

اسم الحکم



دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه قدرت

مدلسازی، طراحی و بهینه‌سازی ماشین شار محوری آهن‌ربای دائم (AFPM)

دانشجو: حسن مرادی

استاد راهنما:

دکتر احمد دارابی

پایان‌نامه ارشد جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

بهمن ۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه قدرت

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای حسن مرادی

تحت عنوان:

مدلسازی، طراحی و بهینه سازی ماشین شار محوری آهن ربای دائم (AFPM)

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با

درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور

تقدیم بہ:

مادر مہربان، پدر بزرگوار، ہمسر صبور و فرزند عزیزم

کہ با

محبت، راہنمائی، ہمدلی و ہمراہی ایشان این موفقیت میسر کردید.

تقدیر و تشکر:

در اینجا بر خود لازم می‌دانم از تلاش و زحمات بی‌دریغ و راهنمایی‌های ارزنده استاد گرانقدر و دلسوزم، جناب آقای دکتر احمد دارابی، در تمام مراحل انجام این پایان نامه صمیمانه تقدیر و تشکر نمایم. همچنین از دوستان همشاگردیم که همواره با تشویق خود باعث دلگرمی بنده در طی این دوره بودند تقدیر و تشکر می‌نمایم.

اقرار نامه

چکیده

در سال‌های اخیر ماشین‌های شار محوری آهن‌ربای دائم به واسطه شکل تخت، ساختار فشرده و چگالی توان بالایی که دارند بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. از جمله کاربردهای این ماشین‌ها می‌توان استفاده در خودروهای الکتریکی، ژنراتورهای کوچک تا متوسط، کاربردهای حمل و نقل زمینی، زمینه‌های فضانوردی، صنایع هواپیمایی، صنایع کاغذسازی، نیروی رانشی کشتی‌ها و زیردریایی‌ها و دیگر محرک‌های صنعتی را نام برد. شکل نوع دیسکی منحصر بفرد روتور و استاتور این ماشین‌ها امکان ایجاد طراحی‌های متنوع را فراهم می‌سازد. در این پایان‌نامه ابتدا انواع توپولوژی‌های ماشین‌های شار محوری آهن‌ربای دائم معرفی و بررسی شده‌اند. در ادامه مطالعه مقایسه بین توپولوژی‌های مختلف انجام گرفته و سپس توپولوژی مورد نظر جهت کاربرد مورد نیاز انتخاب شده است. ابتدا طراحی اولیه ماشین مورد نظر توسط الگوریتم طراحی اولیه انجام و سپس مدلسازی ماشین به روش تحلیل اجزاء محدود صورت گرفته است و نتایج حاصل از شبیه‌سازی ارائه شده‌اند. بهینه‌سازی ماشین برای به دست آوردن چگالی توان ماکزیمم به ازای نسبت قطر (λ) و چگالی شار فاصله هوایی (B_g) انجام گرفته و مقادیر بهینه پارامترها به دست آمده‌اند. در پایان یک نمونه ماشین کوچک شار محوری آهن‌ربای دائم ساخته و مورد آزمایش قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: ماشین شار محوری آهن‌ربای دائم (AFPM)، الگوریتم طراحی، روش تحلیل اجزاء

محدود

لیست مقالات مستخرج

- ❖ Design and Simulation of Low Speed Axial Flux Permanent Magnet (AFPM) Machine, International Conference on Electrical Engineering (ICEE 2012), Dubai, UAE

❖ ثبت اختراع با عنوان: « ماشین سه فاز سنکرون شار محوری مغناطیس دائم با استاتور بدون شیار ».

شماره ثبت: ۷۳۳۲۰ - ۱۳۹۰/۱۰/۱۷

فهرست مطالب

فصل ۱: مقدمه.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۱-۲- تاریخچه و گسترش ماشین‌های AFPM.....	۳
۱-۳- مقایسه ماشین‌های شار محوری با ماشین‌های شار شعاعی آهنربای دائم.....	۵
۱-۴- انواع ماشین‌های شار محوری آهنربای دائم.....	۷
۱-۵- مقایسه ماشین‌های AFPM با تحریک جریان موج سینوسی و موج مربعی	۹
۱-۵-۱- انتخاب سیستم تحریک	۱۰
۱-۶- برخی از ویژگی‌های مشترک ماشین‌های AFPM	۱۱
فصل ۲: بررسی انواع توپولوژی‌های ماشین‌های شار محوری آهنربای دائم	۱۳
۲-۱- مقدمه	۱۴
۲-۲- انواع توپولوژی‌های ماشین‌های شار محوری آهنربای دائم.....	۱۴
۲-۳- ماشین‌های AFPM یک وجهی.....	۱۵
۲-۳-۱- تکنیک‌های اتصال آهنرباهای دائم به روتور.....	۱۶
۲-۴- ماشین‌های AFPM دو وجهی.....	۱۸
۲-۴-۱- انواع توپولوژی‌های آرایش دو وجهی.....	۱۸
۲-۴-۱-۱- ماشین‌های نوع TORUS.....	۱۹
۲-۴-۱-۱-۱- ماشین‌های نوع TORUS-NS.....	۱۹

۲۲.....	۲-۱-۱-۴-۲- ماشین نوع TORUS-S
۲۲.....	۱-۲-۱-۱-۴-۲- ماشین TORUS-S نوع NN
۲۴.....	۲-۲-۱-۱-۴-۲- ماشین TORUS-S نوع NS
۲۶.....	۳-۱-۱-۴-۲- ماشین TORUS نوع NS بدون هسته
۲۷.....	۲-۱-۴-۲- ماشین‌های نوع AFIR
۲۷.....	۱-۲-۱-۴-۲- ماشین نوع AFIR-NS
۳۰.....	۲-۲-۱-۴-۲- ماشین نوع AFIR-S
۳۴.....	۵-۲- ماشین‌های چند لایه (چند دیسکی)
۳۵.....	۱-۵-۲- ماشین شار محوری چند لایه بدون شیار (MULTI-NS)
۳۶.....	۲-۵-۲- ماشین چند لایه شیاردار (MULTI-S)
۳۷.....	۱-۲-۵-۲- ماشین چند لایه شیاردار نوع NN (MULTI-S نوع NN)
۳۷.....	۲-۲-۵-۲- ماشین چند لایه شیاردار نوع NS (MULTI-S نوع NS)
۳۹.....	۳-۵-۲- ماشین شار محوری چند لایه با استاتور بدون هسته
۳۹.....	۶-۲- انواع دیگر ماشین شار محوری آهنربای دائم
۴۵.....	۷-۲- انتخاب ساختار ماشین مناسب برای محرک زیردریایی
۴۶.....	۱-۷-۲- مقایسه برخی پارامترهای انواع ماشین‌های شار شعاعی و شار محوری
۵۱.....	فصل ۳: الگوریتم طراحی اولیه ماشین شار محوری آهنربای دائم
۵۲.....	۱-۳- مقدمه
۵۲.....	۲-۳- معادله ابعادی ماشین

۶۳	۳-۳- چگالی شار فاصله هوایی.....
۶۴	۳-۴- سیم پیچی.....
۶۵	۳-۴-۱- تعداد دور سیم پیچی سری هر فاز.....
۶۵	۳-۴-۲- مقاومت سیم پیچی.....
۶۷	۳-۵- الگوریتم طراحی اولیه
۷۰	۳-۶- یک مثال عددی از طراحی اولیه ماشین شار محوری TORUS-NS.....

فصل ۴: مدل سازی و شبیه سازی ماشین شار محوری آهن ربای دائم

۷۷	۴-۱- مقدمه
۸۰	۴-۲- شبیه سازی ماشین TORUS-NS.....
۸۷	۴-۳- تأثیر اندازه طول فاصله هوایی بر روی چگالی شار فاصله هوایی.....
۸۸	۴-۴- طراحی اولیه ماشین نمونه اصلی با استفاده از الگوریتم طراحی اولیه ارائه شده.....
۹۸	۴-۵- محاسبه مقاومت، اندوکتانس ها و راکتانس سنکرون ماشین TORUS-NS.....
۹۹	۴-۶- بهینه سازی ماشین شار محوری TORUS-NS.....

فصل ۵: طراحی، ساخت و آزمایش یک نمونه ماشین کوچک شار محوری آهن ربای دائم

۱۰۲	۵-۱- مقدمه
۱۰۲	۵-۲- جزئیات طرح و نقشه اجزاء ماشین
۱۰۲	۵-۲-۱- هسته استاتور.....

- ۵-۲-۲- سیم پیچی استاتور..... ۱۰۳
- ۵-۲-۳- روتور..... ۱۰۵
- ۵-۲-۴- شفت (محور)..... ۱۰۷
- ۵-۲-۵- نگهدارنده ها..... ۱۰۸
- ۵-۲-۶- بلبرینگ..... ۱۰۹
- ۵-۲-۷- ماشین مونتاژ شده..... ۱۰۹
- ۵-۳- آزمایشات..... ۱۱۰
- ۵-۳-۱- ماشین با یک دیسک روتور..... ۱۱۰
- ۵-۳-۱-۱- حالت مولدی..... ۱۱۰
- ۵-۳-۱-۱-۱- مشخصه ولتاژ-جریان ماشین در حالت مولدی..... ۱۱۲
- ۵-۳-۱-۱-۲- مشخصه راندمان-توان ماشین در حالت مولدی..... ۱۱۲
- ۵-۳-۱-۱-۳- راکتانس سنکرون ماشین در حالت مولدی با یک دیسک روتور..... ۱۱۳
- ۵-۳-۱-۲- حالت موتور..... ۱۱۴
- ۵-۳-۱-۲-۱- مشخصه راندمان-توان ماشین در حالت موتوری..... ۱۱۵
- ۵-۳-۱-۲-۲- راکتانس سنکرون ماشین در حالت موتوری با یک دیسک روتور..... ۱۱۶
- ۵-۳-۲- ماشین با دو دیسک روتور..... ۱۱۶
- ۵-۳-۲-۱- حالت مولدی..... ۱۱۷
- ۵-۳-۲-۱-۱- مشخصه ولتاژ-جریان ماشین در حالت مولدی..... ۱۱۸
- ۵-۳-۲-۱-۲- مشخصه راندمان-توان ماشین در حالت مولدی..... ۱۱۸
- ۵-۳-۲-۱-۳- راکتانس سنکرون ماشین در حالت مولدی با دو دیسک روتور..... ۱۱۹

۵-۳-۲- حالت موتوری ۱۱۹

۵-۳-۲-۱- مشخصه راندمان-توان ماشین در حالت موتوری ۱۲۰

۵-۳-۲-۲- راکتانس سنکرون ماشین در حالت موتوری با دو دیسک روتور..... ۱۲۰

فصل ۶: نتیجه گیری ۱۲۱

۶-۱- مقدمه ۱۲۲

۶-۲- جمع بندی و نتیجه گیری ۱۲۲

۶-۳- پیشنهادات ۱۲۳

مراجع ۱۲۵

فهرست علائم و اختصارات

α	ثابت دما
η	راندمان ماشین
λ	نسبت قطر داخلی به قطر خارجی ماشین
Λ_g	شار پیوندی فاصله هوایی هر فاز
μ_o	ضریب نفوذپذیری مغناطیسی هوا
μ_{rPM}	ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی آهنربای دائم
$\rho_{cu,\theta}$	مقاومت ویژه مس در دمای θ
$\rho_{cu,20^{\circ}C} = 1.678 \times 10^{-8} \Omega.m$	مقاومت ویژه مس در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد
ϕ_f	دامنه مؤلفه اصلی شکل موج شار مغناطیسی عبور کننده از کویل‌ها
ϕ_{f1}	شار لحظه‌ای عبور کننده از یک حلقه سیم‌پیچ
a_p	تعداد مسیرهای موازی جریان
a_w	تعداد هادی‌های موازی
A	بارگذاری الکتریکی کل
A_r	بارگذاری الکتریکی روتور
A_s	بارگذاری الکتریکی استاتور
A_{PM}	مساحت سطح آهنربای دائم
A_p	مساحت سطح فاصله هوایی قطع شده توسط خطوط شار
B_g	چگالی شار فاصله هوایی
B_{cs}	دامنه چگالی شار در هسته استاتور
B_u	بارگذاری مغناطیسی ویژه
B_{cr}	چگالی شار در هسته روتور
B_r	چگالی شار پس‌ماند
D_o	قطر خارجی ماشین

D_g	قطر متوسط فاصله هوایی
D_t	قطر بیرونی کلی ماشین
d_w	قطر سیم
d_{str}	قطر هر رشته هادی
E_{PK}	نیروی محرکه الکتریکی ماکزیمم
$e(t)$	نیروی محرکه الکتریکی لحظه‌ای فاز
$f_e(t)$	نیروی محرکه الکتریکی نرمالیزه شده
$f_i(t)$	جریان نرمالیزه شده
f	فرکانس
g	طول فاصله هوایی
H	شدت میدان مغناطیسی
$i(t)$	جریان لحظه‌ای فاز
I_a	جریان مؤثر سیم‌پیچی در هر مسیر
I_{rms}	جریان مؤثر فاز هر استاتور
I_{PK}	جریان ماکزیمم فاز
J_s	چگالی جریان
K_{cu}	ضریب پر شونده‌گی مس
K_p	ضریب شکل موج توان الکتریکی
K_e	ضریب نیروی محرکه الکتریکی
K_i	ضریب شکل موج جریان
K_ϕ	نسبت بارگذاری الکتریکی روتور به استاتور
K_L	ضریب نسبت وجه
K_f	ضریب شکستگی شار
K_d	ضریب نشت شار
K_{focus}	ضریب تمرکز شار

K_w	ضریب سیم‌پیچی
L_e	طول محوری ماشین
L_s	طول محوری استاتور
L_r	طول محوری روتور
L_{cs}	طول محوری هسته استاتور
L_{PM}	طول محوری (ضخامت) آهن‌ربای دائم
L_{cr}	طول محوری هسته روتور
L_a	طول مؤثر هسته استاتور
l_w	ضخامت محوری سیم‌پیچی
l_{lav}	طول متوسط یک دور سیم‌پیچی
l_{in}	طول اتصال انتهایی داخلی
l_{out}	طول اتصال انتهایی خارجی
L_i	طول مؤثر هسته استاتور در جهت شعاعی
m	تعداد فازهای ماشین
m_1	تعداد فازهای هر استاتور
N_t	تعداد دور هر فاز
N_{stator}	تعداد استاتورها
N_{coil}	تعداد کلاف‌های سیم‌پیچی
N_{str}	تعداد رشته‌های هادی
P_R	توان خروجی نامی ماشین
p	تعداد جفت قطب‌های ماشین
P_{dens}	چگالی توان ماشین
S_a	سطح مقطع یک رشته هادی
S_{str}	سطح مقطع هر رشته هادی
T	دوره تناوب یک سیکل emf

W_{cuo}	ضخامت شعاعی سیم‌پیچی انتهایی ورای قطر خارجی
W_{cui}	ضخامت شعاعی سیم‌پیچی انتهایی درون قطر داخلی
w_{PMg}	عرض آهن‌ربا در قطر متوسط

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱: ژنراتور سنکرون آهنربای دائم ۳ مگاوات بدون جعبه دنده برای توربین بادی (زیمنس ۲۰۰۴) ۳
- شکل ۲-۱: توپولوژی‌های (a) ماشین RFPM (b) ماشین AFPM ۵
- شکل ۳-۱: موتور ۸ قطب آهنربای دائم جریان مستقیم کموتاتوردار - (a) استاتور با آهنرباهای دائم (b) مقطع عرضی (c) سیم‌پیچی روتور (آرمیچر) و زغال‌ها (d) ساختمان سیم‌پیچی $2p=8$ با ۱۴۵ میله. ۱- روتور با سیم‌پیچی چابی دو وجهی ۲- آهنرباهای دائم ۳- زغال‌ها ۸
- شکل ۴-۱: شکل موج جریان برای ماشین‌های AFPM بدون جاروبک (a) ماشین موج مربعی (b) ماشین موج سینوسی ۹
- شکل ۱-۲: نمودار طبقه‌بندی انواع توپولوژی‌های ماشین AFPM ۱۴
- شکل ۲-۲: ساختار ماشین شار محوری آهنربای دائم یک روتور- یک استاتور ۱۵
- شکل ۳-۲: استاتور مورق یک ماشین AFPM ساخته شده از یک نوار فولادی تنها پیچیده شده به صورت دایره‌ای ۱۵
- شکل ۴-۲: ساختار ماشین شیاردار شار محوری آهنربای دائم یک روتور- یک استاتور ۱۷
- شکل ۵-۲: ساختمان روتور ماشین شار محوری با آهنربای دائم درونی (a) نمای گسترده (b) نمای مونتاژ شده ۱۷

- شکل ۶-۲: پیکربندی موتور شار محوری نوع TORUS بدون شیار با آهنربای دائم با اتصال سطحی (TORUS-NS)..... ۲۰
- شکل ۷-۲: ساختار روتور و استاتور ماشین TORUS بدون شیار (TORUS-NS) الف) روتور ب) استاتور..... ۲۰
- شکل ۸-۲: جهت‌های شار ماشین TORUS-NS الف) دو بعدی ب) سه بعدی..... ۲۱
- شکل ۹-۲: ساختار موتور شار محوری نوع TORUS شیاردار با آهنربای دائم با اتصال سطحی (TORUS-S)..... ۲۳
- شکل ۱۰-۲: ساختار سیم‌پیچی پشت به پشت استفاده شده در ماشین‌های شار محوری بدون شیار و شیاردار نوع NN..... ۲۳
- شکل ۱۱-۲: جهت‌های شار در طرح دو بعدی ماشین TORUS-S با آرایش آهنرباهای دائم از نوع NN..... ۲۴
- شکل ۱۲-۲: ساختار موتور شار محوری نوع TORUS شیاردار نوع NS با آهنربای دائم با اتصال سطحی..... ۲۵
- شکل ۱۳-۲: جهت‌های شار ماشین TORUS-NS نوع NS الف) دو بعدی ب) سه بعدی..... ۲۵
- شکل ۱۴-۲: جهت‌های شار در طرح دو بعدی ماشین TORUS-S با آرایش آهنرباهای دائم از نوع NS..... ۲۶
- شکل ۱۵-۲: ماشین TORUS نوع NS بدون هسته..... ۲۷
- شکل ۱۶-۲: ساختار موتور شار محوری نوع AFIR بدون شیار با آهنربای دائم با اتصال سطحی (AFIR-NS)..... ۲۸

شکل ۲-۱۷: الف) ساختار روتور توپولوژی‌های AFIR-NS و AFIR-S ب) ساختار استاتور توپولوژی AFIR-NS ۲۹

شکل ۲-۱۸: جهت‌های شار و توپولوژی ساختار AFIR-NS الف) دو بعدی ب) سه بعدی ۳۰

شکل ۲-۱۹: ساختار موتور شار محوری نوع AFIR شیاردار با آهن‌ربای دائم با اتصال سطحی (AFIR-S) با دو مجموعه سیم‌پیچی رویهم در هر استاتور ۳۱

شکل ۲-۲۰: نمایش دو بعدی جهت‌های شار و ساختار ماشین نوع AFIR شیاردار ۳۱

شکل ۲-۲۱: یکی از استاتورهای ماشین شار محوری نوع AFIR-S قبل و بعد از سیم‌پیچی ۳۲

شکل ۲-۲۲: ساختار ماشین نوع AFIR شیاردار با اتصال سطحی آهن‌رباها ۳۲

شکل ۲-۲۳: طرح دو بعدی جهت‌های شار در ساختار ماشین نوع AFIR-S با: الف) اتصال سطحی آهن-رباهای دائم ب) اتصال درونی آهن‌رباهای دائم ۳۲

شکل ۲-۲۴: ساختار قطب روتور با توانایی کاهش عکس‌العمل آرمیچر ۳۴

شکل ۲-۲۵: نمای سه بعدی از ماشین چند لایه‌ای آهن‌ربای دائم بدون شیار برای $N=3$ ۳۶

شکل ۲-۲۶: نمایش سه بعدی مسیرهای شار توپولوژی چند لایه‌ای (دو روتور- سه استاتور). الف) نوع NN ب) نوع NS ۳۶

شکل ۲-۲۷: توپولوژی ماشین MULTI-S نوع NN برای $N=3$ ۳۷

شکل ۲-۲۸: توپولوژی ماشین MULTI-S نوع NS برای $N=3$ ۳۸

شکل ۲-۲۹: ماشین شار محوری چند لایه با استاتور بدون هسته ۳۹

شکل ۲-۳۰: موتورهای ترکیبی دو وجهی با هر دو فاصله هوایی محوری و شعاعی ۴۰

شکل ۲-۳۱: ماشین شار محوری داخلی آهن‌ربای دائم (AFIPM) ۴۱

- شکل ۲-۳۲: ماشین شار محوری از دو طرف برجسته آهنربای دائم (AFDSPM)..... ۴۲
- شکل ۲-۳۳: موتور سنکرون شار محوری آهنربای دائم داخلی ساخته شده با پودر مواد مغناطیسی نرم ۴۳
- شکل ۲-۳۴: ساختار ماشین شار محوری با اتصال سطحی آهنرباهای دائم با میدان کنترل شده (FCAFPM)..... ۴۴
- شکل ۲-۳۵: نمای دو بعدی ماشین FCAFPM (a) استاتور (b) روتور..... ۴۴
- شکل ۲-۳۶: مقایسه چگالی توان (نیوتن بر سانتیمتر مربع)..... ۴۶
- شکل ۲-۳۷: مقایسه راندمان (درصد)..... ۴۷
- شکل ۲-۳۸: مقایسه وزن (پوند)..... ۴۷
- شکل ۲-۳۹: مقایسه ضریب استفاده (کیلووات بر کیلوگرم)..... ۴۸
- شکل ۲-۴۰: مقایسه پراکنده سازی حرارت (وات بر سانتیمتر مربع)..... ۴۸
- شکل ۲-۴۱: مقایسه گشتاور دندانگی برای ماشین های شیاردار و بدون شیار (پریونیت)..... ۴۸
- شکل ۲-۴۲: مقایسه گشتاور ریپل برای ماشین های شیاردار و بدون شیار (پریونیت)..... ۴۹
- شکل ۲-۴۳: مقایسه سطح توان صوتی منتجه (دسی بل)..... ۵۰
- شکل ۳-۱: طرح ساختار یک موتور TORUS-NS..... ۵۲
- شکل ۳-۲: تعریف پارامترهای هندسی ماشین شار محوری آهنربای دائم TORUS-NS..... ۶۰
- شکل ۳-۳: منحنی های الف) چگالی توان ماشین بر حسب λ ب) راندمان ماشین بر حسب λ ۶۳

شکل ۳-۴: سیم‌پیچی سه فاز، قطب‌های آهن‌ربا و مسیر شار مغناطیسی ماشین دیسکی دو وجهی با یک

استاتور داخلی بدون شیار. ۱- سیم‌پیچی ۲- آهن‌رباهای دائم ۳- یوغ استاتور ۴- یوغ روتور..... ۶۵

شکل ۳-۵: آرایش سیم‌پیچی نوع حلقه‌ای سه فاز، شش قطب، ۱۸ کلاف برای استاتور یک ماشین

AFPM با دو روتور خارجی و یک استاتور داخلی بدون شیار..... ۶۵

شکل ۳-۶: نمایش کلاف‌های سری و موازی سیم‌پیچی ماشین در هر فاز..... ۷۴

شکل ۳-۷: ابعاد اساسی طراحی شده (ابعاد بر حسب میلیمتر)..... ۷۵

شکل ۴-۱: ساختار ماشین TORUS-NS (مورد مطالعه الف) ساختار روتور ب) ساختار استاتور ج) ساختار

کلی ماشین..... ۷۸

شکل ۴-۲: نمودار پروسه کلی نرم‌افزار FEM نوعی..... ۸۱

شکل ۴-۳: ابعاد مدل رسم شده ماشین TORUS-NS بر حسب میلیمتر..... ۸۳

شکل ۴-۴: مواد تخصیص یافته به اجزاء مدل رسم شده ماشین TORUS-NS..... ۸۳

شکل ۴-۵: مش‌بندی قسمتی از ماشین TORUS-NS..... ۸۳

شکل ۴-۶: خطوط شار مغناطیسی ماشین TORUS-NS در حالت استاتور بدون جریان..... ۸۴

شکل ۴-۷: توزیع چگالی شار مغناطیسی ماشین TORUS-NS به صورت برداری در حالت استاتور بدون

جریان..... ۸۴

شکل ۴-۸: توزیع چگالی شار مغناطیسی ماشین TORUS-NS به صورت طیف رنگی در حالت استاتور

بدون جریان..... ۸۴

شکل ۴-۹: توزیع چگالی شار مغناطیسی زیر یک قطب بر حسب فاصله تا محور عرضی ماشین TORUS-

NS در حالت استاتور بدون جریان..... ۸۵

شکل ۴-۱۰: مولفه عمودی چگالی شار مغناطیسی زیر دو قطب در حالت $i = 0$ و توزیع چگالی شار

مغناطیسی با فرض جریان نامی در سیم‌پیچ‌ها به ازای ωt های مختلف

($\omega t = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$) ماشین TORUS-NS مورد مطالعه..... ۸۶

شکل ۴-۱۱: بزرگنمایی قسمتی از شکل ۴-۱۰..... ۸۷

شکل ۴-۱۲: مولفه عمودی چگالی شار مغناطیسی زیر دو قطب در فاصله هوایی ناشی از جریان نامی

سیم‌پیچ‌ها بدون حضور آهن‌رباهای دائم به ازای ωt های مختلف

($\omega t = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$) ماشین TORUS-NS مورد مطالعه..... ۸۷

شکل ۴-۱۳: توزیع چگالی شار مغناطیسی زیر یک قطب در حالت استاتور بدون جریان بر حسب فاصله تا

محور عرضی در ماشین TORUS-NS به ازای فواصل هوایی مختلف..... ۸۸

شکل ۴-۱۴: قسمتی از نمای دو بعدی ماشین TORUS-NS دو لایه..... ۸۹

شکل ۴-۱۵: ابعاد اساسی طراحی شده ماشین مورد مطالعه (ابعاد بر حسب متر)..... ۹۵

شکل ۴-۱۶: مش‌بندی قسمتی از مدل ماشین مورد مطالعه..... ۹۶

شکل ۴-۱۷: خطوط شار مغناطیسی بی‌باری ماشین مورد مطالعه..... ۹۶

شکل ۴-۱۸: چگالی شار مغناطیسی بی‌باری به صورت برداری در ماشین مورد مطالعه..... ۹۶

شکل ۴-۱۹: توزیع چگالی شار مغناطیسی بی‌باری زیر یک قطب بر حسب فاصله تا محور عرضی ماشین

TORUS-NS مورد مطالعه..... ۹۷

شکل ۴-۲۰: مولفه عمودی چگالی شار مغناطیسی زیر دو قطب در بی‌باری در ماشین TORUS-NS مورد

مطالعه..... ۹۸

شکل ۴-۲۱: چگالی توان ماشین TORUS-NS به عنوان تابعی از چگالی شار فاصله هوایی (B_g) و نسبت

قطر (λ) ($P_R=500KW, n_s=300rpm, p=11, A=600A/cm, J_s=10A/mm^2$)..... ۱۰۰

شکل ۴-۲۲: نمای دو بعدی چگالی توان ماشین TORUS-NS به عنوان تابعی از نسبت قطر (λ)

($P_R=500KW, n_s=300rpm, p=11, A=600A/cm, B_g=0.35T, J_s=10A/mm^2$)..... ۱۰۰

شکل ۵-۱: جزئیات طرح هسته استاتور و پایه‌ها (الف) نمای دو بعدی (ب) نمای سه بعدی..... ۱۰۳

شکل ۵-۲: (الف) قالب ساخته شده برای استاتور (ب) هسته استاتور ساخته شده پس از قالب‌ریزی و نصب

پایه‌ها..... ۱۰۳

شکل ۵-۳: نقشه سیم‌پیچی فاز A..... ۱۰۴

شکل ۵-۴: (الف) استاتور سیم‌پیچی شده با ۳۰ کلاف و ۶۰ سر سیم (ب) تصویر استاتور بعد از سیم‌پیچی و

سرپندی آن..... ۱۰۵

شکل ۵-۵: (الف) جزئیات طرح یوغ روتورها (ب) تصویر یکی از یوغ روتورهای ساخته شده..... ۱۰۶

شکل ۵-۶: عکس یکی از روتورها پس از قرار دادن آهن‌رباها بر روی آن. الف- نمای دو بعدی ب- نمای

سه بعدی..... ۱۰۶

شکل ۵-۷: تصویر یکی از آهن‌رباهای ماشین (دارای ابعاد $10\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 5\text{ mm}$)..... ۱۰۷

شکل ۵-۸: جزئیات طرح شفت. الف- نمای دو بعدی ب- نمای سه بعدی..... ۱۰۷

شکل ۵-۹: تصویر شفت ساخته شده از جنس فولاد..... ۱۰۷

شکل ۵-۱۰: جزئیات طرح نگه‌دارنده‌ها. الف- صفحه نگه‌دارنده ب- نمای دو بعدی پایه نگه‌دارنده ج-

نمای سه بعدی پایه نگه‌دارنده..... ۱۰۸

شکل ۵-۱۱: عکس نگه‌دارنده‌ها. الف- صفحه نگه‌دارنده ب- پایه‌های نگه‌دارنده..... ۱۰۸

- شکل ۵-۱۲: تصویر بلبرینگ استفاده شده در ماشین..... ۱۰۹
- شکل ۵-۱۳: الف- طرح کلی ماشین مورد نظر ب- تصویر کامل ماشین ساخته شده..... ۱۱۰
- شکل ۵-۱۴: آزمایش حالت مولدی..... ۱۱۱
- شکل ۵-۱۵: شکل موج ولتاژ خروجی در حالت مولدی..... ۱۱۱
- شکل ۵-۱۶: مشخصه ولتاژ- جریان در حالت مولدی..... ۱۱۲
- شکل ۵-۱۷: مشخصه راندمان-توان در حالت مولدی..... ۱۱۳
- شکل ۵-۱۸: دیاگرام برداری مولدی پس فاز..... ۱۱۳
- شکل ۵-۱۹: مشخصه راندمان-توان در حالت موتوری..... ۱۱۵
- شکل ۵-۲۰: دیاگرام برداری موتور پس فاز..... ۱۱۶
- شکل ۵-۲۱: شکل اتصالات ماشین با دو دیسک روتور..... ۱۱۷
- شکل ۵-۲۲: شکل موج ولتاژ خروجی در حالت مولدی با دو دیسک روتور..... ۱۱۷
- شکل ۵-۲۳: مشخصه ولتاژ-جریان در حالت مولدی..... ۱۱۸
- شکل ۵-۲۴: مشخصه راندمان-توان در حالت مولدی..... ۱۱۹
- شکل ۵-۲۵: مشخصه راندمان-توان در حالت موتوری..... ۱۲۰

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: ساختار انواع موتورهای شار شعاعی و شار محوری..... ۴۶
- جدول ۱-۳: شکل موج‌های نمونه اولیه نوعی..... ۵۷
- جدول ۲-۳: مقایسه نتایج ماشین طراحی شده و نمونه ارائه شده در مرجع ۷۵
- جدول ۱-۴: مشخصات نامی داده شده برای ماشین مورد طراحی..... ۷۸
- جدول ۲-۴: پارامترها و ابعاد ماشین طراحی شده..... ۷۹
- جدول ۳-۴: مقایسه چگالی شار مغناطیسی در حالت استاتور بدون جریان حاصل از محاسبات تحلیلی و FEM..... ۸۷
- جدول ۴-۴: تاثیر اندازه طول فاصله هوایی بر روی ماکزیمم چگالی شار فاصله هوایی در ماشین TORUS-NS مورد مطالعه در حالت استاتور بدون جریان ۸۸
- جدول ۵-۴: مشخصات نامی داده شده برای ماشین مورد طراحی..... ۹۳
- جدول ۶-۴: پارامترها و ابعاد ماشین طراحی شده..... ۹۳
- جدول ۷-۴: مقایسه چگالی شار مغناطیسی بی‌باری حاصل از محاسبات تحلیلی و FEM..... ۹۷
- جدول ۸-۴: بهینه‌سازی ماشین TORUS-NS برای چگالی توان ماکزیمم..... ۹۹
- جدول ۱-۵: نتایج حاصل از آزمایش در حالت مولدی..... ۱۱۲
- جدول ۲-۵: راکتانس سنکرون ماشین (مولدی)..... ۱۱۴
- جدول ۳-۵: نتایج حاصل از آزمایش در حالت موتور..... ۱۱۴
- جدول ۴-۵: نتایج حاصل از آزمایش در حالت مولدی..... ۱۱۸
- جدول ۵-۵: نتایج حاصل از آزمایش در حالت موتور..... ۱۱۹

فصل ۱

مقدمه

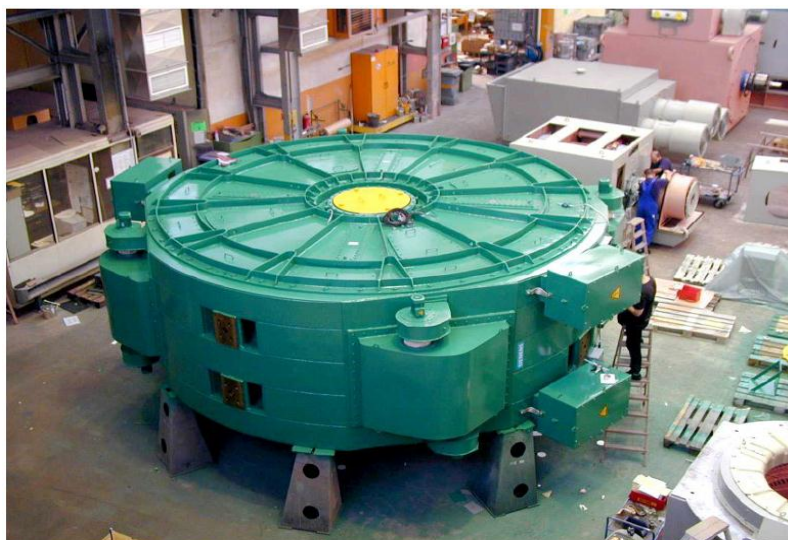
ماشین‌های شار محوری آهن‌ربای دائم^۱ (AFPM)، همچنین با نام ماشین‌های "نوع دیسکی"^۲، به واسطه شکل تخت، ساختار فشرده و چگالی توان بالایی که دارند جایگزینی مناسب برای ماشین‌های شار شعاعی آهن‌ربای دائم^۳ (RFPM) می‌باشند.

