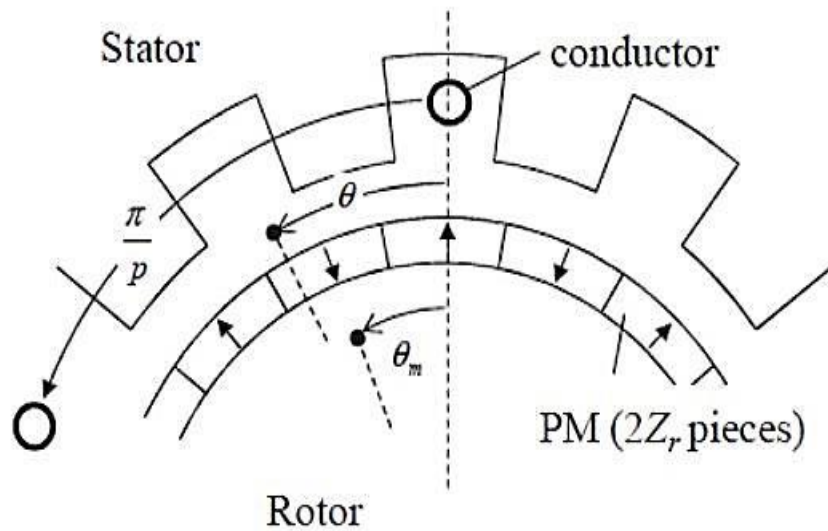
در این رابطه Z_r ، Z_s و P به ترتیب تعداد جفت قطب‌های روتور، تعداد دندانه‌های استاتور و تعداد جفت قطب ماشین می‌باشد. با توجه به ساختار روتور ورنیر و قرار گرفتن آهنرباها در کنار هم مانند شکل 2-8 و صرف نظر کردن از هارمونیک‌های MMF در فاصله‌ی هوایی، می‌توان MMF را به صورت رابطه‌ی تقریبی (2-2) بیان کرد [8]:

$$F_{PM} \approx F_{PM1} \cos(Z_r(\theta - \theta_m)) \quad (2-2)$$

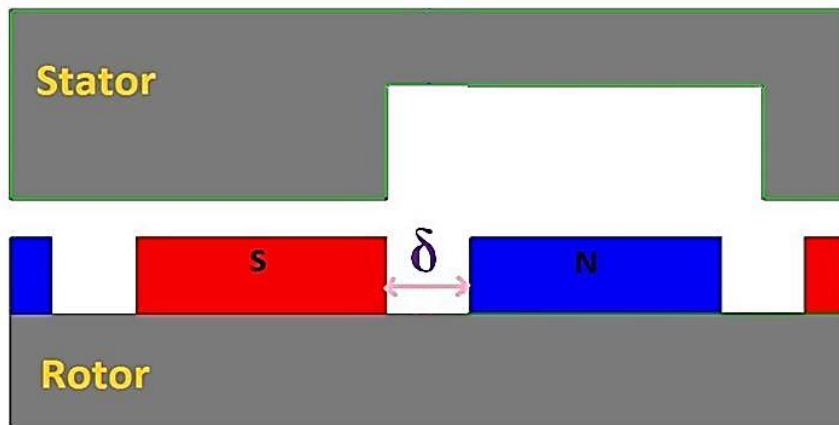
در این رابطه θ زاویه‌ی مکانیکی استاتور، θ_m زاویه‌ی موقعیت روتور و F_{PM1} دامنه‌ی هارمونیک اصلی MMF ناشی از آهنربای دائم می‌باشد که به صورت رابطه‌ی (2-3) تعریف می‌شود:

$$F_{PM1} = \frac{2}{\pi} \int_{\frac{\delta}{2}}^{\pi - \frac{\delta}{2}} F_{PM} \sin \theta d\theta = \frac{4B_r g_m}{\pi \mu_m} \cos(\delta / 2) \quad (3-2)$$

بطوریکه در این رابطه، B_r چگالی شار پسماند آهنربای دائم و g_m اندازه‌ی ارتفاع آهنربا و μ_m نفوذپذیری مغناطیسی در آهنربا می‌باشد. همچنین همانطور که در شکل 2-9 نشان داده شده است δ فاصله‌ی بین دو آهنربا می‌باشد. استفاده از فاصله بین آهنرباها سبب می‌شود تا شار نشتی و مصرف آهنربا کاهش پیدا کند.



شکل 2-8: رابطه‌ی بین زاویه‌ی چرخش روتور و زاویه‌ی الکتریکی استاتور [1]



شکل 2-9: ارتباط بین اندازه‌ی آهنربا و اندازه‌ی دندانه‌ی استاتور

با توجه به شکل دندانه‌های استاتور می‌توان پرمیانس فاصله‌ی هوایی بین استاتور و روتور را با در نظر گرفتن هارمونیک‌های صفرو یکم بصورت رابطه‌ی (2-4) تقریب زد:

$$P(\theta) \approx P_0 - P_1 \cos(Z_s \theta) \quad (4-2)$$

در این رابطه P_0 مقدار متوسط پرمیانس و P_1 دامنه‌ی هارمونیک اصلی تغییرات اندازه‌ی پرمیانس در فاصله‌ی هوایی را نشان می‌دهد. با توجه به داشتن رابطه‌ی MMF و پرمیانس در واحد سطح فاصله‌ی هوایی، می‌توان چگالی شار فاصله‌ی هوایی را بصورت رابطه‌ی تقریبی (2-5) تعریف کرد:

$$B(\theta, \theta_m) = F_{PM}(\theta, \theta_m) P(\theta) \quad (5-2)$$

$$B(\theta, \theta_m) = B_{PM0} \cos(Z_r(\theta - \theta_m)) - \frac{B_{PM1}}{2} (\cos((Z_r - Z_s)\theta - Z_r\theta_m) + \cos(((Z_r + Z_s)\theta - Z_r\theta_m))) \quad (6-2)$$

بطوری که پارامترهای B_{PM0} و B_{PM1} بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$B_{PM0} = F_{PM1} P_0 \quad (7-2)$$

$$B_{PM1} = F_{PM1} P_1 \quad (8-2)$$

با استفاده از رابطه‌ی چگالی شار فاصله‌ی هوایی می‌توان شار پیوندی یک فاز را بصورت رابطه‌ی (2-9) تعریف کرد:

$$\lambda_{ph}(\theta_m) = \frac{N_{ph} r_g L_{stk}}{q} \sum_{k=0}^{q-1} \int_{\theta_i + k\alpha_\tau}^{\theta_i + k\alpha_\tau + \frac{\pi}{p}} B(\theta, \theta_m) d\theta \quad (9-2)$$

همچنین گام شیار استاتور عبارت است از:

$$\alpha_\tau = \frac{2\pi}{Z_s} \quad (10-2)$$

در رابطه‌ی (9-2)، N_{ph} ، L_{stk} و r_g به ترتیب تعداد دور سیم‌پیچی هر فاز (به صورت سری)، طول موثر ماشین و متوسط شعاع فاصله‌ی هوایی بین استاتور و روتور بیرونی می‌باشد. همچنین q تعداد شیارهای هر فاز زیر هر قطب می‌باشد. در رابطه‌ی (9-2) موقعیت اولیه‌ی سیم‌پیچی هر فاز با θ_i مشخص می‌شود. با جایگزین کردن رابطه‌ی (6-2) در رابطه‌ی (9-2)، رابطه‌ی (11-2) بدست می‌آید [8].

(11-2)

$$\lambda_{ph}(\theta_m) = \frac{N_{ph} r_g L_{stk}}{q} \sum_{k=0}^{q-1} \left[\left(\frac{B_{PM0}}{Z_r} \sin(Z_r(\theta - \theta_m)) - \frac{B_{PM1}}{2} \left(\frac{\sin((Z_r - Z_s)\theta - Z_r\theta_m)}{Z_r - Z_s} + \frac{\sin((Z_r + Z_s)\theta - Z_r\theta_m)}{Z_r + Z_s} \right) \right) \right]_{\theta_i + k\alpha_\tau}^{\theta_i + k\alpha_\tau + \frac{\pi}{p}}$$

تمامی روابطی که تا این قسمت بیان شد بین ماشین ورنیر و ماشین سنکرون با روتور آهنربای دائم سطحی یکسان می‌باشد. در ماشین PMSM دو پارامتر Z_r و P دارای یک مقدار می‌باشند. در این صورت با توجه به ساده سازی رابطه‌ی (11-2)، رابطه‌ی (12-2) بدست می‌آید.

$$\lambda_{ph}(\theta_m) = \frac{2k_{1q} N_{ph} r_g L_{stk} B_{PM0}}{P} \sin(P\theta_m - P\theta_{ph}) \quad (12-2)$$

در رابطه‌ی (12-2)، پارامترهای θ_{ph} و k_{1q} به ترتیب موقعیت زاویه‌ی هر فاز استاتور و هارمونیک اصلی می‌باشند. بدلیل کوچک بودن دامنه‌ی هارمونیک‌های ناشی از دندانه‌های استاتور، از آن‌ها در رابطه (12-2) صرف نظر شده است. با توجه به داشتن رابطه‌ی (12-2) برای شار دور فاصله‌ی هوایی، می‌توان ولتاژ القاء شده در ساختار PMSM را به صورت رابطه‌ی (13-2) بیان کرد:

$$e_{ph}(t) = \frac{\partial \lambda}{\partial t} = \frac{\partial \lambda}{\partial \theta} \times \frac{\partial \theta}{\partial t} = \omega_m \frac{\partial \lambda}{\partial \theta} = k_{1q} N_{ph} D_g L_{stk} B_{PM0} \cos(P\theta_m - P\theta_{ph}) \quad (13-2)$$

در رابطه‌ی (13-2)، پارامتر D_g متوسط اندازه‌ی قطر فاصله‌ی هوایی بین استاتور و روتور می‌باشد. با توجه به اینکه در ساختار ماشین ورنیر از رابطه‌ی (1-2) استفاده می‌شود، آنگاه رابطه‌ی (12-2) به شکل رابطه‌ی (14-2) بیان می‌شود:

$$\lambda_{ph}(\theta_m) \approx 2k_{1q} N_{ph} r_g L_{stk} \left[\frac{B_{PM0}}{Z_r} \sin(Z_r \theta_m - Z_r \theta_{ph}) + \frac{B_{PM1}}{2P} \sin(Z_r \theta_m - P\theta_{ph}) \right] \quad (14-2)$$

با توجه به اینکه در رابطه‌ی (14-2)، از مولفه‌ی هارمونیک شماره‌ی $2Z_r + P$ به دلیل کوچک بودن دامنه‌ی آن صرف نظر شده، بنابراین از علامت تقریب در رابطه استفاده شده است.

حال می‌توان ولتاژ القایی در ساختار ورنیر را به صورت رابطه‌ی (15-2) بیان کرد:

$$e_{ph}(t) = \frac{\partial \lambda_{ph}(\theta_m)}{\partial t} = k_{1q} N_{ph} D_g L_{stk} \left(\frac{B_{PM0}}{Z_r} \mp \frac{B_{PM1}}{2P} \right) \frac{d}{dt} \sin(Z_r \theta_m \mp P\theta_{ph}) \quad (15-2)$$

$$e_{ph}(t) = k_{1q} N_{ph} D_g L_{stk} \omega_m \left[B_{PM0} \mp \frac{Z_r B_{PM1}}{2P} \right] \cos(Z_r \theta_m \mp P\theta_{ph}) \quad (16-2)$$

در این رابطه علامت مثبت برای حالت $Z_r - Z_s = -P$ و علامت منفی برای حالت $Z_r - Z_s = +P$ است. برای اینکه ولتاژ القایی افزایش پیدا کند در طراحی ساختار ماشین از رابطه‌ی $Z_r - Z_s = -P$ استفاده می‌شود. با آنالیز چگالی شار فاصله‌ی هوایی می‌توان دامنه‌ی B_{PM0} و B_{PM1} را بدست آورد. دامنه‌ی B_{PM1} نسبت به B_{PM0} خیلی کوچکتر است اما بدلیل تاثیر ضریبی که در آن ضرب می‌شود نمی‌توان از مقدار آن صرف نظر کرد. با توجه به مطالب فوق، ساختار ورنیر دارای دامنه‌ی ولتاژ بالاتری نسبت به ساختار PMSM می‌باشد. هرچه نسبت $\frac{Z_r}{2P}$ بزرگتر انتخاب شود دامنه‌ی ولتاژ خروجی ماشین نیز افزایش پیدا می‌کند، بنابراین بهتر است برای ساختار ورنیر از قطر بزرگ تری برای طراحی استفاده شود.

رابطه‌ی شماره‌ی (1-2) را می‌توان بصورت رابطه‌ی (17-2) نیز بیان کرد:

$$Z_r = Z_s - P = 6Pq - P \quad (17-2)$$

در این صورت با ترکیب دو رابطه‌ی (16-2) و (17-2) دامنه‌ی موثر ولتاژ القاء شده در سیم‌پیچی استاتور از رابطه‌ی (18-2) بدست می‌آید:

$$E_{ph} = \frac{1}{\sqrt{2}} k_{1q} N_{ph} D_g L_{stk} \omega_m (F_{PM1} (P_0 + \frac{6q-1}{2} P_1)) \quad (18-2)$$

با استفاده از رابطه‌ی (12-2) می‌توان دامنه‌ی موثر ولتاژ القائی در ماشین PMSM را بصورت رابطه‌ی (19-2) بیان نمود:

$$E_{ph} = \frac{1}{\sqrt{2}} k_{1q} N_{ph} D_g L_{stk} \omega_m (F_{PM1} P_0) \quad (19-2)$$

برای ساده سازی بیشتر می‌توان ثابت‌های رابطه‌ی پرمیانس را با استفاده از روش Conformal Mapping (نگاشت همدیس) و ضریب کارتر بدست آورد [9]:

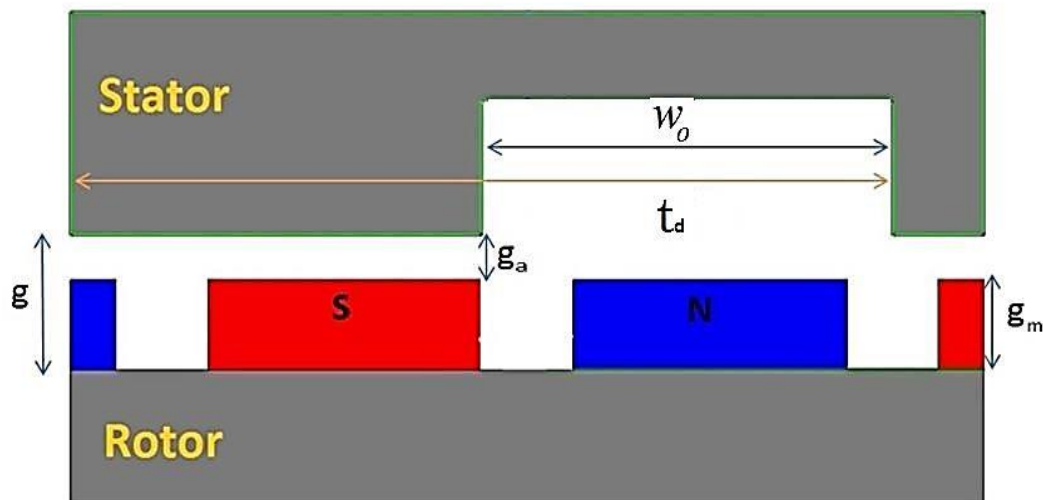
$$P_0 = \frac{\mu_0}{g} (1 - 1.6\beta c_0) \quad (20-2)$$

$$P_1 = \frac{2\mu_0\beta}{g\pi} \left(\frac{0.78125}{0.78125 - 2c_0^2} \right) \sin(1.6\pi c_0) \quad (21-2)$$

با توجه به شکل 10-2 و رابطه‌ی (20-2)، c_0 برابر است با نسبت دهانه‌ی شیار به گام شیار $\frac{w_o}{t_d}$ و همچنین پارامتر g برابر است با $g = g_a + g_m$ که g_a و g_m به ترتیب ارتفاع آهنربا و فاصله‌ی هوایی بین روتور و استاتور می‌باشد.

با توجه به شکل 10-2 می‌توان گام شیار t_d را برابر $\frac{\pi D_g}{Z_s}$ در نظر گرفت، در این صورت اندازه‌ی دهانه‌ی شیار w_o از رابطه‌ی (22-2) بدست می‌آید:

$$w_o = \frac{c_0 \pi D_g}{Z_s} = \frac{c_0 \pi D_g}{6qP} \quad (22-2)$$



شکل 2-10: ارتباط بین دهانه‌ی شیار و گام شیار

ضریب کارتر β نیز تابعی غیر خطی بر حسب $\frac{w_o}{g}$ است که در شکل 2-11 نشان داده شده است و از رابطه‌ی (2-23) بدست می‌آید [9]:

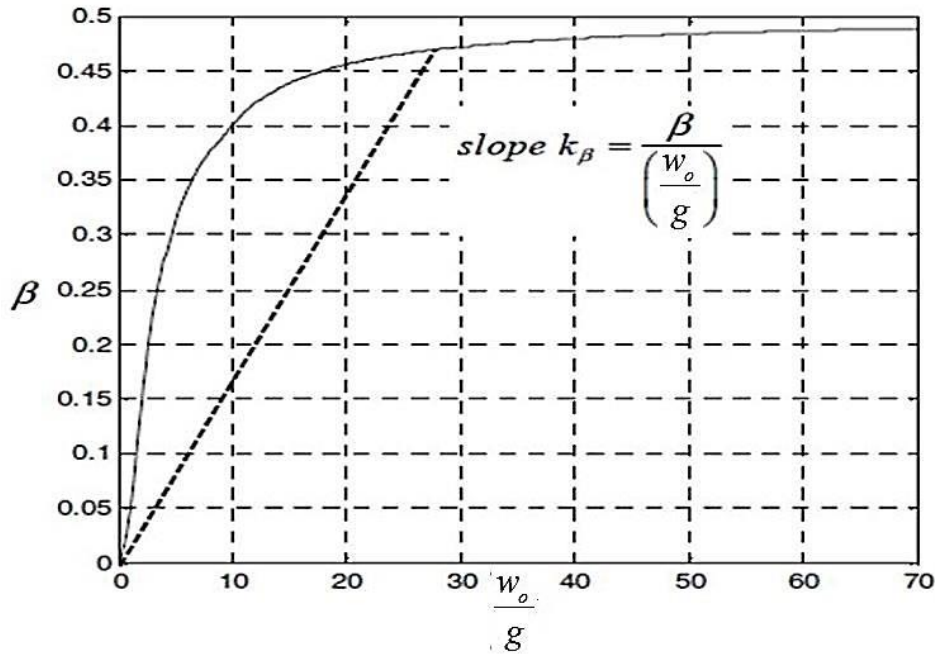
$$\beta = \frac{1}{2} \left[1 - \left[1 + \left(\frac{w_o}{2g} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \right] \quad (23-2)$$

البته می‌توان با یک تقریب مناسب ضریب کارتر را بصورت رابطه‌ی (2-24) نیز بیان کرد [8]:

$$\beta = k_\beta \frac{w_o}{g} = k_\beta \frac{c_0 \pi D_g}{6qPg} \quad (24-2)$$

در رابطه‌ی (2-24)، منحنی غیر خطی β ، با شیب k_β تقریب زده شده است تا روابط ساده‌تر شوند.





شکل 2-11: ارتباط بین ضریب کارتر β و $\frac{w_o}{g}$ [8]

با توجه به ساده سازی‌های انجام شده می‌توان روابط (2-18) و (2-19) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

(25-2)

$$E_{ph(PMVM)} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi\mu_r} B_r k_{1q} N_{ph} D_g L_{stk} \omega_m \frac{g_m}{g} (k_{conv} + k_{add})$$

(26-2)

$$E_{ph(PMSM)} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi\mu_r} B_r k_{1q} N_{ph} D_g L_{stk} \omega_m \frac{g_m}{g} k_{conv}$$

$$k_{conv} = 1 - 1.6k_\beta \frac{\pi D_g}{6qPg} c_0^2 \quad (27-2)$$

(28-2)

$$k_{add} = k_\beta \frac{c_0 \pi D_g}{Pg} \left(1 - \frac{1}{6q}\right) \left(\frac{0.78125}{0.78125 - 2c_0^2}\right) \sin(1.6\pi c_0)$$

با بررسی پارامتر c_0 در روابط بالا می‌توان به این نتیجه رسید که دامنه‌ی ضریب k_{conv} با افزایش مقدار c_0 کاهش پیدا می‌کند. از طرفی دامنه‌ی ضریب k_{add} با افزایش مقدار c_0 ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا می‌کند. برای بدست آوردن مقدار بهینه‌ی پارامتر c_0 برای داشتن بیشترین مقدار k_{add} ، می‌توان از رابطه‌ی (2-28) نسبت به پارامتر c_0 مشتق گرفت. معمولاً مقدار بهینه‌ی پارامتر c_0 در بازه‌ای بین 0/5 تا 0/6

است. با توجه به روابط (25-2) و (26-2)، نسبت ولتاژ القاء شده در ساختار ورنیر و ساختار PMSM برابر است با:

$$k_e = \frac{k_{PMVM}}{k_{PMSM}} = \frac{k_{conv} + k_{add}}{k_{conv}} \quad (29-2)$$

از این پارامتر در ادامه برای بررسی ضریب قدرت ساختار ورنیر استفاده می‌شود. حال می‌توان توان خروجی استاتور را با استفاده از رابطه‌ی (30-2) بدست آورد:

$$P_0 = 3I_{ph} E_{ph} = \frac{\sqrt{2}}{\mu_r} B_r k_{1q} k_s D_g^2 L_{stk} \omega_m \frac{g_m}{g} (k_{conv} + k_{add}) \quad (30-2)$$

اگر بارگذاری الکتریکی مخصوص بصورت رابطه‌ی (31-2) در نظر گرفته شود:

$$k_s = \frac{6N_{ph} I_{ph}}{\pi D_g} \quad (31-2)$$

آنگاه با ترکیب رابطه‌ی (30-2) و (31-2) می‌توان به رابطه‌ی (32-2) رسید:

$$P_0 = k_r V_g \omega_m \frac{g_m}{g} (k_{conv} + k_{add}) \quad (32-2)$$

$$k_r = 4\sqrt{2} \frac{k_{1q} k_s B_r}{\pi \mu_r} \quad (33-2)$$

تعداد دندانه‌های استاتور و تعداد جفت قطب‌های روی روتور از جمله مهمترین پارامترهایی هستند که در کاهش دامنه‌ی ریبیل گشتاور ورودی ساختار ورنیر تاثیر چشمگیری می‌گذارند. در ساختار ورنیر انتخاب بالای تعداد دندانه‌های استاتور سبب کاهش ضریب قدرت ماشین می‌شود که در ادامه به بررسی آن پرداخته می‌شود. معمولاً پارامتر q را برابر 2 یا 3 در نظر می‌گیرند تا هم دامنه‌ی ضریب k_{add} که رابطه‌ی مسقیمی با مقدار $(1 - \frac{1}{6q})$ دارد، بزرگ انتخاب شود و هم ضریب قدرت کاهش چشمگیری نداشته باشد [8].

همچنین در این ماشین، تعداد جفت قطب آهنربای دائم روی روتور به‌اندازه‌ی سرعت روتور N_m و فرکانس ماشین f بستگی دارد و از رابطه‌ی (34-2) بدست می‌آید:

$$Z_r = \frac{120f}{2N_m} \quad (34-2)$$

2)

همانطور که قبلا بیان شد دامنه‌ی B_{PM1} نسبت به B_{PM0} خیلی کوچک است. بنابراین برای اینکه تاثیر بیشتری در تولید توان ماشین داشته باشد نیاز است تا نسبت $\frac{Z_r}{2P}$ بزرگ انتخاب شود. اگر مقدار نسبت $\frac{Z_r}{2P}$ خیلی بزرگ انتخاب شود ولتاژ القاء شده در سیم‌پیچی استاتور افزایش پیدا کرده اما ضریب قدرت ماشین بشدت افت پیدا می‌کند. همچنین اگر مقدار نسبت $\frac{Z_r}{2P}$ کوچک انتخاب شود دامنه‌ی ولتاژ القائی سیم‌پیچی استاتور کاهش پیدا کرده اما ضریب قدرت افزایش پیدا می‌کند. بنابراین باید یک مصالحه‌ای بین ولتاژ القائی (گشتاور) و ضریب قدرت ماشین در نظر گرفت تا هم ضریب قدرت مقداری معقول داشته باشد و هم ولتاژ القائی خروجی ماشین، افت چشمگیری نداشته باشد.

با توجه به در نظر گرفتن تمامی شرایطی که برای انتخاب تعداد دندانه‌های استاتور و تعداد جفت قطب‌های روتور ذکر شد، باید این دو پارامتر طوری انتخاب شوند تا کوچکترین مضرب مشترک این دو پارامتر، عددی بزرگ شود. زیرا رپیل گشتاور با مقدار کوچکترین مضرب مشترک دو پارامتر تعداد دندانه‌های استاتور و تعداد قطب‌های روتور رابطه‌ای معکوس دارد. بنابراین هر چه این مضرب مشترک، بزرگتر انتخاب شود رپیل گشتاور کوچکتر شده و خروجی ماشین مطلوب‌تر خواهد شد [10-14].

حال با فرض انتخاب مناسب پارامترهای c_0 ، q و P می‌توان رابطه‌ی توان خروجی ماشین را بصورت رابطه‌ی (2-35) بازنویسی کرد تا با استفاده از این رابطه، به انتخاب مناسب پارامترهای دیگر ماشین پرداخته شود [8].

(35-2)

$$P_0 = k_r V_g \omega_m \frac{g_m}{g} (1 + k_o k_\beta \frac{D_g}{g})$$

(36-2)

$$k_o = c_0 \frac{\pi}{P} \left(1 - \frac{1}{6q}\right) \left(\frac{0.78125}{0.78125 - 2c_0^2}\right) \sin(1.6\pi c_0) - 1.6 \frac{\pi c_0^2}{6Pq}$$

با ثابت در نظر گرفتن پارامترهای c_0 ، q و P ، ضریب k_o مقداری ثابت خواهد داشت. بنابراین توان خروجی ماشین با قطر فاصله‌ی هوایی رابطه‌ی مستقیم و با اندازه‌ی فاصله‌ی هوایی رابطه‌ی معکوس دارد. هرچه قطر ماشین بزرگتر انتخاب شود و فاصله‌ی هوایی کوچکتر شود توان خروجی ماشین بالاتر می‌رود. البته انتخاب فاصله‌ی هوایی تحت تاثیر محدودیت‌های مکانیکی می‌باشد و نمی‌توان از یک مقدار مشخصی کوچکتر در نظر گرفت.