موتورهای AFPM به ویژه برای خودروهای الکتریکی، پمپ‌ها، فن‌ها، کنترل شیرها، سانتریفیوژها، ابزارهای ماشینی، ربات‌ها و تجهیزات صنعتی مناسب می‌باشند. روتور با قطر بزرگ با گشتاور اینرسی بالا می‌تواند به عنوان چرخ طیار به کار رود. ماشین‌های AFPM همچنین می‌توانند به عنوان ژنراتورهای کوچک تا متوسط استفاده شوند. از آن جایی که این ماشین‌ها قابلیت طراحی با تعداد قطب‌های زیاد را دارند، این ماشین‌ها بدون نیاز به گیربکس‌های گران‌قیمت برای کاربردهای سرعت پایین مانند: درایوهای کشنده مکانیکی، بالابرها، ژنراتورهای بادی (شکل ۱-۱) و ... ایده‌آل هستند. همچنین از دیگر کاربردهای این ماشین‌ها می‌توان به کاربردهای حمل و نقل زمینی، زمینه‌های فضانوردی، صنایع هواپیمایی، صنایع کاغذسازی، نیروی رانشی کشتی‌ها و زیردریایی‌ها و دیگر محرک‌های صنعتی نام برد. شکل نوع دیسکی منحصر بفرد روتور و استاتور ماشین‌های AFPM امکان ایجاد طراحی‌های متنوع را فراهم می‌سازد. ماشین‌های AFPM می‌توانند به صورت ماشین‌های دارای یک یا چند فاصله هوایی، شیاردار یا بدون شیار و یا به طور کلی آرمیچر بدون هسته (بدون آهن) طراحی شوند [۱]، [۲]، [۳]، [۴].

^۱ - Axial Flux Permanent Magnet

^۲ - disc-type

^۳ - Radial Flux Permanent Magnet



شکل ۱-۱- ژنراتور سنکرون آهنربای دائم ۳ مگاوات بدون جعبه دنده برای توربین بادی (زیمنس ۲۰۰۴) [۷]

۲-۱- تاریخچه و گسترش ماشین‌های AFPM

تاریخچه ماشین‌های الکتریکی نشان می‌دهد که نخستین ماشین‌ها، ماشین‌های "شار محوری" بوده‌اند (M.Faraday در سال ۱۸۳۱، مخترع اولین ماشین آهنربای دائم، W.Ritchie، سال ۱۸۳۳، B. Jacobi، ۱۸۳۴). اما مدت کوتاهی پس از آن T.Davenport در سال ۱۸۳۷ ادعای اختراع اولین ماشین "شار شعاعی" را نمود. ماشین‌های شار شعاعی متداول به طور گسترده‌ای به عنوان پیکربندی اصلی برای ماشین‌های الکتریکی پذیرفته شده بودند.

قدیمی‌ترین نمونه کار اولیه از ماشین‌های شار محوری، دیسک مایکل فارادی (M.Faraday) بوده است. ساختار نوع دیسکی ماشین‌های الکتریکی همچنین در اختراعات نیکولا تسلا نیز دیده می‌شود (مثلاً U.S. patent No.405 858 با عنوان موتور الکترومغناطیسی و در سال ۱۸۸۹ چاپ شد).

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

۱- نیروی جذب مغناطیسی محوری قوی بین استاتور و روتور

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

استاتور شیاردار

۳- هزینه‌های بالای مورد بحث در ساخت هسته‌های مورق استاتور

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

اگر چه اولین سیستم تحریک آهن‌ربای دائم برای ماشین‌های الکتریکی در اوایل سال ۱۸۳۰ به کار گرفته شده بود، ولی به دلیل کیفیت پایین مواد مغناطیسی سخت استفاده از آنها به سرعت رو به سستی نهاد. اختراع آلیاژ آلومینیوم-نیکل-کبالت^۱ (Alnico) در سال ۱۹۳۱، فریت باریم در سال ۱۹۵۰ و به ویژه ماده کمیاب خاکی نئودیمیوم-آهن-بورون^۲ (NdFeB)؛ (معرفی شده در سال ۱۹۸۳) بازگشت سیستم تحریک آهن‌ربای دائم را ممکن ساخت.

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

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

اولین کار متمرکز بر روی ماشین‌های دیسکی آهن‌ربای دائم، در اواخر دهه ۷۰ و اوایل دهه ۸۰ انجام گرفت. ماشین‌های شار محوری آهن‌ربای دائم در دهه‌های اخیر رشد قابل توجهی داشته است به ویژه در

^۱ - Aluminum Nickel Cobalt

^۲ - Neodymium-Iron-Boron

دهه ۹۰ به طور گسترده‌ای در کاربردهای نیروی دریایی و خانگی به عنوان یک جایگزین بسیار مناسب برای ماشین‌های شار شعاعی متداول استفاده شده است [۵].

۱-۳- مقایسه ماشین‌های شار محوری با ماشین‌های شار شعاعی آهن‌ربای دائم [۴]

همگام با کاربرد مواد جدید، نوآوری در تکنولوژی ساخت و پیشرفت در روش‌های خنک‌سازی امکان افزایش بیشتر چگالی توان (نسبت توان خروجی به جرم یا حجم) ماشین‌های الکتریکی فراهم گردیده است. اما با این حال برخی محدودیت‌های ذاتی برای این افزایش چگالی توان برای ماشین‌های شار شعاعی آهن‌ربای دائم (RFPM) وجود دارند که عبارتند از:

۱- خصوصیت تراکم شار عبوری در مسیر انتهای دندانه استاتور در مورد ماشین‌های القایی و

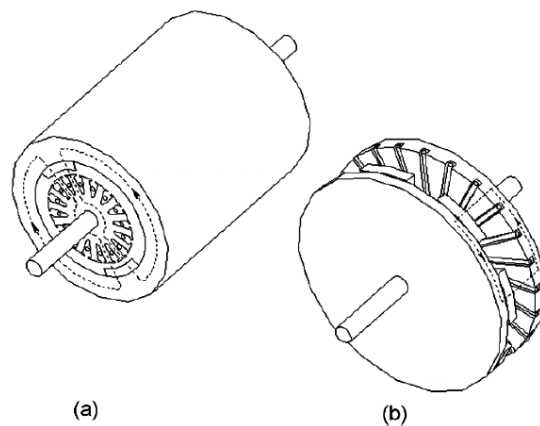
کموتاتوردار جریان مستقیم یا ماشین‌های بدون جاروبک با روتورهای خارجی. شکل (۲).

۲- از هسته روتور اطراف محور (یوغ روتور) به سختی به عنوان یک مدار مغناطیسی استفاده می‌شود.

۳- گرمای سیم‌پیچی استاتور ابتدا به هسته استاتور و سپس به بدنه منتقل می‌شود. لذا انتقال

گرمای ضعیفی از طریق فاصله هوایی استاتور، روتور و محور بدون وجود سیستم خنک‌کننده

صورت می‌گیرد.



شکل ۱-۲- توپولوژی های (a) ماشین RFPM (b) ماشین AFPM [۴]

این محدودیت‌های ذاتی ساختار شار شعاعی را محدود می‌کنند و نمی‌توانند به آسانی رفع شوند مگر این که یک توپولوژی جدید اختیار شود.

به طور خلاصه ماشین‌های شار محوری آهن‌ربای دائم دارای برخی ویژگی‌های برجسته‌ای نسبت به ماشین‌های شار شعاعی هستند که عبارتند از:

- ۱- ماشین‌های AFPM نسبت قطر به طول بزرگتری در مقایسه با ماشین‌های RFPM دارند.
- ۲- ماشین‌های AFPM می‌توانند به گونه‌ای طراحی شوند که نسبت توان به وزن بالاتری داشته باشند. در نتیجه در مواد هسته صرفه‌جویی شده و بازده بالاتری دارند.
- ۳- اندازه ماشین‌های AFPM در مقایسه با ماشین‌های RFPM متناظر کوچکتر است و ساختارهای روتور و استاتور دیسکی شکل یک ویژگی مهم ماشین‌های شار محوری است. به دلیل شکل و اندازه مناسب برای تطبیق با محدودیت فضا برای بعضی کاربردها مانند خودروهای الکتریکی بسیار مهم است.
- ۴- ماشین‌های AFPM دارای فاصله‌های هوایی دو وجهی و قابل تنظیم می‌باشند که در ماشین‌های شار شعاعی این امکان وجود ندارد.
- ۵- ماشین‌های AFPM دارای قطر بیرونی هسته بزرگتر می‌باشند که با تطبیق تعداد قطب‌های بیشتر می‌توانند انتخاب مناسبی برای عملکردهای فرکانس بالا یا سرعت پایین باشند.
- ۶- علاوه بر موارد فوق جهت شار فاصله هوایی ماشین‌های AFPM می‌تواند متنوع باشد و توپولوژی‌های متمایز زیادی به دست آیند که این ویژگی مزایای برجسته‌ای را نسبت به ماشین‌های شار شعاعی متداول در بعضی از کاربردها ایجاد می‌کنند.

۴-۱- انواع ماشین‌های شار محوری آهن ربای دائم [۴]

عملاً ماشین‌های دیسکی به سه نوع زیر محدود می‌شوند:

۱- ماشین‌های آهن‌ربای دائم جریان مستقیم کموتاتوردار^۱

۲- ماشین‌های آهن‌ربای دائم بدون جاروبک جریان مستقیم و سنکرون

۳- ماشین‌های القایی

ماشین‌های AFPM جریان مستقیم کموتاتوردار از آهن‌رباهای دائم (PM^۲ ها) به جای سیستم تحریک میدان الکترومغناطیسی استفاده می‌کنند. روتور (آرمیچر) می‌تواند به صورت روتور سیم‌پیچی شده یا روتور سیم‌پیچی چاپی طراحی شود. در روتور سیم‌پیچی شده، سیم‌پیچی آرمیچر از سیم‌های مسی ساخته شده و توسط رزین فرم داده شده‌اند. کموتاتور مشابه نوع متداول بوده، یعنی می‌تواند از هر دو نوع کموتاتور استوانه‌ای^۳ و شعاعی^۴ باشد. موتور با سیم‌پیچی آرمیچر چاپی نوع دیسکی در شکل (۳) نشان داده شده است. روتور (آرمیچر) بدون هسته فرومغناطیسی بوده و سیم‌پیچی آن مشابه سیم‌پیچی موجی ماشین‌های کموتاتوردار dc متداول می‌باشد. کلاف‌ها از تکه‌هایی از ورق مس به گونه‌ای نقش بسته و سپس جوشکاری شده‌اند که یک سیم‌پیچی موجی را تشکیل می‌دهند. هنگامی که این موتور توسط Henuy Babdet اختراع شده بود آرمیچر با استفاده از روشی ساخته شد که مشابه روش ساخت بُرد مدار چاپی بود. به همین خاطر این موتور سیم‌پیچی چاپی نامیده شد. شار مغناطیسی موتور کموتاتوردار سیم-پیچی چاپی با یک فاصله هوایی بزرگ می‌تواند با استفاده از آهن‌رباهای آلومینیوم-نیکل-کبالت (Alnico) با پس‌ماند مغناطیسی بالا ایجاد شود.

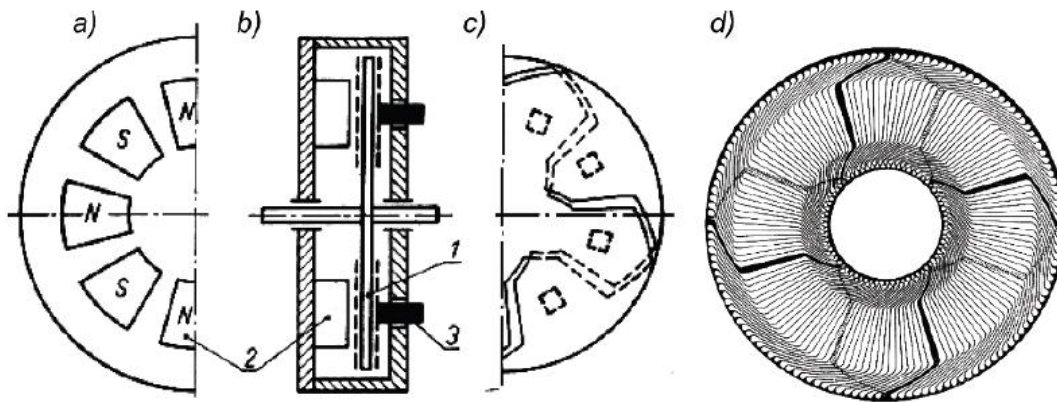
¹ -PM DC Commutator Machines

² - Permanent Magnet

³ -cylindrical

⁴ - radial

ماشین‌های AFPM جریان مستقیم کموتاتوردار هنوز برای صنایع خاص، صنایع اتومبیل و کاربردهای خانگی مانند فن‌ها، دمنده‌ها، خودروهای برقی کوچک و ... انتخابی جامع و اقتصادی است.



شکل ۱-۳- موتور ۸ قطب آهن‌ربای دائم جریان مستقیم کموتاتوردار - (a) استاتور با آهن‌رباهای دائم (b) مقطع عرضی (c) سیم‌پیچی روتور (آرمیچر) و زغال‌ها (d) ساختمان سیم‌پیچی $2p=8$ با ۱۴۵ میل. ۱- روتور با سیم‌پیچی چابی دو وجهی ۲- آهن‌رباهای دائم ۳- زغال‌ها [۴]

عملاً ماشین‌های جریان مستقیم بدون جاروبک و جریان متناوب سنکرون تقریباً دارای ساختار یکسان هستند. اگر چه تئوری و اساس عملکرد قدری متفاوت است. تفاوت اصلی در شکل عملکردی شکل موج جریان است. شکل (۴).

- ماشین dc بدون جاروبک یک شکل موج EMF دوزنقه‌ای تولید می‌کند و با یک شکل موج خط

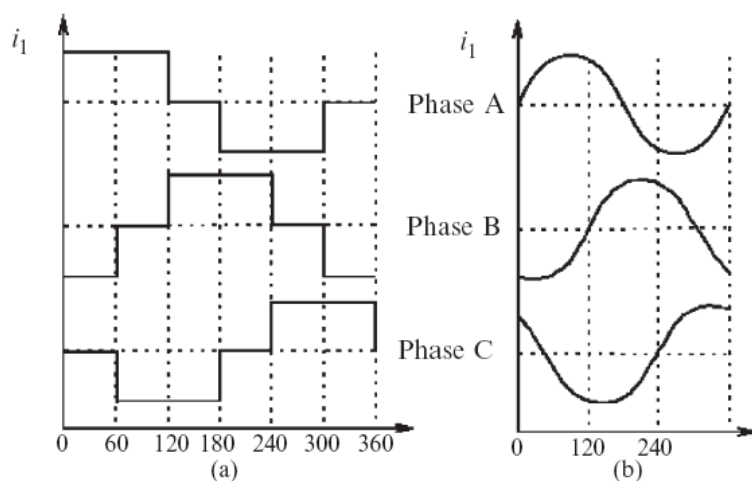
مستطیلی کار می‌کند. (همچنین ماشین "موج مربعی"^۱ نامیده می‌شود).

- ماشین ac سنکرون یک شکل موج EMF سینوسی تولید می‌کند و با جریان سینوسی کار می‌-

کند. (همچنین ماشین "موج سینوسی"^۲ نامیده می‌شود).

^۱ - square-wave

^۲ - sine-wave



شکل ۴-۱- شکل موج جریان برای ماشین‌های AFPM بدون جاروبک (a) ماشین موج مربعی (b) ماشین موج سینوسی [۴]

۵-۱- مقایسه ماشین‌های AFPM با تحریک جریان موج سینوسی و موج مربعی [۶]

خصوصیات موتورهای DC بدون جاروبک عبارتند از:

۱- توزیع مستطیلی شار مغناطیسی در فاصله هوایی

۲- شکل موج جریان مستطیلی

۳- سیم‌پیچی‌های متمرکز استاتور

خصوصیات موتورهای موج سینوسی (AC بدون جاروبک) عبارتند از:

۱- توزیع سینوسی یا شبه سینوسی شار مغناطیسی در فاصله هوایی

۲- شکل موج جریان سینوسی یا شبه سینوسی

۳- توزیع شبه سینوسی هادی‌های استاتور؛ یعنی سیم‌پیچی استاتور گام کوتاه شده و توزیع شده یا

متمرکز

بنابراین ماشین‌های AFPM می‌توانند برای کار با جریان موج مربعی یا سینوسی طراحی شوند. همانطور که بیان شد اساس عملکردشان کاملاً مشابه است، اما می‌توانند با توجه انواع کاربردهای مختلف، انتخاب شوند. برای مثال، وقتی یک گشتاور بزرگتر و یا یک سیستم محرک ساده‌تر مورد نیاز است، ماشین‌های DC بدون جاروبک می‌توانند پیشنهاد مناسبی باشند. همچنین یک گشتاور یکنواخت‌تر و نویز صوتی کمتر می‌تواند با ماشین‌های AC بدون جاروبک به دست آید.

۱-۵-۱- انتخاب سیستم تحریک [۶]

انتخاب بین دو ماشین موج سینوسی و موج مربعی باید مطابق با کاربرد مورد نیاز باشد. تصمیم‌گیری نباید منحصرأ بر اساس ماشین باشد بلکه بخش‌های مبدل و کنترلر نیز باید در نظر گرفته شوند. به طور کلی راجع به ماشین‌های موج سینوسی و موج مربعی می‌توان نوشت:

- ۱- اختلاف چگالی گشتاور قابل ملاحظه‌ای بین ماشین‌های موج سینوسی و موج مربعی وجود ندارد.
- ۲- ماشین‌های موج سینوسی می‌توانند به صورت کارآمدتر و بهره‌ورتر از ماشین‌های موج مربعی طراحی شوند.
- ۳- ماشین‌های موج سینوسی قابلیت تولید گشتاور یکنواخت در سرعت بالا را دارند.
- ۴- گشتاور ماشین موج مربعی در سرعت بالا یا با ولتاژ تغذیه پایین به دلیل اعوجاج جریان فاز کاهش می‌یابد.
- ۵- ماشین‌های موج سینوسی نیاز به دقت بالا و مبدل وضعیت گران قیمت دارند.
- ۶- کنترل ماشین موج سینوسی پیچیده‌تر است.

۷- تلفات سوئیچینگ مبدل در عملکرد موج سینوسی بالاتر است.

از موارد بالا می‌توان نتیجه گرفت که برای کاربردهای سرعت بالا، گشتاور بالا و ولتاژ تغذیه پایین ماشین-های موج سینوسی مزیت‌های بیشتری را ارائه می‌دهند.

ساختن یک روتور مورق با سیم‌پیچی قفسه‌ای برای یک ماشین القایی نوع دیسکی مشکل است. اگر سیم‌پیچی قفسه‌ای با یک صفحه همگن غیرمغناطیسی با هدایت بالا (مس یا آلومینیوم) یا صفحه فولادی پوشیده با لایه مس جایگزین شود عملکرد ماشین به شدت خراب می‌شود. بنابراین تا کنون علاقه کمی در زمینه ماشین‌های القایی نوع دیسکی وجود داشته است [۴].

۱-۶- برخی از ویژگی‌های مشترک ماشین‌های AFPM [۶]

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

مزایا:

- ساختمان فشرده ماشین و طول بدنه کوتاه
- چگالی توان بالا
- راندمان بالا؛ بدون تلفات مس روتور به دلیل تحریک آهن‌ربای دائم

- دارای روتور کوتاه در جهت محوری با قابلیت ساختمان بدون فولاد روتور

- دارای ساختار مستحکم‌تر از نوع استوانه‌ای

معایب:

- تلفات بادخوری بالا در کاربردهای سرعت بالا (که می‌تواند با قرار دادن ماشین در محفظه خلأ تا

حدی کاهش یابد).

- توپولوژی پیچیده ماشین با دو یا چند فاصله هوایی

در فصل بعد به بررسی انواع ساختارها و توپولوژی‌های ماشین شار محوری آهن‌ربای دائم پرداخته می‌شود

و در پایان فصل یک ساختار مناسب جهت کاربرد مورد نیاز که موتور محرک زیردریایی می‌باشد انتخاب

می‌شود.

فصل ۲

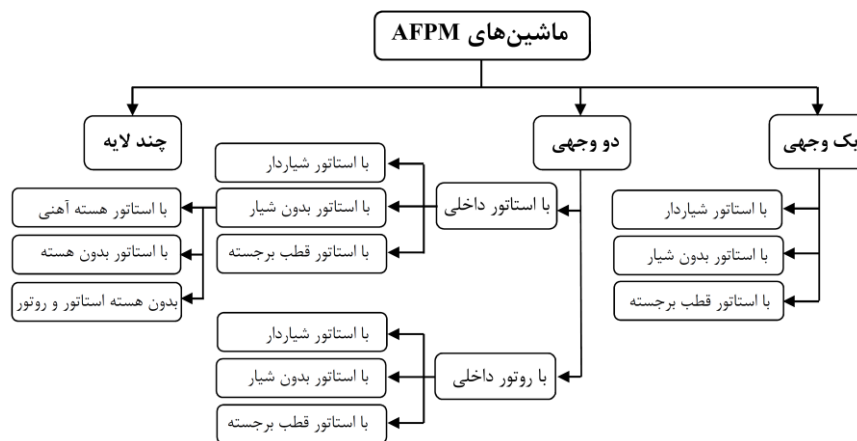
بررسی انواع توپولوژی‌های ماشین شار

محوری آهنربای دائم

در این فصل انواع توپولوژی‌های ماشین AFPM از نظر ساختاری که در مراجع مختلف آمده‌اند مورد بررسی قرار می‌گیرند و مقایسه‌هایی نیز از جنبه‌های مختلف بین آنها صورت می‌گیرد و در نهایت در پایان فصل یک ماشین مناسب از نظر نوع ساختار و دیگر پارامترها برای کاربرد مورد نظر انتخاب می‌شود.

۲-۲- انواع توپولوژی‌های ماشین شار محوری آهن‌ربای دائم [۴]

از نظر ساختاری، ماشین‌های AFPM بدون جاروبک می‌توانند به صورت ماشین‌های "یک وجهی"^۱، "دو وجهی"^۲، یا "چند لایه (چند دیسکی)"^۳ با یا بدون شیار آرمیچر، با یا بدون هسته آرمیچر، با روتور PM داخلی یا خارجی، با "اتصال سطحی"^۴ یا "درونی"^۵ آهن‌رباهای دائم طراحی شوند. در پیکربندی‌های دو وجهی، هر دو آرایش استاتور خارجی یا روتور خارجی می‌توانند در نظر گرفته شوند. به طور کلی طبقه‌بندی انواع توپولوژی‌های ماشین AFPM بدون جاروبک به صورت نمودار شکل ۲-۱ می‌باشد.



شکل ۲-۱- نمودار طبقه‌بندی انواع توپولوژی‌های ماشین AFPM

¹ - Single-sided

² - double-sided

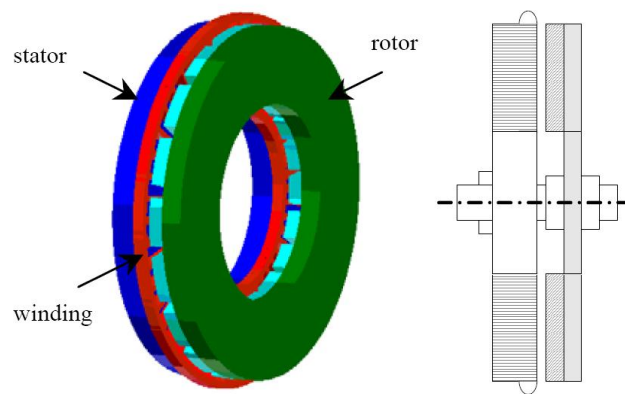
³ - multi-stage (multi-disc)

⁴ - surface-mounted

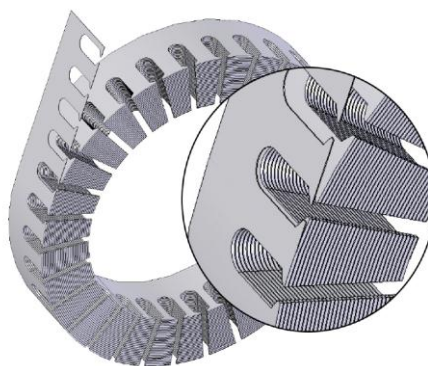
⁵ - buried

۳-۲- ماشین‌های AFPM یک وجهی

ابتدائی‌ترین، ساده‌ترین و ارزان‌ترین ساختار ماشین شار محوری، ساختار "یک روتور- یک استاتور"^۱ است که در شکل ۲-۲ دیده می‌شود. استاتور شامل یک سیم‌پیچی نوع حلقه‌ای جای گرفته در یک ماده شبه اپوکسی و یک دیسک آهنی که از یک "هسته آهنی پیچانده شده نواری"^۲ مطابق شکل ۳-۲ ساخته شده است [۵]، [۶]. روتور نیز از یک صفحه فولادی یک پارچه که آهن‌رباها روی آن نصب شده‌اند تشکیل شده است.



شکل ۲-۲- ساختار ماشین شار محوری آهن‌ربای دائم یک روتور- یک استاتور [۵]



شکل ۳-۲- استاتور مورق یک ماشین AFPM ساخته شده از یک نوار فولادی تنها پیچیده شده به صورت دایره‌ای [۷]

¹ - single-rotor-single-stator

² - tape wound iron core

از آن جایی که این ساختار هنوز هم از نیروی محوری نامتعادل بین روتور و استاتور رنج می‌برد به طوری که پیامد آن آرایش یاطاقان‌های پیچیده‌تر و نیاز به صفحه روتور نازک‌تر می‌باشد و از طرف دیگر به واسطه تولید گشتاور نسبتاً پایین این نوع ماشین خیلی رواج ندارد [۶]، [۸]. مانع اصلی در طراحی ماشین شار محوری با ساختار یک لایه وجود نیروی محوری بزرگ اعمال شده توسط آهن‌رباهای روتور به استاتور است. این نیروی آهن‌رباها می‌تواند به راحتی ساختار این ماشین را دچار پیچش کند. به هر حال از آن جایی که این نیرو به آهن اعمال می‌شود نه به سیم‌پیچی‌های مسی، لذا اگر دندانه‌های استاتور حذف شوند (استاتور بدون شیار) شدت نیروی محوری کمتر خواهد شد [۵]. اما باید توجه داشت که استاتور از نوع بدون شیار برای کاربرد در جاهایی که موتور در معرض هر نوع تنش مکانیکی باشد خیلی مناسب نیست [۶].