با توجه به اینکه فرکانس برق شبکه و فرکانس ولتاژ مورد استفاده‌ی وسایل برقی برابر 50 هرتز است، بنابراین فرکانس ولتاژ ورودی موتور، برابر 50 هرتز در نظر گرفته می‌شود. همچنین دامنه‌ی موثر ولتاژ هر فاز سیم‌پیچی استاتور برابر 220 ولت در نظر گرفته می‌شود تا در سرعت‌های پایین برای یک توان ثابت، ابعاد ماشین از یک حد مشخصی بزرگتر نشود.

انتخاب مناسب تعداد جفت قطب‌های روتور و تعداد شیارهای استاتور باعث کاهش ریبیل گشتاور می‌شود. به‌منظور داشتن ریبیل گشتاور کمتر بایستی تعداد دندانهای استاتور و تعداد جفت قطب‌های روتور، طوری انتخاب شوند تا کوچکترین مضرب مشترک این دو پارامتر، عددی بزرگ شود. محدودیت بعدی که باید برای انتخاب تعداد جفت قطب‌های روتور لحاظ کرد سرعت موتور می‌باشد که در این پروژه کاربردهای خاص با سرعت پایین، سرعت روتور، کمتر از 200 دور در دقیقه در نظر گرفته می‌شود. بنابراین برای فرکانس 50 هرتز، تعداد جفت قطب‌های روتور باید بزرگتر و یا مساوی 15 در نظر گرفته شود. با توجه به بررسی‌های انجام شده در مقالات، q برابر 2 یا 3 در نظر گرفته می‌شود تا ضریب قدرت ماشین افت چشمگیری نداشته باشد. اگر q برابر 2 انتخاب و از 4 قطب برای سیم‌پیچی استاتور استفاده شود آنگاه تعداد شیارهای استاتور برابر 24 خواهد شد. بنابراین با توجه به روابط (2-38) و (1-34) می‌توان پارامترهای اساسی ماشین را بصورت روابط (2-37) و (2-38) تعریف کرد تا تمامی محدودیت‌ها در آن لحاظ شود:

$$Z_r - Z_s = -P \Rightarrow \begin{cases} P = 2 \\ Z_r = 22 \end{cases} \quad (37-2)$$

$$N_m = \frac{120f}{2Z_r} = \frac{6000}{44} = 136.36 \text{rpm} \quad (38-2)$$

در این رابطه f فرکانس موتور و N_m سرعت خروجی روتور می‌باشد. با توجه به مقادیر بدست آمده برای تعداد دندانهای استاتور و تعداد جفت قطب‌های روتور، کوچکترین مضرب مشترک این دو پارامتر از رابطه‌ی (2-39) بدست می‌آید [14]:

$$(2-39) \quad LCM[2Z_r - Z_s] = 44 \times 24 = 264$$

پارامتر دیگری که در ساختار ورنیر مورد بررسی قرار می‌گیرد نسبت جفت قطب روتور به جفت قطب استاتور می‌باشد. این نسبت با رابطه‌ی (2-40) تعریف می‌شود. این نسبت با توجه به مقادیر بدست آمده برای پارامترهای این ماشین برابر 11 است که با توجه به مرجع [15] عددی مطلوب می‌باشد. زیرا هدف از انتخاب این نسبت، داشتن ضریب قدرت مناسب می‌باشد.

$$PR = \frac{Z_r}{p} = 11 \quad (40-2)$$

بعد از بررسی مشخصات کلی موتور، نوبت به بررسی محدودیت‌های مکانیکی آن می‌رسد. ساختار انتخاب شده برای موارد خاص می‌باشد که در آنها حجم موتور بسیار حائز اهمیت است به همین دلیل

محدودیت مکانیکی آن، مربوط به قطر خارجی روتور می‌باشد. یکی از مزیت‌های ماشین ورنیر امکان کار به صورت اتصال مستقیم می‌باشد به همین دلیل اجازه داده می‌شود بار به صورت مستقیم به موتور وصل شود، همانگونه که مشخص است تفاوت ذاتی میان یک موتور و ژنراتور در میان نیست به همین دلیل ابعاد ماشین را به گونه‌ای در نظر گرفته می‌شود که امکان استفاده به عنوان یک ژنراتور 1kw در توربین‌های بادی کوچک را نیز داشته باشد (کاربرد ماشین‌های الکتریکی برای خودروهای الکتریکی نیز به گونه‌ای است که ماشین مذکور امکان بهره‌وری به صورت ژنراتوری را نیز فراهم نماید). با توجه به توضیحات ارائه شده اندازه قطر خارجی آن برابر 230 میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود [16]. در ادامه به بررسی مشخصات طراحی هرکدام از بخش‌های موتور پرداخته می‌شود.

2-1-1- طراحی روتور

با توجه به محدودیت‌های مکانیکی بیان شده، قطر داخلی روتور برابر 200 میلی‌متر و اندازه فاصله‌ی هوایی برابر 0.5 میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. از آنجاییکه اندازه‌ی ضخامت آهنرباهای دائمی برای ساختارهای سطحی 5 برابر اندازه‌ی فاصله‌ی هوایی انتخاب می‌شود [17] بنابراین می‌توان ضخامت آهنرباهای دائمی استفاده شده در ساختار روتور را برابر 2.5 میلی‌متر در نظر گرفت. از آنجاییکه تعداد قطب روتور برابر 44 می‌باشد، می‌توان گام قطب را بصورت تقریبی از رابطه‌ی (2-41) بدست آورد. معمولاً به‌منظور کاهش شار نشتی بین آهنرباها و کاهش آهنربای مصرفی در موتور، ضریب قوس قطب به گام قطب آهنربا α_p عددی بین 0.6 تا 0.8 انتخاب می‌شود [14]، اگر قوس قطب به گام قطب در این ساختار برابر 0.75 انتخاب شود، آنگاه اندازه‌ی عرض آهنربا و ارتفاع یوغ به‌ترتیب از روابط (2-42) و (2-43) بدست می‌آید.

$$\tau_p = \frac{D_{in_Rotor} \pi}{2Z_r} = \frac{200\pi}{44} = 14.28_{mm} \quad (41-2)$$

$$(42-2)$$

$$W_{PM} = \alpha_p \tau_p = 0.75 \times 14.28 = 10.7_{mm}$$

$$(43-2)$$

$$(H_{y_Rotor} = \frac{(D_{out_Rotor} - D_{in_Rotor}) - (2H_{PM})}{2} = \frac{(230 - 200) - (2 \times 2.5)}{2} = 12.5_{mm})$$

پارامترهای α_p ، τ_p ، H_{y_Rotor} ، H_{PM} ، W_{PM} ، D_{in_Rotor} به‌ترتیب معرف اندازه‌ی قطر داخلی روتور، اندازه‌ی عرض آهنربای روتور، اندازه‌ی ارتفاع آهنربای روتور، اندازه‌ی ارتفاع یوغ روتور، اندازه‌ی گام قطب روتور و ضریب موثر قوس قطب می‌باشند. در ادامه به بررسی ساختار و ابعاد استاتور پرداخته می‌شود.

2-1-2- طراحی استاتور

ساختار استاتور در این پروژه شامل 24 دندانه و شیار می‌باشد. با توجه به مرجع [15] پارامتر عرض دهانه‌ی شیار به گام شیار (c_0 پارامتر) برابر 0.6 انتخاب می‌شود تا بصورت همزمان ضریب قدرت و گشتاور، دارای مقادیر مطلوبی باشند. بنابراین با توجه به اندازه‌ی قطر خارجی استاتور، می‌توان اندازه‌ی گام شیار و عرض شیار استاتور را به‌ترتیب از روابط (44-2) و (45-2) بدست آورد.

$$(45-2) \quad t_d = \frac{D_{out_Stator} \pi}{Z_s} = \frac{(D_{in_Rotor} - 2Lg) \pi}{24} = \frac{199\pi}{24} = 26_{mm}$$

$$w_o = c_0 t_d = 0.6 \times 24.2 = 15.6_{mm}$$

پارامترهای D_{out_Stator} و Lg ، w_o ، t_d و c_0 به‌ترتیب معرف اندازه‌ی قطر خارجی استاتور، اندازه‌ی فاصله‌ی هوایی موتور، اندازه‌ی عرض شیار استاتور، اندازه‌ی گام شیار استاتور و نسبت عرض دهانه‌ی شیار به گام شیار استاتور می‌باشند. به‌منظور محاسبه‌ی اندازه‌ی ارتفاع دندانه‌های استاتور، ابتدا باید تعداد دور سیم‌پیچی هر کدام از شیارهای استاتور و سطح مقطع سیم‌پیچی استاتور محاسبه شود. با توجه به مشخص بودن دامنه‌ی ولتاژ هر کدام از فازها، می‌توان پارامتر تعداد دور سیم‌پیچی هر فاز استاتور را با استفاده از رابطه‌ی ولتاژ القایی، بصورت رابطه‌ی (46-2) تعریف کرد.

(46-2)

$$N_{ph} = \frac{E_{ph}}{\frac{1}{\sqrt{2}} k_{W1} D_{out_Stator} L_{stk} \omega_m (F_{PM1} (P_0 + \frac{6q-1}{2} P_1))}$$

بنابراین ابتدا باید پارامترهای مجهول تخمین زده شوند تا تعداد دور هر کدام از فازها محاسبه شود. اولین پارامتری که به‌منظور تخمین تعداد دور سیم‌پیچی هر فاز استاتور مورد بررسی قرار می‌گیرد، پارامتر F_{PM1} ناشی از آهنرباهای روی روتور می‌باشد. هارمونیک اصلی نیرو محرکه‌ی مغناطیسی ناشی از آهنربا را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی (47-2) تقریب زد:

(47-2)

$$F_{PM1} = \frac{4B_m H_{PM}}{\pi \mu_m} \cos(\delta/2) \Rightarrow F_{PM1} = 0.284 \times 10^7 AT$$

(48-2)

$$\mu_m = \mu_{rm} \mu_o \approx 1.1 \times 4\pi \times 10^{-7} \frac{H}{m}$$

(49-2)

$$B_m = B_r + \mu_0 \mu_{rm} H_m \Rightarrow B_m = B_r - \mu_0 \mu_{rm} \frac{L_g}{H_{PM}} H_g \quad \mu_0 H_g = B_g \Rightarrow$$

$$B_m = B_r - \mu_{rm} \frac{L_g}{H_{PM}} B_g = 1.28 - (1.1 \times \frac{0.5}{2.5} \times 1) = 1.06_T$$

(50-2)

$$H_{PM} = 2.5mm$$

$$\alpha_p = 0.75$$

(51-2)

(52-2)

$$\delta = (1 - \alpha_p) \times 180 = 45^\circ$$

بطوریکه در رابطه‌ی (49-2)، B_g حداکثر چگالی شار نقطه‌ی کار فاصله‌ی هوایی در حالت بی باری می‌باشد که برابر 1 تسلا فرض شده است. همچنین همانطور که قبلاً بیان شد، پارامتر δ فاصله‌ی بین دو آهنربا می‌باشد و استفاده از آن سبب می‌شود تا شار نشتی و مصرف آهنربا کاهش پیدا کند. دومین و سومین پارامتری که به‌منظور تخمین تعداد دور سیم‌پیچی هر فاز استاتور مورد بررسی قرار می‌گیرند، پارامترهای ثابت پرمیانس فاصله‌ی هوایی هستند که از روابط (54-2) و (55-2) بدست می‌آیند.

(53-2)

$$\beta = \frac{1}{2} \left[1 - \left[1 + \left(\frac{w_o}{2(H_{PM} + L_g)} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \right] \Rightarrow$$

$$\beta = \frac{1}{2} \left[1 - \left[1 + \left(\frac{15.6}{6} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \right] = 0.32$$

$$P_0 = \frac{\mu_0}{(H_{PM} + L_g)} (1 - 1.6\beta c_0) \Rightarrow \quad (54-2)$$

$$P_0 = \frac{4\pi \times 10^{-7}}{3} (1 - 1.6 \times 0.32 \times 0.6) = 2.9 \times 10^{-7} \text{ T}$$

$$P_1 = \quad (55-2)$$

$$\frac{2\mu_0\beta}{(H_{PM} + L_g)\pi} \left(\frac{0.78125}{0.78125 - 2c_0^2} \right) \sin(1.6\pi c_0) \Rightarrow$$

$$P_1 = \frac{2 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 0.32}{3\pi} \left(\frac{0.78125}{0.78125 - 2 \times 0.6^2} \right) \sin(1.6\pi \times 0.6)$$

$$= 1.364 \times 10^{-7} \text{ و}$$

چهارمین پارامتری که به‌منظور تخمین تعداد دور سیم‌پیچی هر فاز استاتور مورد بررسی قرار می‌گیرد، پارامتر ضریب سیم‌پیچی استاتور می‌باشد. بطور کلی ضریب سیم‌پیچی استاتور تابع سه مولفه می‌باشد. مولفه اول مربوط به ضریب توزیع سیم‌پیچی استاتور K_{d1} بوده و از رابطه‌ی (2-56) محاسبه می‌شود.

[11].
(56-2)

$$K_{dn} = \frac{\sin(n \frac{q\sigma}{2})}{q \sin(n \frac{\sigma}{2})} \Rightarrow K_{d1} = \frac{\sin(\frac{2 \times 15}{2})}{2 \sin(\frac{15}{2})} = 0.995$$

پارامترهای q ، σ و n به‌ترتیب معرف تعداد شیارهای زیر هر قطب برای هر فاز استاتور، زاویه‌ی الکتریکی گام شیار استاتور و شماره‌ی هارمونیک تابع اصلی می‌باشند.

مولفه دوم مربوط به ضریب گام سیم‌پیچی K_{p1} می‌باشد و از رابطه‌ی (2-57) محاسبه می‌شود [18].

(57-2)

$$K_{pn} = \sin(n \frac{\xi}{2}) \Rightarrow K_{p1} = \sin(\frac{\xi}{2}) = \sin(\frac{150^\circ}{2}) = 0.966$$

پارامتر ξ معرف زاویه‌ی الکتریکی گام سیم‌پیچی استاتور می‌باشد، که اندازه‌ی زاویه‌ی آن برابر 150 درجه‌ی الکتریکی است.

مولفه سوم مربوط به ضریب مورب کردن شیار استاتور یا آهنربا می‌باشد. از آنجایی که در این موتور از هیچ شیار موربی استفاده نشده است و آهنرباها بصورت مستقیم بر روی روتور قرار گرفته‌اند، دامنه‌ی این ضریب طبق رابطه‌ی (2-58) برابر 1 می‌باشد [18].

(58-2)

$$K_{sk} = \frac{2 \sin(\frac{\theta_{sk}}{2})}{\theta_{sk}} = 1$$

پارامتر θ_{sk} معرف زاویه‌ی مورب کردن شیار استاتور می‌باشد. حال می‌توان ضریب سیم‌پیچی استاتور K_{W1} را از رابطه‌ی (2-59) بدست آورد.

$$K_{W1} = K_{p1} K_{d1} K_{sk} = 0.995 \times 0.966 \times 1 \simeq 0.966$$

(59-2)

حال اگر فرض شود طول موثر موتور برابر 50 میلی متر باشد، در اینصورت تعداد دور سیم‌پیچی هر فاز استاتور از رابطه‌ی (60-2) محاسبه می‌شود.

$$N_{ph} = \frac{E_{ph}}{\frac{1}{\sqrt{2}} k_{W1} D_{out_Stator} L_{stk} \omega_m (F_{PM1} (P_0 + \frac{6q-1}{2} P_1))} \Rightarrow \quad (60-2)$$

$$N_{ph} = \frac{220}{\frac{0.966}{\sqrt{2}} \times 0.199 \times 0.05 \times (\frac{136.36\pi}{30}) \times (0.284 \times (2.9 + 5.5 \times 1.364))} \simeq 766$$

بعد از بررسی تعداد دور در هر فاز، نوبت به بررسی اندازه‌ی سطح مقطع سیم استاتور در هر فاز می‌رسد. به‌منظور بررسی اندازه‌ی سطح مقطع استاتور، ابتدا باید دامنهی جریان هر فاز مشخص شود. بر همین اساس با توجه به مشخص بودن دامنهی توان و ولتاژ، و بار نامی، می‌توان دامنهی جریان موتور را از رابطه‌ی (61-2) بدست آورد.

همانگونه که از رابطه (61-2) مشخص است برای بدست آوردن جریان هر فاز نیازمند تعیین ضریب توان می‌باشیم. یکی از مشکلاتی که ماشین ورنیر به صورت کلی با آن روبه روست داشتن ضریب توان پایین می‌باشد [19] برای بهبود ضریب توان می‌توان از راه‌های مشخص شده‌ای مانند؛ کاهش بارگذاری الکتریکی و یا تنظیم زاویه جریان استفاده کرد که هر کدام مشکلات خاص خود را دارد، روش دیگر استفاده از هالباخ¹ می‌باشد که در طی تغییر در ساختار موتور شاهد بهبود ضریب توان خواهیم بود، البته در کنار این افزایش گشتاور خروجی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد. [20-21] یکی از بهترین روش‌ها برای بهبود ضریب توان استفاده از ساختار دو استاتور و ساختار Spoke می‌باشد. که در حال حاضر یکی از بهترین روش‌های بهبود ضریب توان محسوب می‌گردد. در ادامه برای محاسبات، ضریب توان را 0/66 در نظر می‌گیریم [19].

$$P_{in} = 3E_{ph} I_{rms} \cos \theta \Rightarrow \cos \theta = 0.66 \quad (61-2)$$

$$I_{rms} = \frac{P_{in}}{3E_{ph} \cos \theta} = \frac{\frac{P_{out}}{\eta}}{3E_{ph} \cos \theta} = \frac{\frac{1000}{0.8}}{3 \times 220 \times 0.66} = 2.87_A$$

پارامترهای P_{in} ، P_{out} ، E_{ph} ، I_{rms} ، $\cos \theta$ و η به‌ترتیب معرف متوسط توان ورودی موتور، متوسط توان خروجی موتور، اندازه‌ی دامنهی موثر ولتاژ هر کدام از فازها، اندازه‌ی دامنهی موثر جریان هر کدام از فازها، ضریب توان و راندمان موتور می‌باشند. با توجه به مشخصات موتور ورنیر، توان خروجی موتور برابر 1000 وات و راندمان آن برابر 80 درصد فرض شده است. همچنین در رابطه (61-2) ضریب قدرت $\cos \theta$ برابر 0/66 در نظر گرفته شده است [19].

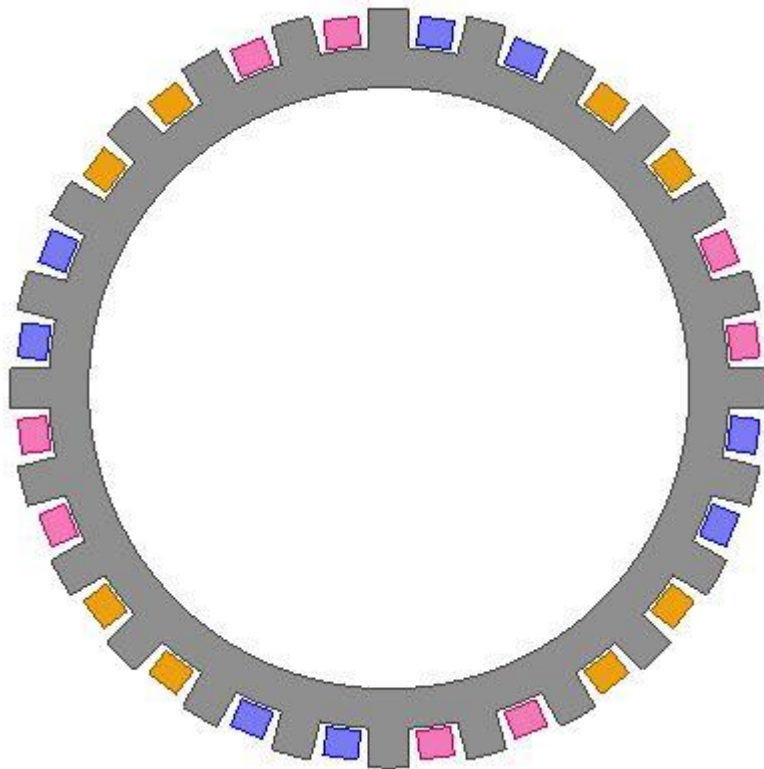
با توجه به مشخص بودن دامنه‌ی جریان ورودی هر کدام از فازها و با فرض چگالی جریان 6 آمپر بر میلیمتر مربع برای سیم‌پیچی هر کدام از فازها، می‌توان سطح مقطع و قطر سیم را به‌ترتیب از روابط (62-2) و (63-2) تخمین زد.

$$I_{rms} = \delta_{cu} A_{cu} \Rightarrow A_{cu} = \frac{I_{rms}}{\delta_{cu}} = \frac{2.87}{6} = 0.478_{mm^2} \quad (62-2)$$

$$A_{cu} = \pi \frac{D^2}{4} \Rightarrow D = \sqrt{\frac{4A_{cu}}{\pi}} \simeq 0.780_{mm} \quad (63-2)$$

پارامترهای δ_{cu} ، A_{cu} و D به‌ترتیب معرف چگالی جریان سیم‌پیچی هر فاز موتور، سطح مقطع هر سیم و اندازه‌ی قطر سیم‌پیچی هر کدام از فازها می‌باشند.

شکل 12-2 نحوه‌ی سیم‌پیچی استاتور را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل 12-2 مشاهده می‌شود، سیم‌پیچی هر کدام از فازهای استاتور دارای یک رنگ مجزا می‌باشند و هر کدام از فازها با 120 درجه اختلاف فاز الکتریکی نسبت به یکدیگر بصورت چهار قطبی سیم‌پیچی شده‌اند.



شکل 12-2: نحوه‌ی سیم‌پیچی فازهای مختلف استاتور

با توجه به نحوه‌ی سیم‌پیچی استاتور که در شکل 12-2 نشان داده شده است، تعداد دور مربوط به بازوی کلاف داخل هر شیار برابر 192 دور می‌باشد. البته این تعداد دور مربوط به حالت بی باری است و بصورت تقریبی تخمین زده شده است و تعداد دور هر فاز بصورت دقیق از روی شبیه‌سازی و بهینه‌سازی موتور بدست می‌آید. اگر پرشدگی شیار استاتور جهت رعایت موارد ایمنی از دید جلوگیری از ازدیاد

حرارت طبق سایر مقالات ارائه شده برابر 40 درصد در نظر گرفته شود، در این صورت مساحت مورد نیاز برای هر شیار از رابطه‌ی (64-2) بدست می‌آید.

$$A_{slot} = K_{Fill}[N_{coil}A_{cu}] = 2.5 \times 192 \times 0.478 = 229.44 \text{mm}^2 \quad (64-2)$$

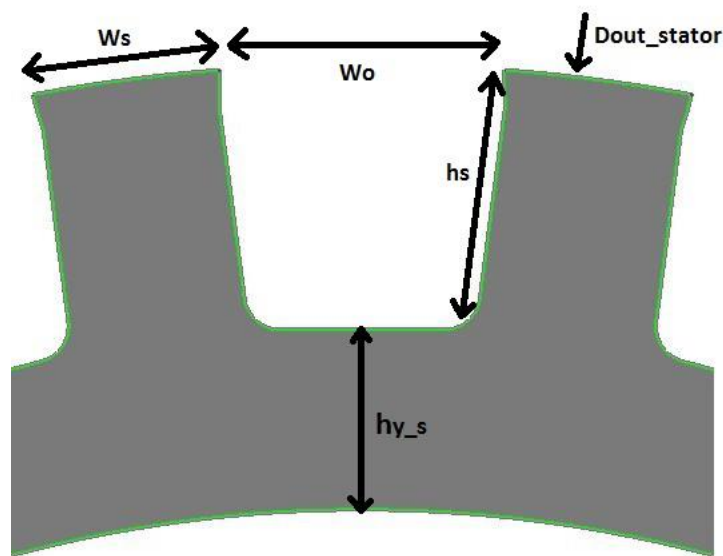
$$(65-2)$$

$$K_{Fill} = 2.5$$

$$(66-2)$$

$$N_{coil} = 192$$

در روابط فوق پارامترهای N_{coil} ، A_{slot} ، A_{cu} و K_{Fill} به ترتیب تعداد هادی‌های داخل هر شیار استاتور، مساحت هر شیار استاتور، سطح مقطع سیم و ضریب پرشدگی شیار استاتور می‌باشند. شکل 2-13 پارامترهای مربوط به شیار استاتور را نشان می‌دهد. با توجه به شکل 2-13 دامنه‌ی پارامترهای استاتور باید طوری انتخاب شوند تا سطح مقطع بدست آمده از رابطه‌ی (64-2) برای هر شیار رعایت شود.