۲-۳-۱- تکنیک‌های اتصال آهن‌رباهای دائم به روتور

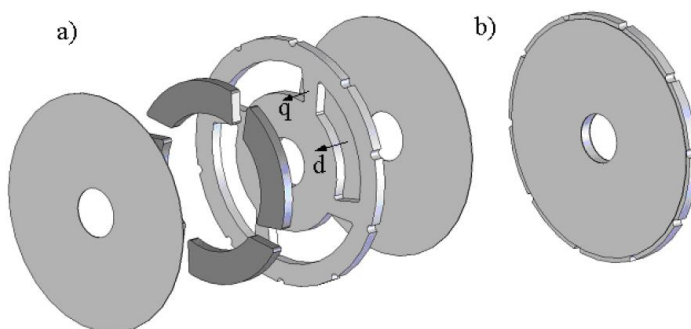
در مورد تکنیک‌های اتصال آهن‌رباهای دائم به روتور روش‌های مختلفی وجود دارد. ماشین‌های AFPM می‌توانند با نوع "اتصال سطحی" یا "درونی" آهن‌رباهای دائم بر روی دیسک روتور طراحی شوند. برای موتورهای آهن‌ربای دائم با اتصال سطحی، چون "پرمیانس"^۱ آهن‌رباها تقریباً معادل با فضای آزاد است فاصله هوایی موثر بزرگتر است، اندوکتانس سیم‌پیچی استاتور خیلی پایین است و (در ناحیه ثابت توان-سرعت، بدون افزایش اندازه KVA اینورتر) قابلیت توانایی موتور برای عملکرد در سرعت‌های بالای سرعت پایه‌اش محدود می‌شود، که عیب اصلی این نوع ساختار است. برای ماشین‌های نوع آهن‌ربای دائم درونی، آهن‌رباهای دائم درون آهن جاسازی شده‌اند و ساختار از نظر مکانیکی کاملاً مقاوم است. مثلاً آهن‌رباها در مقابل نیروهای گریز از مرکز به ویژه در عملکرد سرعت بالا خیلی خوب محافظت می‌شوند. عیب اصلی این

¹ -permeance

روش می‌تواند مشکلات ساخت آن باشد [۶]. در شکل ۲-۴ ساختار یک ماشین شار محوری آهن‌ربای دائم با "یک روتور- یک استاتور" که استاتور آن دارای شیار می‌باشد و آهن‌رباها نیز بر روی دیسک روتور به صورت اتصال سطحی نصب شده‌اند نشان داده شده است [۸]. روش مونتاژ PMها به روتور به صورت درونی در شکل ۲-۵ نشان داده شده است. به طوری که در شکل ۲-۵ دیده می‌شود روتور از یک دیسک آلومینیومی که محل قرار گرفتن PMها بر روی آن تعبیه شده است و الگوی نصب نیز نامیده می‌شود و باعث می‌شود که PMها به طور دقیق و محکم در جای خود قرار بگیرند و همچنین دو صفحه صاف آلومینیومی که بر روی دو طرف دیسک روتور نصب می‌شوند تشکیل شده است [۷].



شکل ۲-۴- ساختار ماشین شیاردار شار محوری آهن‌ربای دائم یک روتور- یک استاتور [۸]



شکل ۲-۵- ساختمان روتور ماشین شار محوری با آهن‌ربای دائم درونی (a) نمای گسترده (b) نمای مونتاژ شده [۷]

۴-۲- ماشین‌های AFPM دو وجهی

همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد ماشین‌های AFPM برحسب آرایش روتور- استاتور می‌توانند به صورت یک وجهی، دو وجهی و چند لایه طراحی شوند. همچنین بیان شد که مشکل ساختار یک وجهی وجود نیروی محوری نامتعادل بین روتور و استاتور آن می‌باشد، که این نیروی جذب قوی بین روتور و استاتور می‌تواند با استفاده از استاتور (یا روتور) دوم که به صورت قرینه اولی قرار می‌گیرد متعادل شود. این ساختار آرایش "دو وجهی" نامیده می‌شود [۶].

۴-۲-۱- انواع توپولوژی‌های آرایش دو وجهی

به طور کلی ماشین‌های AFPM بر حسب موقعیت قرار گرفتن روتور(ها) و استاتور(ها) به دو نوع کلی گروه‌بندی می‌شوند که یکی ساختار "روتور خارجی - استاتور داخلی" می‌باشد که ماشین‌های دارای این ساختار به طور کلی دارای N استاتور و $N+1$ روتور (برای $N \geq 1$) می‌باشند. لذا برای ساختار آرایش دو وجهی اگر $N=1$ انتخاب شود ماشین دارای ساختار "دو روتور - یک استاتور" خواهد بود که یک استاتور سیم‌پیچی شده بین دو روتور حامل آهن‌رباهای دائم قرار می‌گیرد و به اختصار به ماشین نوع "TORUS"^۱ معروف است. همچنین در این‌جا لازم است به این موضوع اشاره شود که نام TORUS برای نشان دادن طبیعت حلقوی هسته استاتور و نیز سیم‌پیچی استاتور در نظر گرفته شده است [۱]. ساختار دیگر "روتور داخلی - استاتور خارجی" می‌باشد که ماشین‌های دارای این ساختار نیز به طور کلی دارای $N+1$ استاتور و N روتور (برای $N \geq 1$) می‌باشند. و لذا برای ساختار آرایش دو وجهی اگر $N=1$ انتخاب شود ماشین دارای ساختار "دو استاتور - یک روتور" خواهد بود که یک روتور حامل آهن‌رباهای دائم بین دو استاتور سیم‌پیچی شده قرار می‌گیرد و به آن ساختار روتور داخلی نیز می‌گویند و به اختصار به ماشین نوع

^۱ - Two-Rotor-One-Stator

"AFIR"^۱ معروف است. با توجه به این که ماشین‌های AFPM دو وجهی گسترده‌ترین کاربرد را دارند در ادامه این دو گروه کلی و انواع مختلف آن مورد بررسی قرار می‌گیرند [۸]، [۹].

۲-۴-۱-۱- ماشین‌های نوع TORUS

ماشین‌های نوع TORUS بر حسب نوع ساختار استاتور به دو نوع ماشین TORUS بدون شیار "TORUS-NS"^۲ و TORUS شیاردار "TORUS-S"^۳ ساخته می‌شوند.

۲-۴-۱-۱-۱- ماشین نوع TORUS-NS

اولین ماشین آهنربای دائم نوع TORUS با استاتور بدون شیار در اواخر سال ۱۹۸۰ معرفی شد (Spooner and Chalmers, 1988)، [۸]. ماشین TORUS بدون شیار (TORUS-NS) ساختار نوعی دو روتور-یک استاتور، شار محوری، آهنربای دائم، بدون شیار، دیسکی شکل می‌باشد. یک مدل ایده‌آل از ساختار ماشین در شکل ۲-۶ نشان داده شده است. ماشین یک استاتور دارد که بین دو دیسک روتور که حامل آهنرباهای دائم می‌باشند قرار گرفته است. استاتور ماشین توسط هسته نواری پیچانده شده با سیم‌پیچی فاصله هوایی AC چند فاز که به دور هسته استاتور با اتصال پشت به پشت (نوع گرامه)^۴ پیچیده می‌شود ساخته شده است [۵]. ساختار روتور توسط آهنربای NdFeB قوسی شکل با اتصال سطحی، هسته روتور و محور ساخته شده است. دو روتور دیسکی شکل، آهنرباهای NdFeB مغناطیس شده محوری را که بر روی سطح داخلی دو دیسک روتور به صورت محوری نصب شده‌اند حمل می‌کنند. ساختار استاتور و روتور با جزئیات بیشتر در شکل ۲-۷ دیده می‌شوند. بخش هادی‌های مؤثر در ایجاد گشتاور، قسمت‌های شعاعی

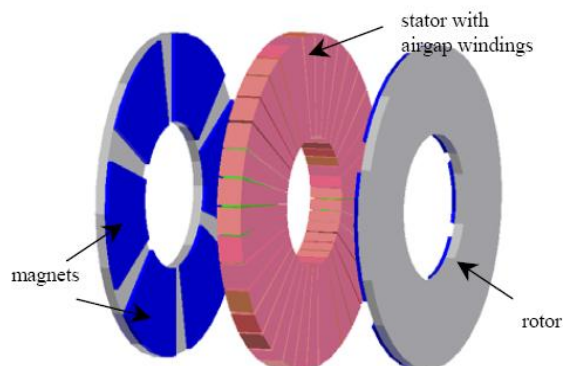
^۱ - Axial Flux Interior Rotor Permanent Magnet

^۲ - TORUS-Non Slotted

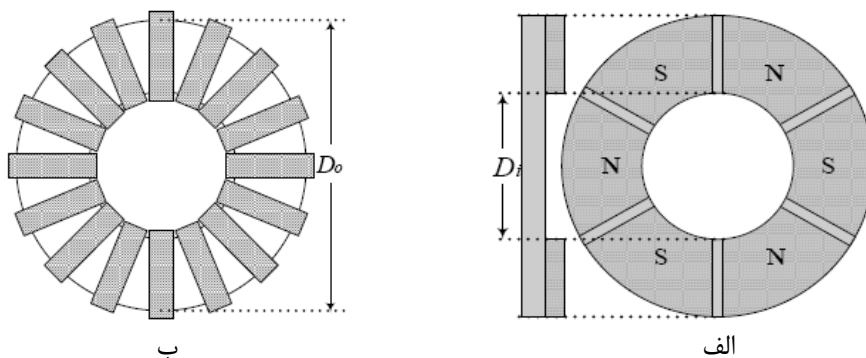
^۳ - TORUS-Slotted

^۴ - Gramme

سیم‌پیچی چنبره‌ای روبروی ساختارهای دو روتور می‌باشد. مسیرهای شار اصلی ماشین TORUS در قطر متوسط به صورت دو بعدی و سه بعدی در شکل‌های ۲-۸-الف و ب نشان داده شده‌اند.

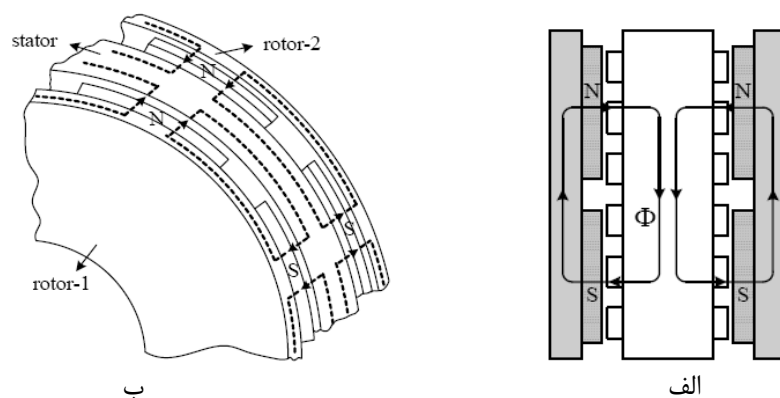


شکل ۲-۶- پیکربندی موتور شار محوری نوع TORUS بدون شیار با آهن‌ربای دائم با اتصال سطحی (TORUS-NS) [۵]



شکل ۲-۷- ساختار روتور و استاتور ماشین TORUS بدون شیار (TORUS-NS) (الف) روتور (ب) استاتور [۵]

به طوری که در شکل‌های ۲-۸-الف و ب دیده می‌شود شار از قطب N آهن‌رباها از طریق دو فاصله هوایی به داخل هسته استاتور وارد می‌شود. سپس شار به صورت محیطی در امتداد هسته استاتور طی مسیر کرده، از میان فاصله‌های هوایی برمی‌گردد و سپس از طریق قطب مخالف (قطب S) آهن‌ربای دائم وارد هسته روتور می‌شود. بنابراین انتظار می‌رود طول محوری هسته استاتور کاملاً بلند باشد زیرا شار ورودی به استاتور جمع شارهای هر دو روتور می‌باشد. همچنین لازم به ذکر است که این ماشین به خاطر جهت شار می‌تواند به صورت ترکیبی از دو نیمه مستقل تصور شود.



شکل ۲-۸- جهت‌های شار ماشین TORUS-NS (الف) دو بعدی (ب) سه بعدی [۵]

توپولوژی TORUS بدون شیار به خاطر دارا بودن طول محوری کوتاه، نسبت توان به وزن یا گشتاور به وزن بالایی دارد. فرض می‌شود قسمت‌های بین سیم‌پیچی فاصله هوایی با رزین اپوکسی^۱ پر شده باشد همان گونه که در همه ساختارهای بدون شیار به منظور افزایش استحکام و مقاوم بودن و نیز انتقال بهتر تلفات گرمایی این کار انجام می‌گیرد. علاوه بر این در توپولوژی TORUS سیم‌پیچی‌ها در فاصله هوایی برای تولید گشتاور استفاده می‌شوند. سیم‌پیچی‌های انتهایی کاملاً کوتاه هستند که منجر به ساخت ماشین TORUS-NS با تلفات مس پایین‌تر، بازدهی بالاتر و انتقال گرمای راحت‌تر می‌شود. سیم‌پیچی فاصله هوایی بدون شیار مقدار کمتری اندوکتانس متقابل و نشتی ایجاد می‌کند. اثرات ناشی از وجود شیارها مانند: ریپل شیار، گشتاور دندانگی^۲، تلفات فرکانس بالای روتور و اشباع در دندانه‌های استاتور حذف می‌شوند و این ویژگی منجر به یک ماشین با نویز پایین می‌شود. علاوه بر این اثر مغناطیس‌زدایی آهن‌رباها به دلیل فاصله هوایی موثر بزرگ کاملاً کوچک است از این رو با استفاده از آهن‌رباهای NdFeB چگالی شار فاصله هوایی بالایی به دست می‌آید. به علاوه ویژگی مهم دیگر این ماشین این است که اندوکتانس خودی آن کوچکتر است [۵]. در طراحی ماشین بدون شیار، مؤلفه‌های پرمیانس ریپل شار، تلفات آهنی دندانه، اشباع دندانه و لرزش‌های مربوط به دندانه حذف می‌شوند. از طرفی به واسطه سیم-

^۱ - epoxy resin

^۲ - Cogging Torque

پیچی انتهایی نسبتاً کوتاه، تلفات مسی نیز کمتر است. اما نوع بدون شیار برای کاربرد در جاهایی که ماشین در معرض تنش‌های مکانیکی باشد مناسب نیست [۶].

۲-۴-۱-۱-۲- ماشین‌های نوع TORUS-S

ماشین TORUS با وجود شیارهای آرمیچر بسیار مقاوم‌تر است و از طرفی نیز فاصله هوایی مؤثر آن خیلی کوچکتر است. مزیت دیگر ماشین شیاردار مجاز بودن آن برای ساختارهای مختلف سیم‌بندی است که منجر به توزیع شار مختلف می‌شود [۶]. همچنین در رابطه با آرایش آهن‌رباها بر روی روتور نیز می‌تواند تغییراتی ایجاد شود به طوری که آرایش آهن‌رباها بر روی مسیر شار اصلی در روتور یا استاتور ماشین به همان اندازه ساختار سیم‌پیچی تأثیر دارد [۸]. دو نوع مختلف ماشین TORUS شیاردار، TORUS-S نوع NS^1 و TORUS-S نوع NS^2 می‌توانند با توجه به جهت شار اصلی به دست آیند [۹].

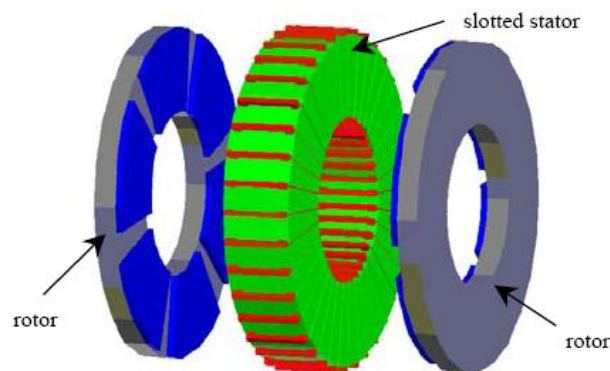
۲-۴-۱-۱-۲- ماشین‌های نوع TORUS-S و NN

یک تصویر سه بعدی از ساختار موتور TORUS-S نوع NN در شکل ۲-۹ نشان داده شده است. ماشین دارای یک استاتور و دو دیسک روتور که آهن‌رباهای دائم بر روی آن نصب شده‌اند همان‌طوری که در ماشین TORUS بدون شیار بود می‌باشد. استاتور دارای ساختار شیاردار با فولاد استاتور پیچانده شده نواری می‌باشد. سیم‌پیچی توزیع شده با اتصال پشت به پشت به صورت مساوی داخل شیارهای پشت به پشت جای داده شده‌اند. ساختار روتور دقیقاً همانند روتور ماشین TORUS-NS می‌باشد. روتورهای دیسکی شکل آهن‌رباهای مغناطیس شده محوری را که بر روی سطح داخلی دیسک‌های روتور به صورت محوری نصب شده‌اند حمل می‌کنند. سیم‌پیچی‌ها در جهت شعاعی برای تولید گشتاور به کار می‌روند. بنابراین سیم‌پیچی‌های انتهایی کاملاً کوتاه هستند که منجر به تلفات مس پایین‌تر و راندمان بالای این

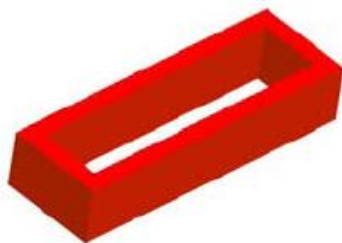
¹ - North-North

² - North-South

توپولوژی می‌شوند. ساختار سیم‌پیچی پشت به پشت که برای ماشین با هر دو ساختار بدون شیار و شیاردار به کار می‌رود در شکل ۲-۱۰ دیده می‌شود [۵].

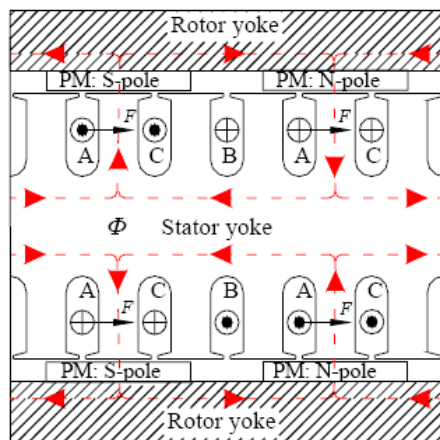


شکل ۲-۹- ساختار موتور شار محوری نوع TORUS شیاردار با آهن‌ربای دائم با اتصال سطحی (TORUS-S) [۵]

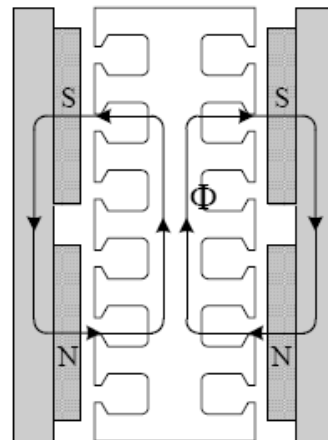


شکل ۲-۱۰- ساختار سیم‌پیچی پشت به پشت استفاده شده در ماشین‌های شار محوری بدون شیار و شیاردار نوع NN [۵]

مسیرهای شار ماشین TORUS-S نوع NN در شکل‌های ۲-۸ و ۲-۱۱ نشان داده شده‌اند. اساس عملکرد ماشین همانند توپولوژی TORUS بدون شیار است. همان‌گونه که در هر دو شکل دیده می‌شود شار تولیدی آهن‌رباها ابتدا به فاصله هوایی و سپس به هسته استاتور وارد می‌شود. شار در امتداد یوغ استاتور عبور می‌کند، به طوری که در توپولوژی TORUS بدون شیار بود، و مسیرش را از طریق پلاریته مخالف آهن‌ربای دائم و هسته می‌بندد [۵]. همچنین در شکل ۲-۱۱-ب ساختار ماشین TORUS-S نوع NN با جزئیات بیشتر که در آن مسیرهای عبوری شار و محل قرارگیری قطب‌ها نسبت به هم و نیز ساختار سیم‌پیچی مشخص شده است نشان داده شده است [۸].



ب [۸]



الف [۵]

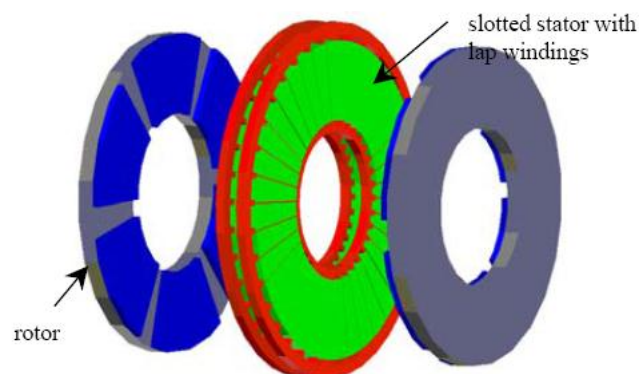
شکل ۱۱-۲- جهتهای شار در طرح دو بعدی ماشین TORUS-S با آرایش آهنرباهای دائم از نوع NN

همانطور که در شکل ۱۱-۲ دیده می شود از آن جایی که شار اصلی به صورت محیطی در امتداد هسته استاتور جاری می شود یک یوغ استاتور ضخیم مورد نیاز خواهد بود که باعث افزایش تلفات آهن می شود. و همین طور طول سیم پیچی انتهایی کوتاه در هر دو جهت محوری و شعاعی ماشین به دست خواهد آمد. لذا در این ساختار به خاطر طول سیم پیچی انتهایی کوتاه تلفات مس نیز کاهش خواهد یافت [۸].

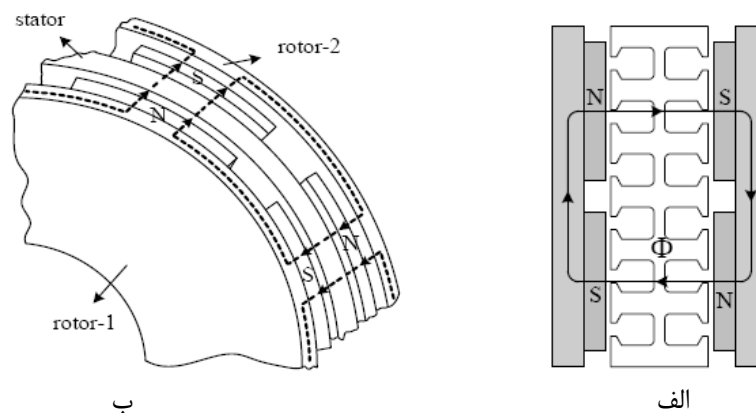
۲-۴-۱-۱-۲- ماشین TORUS-S نوع NS

ماشین TORUS-S نوع NS که در شکل ۱۲-۲ نشان داده شده است همان ساختار فیزیکی ماشین TORUS نوع NN است به جز این که یوغ استاتور حذف شده است یا در مقایسه با نوع اول ماشین TORUS-S به طور چشمگیری کاهش یافته است. ساختار آن دارای دو روتور دیسکی شکل است که آهنرباهای مغناطیس شده محوری را که بر روی سطح داخلی دیسک های روتور به صورت محوری نصب شده اند حمل می کنند. ساختار استاتور نیز مانند نوع اول می باشد. تنها تفاوت در جهت مغناطیس کنندگی آهنرباهای دائم و مسیر شار است. نمایش طرح دو بعدی و سه بعدی جهت شار ماشین TORUS-S نوع NS در شکل های ۱۳-۲- الف و ب به ترتیب نشان داده شده اند [۵]. در شکل ۱۴-۲ طرح دو بعدی ماشین

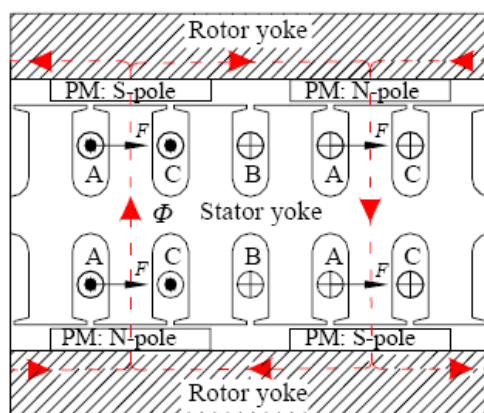
TORUS نوع NS با جزئیات بیشتر که در آن مسیرهای عبوری شار و محل قرارگیری قطب‌ها نسبت به هم و نیز ساختار سیم‌پیچی مشخص شده است نشان داده شده است. از آن جایی که شار به صورت محوری از طریق استاتور عبور می‌کند و به صورت محیطی طی مسیر نمی‌کند ضخامت محوری استاتور می‌تواند کمتر از ماشین TORUS-S نوع NN باشد. این ویژگی مهم منجر به وزن کمتر، تلفات آهن پایین‌تر و در نتیجه راندمان بالاتر از ماشین TORUS-S می‌گردد.



شکل ۲-۱۲- ساختار موتور شار محوری نوع TORUS شیاردار نوع NS با آهن‌ربای دائم با اتصال سطحی [۵]



شکل ۲-۱۳- جهت‌های شار ماشین TORUS-NS نوع NS (الف) دو بعدی (ب) سه بعدی [۵]



شکل ۲-۱۴- جهت‌های شار در طرح دو بعدی ماشین TORUS-S با آرایش آهن‌رباهای دائم از نوع NS [۸]

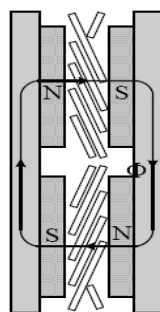
در این ساختار از نظر تئوری برای هیچ منظوری نیاز به یوغ استاتور نمی‌باشد، اما به هر حال باید یک یوغ کوچک به خاطر محدودیت‌های مکانیکی وجود داشته باشد [۵]. از طرفی طول سیم‌پیچی انتهایی بلند (بیشتر از یک گام قطب) خواهد بود که به مفهوم تلفات مس بیشتر است [۶]. تفاوت دیگر بین دو توپولوژی TORUS-S در نوع سیم‌پیچی است. در نوع NN هم سیم‌پیچی با اتصال پشت به پشت و هم سیم‌پیچی رویهم^۱ می‌توانند استفاده شوند در حالی که در نوع NS به منظور تولید گشتاور فقط سیم‌پیچی سه فاز رویهم می‌تواند استفاده شود [۵].

۲-۴-۱-۱-۳- ماشین TORUS نوع NS بدون هسته

ماشین دیگر TORUS نوع NS که در مرجع [۵] معرفی شده است به دلیل این که نیاز به هسته یا یوغ استاتور ندارد به ماشین بدون هسته (بدون یوغ) معروف می‌باشد و در توان‌های کوچک و متوسط دیده می‌شود. شکل دو قطبی ماشین در شکل ۲-۱۵ دیده می‌شود. روتور ماشین همانند ماشین‌های شار محور آهن‌ربای دائم دیگر دارای آهن‌رباهای با اتصال سطحی روی دیسک روتور می‌باشد. اما ساختار استاتور فقط در سیم‌پیچی، با استاتور ماشین TORUS با هسته تفاوت دارد. لازم به ذکر است که این نوع ماشین

^۱ - Lap Winding

در مقالات علمی کمتر بررسی شده است. ایده اصلی پشت ماشین‌های بدون هسته این است که از آن جایی که شار اصلی از یک روتور به روتور دیگر مسیرش را می‌بندد و از هسته استاتور عبور نمی‌کند، ساختار استاتور می‌تواند حذف شود [۵].



شکل ۲-۱۵- ماشین TORUS نوع NS بدون هسته [۵]

۲-۴-۱-۲- ماشین‌های نوع AFIR

علاوه بر ماشین‌های شار محوری آهن‌ربای دائم نوع TORUS با استاتور داخلی - روتور خارجی، همچنین ماشین‌های شار محوری آهن‌ربای دائم نوع روتور داخلی - استاتور خارجی نیز وجود دارند. این ماشین‌ها دارای ساختار ساده، راندمان نسبتاً بالا و هزینه پایین می‌باشند. این ماشین‌ها می‌توانند برای کاربردهایی که چگالی توان و گشتاور بالا، راندمان بالا و نویز پایین با استفاده از آهن‌ربای NdFeB نیاز دارند استفاده شوند. این ماشین‌ها به دو صورت روتور داخلی - استاتور خارجی بدون شیار^۱ (AFIR-NS) و روتور داخلی - استاتور خارجی شیاردار^۲ (AFIR-S) وجود دارند [۸]، [۱۰].

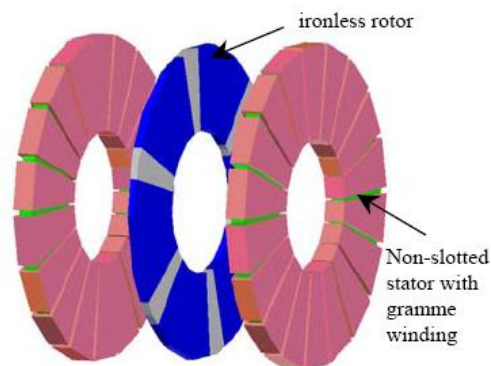
۲-۴-۱-۲-۱- ماشین نوع AFIR-NS

ساختار موتور آهن‌ربای دائم AFIR-NS از نوع استاتور خارجی و روتور داخلی می‌باشد که در شکل ۲-۱۶ نشان داده شده است. ساختار دارای دو استاتور و تنها یک روتور دیسکی آهن‌ربای دائم می‌باشد. استاتورها

^۱ -Axial Flux Interior Rotor-Non Slotted

^۲ -Axial Flux Interior Rotor- Slotted

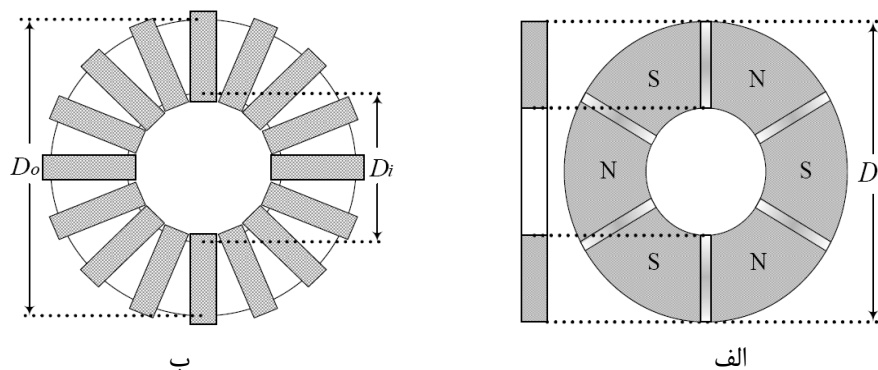
دارای ساختار بدون شیار با نوار فولادی پیچانده شده می‌باشند. سیم‌پیچی‌های توزیع شده با اتصال پشت به پشت در اطراف هسته استاتور قرار گرفته‌اند. یک ماده غیرمغناطیسی مانند رزین اپوکسی نیز برای پر کردن فضای بین سیم‌پیچی‌های استاتور به منظور افزایش استحکام و فراهم کردن انتقال گرمای هادی‌ها، همان‌طور که در همه ساختارهای بدون شیار انجام می‌گیرد، به کار رفته است [۵].