شکل 2-13: شکل شیار استاتور

بنابراین می‌توان اندازه‌ی عمق شیار استاتور را از رابطه‌ی (67-2) محاسبه کرد.

$$Z_s A_{slot} = \left[\pi \left[\left(\frac{D_{out_stator}}{2} \right)^2 - \left(\frac{D_{out_stator}}{2} - h_s \right)^2 \right] \times c_0 \right] \quad (67-2)$$

$$\Rightarrow 24 \times 229.44 = [\pi[(99.5)^2 - (99.5 - h_s)^2] \times 0.6] \Rightarrow h_s = 15.96 \text{mm}$$

بعد از تخمین اندازه‌ی ارتفاع شیار استاتور نوبت به بررسی و محاسبه‌ی ارتفاع یوغ استاتور می‌رسد. معمولاً در ماشین‌های ورنیر، اندازه‌ی ارتفاع یوغ استاتور برابر اندازه‌ی عرض دندانه‌ی استاتور در نظر گرفته می‌شود، بنابراین اندازه‌ی ارتفاع یوغ استاتور برابر 15.96 میلی‌متر در نظر گرفته می‌شود. با توجه به مشخص بودن ارتفاع شیار و ارتفاع یوغ استاتور، می‌توان قطر داخلی استاتور را از رابطه‌ی (2-68) محاسبه کرد.

$$D_{in_Stator} = D_{out_Stator} - 2h_s - 2h_{y_s} = 199 - 31.92 - 20.8 = 146.28_{mm} \quad (68-2)$$

در رابطه‌ی (2-68) پارامترهای D_{in_Stator} ، h_{y_s} و h_s به‌ترتیب معرف قطر داخلی استاتور، ارتفاع یوغ استاتور و ارتفاع شیار استاتور می‌باشند. حال با توجه به مشخص شدن تمامی ابعاد اولیه‌ی موتور، نوبت به پیاده‌سازی آن و بررسی صحت طراحی اولیه می‌رسد.

در ادامه جدول 1-2 بیانگر تمام مشخصات موتور ورنیر طراحی شده است

جدول 1-2: مشخصات موتور ورنیر طراحی شده

طول موثر موتور (mm)	50	L_{stk}
قطر خارجی استاتور (mm)	199	D_{out_stator}
قطر داخلی استاتور (mm)	146.28	D_{in_stator}
طول فاصله‌ی هوایی (mm)	0.5	L_g
قطر خارجی روتور (mm)	230	D_{out_Rotor}
قطر داخلی روتور (mm)	200	D_{in_Rotor}
تعداد شیارهای استاتور	24	Z_s
تعداد جفت قطب آهنرباهای دائمی روتور	22	Z_r
تعداد دور هر فاز استاتور	766	N_{ph}
ضریب موثر قوس قطب آهنربا (نسبت قوس به گام قطب)	0.75	α_p
ضریب توان	0.66	$\cos(\varphi)$
بازده	80	$\eta [\%]$

تعداد قطب رتور	44	P_r
تعداد شیار	24	n_s
تعداد قطب استاتور	4	P_s
تعداد شیار هر فاز به ازای هر قطب	2	q
ضریب توزیع سیم‌پیچی	0.995	K_{d1}
ضریب گام سیم‌پیچی	0.966	K_{p1}
ضریب مورب کردن شیار استاتور/رتور	1	K_{sk}
ضریب سیم‌پیچی	0.966	K_{w1}
چگالی جریان سیم‌پیچی	6	δ_{cu}
سطح مقطع هر سیم	0.478	A_{cu}
قطر سیم‌پیچی هر فاز	0.780	D
مساحت هر شیار استاتور	229.44	$A_{slot} [mm^2]$
عمق شیار استاتور	15.96	h_s
ارتفاع یوغ استاتور	15.96	h_{ys}
بارپذیری مغناطیسی ویژه	1.06	$B [T]$
حداکثر چگالی شار نقطه‌ای کار	1	$B_g [T]$
ضریب انباشتگی شیار	2.5	K_{Fill}
گام قطب	14.28	τ_p
گام شیار استاتور	26	τ_d
زاویه الکتریکی گام شیار استاتور	15	σ
زاویه الکتریکی گام سیم‌پیچی استاتور	150	$\xi [Deg]$
عرض شیار استاتور	15.6	w_o
عرض دهانه‌ی شیار به گام شیار	0.6	c_0
ضریب کارتر	0.32	β
ضخامت آهنربا	2.5	L_{pm}

عرض آهنربا	10.7	W_{pm}
ارتفاع آهنربا	12.5	H_y
نوع آهنربا	NdFeB	PM
پرمیانس فاصله هوایی	$1.364 \cdot 10^{-7}$	P_1

جدول 1-3: مشخصات نامی موتور ورنیر طراحی شده

توان خروجی	1	P_{out} [kW]
فرکانس	50	f [Hz]
ولتاژ نامی	155.56	V_{rms} [V]
سرعت	136.36	rpm
بازده	80	η [%]



فصل سوم: بهینه‌سازی طراحی با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک

هدف از بهینه‌سازی یافتن بهترین مقدار از میان گروهی از مقادیر ممکن است، به طوریکه این مقدار بهینه محدودیتی را تامین نماید [22]. در این فصل انواع روش‌های بهینه‌سازی متداول در طراحی ماشین‌های الکتریکی بررسی می‌شوند. پس از مقایسه این روش‌ها، یکی از آنها به عنوان روش مناسب‌تر برای کاربرد موردنظر انتخاب شده و سپس پارامترهای بهینه‌سازی و توابع هدف انتخاب می‌شوند. روش انتخابی قادر است علاوه بر بهینه‌سازی بازده و سپس بهینه‌سازی همزمان بازده و چگالی توان مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت، مقدار پارامترهای موتور بهینه در انتهای فصل بیان می‌شود.

1-3- انواع روش‌های بهینه‌سازی

با توجه به فراوانی تعداد پارامترهای درگیر در طراحی ماشین‌های الکتریکی و نیز معادلات غیرخطی که ارتباط بین پارامترها را پیچیده‌تر می‌کند، طراحی ماشین‌های الکتریکی یک مسأله غیرخطی چند بعدی است که با محاسبات دستی نمی‌توان به نتایج بهینه دست یافت. لذا طراحی بهینه ماشین‌های الکتریکی نیازمند روش‌های تحلیل و محاسبه کامپیوتری می‌باشد که بتوان الگوریتم عملکرد آنها را طراحی و به کامپیوتر تعریف کرد. پیش از پرداختن به انواع روش‌های بهینه‌سازی متداول در طراحی ماشین‌های الکتریکی، لازم است مفاهیم زیر تعریف شوند:

تابع هدف¹: یک تابع ریاضی است که مقصود نهایی از اجرای بهینه‌سازی یافتن مقدار بهینه برای آن می‌باشد. این مقدار بهینه معمولاً مقدار اکسترمم (ماکزیمم یا مینیمم) تابع هدف است که باید محدودیتی (معادله و نامعادله محدودیت) را نیز رعایت کرده باشد. در رابطه‌ی زیر، هدف یافتن مقدار بهینه‌ی Z بوده، F تابع هدف و تابعی از متغیرهای $X_1, X_2, \dots, X_n$ می‌باشد.

$$Z = F(X) \quad ; \quad X = x_1, x_2, \dots, x_n \quad (1-3)$$

پارامترهای بهینه‌سازی²: در تعریف فوق از تابع هدف، $X_1, X_2, \dots, X_n$ در رابطه‌ی (1-3) پارامترهای بهینه‌سازی محسوب می‌شوند. به عبارتی پارامترهای بهینه‌سازی متغیرهایی هستند که مقدار بهینه‌ی تابع هدف با توجه به وابستگی‌اش به آن متغیرها به دست می‌آید.

فضای مسأله یا فضای جست‌وجو³: تمامی مجموعه مقادیری که امکان دارد مقدار بهینه را به دست بدهند. هر یک از مجموعه مقادیر X مجاز، در رابطه‌ی (1-3) یک نقطه در فضای مسأله‌ی n بعدی و به عبارتی کاندیدای جواب⁴ است.

بهینه‌سازی محلی⁵ و بهینه‌سازی سراسری⁶: در مسائل بهینه‌سازی محلی، هدف یافتن مقدار ماکزیمم یا مینیمم تابع هدف نسبت به مقادیر همسایگی در فضای مسأله است در حالی که در بهینه‌سازی

¹ Objective function

² Optimization parameters

³ Problem space or search space

⁴ Solution candidate

⁵ Local optimization

⁶ Global optimization

کلی، مقصود به دست آوردن مقدار ماکزیمم یا مینیمم است که به ازای کلیه‌ی مقادیر فضای مساله به دست آمده باشد. در طراحی ماشین‌های الکتریکی به دنبال یافتن مقدار بهینه‌ی سراسری هستیم.

شایستگی یا برازندگی¹: ارجحیت یا میزان بهینه بودن یک کاندیدای جواب توسط شایستگی آن تعیین می‌شود. در واقع تابع هدف توسط تابع شایستگی به برنامه کامپیوتری معرفی می‌شود و مقدار ماکزیمم و مینیمم بودن تابع شایستگی است که تابع هدف را بهینه می‌کند. به عنوان یک مثال ساده اگر در یک مساله‌ی بهینه‌سازی یک بعدی، تابع شایستگی $f(x)=3x-4$ بوده و هدف یافتن مقدار حداکثر باشد، با توجه به کمتر بودن $f(x_1=1)=-1$ از $f(x_2=2)=2$ ، x_2 کاندیدای شایسته تری نسبت به x_1 است.

نامعادله و معادله‌ی محدودیت²: به صورت کلی در مسائل غیرخطی، مقادیر مشخصی از پارامترهای بهینه‌سازی $x_1, x_2, \dots, x_n$ را باید طوری محاسبه کرد که نامعادله‌ی محدودیت (2-3) همراه با معادله‌ی محدودیت (3-3) برقرار باشند. می‌توان محدودیت را بازدهی قابل قبولی برای پارامترهای بهینه‌سازی تعریف کرد.

$$g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq 0 \quad ; i = 1, 2, \dots, m \quad (2-3)$$

$$h_j(x_1, x_2, \dots, x_n) = 0 \quad ; j = m + 1, m + 2, \dots, k \quad (3-3)$$

رابطه‌ی خاصی بین تعداد متغیرها n و تعداد محدودیت‌های k وجود ندارد. بنابراین در هر مساله k می‌تواند بزرگتر، کوچکتر و یا مساوی با n باشد. به مسائلی که در آنها k برابر با صفر است، بهینه‌سازی بدون محدودیت اطلاق می‌شود.

3-1-1- الگوریتم‌های بهینه‌سازی قطعی و احتمالی

عموما الگوریتم‌های بهینه‌سازی سراسری را می‌توان در دو دسته‌ی قطعی و احتمالی بررسی کرد. الگوریتم‌های قطعی دسته‌ای هستند که رابطه‌ی معناداری بین کاندیدای احتمالی جواب و شایستگی آن وجود داشته باشد. اگر ارتباط بین کاندیدای جواب و شایستگی آن واضح نباشد یا خیلی پیچیده باشد، معرفی جواب بهینه به طور قطعی ممکن نبوده و ناچار از الگوریتم‌های احتمالی استفاده خواهد شد. در الگوریتم‌های قطعی حداکثر یک راه برای ادامه‌ی الگوریتم وجود دارد که با نفی شدن آن، الگوریتم به پایان رسیده و مقدار بهینه‌ی سراسری معرفی می‌شود. در واقع هیچ یک از مراحل الگوریتم‌های قطعی از اعداد یا روابط تصادفی استفاده نمی‌کند و ارتباط بین مراحل کاملا مشخص و به طور ریاضی قابل تعریف است. به دست آوردن مقدار اکستریم با استفاده از مشتق گیری از ساده‌ترین نمونه‌های الگوریتم قطعی است. الگوریتم‌های احتمالی ممکن است مقدار بهینه‌ی محلی را معرفی کنند اما این به معنای نادرست بودن نتیجه آنها نیست. در واقع از الگوریتم‌های احتمالی در شرایطی استفاده می‌شود که الگوریتم قطعی برای حل مساله یا وجود ندارد یا بسیار زمان بر (در شرایطی 10^{100} سال!) است. در این شرایط یافتن یک مقدار بهینه‌ی محلی قطعا بهتر از نرسیدن به هیچ جوابی است.

¹ Fitness

² Constraint inequalities and equalities

3-1-2- الگوریتم‌های بهینه‌سازی مستقیم و غیر مستقیم

تحلیل مسائل غیر خطی می‌تواند به روش مستقیم یا غیر مستقیم انجام شود. در روش مستقیم، محدودیت‌ها به صورت مستقیم به الگوریتم حل اعمال می‌گردند ولی در روش‌های غیر مستقیم، ابتدا محدودیت‌ها را به بهینه‌سازی بدون محدودیت تبدیل و سپس به حل آن اقدام می‌شود [23]. انواع روش‌های مستقیم و غیر مستقیم عبارتند از:

روش‌های مستقیم:

- روش‌های جستجوی ابتکاری¹
- روش‌های با محدودیت تقریبی
- روش‌های جهت ممکن

روش‌های غیر مستقیم:

- روش حذف محدودیت‌ها
- روش تابع جریمه داخلی
- روش تابع جریمه خارجی

3-1-3- الگوریتم بهینه‌سازی هیوریستیک و فراابتکاری²

هیوریستیک در واقع بخشی از الگوریتم بهینه‌سازی است که در تصمیم‌گیری راجع به مرحله‌ی بعدی الگوریتم نقش اصلی را ایفا می‌کند. به این معنی که کاندیدهای جواب یک مرحله را مقایسه کرده و تصمیم می‌گیرد از کدام یک در شکل دهی کاندیدهای جواب در مرحله بعد استفاده شود. الگوریتم متاهیوریستیک روش حلی برای مسائل بهینه‌سازی عمومی است که توابع هیوریستیک و توابع هدف را ترکیب کرده و با آنها مثل یک جعبه‌ی سیاه عمل می‌کند.

3-1-4- الگوریتم بهینه‌سازی با روش جستجوی اتفاقی³

این روش بر مبنای دستیابی به مقدار حداقل تابع با تقریب کمتری از مقدار قبلی و تکرار این عمل استوار است. الگوریتم جستجوی اتفاقی را می‌توان در مراحل زیر خلاصه کرد:

گام 1: انتخاب نقطه‌ی شروع X و طول گام λ_i برای n متغیر ($i=1,2, \dots, n$)

گام 2: ایجاد عدد تصادفی U_i

گام 3: تدوین بردار $S_i = U_i \lambda_i$

گام 4: محاسبه‌ی $F(X+S)$

¹ Heuristic

² Metaheuristic

³ Stochastic algorithm

گام 5: اگر $F(X+S) < F(X)$ باشد، افزایش X در جهت S ادامه می‌یابد و تا وقتی که بهبود حاصله در تابع هدف ناچیز شود، این روند را ادامه داده و به گام 2 بر می‌گردد.

گام 6: اگر $F(X+S) > F(X)$ باشد مقدار $F(X-S)$ محاسبه شود.

گام 7: اگر $F(X-S) < F(X)$ باشد، افزایش X در جهت $-S$ ادامه می‌یابد و تا وقتی که بهبود حاصله در تابع هدف ناچیز شود، این روند را ادامه داده و به گام 2 بر می‌گردد.

گام 8: اگر بهبودی در تابع هدف در هیچ یک از جهت‌ها حاصل نشود، جهت S ناموفق خوانده می‌شود. الگوریتم به گام 2 بر می‌گردد.

گام 9: با استفاده از یک ضریب کاهش از طول گام کاسته شده و به گام 2 رجوع می‌شود.

گام 10: وقتی طول گام از دقت مورد نیاز کمتر شود، تکرار محاسبات متوقف خواهد شد.

این روش زمان زیادی برای همگرایی نیاز دارد و کاملاً وابسته به نقطه‌ی شروع است.

3-1-5- الگوریتم هوک و جیوز¹

در این روش از شیوه‌ی جستجوی شکل کلی استفاده می‌شود. یعنی در هر گام دو عمل انجام می‌شود یکی عملکرد موضعی تابع هدف و دیگری استفاده از شکل کلی. الگوریتم زیر این روش را به طور گام به گام تشریح می‌کند.

گام 1: مقدار اولیه X را انتخاب و مقدار $F(X)$ را محاسبه کنید.

گام 2: با جستجوی موضعی در هر جهت و افزایش دیفرانسیلی هر متغیر به میزان Δx_i و محاسبه‌ی تابع هدف در هر مرحله، امکان دستیابی به تابع هدف با کمترین مقدار بررسی می‌شود.

گام 3: چنانچه بهبود در تابع هدف حاصل نشود، از اندازه‌ی دیفرانسیل کاسته و جستجو از بهترین نقطه‌ی قبلی ادامه می‌یابد.

گام 4: در صورت کاهش مقدار تابع هدف، با استفاده از نقاط مراحل قبل $(x_i^k \text{ و } x_i^{k+1})$ مقدار نقطه‌ی موقت $(x_{i,o}^k \text{ و } x_{i,o}^{k+1})$ از رابطه $x_{i,o}^{k+1} = x_i^{k+1} + \alpha(x_i^k \text{ و } x_i^{k+1})$ محاسبه می‌شود.

گام 5: اگر نقطه‌ی موقت به کاهش مقدار تابع هدف منجر شود، جستجوی موضعی جدید انجام شده و در نقطه‌ی جدید مقدار تابع هدف محاسبه می‌شود.

¹ Hook and Jeeves method

گام 5: اگر نقطه‌ی موقت به کاهش مقدار تابع هدف منجر شود، جستجوی موضعی جدید انجام شده و در نقطه‌ی جدید مقدار تابع هدف محاسبه می‌شود.

گام 6: چنانچه تفاوت بین مقادیر تابع هدف در گام آخر و ماقبل آن کمتر از مقدار مشخص شده به عنوان خطا باشد، عملیات خاتمه می‌یابد.

این روش از روش جستجوی اتفاقی کندتر است ولی از دقت بیشتری برخوردار است.

3-1-6- روش پاول¹

این روش تعمیم روش قبل بوده و از ویژگی همگرایی درجه دوم برخوردار است. از آنجاییکه می‌توان بیشتر توابع را در نزدیکی مقدار حداقل آنها با دقت بالا توسط توابع درجه‌ی دوم تقریب زد، روش پاول از بازدهی بالایی برخوردار است. الگوریتم این روش به صورت زیر می‌باشد [24].

گام 1: با انتخاب بردار شروع $X_0(0)$ ، جهت‌های جستجوی $M_i(0)$ موازی با محورهای اصلی انتخاب می‌شوند.

گام 2: برای بهینه‌سازی تابع در n جهت اولیه با استفاده از تقریب درجه دوم، توالی جستجوی یک متغیره ایجاد می‌شود.

گام 3: با جابجایی متغیرها به صورت $x_m^k = 2x_n^k - x_0^k$ متغیر جدید ایجاد می‌شود. در این حالت x_n^k آخرین نقطه از توالی جستجوی یک متغیره و x_m^k نقطه‌ای است که در بین دو جستجوی متوالی منجر به بیشترین بهبودی در مقدار تابع می‌شود.

گام 4: اگر در مقدار تابع هدف در x_n^k بهبودی نسبت به نقطه شروع x_0^k حاصل نشده باشد، آخرین نقطه یعنی x_n^k به عنوان نقطه‌ی شروع جدید انتخاب شده و گروه جستجوی یک متغیره در جهت‌های قبلی انجام می‌شود.

گام 5: وقتی همگرایی حاصل می‌شود که تفاضل مقادیر توابع در تکرارهای متوالی از مقدار مشخص شده به عنوان خطا کمتر باشد.

3-1-7- الگوریتم ژنتیک (GA^2)

الگوریتم ژنتیک به عنوان یک ابزار بهینه‌سازی قدرتمند در مسائل مختلف بهینه‌سازی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این الگوریتم ابتدا ورودیها و محدوده‌ی تغییرات آنها مشخص می‌شود. هریک از ورودی‌ها به عنوان ژن در الگوریتم ژنتیک عمل می‌کند. ژن‌ها در کنار هم تشکلی کروموزوم را داده

¹ Powell method

² Genetic Algorithm

و چندین کروموزوم در کنار هم یک جمعیت را تشکیل می‌دهند. مقدار تابع هدف برای هر کروموزوم با توجه به مقادیر اختصاص یافته به ژن‌های آن کروموزوم قابل محاسبه است. در واقع کروموزوم‌های تشکیل دهنده جمعیت همان کاندیدهای جواب هستند.

اولین قدم در الگوریتم ژنتیک ایجاد جمعیت اولیه به صورت تصادفی است. در ادامه جمعیت هر نسل با توجه به نسل قبل تولید می‌شود. به منظور تولید نسل بعد (بازتولید¹) عملیات انتخاب²، تزیوج یا تقاطع³ و جهش⁴ بر روی کروموزوم‌ها انجام می‌شود. روند پیش روی الگوریتم و بازتولید طوری است که جمعیت جدید را با هدف تولید نسل بهتر (تابع هدف بهینه تر) و حذف کروموزوم‌های ضعیف تولید نماید.

3-1-8- سردسازی (تبرید) شبیه سازی شده (SA⁵)

سردسازی شبیه سازی از روند فیزیکی سرچشمه می‌گیرد که در آن ابتدا یک جامد را داغ کرده و سپس به تدریج سرد می‌کنند. گرما باعث پخش اتم‌ها در فضای جامد می‌شود. به تدریج با سرد شدن جامد، اتم‌ها ساختاری را به خود می‌گیرند که دارای حداقل انرژی باشد (مینیم سراسری). این روش کاربرد بسیاری در الگوریتم‌های مربوط به یافتن مینیم محلی دارد. مشکل این روش ناکارآمد بودن آن در فضای جستجوی وسیع است. معمولاً سردسازی شبیه سازی شده در ترکیب با سایر روش‌های بهینه‌سازی ابزار قدرتمندی است [25].

3-1-9- الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات (PSO⁶)

این روش برگرفته از حرکت گروهی انبوهی از زنبورها (ذرات) است که سعی در یافتن محلی با بیشترین تعداد گل را دارند. در واقع می‌توان PSO را تعمیم یافته‌ی روش جستجوی اتفاقی دانست. مسیر جستجوی محل بهینه با استفاده از دانش هر زنبور و زنبورهای مجاور آن ادامه می‌یابد [26].

هر ذره در الگوریتم PSO از سه بردار n بعدی تشکیل شده است که n بعد فضای جستجو می‌باشد. برای ذره‌ی i ام این سه بردار عبارتند از: x^i موقعیت فعلی ذره، v^i سرعت فعلی حرکت ذره و $x^{i,best}$ بهترین موقعیتی که ذره تا به حال تجربه کرده است. در هر مرحله‌ای که الگوریتم تکرار می‌شود، x^i به عنوان یک کاندیدای جواب محاسبه می‌شود. اگر این موقعیت بهتر از جواب‌های پیشین باشد در $x^{i,best}$ ذخیره می‌شود. این روند تا جایی ادامه می‌یابد که بهترین جواب حاصله از دو مرحله‌ی متوالی اخیر دارای اختلاف کمی باشند. الگوریتم پایان یافته و جواب آخرین مرحله به عنوان مقدار بهینه معرفی می‌شود [27].

3-2- مقایسه و انتخاب روش بهینه‌سازی مناسب

از میان روش‌های بهینه‌سازی استفاده شده در علوم مختلف، روش‌های تکاملی⁷ بیشتر در طراحی ماشین‌های الکتریکی محبوبیت یافته‌اند. الگوریتم‌های تکاملی در هر مرحله تعدادی از کاندیدهای جواب را شامل می‌شوند که اساس تولید جواب‌های مرحله بعد خواهند بود. ارتباط بین دو مرحله‌ی متوالی

¹ Reproduction

² Selection

³ Cross over

⁴ Mutation

⁵ Simulated Annealing

⁶ Particle Swarm Optimization

⁷ Evolutionary algorithms

معمولا از یکی از روش‌های الهام گرفته از طبیعت بهره می‌گیرد. همچون روش الگوریتم ژنتیک که از تولید نسل جدید (فرزندان) توسط جمعیت ماقبل (والدین) استفاده می‌کند و روش انبوه ذرات یا گروه مورچگان¹ که همگی از رفتار ذاتی و طبیعی حیوانات و حشرات برای یافتن بهترین وضعیت موجود در محیط اطراف بهره گرفته‌اند.

معیارهایی که در مسائل طراحی و بهینه‌سازی ماشین‌های الکتریکی به منظور انتخاب مناسب‌ترین روش بهینه‌سازی وجود دارد عبارتند از:

- زمان لازم برای همگرایی محاسبات و الگوریتم حداقل باشد
- نتایج دقیق تری حاصل شود.
- مراحل و محاسبات الگوریتم کمترین میزان مشتق‌های مرتبه اول و دوم را شامل شود.
- در مراحل تکرار در حل مسائل کمترین میزان تخلف از محدودیت‌ها رخ می‌دهد.
- نقطه‌ی اکسترمم به دست آمده نتیجه‌ی بررسی کل فضای مساله باشد. به عبارتی اکسترمم سراسری باشد نه محلی.

از بین روش‌های متداول، الگوریتم ژنتیک دارای زمان تحلیل مناسبتر، دقت محاسبات قابل قبول و عاری از مشتقات مرتبه اول و دوم می‌باشد. در ادامه مزایا و معایب الگوریتم ژنتیک در مقایسه با سایر روش‌های بهینه‌سازی ذکر می‌شود [27-28-29].

3-2-1- مزایای الگوریتم ژنتیک در مقایسه با سایر روش‌های بهینه‌سازی

1) اولین و مهمترین نقطه‌ی قوت الگوریتم ژنتیک موازی بودن آن است. به این معنی که در الگوریتم

ژنتیک جمعیتی از نقاط به صورت موازی و هم زمان به جای یک نقطه مورد جستجو قرار می‌گیرند. روش‌های پرکاربرد دیگر همچون بهینه‌سازی انبوه ذرات موازی نبوده و یک نقطه یا مسیر پیش روی تصادفی انتخاب می‌شود. در صورت بهتر نبودن این مسیر از مسیر قبلی، کل کارهای انجام شده بیهوده بوده و به کناری گذاشته می‌شود و الگوریتم از گام‌های اول دوباره شروع می‌شود. از آنجایی که GA چند نقطه‌ی شروع دارد، در یک لحظه می‌تواند فضای مساله را از چند جهت مختلف جستجو کند و در صورت به نتیجه نرسیدن سایر راه‌ها ادامه می‌یابد. گرچه الگوریتم ژنتیک عموماً روش بهینه‌سازی سریعی محسوب نمی‌شود ولی موازی بودن روند پیش روی آن سبب می‌شود که نسبت به سایر روش‌های تکاملی و احتمالی سریع‌تر باشد.

2) با توجه به موازی بودن الگوریتم ژنتیک، این روش برای مسائلی که فضای مساله‌ی چند بعدی و

وسعی دارند بسیار مناسب است.

¹ Ant Colony

(3) GA چیزی از طبیعت مساله‌ای که حل می‌کند نمی‌داند. این موضوع باعث می‌شود که تمام فضای سه بعدی را بدون ارجحیت قائل شدن برای بخشی از فضاء، جستجو کند.

(4) در GA نیاز به اطلاع از مشتقات تابع هدف نیست و کافی است بتوان یک تابع برازش¹ برای آن

تعریف کرد به گونه‌ای که میزان شایستگی تابع هدف را مشخص کند. لذا بر خلاف روش‌های بهینه‌سازی قطعی که نیاز به مشتقات تابع هدف دارند، الگوریتم ژنتیک یک روش بهینه‌سازی احتمالی است.

(5) با افزایش دادن ضریب جهش می‌توان پراکندگی ژن‌ها را در مراحل بعدی افزایش داد. این مساله

موجب پوشش دادن کل فضای جستجو شده و لذا GA در مسائل با فضای جستجو نویزی مفید و کارآمد است.

(6) یکی دیگر از مزایای الگوریتم ژنتیک این است که به راحتی می‌توان از آن برای مسائل تک هدفه²

و نیز چند هدفه³ استفاده کرد. در مسائل چند هدفه، قصد یافتن مقدار بهینه را برای چند پارامتر (تابع هدف) به طور همزمان داریم.

(7) روش‌های متعددی برای سرعت دهی به الگوریتم و بهبود کیفیت جواب وجود دارد که به محض

افزایش آگاهی از دامنه‌ی مساله از این روش‌ها می‌توان استفاده کرد و رفته رفته سرعت پیش روی الگوریتم را افزایش داد.

3-2-2- معایب الگوریتم ژنتیک در مقایسه با سایر روش‌های بهینه‌سازی

(1) یکی از مشکلات الگوریتم ژنتیک چگونگی نوشتن تابع هدف است. تابع هدف در جعبه ابزار بهینه‌سازی GA در نرم افزار MATLAB توسط تابع شایستگی که همان تابع برازش است به کامپیوتر معرفی می‌شود. سراسری یا محلی بودن کروموزوم بهینه‌ی معرفی شده وابستگی شدید به تابع شایستگی، اندازه‌ی جمعیت، نرخ جهش و تقاطع دارد. البته با چند مرتبه اجرای برنامه به صورت سعی و خطا می‌توان در مورد مناسب بودن تابع برازش معرفی شده اطمینان حاصل کرد.

(2) مشکل دیگر که آن را نارس بودن جواب⁴ می‌نامند این است که اگر یک کروموزوم فاصله‌اش با سایر کروموزوم‌های نسل‌اش زیاد باشد و در نسل‌های نخستین ایجاد شود، محدودیت ایجاد کرده و جواب نهایی اعلام خواهد شد، پیش از آنکه کل فضای جستجو بررسی شود. این اتفاق معمولاً

¹ Fitness function

² Single objective

³ Multi objective

⁴ Premature

در جمعیت‌های کم اتفاق می‌افتاد. در این مورد هم می‌توان با سعی و خطا و اجرای چندباره‌ی بهینه‌سازی تعداد جمعیت مناسب برای مساله را انتخاب کرد.

با توجه به نکات ذکر شده، با انتخاب مناسب چگونگی تعریف تابع هدف، تعداد جمعیت و نرخ جهش و تقاطع، روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک (GA) به عنوان یک روش مناسب برای موتور ورنیر طراحی شده در فصل قبل انتخاب می‌شود.

3-3- الگوریتم ژنتیک

در سال 1859 میلادی، داروین¹ کتاب معروف خود را تحت عنوان "منشا انواع"² منتشر کرد. در این کتاب داروین نظریه‌ی انتخاب طبیعی و بقای اصلح را که در میان تمام انواع جانداران و گیاهان جاری است برای اولین بار مطرح کرد. نظریه‌ی فوق در واقع نیروی طبیعت در بهینه‌سازی انواع گونه‌ها طی یک تکامل بیولوژیکی را مطرح می‌کند.

برداشت داروین از قاعده‌ی تولید مثل فرزندان یک گونه توسط والدین، یک الگوریتم منظم را تبیین می‌کرد که بعدها پایه و اساس بسیاری از شاخه‌های علوم مختلف گردید. تاجاییکه در مسائل مهندسی با کاربرد در روش‌های بهینه‌سازی تحت عنوان الگوریتم ژنتیک وارد شد و سپس نقطه‌ی شروع و اساس بسیاری از روش‌های بهینه‌سازی دیگر شد. پیش از پرداختن به جزییات مراحل بهینه‌سازی طراحی ماشین توسط این الگوریتم لازم است اصطلاحات ذیل تعریف گردند:

ژن³: ژن‌ها پارامترهای تاثیرگذار بر تابع هدف هستند.

کروموزوم⁴: هر گروه از ژن‌ها که تابع هدف به ازای آنها محاسبه می‌شود یک کروموزوم یا DNA را تشکیل می‌دهد. طول یک کروموزوم برابر با تعداد پارامترهای تاثیرگذار بر تابع هدف است و بعد فضای جستجو را تعیین می‌کند. لذا وقتی راجع به فضای مساله یا فضای جستجوی n بعدی صحبت می‌شود منظور این است که هر کروموزوم شامل n ژن بوده و به عبارتی طول کروموزوم‌ها n است.

نسل⁵: کروموزوم‌ها در هر مرحله از الگوریتم ژنتیک، نسل مربوط به آن مرحله را تشکیل می‌دهند.

جمعیت⁶: تعداد کروموزوم‌های هر نسل، جمعیت نامیده می‌شود.

فرزندان⁷: نسل جدید تولید شده از نسل قبل (والدین) را فرزندان می‌نامیم.

والدین⁸: نسل تولیدکننده‌ی نسل بعد (فرزندان)، والدین هستند.

¹ Charles Darwin

² On the Origin of species

³ Gene

⁴ Chromosome

⁵ Generation

⁶ Population

⁷ Children or offspring

⁸ Parents

مسأله‌ی بهینه‌سازی طراحی را می‌توان در یک فضای n بعدی تعریف کرد که n برابر با تعداد پارامترهای بهینه‌سازی است. جواب یک مسأله‌ی بهینه‌سازی در نهایت توسط مجموعه‌ای از پارامترهای بهینه‌سازی به شکل $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ تعریف می‌شود. در الگوریتم ژنتیک (GA) هر پارامتر بهینه‌سازی (x_1 و x_2 و ...) یک ژن و هر مجموعه‌ی X متشکل از ژنهای یک کروموزوم نامیده می‌شود. در روش GA جستجو در فضای مسأله توسط یک روش تکاملی انجام می‌گیرد. ابتدا جمعیت اولیه به طور تصادفی تشکیل می‌شود. هر کروموزوم متناظر با یک نقطه در فضای مسأله است. مقدار تابع هدف برای هر کروموزوم محاسبه می‌شود. به عنوان مثال اگر حصول مقدار ماکزیمم تابع هدف مطلوب باشد، کروموزوم‌های ضعیف که مقدار تابع هدف محاسبه شده برای آنها کمتر از بقیه است حذف شده و کروموزوم‌های باقی مانده در نقش والدین، بازتولید نسل آینده یا فرزندان را بر عهده می‌گیرند. بازتولید نسل جدید توسط یکی از سه روش انتخاب، تقاطع و جهش انجام می‌گیرد که در ادامه هر روش توضیح داده خواهد شد. پس از تولید نسل جدید، دوباره مقدار تابع هدف برای هر کروموزوم محاسبه شده و روند بازتولید فرزندان توسط والدین ادامه می‌یابد. این حلقه تا وقتی تکرار می‌شود که تابع هدف حاصله از کروموزوم‌های آخرین نسل به مقدار مطلوب برسد. ضوابط این مقدار مطلوب را معمولاً توسط تعداد نسل‌ها یا اختلاف بین بهترین مقدار حاصله از دو نسل اخیر متوالی تعیین می‌نمایند [37-38-39]. گام‌های طی شده در الگوریتم ژنتیک را می‌توان به طور خلاصه به ترتیب زیر بیان کرد:

- 1- تولید تصادفی کروموزوم‌های اولین نسل
- 2- محاسبه‌ی تابع هدف برای کروموزوم‌ها و انتخاب بهترین مقادیر
- 3- اتمام الگوریتم در صورت حصول ضوابط تعیین شده برای اتمام
- 4- بازتولید نسل جدید از نسل قبل و بازگشت به مرحله دوم

بازتولید نسل جدید توسط یکی از سه روش انتخاب، تقاطع و جهش انجام می‌گیرد. در ادامه هر یک از این روش‌ها توضیح داده می‌شود.

انتخاب (selection):

معمولاً پس از انتخاب تعداد کروموزوم‌های برتر هر نسل، تعدادی از بهترین‌ها عیناً در نسل بعدی تکرار می‌شوند. این روش بازتولید را "انتخاب" می‌نامند. تعداد کروموزوم‌های برتر انتخاب شده معمولاً کمتر از 2 درصد جمعیت نسل بعد را تشکیل می‌دهد.

تقاطع (cross over):

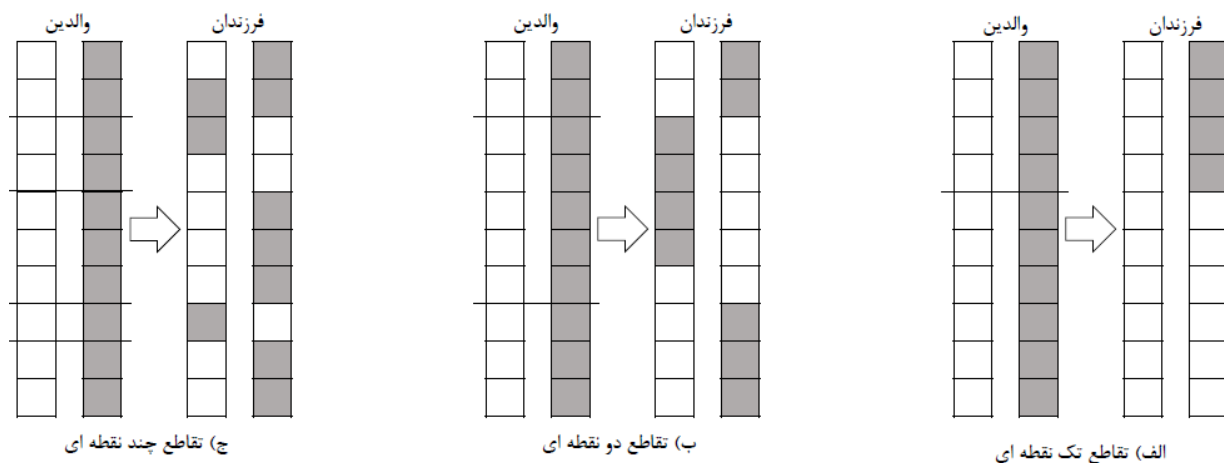
اپراتور تقاطع به گونه‌ای عمل می‌کند که 2 کروموزوم به عنوان والدین دریافت کرده و حداکثر 2 فرزند ایجاد می‌کند. هریک از فرزندان خصوصیتی را از هریک از والدینش به ارث می‌برد. در واقع کروموزوم مربوط به فرزند، بعضی از ژن‌ها را از یکی از والدین و باقی را از والد دیگرش دریافت می‌کند. اپراتور تقاطع می‌تواند تک نقطه‌ای (SPX^1)، دو نقطه‌ای (TPX^2)، و یا چند نقطه‌ای (MPX^3)

¹ Single Point Crossover

² Tow Point Crossover

³ Multi Point Crossover

باشد. شکل 3-1 هر یک از انواع اپراتورهای تقاطع را برای کروموزوم‌هایی با 10 ژن به تصویر می‌کشد.



شکل 3-1: بازتولید نسل جدید با استفاده از تقاطع

جهش (mutation):

اپراتور جهش یک روش بازتولید نسل جدید مهم به منظور حفظ تنوع کروموزوم‌ها می‌باشد. در این روش ژن‌های تشکیل دهنده کروموزوم‌های فرزندان از تغییرات جزئی و تصادفی در ژن‌های کروموزوم‌های والدین به دست می‌آید. این تغییرات تصادفی طوری انجام می‌شود که هر ژن در محدوده مجاز خود باقی بماند.

معمولاً بیش از 60% کروموزوم‌های نسل جدید از روش تقاطع و باقی کروموزوم‌ها از اعمال جهش در نسل قبل به وجود می‌آیند.

3-4- بهینه‌سازی در الگوریتم ژنتیک

در استفاده از روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک، دو گام اساسی و اولیه مورد توجه ویژه هستند: انتخاب توابع هدف و انتخاب پارامترهای بهینه‌سازی متناظر با آنها. در ادامه به شرح دقیق تابع هدف و پارامترهای دخیل در بهینه‌سازی خواهیم پرداخت.

3-4-1- تابع هدف بهینه‌سازی

ماشین ورنیر به صورت کلی یکی از ماشین‌های جدید در دنیای ماشین‌های الکتریکی می‌باشد به همین دلیل تحقیقات و آزمایش‌های انجام شده بروی این ماشین بخصوص نسبت به سایر ماشین‌های الکتریکی کمتر صورت گرفته است و از آنجایی که بازده موتور یکی از مهمترین فاکتورها در ساخت موتور می‌باشد و تاکنون نیز به ندرت در مقالات به این مسئله پرداخته شده است به همین دلیل در این پروژه

بخصوص هدف را ماکزیم سازی بازده ماشین قرار می‌دهیم و سعی می‌کنیم با توجه به مینیمم سازی در الگوریتم ژنتیک، بیشترین بازده را از موتور دریافت نماییم.

3-4-2- پارامترهای بهینه‌سازی

پارامترهای بهینه‌سازی باید به گونه‌ای انتخاب شوند که اولاً بیشترین تاثیر را بر توابع هدف گذاشته و ثانياً ارتباطی با یکدیگر نداشته باشند و یا ارتباطشان با یکدیگر در نظر گرفته شود به طوریکه اختلالی در حصول نتیجه مطلوب به وجود نیاورند. ویژگی سوم انتخاب مناسب پارامترهای بهینه‌سازی تعریف بازه‌ی قابل قبول برای آنهاست به طوری که این بازه به اندازه‌ی کافی وسیع باشد تا فضای جستجو بی دلیل محدود نگردد و نیز به طور منطقی محدود شده باشد و مقادیر غیرقابل قبول آن پارامتر را شامل نشود.

با توجه به اهمیت پارامترها به همین دلیل سعی می‌شود در ابتدا یک گذاره کلی در نظر بگیریم و سپس برای رسیدن به آن گذاره، ضرایبی که امکان بهینه شدن در راستای آن گذاره را دارند، انتخاب نماییم. از طرفی چون این پروژه قرار است به صورت کاربردی و واقع گرایانه انجام شود سعی خواهیم کرد متغیرهایی را انتخاب نماییم که متخصص طراح به سادگی و در حین انجام پروسه ساخت بتواند آنها را تغییر دهد. چرا که بعضاً دیده شده المان‌های بهینه‌سازی شده در برخی موارد به قدری دارای جزئیات طراحی می‌باشند که سایر قسمت‌های ماشین را تحت تاثیر قرار داده و در مرحله‌ی ساخت، سازنده تمایلی به تغییر آنها ندارد.

چنانچه پیش از این ذکر شد، هر یک از پارامترهای بهینه‌سازی به عنوان یک ژن شناخته شده و یک مجموعه کامل از آنها، کروموزوم را تشکیل می‌دهند. در ادامه، ژن‌ها به طور دقیق بررسی و معرفی می‌شوند.

بارپذیری مغناطیسی ویژه

بارپذیری مغناطیسی ویژه با B_g نشان داده شده و در ماشین‌های ورنیر حداکثر چگالی شار در فاصله هوایی تعریف می‌شود. انتخاب ضخامت آهنربا وابسته به بارپذیری مغناطیسی ویژه موردنظر است. در انتخاب مقدار این پارامتر باید عدم اشباع هسته‌ها را در نظر گرفت. معمولاً در چگالی شار بیش از $1/5$ تسلا هسته به اشباع نزدیک می‌شود. انتخاب مقدار کم برای بارپذیری مغناطیسی ویژه، شار فاصله هوایی کمی نتیجه می‌دهد و انتخاب مقدار بزرگ آن نیز مسائل خاص خود را دارد. محدوده‌ی بارپذیری مغناطیسی ویژه $0/4$ تا $1/2$ تسلا برای ماشین طراحی شده انتخاب گردیده است.

یوغ استاتور و یوغ رتور

محدودیت یوغ‌های استاتور و رتور از لحاظ فضای موجود برای جاسازی موتور در نظر گرفته می‌شود. و از آنجایی که در ادامه تعداد دور برای هر فاز نیز به عنوان یک پارامتر در نظر گرفته می‌شود می‌توانیم محدوده انتخاب را صرفاً با توجه به فضای ماشین در نظر بگیریم؛

قطر داخلی استاتور؛ 165mm – 140mm

قطر خارجی استاتور؛ 207mm – 194mm

قطر داخلی رتور؛ 208mm – 195mm

قطر خارجی رتور؛ 245mm – 227mm



نسبت قوس قطب به گام قطب

نسبت قوس قطب به گام قطب یک پارامتر مهم در طراحی ماشین‌های الکتریکی می‌باشد که علاوه بر نقش بحرانی این پارامتر بر گشتاور دندانه‌ای، بازده و شار مغناطیسی فاصله هوایی نیز به شدت به انتخاب صحیح این پارامتر بستگی دارد.

بازه نسبت قوس قطب به گام قطب در بسیاری از ماشین‌های الکتریکی متداول به صورت تجربی و در طی انتشار مقالات متفاوت مشخص شده است. متأسفانه ماشین ورنیر در این زمینه حاوی مقالات بسیار اندکی می‌باشد بنابراین ما نیز بازه متداول سایر ماشین‌ها را با افزودن مقداری آزادی بیشتر بین 0/70 تا 0/98 در نظر می‌گیریم.

تعداد دور برای هر فاز

افزایش تعداد دور سیم‌پیچی N_{ph} ، افزایش EMF، افزایش تلفات سیم‌پیچی، کاهش ضریب توان و افزایش راندمان را در پی دارد. بازه انتخابی باید به گونه‌ای باشد که امکان جادهی سیم‌پیچی نیز فراهم باشد، برای مشخص کردن اعداد این قسمت کفایت که سایر پارامترها را ثابت فرض کرده و تأثیر تعداد دور برای هر فاز بروی بازده خروجی را بررسی نماییم. با انجام آزمایش ذکر شده بازه انتخابی این قسمت بین 720 تا 800 دور در هر فاز می‌باشد.

طول ماشین

این پارامتر نیز به دلیل اینکه می‌تواند در طراحی و مراحل ساخت به سادگی تأثیر بپذیرد قاعدتاً می‌تواند گزینه بسیار خوبی برای بهینه‌سازی قلمداد گردد، تنها مسئله حائز اهمیت در این قسمت نیز فضای موجود برای جاسازی ماشین می‌باشد، به همین دلیل باید به گونه‌ای بازه را مشخص نماییم که ابعاد کلی ماشین بیش از اندازه بزرگ نشود، بازه انتخابی برای این قسمت 45 تا 71 میلی متر می‌باشد.

با توجه به اینکه تعداد پارامترهای تأثیرگذار بر تابع هدف بیش از دو پارامتر بوده بنابراین برای یافتن نقطه ماکزیمم نیاز به الگوریتم‌های بهینه‌سازی داریم.

در ادامه جدول محدودیت‌ها و الزامات بهینه‌سازی طراحی قرار داده شده است.

جدول 3-1: محدودیت‌ها و الزامات بهینه‌سازی طراحی

محدودیت‌های مربوط به ابعاد		
قطر داخلی استاتور	$D_{in_stator} [mm]$	$140 < D_{i-s} < 165$
قطر خارجی استاتور	$D_{out_stator} [mm]$	$194 < D_{o-s} < 207$
قطر داخلی رتور	$D_{in_Rotor} [mm]$	$195 < D_{i-r} < 208$
قطر خارجی رتور	$D_{out_Rotor} [mm]$	$227 < D_{o-r} < 245$
نسبت قوس قطب به گام قطب	α_p	$0/70 < \alpha_p < 0/98$

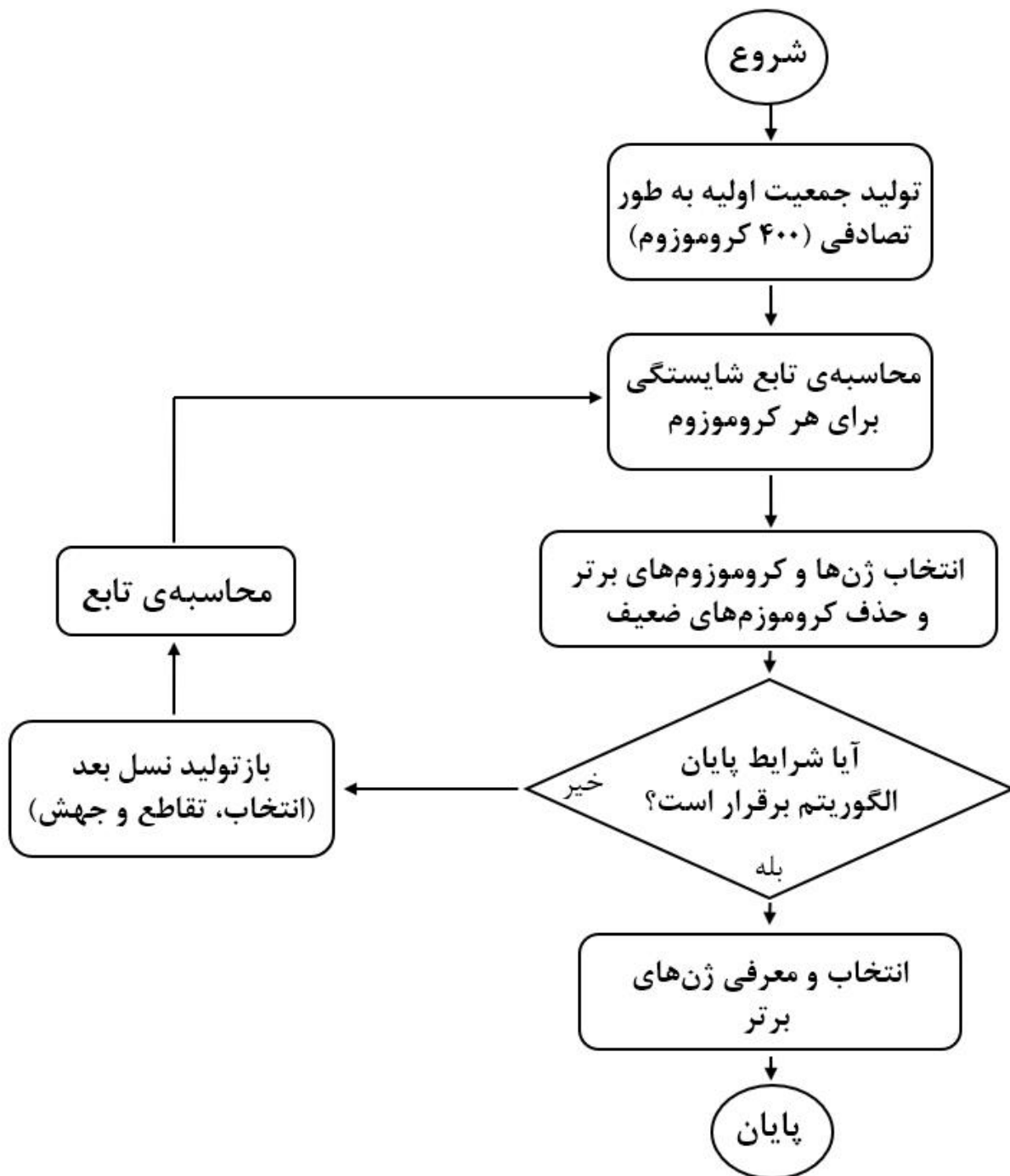
طول ماشین	L_{stk} [mm]	$45 < L_{stk} < 71$
محدودیت‌های مربوط به جنس مواد (هسته و آهنربا)		
آهنربا از جنس:	چگالی شار پسماند	B_r [T]
NdFeB	نفوذپذیری مغناطیسی نسبی	μ_r [H/m]
ماکزیم چگالی شار مجاز در هسته‌ی روتور و استاتور	B_{cr}, B_{cs} [T]	$B_{cr}, B_{cs} < B_{max} = 1/5 \tau$
الزامات بهینه‌سازی		
توان خروجی	P_{out} [W]	1000
ولتاژ نامی	V_{rms} [v]	155.56
بارپذیری مغناطیسی ویژه	B_g [T]	$0.4 < B_g < 1.2$
تعداد دور برای هر فاز	N_{ph}	$720 < N_{ph} < 800$
بازده (بیش از مقدار بهینه نشده)	η [%]	$\eta > 80\%$

3-4-3- بهینه‌سازی تابع تک هدفه (بازده)

با توجه به انتخاب 8 ژن (L_{stk} ، N_{ph} ، α_p ، D_{o-r} ، D_{i-r} ، D_{o-s} ، D_{i-s} ، B_g) کروموزوم‌های ایجاد شده دارای طول 8 آرایه (8 ژن) هستند. جمعیت هر نسل 400 بوده و به تعداد 500 نسل متوالی بهینه‌سازی پیش می‌رود. بازتولید هر نسل از نسل پیشین طوری انجام می‌شود که 2 کروموزوم از روش انتخاب، 60 درصد باقی کروموزوم‌ها از تقاطع و بقیه‌ی کروموزوم‌ها از روش جهش به دست آمده‌اند.

الگوریتم ژنتیک یکی از روش‌های احتمالی بهینه‌سازی است. لذا حصول مقدار بهینه‌ی سراسری تنها یک احتمال است که در صورت مناسب نوشته شدن تابع شایستگی، این احتمال قوی خواهد بود. با پنج بار اجرای مختلف برنامه‌ی بهینه‌سازی و حصول نتایج تقریباً یکسان از سراسری بودن جواب به دست آمده اطمینان حاصل شد.

مراحل بهینه‌سازی در طراحی شکل 3-2 توضیح داده شده است.