شکل ۲-۱۶- ساختار موتور شار محوری نوع AFIR بدون شیار با آهن‌ربای دائم با اتصال سطحی (AFIR-NS) [۵]

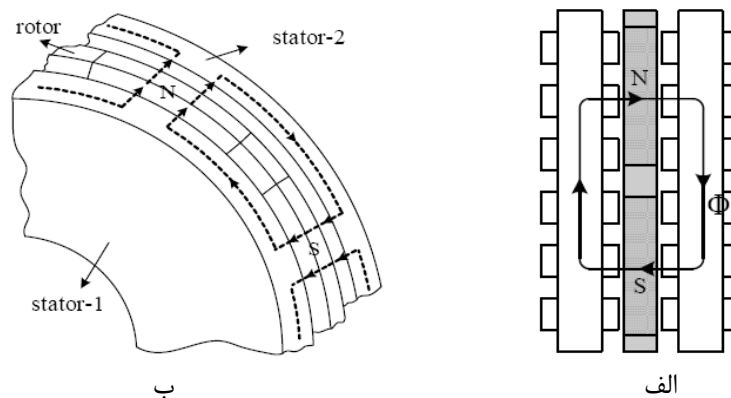
ساختار روتور در توپولوژی‌های AFIR با روتور توپولوژی‌های TORUS کمی متفاوت است. در توپولوژی‌های AFIR، برای سادگی، دیسک فولادی در ساختار روتور به کار نمی‌رود. زیرا شار اصلی از روتور عبور نمی‌کند. روتور تنها از آهن‌رباهای دائم NdFeB قوسی شکل مغناطیس شده محوری و یک محور ساخته می‌شود. از طرف دیگر، یک ماده غیرمغناطیسی برای پر کردن فضای بین آهن‌رباهای دائم و تشکیل یک ساختار مقاوم و محکم به کار می‌رود. زیرا هیچ نیازی به دیسک روتور مغناطیسی برای نگه داشتن آهن‌رباهای دائم نیست. این موضوع یک ویژگی مهم برای ماشین‌های شار محوری آهن‌ربای دائم روتور داخلی برای داشتن نسبت توان به اینرسی خیلی بالا به واسطه عدم وجود آهن در روتور فراهم می‌کند. این ویژگی ساختار AFIR را برای کاربردهایی که نیاز به اینرسی کوچک دارند بسیار جذاب می‌کند. همچنین آلومینیوم یا فولاد غیرمغناطیسی می‌توانند برای شکل دادن به ساختار یک روتور محکم و مقاوم استفاده

شوند. ساختار استاتور AFIR بدون شیار و روتور در شکل های ۲-۱۶-الف و ب برای نمایش بهتر نشان داده شده‌اند [۵].



شکل ۲-۱۷-الف) ساختار روتور توپولوژی‌های AFIR-NS و AFIR-S (ب) ساختار استاتور توپولوژی AFIR-NS [۵]

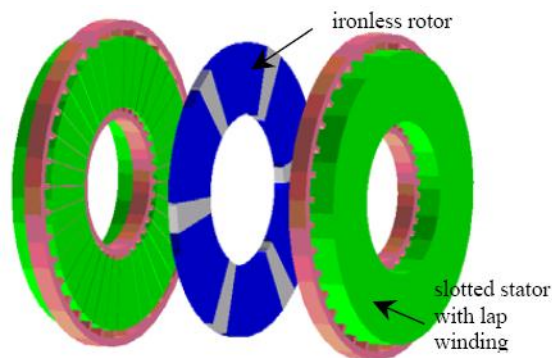
بخش‌های سیم‌پیچی استفاده شده برای تولید گشتاور بر روی وجوه داخلی استاتور که روبروی روتور قرار دارند می‌باشند. بنابراین سیم‌پیچی انتهایی در توپولوژی AFIR-NS نیز نسبتاً بلند است که تلفات مس زیادتر و راندمان پایین‌تری را ایجاد می‌کنند. علاوه بر این، باید ذکر شود که ماشین AFIR-NS اندوکتانس بزرگتری نسبت به ماشین نوع TORUS معادل آن دارد. از طرف دیگر، شار نشتی طرف‌های پشت (نه طرف‌های ایجاد گشتاور) توپولوژی AFIR-NS می‌تواند قسمت‌های آهنی را که به طور مناسب به ماشین متصل نشده‌اند به هم پیوند دهد. هر دو نمایش دو بعدی و سه بعدی مسیرهای شار ماشین AFIR بدون شیار در شکل ۲-۱۸-الف و ب به ترتیب نشان داده شده‌اند. همان‌طور که از قسمت دو قطبی دو بعدی دیده می‌شود، شار تولیدی آهن‌ربای دائم با پلاریته N از طریق فاصله هوایی به هسته استاتور وارد می‌شود. سپس شار به صورت محیطی در امتداد هسته استاتور عبور کرده، به فاصله هوایی برمی‌گردد، و سپس از طریق قطب S آهن‌ربا وارد هسته استاتور شده و مسیرش را از طریق فاصله هوایی می‌بندد.



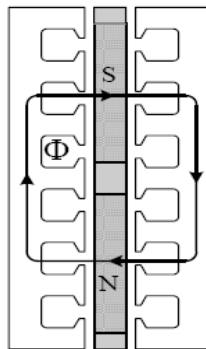
شکل ۲-۱۸- جهت‌های شار و توپولوژی ساختار AFIR-NS (الف) دو بعدی (ب) سه بعدی [۵]

۲-۲-۱-۴-۲- ماشین نوع AFIR-S

ماشین دیسکی نوع AFIR شیاردار یک نوع دیگر از موتور شار محوری آهن‌ربای دائم با اتصال سطحی می‌باشد، که در شکل ۲-۱۹ نشان داده شده است. ماشین توسط دو استاتور شیاردار و تنها یک روتور آهن‌ربای دائم ساخته می‌شود. هسته استاتور شیاردار ماشین نیز توسط هسته نواری پیچانده شده با یک سیم‌پیچی AC چند فاز از نوع رویهم که در شیارهای استاتور قرار گرفته‌اند ساخته می‌شود [۵]. ساختار روتور ماشین AFIR-S، که با ساختار روتور ماشین AFIR-NS یکسان است، تنها توسط آهن‌رباهای NdFeB مغناطیس شده محوری ساخته می‌شود که در آن رزین اپوکسی یا آلومینیوم در بین آهن‌رباها برای شکل دادن ساختار یک روتور صلب و محکم استفاده شده است. مسیر شار اصلی ماشین AFIR-S به همان صورتی که در ماشین AFIR-NS بود می‌باشد. در شکل ۲-۱۸-ب تصویر سه بعدی مسیر شار دیده می‌شود. همچنین تصویر دو بعدی مسیر شار بر روی دو قطب در قطر متوسط در شکل ۲-۲۰ نشان داده شده است. لازم به ذکر است که در توپولوژی AFIR-S به دلیل این که از سیم‌پیچی گام کوتاه شده استفاده شده است سیم‌پیچی‌های انتهایی نسبتاً کوتاه هستند که منجر به تلفات مس پایین‌تر و راندمان بهتر در مقایسه با همتای بدون شیارش می‌شود.



شکل ۲-۱۹- ساختار موتور شار محوری نوع AFIR شیاردار با آهنربای دائم با اتصال سطحی (AFIR-S) با دو مجموعه سیم‌پیچی رویهم در هر استاتور [۵]

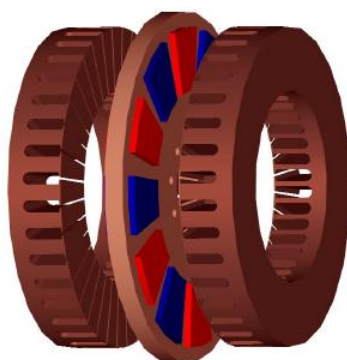


شکل ۲-۲۰- نمایش دو بعدی جهت‌های شار و ساختار ماشین نوع AFIR شیاردار [۵]

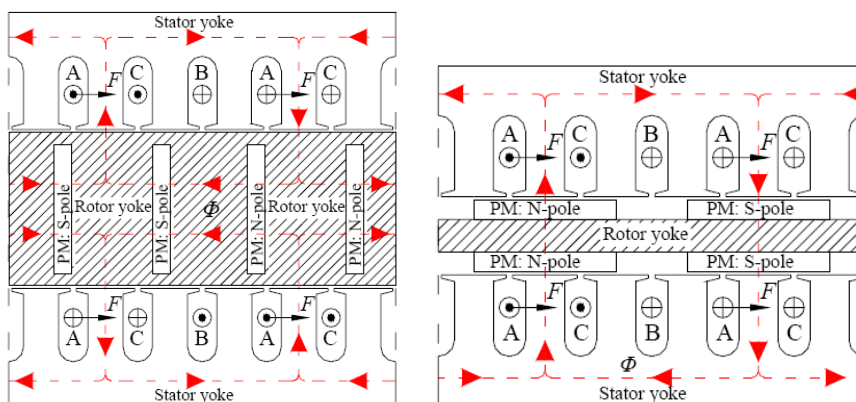
در شکل ۲-۲۱ نمونه استاتور شیاردار یک ماشین AFIR-S قبل و بعد از سیم‌پیچی مشاهده می‌شود. در شکل ۲-۲۲ ماشین ساختار نوع AFIR که دارای یک روتور و دو استاتور می‌باشد و آهنرباهای دائم به صورت اتصال سطحی بر روی دیسک روتور نصب شده‌اند دیده می‌شود. در شکل ۲-۲۳ الف طرح دو بعدی اتصال آهنرباها به صورت اتصال سطحی بر روی دیسک روتور نشان داده شده‌اند. همچنین به عنوان راه حل دیگر آهنرباها می‌توانند درون دیسک روتور به صورت شکل ۲-۲۳ ب قرار گیرند. در نتیجه شار اصلی به صورت محوری از طریق دیسک روتور یا در امتداد محیطی دیسک روتور جاری می‌شود. برای ساختن ساختار "یک روتور- یک استاتور" هر دو آرایش آهنرباها می‌توانند استفاده شوند اما در این مورد شار اصلی همواره در امتداد محیطی دیسک روتور جاری می‌شود [۸].



شکل ۲-۲۱- یکی از استاتورهای ماشین شار محوری نوع AFIR-S قبل و بعد از سیم‌پیچی [۸]



شکل ۲-۲۲- ساختار ماشین نوع AFIR شیاردار با اتصال سطحی آهن‌رباها [۸]



ب

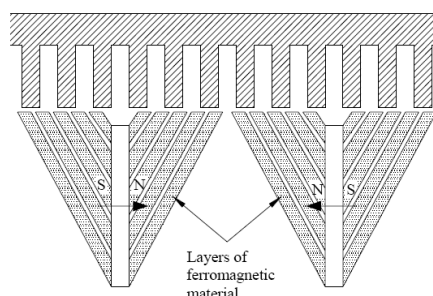
الف

شکل ۲-۲۳- طرح دو بعدی جهت‌های شار در ساختار ماشین نوع AFIR-S با: الف) اتصال سطحی آهن‌رباهای دائم ب) اتصال درونی آهن‌رباهای دائم [۸].

ساختار اتصال سطحی که در شکل ۲-۲۳-الف نشان داده شده است یک روتور خیلی نازک دارد به ویژه

اگر آهن‌رباها درون یک هسته روتور غیرمغناطیسی نصب شوند (Gieras, 1997; Platt, 1989). در راه حل

دیگر مطابق شکل ۲-۲۳-ب که آهنرباهای دائم درون دیسک روتور قرار می‌گیرند، ساختار دیسک روتور ضخیم‌تری دارد که منجر به کاهش چگالی توان ماشین می‌شود. ساختار استاتور به همان صورت باقی می‌ماند. شار نشتی در انتهای آهنربا در مقایسه با ساختار اتصال سطحی بزرگتر است زیرا آهنرباها توسط مواد مغناطیسی احاطه شده‌اند. اگر ضخامت و مغناطیس شوندگی آهنرباها در راستای شعاع ماشین ثابت باشد ممکن است مشکلاتی رخ دهد؛ در شعاع داخلی وابسته به قطر داخلی ماشین و تعداد جفت قطب‌ها ممکن است آهنرباهای دائم خیلی نزدیک به هم قرار گیرند که این موضوع ممکن است منجر به اشباع بیش از حد در هسته روتور در شعاع داخلی شود. از طرف دیگر، میزان چگالی شار در شعاع خارجی خیلی کوچکتر است که باعث توزیع چگالی شار غیر ثابت در امتداد فاصله هوایی شعاع ماشین می‌شود. در مقایسه بیشتر ساختار اتصال سطحی با ساختار درونی می‌توان گفت که برای ساختار درونی عکس‌العمل آرمیچر بزرگتر است، چون برای ساختار اتصال سطحی، آهنرباهای دائم تقریباً به عنوان هوا عمل می‌کنند بنابراین فاصله هوایی بزرگتری را تشکیل می‌دهند. همچنین به عنوان یک مزیت ساختار درونی در مقابل ضربه‌های مکانیکی، فرسودگی و خوردگی آهنرباها را بهتر محافظت می‌کند. برای ساختار آهنربای درونی، یک ساختمان قطب روتور مدولار شامل لایه‌هایی از مواد فرومغناطیسی و غیر فرومغناطیسی می‌تواند عکس‌العمل آرمیچر را کاهش دهد. این چنین ساختاری در شکل ۲-۲۴ نشان داده شده است. پل‌های غیر فرومغناطیسی بین لایه‌های فرومغناطیسی موجب می‌شود که رلوکتانس در مسیر خطوط میدان آرمیچر شدیداً افزایش یابد. در نتیجه، با در نظر گرفتن کاهش میدان آرمیچر، میدان آرمیچر در مقایسه با حالتی که در آن قطب روتور شامل فقط مدار مغناطیسی است به طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. برای ساختار پیشنهاد شده هر کدام از دندانه‌های استاتور به طور تقریبی با شار مغناطیسی یکسان تغذیه می‌شوند، بنابراین یک میدان تحریک ثابت واقعی وجود دارد. بعلاوه، در اینجا همچنین یک کاهش شار نشتی در انتهای آهنرباها به واسطه شکافهای ایجاد شده بین پل‌های غیر فرومغناطیسی ظاهر می‌شود [۸].



شکل ۲-۲۴- ساختار قطب روتور با توانایی کاهش عکس‌العمل آرمیچر [۸]

۲-۵- ماشین‌های چند لایه (چند دیسکی)

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

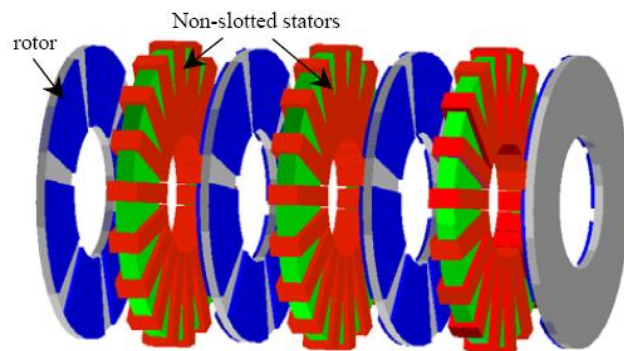
روتورها مشترک است [۵]. سیم‌پیچی‌های استاتور N استاتور می‌توانند هم به صورت موازی و هم به صورت سری متصل شوند. هسته روتور تنها برای روتور بیرونی استفاده شده باید به دقت انتخاب شود زیرا آنها مسیر شار اصلی را ایجاد می‌کنند [۵]. همچنین ماشین‌های شار محوری چند لایه نیز بر حسب عدم وجود یا وجود شیارهای استاتور به دو نوع توپولوژی شار محوری چند لایه بدون شیار^۱ (MULTI-NS) و توپولوژی شار محوری چند لایه شیاردار^۲ (MULTI-S) ساخته می‌شوند.

۲-۵-۱- ماشین شار محوری چند لایه بدون شیار (MULTI-NS)

یک طرح ساده از توپولوژی شار محوری چند لایه بدون شیار (MULTI-NS) برای $N=3$ در شکل ۲-۲۵ نشان داده شده است. استاتورها توسط فولاد استاتور پیچانده شده نواری ساخته شده‌اند. سیم‌پیچی‌های فاصله هوایی نوع گرامه با اتصال پشت به پشت در اطراف هسته استاتور قرار گرفته‌اند. دیسک‌های روتور بیرونی توسط هسته روتور و آهن‌رباهای با اتصال سطحی مغناطیس شده محوری همان‌طور که در دیگر توپولوژی‌های نوع TORUS بود ساخته می‌شوند. روتورهای داخلی به وسیله دیسک‌های روتور با آهن‌ربای دائم در هر دو طرف هسته استاتور ساخته می‌شوند. بخش‌های سیم‌پیچی مورد استفاده برای تولید گشتاور قسمت‌هایی از وجه‌های داخلی استاتورها که روبروی روتورها هستند می‌باشند. بنابراین سیم‌پیچی‌های انتهایی در توپولوژی MULTI-NS کاملاً کوتاه هستند که منجر به تلفات مس پایین و راندمان بالا می‌گردد. همچنین از آن جایی که طول ماشین MULTI-NS بلندتر از ماشین شار محوری یک لایه است مساحت سطح بدنه استاتور برای انتقال گرمای تولید شده بیشتر است [۵].

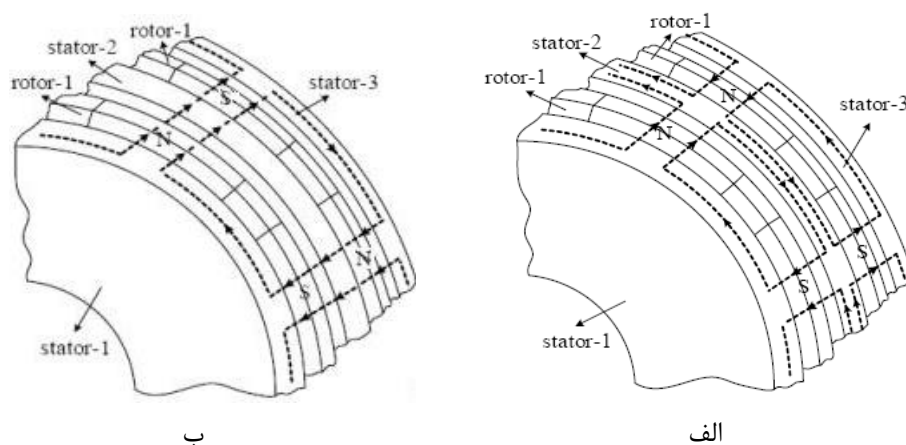
^۱ -Multi-Non Slotted

^۲ -Multi-Slotted



شکل ۲-۲۵- نمای سه بعدی از ماشین چند لایه‌ای آهن‌ربای دائم بدون شیار برای $N=3$ [۵]

مسیر شار ماشین‌های MULTI-NS اساساً با ساختار نوع TORUS یا AFIR یکسان است. همان‌طور که در شکل‌های ۲-۲۶-الف و ب دیده می‌شود شار از یک روتور بیرونی به روتور بیرونی دیگر از طریق N استاتور، $N+1$ روتور بدون هسته و $2N$ فاصله هوایی در هر کدام از ساختارهای روتور و استاتور عبور می‌کند.



شکل ۲-۲۶- نمایش سه بعدی مسیرهای شار توپولوژی چند لایه (دو روتور-سه استاتور). الف) نوع NN ب) نوع NS [۵]

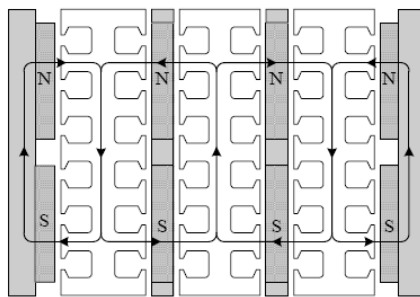
۲-۵-۲- ماشین چند لایه شیاردار (MULTI-S)

ساختار ماشین چند لایه‌ی شیاردار MULTI-S دارای تعداد N استاتور و $N+1$ روتور، شبیه توپولوژی MULTI-NS می‌باشد. در اینجا نیز دو ساختار متفاوت برای ماشین MULTI-S می‌توانند در نظر گرفته

شوند. یکی توپولوژی نوع NN (MULTI-S نوع NN) و دیگری توپولوژی نوع NS (MULTI-S نوع NS) است [۵].

۲-۵-۱- ماشین چند لایه شیاردار نوع NN (MULTI-S نوع NN)

در ماشین چند لایه شیاردار نوع NN (MULTI-S نوع NN) شار اصلی به صورت محیطی از استاتور عبور می‌کند بنابراین پشتی آهنی (Back-Iron) در هر استاتور مورد نیاز است. ساختار موتور در شکل ۲-۲۷ نشان داده شده است. استاتورهای MULTI-S نوع NN توسط فولاد استاتور نواری شیاردار پیچانده شده ساخته می‌شوند. هسته‌های استاتور شیاردار ماشین توسط هسته نواری پیچانده شده با سیم‌پیچی با اتصال پشت به پشت توزیع شده سینوسی در شیارهای استاتور ساخته می‌شود. ساختار روتور در هر دو ماشین MULTI-S یکسان و همانند ماشین MULTI-NS می‌باشد. همچنین یک ماده غیر مغناطیسی مانند رزین اپوکسی یا فولاد غیر مغناطیسی برای افزایش استحکام ساختار روتور استفاده شده است [۵].

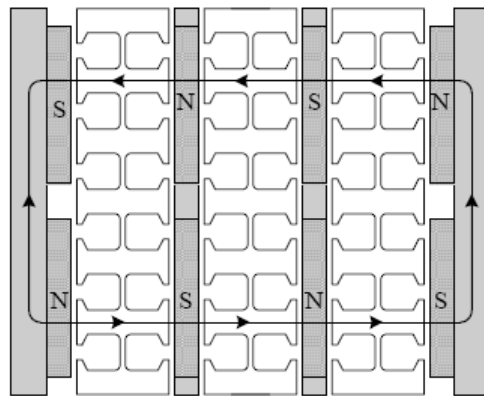


شکل ۲-۲۷- توپولوژی ماشین MULTI-S نوع NN برای $N=3$ [۵]

۲-۵-۲- ماشین چند لایه شیاردار نوع NS (MULTI-S نوع NS)

در ماشین چند لایه شیاردار توپولوژی نوع NS (MULTI-S نوع NS) شار اصلی در جهت محوری عبور می‌کند. از آن جایی که شار از هسته استاتور عبور نمی‌کند نیاز به پشتی آهنی (Back-Iron) نیست و

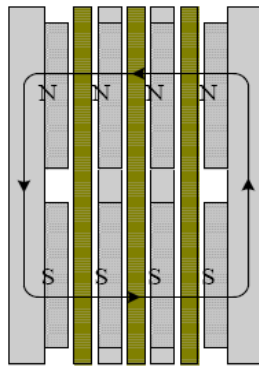
ساختار استاتور می‌تواند در چنین حالتی به گونه‌ای طراحی شود که فقط شامل تعدادی دندانه استاتور باشد. دندانه‌ها برای شکل دادن یک دایره توزیع می‌شوند و یکدیگر را در یک موقعیت توسط صفحه انتهایی که از مواد مغناطیسی ساخته شده است نگه می‌دارند. به علاوه یک پستی آهنی (Back-Iron) خیلی کوچک می‌تواند در ساختار استاتور برای شکل دادن یک ساختار صلب و محکم استفاده شود. ساختار روتور همان‌طور که در قسمت قبل نیز بیان شد در هر دو ماشین MULTI-S یکسان و همانند ماشین MULTI-NS می‌باشد. همچنین یک ماده غیر مغناطیسی مانند رزین اپوکسی یا فولاد غیر مغناطیسی برای افزایش استحکام ساختار روتور استفاده شده است. مزیت استفاده از ماشین MULTI نوع NS، که در شکل ۲-۲۸ نشان داده شده است، مشابه ماشین TORUS نوع NS است. به دلیل این که در ساختار استاتور ماشین MULTI نوع NS از هیچ پستی آهنی (Back-Iron) استفاده نشده است لذا اندازه ماشین کوچکتر از ماشین چند لایه‌ای نوع NN می‌باشد. همچنین در ساختار استاتور ماشین MULTI نوع NS راندمان و چگالی توان بیشتر از ماشین‌های چند لایه‌ای نوع NN است. به علاوه به دلیل این که برای توپولوژی‌های بدون شیار، ورقه‌ها برای ایجاد شیار بریده نمی‌شوند، اتلاف مواد هسته وجود ندارد [۵].



شکل ۲-۲۸- توپولوژی ماشین MULTI-S نوع NS برای $N=3$ [۵]

۲-۵-۳- ماشین شار محوری چند لایه با استاتور بدون هسته

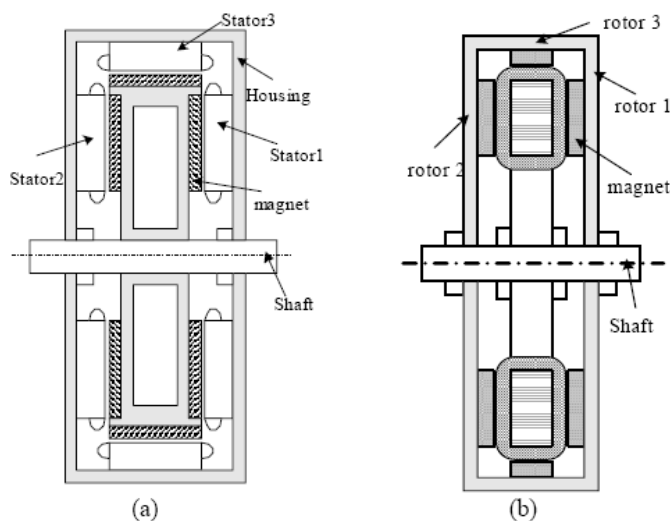
مدل دیگر از ماشین شار محوری چند لایه، مدل با استاتور بدون هسته است. این نوع ماشین می‌تواند با روتورهای چندتایی و سیم‌پیچی‌های آرمیچر بدون آهن استاتور ساخته شود. به طوری که در شکل ۲-۲۹ دیده می‌شود شار مغناطیسی از طریق ماشین از یک طرف به طرف دیگر عبور می‌کند [۵].



شکل ۲-۲۹- ماشین شار محوری چند لایه با استاتور بدون هسته [۵]

۲-۶- انواع دیگر ماشین شار محوری آهن ربای دائم [۵]

به علاوه برای موتورهای آهن‌ربای دائم روتور دیسکی، تعداد کمی ساختار موتور آهن‌ربای دائم ترکیبی دو وجهی در مقالات دیده شده است. یک موتور ترکیبی جذاب توسط دکتر Hsu ارائه شده است و این ماشین در شکل ۲-۳۰ الف نشان داده شده است. این موتور دارای سه مجموعه آهن‌ربا و سه مجموعه استاتور مطابق با آن می‌باشد. که به بدنه محکم بسته شده‌اند یک دیسک روتور دو مجموعه از آهن‌رباها را حمل می‌کند و در سراسر فاصله هوایی محوری عمل می‌کند. مجموعه سوم از آهن‌رباهای دائم در بالای دیسک روتور قرار گرفته است و با یک استاتور احاطه کننده به صورت یک ماشین آهن‌ربای دائم شار شعاعی در سراسر فاصله هوایی شعاعی عمل می‌کند.



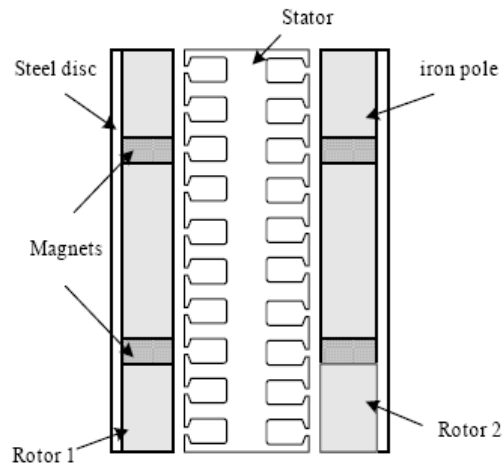
شکل ۳۰-۲- موتورهای ترکیبی دو وجهی با هر دو فاصله هوایی محوری و شعاعی [۵]

به عبارت دیگر همه سطوح ساختار روتور دارای آهنربای دائم می‌باشند و در ایجاد گشتاور استفاده می‌شوند. ماشین چگالی توان بالایی را ارائه می‌دهد زیرا تمام سطح روتور در تولید گشتاور استفاده شده است. یک موتور آهنربای دائم ترکیبی دو وجهی دیگر در شکل ۳۰-۲-ب نشان داده شده است. آهنرباها استاتور را احاطه می‌کنند و سیم‌پیچی‌های آرمیچر از سه طرف تولید گشتاور می‌کنند و تنها طرف داخلی سیم‌پیچی استاتور هیچ گشتاوری تولید نمی‌کند. لازم به ذکر است که وجود مدل شیاردار این ساختار نیز ممکن است اما ساختار این موتور استحکام لازم را ندارد.

تعداد اندک دیگری از ماشین‌های شار محوری آهنربای دائم وجود دارند که در مقالات به آنها پرداخته شده است. ساختار ماشین شار محوری آهنربای دائم داخلی^۱ (AFIPM) با بیش از دو قطب در شکل ۳۱-۲ نشان داده شده است. ساختار توسط دو روتور آهنربای دائم درونی و یک استاتور نواری پیچانده شده ساخته شده است. دو مجموعه سیم‌پیچی چند فاز درون شیار قرار گرفته‌اند. روتور دارای

^۱- Axial flux interior Permanent Magnet

قطب‌های فولادی قوسی شکل، آهن‌رباهای مربعی شکل مغناطیسی شده مماسی و یک دیسک فولادی برای نگه داشتن قطب‌ها و آهن‌رباها می باشد.

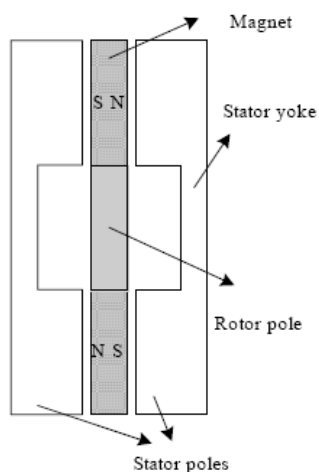


شکل ۲-۳۱- ماشین شار محوری داخلی آهن ربای دائم (AFIPM) [۵]

ماشین AFIPM دارای بعضی ویژگی‌های جالب برای کاربردهای کشندگی می باشد. یکی از ویژگی‌های مهم این ماشین توانایی آن در به دست آوردن مقدار گشتاور مورد نیاز در ناحیه تضعیف میدان توسط طراحی اندوکتانس‌های استاتور (L_d و L_q) می باشد زیرا فاصله هوایی مؤثر ماشین خیلی کوچک است. دیگر این که ماشین AFIPM دارای ساختار کاملاً مستحکم می باشد. زیرا آهن‌رباها در بین قطب‌های آهنی پوشیده شده‌اند و همین طور سیم‌پیچی‌های استاتور درون ساختار آهنی قرار گرفته‌اند. بنابراین این ساختار می تواند برای کاربردهای سرعت بالا مورد استفاده قرار گیرد.

یکی دیگر از ساختارهای ماشین شار محوری آهن‌ربای دائم، ماشین شار محوری از دو طرف برجسته آهن‌ربای دائم می باشد^۱ (AFDSPM) که در شکل ۲-۳۲ نشان داده شده است.

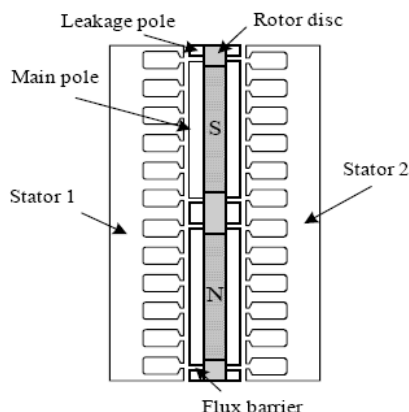
^۱ - Axial Flux Doubly Salient PM



شکل ۲-۳۲- ماشین شار محوری از دو طرف برجسته آهنربای دائم (AFDSM) [۵]

در این ماشین از آهنرباهای فریت و قطبهای شار در روتور و قطبهای برجسته با سیمپیچی متمرکز در استاتور استفاده شده است. اصل عملکرد شار محوری تعادل الکترومغناطیسی سیمپیچی ماشین را تضمین می‌کند. به علاوه ماشین از یک ساختار از دو طرف برجسته بهره می‌برد که اثر تمرکز شار آهنربای دائم را افزایش می‌دهد. ماشین AFDSM و همتای شعاعی آن در مقایسه با ماشین AFIPM ساختار مکانیکی ساده‌تر و قابلیت خنک‌کنندگی بهتر، نه فقط از ماشین AFIPM، بلکه از اکثر ماشین‌های شار شعاعی را نیز دارد. اکثر کاربردهای سرعت متغیر نیاز به استفاده از تضعیف میدان ندارند. اما بعضی از کاربردها مانند محرک‌های کشنده‌ها، ماشین‌های لباسشویی و محرک‌های محورهای وجود دارند که نیاز به عمل تضعیف میدان دارند.

یکی دیگر از محدود ماشین‌های شار محوری برای عمل تضعیف شار توسط Profumo و دیگران مطرح شده است. ساختار ماشین با بیش از دو قطب در شکل ۲-۳۳ نشان داده شده است. این تحقیق درباره طراحی یک ماشین شار محوری آهنربای دائم داخلی (AFIPM) با عمل تضعیف شار با استفاده از مواد مغناطیسی نرم بحث می‌کند.

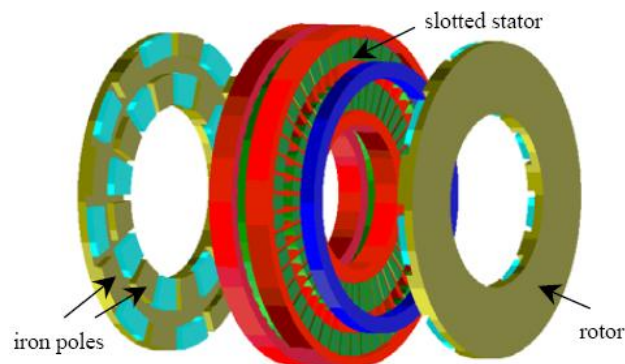


شکل ۲-۳۳- موتور سنکرون شار محوری آهنربای دائم داخلی ساخته شده با پودر مواد مغناطیسی نرم [۵]

ماشین از دو استاتور شیاردار و تنها یک روتور تشکیل شده است یک طرف استاتور شیاردار دارای هسته نواری پیچانده شده با سیم‌پیچی استاتور با اتصال سری می‌باشد. ساختار روتور دارای آهنرباهای مغناطیس شده محوری، دیسک روتور و قطب‌های اصلی و نشتی می‌باشد. دو مانع شار در بین قطب‌های نشتی و اصلی وجود دارند. موقعیت و اندازه مانع شار می‌توانند از این روش که اندوکتانس‌های محور d و q استاتور می‌توانند گشتاور مورد نیاز را در ناحیه تضعیف شار جبران کنند طراحی گردند.

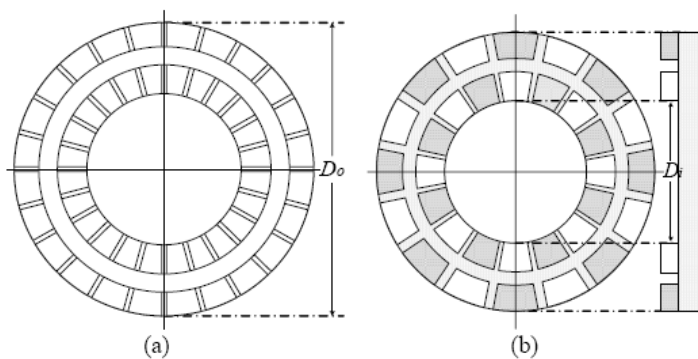
اخیراً یک توپولوژی ماشین شار محوری آهنربای دائم با یک سیم‌پیچی میدان DC به منظور انجام کنترل آسان و ارزان قیمت در دانشگاه Wisconsin Madison معرفی شده است. این ماشین جدید شار محوری با اتصال سطحی آهنرباهای دائم با میدان کنترل شده^۱ (FCAFP) پیشنهاد شده نه تنها بر مشکل تزریق جریان مربوطه غلبه می‌کند بلکه ویژگی‌های ماشین‌های آهنربای دائم متداول را با ارائه یک مفهوم ماشین شار محوری جدید با توانایی تضعیف شار بهبود می‌بخشد. استنتاج مفهوم جدید که ماشین دو استاتور- یک روتور نوع NS نامیده می‌شود و به عنوان یک مثال برای توصیف ساختار استفاده شده است در شکل ۲-۳۴ نشان داده شده است.

¹ - Field Controlled Axial Flux surface mounted PM



شکل ۲-۳۴- ساختار ماشین شار محوری با اتصال سطحی آهنرباهای دائم با میدان کنترل شده (FCAFPM) [۵]

ساختار جدید از دو قسمت ساختار استاتور شیاردار نوع دیسکی پیچانده شده نواری که یکی درون دیگری جای داده شده است، دو دیسک روتور با آهنرباهای سطحی مغناطیس شده محوری و قطعات آهن، دو مجموعه سیم‌پیچی استاتور سه فاز AC و یک سیم‌پیچی میدان DC که تفاوت اصلی بین ماشین شار محوری آهنربای دائم و ماشین FCAFPM مفهوم جدید است تشکیل شده است. به عبارت دیگر دو منبع در ماشین وجود دارند که یکی تحریک آهنربای ثابت و دیگری تحریک میدان DC متغیر می‌باشد. ساختار ماشین با جزئیات در شکل ۲-۳۵ نشان داده شده است.



شکل ۲-۳۵- نمای دو بعدی ماشین FCAFPM (a) استاتور (b) روتور [۵]

سیم‌پیچ تحریک DC از یک پلاریته تمایل به افزایش قطب‌های منته به هر دو قسمت داخلی و بیرونی روتور دارند، بنابراین میدان تقویت می‌شود. سیم‌پیچ تحریک DC با پلاریته مخالف، میدان را در

قطب‌های منته‌جه در هر دو قسمت داخلی و بیرونی دیسک روتور کاهش می‌دهد که به موجب آن شار فاصله هوایی تضعیف می‌شود. این توپولوژی خطر مغناطیس‌زدایی آهن‌رباها را حذف می‌کند زیرا آمپر-دور میدان DC نمی‌تواند مستقیماً با آمپر-دور آهن‌ربا مخالفت کند و شار فاصله هوایی می‌تواند در محدوده وسیعی با استفاده از ماشین FCAFPM کنترل گردد.

۲-۷- انتخاب ساختار ماشین مناسب برای محرک زیردریایی

به عنوان بخش پایانی در این فصل برای تصمیم‌گیری نهایی در مورد انتخاب ماشین مورد نظر جهت استفاده در محرک زیردریایی انواع ماشین‌های شار محوری آهن‌ربای دائم و ماشین‌های شار شعاعی از نظر برخی پارامترهای مهم مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند. پس از مقایسه این پارامترها ساختار ماشین مناسب انتخاب خواهد شد. ماشین‌های شار محوری آهن‌ربای دائم نسبت به ماشین‌های شار شعاعی دارای مزایای بی‌شماری می‌باشند. این ماشین‌ها لایه‌ای بوده و به صورت محوری مونتاژ می‌شوند که این موضوع باعث سادگی ساخت آن می‌شود. در این ماشین‌ها هسته استاتور توسط پیچاندن یک نوار به صورت حلقه-ای به آسانی ساخته می‌شود. از طرف دیگر در ماشین‌های با سیم‌پیچی فاصله هوایی که ماشین‌های شار محوری بدون شیار می‌باشند نیازی به پانچ کردن شیارها نمی‌باشد. چگالی توان (یا گشتاور) بهبود یافته و همین‌طور کاهش نویز صوتی ویژگی منحصر به فرد این نوع ماشین‌ها در مقایسه با ماشین‌های شار شعاعی می‌باشد. گشتاور دندانگی به واسطه عدم وجود دندانه روتور یا استاتور در نوع سیم‌پیچی فاصله هوایی در ماشین‌های شار محوری بدون شیار وجود ندارد و ماشین‌های شار محوری شیاردار دارای گشتاور دندانگی نسبتاً کمی می‌باشند. بعلاوه گشتاور رپل در مقایسه با ماشین‌های شار شعاعی آهن‌ربای دائم کاملاً کوچک می‌باشد. کلاف‌ها می‌توانند برای MMF سینوسی طراحی شوند و یک گشتاور یکنواخت با عملکرد نسبتاً بی‌صدا به دست آید. علاوه بر آن هارمونیک‌های MMF می‌توانند با پیچاندن مناسب سیم‌پیچی‌های

فاصله هوایی به دور هسته استاتور برای توپولوژی‌های بدون شیار بیشتر کاهش یابند. در نهایت، خنک-سازی ماشین‌های شار محوری در توپولوژی‌های بدون شیار نسبتاً آسان است زیرا سیم‌پیچی‌های مسی بدون قرار گرفتن در داخل محفظه یا پوششی بر روی سطح دیسک استاتور قرار گرفته‌اند [۱۱]. در ادامه پارامترهای اساسی انواع ساختار موتورهای شار شعاعی و شار محوری با هم مقایسه شده‌اند. قبل از آن در جدول ۱-۲ معرفی اصطلاحات اختصاری ساختار انواع ماشین‌های شار شعاعی و شار محوری آمده است.

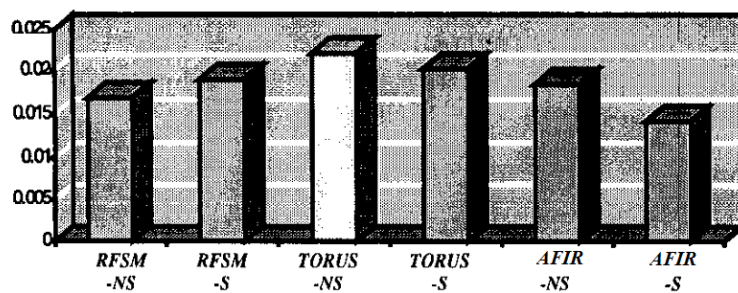
جدول ۱-۲ - ساختار انواع موتورهای شار شعاعی و شار محوری [۱۲].

Abbreviation	Radial and Axial Flux Surface Magnet PM Machine Types
RFSM-NS	Radial flux surface mounted PM non-slotted motor
RFSM-S	Radial flux surface mounted PM slotted motor
TORUS-NS	Axial flux external rotor internal stator PM non-slotted motor
TORUS-S	Axial flux external rotor internal stator PM slotted motor
AFIR-NS	Axial flux internal rotor external stator PM non-slotted motor
AFIR-S	Axial flux internal rotor external stator PM slotted motor

۱-۷-۲ - مقایسه برخی پارامترهای انواع ماشین‌های شار شعاعی و شار محوری

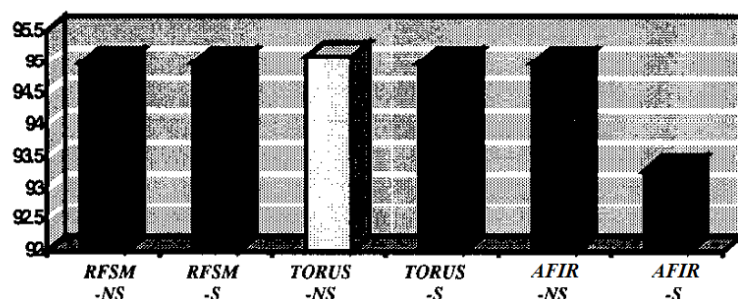
- توپولوژی‌های TORUS شیاردار و بدون شیار میزان چگالی توان یا گشتاور بالاتری در مقایسه با

ماشین‌های RFSM دارند. شکل ۳۶-۲.



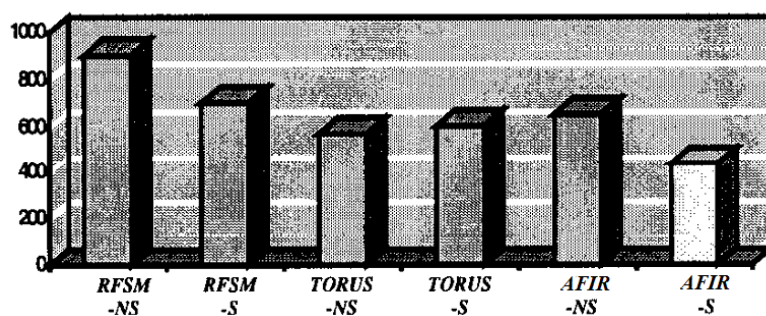
شکل ۳۶-۲ - مقایسه چگالی توان (نیوتن بر سانتیمتر مربع) [۱۱]

- راندمان همه توپولوژی‌ها کاملاً بالا و تقریباً نزدیک به هم است. شکل ۳۷-۲.

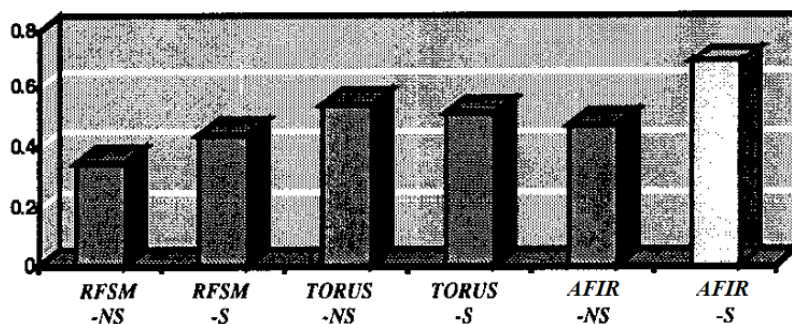


شکل ۲-۳۷- مقایسه راندمان (درصد) [۱۱]

- توپولوژی‌های AFIR شیاردار و بدون شیار دارای کمترین وزن نسبت به دیگر ساختارها می‌باشند. به ویژه، توپولوژی AFIR-S کمترین وزن و بیشترین ضریب استفاده را دارد. شکل ۲-۳۸ و ۲-۳۹.



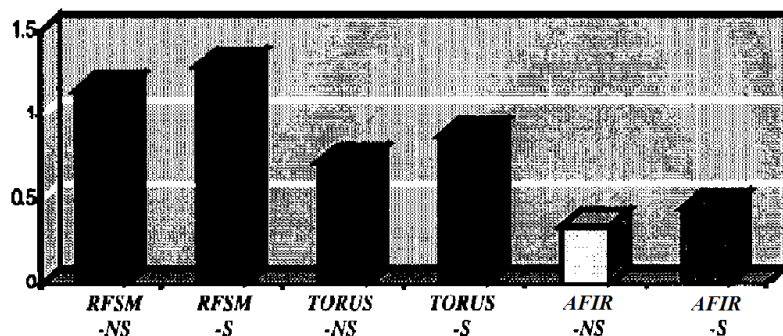
شکل ۲-۳۸- مقایسه وزن (پوند) [۱۱]



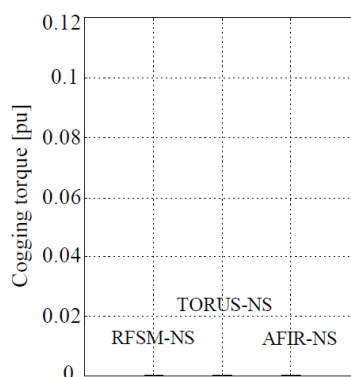
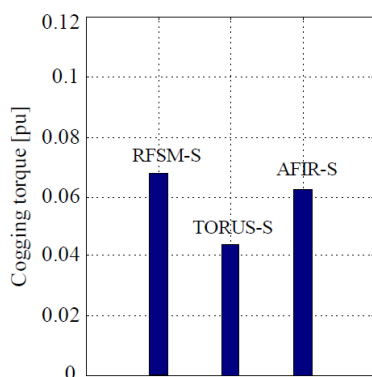
شکل ۲-۳۹- مقایسه ضریب استفاده (کیلووات بر کیلوگرم) [۱۱]

- توپولوژی‌های شار محوری بدون شیار از نظر چگالی گشتاور، راندمان و پراکنده‌سازی حرارت همواره بهتر از توپولوژی‌های شار محوری شیاردار می‌باشند. شکل ۲-۴۰.

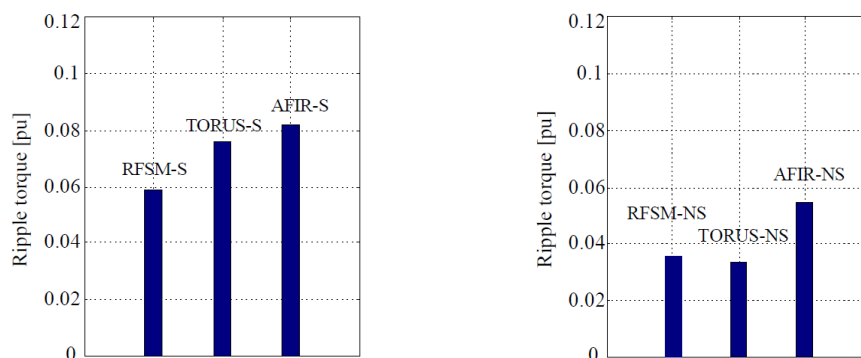
- توپولوژی روتور داخلی ماشین‌های شار محوری برای استفاده از صفحه خنک کننده برای انتقال حرارت هادی‌ها راحت‌تر هستند.
- به طور کلی، توپولوژی‌های بدون شیار دارای گشتاور دندانگی قابل چشم‌پوشی می‌باشند. بیشترین گشتاور دندانگی مربوط به ماشین RFSM-S است. شکل ۲-۴۱.
- به طور کلی، توپولوژی‌های بدون شیار دارای گشتاور رپل پایین‌تری نسبت به توپولوژی‌های شیاردار می‌باشند. شکل ۲-۴۲.
- توپولوژی TORUS-NS دارای کمترین رپل گشتاور در مقایسه با دیگر توپولوژی‌ها می‌باشد.



شکل ۲-۴۰- مقایسه پراکنده سازی حرارت (وات بر سانتیمتر مربع) [۱۱]



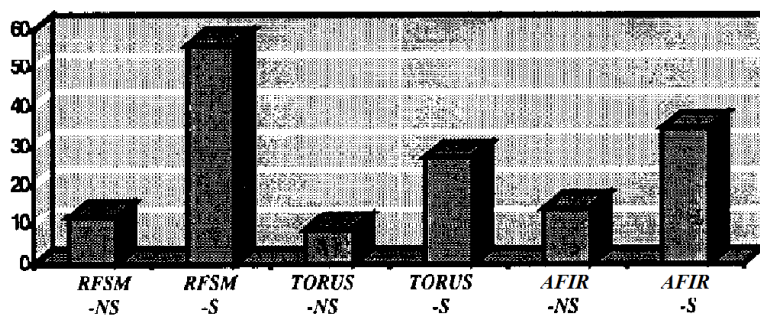
شکل ۲-۴۱- مقایسه گشتاور دندانگی برای ماشین‌های شیاردار و بدون شیار (پریونیت) [۱۳].



شکل ۲-۴۲- مقایسه گشتاور ریبِل برای ماشین‌های شیاردار و بدون شیار (پریونیت) [۱۳].

- به طور کلی، توپولوژی‌های بدون شیار نسبت به شیاردار دارای سطوح توان صوتی پایین‌تری می‌باشند. به ویژه توپولوژی TORUS-NS پایین‌ترین سطح توان صوتی را دارد. شکل ۲-۴۳.
- توپولوژی TORUS-S بیشترین حالت سفتی فنی و پایین‌ترین جابجایی ناشی از لرزش را دارد.
- توپولوژی TORUS-NS دارای بیشترین چگالی گشتاور (توان)، بیشترین راندمان، کمترین سطح نویز و کمترین جابجایی ناشی از لرزش را دارد.

ماشین شار شعاعی آهن‌ربای دائم شیاردار متداول بالاترین سطح نویز و لرزش را دارد. به طور کلی با این که هر دو ساختار TORUS و AFIR دارای چگالی گشتاور و توان بالایی هستند اما ساختار AFIR به دلیل وجود نیروی محوری قابل ملاحظه باعث لرزش می‌شود لذا این ماشین‌ها فقط برای توان‌های پایین مناسب هستند [۱۴].



شکل ۲-۴۳- مقایسه سطح توان صوتی منته (دسی بل) [۱۱]

لذا با توجه به توضیحات ارائه شده در این بخش می‌توان ماشین مناسب برای کاربرد مورد نظر را انتخاب نمود که در ادامه برای استفاده در محرک زیردریایی با توجه به مشخصات ماشین‌ها، ماشین شار محوری آهنربای دائم با توپولوژی نوع TORUS-NS انتخاب می‌شود. در فصل بعد به موضوع طراحی این ماشین پرداخته می‌شود.

فصل ۳

الگوریتم طراحی اولیه ماشین شار

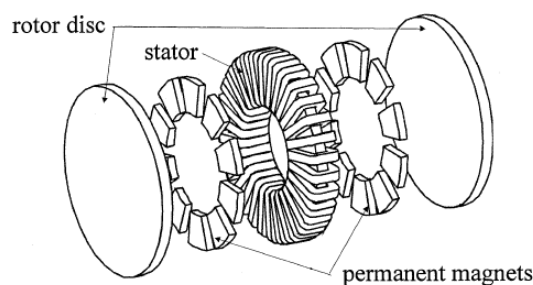
محوری آهنربای دائم

۳-۱- مقدمه

در این فصل با استفاده از رابطه ابعادی و سایر روابط مربوط به ماشین مورد نظر الگوریتم طراحی اولیه ماشین نوشته شده است. سپس تایید دقت این الگوریتم طراحی با استفاده از نتایج یک ماشین نمونه ساخته شده در مرجع [۲۴] انجام گرفته است.

۳-۲- معادله ابعادی^۱ ماشین

در این بخش به طراحی یک ماشین شار محوری حلقوی بدون شیار^۲ (دارای دو دیسک روتور و یک استاتور) پرداخته می‌شود. در شکل ۳-۱ طرح ساختار یک موتور TORUS-NS نشان داده شده است.



شکل ۳-۱- طرح ساختار یک موتور TORUS-NS [۱۵]

ابعاد اصلی یک ماشین شار محوری می‌توانند با استفاده از معادله توان الکتریکی خروجی ماشین تعیین شوند. به طور کلی با صرف نظر از مقاومت و اندوکتانس ناشی استاتور توان خروجی برای هر ماشین الکتریکی می‌تواند به صورت زیر بیان شود [۱۴]، [۱۶] و [۱۷].

$$P_R = \eta \frac{m}{T} \int_0^T e(t) i(t) dt = \eta m K_p E_{PK} I_{PK} \quad (۱-۳)$$

که در آن:

P_R ، توان خروجی نامی ماشین

^۱ Sizing Equations

^۲ TORUS-NS (TORUS Non-Slotted)

$e(t)$ و E_{PK} ، به ترتیب نیروی محرکه الکتریکی لحظه‌ای فاز فاصله هوایی و مقدار ماکزیمم آن

$i(t)$ و I_{PK} ، به ترتیب جریان لحظه‌ای فاز و مقدار ماکزیمم آن

η ، راندمان ماشین

m ، تعداد فازهای ماشین

T ، دوره تناوب یک سیکل emf

و کمیت K_p ، ضریب شکل موج توان الکتریکی^۱ است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K_p = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{e(t) i(t)}{E_{PK} I_{PK}} dt = \frac{1}{T} \int_0^T f_e(t) f_i(t) dt \quad (۲-۳)$$

که در آن $f_e(t) = \frac{e(t)}{E_{PK}}$ و $f_i(t) = \frac{i(t)}{I_{PK}}$ عباراتی برای شکل موج‌های نیروی محرکه الکتریکی و

جریان نرمالیزه شده می‌باشند.

مقدار نیروی محرکه الکتریکی برای ماشین‌های شار محوری به صورت زیر می‌باشد:

$$e(t) = \frac{d\Lambda_g}{dt} = K_e N_t B_g \frac{f}{p} (1 - \lambda^2) D_o^2 f_e(t) \quad (۳-۳)$$

که در آن Λ_g شار پیوندی فاصله هوایی هر فاز، N_t تعداد دور هر فاز، B_g چگالی شار متوسط در فاصله هوایی، f فرکانس تغذیه، p تعداد جفت قطب‌های ماشین، K_e ضریب نیروی محرکه الکتریکی در برگرنده ضریب توزیع سیم‌پیچی و نسبت سطح پوشش داده شده با برجستگی قطب‌ها به کل سطح فاصله هوایی و D_o قطر خارجی ماشین است. مقدار λ به صورت نسبت قطر داخلی به قطر خارجی ماشین تعریف می‌شود:

$$\lambda = \frac{D_i}{D_o} \quad (۴-۳)$$

^۱ Electrical Power Waveform Factor

بنابراین با توجه به $f_e(t) = \frac{e(t)}{E_{PK}}$ و رابطه (۳-۳) مقدار E_{pk} به صورت زیر بدست می‌آید:

$$E_{PK} = K_e N_t B_g \frac{f}{p} (1 - \lambda^2) D_o^2 \quad (۵-۳)$$

ضریب شکل موج جریان K_i^1 به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K_i = \frac{I_{PK}}{I_{rms}} = \left(\frac{1}{T} \int_0^T \left(\frac{i(t)}{I_{PK}} \right)^2 dt \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (۶-۳)$$

که در آن I_{rms} جریان مؤثر فاز هر استاتور است که به بارگذاری الکتریکی استاتور A_s وابسته است. برای ماشین‌های شار محوری، بارگذاری الکتریکی تابعی از شعاع است که مقدار متوسط آن از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$A_s = 2m_1 N_t \frac{I_{rms}}{\pi D_g} \quad (۷-۳)$$

که در آن m_1 تعداد فازهای هر استاتور می‌باشد. اگر بیش از یک استاتور وجود داشته باشد و هر استاتور دارای m_1 فاز باشد و در صورتی که فازهای مشابه استاتورها بصورت موازی و هم زمان توسط درایو تغذیه شوند در آن صورت تعداد فازهای ماشین یا درایو (m) از حاصل ضرب تعداد استاتورها در تعداد فازهای هر استاتور (m_1) بدست می‌آید. به هر حال برای یک ماشین سه فاز با یک استاتور $m = m_1 = 3$ است.

D_g قطر متوسط فاصله هوایی است و داریم:

$$D_g = \frac{D_o + D_i}{2} = \frac{1 + \lambda}{2} D_o \quad (۸-۳)$$

¹ Current waveform factor

در حالت کلی، بارگذاری الکتریکی کل A باید شامل هر دو بارگذاری الکتریکی استاتور A_s و بارگذاری الکتریکی روتور A_r باشد. به عبارت دیگر بارگذاری الکتریکی کل $A = A_s + A_r$ است و بارگذاری الکتریکی استاتور به صورت زیر بدست می‌آید:

$$A_s = A - A_r = \frac{A}{1 + K_\phi} \quad (9-3)$$

که در آن $K_\phi = \frac{A_r}{A_s}$ نسبت بارگذاری الکتریکی روتور به استاتور می‌باشد. در یک ماشین آهن‌ربای دائم بدون سیم‌پیچی روتور $K_\phi = 0$ است.

با استفاده از معادلات (۳-۶)، (۳-۷) و (۳-۹) عبارتی برای جریان ماکزیمم به صورت زیر بدست می‌آید:

$$I_{PK} = \frac{1}{1 + K_\phi} K_i A \pi \frac{D_g}{2m_1 N_t} \quad (10-3)$$

با ترکیب معادلات (۳-۱)، (۳-۵)، (۳-۸) و (۳-۱۰) معادله ابعادی کلی برای ماشین‌های شار محوری به صورت زیر خواهد بود:

$$P_R = \frac{1}{1 + K_\phi} \frac{m}{m_1} \frac{\pi}{2} K_e K_i K_p \eta B_g A \frac{f}{p} (1 - \lambda^2) \frac{1 + \lambda}{2} D_o^3 \quad (11-3)$$

در رابطه فوق $N_{stator} = \frac{m}{m_1}$ تعداد استاتورها و یا به عبارتی تعداد طبقات ماشین می‌باشد [۱۸].

برای یافتن معادله ابعادی مورد نیاز یعنی $D_o^2 L_e$ ، که در آن L_e طول محوری ماشین می‌باشد، ضریب نسبت وجه^۱ K_L برای ماشین شار محوری به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K_L = \frac{D_o}{L_e} \quad (12-3)$$

¹ Aspect Ratio Coefficient

از رابطه (۱۱-۳) مقدار D_o به صورت زیر بدست می‌آید:

$$D_o = \left(\frac{4pP_R}{N_{stator} \pi K_e K_i K_p \eta B_g A f (1-\lambda^2)(1+\lambda)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (۱۳-۳)$$

مقادیر ضرایب K_p و K_i در معادله ابعادی می‌توانند با استفاده از جدول ۱-۳ با توجه به شکل موج-

های نیروی ضد محرکه و جریان تعیین شوند.

شکل ۲-۳ تعریف پارامترهای هندسی ماشین شار محوری آهن‌ربای دائم TORUS بدون شیار را نشان

می‌دهد.

قطر بیرونی کلی ماشین D_t برای توپولوژی نوع TORUS بدون شیار به صورت زیر بدست می‌آید:

$$D_t = D_o + 2W_{cuo} \quad (۱۴-۳)$$

که در آن W_{cuo} ، ضخامت شعاعی سیم‌پیچی انتهایی ورای قطر خارجی می‌باشد. همچنین W_{cui} ،

ضخامت شعاعی سیم‌پیچی انتهایی درون قطر داخلی است. مقادیر W_{cuo} و W_{cui} از روابط زیر بدست می-

آیند:

$$W_{cui} = \frac{\sqrt{D_i^2 + \frac{4A_s D_g}{K_{cu} J_s}} - D_i}{2} \quad (۱۵-۳)$$

$$W_{cuo} = \frac{\sqrt{D_o^2 + \frac{4A_s D_g}{K_{cu} J_s}} - D_o}{2} \quad (۱۶-۳)$$

که در آن J_s چگالی جریان^۱ و K_{cu} ضریب پُرشوندگی مس^۲ است. ضریب پُرشوندگی مس به طور

متوسط برای هادی‌های با مقطع چهارگوش (مستطیلی) ۰/۶ و برای هادی‌های با مقطع گرد ۰/۴ تعیین

می‌شود [۴]. به هر حال مقادیر تجربی دقیق‌تر آن برای قطرهای و ابعاد مختلف هادی‌ها از جدول هادی‌ها

^۱ Current Density

^۲ Copper Fill Factor

تعیین می‌شود. لازم به ذکر است که استفاده از هادی‌های با مقطع گرد منجر به مقدار تلفات جریان گردابی کمتری نسبت به هادی‌های با مقطع مستطیلی خواهد شد و این موضوع تا حدی ضریب پُرشوندگی پایین هادی‌های با مقطع گرد در مقایسه با هادی‌های با مقطع مستطیلی را جبران می‌کند. از طرف دیگر بکارگیری هادی‌های با مقطع گرد نسبت به هادی‌های با مقطع مستطیلی به لحاظ مسائل سیم‌پیچی راحت‌تر است [۱۹].