شکل 3-2: مراحل بهینه‌سازی

الگوریتم ژنتیک با استفاده از جعبه ابزار بهینه‌سازی نرم افزار MATLAB اجرا شد. باتوجه به اینکه MATLAB بهینه‌سازی را به منظور حصول مقدار مینیمم اجرا می‌کند، تابع شایستگی معرف بازده، به صورت رابطه‌ی (3-4) می‌باشد. به طوریکه حداقل بودن مقدار آن، حداکثر بودن بازده را نتیجه می‌دهد.

$$\text{fitness function} = -\eta$$

(4-3)

البته تابع شایستگی را می‌توان به شکل‌های دیگری هم تعریف کرد که مقدار مینیمم آنها مقدار ماکزیمم بازده را نتیجه دهد. به عنوان نمونه $1 - \eta$ و یا $\frac{1}{\eta}$ هم شکل‌های دیگری از تعریف تابع شایستگی هستند که می‌توان از آنها استفاده نمود.

نتیجه 5 مرتبه اجرای الگوریتم بهینه‌سازی (به منظور حصول اطمینان از محلی نبودن پاسخ) برای موتور ورنیر در جدول 2-3 آمده است. هر سطر کروموزوم برتر معرفی شده در یکبار اجرای الگوریتم را نشان می‌دهد. کروموزوم مشخص شده بهترین جواب (بیشترین بازده) را به دست داده و طراحی بهینه‌ی موتور بر اساس آن انجام شده است.

جدول 2-3: نتیجه 5 مرتبه اجرای الگوریتم بهینه‌سازی

Exp	η_p	L_{stk}	D_{in_s}	D_{out_s}	D_{in_r}	D_{out_r}	N_{ph}	B_g	η
1	0.931	51.72	151.78	197.41	198.32	226.73	763.17	1.08	83.43
2	0.932	50.77	150.80	197.56	198.31	226.79	764.28	1.08	83.38
3	0.933	49.98	151.61	197.49	198.29	227.08	767.61	1.06	83.36
4	0.935	51.24	151.21	197.78	198.49	226.91	768.56	1.05	83.21
5	0.936	51.69	150.91	197.52	198.32	226.70	768.41	1.05	82.98

نتیجه طراحی موتور ورنیر پس از بهینه‌سازی در جدول 3-3 مشاهده می‌شود. البته در مقادیر برخی ژن‌های معرفی شده در کروموزوم برتر، تغییرات کوچکی داده شده است. به عنوان مثال می‌توان به تعداد دور برای هر فاز اشاره کرد، در نهایت N_{ph} باید طوری انتخاب شود که حاصل نهایی آن یک عدد صحیح باشد. الگوریتم ژنتیک قادر نیست این محدودیت را در نظر بگیرد. لذا به جای عدد اعشاری حاصله، از یک عدد صحیح نزدیک به آن استفاده شده است.

جدول 3-3: مشخصات موتور ورنیر طراحی شده

طول موثر موتور (mm)	51.72	L_{stk}
قطر خارجی استاتور (mm)	197.41	D_{out_stator}
قطر داخلی استاتور (mm)	151.78	D_{in_stator}
طول فاصله‌ی هوایی (mm)	0.5	L_g

قطر خارجی روتور (mm)	226.73	D_{out_Rotor}
قطر داخلی روتور (mm)	198.32	D_{in_Rotor}
تعداد شیارهای استاتور	24	Z_s
تعداد جفت قطب آهنرباهای دائمی روتور	22	Z_r
تعداد دور هر فاز استاتور	763	N_{ph}
ضریب موثر قوس قطب آهنربا (نسبت قوس به گام قطب)	0.931	$\square_p$
ضریب توان	0.66	$\cos(\varphi)$
بازده	83.43	$\eta [\%]$
تعداد قطب رتور	44	P_r
تعداد شیار	24	n_s
تعداد قطب استاتور	4	P_s
تعداد شیار هر فاز به ازای هر قطب	2	q
ضریب توزیع سیم‌پیچی	0.995	K_{d1}
ضریب گام سیم‌پیچی	0.966	K_{p1}
ضریب مورب کردن شیار استاتور/رتور	1	K_{sk}
ضریب سیم‌پیچی	0.966	K_{w1}
چگالی جریان سیم‌پیچی	6	δ_{cu}
سطح مقطع هر سیم	0.478	A_{cu}
قطر سیم‌پیچی هر فاز	0.780	D
مساحت هر شیار استاتور	229.44	$A_{slot} [mm^2]$
عمق شیار استاتور	15.96	h_s
ارتفاع یوغ استاتور	15.96	h_{ys}
فرکانس	50	$f [Hz]$
توان خروجی	1	$P_{out} [kW]$

ولتاژ نامی	155.56	$V_{rms} [V]$
بارپذیری مغناطیسی ویژه	1.06	$B [T]$
حداکثر چگالی شار نقطه‌ای کار	1.08	$B_g [T]$
ضریب انباشتگی شیار	2.5	K_{Fill}
گام قطب	14.28	τ_p
گام شیار استاتور	26	τ_d
زاویه الکتریکی گام شیار استاتور	15	σ
زاویه الکتریکی گام سیم‌پیچی استاتور	150	$\xi [Deg]$
عرض شیار استاتور	15.6	w_o
عرض دهانه‌ی شیار به گام شیار	0.6	c_0
ضریب کارتر	0.32	β
ضخامت آهنربا	2.5	L_{pm}
عرض آهنربا	10.7	W_{pm}
ارتفاع آهنربا	12.5	H_y
نوع آهنربا	NdFeB	PM
پرمیانس فاصله هوایی	$1.364 \cdot 10^{-7}$	P_1
سرعت	136.36	rpm

3-4-4- تحلیل نتایج

با توجه به خروجی‌های مدنظر مشاهده می‌شود که بازده از عدد 80% (جدول 3-1) به عدد 83.43% افزایش یافته است، از طرفی تمامی مقادیر تعریف شده در طراحی اولیه که به عنوان پارامتر در الگوریتم ژنتیک وارد شده بودند دچار تغییراتی شده اند، این پارامترها عبارتند از: طول موثر موتور، قطر خارجی استاتور، قطر داخلی استاتور، قطر خارجی رتور، قطر داخلی رتور، تعداد دور هر فاز استاتور، نسبت قوس قطب به گام قطب و بارپذیری مغناطیسی.

افزایش اسمی بازده بیانگر موفق بودن بهینه‌سازی می‌باشد اما برای اینکه با دقت بیشتری به مسئله نگاه نماییم باید دید که تغییرات ایجاد شده بروی پارامترها چه تاثیراتی داشته اند، برای واکاوی بیشتر این مسئله باید موتور بهینه‌سازی شده را به صورت المان محدود (FEM^1) پیاده سازی و بررسی نماییم.

¹ The finite element method



فصل چهارم: مدل‌سازی موتور بهینه ورنیر به روش المان محدود

موتور ورنیر با مقادیر نامی مشخص شده در فصول گذشته طراحی و بهینه‌سازی شد. در این فصل موتور بهینه شده با مشخصات مذکور در جدول 3-3 مدل‌سازی می‌شود. برای اینکه امکان مقایسه بین طراحی اولیه و موتور بهینه‌سازی شده وجود داشته باشد باید در ابتدا اقدام به مدل‌سازی موتور معمولی کرده و سپس با تعریف کردن پارامترهای تغییر یافته، داده‌های بدست آمده تحت شبیه سازی بررسی می‌گردد.

به دلیل اینکه ماشین ورنیر مطرح شده به صورت شار شعاعی می‌باشد امکان پیاده سازی کامل آن بدون استفاده از تقریب در فضای دو بعدی فراهم است. بدین ترتیب در این فصل پس از معرفی روش اجزای محدود به شبیه سازی موتور پرداخته می‌شود. برای شبیه سازی از نسخه‌ی 16.0 نرم افزار مکسول¹ استفاده شده که به وفور مورد استفاده‌ی مهندسين طراحی ماشین است. پس از طی مراحل شبیه سازی موتور اولیه و موتور بهینه‌سازی شده، اقدام به بررسی نتایج و تغییرات ایجاد شده در المان‌های اساسی ماشین خواهد شد.

4-1- معرفی روش اجزای محدود (FEM)

دانشمندان و مهندسان از روش‌های بسیاری در حل مسائل میدانی استفاده می‌کنند. به طور کلی این روش‌ها را می‌توان در سه دسته‌ی تجربی²، تحلیلی³ و عددی⁴ جای داد. روش‌های تجربی معمولاً گران، زمان بر بوده و در بسیاری از مواقع انعطاف چندانی در تغییر پارامتر مورد بررسی ندارند. به همین دلایل گاهی عملاً استفاده از روش‌های تجربی غیرممکن است. روش‌های تحلیلی پاسخ دقیق به دست می‌دهند ولی نیازمند محاسبات طولانی و پیچیده هستند. پیچیدگی استفاده از این روش‌ها چنان است که در مسائل واقعی کاربرد آنها را غیرمعمول کرده است. روش‌های عددی گرچه جواب تقریبی به دست می‌دهند ولی محاسبات ماتریسی و ساده تری دارند که عموماً قابل برنامه نویسی کامپیوتری هستند. این روش‌ها از دقت قابل قبولی در مسائل مهندسی برخوردارند به طوری که نرم افزارهای استفاده کننده از روش‌های عددی، روز به روز بیشتر و پیشرفته‌تر می‌شوند. روش اجزای محدود که پس از این با نام FEM شناخته می‌شود، یکی از پرکاربردترین روش‌های عددی نه تنها در طراحی و شبیه سازی ماشین‌های الکتریکی بلکه در زمینه‌های مختلف علوم می‌باشد [30].

با معرفی ماشین‌هایی با ساختار پیچیده‌تر همچون ماشین‌های با تحریک آهنربای دائم یا ماشین‌های رلوکتانسی، استفاده از روش‌های تحلیل عددی همچون FEM امکان مدل سازی دو بعدی و سه بعدی ساختارهای فیزیکی غیرمعمول با ویژگی‌های غیر خطی را بدون هیچ فرض محدود کننده‌ای فراهم می‌کند.

روش اجزای محدود در تحلیل هر مساله‌ای اساساً چهار مرحله‌ی زیر را شامل می‌شود:

¹ Ansys Maxwell

² Experimental techniques

³ Analytical techniques

⁴ Numerical techniques

- ¹
- Node

اگر در فضای مورد بررسی رسانای حامل جریان وجود نداشته باشد، شدت میدان مغناطیسی توسط پتانسیل مغناطیسی اسکالر از رابطه (1-4) به دست می‌آید.

$$\vec{H} = -\nabla\Omega \quad (1-4)$$

در یک ناحیه سه بعدی همسانگرد¹ داریم:

$$(4-2)$$

$$\begin{cases} H_x = -\frac{\partial\Omega}{\partial x}, & B_x = -\mu_0\mu_r \frac{\partial\Omega}{\partial x} \\ H_y = -\frac{\partial\Omega}{\partial y}, & B_y = -\mu_0\mu_r \frac{\partial\Omega}{\partial y} \\ H_z = -\frac{\partial\Omega}{\partial z}, & B_z = -\mu_0\mu_r \frac{\partial\Omega}{\partial z} \end{cases}$$

همینطور اگر در فضای سه بعدی هیچ نشت یا ورود شار وجود نداشته باشد، دیورژانس چگالی شار صفر است. به عبارتی:

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3-4)$$

که در فرم اسکالر می‌توان گفت:

$$\frac{\partial B_x}{\partial x} + \frac{\partial B_y}{\partial y} + \frac{\partial B_z}{\partial z} = 0 \quad (4-4)$$

با جایگذاری رابطه‌ی (2-4) در رابطه‌ی فوق داریم:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-\mu_0\mu_r \frac{\partial\Omega}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-\mu_0\mu_r \frac{\partial\Omega}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-\mu_0\mu_r \frac{\partial\Omega}{\partial z} \right) = 0 \quad (5-4)$$

بیان ساده‌تر رابطه (5-4) به صورت زیر است:

$$\frac{\partial^2\Omega}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\Omega}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\Omega}{\partial z^2} = 0 \quad (6-4)$$

رابطه‌ی (6-4) بیان معادله‌ی لاپلاس است.

(مستقل از جهت ϵ) و گذردهی دی الکتریکی (σ)، رسانایی الکتریکی (μ) ناحیه‌ی همسانگرد یا ایزوتروپ به ناحیه‌ای از فضا اطلاق می‌شود که در آن مقدار نفوذپذیری مغناطیسی (μ) باشد.

ارتباط بردار چگالی شار و بردار پتانسیل مغناطیسی به صورت رابطه‌ی (7-4) بیان می‌شود:

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (7-4)$$

که در آن

$$(8-4)$$

$$\begin{cases} B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z} \\ B_y = \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x} \\ B_z = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y} \end{cases}$$

و نیز داریم:

$$\nabla \times H = \vec{J} \quad (9-4)$$

که $\vec{J}$ بردار چگالی جریان است. از رابطه‌ی (9-4) نتیجه می‌شود:

$$(10-4)$$

$$\begin{cases} J_x = \frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z} \\ J_y = \frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x} \\ J_z = \frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y} \end{cases}$$

با استفاده از رابطه‌ی $\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J} \quad (11-4)$$

اگر چگالی جریان در جهت محور Z باشد (A_x و A_y اعداد ثابت هستند)، برای A_z داریم:

$$B_x = \frac{\partial A_z}{\partial y}, \quad B_y = -\frac{\partial A_z}{\partial x} \quad (12-4)$$

با در نظر گرفتن رابطه‌ی (4-11) در فضای همسانگرد، رابطه‌ی زیر را به دست می‌آوریم:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu_0 \mu_r} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z \quad (4-13)$$

در نتیجه:

$$\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} = -\mu_0 \mu_r J_z \quad (4-14)$$

رابطه‌ی (4-14) همان معادله‌ی پواسون است. لازم به ذکر است که مولفه‌های بردار چگالی شار مغناطیسی ($\vec{B}$) به گرادیان مولفه‌های بردار پتانسیل مغناطیسی ($\vec{A}$) بستگی دارند [41].

به طور خلاصه، سلسله روابط فوق نشان دادند برای به دست آوردن چگالی شار ابتدا پتانسیل مغناطیسی از روابط تعریف شده‌ای به دست آمده و سپس با توجه به رابطه‌ای که بین چگالی شار و پتانسیل مغناطیسی حاکم است، بردار چگالی شار به دست می‌آید. سپس با استفاده از آن، سایر پارامترهای مورد نیاز محاسبه می‌شوند.

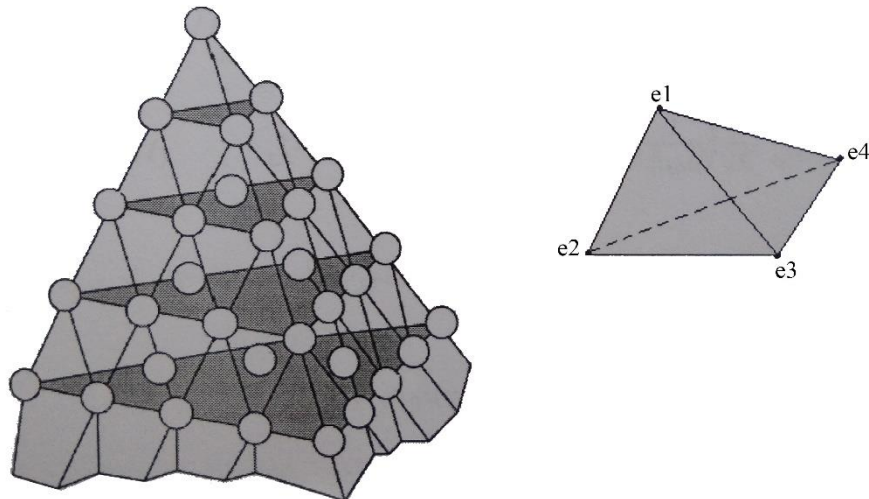
3-1-4- اعمال روابط به مش‌ها و حصول دستگاه معادلات

معادله دیفرانسیل با مشتقات جزئی برای یافتن شار مغناطیسی داخل هسته‌ی یک ماشین الکتریکی به صورت رابطه‌ی (4-15) بیان می‌شود.

$$\nabla \times v(\nabla \times A) = -J + j\sigma\omega A \quad (4-15)$$

در رابطه‌ی فوق A بردار پتانسیل مغناطیسی، J چگالی جریان سیم‌پیچ‌های ماشین، ω فرکانس زاویه‌ای، σ رسانایی الکتریکی ویژه و $v = 1/\mu$ مقاومت مغناطیسی ویژه (عکس نفوذپذیری مغناطیسی) است.

برای حل معادله‌ی (4-15) به روش FEM در یک ناحیه‌ی دلخواه مانند ناحیه نشان داده شده در شکل 4-1، ابتدا ناحیه را به تعدادی مش هر می (چهار وجهی) تقسیم کرده به طوری که مش‌ها با هم همپوشانی نداشته باشند.



شکل 4-1: مش بندی یک ناحیه دلخواه از فضا

به این ترتیب هر ناحیه دلخواه به M المان و N گره تقسیم می‌شود. ابتدا در صدد یافتن توزیع پتانسیل المان e ام که آن را با $A^e(x, y, z)$ نشان می‌دهیم، هستیم. توزیع پتانسیل در کل ناحیه مذکور از رابطه‌ی (4-16) محاسبه می‌شود:

$$A(x, y, z) = \sum_{e=1}^M A^e(x, y, z) \quad (4-16)$$

اگر فرض شود که در هر المان تغییرات بردار پتانسیل به صورت خطی است، در هر نقطه داخل فضای هر می هر المان داریم:

$$A^e(x, y, z) = a + bx + cy + dz \quad (17-4)$$

البته کوچکتر انتخاب کردن المان‌ها (که طبعاً تعداد آنها را افزایش خواهد داد) دقت تقریب فوق را بالاتر خواهد برد.

با توجه به رابطه (17-4) چون پتانسیل برداری به صورت خطی تغییر می‌کند، چگالی شار مغناطیسی، با توجه به رابطه‌ی (7-4)، داخل هر المان مقدار ثابتی خواهد داشت.

با حل معادلات فوق و همچنین اعمال شرایط مرزی، معادله‌ی توزیع پتانسیل برداری برای هر المان هر می شکل بر حسب پتانسیل گره‌های آن طبق رابطه‌ی (18-4) به دست خواهد آمد. پتانسیل گره‌ها از شرایط مرزی حاصل می‌شوند که در بخش بعد به آن پرداخته می‌شود.

$$K_{4 \times 4}^e \cdot A_{4 \times 1}^e = g_{4 \times 1}^e \quad (4-18)$$

در رابطه‌ی (18-4)، $K_{4 \times 4}^e$ ماتریس سختی عنصر e ام، $A_{4 \times 1}^e$ بردار پتانسیل گره‌های عنصر e ام و $g_{4 \times 1}^e$ بردار تحریک و ناشی از منابع ورودی می‌باشد. از ترکیب ماتریس‌های مربوط به تک‌تک

المان ها، ماتریس کلی که دستگاه معادلات نهایی را تشکیل می‌دهد، به دست می‌آید. با فرض دارا بودن N گره و M المان در کل فضای سه بعدی مورد بررسی، ماتریس سختی کل یک ماتریس $N \times N$ خواهد بود. رابطه‌ی (19-4) دستگاه معادلات کل به دست آمده را نشان می‌دهد.

$$K_{N \times N}^e \cdot A_{N \times 1}^e = g_{N \times 1}^e \quad (19-4)$$

با حل دستگاه فوق و مشخص شدن مقدار پتانسیل در تمام گره‌ها می‌توان با استفاده از رابطه‌ی (17-4) پتانسیل را در تمام نقاط فضای مورد بررسی به دست آورد.

با به دست آوردن پتانسیل مغناطیسی می‌توان چگالی شار، شار، گشتاور و ... را محاسبه نمود.

4-2- شرایط مرزی

شرایط مرزی اعمالی به مرزهای فضای مورد بررسی را در سه دسته می‌توان بررسی نمود:

شرط مرزی دیریکله¹: با این شرط مرزی مقدار بردار پتانسیل مغناطیسی در یک نقطه مشخص برابر با مقدار از پیش تعیین شده‌ای قرار می‌گیرد. شرط مرزی دیریکله خطوط شار را وادار به موازی شدن با مرزها می‌کند. شرط مرزی دیریکله با رابطه‌ی (20-4) بیان می‌شود. در این رابطه P عدد ثابت برقرار کننده‌ی شرط مرزی برای بردار پتانسیل مغناطیسی است.

$$\begin{cases} \vec{A} = P; & \text{شرط مرزی دیریکله غیر هموژن} \\ \vec{A} = 0; & \text{شرط مرزی دیریکله هموژن} \end{cases} \quad (20-4)$$

شرط مرزی نیومن²: این شرط مرزی مشتق مرتبه اول بردار پتانسیل مغناطیسی را برابر با صفر می‌کند. به این معنی که خطوط شار مغناطیسی به طور عمود، مرز دارای شرط نیومن را قطع می‌کنند. رابطه‌ی زیر بیان شرط مرزی نیومن است. در این رابطه n بردار یکه‌ی در جهت عمود بر مرز است.

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial n} = 0 \quad (4-21)$$

شرط مرزی تقارن³: در شرایطی که مدل ماشین مورد بررسی دارای تقارن باشد، می‌توان یکی از بخش‌های متقارن را حذف کرده و تحلیل FEM را فقط برای یکی از بخش‌های متقارن انجام داد. به این ترتیب حجم محاسبات کاهش قابل ملاحظه‌ای داشته و سرعت تحلیل افزایش می‌یابد. مرزهای بخش

¹ Dirichlet boundary condition

² Neumann boundary condition

³ Symmetry boundary condition

متقارن باقی مانده برای تحلیل شرایط مشابهی دارند. در این مرزها از شرایط مرزی تقارن استفاده می‌شود.

3-4- مدلسازی موتور ورنیر آهنربای دائم با استفاده از FEM

مراحل تحلیل به روش FEM عبارت است از:

الف) مرحله‌ی پیش پردازش:

- تعریف و ترسیم ساختمان ماشین الکتریکی
- تعیین جنس مواد در هر قسمت (فولاد برای هسته، مغناطیس دائم از جنس NdFeB برای آهنربای دائم، مس برای هادی‌ها و هوا)
- تعیین شرایط مرزی

ب) مرحله‌ی پردازش:

- مش‌بندی ساختار تعریف شده
- تشکیل دستگاه معادلات
- حل دستگاه معادلات و محاسبه‌ی پتانسیل مغناطیسی در هر گره

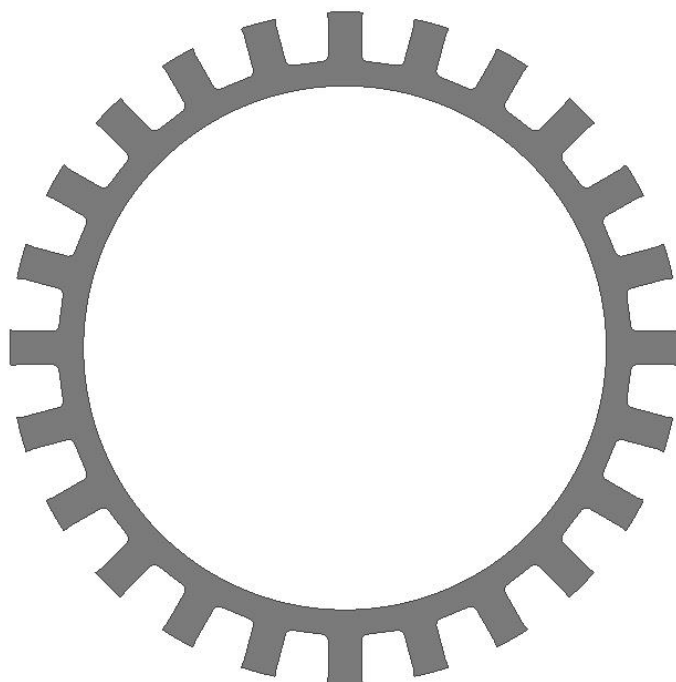
ج) مرحله‌ی پس از پردازش:

محاسبه کمیت‌های مورد نظر با استفاده از بردار پتانسیل مغناطیسی نظیر چگالی شار مغناطیسی، شار مغناطیسی، نیرو محرکه‌ی القایی و ...

در ادامه هر یک از مراحل فوق برای موتور شار محوری آهنربای دائم با ساختار استاتور میانی، دارای 44 قطب و 24 شیار، شرح داده می‌شود.

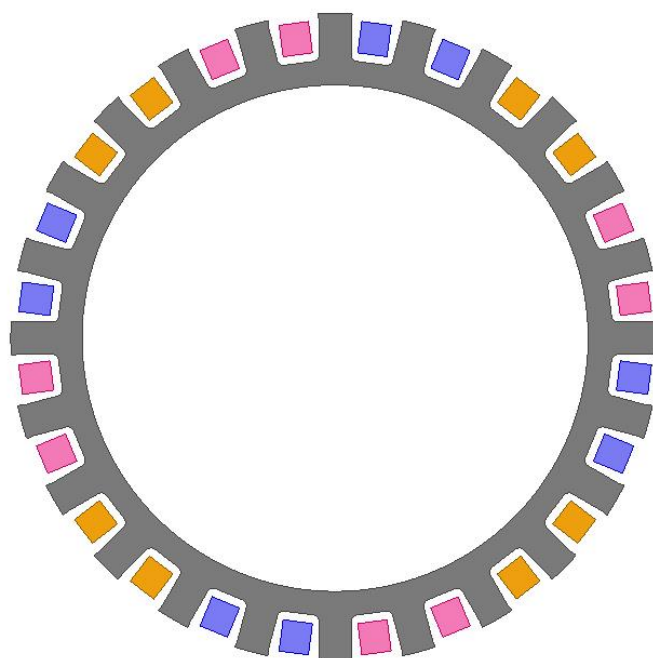
3-4-1- مرحله‌ی پیش پردازش

ابتدا ساختار استاتور با 24 شیار رسم شد. شکل 2-4 هسته‌ی استاتور را نمایش می‌دهد.



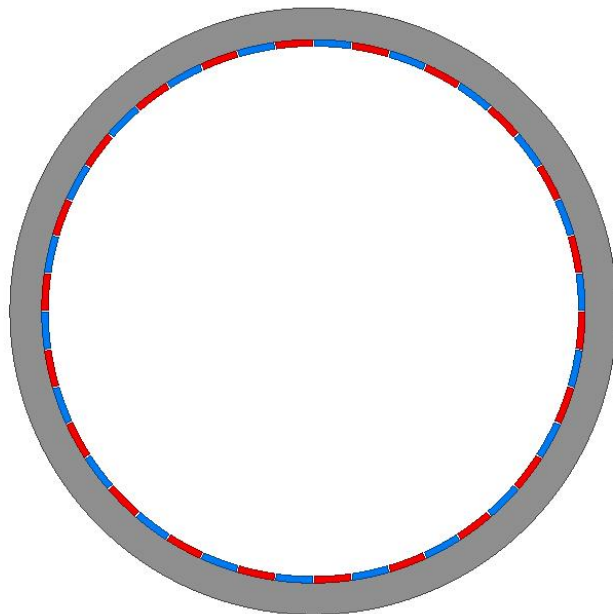
شکل 2-4: نمای ساختار استاتور

سیم بندی انتخاب شده از نوع متمرکز بدون همپوشانی و تک لایه است. شکل 3-4 استاتور فوق را پس از انجام سیم‌پیچی نمایش می‌دهد.



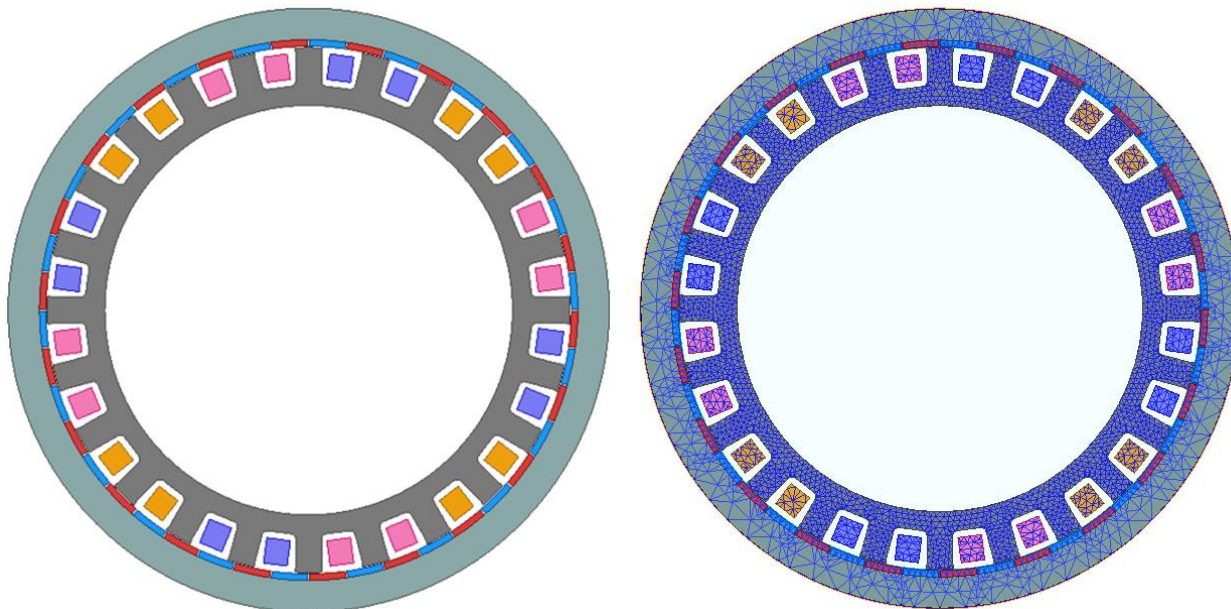
شکل 3-4: نمای استاتور سیم‌پیچی شده

هسته‌ی روتور دارای 44 قطب ساخته شده از آهنربای دائم قرار داده شده روی سطح هسته می‌باشد. شکل (4-4) نمایی از روتور به همراه قطب‌های آن می‌باشد.



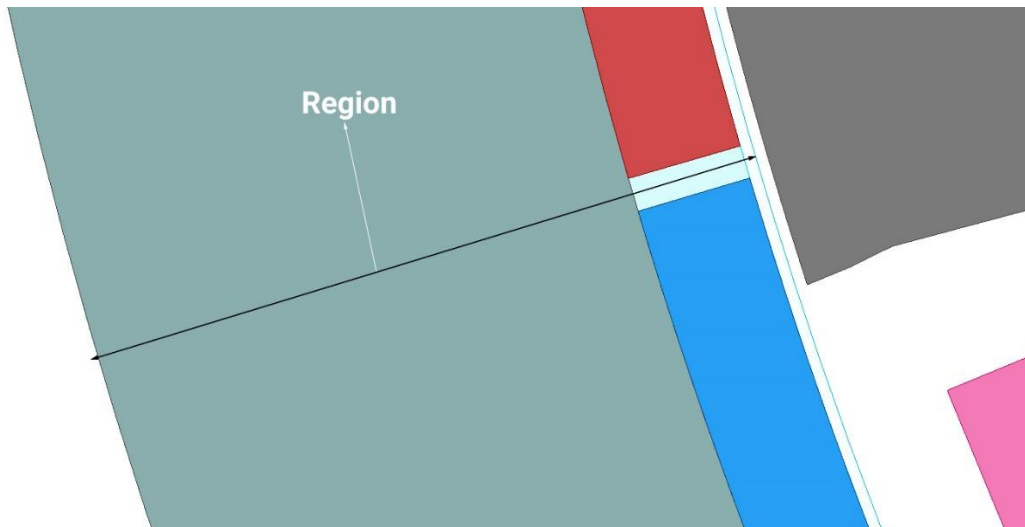
شکل 4-4: هسته‌ی روتور به همراه آهنرباهای مربوط به آن

ساختار نهایی موتور ورنیر آهنربای دائم به صورت شکل 4-5 می‌باشد.



شکل 4-5: مش بندی و نمای دوبعدی موتور ورنیر آهنربای دائم با 44 قطب و 24 شیار

بخشی از فضا که موتور در آن قرار گرفته و شرایط مرزی برای آن تعریف می‌شود (Region) در شکل 4-6 نمایش داده شده است. شرط مرزی دیریکله‌ی هموزن برای تمام مرزهای این ناحیه تعریف شده است.



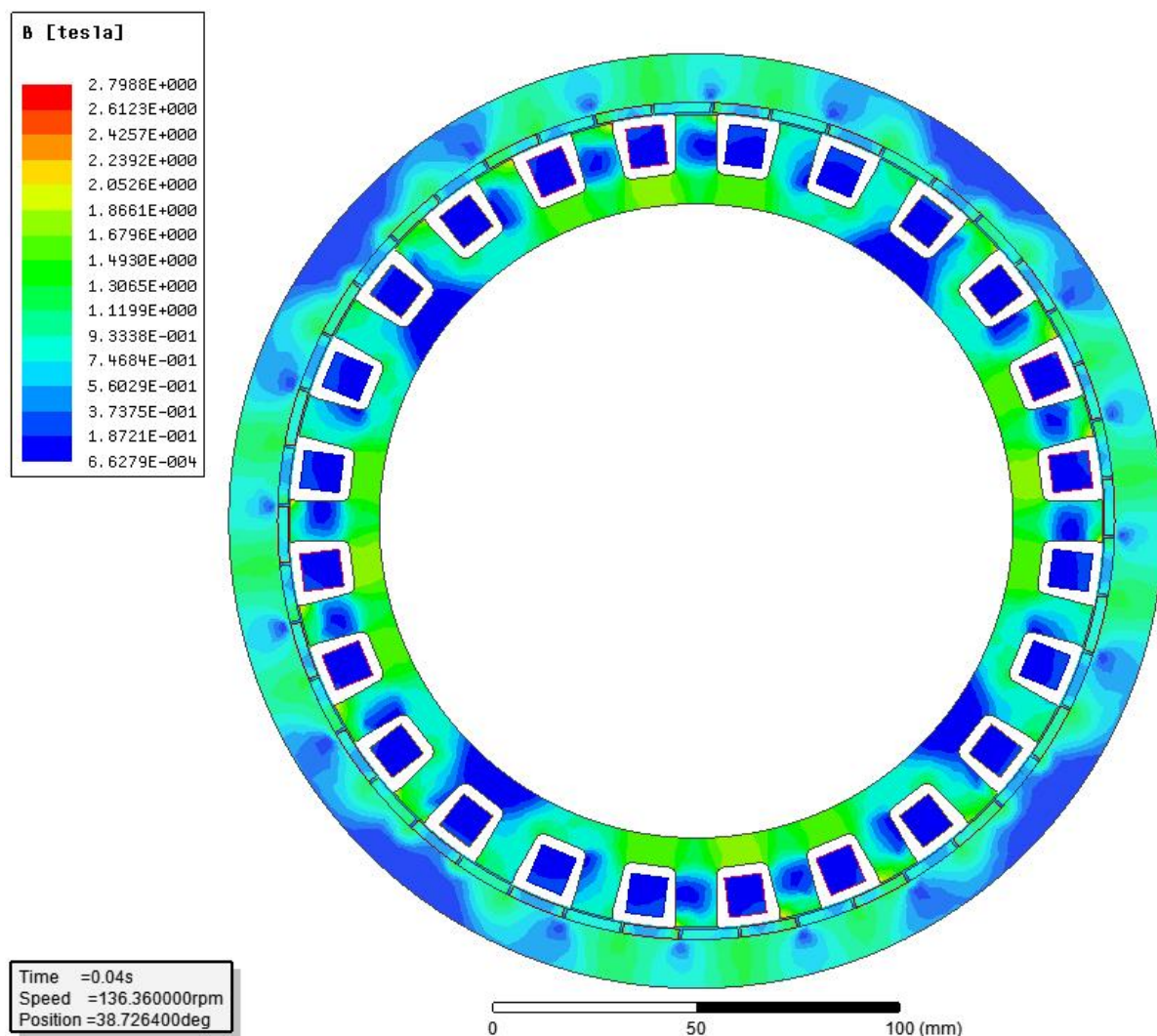
شکل 4-6: نمونه‌ای از فضای مرزی تعریف شده در موتور ورنیر مغناطیس دائم

4-3-2- مرحله‌ی پردازش

اولین مرحله‌ی پردازش، مش بندی ساختار ماشین است. نرم افزار مکسول به طور خودکار قادر است مش بندی را انجام دهد. اما بهتر است تنظیمات تعریف شده‌ی نرم افزار را طوری تغییر داد که بسته به خروجی موردنظر مش بندی بعضی نواحی ریزتر باشد تا دقت نتایج افزایش یابد. واضح است که مش بندی در نواحی نزدیک به فاصله‌ی هوایی و دندانه‌ها که از اهمیت بیشتری برخوردارند، کوچکتر از سایر نواحی است.

شدت میدان مغناطیسی محاسبه شده برای هر نقطه در شکل 4-7 نمایش داده شده است. با نزدیک شدن به آهنربا که منبع تولید شار مغناطیسی هستند، شدت میدان مغناطیسی نیز افزایش می‌یابد.





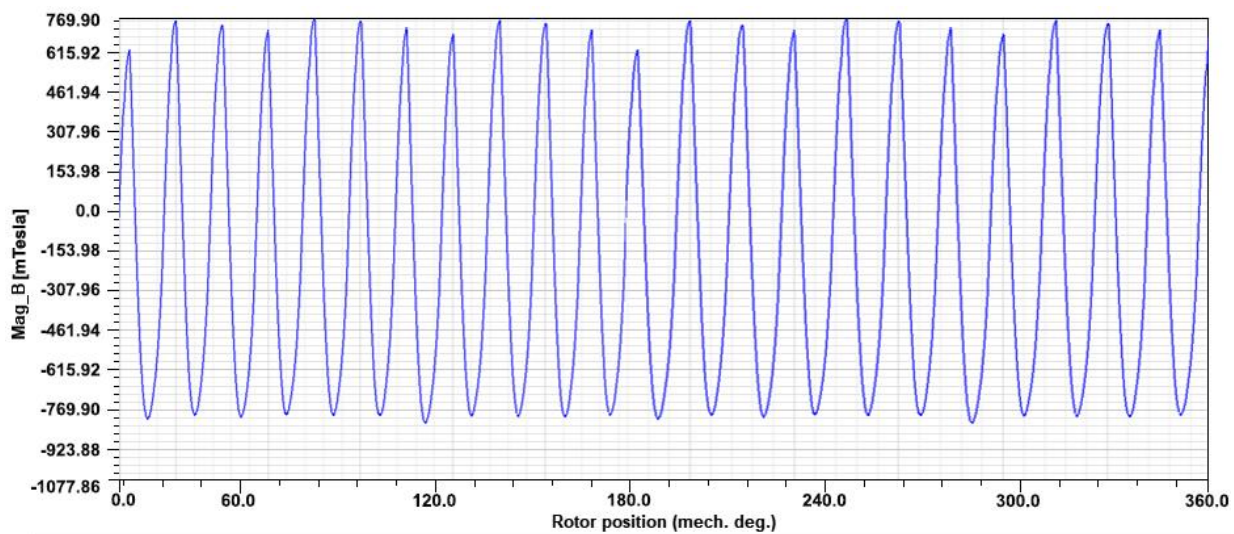
شکل 4-7: شدت میدان مغناطیسی در هر نقطه از ساختار موتور

4-4- تحلیل موتور ورنیر در FEM

در این قسمت به تحلیل مقادیر موتور در نرم افزار مکسول پرداخته می‌شود.

4-4-1- چگالی میدان مغناطیسی در فاصله هوایی

چگالی میدان مغناطیسی در فاصله هوایی یکی از مهمترین پارامترهای موجود در طراحی ماشین می‌باشد و به صورت کلی سعی می‌شود در بهینه‌سازی ماشین، بیشترین چگالی میدان مغناطیسی را در فاصله هوایی ایجاد نماییم.



شکل 8-4: چگالی میدان مغناطیسی فاصله هوایی پس از بهینه‌سازی

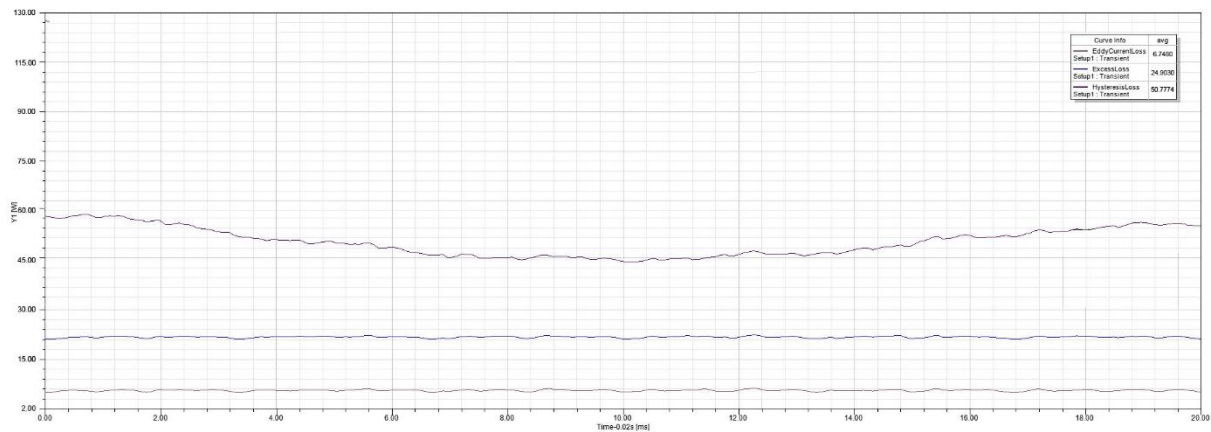
همانگونه که در تصویر 8-4 مشاهده می‌شود چگالی میدان مغناطیسی در فاصله هوایی پس از بهینه‌سازی به صورت میانگین برابر 763.181mT می‌باشد.

2-4-4- تلفات

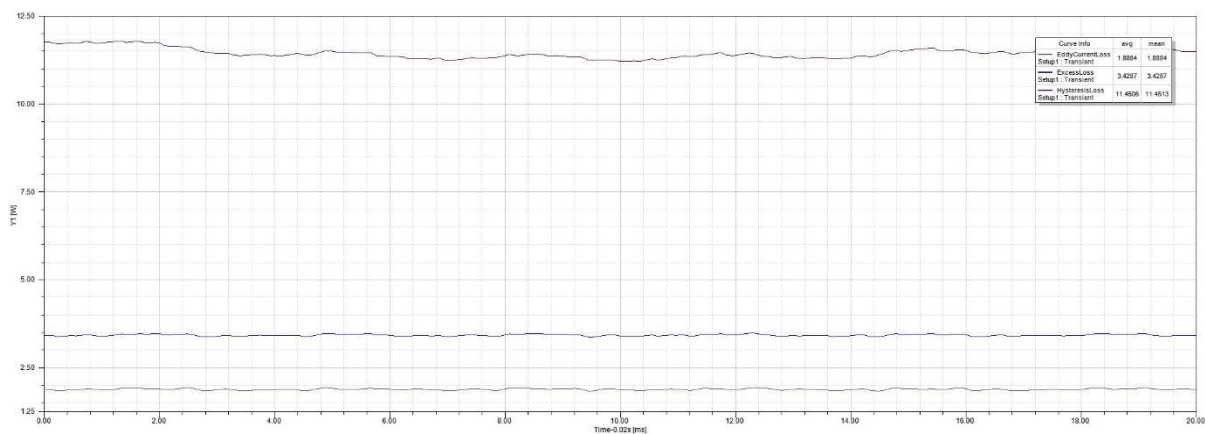
بدون شک در بهینه‌سازی، کاهش تلفات یکی از مهمترین اهداف می‌باشد چرا که به صورت مستقیم بروی بازده تاثیر خواهد داشت. در این قسمت تمامی تلفات قبل و بعد از بهینه‌سازی با یکدیگر مقایسه می‌شود. قبل از اینکه به بررسی نمودارها پرداخته شود توضیح مختصری در مورد تلفات بررسی شده در طی این بهینه‌سازی ارائه می‌شود؛

تلفات هسته (Core Loss)

زمانی که هسته به دلیل استفاده از جریان AC تحت تاثیر تغییرات مغناطیسی قرار بگیرد این نوع از تلفات آشکار خواهد شد که معمولاً به صورت گرما خود را نشان می‌دهد، دقت داشته باشید که برخی مواقع به تلفات هسته تلفات آهنی نیز گفته می‌شود. در ادامه تلفات محاسبه شده در این موتور بررسی خواهد شد؛



شکل 4-9: تلفات موتور قبل از بهینه‌سازی



شکل 4-10: تلفات موتور پس از بهینه‌سازی

تلفات پسماند (Hysteresis losses)

تلفات هیستریزیس در اثر خاصیت پس ماند مغناطیسی در هسته ایجاد می‌شود. به این معنی که عبور شار مغناطیسی از هسته آهنی در یک جهت، باعث می‌شود هسته به مقدار کمی مغناطیسی شده و در نتیجه در نیم سیکل بعدی مقداری انرژی برای از بین بردن خاصیت آهن ربایی نیم سیکل قبل تلف شود و این عمل دائماً تکرار می‌شود. مقدار تلفات هیستریزیس بستگی به فرکانس داشته و در فرکانس‌های پایین مقدار آن کم است. و مقدار آن با افزایش فرکانس به شدت افزایش می‌یابد. به علت تلفات گردابی و هیستریزیس، در فرکانس‌های بالا معمولاً از هسته با پودر آهن، فریت و یا هسته هوایی استفاده می‌شود. از این نظر هسته هوایی بهترین است چرا که تلفات مزبور در آن تقریباً صفر است. بروی کاغذ و مباحث تئوری تلفات هسته در واقع مجموع تلفات پسماند و تلفات جریان گردابی می‌باشد با این حال در نرم افزار مکسول این دو مورد به صورت مستقل از هم برای دقت بیشتر محاسبه می‌شوند. در اینجا نیز قبل از بهینه‌سازی تلفات پسماند عددی برابر 50.77w بوده که پس از بهینه‌سازی این مقدار نیز به صورت کاهشی به عدد 11.45w رسیده است.

تلفات جریان گردابی (Eddy current)

در فیزیک، جریان گردابی (Eddy current) یا جریان فوگو به جریان‌های الکتریکی گردشی و پراکنده‌ای گفته می‌شود که در یک رسانا در اثر یک میدان مغناطیسی متغیر با زمان، القاء می‌شود. متغیر بودن این میدان مغناطیسی می‌تواند به دلیل یک جریان متناوب، یا حرکت رسانا و میدان نسبت به هم باشد.

هنگامی که یک رسانا در معرض تغییر میدان مغناطیسی ناشی از حرکت نسبی منبع میدان و رسانا، یا تغییر خود میدان در اثر یک جریان متناوب قرار می‌گیرد، جریان‌های گردشی پراکنده (گردابی) در رسانا پدید می‌آیند (جریان القاء می‌شود). این جریان‌های گردابی به نوبه خود، میدان‌های مغناطیسی تولید می‌کنند که با تغییر میدان مغناطیسی اولیه، بر اساس قانون لنز مخالفت می‌کنند، بنابراین باعث ایجاد نیروهای دافعه و جاذبه بین رسانا و مغناطیس می‌شوند.

اصطلاح جریان گردابی از جریان‌های مشابه در آب گرفته شده است. این جریان‌ها در هنگام پارو زدن در آب به وجود می‌آیند.

جریان‌های گردابی درون هسته، مانند جریان الکتریکی، گرما و نیروی مغناطیسی تولید می‌کنند. این گرما را می‌توان برای گرمایش القایی به کار برد. جریان‌های گردابی همچنین عامل شنواری (Levitation) در آبرساناها (Superconductor) هستند. جریان‌های گردابی، تأثیرات نامطلوبی هم دارند، از جمله اتلاف توان در مبدل‌ها و ترانسفورماتورها که با لایه لایه کردن (Laminating) رساناها، این تلفات به حداقل می‌رسند.

جریان‌های گردابی، عامل اثر پوستی (Skin effect) در رساناها هستند. از اثر پوستی می‌توان برای تست غیرمخرب ویژگی‌های هندسی مواد از جمله ترک‌های کوچک استفاده کرد. همانطور که در شکل 4-9 مشاهده می‌کنید تلفات Eddy current قبل از بهینه‌سازی برابر 6.74w بوده است که پس از بهینه‌سازی به مقدار 1.88w کاهش یافته است.

تلفات Excess loss

این نیز نوعی از تلفات است که در نرم افزار Ansys Maxwell به عنوان تلفات اضافه بر سازمان معرفی می‌شود، در ادامه معادله محاسبه تلفات Excess Loss بیان شده است؛

(1-4)

$$p_e(t) = \frac{1}{C_e} k_c \left| \frac{dB}{dt} \right|^2$$

که در رابطه (1-4) C_e برابر است با؛

(2-4)

$$C_e = (2\pi)^{1.5} \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \cos^{1.5} \theta d\theta$$

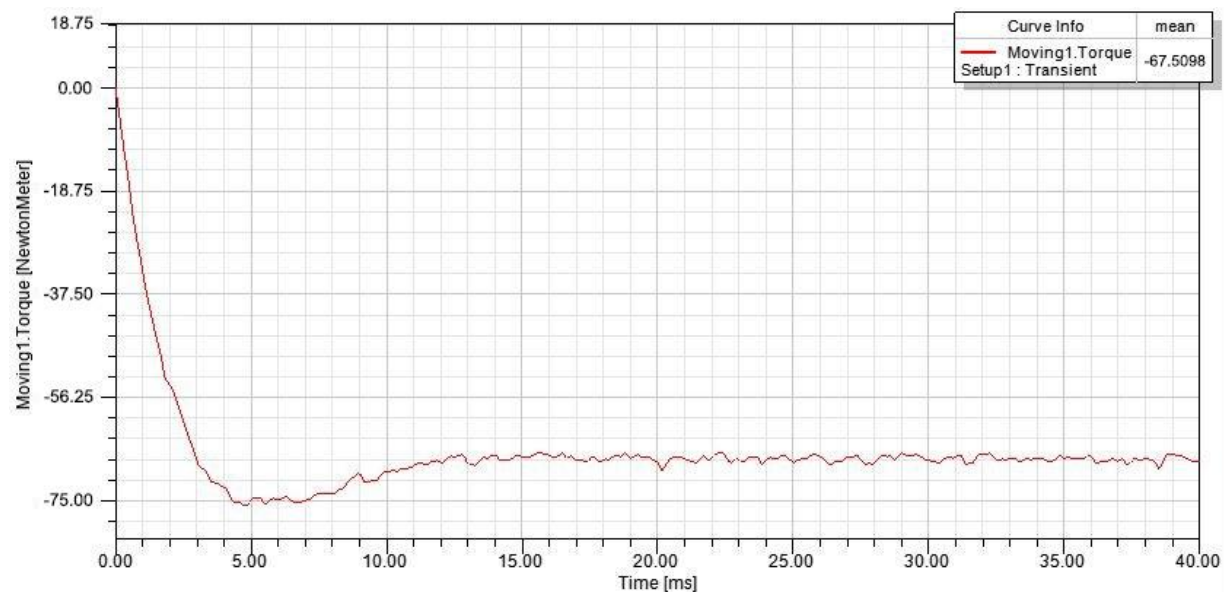
همانطور که در شکل 4-9 نیز مشاهده می‌شود تلفات Excess Loss پیش از بهینه‌سازی برابر 24.90W بوده است که پس از بهینه‌سازی (شکل 4-10) این مقدار به 3.42W کاهش یافته است.

بررسی کلی بخش تلفات

همانگونه که مشاهده می‌شود در این قسمت در تمام بخش‌ها کاهش تلفات در موتور ورنیر رخ داده است بدین معنا که با بهینه‌سازی، 65.66W از توان مصرفی در بخش تلفات کاهش داده شد.