جدول ۳-۱- شکل موج‌های نمونه اولیه نوعی [۱۶]

Model	$e(t)$	$i(t)$	K_1	K_2
1. Sinusoidal waveform			$\sqrt{2}$	$\frac{1}{2} \cos \phi$
2. Sinusoidal waveform			$\sqrt{2}$	0.5
3. Rectangular waveform			1	1
4. Trapezoidal waveform			1.134	0.777
5. Triangular waveform			$\sqrt{3}$	0.333
6. Rectangular & trapezoidal waveform			1.134	0.8
7. Rectangular & trapezoidal waveform			1.389	0.556
8. Trapezoidal waveform			1.389	0.519
9. Rectangular & triangular waveform			1.5	0.333
10. Rectangular waveform			1.225	0.667

طول محوری ماشین L_e ، جمع طول‌های محوری استاتور، روتور و فاصله هوایی بوده و برابر است با:

$$L_e = L_s + 2L_r + 2g \quad (۱۷-۳)$$

که در آن L_s طول محوری استاتور، L_r طول محوری روتور و g طول فاصله هوایی است.

از تجربه‌های ساخت، طول محوری استاتور حدوداً برابر است با:

$$L_s = L_{cs} + 1.6W_{cui} \quad (۱۸-۳)$$

که در آن L_{cs} طول محوری هسته استاتور است و می‌تواند به صورت زیر نوشته شود:

$$L_{cs} = \frac{B_g \pi D_o (1 + \lambda)}{B_{cs} 4p} \quad (۱۹-۳)$$

که در آن B_{cs} دامنه چگالی شار در هسته استاتور است.

طول محوری روتور L_r از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$L_r = L_{cr} + L_{PM} \quad (۲۰-۳)$$

که در آن L_{PM} طول محوری (ضخامت) آهن‌ربای دائم می‌باشد و L_{cr} طول محوری هسته روتور است.

مقدار L_{cr} از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$L_{cr} = \frac{B_u \pi D_o (1 + \lambda)}{B_{cr} 8p} \quad (۲۱-۳)$$

که در آن B_u چگالی شار قابل حصول در سطح آهن‌ربای دائم (بارگذاری مغناطیسی ویژه) و B_{cr} چگالی

شار در هسته روتور است.

برای محاسبه طول محوری آهن‌ربای دائم L_{PM} نیروی محرکه مغناطیسی تولید شده توسط آهن‌ربای

دائم با نیروی محرکه مغناطیسی مسیر برابر قرار داده می‌شود. یعنی:

$$H_{in} l_{in} = H_{out} l_{out} \quad (۲۲-۳)$$

یا:

$$\frac{1}{\mu_{rPM}\mu_0}(K_f B_r - \frac{1}{K_d} B_u) L_{PM} = \frac{B_g}{\mu_0}(g + W_{cui}) \quad (23-3)$$

از رابطه فوق طول محوری آهنربای دائم L_{PM} به صورت زیر بدست می‌آید:

$$L_{PM} = \frac{\mu_{rPM} B_g}{K_f B_r - \frac{1}{K_d} B_u} (g + W_{cui}) \quad (24-3)$$

رابطه مشابه دیگر برای محاسبه طول محوری آهنربای دائم L_{PM} که در بعضی مقالات از آن استفاده شده است بصورت زیر است [۲۰]:

$$L_{PM} = \frac{\mu_{rPM} B_g}{B_r - \frac{K_f}{K_d} B_g} (g + W_{cu}) \quad (25-3)$$

که در آن μ_{rPM} ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی آهنربای دائم، B_r چگالی شار پس‌ماند، K_f ضریب شکستگی شار^۱ و K_d ضریب نشت شار^۲ آهنربای دائم می‌باشد. معمولاً فرض می‌شود $K_f = 0.95$ و مقدار ضریب نشت شار نیز به یک روش خیلی ساده از تجربه‌های طراحی توسط رابطه $K_d = 1 - \frac{p}{30}$ محاسبه می‌شود.

با ترکیب معادلات (۱۵-۳) تا (۲۴-۳) طول محوری ماشین L_e به صورت زیر بدست می‌آید:

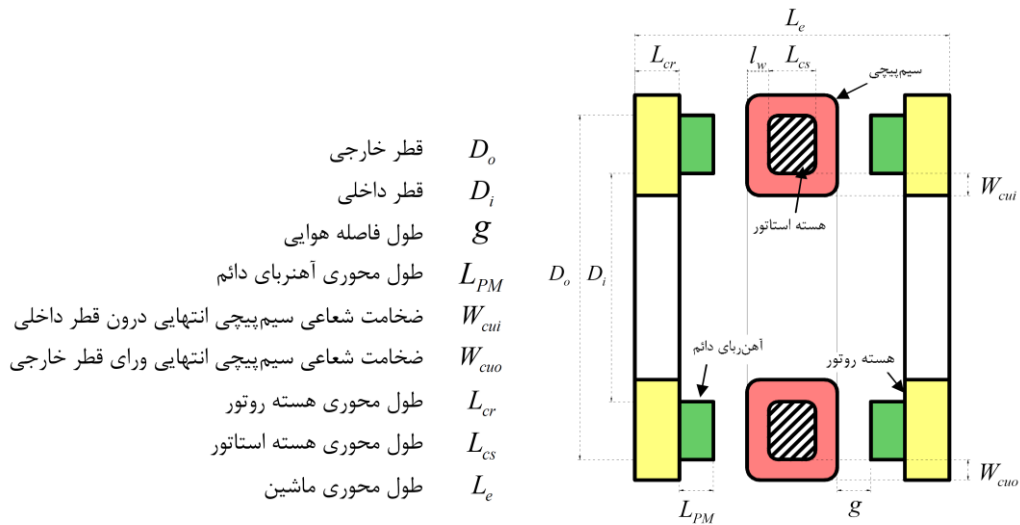
$$L_e = \frac{\pi D_o (1 + \lambda)}{4p} \left(\frac{B_g}{B_{cs}} + \frac{B_u}{B_{cr}} \right) + (1.6W_{cui} + 2g) \left(1 + \frac{\mu_{rPM} B_g}{0.95B_r - \frac{1}{K_d} B_u} \right) \quad (26-3)$$

با توجه به معادله (۱۲-۳) نسبت وجه K_L به صورت زیر خواهد بود:

$$K_L = \left[\frac{\pi(1 + \lambda)}{4p} \left(\frac{B_g}{B_{cs}} + \frac{B_u}{B_{cr}} \right) + \frac{1}{D_o} (1.6W_{cui} + 2g) \left(1 + \frac{\mu_{rPM} B_g}{0.95B_r - \frac{1}{K_d} B_u} \right) \right]^{-1} \quad (27-3)$$

¹ Fringing Flux Factor

² Leakage Flux Factor



شکل ۳-۲- تعریف پارامترهای هندسی ماشین شار محوری آهن‌ربای دائم TORUS-NS [۱۱]

به واسطه ساختار ماشین AFPM، شارهای استاتور و روتور دارای مشخصه‌های متفاوتی می‌باشند. در هسته استاتور یک شار AC و در هسته روتور یک شار تقریباً ثابت وجود دارد. یک قاعده تجربی ارتباط تقریبی بین دامنه چگالی شار مطلوب استاتور B_{cs} و فرکانس مبدل را به صورت زیر بیان می‌کند:

$$B_{cs} = \begin{cases} 5.47 f^{-0.32} & f > 40 \text{ Hz} \\ 1.7 \text{ to } 1.8 & f \leq 40 \text{ Hz} \end{cases} \quad (28-3)$$

برای دامنه چگالی شار در هسته روتور نیز می‌توان رابطه زیر را بکار گرفت:

$$B_{cr} = 1.6 \text{ to } 1.8 \quad (29-3)$$

چگالی شار متوسط فاصله هوایی B_g می‌تواند به صورت زیر بیان شود:

$$B_g = K_{focus} B_u \quad (30-3)$$

که در آن K_{focus} ضریب تمرکز شار است که مقدار آن وابسته به ساختار ماشین آهن‌ربای دائم است. بطور کلی داریم:

$$K_{focus} = \frac{A_{PM}}{A_p} K_d \quad (31-3)$$

که در آن A_{PM} مساحت سطح آهنربای دائم و A_p مساحت سطح فاصله هوایی قطع شده توسط خطوط شار است. برای ماشین با آهنربای دائم با اتصال سطحی $A_p = A_{PM}$.

مقدار emf در بی باری از رابطه (۳۲-۳) به دست می‌آید [۴]:

$$e_f = N_t K_w \frac{d\phi_f}{dt} = 2\pi f N_t K_w \phi_f \cos \omega t \quad (32-3)$$

که در آن ϕ_f دامنه مؤلفه اصلی شکل موج شار مغناطیسی عبور کننده از کویل‌ها می‌باشد. بعبارت بهتر اگر شار لحظه‌ای عبور کننده از یکی از حلقه‌های سیم‌پیچ بصورت $\phi_{f1} = \phi_f \sin \omega t$ بیان شود مقدار ϕ_f از رابطه زیر به دست خواهد آمد.

$$\phi_f = B_{av} A_p = \frac{2}{\pi} B_g \frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)}{4(2p)} \quad (33-3)$$

لذا مقدار پیک emf برای ماشین TORUS بدون شیار با جایگذاری مقدار ϕ_f از رابطه (۳۳-۳) در رابطه (۳۲-۳) و ضرب آن در عدد ۲ برای منظور کردن emf هر دو طرف سیم‌پیچی، به صورت زیر دست می‌آید:

$$E_{PK} = 2(2\pi f N_t K_w \phi_f) = 2(2\pi f N_t K_w \frac{2}{\pi} B_g \frac{\pi(D_o^2 - D_i^2)}{4(2p)}) \quad (34-3)$$

مقایسه دو رابطه (۳۴-۳) و (۳۵-۳) مقدار K_e برای ماشین TORUS بدون شیار را بصورت $K_e = \pi K_w$ نتیجه می‌دهد [۲۱] که در آن K_w ضریب سیم‌پیچی است. ضریب سیم‌پیچی برای ماشین TORUS بدون شیار با سیم‌پیچی نوع مارپیچی^۱ تقریباً برابر با یک است [۴].

با در نظر گرفتن شکل موج دوزنقه‌ای، مقادیر K_i و K_p از ردیف چهارم از جدول ۳-۱ برابر با $K_i = 1.134$ و $K_p = 0.777$ خواهد بود. همچنین با توجه به اینکه ماشین دارای آهنربای دائم بوده و فاقد سیم‌پیچی روتور است بنابراین $K_\phi = 0$ است. ادغام معادلات (۳۲-۳)، (۳۰-۳) و (۳۱-۳) در معادله

¹ Toroidal

(۱۱-۳) و جایگذاری مقادیر ضرایب K_i ، K_p و K_e در آن، معادله ابعادی کلی ماشین شار محوری نوع

TORUS-NS به صورت زیر حاصل می‌شود:

$$P_R = 0.22 \pi^2 \eta K_d B_u A \frac{f}{p} K_L (1 - \lambda^2)(1 + \lambda) D_o^2 L_e \quad (۳۵-۳)$$

چگالی توان^۱ ماشین شار محوری نیز می‌تواند به صورت زیر تعریف شود:

$$P_{dens} = \frac{P_R}{\frac{\pi}{4} D_t^2 L_e} \quad (۳۶-۳)$$

از ترکیب معادلات (۱۱-۳)، (۳۰-۳) و (۳۱-۳) خواهیم داشت:

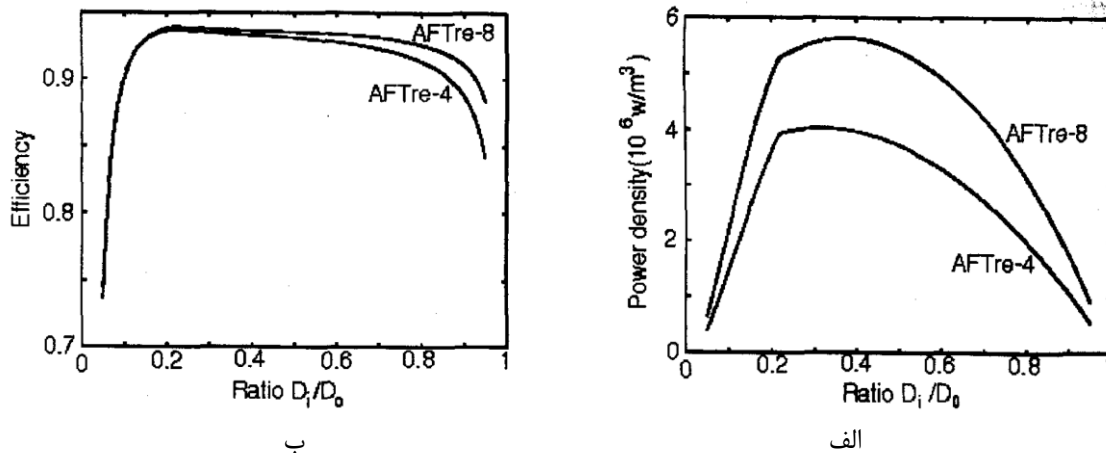
$$P_{dens} = 0.881 \pi \eta K_d B_u A \frac{f}{p} K_L (1 - \lambda^2)(1 + \lambda) \frac{D_o^2}{D_t^2} \quad (۳۷-۳)$$

در ماشین‌های شار شعاعی متداول گشتاور متناسب با $D_g^2 L_a$ است که در آن D_g قطر ماشین در فاصله هوایی استوانه‌ای، و L_a طول موثر هسته استاتور است [۲۲] اما از معادله (۱۱-۳) مشاهده می‌شود که توان (و از آنجا گشتاور) یک ماشین شار محوری متناسب با D_o^3 می‌باشد. این مطلب می‌تواند یک مزیت ممتاز برای ماشین‌های شار محوری محسوب شود.

در معادلات (۳۵-۳) و (۳۷-۳)، λ پارامتر اکیدا مستقل می‌باشد در حالی که دیگر پارامترها یا به λ وابسته هستند و یا دارای محدودیت‌های فیزیکی مشخصی هستند. از این رو در ماشین‌های شار محوری نسبت λ یک پارامتر اصلی و مهم در طراحی ماشین است که اثر قابل توجهی بر مشخصه‌های ماشین دارد. بنابراین به منظور بهینه کردن عملکرد ماشین مقدار λ باید به دقت انتخاب شود. به عنوان یک مثال، رابطه بین چگالی توان و راندمان ماشین‌های TORUS-NS با مشخصات $A = 60,000 A/m$ ، $J_s = 6.2 \times 10^6 A/m^2$ ، $P_R = 75000 W$ ، $n = 3000 RPM$ و $p = 2$ و 4 ، با استفاده از آهن‌ربای دائم

¹ Power density

کمیاب خاکی به ازای λ های مختلف به ترتیب در شکل های ۳-۳ الف و ب رسم شده‌اند [۱۴]. از این شکل‌ها به وضوح مشاهده می‌شود که تأثیر λ بر روی چگالی توان بسیار قابل توجه‌تر از تأثیر آن بر روی راندمان ماشین است. با توجه به رابطه بین گشتاور و توان ($P = T\omega$) گشتاور حداکثر هنگامی حاصل می‌شود که $\lambda = D_i/D_o = 1/\sqrt{3}$ باشد [۱۴].



شکل ۳-۳- منحنی‌های الف) چگالی توان ماشین بر حسب λ ب) راندمان ماشین بر حسب λ [۱۴]

۳-۳- چگالی شار فاصله هوایی

یکی از ویژگی‌های برجسته موتور شار محوری آهنربای دائم نوع TORUS-NS فاصله هوایی مؤثر بزرگ آن است، که شامل فاصله هوایی g و ضخامت محوری سیم‌پیچی l_w می‌باشد [۲۳]. چگالی شار فاصله هوایی B_g به صورت زیر محاسبه می‌شود [۱۴]:

$$B_g = \frac{B_r L_{PM}}{L_{PM} + \mu_{rPM}(g + l_w)} \quad (3-38)$$

۴-۳- سیم‌پیچی [۴]، [۱۹]، [۲۳]

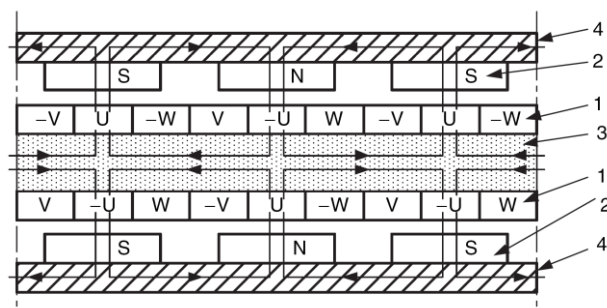
سیم‌پیچی مورد استفاده در ماشین‌های AFPM دو وجهی با دو روتور خارجی، معمولاً "سیم‌پیچی استاتور حلقه‌ای"^۱ می‌باشد. سیم‌پیچی هر فاز دارای تعداد کلاف‌های مساوی است که به صورت متقابل به هم متصل می‌شوند تا امکان گردش شار در هسته استاتور وجود نداشته باشد. این کلاف‌ها به طور یکنواخت و متقارن در امتداد هسته استاتور به صورت قطری روبروی یکدیگر توزیع می‌شوند. بنابراین با این ساختار سیم‌پیچی تنها امکان ایجاد تعداد قطب‌های ۲، ۶، ۱۰، ۱۴ و ... وجود دارد. مزایای استفاده از سیم‌پیچی استاتور از نوع حلقه‌ای اتصالات انتهایی کوتاه، هسته استاتور ساده و طراحی آسان ماشین برای هر تعداد فاز می‌باشد.

ضخامت سیم‌پیچی و سیم‌پیچی‌های انتهایی با سه پارامتر به صورت زیر تعریف می‌شوند: I_w برای بخش‌های مؤثر سیم‌پیچی که در تولید گشتاور شرکت می‌کنند و W_{cui} و W_{cuo} برای سیم‌پیچی‌های انتهایی که در تولید گشتاور شرکت نمی‌کنند. در محاسبات طراحی با یک دقت قابل قبول معمولاً فرض می‌شود:

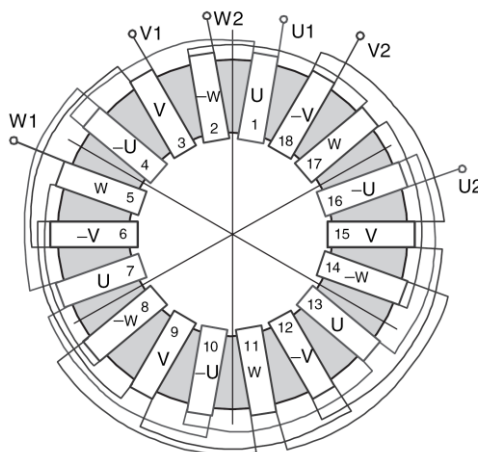
$$I_w = \frac{W_{cuo} + W_{cui}}{2} \quad (۳-۳۹)$$

در شکل ۴-۳ آرایش سیم‌پیچی سه فاز، قطب‌های آهن‌ربا و مسیر شار در مدار مغناطیسی نشان داده شده‌اند. در شکل ۵-۳ نیز آرایش نوع حلقه‌ای سیم‌پیچی سه فاز شش قطب استاتور یک ماشین AFPM نمایش یافته است. این سیم‌پیچی ۱۸ کلافه برای یک ماشین با دو روتور خارجی و یک استاتور داخلی بدون شیار بکار گرفته شده است.

^۱ Toroidal Stator Windings



شکل ۳-۴- سیم‌پیچی سه فاز، قطب‌های آهن‌ربا و مسیر شار مغناطیسی ماشین دیسکی دو وجهی با یک استاتور داخلی بدون شیار. ۱- سیم‌پیچی ۲- آهن‌رباهای دائم ۳- یوغ استاتور ۴- یوغ روتور [۴]



شکل ۳-۵- آرایش سیم‌پیچی نوع حلقه‌ای سه فاز، شش قطب، ۱۸ کلاف برای استاتور یک ماشین AFPM با دو روتور خارجی و یک استاتور داخلی بدون شیار [۴]

۳-۴-۱- تعداد دور سیم‌پیچی سری هر فاز [۲۳]

تعداد دور سیم‌پیچی سری هر فاز را می‌توان با توجه به ولتاژ ماشین با استفاده از رابطه (۳-۵) به

صورت زیر بدست آورد:

$$N_t = \frac{E_{PK}}{K_e B_g \frac{f}{p} (1 - \lambda^2) D_o^2} \quad (۳-۴۰)$$

۳-۴-۲- مقاومت سیم‌پیچی [۴] و [۲۳]

مقاومت سیم‌پیچی هر فاز استاتور از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$R = \frac{N_t l_{1av} \rho_{cu, \theta}}{a_p a_w s_a} \quad (41-3)$$

که در آن l_{1av} طول متوسط یک دور سیم پیچی پیچیده شده به دور هسته استاتور، a_p تعداد مسیرهای موازی جریان، a_w تعداد هادی‌های موازی، s_a سطح مقطع یک رشته هادی و $\rho_{cu, \theta}$ مقاومت ویژه مس در دمای θ می‌باشد. مقاومت ویژه مس در دمای ۲۰ درجه سانتیگراد برابر است با $\rho_{cu, 20^\circ C} = 1.678 \times 10^{-8} \Omega.m$ و مقدار آن در دمای θ از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\rho_{cu, \theta} = \rho_{cu, 20^\circ C} (1 + \alpha(\theta - 20^\circ)) \quad (42-3)$$

که در آن α ثابت دما می‌باشد و مقدار آن برابر $\alpha = 0.0039$ بر هر $^\circ C$ می‌باشد.

طول متوسط یک دور سیم پیچی نیز از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$l_{1av} = 2L_i + l_{1in} + l_{1out} \quad (43-3)$$

که در آن l_{1in} طول اتصال انتهایی داخلی، l_{1out} طول اتصال انتهایی خارجی و L_i طول مؤثر هسته استاتور در جهت شعاعی بوده و به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$L_i = 0.5(D_o - D_i) \quad (44-3)$$

سطح مقطع یک رشته هادی از رابطه (۴۵-۳) بدست می‌آید.

$$s_a = \frac{\pi d_w^2}{4} \quad (45-3)$$

که در رابطه فوق d_w قطر سیم است که به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$d_w = \sqrt{\frac{4l_w D_i K_{cu}}{a_p m_1 N_t}} \quad (46-3)$$

۳-۵- الگوریتم طراحی اولیه

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

۱- توان خروجی نامی موتور P_R [W]

۲- تعداد فازها m

۳- تعداد طبقات استاتور N_{stator}

۴- ولتاژ خط V_l [V]

۵- فرکانس f [Hz]

۶- سرعت نامی موتور n [RPM]

۷- اتصال موتور Δ یا Y

۸- تعداد زوج قطب‌ها $p = 60 f / n$

۹- بارگذاری الکتریکی کل $12000 < A < 60000$ $p = 60 f / n$

۱۰- چگالی جریان $3(10^6) < J_s < 10(10^6)$ A [A/m]

۱۱- تعداد مسیرهای موازی جریان a_p

۱۲- چگالی شار فاصله هوایی B_g [T]

۱۳- نسبت قطر داخلی به قطر خارجی $\lambda = \frac{D_i}{D_o}$

۱۴- ضریب شکل موج توان الکتریکی K_p

۱۵- ضریب شکل موج جریان K_i

۱۶- ضریب نیروی محرکه الکتریکی K_e

۱۷- ضریب پر شوندگی مس K_{cu}

۱۸- ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی آهنربای دائم (NdFeB) μ_{rPM}

۱۹- چگالی شار پس ماند آهنربای دائم (NdFeB) $B_r [T]$

۲۰- دامنه چگالی شار هسته روتور $B_{cr} [T]$

۲۱- ضریب نشت شار $K_d = (1 - p/30)$

۲۲- بارگذاری مغناطیسی ویژه $B_u = B_g / K_d [T]$

۲۳- راندمان η

۲۴- قطر خارجی $D_o = \left(\frac{4pP_R}{N_{stator} \pi K_e K_i K_p \eta B_g A f (1 - \lambda^2)(1 + \lambda)} \right)^{\frac{1}{3}} [m]$

۲۵- قطر داخلی $D_i = \lambda D_o [m]$

۲۶- قطر متوسط فاصله هوایی $[m]$

$$D_g = \frac{D_o + D_i}{2} = \frac{1 + \lambda}{2} D_o$$

۲۷- فاصله هوایی $g [m]$

۲۸- دامنه چگالی شار هسته استاتور $B_{cs} = 5.47 f^{-0.32} [T]$

۲۹- طول محوری هسته استاتور $L_{cs} = \frac{B_g \pi D_o (1 + \lambda)}{B_{cs} 4p} [m]$

۳۰- ضخامت شعاعی سیم پیچی انتهایی درون قطر داخلی $W_{cui} = \frac{\sqrt{D_i^2 + \frac{4A_s D_g}{K_{cu} J_s}} - D_i}{2} [m]$

$$W_{cuo} = \frac{\sqrt{D_o^2 + \frac{4A_s D_g}{K_{cu} J_s}} - D_o}{2} [m] \quad \text{۳۱- ضخامت شعاعی سیم پیچی انتهایی ورای قطر خارجی}$$

$$W_{cu} = \frac{W_{cui} + W_{cuo}}{2} [m] \quad \text{۳۲- متوسط ضخامت شعاعی سیم پیچی انتهایی}$$

$$L_s = L_{cs} + 1.6W_{cui} [m] \quad \text{۳۳- طول محوری استاتور}$$

$$L_{cr} = \frac{B_u \pi D_o (1 + \lambda)}{B_{cr} 8p} [m] \quad \text{۳۴- طول محوری هسته روتور}$$

$$L_{PM} = \frac{\mu_{rPM} B_g}{K_f B_r - \frac{1}{K_d} B_u} (g + W_{cui}) [m] \quad \text{۳۵- طول محوری آهن ربای دائم}$$

$$L_r = L_{cr} + L_{PM} [m] \quad \text{۳۶- طول محوری روتور}$$

$$L_e = L_s + 2L_r + 2g [m] \quad \text{۳۷- طول محوری ماشین}$$

$$N_t = \frac{E_{PK}}{K_e B_g \frac{f}{p} (1 - \lambda^2) D_o^2} \quad \text{۳۸- تعداد دور سیم پیچی سری هر فاز}$$

$$I_{rms} = \frac{\pi D_g A_s}{2m_1 N_t} [A] \quad \text{۳۹- جریان سیم پیچی}$$

$$I_{PK} = \frac{P_R}{\eta m K_p E_{PK}} [A]$$

$$l_w = (L_e - 2(L_{PM} + L_{cr} + g) + L_{cs}) / 2 \quad \text{۴۰- ضخامت لایه سیم پیچی (} l_w = W_{cu} \text{)}$$

$$s_a = \frac{I_{rms}}{J_s} [m^2] \quad \text{۴۱- سطح مقطع هادی سیم پیچی}$$

$$s_{str} = \frac{\pi d_{str}^2}{4} [mm^2]$$

$$N_{str} = \frac{s_a}{s_{str}} \quad \text{تعداد رشته ها}$$

$$L_i = (D_o - D_i) / 2 \quad [m] \quad \text{۴۲- طول مؤثر هسته استاتور در جهت شعاعی (طول آهن‌ریا)}$$

$$L_{1av} = 2(L_i + L_s) \quad [m] \quad \text{۴۳- طول متوسط یک دور سیم‌پیچی}$$

۳-۶- یک مثال عددی از طراحی اولیه ماشین شار محوری TORUS-NS [۲۴] و [۲۵]

در این بخش طراحی اولیه یک ژنراتور نمونه TORUS-NS که قبلاً طراحی و ساخته شده است ارائه می‌شود. این مثال برای اعتبارسنجی روش محاسبات طراحی الگوریتم ارائه شده آورده شده است. پارامترهای ماشین مورد نظر توسط نویسندگان دو مقاله IEEE قبلاً گزارش شده است. پارامترهای طراحی شده ژنراتور توسط الگوریتم این بخش با داده‌های مقالات مذکور مطابقت کامل دارد. مشخصات نامی ماشین در هفت ردیف اول زیر داده شده است.

$$P_R / \eta = 5000 \quad [W] \quad \text{۱- توان خروجی نامی ژنراتور}$$

$$m = 3 \quad \text{۲- تعداد فازها}$$

$$N_{stator} = 1, \quad m = m_1 = 3 \quad \text{۳- تعداد طبقات استاتور}$$

$$V_{DC} = 150 \quad [V] \quad \text{۴- ولتاژ DC خروجی}$$

$$f = 46.67 \quad [Hz] \quad \text{۵- فرکانس}$$

$$n = 200 \quad [RPM] \quad \text{۶- سرعت نامی ماشین}$$

$$Y \quad (\text{ستاره}) \quad \text{۷- اتصال ژنراتور}$$

$$p = 60 f / n = 60(46.67) / 200 = 14 \quad \text{۸- تعداد زوج قطب‌ها}$$

$$A = 10500 \quad \left[\frac{A}{m} \right] \quad \text{۹- بارگذاری الکتریکی کل} \quad 10000 < A < 60000$$

$$J_s = 7.8(10^6) \quad \left[\frac{A}{m^2} \right] \quad \text{۱۰- چگالی جریان} \quad 3(10^6) < J_s < 10(10^6)$$