3-4-4- گشتاور

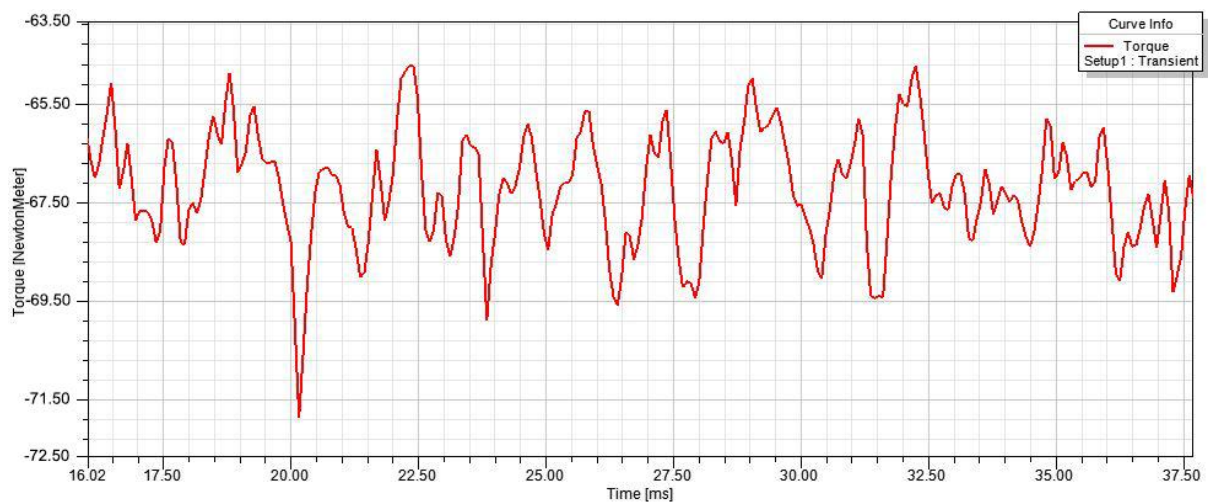
در این قسمت به بررسی گشتاور موتور پس از بهینه‌سازی پرداخته می‌شود، با توجه به سرعتی که در طراحی در نظر گرفته شد (136.36rpm) و اینکه موتور با توان یک کیلووات دوران می‌کند، گشتاور مورد انتظار باید 70.06 N.m باشد، با توجه به شکل 4-11 مشاهده می‌شود که موتور با مقدار متوسط گشتاور 67.50 N.m در حال دوران می‌باشد که به معنای درصد خطای قابل قبول 3.64% می‌باشد.



شکل 4-11: گشتاور موتور ورنیر پس از بهینه‌سازی

4-4-4- رپیل گشتاور

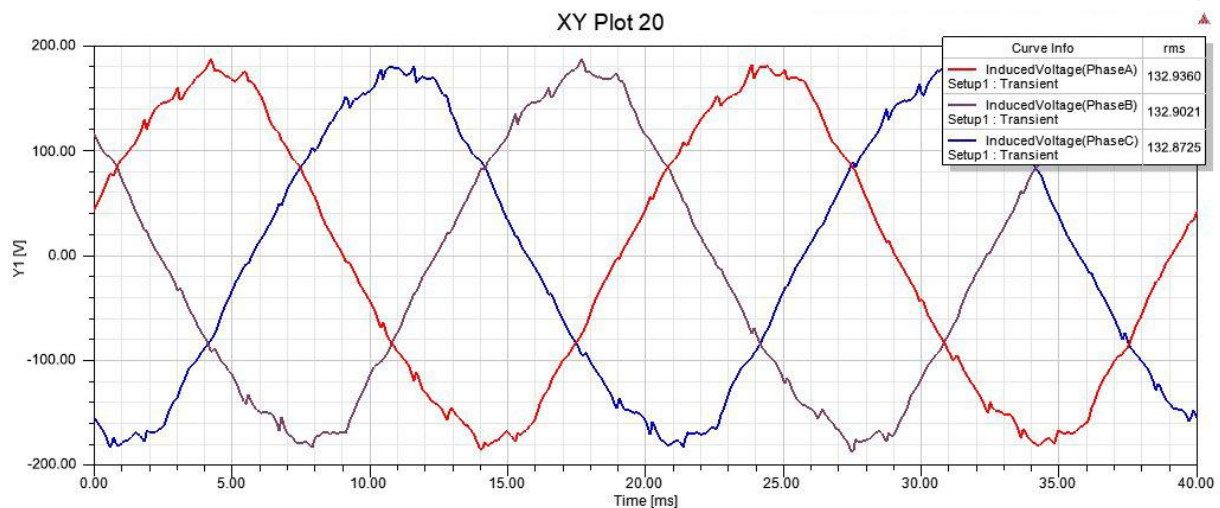
رپیل گشتاور اثری است که در اکثر ماشین‌های الکتریکی دیده می‌شود و به افزایش و کاهش دوره‌ای گشتاور خروجی در محور (شفت) چرخنده موتور باز می‌گردد. مقدار آن با بررسی اختلاف بین حداکثر و حداقل گشتاور در یک دوره به دست می‌آید و معمولاً به صورت درصد نمایش داده می‌شود. برای محاسبه رپیل گشتاور در نرم افزار مکسول، مقدار گشتاور بدست آمده شده را بروی میانگین (Mean) گشتاور تقسیم می‌شود، همانطور که در تصویر 4-12 مشاهده می‌شود پس از بهینه‌سازی رپیل گشتاور 5.94% می‌باشد. پایین بودن رپیل گشتاور می‌تواند تاثیر بسزایی بروی عملکرد و طول عمر ماشین در درازمدت داشته باشد، چراکه رپیل گشتاور کم، خود عاملی در جهت کاهش تلفات مکانیکی و عایق صدا می‌باشد.



شکل 12-4: ریبیل گشتاور موتور پس از بهینه‌سازی

5-4-4- ولتاژ Back-emf

در شکل 13-4 ولتاژ back-emf را مشاهده می‌کنید، همانطور که از شکل 13-4 مشاهده می‌شود شاهد یک موج با توزیع هارمونیک بسیار خوبی می‌باشیم، مقدار RMS ولتاژ در این شکل عدد 132.9 ولت می‌باشد.



شکل 13-4: ولتاژ Back-emf

5-4-4- ضریب توان

روش‌های متفاوتی برای محاسبه ضریب توان در نرم افزار مکسول وجود دارد، در این پایان نامه با قطع دادن شکل موج ولتاژ و جریان و انجام محاسبات مربوطه ضریب توان محاسبه می‌شود، در ابتدا برای داشتن یک مقایسه مناسب جریان عبوری از استاتور را در عدد 111.11444444 ضرب می‌شود، سپس دو موج ولتاژ و جریان را در یک نمودار ترسیم کرده و با نشانه گذاری محل گذر از

صفر آنها، زمان دقیق گذر از صفر هر موج را با نام‌های m_2 و m_3 تعیین می‌شود، در ادامه با توجه به اینکه هر 20 میلی ثانیه یک واحد فرکانسی می‌باشد (موتور با فرکانس 50hz کار می‌کند) با قرار دادن اختلاف m_2 و m_3 در رابطه 3-4 مقدار دقیق ضریب توان را محاسبه می‌کنیم.

(3-4)

$$\cos \frac{(m_3 - m_2)}{20 \times 10^{-3}} * 360$$

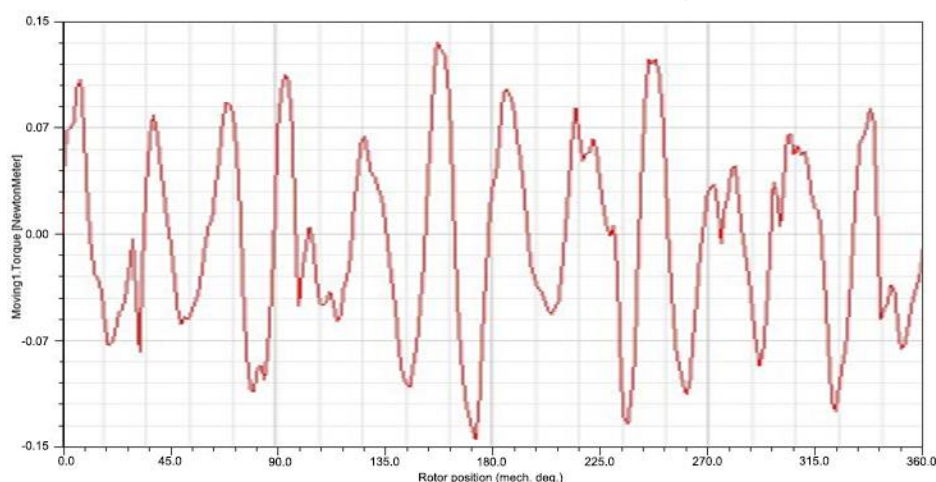
ضریب توان پس از بهینه‌سازی برابر است با 0/712 که با توجه به فرض ابتدایی و شرایط خاص موتور ورنیر عددی قابل قبول می‌باشد.

4-4-6- گشتاور دندانه‌ای

گشتاور دندانه‌ای موتورهای الکتریکی گشتاوری است که به علت اثر متقابل نیروی مغناطیسی دائمی روتور و شکافهای آهنرباهای دائمی استاتور در ماشین پدیدار می‌شود. این گشتاور همچنین به عنوان "Detent" (شیطانک) گشتاور بدون جریان شناخته می‌شود. این گشتاور وابسته به موقعیت است و به صورت دوره‌ای تولید می‌شود که بستگی به تعداد قطبها یا دندانه‌های استاتور دارد.

گشتاور دندانه‌ای به عنوان مؤلفه نامطلوب در هنگام استفاده از موتور محسوب می‌شود. مخصوصاً در سرعتهای پایین حالتی مشابه تشنج و لرزش نامنظم به موتور دست می‌دهد. این گشتاور می‌تواند باعث نوسان در سرعت چرخش موتور نیز بشود اگرچه در سرعتهای بالا فیلترهای اینرسی موتور می‌تواند این گشتاور را خنثی کند.

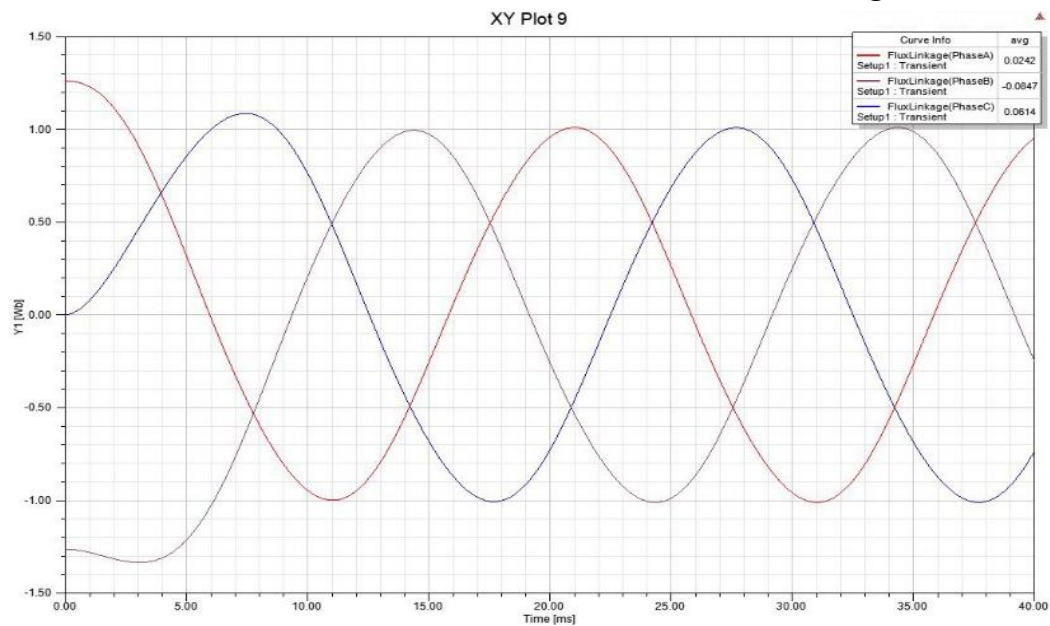
طبق شکل 4-14 گشتاور دندانه‌ای موتور 0.14 نیوتن متر می‌باشد که با توجه به گشتاور تولیدی بالای این موتور عددی بسیار مناسب می‌باشد.



شکل 4-14: گشتاور دندانه‌ای در موتور بهینه شده

6-4-4- سایر مشخصات

در پایان نیز نمودار Flux-Linkage در شکل های 4-15 آورده شده است.



شکل 4-15: Flux-Linkage در موتور بهینه شده

فصل پنجم: مقایسه تاثیر آهنربای نئودینیوم و فریت در موتور

در این فصل به بررسی تاثیر نوع آهنربای استفاده شده در موتور پرداخته می‌شود، برای شروع انواع آهنربا شرح داده می‌شود و سپس با استفاده از شبیه سازی المان محدود (FEM) به مشاهده تاثیرات آهنرباهای مذکور پرداخته می‌شود.

5-1- فریت

اولین آهنربای فریت¹ توسط دو محقق ژاپنی به نام‌های «یوگورو کاتو» (Yogoro Kato) و «تاکشی تاکی» (Takeshi Takei) از مؤسسه فناوری توکیو در ۱۹۳۰ ساخته شد. حدود بیست سال بعد در ۱۹۵۰ باریم هگزافریت ($BaFe_{12}O_{19}$) در آزمایشگاه فیزیک شرکت هلندی فیلیپس کشف شد. این کشف به صورت اتفاقی رخ داد. قرار بود نمونه‌ای از ماده‌ی لانتانیم فریت ساخته شود تا در مورد خواص نیم‌رسانایی آن تحقیق شود. در اثر اشتباه یک دستیار آزمایشگاه، ماده‌ی باریم هگزافریت ساخته شد. وقتی که متوجه شدند این ماده خاصیت مغناطیسی دارد و ساختارش را با پراش اشعه‌ی ایکس مشخص کردند، آن را به بخش پژوهش‌های مغناطیس فرستادند. از آنجا که این ماده هم ارزان بود و هم وادارندگی بالایی داشت (170KA/m)، شرکت فیلیپس در ۱۹۵۲ آن را به تولید انبوه رساند و با نام تجاری «فروکسدور» (Ferroxdure) به بازار عرضه کرد. قیمت پایین و عملکرد مناسب آن باعث توسعه‌ی سریع استفاده از آهنرباها در صنایع مختلف شد. همین شرکت در ۱۹۶۰ آهنربای «استرانسیم هگزافریت» ($SrFe_{12}O_{19}$) را عرضه کرد که توانمندتر از باریم هگزافریت بود. این دو ماده با تکیه بر عملکرد خوب و قیمت پایینشان تا دهه‌ی ۱۹۸۰ بخش عمده‌ی بازار آهنرباها را در اختیار داشتند. در دهه‌ی ۱۹۸۰ فریت $BaFe_2^{+2}Fe_{16}^{+3}O_{27}$ و در ۱۹۹۱ فریت $Ba_2ZnFe_{18}O_{23}$ ارائه شدند که عملکردی بهتر از فریت‌های قبلی داشتند.

فریت‌ها، مواد سرامیکی هستند که از ترکیب اکسید آهن و فلزهای دو ظرفیتی مانند باریم، استرانسیم، سرب، نیکل، کبالت و ... ساخته می‌شوند. فریت‌ها جزء مواد فرّی‌مغناطیسی هستند. آن‌ها سخت و شکننده‌اند و رنگشان خاکستری یا سیاه است. آهنربای طبیعی یا همان مگنتیت با فرمول Fe_3O_4 ، نمونه‌ای از یک فریت است که از قرن‌ها پیش برای ساخت قطب‌نما به کار می‌رفته‌است.

فریت‌ها، آهنرباهای چندان قوی‌ای نیستند اما به دلیل‌های مختلف از جمله قیمت ارزان‌شان، کاربردهای وسیعی در صنایع گوناگون دارند.

5-1-1- ساختار و فرمول شیمیایی

فرمول کلی فریت‌ها را می‌توان به صورت $M(Fe_xO_y)$ نوشت که در آن M یک فلز دو ظرفیتی مانند نیکل، منگنز، مس، باریم، ایتیم و ... است. از نظر ساختار ماده، فریت‌ها جز مواد چندبلوری هستند. به این معنی که از تعداد زیادی بلورهای ریز با جهت‌گیری‌های مختلف تشکیل شده‌اند. از لحاظ ساختار بلوری فریت‌ها انواع مختلفی دارند مانند فریت‌های اسپینل، گارنت، پروسکایت و هگزگونال (شش

¹ Ferrite

وجهی). برای ساخت آهنرباها از سه خانواده ی اصلی فریت ها استفاده می شود که عبارتند از: فریت های هگزائگونال، فریت های اسپینل و فریت های گارنت.

فریت های هگزائگونال

فرمول کلی آن ها به صورت $M(Fe_{12}O_{19})$ است که در آن M معمولاً باریم، استرانسیم یا سرب است. ساختار بلوری آن ها به صورت منشور شش وجهی یا هگزائگونال با یک محور عمودی است. مغناطیس شوندگی ماده در راستای این محور عمودی آسان تر از سایر محورها انجام می شود. به همین دلیل این فریت ها از لحاظ مغناطیسی جزء مواد مغناطیسی سخت محسوب می شوند. یعنی اندازه یا جهت میدان مغناطیسی آن ها به راحتی تغییر نمی کند و از این رو برای ساخت آهنرباهای دائمی مناسب اند. این خانواده را «هگزافریت» نیز می نامند. هگزافریت ها مواد اصلی ساخت آهنرباهای فریت دائمی هستند. «باریم هگزافریت» ($Ba Fe_{12}O_{19}$) با نام تجاری «فروکسدر» (Ferroxdure) نمونه ای از هگزافریت ها است.

فریت های اسپینل

فرمول کلی آن ها به صورت $M(Fe_2O_4)$ است که در آن M یکی از فلزهای منگنز، نیکل، کبالت، روی، مس یا منیزیم است. ساختار بلوری آن ها هم ریخت بلور کانی اسپینل ($MgAl_2O_4$) و مکعبی شکل است. جهت گیری بلوری تأثیری در مغناطیس ماده ندارد و به همین دلیل جزء مواد مغناطیسی نرم محسوب می شوند. یعنی اندازه یا جهت میدان مغناطیسی آن ها به آسانی تغییر می کند. از این رو برای ساخت آهنرباهای موقت مناسب اند. «نیکل فریت» ($NiFe_2O_4$) و «منگنز فریت» ($MgFe_2O_4$) نمونه هایی از فریت های اسپینل هستند.

فریت های گارنت

فرمول کلی آن ها به صورت $M_3(Fe_5O_{12})$ است که در آن M فلز ایتريم (Y) یا یک عنصر خاکی کمیاب دیگر است. ساختار بلوری آن مشابه کانی گارنت (لعل) و مکعبی شکل است. اما پیچیدگی بیشتری نسبت به ساختار اسپینل دارد و مغناطیس این ماده در جهت های مختلف نتایج متفاوتی دارد. این مواد نیز جزء مواد مغناطیسی سخت محسوب می شوند. «ایتريم آهن گارنت» (YIG) با فرمول $Y_3(Fe_5O_{12})$ نمونه ای از فریت های گارنت است که در مدارهای الکترونیکی و تجهیزات میکروویو به کار می رود.

5-1-2- فریت های سخت و نرم

از لحاظ خواص مغناطیسی، فریت ها به دو دسته ی «سخت» (آهنرباهای دائمی) و «نرم» (آهنرباهای موقت) تقسیم می شوند:

فریت های نرم

این مواد از یک سو تراوایی مغناطیسی بالایی دارند و با قرار گرفتن در یک میدان مغناطیسی خارجی به راحتی خاصیت مغناطیسی پیدا می کنند و میدان را تقویت می کنند. از سوی دیگر وادارندگی

پایینی دارند و با حذف میدان خارجی، خاصیت مغناطیسی خود را از دست می‌دهند. به عبارت دیگر مغناطش و وامغناطش این فریت‌ها به آسانی انجام می‌شود.

از این فریت‌ها در تجهیزاتی استفاده می‌شود که میدان‌های مغناطیسی متناوب ایجاد می‌کنند مانند هسته‌ی ترانسفورماتورها و القاگرهای دستگاه‌های مخابراتی و میکروالکترونیک. یک مزیت مهم فریت‌های نرم نسبت به مواد مغناطیسی نرم فلزی و رسانا این است که عایق الکتریسیته هستند. چرا که با تغییر اندازه یا جهت میدان مغناطیسی، در مواد رسانا جریان‌های الکتریکی القا می‌شود و این امر منجر به تولید گرما و اتلاف انرژی می‌شود. به این پدیده ایجاد «جریان گردابی» (Eddy Current) گفته می‌شود. عایق بودن فریت‌ها از ایجاد جریان گردابی و اتلاف انرژی جلوگیری می‌کنند.

فریت‌های سخت

فریت‌های سخت برای ساخت آهنرباهای دائمی به کار می‌روند. در این مواد نیروی وادارندگی زیاد است و پس از مغناطیسی شدن، به راحتی نمی‌توان جهت یا اندازه‌ی میدان مغناطیسی آن‌ها را تغییر داد. از این رو برای ساخت آهنربای در یخچال‌ها، بلندگوها، میکروفوها، جداکننده‌های مواد معدنی و ... استفاده می‌شوند. برای ساخت فریت‌های سخت از خانواده‌ی از فریت‌ها موسوم به «هگزافریت‌ها» استفاده می‌شود.

5-1-3- ویژگی‌ها و کاربردها

توان آهنربایی فریت‌ها چندان بالا نیست و حداکثر به ۳۰ کیلوژول بر متر مکعب می‌رسد. از این رو ایجاد میدان‌های مغناطیسی قوی به وسیله‌ی فریت‌ها به معنای استفاده از مقادیر زیادی آهنرباست؛ بنابراین در مواردی که حجم یا وزن آهنرباها باید کم باشد، نمی‌توان از آن‌ها استفاده کرد. اما برخی ویژگی‌های خاص آن‌ها باعث شده در مواردی دیگر کاربردهای وسیعی داشته باشند. فریت‌ها ارزان هستند، مواد اولیه‌شان فراوان است و پایداری شیمیایی بالایی دارند. دمای کوری^۱ آنها بالا و در حدود ۴۲۰-۴۷۵ درجه‌ی سلسیوس است و علاوه بر آن وادارندگی آن‌ها با افزایش دما نه تنها کم نمی‌شود بلکه افزایش می‌یابد. از همین رو در جاهایی که نیاز به دماهای بالا هست، می‌توان از آن‌ها استفاده کرد.

از فریت‌ها در ساخت موتورهای الکتریکی کوچک استفاده می‌شود که کاربردهای بسیاری در قطعات خودروها و ابزارهای بدون سیم مانند دریل‌ها و پیچ‌گوشتی‌های برقی و شارژی دارند. آهنرباهای بلندگوها و میکروفون‌ها و نیز در یخچال‌ها نیز از فریت‌ها هستند.

یک خاصیت مهم فریت‌ها این است که عایق الکتریسیته هستند. این ویژگی برای استفاده از آن‌ها در کاربردهایی مانند هسته‌ی ترانسفورماتورها و القاگرها بسیار مفید است. چرا که در جاهایی که میدان‌های مغناطیسی متغیر وجود دارد، تغییر میدان مغناطیسی موجب القای جریان الکتریکی در مواد رسانا و فلزها شده که این به نوبه‌ی خود باعث ایجاد گرما و اتلاف انرژی می‌شود. این پدیده را ایجاد «جریان گردابی» (Eddy Current) می‌نامند. به همین دلیل در چنین مواردی نمی‌توان از آهنرباهای فلزی استفاده کرد. اما آهنرباهای فریت به دلیل عایق بودن، جریان گردابی را به شدت کاهش می‌دهند و از اتلاف انرژی به صورت گرما جلوگیری می‌کنند.

تراوایی مغناطیسی فریت‌ها بالاست و به همین دلیل برای ساخت تجهیزاتی مانند آنتن‌ها به کار می‌روند.

^۱ Curie Point

برخی از فریت ها انرژی امواج میکروویو را فقط در یک جهت جذب می کنند و از این رو برای ساخت موجبرهای میکروویو استفاده می شوند.

5-2- نئودیمیوم¹

نئودیمیم را در سال 1885 یک شیمیدان اتریشی به نام Carl F. Auer von Welsbach در وین کشف کرد. او نئودیمیم را به همراه عنصر پرازئودیمیم از ماده ای به نام دیدیمیم جدا نمود اما تا سال 1925 حالت نسبتاً خالص این عنصر تهیه نشد. کلمه نئودیمیم از واژه های یونانی neos (جدید) و didymos (دوگانه) گرفته شده است.

امروزه بیشتر نئودیمیم از طریق فرآیند جابجایی یونی شن موناژیت ($Ce, La, Th, Nd, Y(PO_4)$) که ماده ای سرشار از عناصر خاکی کمیاب است و نیز با روش الکترولیز نمک های هالید آن تهیه می شود. نئودیمیم یک فلز خاکی کمیاب است که به مقدار 18% در فلز خاکی کمیاب قابل اشتعال وجود دارد. این فلز دارای درخشش فلزی و رنگ آن نقره ای روشن بوده و یکی از واکنش پذیرترین فلزات خاکی کمیاب به حساب می آید؛ نئودیمیم در معرض هوا به سرعت کدر شده و تولید اکسیدی می کند که باعث پوسته پوسته شدن این فلز می گردد. این امر موجب اکسیداسیون بیشتر این فلز می شود.

5-2-1- کاربرد نئودیمیوم

نئودیمیم بخشی از دیدیمیم است که در رنگ آمیزی شیشه عینک های جوشکاری به کار می رود. از نئودیمیم در رنگ آمیزی شیشه هایی که دارای یک طیف ملایم بین بنفش خالص تا قرمز و خاکستری می باشند استفاده می شود. نوری که از این شیشه ها ساطع می گردد نوار جذبی درخشانی را پدیدار می کنند. از این نوع شیشه در فعالیت های نجومی برای تولید نوارهای درخشانی که به وسیله آن ها احتمال درجه بندی خطوط طیفی وجود دارد استفاده می شود. شیشه حاوی نئودیمیم یک ماده لیزری است که به جای یاقوت برای تولید نور هموسان بکار می رود. نئودیمیم همچنین برای زدودن رنگ سبز شیشه ها که ناشی از آلاینده های آهن است مورد استفاده قرار می گیرد. نمک های نئودیمیم به عنوان رنگ افزای لعاب ها کاربرد دارند. نئودیمیم در آهن ربا های دائمی بسیار قوی $Nd_2Fe_{14}B$ بکار می روند. این نوع آهن رباها از انواع آهن ربا های کبالت - سامریم ارزانتر هستند. این آهن ربا فوق العاده قوی است و در بکارگیری آن باید نکات ایمنی را رعایت کرد زیرا می تواند باعث آسیب های جدی شود.