- ۱۱- تعداد مسیرهای موازی جریان $a_p = 7$
- ۱۲- چگالی شار متوسط فاصله هوایی $B_g = 0.6 \quad [T]$
- ۱۳- نسبت قطر داخلی به قطر خارجی $\lambda = \frac{D_i}{D_o} = 0.5745$
- ۱۴- ضریب شکل موج توان الکتریکی $K_p = 0.777$
- ۱۵- ضریب شکل موج جریان $K_i = 1.134$
- ۱۶- ضریب نیروی محرکه الکتریکی $K_e = \pi$
- ۱۷- ضریب پر شوندگی مس $K_{cu} = 0.33$
- ۱۸- نسبت قوس قطب به گام قطب $\alpha_i = 0.72$
- ۱۹- ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی آهنربای دائم (NdFeB) $\mu_{rPM} = 1.05$
- ۲۰- چگالی شار پس ماند آهنربای دائم (NdFeB) $B_r = 1.17 \quad [T]$
- ۲۱- چگالی شار هسته روتور $B_{cr} = 1.17 \quad [T]$
- ۲۲- ضریب نشت شار $K_d = (1 - p/30) = (1 - 14/30) = 0.5333$
- ۲۳- بارگذاری مغناطیسی ویژه $B_u = B_g / K_d = 0.6 / 0.5333 = 1.125 \quad [T]$
- ۲۴- راندمان $\eta = 0.81$
- ۲۵- قطر خارجی $D_o = \left(\frac{4p P_R}{N_{stator} \pi K_e K_i K_p \eta B_g A f (1 - \lambda^2)(1 + \lambda)} \right)^{\frac{1}{3}}$
- $D_o = \left(\frac{(4)(14)(5000)}{(1)(\pi)(\pi)(1.134)(0.777)(0.6)(10500)(46.67)(1 - 0.5745^2)(1 + 0.5745)} \right)^{1/3} = 0.470$
- $[m]$
- ۲۶- قطر داخلی $D_i = \lambda D_o = (0.5745)0.470 = 0.270 \quad [m]$

۲۷- قطر متوسط فاصله هوایی $D_g = \frac{D_o + D_i}{2} = \frac{1 + \lambda}{2} D_o = \frac{1 + 0.5745}{2} 0.470 = 0.37 \quad [m]$

۲۸- فاصله هوایی $g = 0.0015 \quad [m]$

۲۹- دامنه چگالی شار هسته استاتور $B_{cs} = 1.245 \quad [T]$

۳۰- طول محوری هسته استاتور $L_{cs} = \frac{B_g \pi D_o (1 + \lambda)}{B_{cs} 4p} = \frac{0.6 \pi (0.470) (1 + 0.5745)}{1.245 (4) 14} = 0.02 \quad [m]$

۳۱- ضخامت شعاعی سیم پیچی انتهایی درون قطر داخلی

$$W_{cui} = \frac{\sqrt{D_i^2 + \frac{4A_s D_g}{K_{cu} J_s}} - D_i}{2} = \frac{\sqrt{0.270^2 + \frac{4(10500)0.37}{0.33(7.8)(10^6)}} - 0.270}{2} = 0.0055 \quad [m]$$

۳۲- ضخامت شعاعی سیم پیچی انتهایی ورای قطر خارجی

$$W_{cuo} = \frac{\sqrt{D_o^2 + \frac{4A_s D_g}{K_{cu} J_s}} - D_o}{2} = \frac{\sqrt{0.470^2 + \frac{4(10500)0.37}{0.33(7.8)(10^6)}} - 0.470}{2} = 0.0032 \quad [m]$$

۳۳- متوسط ضخامت شعاعی سیم پیچی انتهایی (که برابر با ضخامت محوری سیم پیچی است)

$$W_{cu} = \frac{W_{cui} + W_{cuo}}{2} = \frac{0.0055 + 0.0032}{2} = 0.0044 \quad [m]$$

۳۴- طول محوری استاتور $L_s = L_{cs} + 1.6W_{cui} = 0.020 + 1.6(0.0055) = 0.0288 \quad [m]$

۳۵- طول محوری هسته روتور

$$L_{cr} = \frac{B_u \pi D_o (1 + \lambda)}{B_{cr} 8p} = \frac{1.125(\pi) 0.47(1 + 0.5745)}{1.17(8) 14} = 0.020 \quad [m]$$

۳۶- ضخامت محوری آهن ربای دائم [۲۵]

$$L_{PM} = \frac{\mu_{rPM} B_g}{B_r - \frac{K_f}{K_d} B_g} (g + W_{cu}) = \frac{1.05(0.6)}{1.17 - \frac{0.782}{0.5333}(0.6)} (0.0015 + 0.0044) = 0.0127 \quad [m]$$

$$L_r = L_{cr} + L_{PM} = 0.020 + 0.0127 = 0.0327 \quad [m] \quad \text{۳۷- طول محوری روتور}$$

$$w_{PMg} = \frac{\pi D_g}{2p} \alpha_i = \frac{\pi(0.37)}{28} (0.72) = 0.0299 \quad [m] \quad \text{۳۸- عرض آهن ربا در قطر متوسط}$$

$$\text{۳۹- طول محوری ماشین}$$

$$L_e = L_s + 2L_r + 2g = 0.0288 + 2(0.0327) + 2(0.0015) = 0.0970 \quad [m]$$

$$\text{۴۰- تعداد دور سیم پیچی سری هر فاز در هر مسیر}$$

$$N_t = \frac{E_{PK}}{K_e B_g \frac{f}{p} (1 - \lambda^2) D_o^2} = \frac{150}{\pi 0.6 \frac{46.67}{14} (1 - 0.5745^2) 0.470^2} = 160 \quad \text{دور}$$

$$I_{PK} = \frac{P_R}{\eta m K_p E_{PK}} = \frac{5000}{(3)(0.777)(105.21\sqrt{2})} = 14.42 \quad [A] \quad \text{۴۱- جریان سیم پیچی}$$

$$I_{rms} = \frac{\pi D_g A_s}{2m_1 N_t} = \frac{\pi 0.37(10500)}{2(3)(160)} = 12.71 \quad [A] \quad \text{همچنین با استفاده از رابطه مقابل:}$$

$$I_{rms} \text{ جریان مؤثر سیم پیچی در هر فاز می باشد. بنابراین با در نظر گرفتن تعداد مسیرهای موازی، جریان}$$

$$\text{مؤثر سیم پیچی در هر مسیر برابر خواهد شد با:}$$

$$I_a = \frac{I_{rms}}{a_p} = \frac{12.71}{7} = 1.816 \quad [A]$$

$$l_w = (L_e - 2(L_{PM} + L_{cr} + g) + L_{cs}) / 2 \quad (l_w = W_{cu}) \text{ ۴۲- ضخامت محوری سیم پیچی}$$

$$= (0.0970 - 2(0.0127 + 0.020 + 0.0015) + 0.020) / 2 = 0.0044 \quad [m]$$

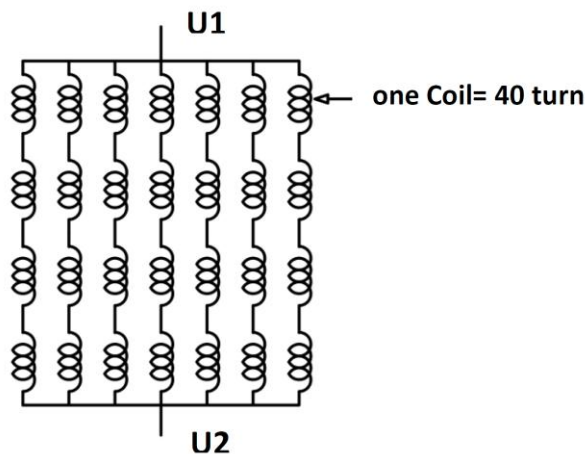
$$\text{۴۳- سطح مقطع و قطر هادی}$$

$$s_a = \frac{I_a}{J_s} = \frac{1.816\sqrt{2}}{(7.8)10^6} = 0.329 \quad [mm^2]$$

$$s_{str} = \frac{\pi d_{str}^2}{4} \rightarrow d_{str} = \left(\frac{4s_{str}}{\pi} \right)^{\frac{1}{2}} = 0.65 \quad [mm]$$

با توجه به قطر سیم به دست آمده معمولاً از جدول قطر سیم‌های استاندارد قطر سیم بزرگ‌تر از مقدار محاسبه شده در نظر گرفته می‌شود که می‌توان اینجا سیم مسی با قطر ۰/۷۱ را انتخاب نمود.

از آنجایی که ماشین مورد نظر دارای ۲۸ قطب و ۳ فاز می‌باشد، با در نظر گرفتن تعداد کلاف‌ها بر قطب بر فاز برابر با یک ($q=1$)، در کل تعداد $N_{coil}=(3)(28)(1)=84$ کلاف سیم‌پیچی ۴۰ دوری با قطر سیم ۰/۷۱ میلی‌متر خواهیم داشت. به عبارت دیگر در هر فاز ۷ مسیر موازی بصورت شکل ۳-۶ با تعداد کلاف‌های هر مسیر برابر با ۴ وجود دارد. بنابراین در کل هر فاز دارای ۲۸ کلاف ۴۰ دوری است.



شکل ۳-۶- نمایش کلاف‌های سری و موازی سیم‌پیچی ماشین در هر فاز

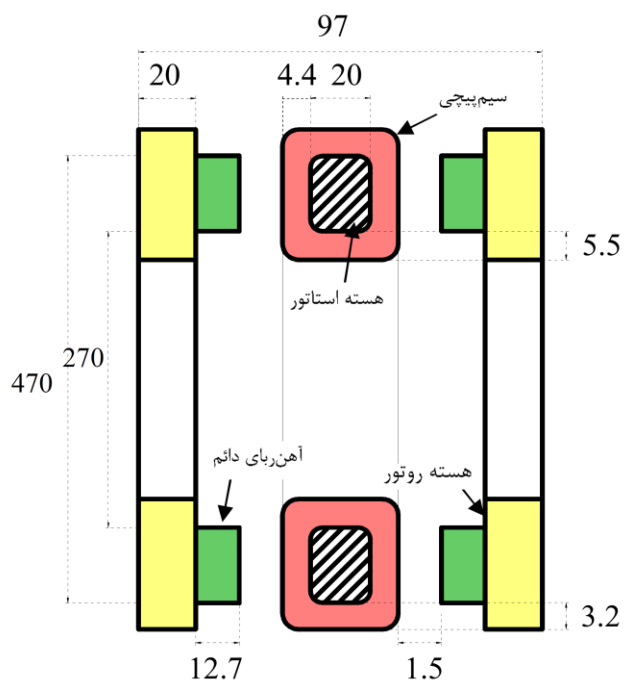
۴۴- طول مؤثر هسته استاتور در جهت شعاعی (طول آهن‌ریا)

$$L_i = (D_o - D_i) / 2 = (0.470 - 0.270) / 2 = 0.1 \quad [m]$$

۴۵- طول متوسط یک دور سیم‌پیچی

$$L_{lav} = 2(L_i + L_s) = 2(0.1 + 0.0288) = 0.2576 \quad [m]$$

در اینجا طراحی الکترومغناطیسی ماشین به پایان رسید. ابعاد طراحی شده در شکل ۳-۶ بطور یکجا نشان داده شده است. همچنین در جدول ۳-۲، پارامترهای داده شده در مرجع [۲۴] و نتایج به دست آمده از محاسبات الگوریتم فوق جهت مقایسه و تأیید صحت الگوریتم، آورده شده است.



شکل ۳-۷- ابعاد اساسی طراحی شده (ابعاد بر حسب میلیمتر)

جدول ۳-۲- مقایسه نتایج ماشین طراحی شده و نمونه ارائه شده در مرجع [۲۴]

ردیف	پارامتر	ابعاد محاسبه شده توسط الگوریتم طراحی	ابعاد ماشین مرجع [۲۴]
۱	قطر خارجی ماشین $D_o [mm]$	۴۷۰	۴۷۰
۲	قطر داخلی ماشین $D_i [mm]$	۲۷۰	۲۷۰
۳	طول محوری هسته استاتور $L_{cs} [mm]$	۲۰	۲۰
۴	طول محوری هسته روتور $L_{cr} [mm]$	۲۰	۲۰
۵	طول محوری آهنربای دائم $L_{pm} [mm]$	۱۲/۷	۱۲/۷
۶	تعداد دور سیم پیچی سری هر فاز N_s	۱۶۰	۱۶۰
۷	سطح مقطع هادی $s_a [mm]$	۰/۳۹۶	۰/۳۹۶
۸	قطر هادی $d_w [mm]$	۰/۷۱	۰/۷۱
۹	ضخامت محوری سیم پیچی $l_w [mm]$	۴/۴	۴/۴
۱۰	طول متوسط یک دور سیم پیچی $L_{lav} [mm]$	۲۵۷/۶	۲۶۶

فصل ۴

مدل سازی و شبیه سازی ماشین شار

محوری آهن ربای دائم

در این فصل شبیه‌سازی ماشین "TORUS-NS" که در فصل قبل طراحی آن توسط الگوریتم طراحی اولیه انجام گرفت به روش تحلیل اجزاء محدود^۱ (FEM) توسط نرم‌افزار Maxwell انجام می‌گیرد و نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی FE و پیش فرضیات در نظر گرفته شده در طراحی اولیه مورد مقایسه و بررسی قرار می‌گیرند. دلایل انتخاب این ماشین به عنوان اولین تجربه طراحی ارائه شده عبارتند از:

۱- بعضی از پارامترهای طراحی این ماشین (با مشخصات داده شده) در مرجع [۲۴] آورده شده است.

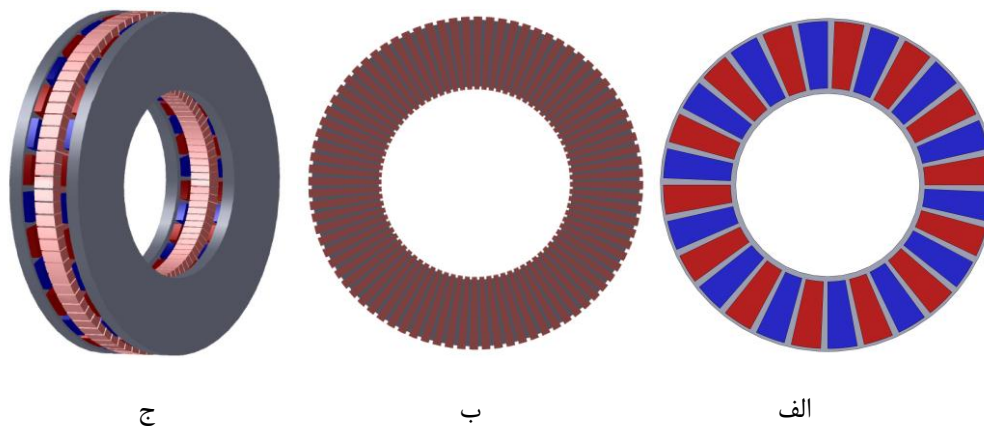
۲- انتخاب مقادیر بعضی از پارامترهای مورد نیاز برای انجام طراحی یا نقطه کار در بازه‌های تقریباً معینی اختیاری است.

۳- با اختیار مقادیر مناسب برای بعضی از پارامترهای اختیاری مذکور در بند ۲ می‌توان موتور مورد نظر را توسط الگوریتم طراحی اولیه ارائه شده در فصل قبل چنان طراحی کرد تا سازگاری عددی قابل قبولی بین نتایج الگوریتم و مقادیر پارامترهای طراحی داده شده در مرجع [۲۴] بوجود آید. اینچنین مهندسی معکوسی یک تصور خوب از نحوه انتخاب مقادیر پارامترهای اختیاری و اطمینانی از صحت نسبی الگوریتم طراحی اولیه ارائه می‌دهد.

۴- با شبیه‌سازی ماشین طراحی شده با روش FE، مشخصات عملکردی ماشین می‌تواند به طور دقیق‌تر مورد بررسی و الگوریتم طراحی اولیه برای بار دوم مورد ارزیابی و تایید قرار گیرد. در صورتی که ماشین طراحی شده به لحاظ بعضی مشخصات عملکردی قابل قبول نباشد ماشین مجدداً طراحی می‌شود.

¹ Finite Element Method

در شکل ۱-۴ نمای سه بعدی ماشین، ساختار استاتور و ساختار روتور ماشین TORUS-NS مورد مطالعه با توجه به تعداد قطب‌ها و اندازه قطرهای داخلی و خارجی ماشین و نیز سایر پارامترهای محاسبه شده ترسیم شده است.



شکل ۱-۴- ساختار ماشین TORUS-NS مورد مطالعه (الف) ساختار روتور (ب) ساختار استاتور (ج) ساختار کلی ماشین

در جدول ۱-۴ مشخصات نامی داده شده برای ماشین مورد طراحی و در جدول ۲-۴ پارامترها و ابعاد ماشین طراحی شده که محاسبات آن در فصل قبل انجام گرفت آورده شده است.

جدول ۱-۴- مشخصات نامی داده شده برای ماشین مورد طراحی

ردیف	پارامتر		واحد	مقدار
۱	توان نامی ژنراتور	P_R	[W]	۵۰۰۰
۲	تعداد فازها	m	-	۳
۳	تعداد طبقات استاتور	N_{stator}	-	۱
۴	ولتاژ تغذیه DC	V_{dc}	[V]	۲۱۰
۵	فرکانس	f	[Hz]	۴۶/۶۷
۶	سرعت نامی	n	[RPM]	۲۰۰
۷	اتصال ژنراتور	Y - ستاره		

جدول ۴-۲- پارامترها و ابعاد ماشین طراحی شده

ردیف	پارامتر		واحد	مقدار
۱	ولتاژ خط به خط	V_l	[V]	۲۱۹/۰۵
۲	ولتاژ فاز	V_p	[V]	۱۲۶/۴۷
۳	تعداد زوج قطبها	p	-	۱۴
۴	بارگذاری الکتریکی کل	A	[A/m]	۱۰۵۰۰
۵	چگالی جریان	J	[A/mm ²]	۷/۸
۶	تعداد مسیرهای موازی جریان	a_p	-	۷
۷	ماکزیمم چگالی شار فاصله هوایی	B_g	[T]	۰/۷۴
۸	نسبت قطر داخلی به قطر خارجی	λ	-	۰/۵۷۴۵
۹	ضریب شکل موج توان الکتریکی	K_p	-	۰/۷۷۷
۱۰	ضریب شکل موج جریان	K_i	-	۱/۱۳۴
۱۱	ضریب نیروی محرکه الکتریکی	K_e	-	π
۱۲	ضریب پرشوندگی مس	K_{cu}	-	۰/۳۳
۱۳	ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی آهنربای دائم (NdFeB)	μ_{rPM}	-	۱/۰۵
۱۴	چگالی شار پس ماند آهنربای دائم (NdFeB)	B_r	[T]	۱/۱۷
۱۵	دامنه چگالی شار هسته روتور	B_{cr}	[T]	۱/۱۷
۱۶	ضریب نشت شار	K_d	-	۰/۵۳۳
۱۷	بارگذاری مغناطیسی ویژه	B_u	[T]	۱/۱۲۵
۱۸	راندمان	η	-	۰/۸۱
۱۹	قطر خارجی	D_o	[m]	۰/۴۷۰
۲۰	قطر داخلی	D_i	[m]	۰/۲۷۰
۲۱	قطر متوسط فاصله هوایی	D_g	[m]	۰/۳۷
۲۲	فاصله هوایی	g	[m]	۰/۰۰۱۵
۲۳	دامنه چگالی شار هسته استاتور	B_{cs}	[T]	۱/۲۴۵
۲۴	طول محوری هسته استاتور	L_{cs}	[m]	۰/۰۲
۲۵	ضخامت شعاعی سیم پیچی انتهایی درون قطر داخلی	W_{cui}	[m]	۰/۰۰۵۵
۲۶	ضخامت شعاعی سیم پیچی انتهایی ورای قطر خارجی	W_{cuo}	[m]	۰/۰۰۳۲
۲۷	متوسط ضخامت شعاعی سیم پیچی انتهایی	W_{cu}	[m]	۰/۰۰۴۳

۰/۰۲۸۸	[m]	L_s	طول محوری استاتور	۲۸
۰/۰۲	[m]	L_{cr}	طول محوری هسته روتور	۲۹
۰/۰۱۲۷	[m]	L_{PM}	طول محوری آهنربای دائم	۳۰
۰/۷۲	-	α_i	نسبت قوس قطب به گام قطب	۳۱
۰/۰۲۹۹	[m]	w_{PMg}	عرض آهنربا در قطر متوسط	۳۲
۰/۰۳۲۷	[m]	L_r	طول محوری روتور	۳۳
۰/۰۹۷	[m]	L_e	طول محوری ماشین	۳۴
۱۶۰	Turn	N_t	تعداد دور سیم‌پیچی سری هر فاز	۳۵
۱۲/۷۱	[A]	I_{rms}	جریان موثر سیم‌پیچی	۳۶
۰/۰۰۴۴	[m]	l_w	ضخامت لایه سیم‌پیچی	۳۷
۰/۳۲۹	[cm ²]	s_a	سطح مقطع هادی سیم‌پیچی	۳۸
۰/۷۱	[mm]	d_{str}	قطر رشته هادی	۳۹
۰/۱	[m]	L_i	طول مؤثر هسته استاتور در جهت شعاعی (طول آهنربا)	۴۰
۰/۲۵۷۶	[m]	L_{lav}	طول متوسط یک دور سیم‌پیچی	۴۱

۴-۲- شبیه‌سازی ماشین TORUS-NS

در این بخش ماشین TORUS-NS طراحی شده، توسط نرم‌افزار Maxwell14 در محیط دو بعدی شبیه‌سازی شده و نتایج به دست آمده ارائه می‌شوند. به طور کلی مراحل شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار روش اجزاء محدود (FEM) عبارتند از [۲۱] و [۲۶]:

الف - پیش‌پردازشگر^۱:

که خود شامل مراحل زیر می‌باشد:

۱- رسم مدل ماشین در محیط نرم‌افزار (Drawing)

۲- اختصاص مواد به اجزاء مدل رسم شده در محیط نرم‌افزار (Materials)

¹ Pre-processor

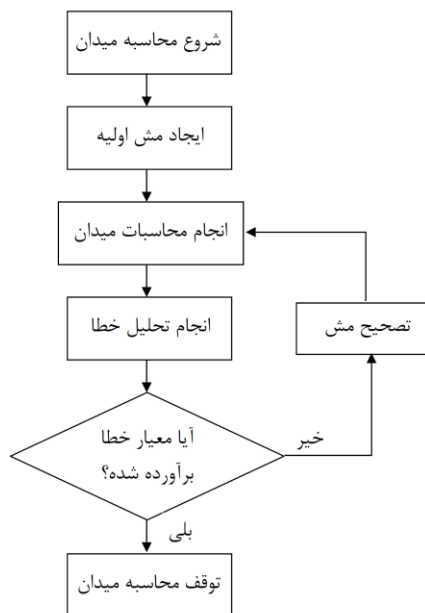
۳- اختصاص تحریک به صورت ولتاژ، جریان یا چگالی جریان سطحی و ... (Electric Circuit)

۴- تعیین محدودیت‌ها شامل شرایط مرزی، تقارن و دیگر شرایط حاکم بر مدل (Constraints)

۵- مش‌بندی^۱ مدل رسم شده ماشین

ب- پردازشگر^۲ (حل)

بعد از اتمام مرحله پیش پردازش و انجام مش‌بندی مدل رسم شده ماشین توسط نرم‌افزار، مرحله پردازش (حل) یا محاسبات میدان انجام می‌گیرد. تحلیل الکترومغناطیسی بر روی هر کدام از المان‌های مش به روش تکراری صورت می‌گیرد و در هر تکرار بررسی می‌شود که آیا معیار خطا برآورده شده است یا خیر؟ و در پایان برخی کمیت‌ها مانند گشتاور، نیرو و اندوکتانس محاسبه می‌شوند. در هر مرحله از تکرار در صورتی که معیار خطا برآورده نشده باشد همان مراحل محاسبات میدان تا رسیدن به حد خطای مورد نیاز دنبال می‌شود. در شکل ۲-۴ نمودار پروسه کلی نرم‌افزار FEM نوعی نشان داده شده است.



شکل ۲-۴- نمودار پروسه کلی نرم‌افزار FEM نوعی [۲۱]

¹ Mesh Generation

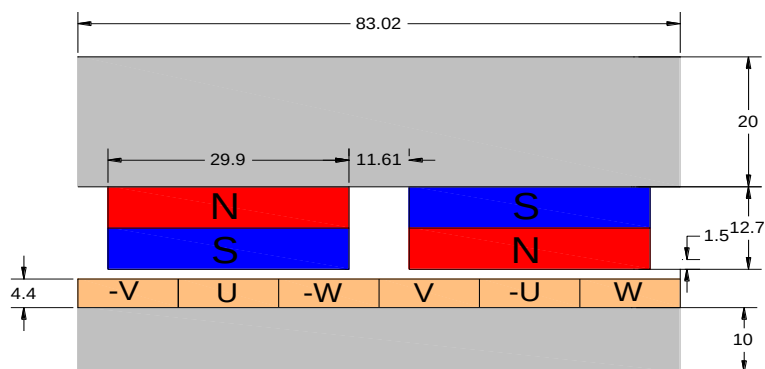
² Processor (Field Solver)

ج- پس پردازشگر^۱ (بررسی نتایج)

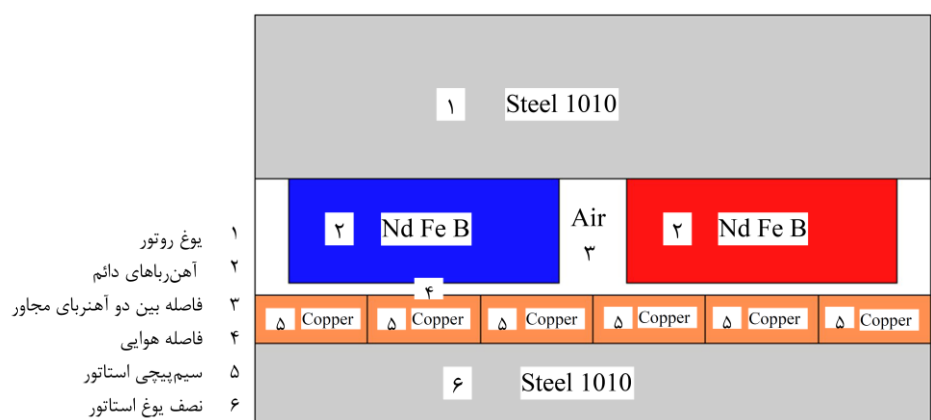
در مرحله پس پردازش، کمیت های میدان مغناطیسی که برخی از آنها عبارتند از گشتاور، نیرو، شار و اندوکتانس و ... محاسبه شده و نمایش داده می شوند.

نمای دو بعدی ماشین TORUS-NS جهت مدل کردن ماشین در محیط نرم افزار با جزئیات آن شامل جهت جریان در سیم پیچی ها و قطب های آهن رباهای دائم و نیز جهت عبور خطوط شار مغناطیسی در شکل ۳-۴ نشان داده شده است [۴]. در ادامه سعی می شود تا مراحل شبیه سازی توسط نرم افزار Maxwell14 به صورت گام به گام با جزئیات توضیح داده شود. در واقع این ماشین را هنگام تحلیل میدان به دلیل وجود تقارن ساختاری می توان به صورت دو نیمه مستقل در نظر گرفت [۲۵]. پس از ترسیم مدل با ابعاد تعیین شده در شکل ۳-۴، در مرحله بعد باید به اجزاء رسم شده در مدل، مواد مورد نظر اختصاص داده شود (گزینه Assign Material). پس از آن، تخصیص تحریک (گزینه Assign Excitation) انجام می گیرد که به سیم پیچی ها جریان یا چگالی جریان اختصاص داده می شود. در ادامه شرایط مرزی به مدل ترسیم شده اعمال می شود (گزینه Assign Boundary). به این ترتیب به تمام اجزاء رسم شده مدل مواد مورد نظر اختصاص داده می شوند. در شکل ۴-۴ مواد تخصیص یافته به اجزاء مدل نشان داده شده است. پس از تخصیص و تعیین شرایط لازم مش بندی ماشین صورت می گیرد. در شکل ۴-۵ مش بندی بخش ترسیم شده ماشین مورد مطالعه نشان داده شده است.

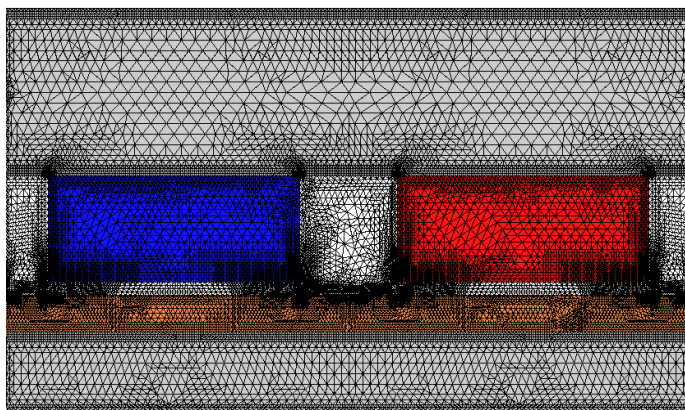
¹ Post-processor



شکل ۴-۳- ابعاد مدل رسم شده ماشین TORUS-NS بر حسب میلیمتر



شکل ۴-۴- مواد تخصیص یافته به اجزاء مدل رسم شده ماشین TORUS-NS

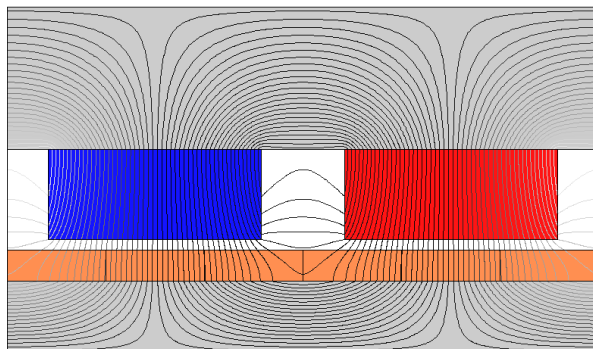


شکل ۴-۵- مش بندی قسمتی از ماشین TORUS-NS

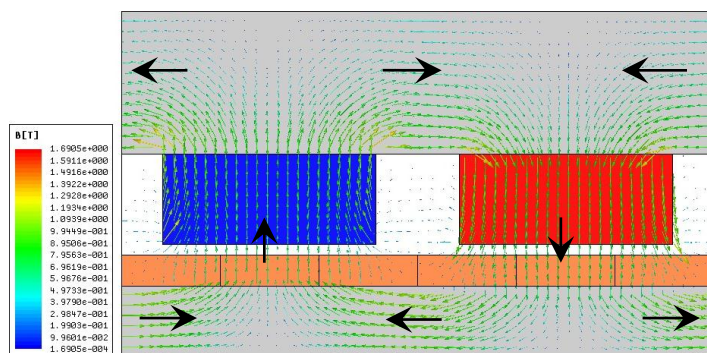
پس از آنالیز و حل مدل معرفی شده به نرم افزار می توان نتایج مورد نظر را مورد بررسی قرار داد. در شکل

۴-۶ نمونه ای از خطوط شار مغناطیسی بدون اختصاص جریان به سیم پیچی های استاتور مدل ترسیم شده

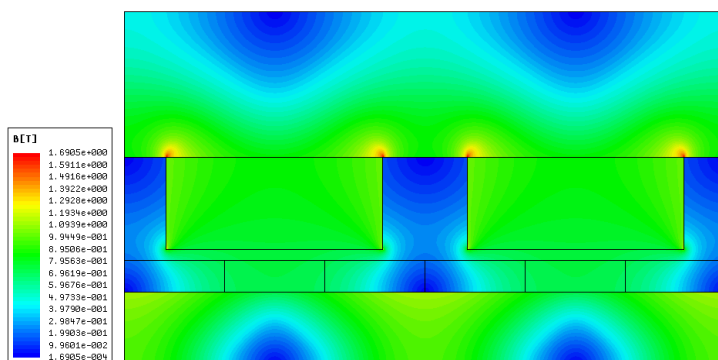
از ماشین مورد مطالعه مشاهده می‌شود. در شکل‌های ۴-۷ و ۴-۸ نیز توزیع چگالی شار مغناطیسی برای این حالت به ترتیب به صورت برداری و طیف رنگی مشاهده می‌شود.