5-2-2- ایزوتوپ ها

نئودیمیم بطور طبیعی دارای 5 ایزوتوپ پایدار $Nd-142, Nd-143, Nd-145, Nd-146, Nd-148$ که فراوان ترین آن ها نئودیمیم 142 « فراوانی طبیعی 27/2% » و 2 ایزوتوپ پرتوزای $Nd144$ و $Nd150$ می باشد. 31 رادیوایزوتوپ هم برای این عنصر شناسایی شده که که پایدارترین آن ها نئودیمیم 150 با نیمه عمر 19 سال ($E 1/1$)، نئودیمیم 144 با نیمه عمر 15 سال ($E 29/2$) و نئودیمیم 147 با نیمه عمر 10/98 روز می باشند. مابقی ایزوتوپ های رادیواکتیو این عنصر دارای نیمه عمرهایی کمتر از 3/38

¹ Neodymium

روز هستند که بیشتر آن‌ها نیمه عمری کمتر از 71 ثانیه دارند. نئودیمیم همچنین دارای 4 حالت متا است که پایدارترین آن‌ها نئودیمیم m139 ($t_{1/25.5}$ ساعت)، نئودیمیم m135 ($t_{1/2}$ 5.5 دقیقه) و نئودیمیم m141 ($t_{1/2}$ 62 ثانیه) هستند.

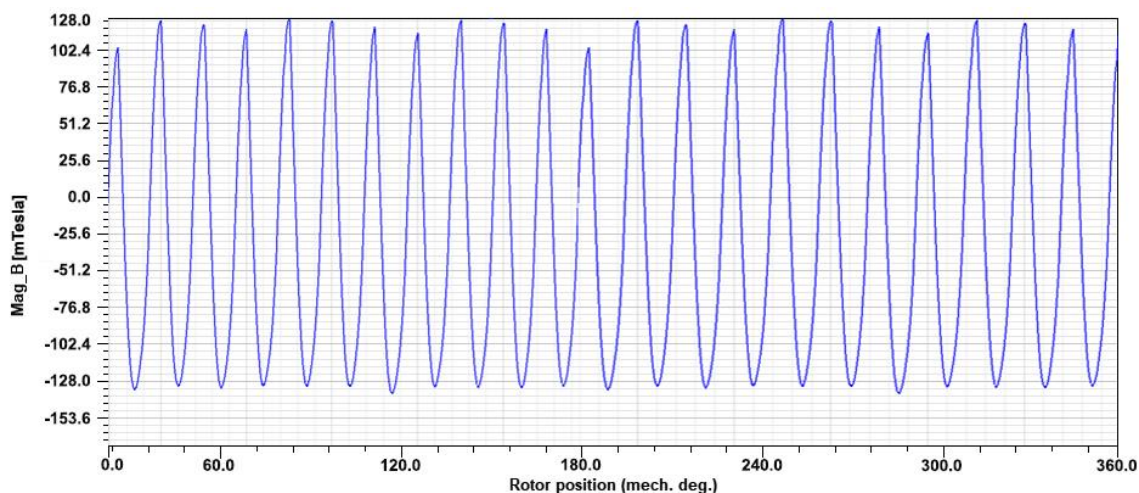
حالت فروپاشی اولیه قبل از فراوان‌ترین ایزوتوپ (نئودیمیم 142) جذب الکترون و حالت فروپاشی پس از آن فروپاشی منفی بتا می‌باشد. محصول فروپاشی اولیه قبل از نئودیمیم 142 ایزوتوپهای Pr (پرازئودیمیم) و محصولات اولیه پس از آن ایزوتوپهای سرب می‌باشد.

3-5- مقایسه تاثیر نوع آهنرباها

در این بخش به بررسی استفاده از آهنرباهای متفاوت در موتور ورنیر پرداخته می‌شود. تمامی تحلیل‌ها و مقایسه‌های انجام شده در حالی صورت گرفته است که ابعاد و حجم آهنرباها یکی بوده و تنها نوع آنها متفاوت می‌باشد. در این بخش تنها به مواردی پرداخته می‌شود که نسبت به حالت قبل دچار تغییرات شده‌اند.

3-5-1- چگالی میدان مغناطیسی در فاصله هوایی

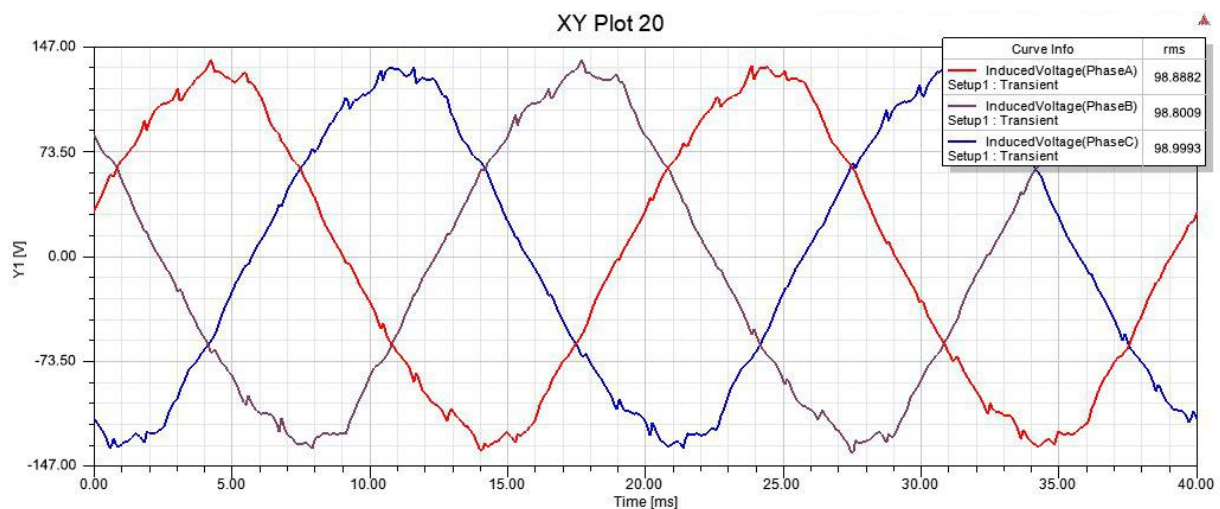
در شکل 5-1 چگالی میدان مغناطیسی در فاصله هوایی موتور ورنیر با استفاده از آهنربای فریت 128.48mT می‌باشد این مقدار باتوجه به شکل 4-8 که در آن آهنربای استفاده شده از نوع نئودیمیم می‌باشد از کاهش 83.16% برخوردار است. این کاهش بسیار چشمگیر بوده و قطعاً تبعات منفی بسیاری در پی خواهد داشت.



شکل 5-1: چگالی میدان مغناطیسی در فاصله هوایی - آهنربای فریت

3-5-2- ولتاژ القاء شده

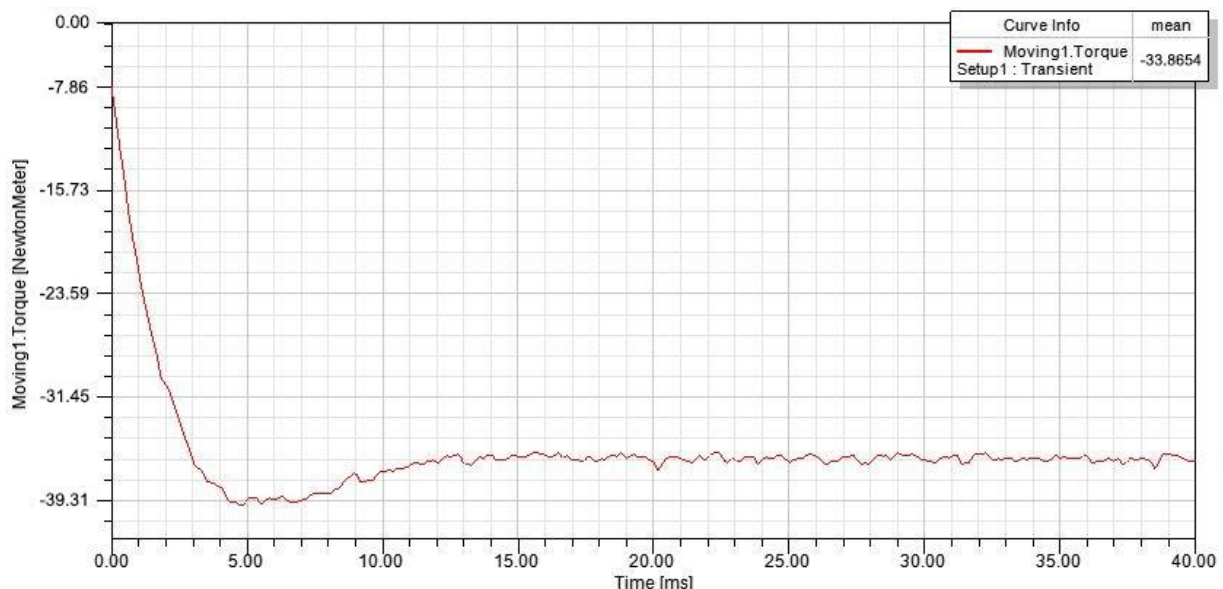
در شکل 5-2 ولتاژ القاء شده در موتور با نوع آهنربای فریت مشاهده می‌شود، با مقایسه این ولتاژ با مدل آهنربای نئودیمیم به راحتی به تاثیر بسیار بد آهنربای فریت در این قسمت می‌توان پی برد، چرا که علاوه بر افزایش مقدار موثر ولتاژ شکل موج به شدت غیر سینوسی بوده که می‌تواند در عملکرد موتور تاثیر منفی به جای گذارد.



شکل 2-5: ولتاژ القاء شده در موتور - آهنربای فریت

4-3-5- گشتاور

در شکل 3-5 گشتاور موتور ورنیر آهنربای فریت آورده شده است همانطور که ملاحظه می‌شود میانگین گشتاور در حالت آهنربای فریت در مقایسه با نئودیمیم که در شکل 4-11 آورده شده است به مقدار زیادی کاهش یافته است. گشتاور در این بخش مقدار 33.86 نیوتن متر می‌باشد. که بیانگر افت 49.83% می‌باشد.

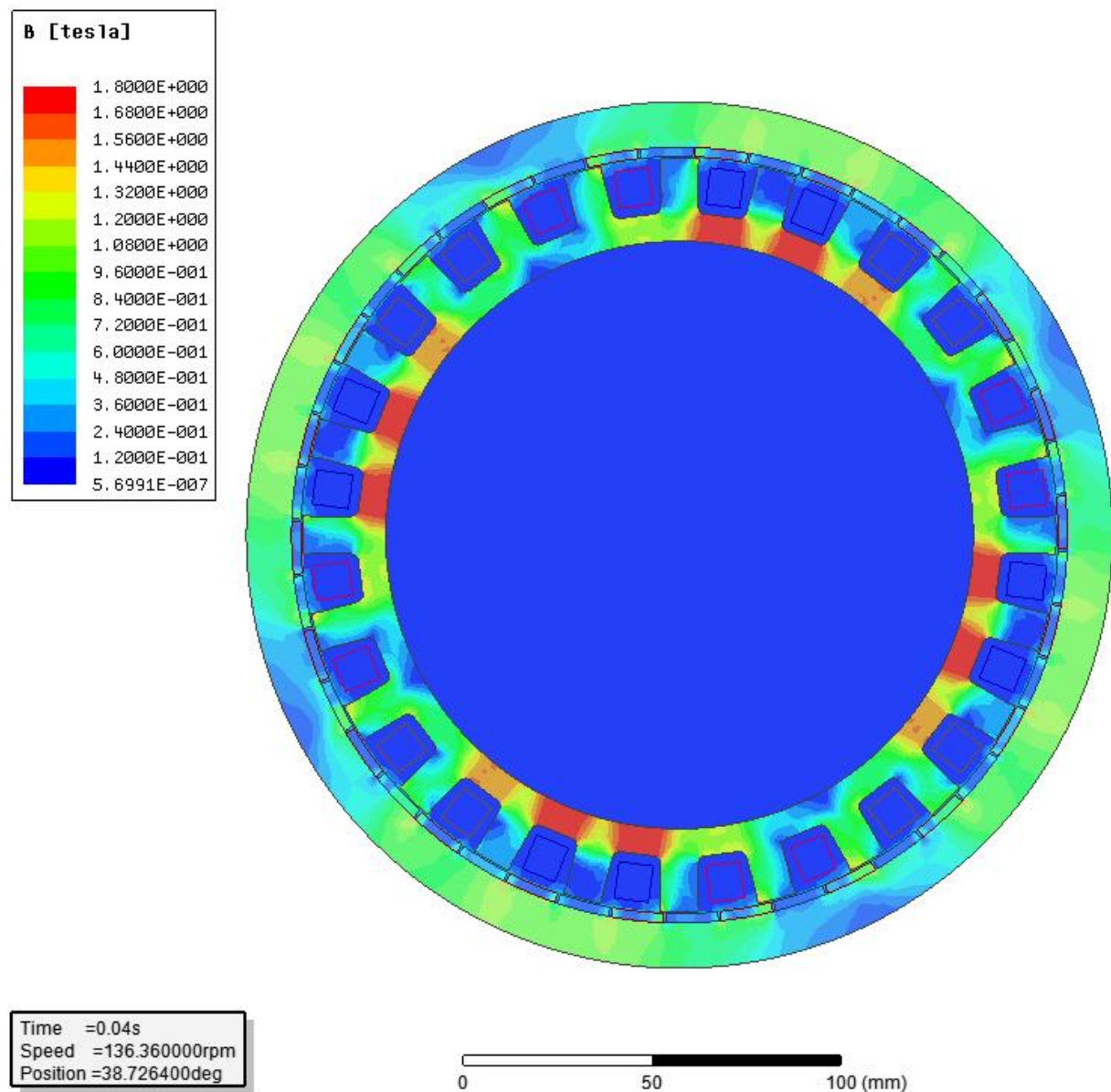


شکل 3-5: گشتاور موتور ورنیر - آهنربای فریت

6-3-5- توزیع چگالی میدان مغناطیسی در موتور

با مقایسه شکل 4-7 و شکل 5-6 به وضوح می‌توان به توزیع مناسب‌تر چگالی میدان مغناطیسی موتور با آهنربای دائم نئودیمیم پی برد، و البته نکته دوم وجود تعداد مناطق بیشتر نزدیک به نقطه اشباع در

موتور با آهنربای فریت می‌باشد این درحالیست که در موتور ورنیر با آهنربای نئودیمیوم مناطق کمتری نزدیک به نقطه اشباع وجود دارند و به صورت کلی ماشین از بعد دمایی نیز کارکرد مناسب‌تری خواهد داشت.



شکل 5-6: توزیع چگالی میدان مغناطیسی در موتور ورنیر - آهنربای فریت

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

امتناع همواره اولین واکنش به دانش‌های نوین و نوپا در صنعت می‌باشد، با این وجود اگر سرمایه‌گذاران با دیدی جدید و البته سرمایه‌گذاری بلند مدت به این دستاوردها نگاه بیاندازند قطعاً در آینده برای آنها نیز مزیت‌هایی به همراه خواهد داشت، ماشین ورنیر نیز از این داستان مستثنا نبوده و با اینکه مدت زمان زیادی از معرفی نمونه‌های اولیه آن می‌گذرد همچنان نه‌تنها به شکل چشم‌گیر بلکه نمونه‌های کاربردی آن نیز به کار گرفته نشده است.

با توجه به ویژگی‌های ارزشمند این ماشین، در صورت استفاده از آن شاهد صرفه‌جویی عظیمی در مصرف و حتی تولید برق به دلیل حذف واسط‌های مکانیکی تبدیل سرعت، خواهیم بود، این ماشین در بسیاری از موارد توانسته چالش‌های حجم‌را به راحتی حل نماید و از طرفی ساختار آن به گونه‌ای می‌باشد که به راحتی قابل پیاده‌سازی توسط مهندسان طراح می‌باشد.

البته نباید فراموش کرد که ماشین‌های ورنیر همچنان از مشکل کم بودن ضریب توان رنج می‌برند، بااینکه در این مسیر پیشنهادات خوبی ارائه شده است ولی همچنان این عدد نسبت به سایر ماشین‌های متداول امروزی نامناسب قلمداد می‌گردد.

در پایان پیشنهاد می‌شود با ترکیب این ساختار به همراه توپولوژی ماشین‌های شار محور، به یک سیستم کاملاً بهینه نه‌تنها از بعد حجمی بلکه بازده نهایی نیز باشیم، این پیشنهاد می‌تواند به عنوان یک مقاله به صورت مفصل در آینده مورد بررسی قرار گیرد.

مراجع

- [1] S. L. Ho, Shuangxia Niu, and W. N. Fu. "Design and Comparison of Vernier Permanent Magnet Machines", IEEE Transactions on Industry Applications, vol.10, no.11 pp. 3280-3283, 2011.
- [2] A.K.Sawhney, "A Course in Electrical Machine Design", Dhanpat Rai & Co, 2016.
- [3] Kataoka, Yasuyuki, et al, "Comparison of three magnet array-type rotors in surface permanent magnet-type Vernier motor" 15th IEEE international Conference on Electrical Machine and systems (ICEMS), 2012.
- [4] Toba, Akio, and Thomas Lipo, "Generic torque-maximizing design methodology of surface permanent-magnet Vernier machine." IEEE transactions on industry applications vol.36 no.6, pp.1539-146 2000.
- [5] Rezzoug, Abderrezak, and Mohammad El-Hadi Zaim, eds. "Non- conventional Electrical Machines", Johan Wiley & Sons, 2013.
- [6] Llibre, J. F., and D. Matt, "Harmonic study of the effort in the Vernier reluctance magnet machine" Proc. ICEM'98 1998.
- [7] Ishizaki, A., et al, "Theory and optimum design of PM Vernier motor", Seventh International Conference on Electrical Machines and Drives (Conf. Publ), no.412, 1995.
- [8] Kim, Byungtaek, and Thomas A. Lipo. "Operation and design principles of a PM Vernier motor", IEEE Transactions on Industry Applications vol.50 no.6 pp.3656-3663, 2014.
- [9] Zhu, Z. Q., and David Howe, "Instantaneous magnetic field distribution in brushless permanent magnet DC motors. III. Effect of stator slotting", IEEE Transactions on Magnetics vol.29 no.1 pp.143-151, 1993.
- [10] Zhu, Li, et al, "Analytical methods for minimizing cogging torque in permanent-magnet machines", IEEE Transactions on Magnetics vol.45 no.4 pp. 2023-2031, 2009.
- [11] Islam, Rakib, et al. "Permanent-magnet synchronous motor magnet designs with skewing for torque ripple and cogging torque reduction", IEEE Transactions on Industry Applications vol.45 no.1 pp.152-160, 2009.
- [12] Hwang, Sang-Moon, et al, "Cogging torque and acoustic noise reduction in permanent magnet motors by teeth pairing", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.36 no.5 pp.3144-3146, 2000.
- [13] Zhu, Z. Q., and David Howe, "Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines", IEEE Transactions on Energy Conversion vol15 no.4 pp.407-412, 2000.
- [14] Wu, Leilei, et al, "Influence of Pole Ratio and Winding Pole Numbers on Performance and Optimal Design Parameters of Surface Permanent-Magnet Vernier Machines", IEEE Transactions on Industry Applications, vol.51 no.5 pp. 3707-3715, 2015.
- [15] Li, Dawei, et al, "Design Procedure of Dual-Stator Spoke-Array Vernier Permanent-Magnet Machines", IEEE Transactions on Industry Applications vol51 no.4 pp. 2972-2983, 2015.

- [16] Li, Jiangui, et al, "A new efficient permanent-magnet Vernier machine for wind power generation" IEEE Transactions on Magnetics vol.46 no.6 pp.1475-1478, 2010.
- [17] Kim, Byungtaek, and Thomas A. Lipo, "Operation and design principles of a PM Vernier motor," IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 2013.
- [18] Krishnan, Ramu, "Permanent magnet synchronous and brushless DC motor drives", CRC press, 2009.
- [19] E. Spooner and L. Hardock, "Vernier hybrid machines", Electric Power Appl, vol.150 no.6, pp.655-662, Nov.2003.
- [20] Dawei Li, Ronghai Qu, Thomas Lipo, "High Power Factor Vernier Permanent Magnet Machines", IEEE Transactions on Industry Applications vol.50 no.6 pp.3664 – 3674, 2014.
- [21] Y. Kataoka, M. Takayama, Y. Matsushima, and Y. Anazawa. "Comparison of three magnet array-type rotors in surface permanent magnet-type Vernier motor", Conf. Electrical Machines and systems, 2012.
- [22] Thomas Weise, "Global Optimization Algorithms – Theory and Application", self-published eBook, 2009.
- [23] S. Rao Singiresu, "Engineering Optimization: Theory and Practice", 3rd Edition, Wiley, 1996.
- [24] Rong-jie Wang, M.J. Kamper, K. Van der Westhuizen, J.F. Gieras, "Optima design of a coreless stator axial flux permanent-magnet generator.", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.41 no.1 pp.55-64, 2005.
- [25] A. Duan, D.M. Ionel, "A review of recent developments in electrical machine design optimization methods with a permanent magnet synchronous motor benchmark study", IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2011.
- [26] J. Robinson, Y. Rahmat-Samii, "Particle swarm optimization in electromagnetics", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol.52 no.2 pp.397-407, 2004.
- [27] D. Rodger, P.C. Coles, N. Allen, H.C. Lai, P.J. Leonard and P. Roberts, "3D finite element model of a disc induction machine", Conference Publication no.444, IEE, 1997.
- [28] Yong-Hwan Oh, Tae-Kyung Chung, Min-Kyu Kim, Hyun-Kyo Jung, "Optimal design of electric machine using genetic algorithms coupled with direct method", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.35 no.3 pp.1742-1745, 1999.
- [29] J.J Yin, W.K.S. Tang and K.F. Man, "A comparison of optimization algorithms for biological neural network identification", IEEE Transactions on Electron, Vol.57 no.3 pp.1127-1131, 2010.
- [30] N. Matthew, O. Sadiku, "Numerical Techniques in Electromagnetic", CRC Press, Second edition, USA, 2000.
- [31] K. atallah, and D. Howe, "A novel high-perrformance magnetic gear," IEEE Transaction on Magnetics, vol. 37 no.4 pp.2844-2846, Jul, 2001.

- [32] Li, Jianguai. "Design, analysis and control of permanent-magnet vernier machines" Department of Electrical and Electronic Engineering The University of Hong Kong PhD thesis, July, 2012.
- [33] Wong, L.L., et al, "Development of a magnetic-gear permanent-magnate brushless motor." IEEE Transaction on Magnetics, vol.45 no.10 pp.4578-4581, 2009.
- [34] Li, Jianguai, K. T. Chau, and Wenlong Li. "Harmonic analysis and comparison of permanent magnet Vernier and magnetic-gear machine." IEEE Transaction on Magnetics, vol.47 no.10, pp.3649-3652, 2011.
- [35] Li, Xianglin, et al, "comparison of magnetic-gear permanent-magnet machines." Progress in Electromagnetics Research pp.177-198, 2013.
- [36] K.T. Chau, W. L. Li, and C. H. T. Lee, "Challenges and Opportunities of Electric Machines for Renewable Energy", Progress in Electromagnetics Research B, Vol.42 pp.45-74, 2012.
- [37] R.Wrobel, P.H. Mellor, "Design consideration of a direct drive brushless PM machine with concentrated windings", IEEE International Conference On Electric Machines and Drives, May, 2005.
- [38] Yong-Hwan Oh, Tae-Kyung Chung, Min-Kyu Lim, Hyun-Kyo Jung, "Optimal design of electric machine using generic algorithms coupled with direct method", IEEE Transactions on Magnetics, vol.35 no.3 pp.1742-1745, May, 1999.
- [39] G.F Uler, O.A. Mohammad, Chang-seop Koh, "Design optimization of electrical machines using genetic algorithms", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.31 no.3 pp.2008-2011, 1995.
- [40] G.F Uler, O.A. Mohammad, Chang-seop Koh, "Design optimization of electrical machines using genetic algorithms", IEEE Transactions on Magnetics, Vol.31 no.3 pp.2008-2011, 1995.
- [41] A.B.J. Reece and T.W. Preston, "Finite Element Methods in Electrical Power Engineering", Oxford University Press, 2000.



Abstract

nowadays, energy supply using fossil fuels is no longer economical as the serious limitation of fossil fuel resources has been clarified, on the other hand, governments are no longer able to easily pollute the environment with these fossil fuels, All of this has dramatically changed the way energy is produced and, more importantly, the way energy is consumed.

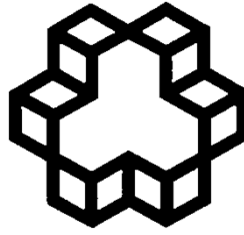
Electric cars and wind power plants have received more attention than in previous years. However, electric cars and wind power plants have witnessed low outputs efficiency due to the use of conventional induction machines as well as special restrictions due to low operating speed and, of course, high volume.

In this research, to provide a solution to the above problems, we use Vernier machines and after considering their types of them, the model is selected and then considering efficiency as the objective function and using the genetic algorithm, Designing has taken place relative to the optimal one. Finally, the optimal machine simulated by the finite element method and its parameters will be discussed.

It should be noted that in this thesis MATLAB R2018b software is used to optimize the genetic algorithm method and Ansys Maxwell 16 software is used to simulate the finite element method.

Keywords:

Vernier machine,motor,direct drive, Genetic Algorithm, Finite Element Method



1928

K. N. Toosi University of Technology

Faculty of Electrical Engineering

Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the
Requirements for the Degree of Master of Science (M.Sc.) in Electrical
Engineering

**Optimized design and simulation of Ferrite permanent magnet
vernier motor and its comparison with neodymium permanent
magnet motor**

Supervisor:

Dr. Mohammad Ardebili

Author:

Mohammad Siahtiri

Feb 2020