شکل ۴-۶- خطوط شار مغناطیسی ماشین TORUS-NS در حالت استاتور بدون جریان

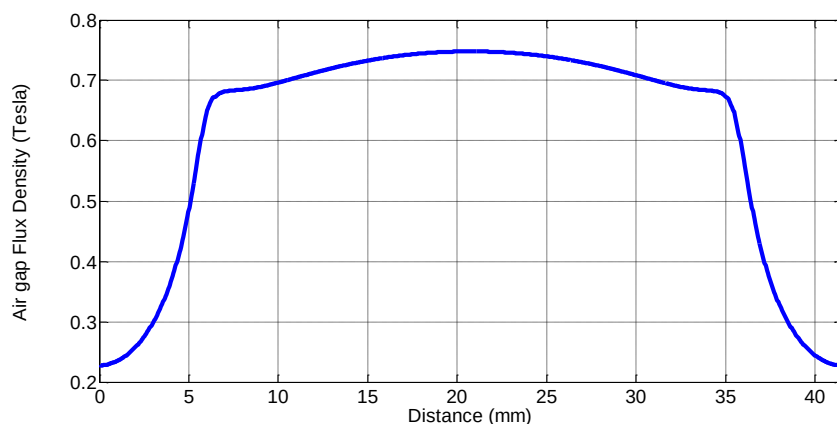


شکل ۴-۷- توزیع چگالی شار مغناطیسی ماشین TORUS-NS به صورت برداری در حالت استاتور بدون جریان



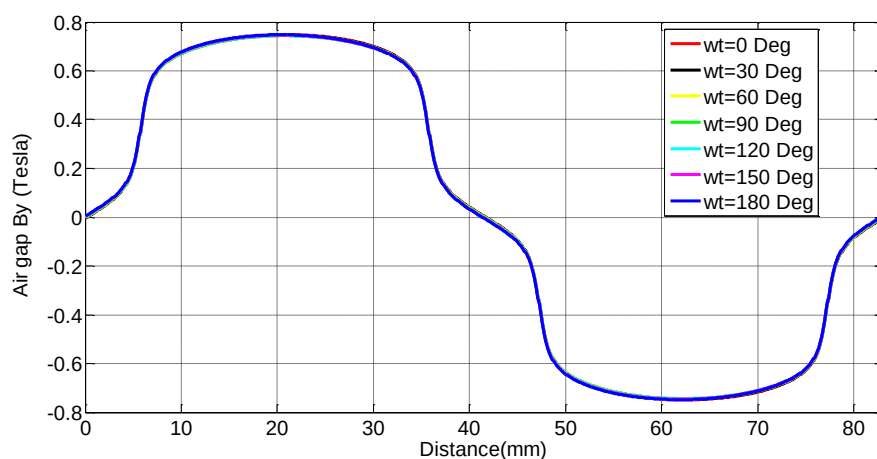
شکل ۴-۸- توزیع چگالی شار مغناطیسی ماشین TORUS-NS به صورت طیف رنگی در حالت استاتور بدون جریان

در شکل ۹-۴ توزیع چگالی شار مغناطیسی زیر یک قطب بر حسب فاصله رسم شده است. محور عمودی چگالی شار مغناطیسی در مرکز فاصله هوایی بر حسب تسلا و محور افقی فاصله از محور عرضی بر حسب میلیمتر است. از شکل ۹-۴ مقدار ماکزیمم چگالی شار در مرکز فاصله هوایی حدود 0.748 تسلا می‌باشد.

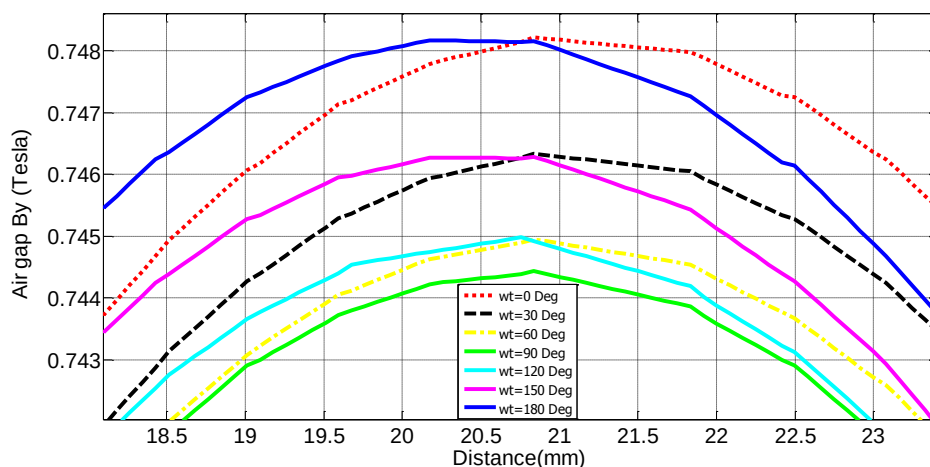


شکل ۹-۴- توزیع چگالی شار مغناطیسی زیر یک قطب بر حسب فاصله تا محور عرضی ماشین TORUS-NS در حالت استاتور بدون جریان

در شکل ۱۰-۴ نیز منحنی‌های توزیع چگالی شار مغناطیسی زیر یک قطب در حالت استاتور بدون جریان بر حسب فاصله تا محور عرضی به همراه توزیع چگالی شار مغناطیسی در حالی که سیم‌پیچی‌های استاتور دارای جریان‌های موثر نامی ولی با ترکیب‌های لحظه‌ای مختلف جریان فازهای متفاوت می‌باشند را نشان می‌دهد. در واقع جریان‌های سینوسی لحظه‌ای به ازای ωt های مختلف یعنی ($\omega t = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$) محاسبه و به مدل ساکن اعمال شده‌اند. با توجه به این که نیروی محرکه مغناطیسی تولید شده توسط جریان سیم‌پیچی‌های استاتور در مقایسه با نیروی محرکه مغناطیسی تولید شده توسط آهن‌رباهای دائم ناچیز است لذا همان‌طور که در شکل ۱۰-۴ مشاهده شد به ازای ωt های مختلف تاثیر این تغییرات در دامنه، شیفت شکل موج و متوسط شار قابل توجه نیست. برای مشاهده واضح‌تر این تفاوت‌ها، بزرگنمایی قسمتی از منحنی‌های شکل ۱۰-۴ در شکل ۱۱-۴ نمایش داده شده است.

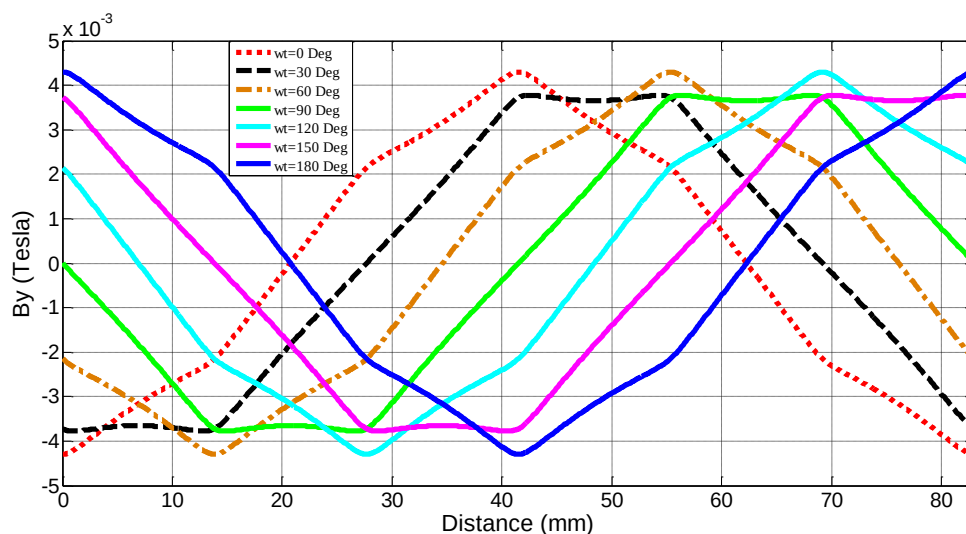


شکل ۱۰-۴- مولفه عمودی چگالی شار مغناطیسی زیر دو قطب در حالت $i = 0$ و توزیع چگالی شار مغناطیسی با فرض جریان نامی در سیم‌پیچ‌ها به ازای ωt های مختلف ($\omega t = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$) ماشین TORUS-NS مورد مطالعه



شکل ۱۱-۴- بزرگنمایی قسمتی از شکل ۱۰-۴

به منظور برآورد زاویه δ_{ar} که زاویه بین بردارهای چگالی شار B_a ایجاد شده توسط mmf آرمیچر و چگالی شار منتهی فاصله هوایی B_r می‌باشد، توزیع چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی با حذف اثر چگالی شار حاصل از آهن‌رباهای دائم (با جایگزین نمودن آهن‌رباها با هوا) به ازای ωt های مختلف در شکل ۱۲-۴ رسم شده است. در جدول ۳-۴ یک مقایسه از چگالی شارهای مغناطیسی در حالت استاتور بدون جریان حاصل از محاسبات تحلیلی و FEM در فاصله هوایی، یوغ روتور و یوغ استاتور آمده است.



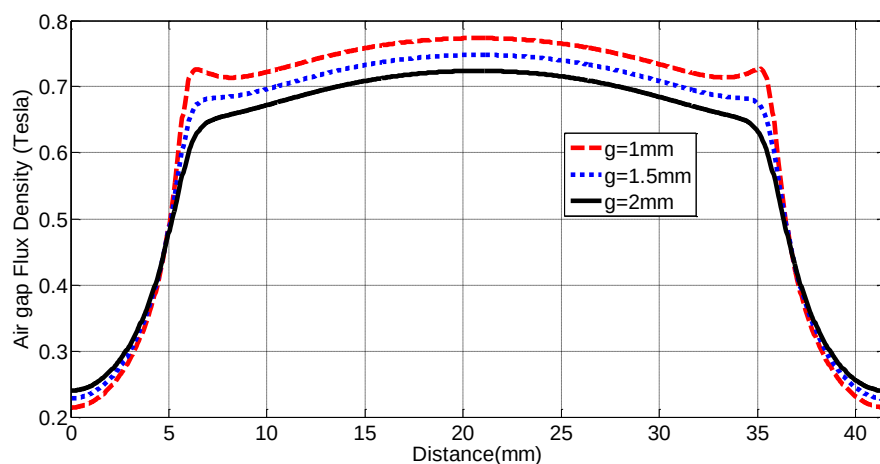
شکل ۴-۱۲- مولفه عمودی چگالی شار مغناطیسی زیر دو قطب در فاصله هوایی ناشی از جریان نامی سیم پیچ‌ها بدون حضور آهن‌رباهای دائم به ازای ωt های مختلف ($\omega t = 0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ, 150^\circ, 180^\circ$) ماشین TORUS- NS مورد مطالعه

جدول ۴-۳- مقایسه چگالی شار مغناطیسی در حالت استاتور بدون جریان حاصل از محاسبات تحلیلی و FEM

	هسته استاتور	هسته روتور	فاصله هوایی	
			B_{g-max}	B_{g-avg}
چگالی شار مغناطیسی	B_{cs-max}	B_{cr-max}		
FEM	۱/۱۲۳	۱/۰۹	۰/۷۴۸	۰/۶۱
محاسبات تحلیلی	۱/۲۴۵	۱/۱۷	۰/۷۴	۰/۶

۴-۳- تأثیر اندازه طول فاصله هوایی بر روی چگالی شار فاصله هوایی

در شکل ۴-۱۳ توزیع چگالی شار مغناطیسی زیر یک قطب بر حسب فاصله تا محور عرضی در حالت استاتور بدون جریان به ازای چند فاصله هوایی متفاوت رسم شده است. مقدار ماکزیمم چگالی شار مغناطیسی در مقادیر مختلف اندازه طول فاصله هوایی از شکل ۴-۱۳ استخراج و در جدول ۴-۴ ارائه شده است. همان‌طور که از شکل ۴-۱۳ و جدول ۴-۴ مشاهده می‌شود و انتظار هم همین بود با بزرگ‌تر شدن طول فاصله هوایی مقدار چگالی شار در فاصله هوایی کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۱۳- توزیع چگالی شار مغناطیسی زیر یک قطب در حالت استاتور بدون جریان بر حسب فاصله تا محور عرضی در ماشین TORUS-NS به ازای فواصل هوایی مختلف

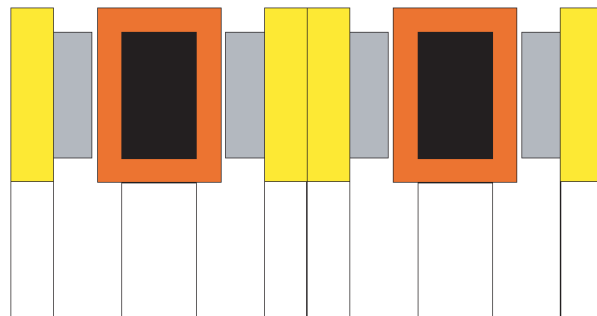
جدول ۴-۴- تاثیر اندازه طول فاصله هوایی بر روی ماکزیمم چگالی شار فاصله هوایی در ماشین TORUS-NS مورد مطالعه در حالت استاتور بدون جریان

ردیف	طول فاصله هوایی بر حسب میلیمتر	ماکزیمم چگالی شار مغناطیسی در فاصله هوایی بر حسب تسلا
۱	۱	۰/۷۷۳
۲	۱/۵	۰/۷۴۸
۳	۲	۰/۷۲۴

۴-۴- طراحی اولیه ماشین نمونه اصلی با استفاده از الگوریتم طراحی اولیه ارائه شده

با توجه به اینکه تا اینجا الگوریتم طراحی اولیه و مدل سازی و شبیه سازی بر روی یک ماشین نمونه انجام گرفت و صحت و اعتبار آن تأیید شد در این بخش یک ماشین TORUS-NS نمونه اصلی با استفاده از الگوریتم ارائه شده طراحی و سپس مدل سازی و شبیه سازی آن انجام می گیرد. لازم به ذکر است از آنجایی که توان ماشین مورد طراحی 1 MW بوده و ولتاژ تغذیه ماشین های با چنین توانی در محدوده کیلوولت و بالاتر می باشد اما در این ماشین ولتاژ تغذیه باتری در دسترس ۴۴۰ ولت است لذا ماشین مورد نظر به صورت دو لایه (مطابق شکل ۴-۱۴) طراحی می شود تا تعداد دور سیم پیچی زیر

هر قطب مربوط به هر فاز به صورت عدد قابل قبولی به دست آید از طرفی با چند لایه در نظر گرفتن ماشین حجم آهن و مس ماشین افزایش یافته که تا حدودی منجر به کاهش چگالی توان می گردد. به عبارت دیگر می توان گفت که در واقع هدف طراحی دو موتور جداگانه با مشخصات دقیقاً یکسان است که توان هر کدام نیم مگاوات بوده و به صورت کاسکاد^۱ مونتاژ می شوند. از سوی دیگر، با طراحی دو لایه دستیابی به راندمان ماکزیمم در بار نامی و نصف بار نامی میسر می گردد.



شکل ۴-۱۴- قسمتی از نمای دو بعدی ماشین TORUS-NS دو لایه [۲۳]

مشخصات نامی ماشین در هفت ردیف اول داده شده است.

۱- توان خروجی نامی موتور $P_R = 500000 \text{ [W]}$

۲- تعداد فازها $m = 3$

۳- تعداد طبقات استاتور $N_{stator} = 1$ ، $m = m_1 = 3$

۴- ولتاژ تغذیه باتری $V_{dc} = 440 \text{ [V]}$

۵- فرکانس $f = 55 \text{ [Hz]}$

۶- سرعت نامی موتور $n = 300 \text{ [RPM]}$

۷- اتصال موتور Y (ستاره)

¹ Cascade

$$p = 60 f / n = 60(55) / 300 = 11 \quad \text{۸- تعداد زوج قطب‌ها}$$

$$A = 60000 \quad \left[\frac{A}{m} \right] \quad \text{۹- بارگذاری الکتریکی کل} \quad 10000 < A < 60000$$

$$J_s = 10^7 \quad \left[\frac{A}{m^2} \right] \quad \text{۱۰- چگالی جریان} \quad 3(10^6) < J_s < 10(10^6)$$

$$a_p = 1 \quad \text{۱۱- تعداد مسیرهای موازی جریان}$$

$$B_g = 0.44 \quad [T] \quad \text{۱۲- چگالی شار فاصله هوایی}$$

$$\lambda = \frac{D_i}{D_o} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0.577 \quad \text{۱۳- نسبت قطر داخلی به قطر خارجی}$$

$$K_p = 0.777 \quad \text{۱۴- ضریب شکل موج توان الکتریکی}$$

$$K_i = 1.134 \quad \text{۱۵- ضریب شکل موج جریان}$$

$$K_e = \pi \quad \text{۱۶- ضریب نیروی محرکه الکتریکی}$$

$$K_{cu} = 0.4 \quad \text{۱۷- ضریب پر شوندگی مس}$$

$$\alpha_i = 0.8 \quad \text{۱۸- نسبت قوس قطب به گام قطب}$$

$$\mu_{rPM} = 1.05 \quad \text{۱۹- ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی آهنربای دائم (NdFeB)}$$

$$B_r = 1.2 \quad [T] \quad \text{۲۰- چگالی شار پس ماند آهنربای دائم (NdFeB)}$$

$$B_{cr} = 1.8 \quad [T] \quad \text{۲۱- دامنه چگالی شار هسته روتور}$$

$$K_d = (1 - p/30) = (1 - 11/30) = 0.633 \quad \text{۲۲- ضریب نشت شار}$$

$$B_u = B_g / K_d = 0.44 / 0.633 = 0.6947 \quad [T] \quad \text{۲۳- بارگذاری مغناطیسی ویژه}$$

$$\eta = 0.95 \quad \text{۲۴- راندمان}$$

$$D_o = \left(\frac{4pP_R}{N_{stator} \pi K_e K_i K_p \eta B_g A f (1 - \lambda^2)(1 + \lambda)} \right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{۲۵- قطر خارجی}$$

$$D_o = \left(\frac{(4)(11)(500000)}{(1)(\pi)(\pi)(1.134)(0.777)(0.95)(0.44)(60000)(55)(1 - 0.577^2)(1 + 0.577)} \right)^{1/3} = 1.2037 \quad [m]$$

$$D_i = \lambda D_o = (0.577)1.2037 = 0.6950 \quad [m] \quad \text{۲۶- قطر داخلی}$$

$$D_g = \frac{D_o + D_i}{2} = \frac{1 + \lambda}{2} D_o = \frac{1 + 0.577}{2} 1.2037 = 0.9493 \quad [m] \quad \text{۲۷- قطر متوسط فاصله هوایی}$$

$$g = 0.005 \quad [m] \quad \text{۲۸- فاصله هوایی}$$

$$B_{cs} = 5.47 f^{-0.32} = 5.47(55^{-0.32}) = 1.5173 \quad [T] \quad \text{۲۹- دامنه چگالی شار هسته استاتور}$$

$$\text{۳۰- طول محوری هسته استاتور}$$

$$L_{cs} = \frac{B_g \pi D_o (1 + \lambda)}{B_{cs} 4p} = \frac{0.44 \pi (1.2037)(1 + 0.577)}{1.5173(4)11} = 0.0393 \quad [m]$$

$$\text{۳۱- ضخامت شعاعی سیم پیچی انتهایی درون قطر داخلی}$$

$$W_{cui} = \frac{\sqrt{D_i^2 + \frac{4A_s D_g}{K_{cu} J_s}} - D_i}{2} = \frac{\sqrt{0.6950^2 + \frac{4(60000)0.9493}{0.4(10^7)}} - 0.6950}{2} = 0.0199 \quad [m]$$

$$\text{۳۲- ضخامت شعاعی سیم پیچی ورای قطر خارجی}$$

$$W_{cuo} = \frac{\sqrt{D_o^2 + \frac{4A_s D_g}{K_{cu} J_s}} - D_o}{2} = \frac{\sqrt{1.2037^2 + \frac{4(60000)0.9493}{0.4(10^7)}} - 1.2037}{2} = 0.0117 \quad [m]$$

$$\text{۳۳- متوسط ضخامت شعاعی سیم پیچی انتهایی}$$

$$W_{cu} = \frac{W_{cui} + W_{cuo}}{2} = \frac{0.0199 + 0.0117}{2} = 0.0158 \quad [m]$$

$$L_s = L_{cs} + 1.6W_{cui} = 0.0393 + 1.6(0.0199) = 0.0712 \quad [m] \quad \text{۳۴- طول محوری استاتور}$$

$$\text{۳۵- طول محوری هسته روتور}$$

$$L_{cr} = \frac{B_u \pi D_o (1 + \lambda)}{B_{cr} 8p} = \frac{0.6947(\pi) 1.2037(1 + 0.577)}{1.8(8)11} = 0.0262 \quad [m]$$

۳۶- طول محوری آهنربای دائم

$$L_{PM} = \frac{\mu_{rPM} B_g}{B_r - \frac{K_f}{K_d} B_g} (g + W_{cu}) = \frac{1.05(0.44)}{1.2 - \frac{0.95}{0.6333}(0.44)} (0.005 + 0.0158) = 0.0178 \quad [m]$$

$$w_{PMg} = \frac{\pi D_g}{2p} \alpha_i = \frac{\pi(0.9493)}{22} (0.8) = 0.1085 \quad [m] \quad ۳۷- عرض آهنربا در قطر متوسط$$

$$L_r = L_{cr} + L_{PM} = 0.0262 + 0.0178 = 0.0440 \quad [m] \quad ۳۸- طول محوری روتور$$

$$L_e = L_s + 2L_r + 2g = 0.0712 + 2(0.0440) + 2(0.005) = 0.1691 \quad [m] \quad ۳۹- طول محوری ماشین$$

۴۰- تعداد دور سیم پیچی سری هر فاز

$$N_t = \frac{E_{PK}}{K_e B_g \frac{f}{p} (1 - \lambda^2) D_o^2} = \frac{440}{\pi 0.44 \frac{55}{11} (1 - 0.577^2) 1.2037^2} = 65.9068 \cong 66$$

۴۱- جریان سیم پیچی

$$I_{PK} = \frac{P_R}{\eta m K_p E_{PK}} = \frac{500000}{(0.95)(3)(0.777)(440)} = 513.1584 \quad [A]$$

$$I_{rms} = \frac{\pi D_g A_s}{2m_1 N_t} = \frac{\pi 0.9493(60000)}{2(3)(66)} = 452.5206 \quad [A] \quad \text{با در نظر گرفتن تعداد دور اصلاح شده:}$$

$$l_w = (L_e - 2(L_{PM} + L_{cr} + g) + L_{cs}) / 2 \quad (l_w = W_{cu}) \quad \text{۴۲- ضخامت لایه سیم پیچی}$$

$$= (0.1691 - 2(0.0178 + 0.0262 + 0.005) + 0.0393) / 2 = 0.0159 \quad [m]$$

$$s_a = \frac{I_{rms}}{J_s} = \frac{452.5206}{10^7} = 45.25 \quad [mm^2] \quad ۴۳- سطح مقطع هادی سیم پیچی$$

با انتخاب هادی‌های رشته‌ای با قطر ۱ میلی‌متر ($d_{str} = 1 \text{ mm}$)، سطح مقطع هر رشته هادی به صورت زیر به دست می‌آید:

$$s_{str} = \frac{\pi d_{str}^2}{4} = \frac{\pi (1)^2}{4} = 0.785 \text{ [mm}^2\text{]}$$

لذا تعداد رشته هادی‌های مورد نیاز جهت تأمین سطح مقطع مورد نیاز برابر خواهد بود با:

$$N_{str} = \frac{s_a}{s_{str}} = \frac{45.25}{0.785} = 57.6167 \cong 58$$

۴۴- طول مؤثر هسته استاتور در جهت شعاعی (طول آهن‌ربا)

$$L_i = (D_o - D_i) / 2 = (1.2037 - 0.6950) / 2 = 0.2594 \text{ [m]}$$

$$L_{lav} = 2(L_i + L_s) = 2(0.2594 + 0.0712) = 0.6811 \text{ [m]} \quad \text{۴۵- طول متوسط یک دور سیم‌پیچی}$$

در جدول ۴-۵ مشخصات نامی برای طراحی ماشین مورد نظر داده شده است. همچنین پارامترهای محاسبه شده برای ماشین ذکر شده در جدول ۴-۶ لیست شده است.

جدول ۴-۵- مشخصات نامی داده شده برای ماشین مورد طراحی

پارامترهای طراحی ورودی			
ردیف	پارامتر	واحد	مقدار
۱	توان نامی موتور	P_R	[W] ۵۰۰۰۰۰
۲	تعداد فازها	m	- ۳
۳	تعداد طبقات استاتور	N_{stator}	- ۱
۴	ولتاژ تغذیه باتری	V_{dc}	[V] ۴۴۰
۵	فرکانس	f	[Hz] ۵۵
۶	سرعت نامی موتور	n	[R.P.M] ۳۰۰
۷	اتصال موتور	Y - ستاره	

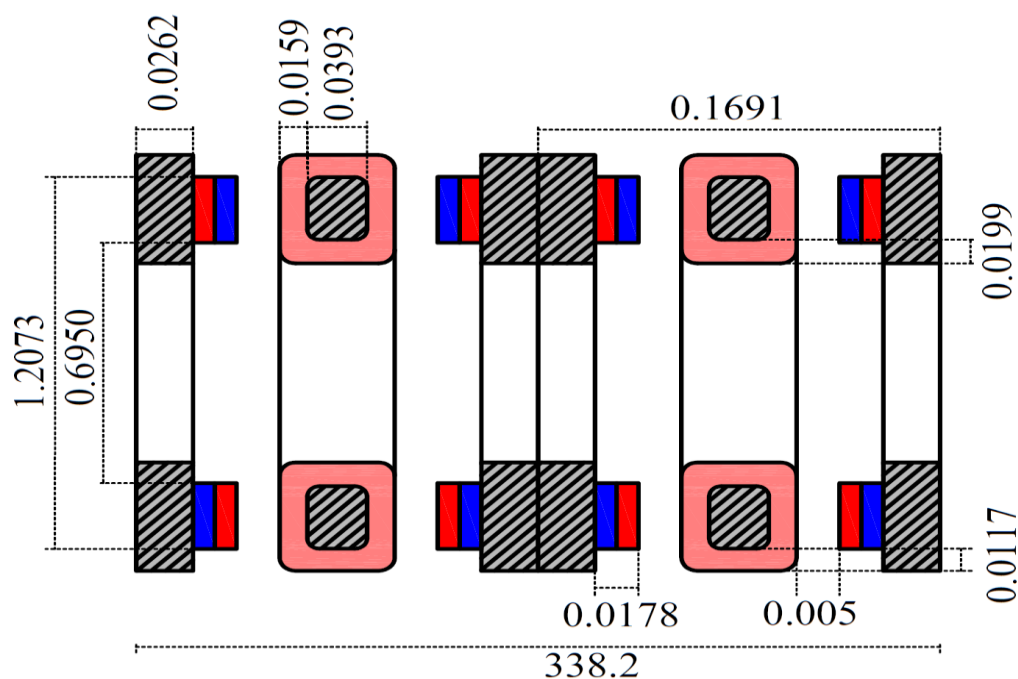
جدول ۴-۶- پارامترها و ابعاد ماشین طراحی شده

پارامترهای ماشین			
ردیف	پارامتر	واحد	مقدار
۱	تعداد زوج قطبها	p	- ۱۱

۶۰۰۰۰	$[A/m]$	A	بارگذاری الکتریکی کل	۲
۱۰	$[A/mm^2]$	J	چگالی جریان	۳
۱	-	a_p	تعداد مسیرهای موازی جریان	۴
۰/۴۴	$[T]$	B_g	چگالی شار فاصله هوایی	۵
۰/۵۷۷	-	λ	نسبت قطر داخلی به قطر خارجی	۶
۰/۷۷۷	-	K_p	ضریب شکل موج توان الکتریکی	۷
۱/۱۳۴	-	K_i	ضریب شکل موج جریان	۸
π	-	K_e	ضریب نیروی محرکه الکتریکی	۹
۰/۴	-	K_{cu}	ضریب پر شوندگی مس	۱۰
۱/۰۵	-	μ_{rPM}	ضریب نفوذپذیری مغناطیسی نسبی آهنربای دائم (NdFeB)	۱۱
۱/۲	$[T]$	B_r	چگالی شار پس ماند آهنربای دائم (NdFeB)	۱۲
۱/۸	$[T]$	B_{cr}	دامنه چگالی شار هسته روتور	۱۳
۰/۶۳۳	-	K_d	ضریب نشت شار	۱۴
۰/۶۹۴۷	$[T]$	B_u	بارگذاری مغناطیسی ویژه	۱۵
۰/۹۵	-	η	راندمان	۱۶
۱/۲۰۳۷	$[m]$	D_o	قطر خارجی	۱۷
۰/۶۹۵۰	$[m]$	D_i	قطر داخلی	۱۸
۰/۹۴۹۳	$[m]$	D_g	قطر متوسط فاصله هوایی	۱۹
۰/۰۰۵	$[m]$	g	فاصله هوایی	۲۰
۱/۵۱۷۳	$[T]$	B_{cs}	دامنه چگالی شار هسته استاتور	۲۱
۰/۰۳۹۳	$[m]$	L_{cs}	طول محوری هسته استاتور	۲۲
۰/۰۱۹۹	$[m]$	W_{cui}	ضخامت شعاعی سیم پیچی انتهایی درون قطر داخلی	۲۳
۰/۰۱۱۷	$[m]$	W_{cuo}	ضخامت شعاعی سیم پیچی انتهایی ورای قطر خارجی	۲۴
۰/۰۱۵۸	$[m]$	W_{cu}	متوسط ضخامت شعاعی سیم پیچی انتهایی	۲۵
۰/۰۷۱۲	$[m]$	L_s	طول محوری استاتور	۲۶
۰/۰۲۶۲	$[m]$	L_{cr}	طول محوری هسته روتور	۲۷
۰/۰۱۷۸	$[m]$	L_{PM}	طول محوری آهنربای دائم	۲۸
۰/۸	-	α_i	نسبت قوس قطب به گام قطب	۲۹
۰/۱۰۸۵	$[m]$	w_{PMg}	عرض آهنربا در قطر متوسط	۳۰

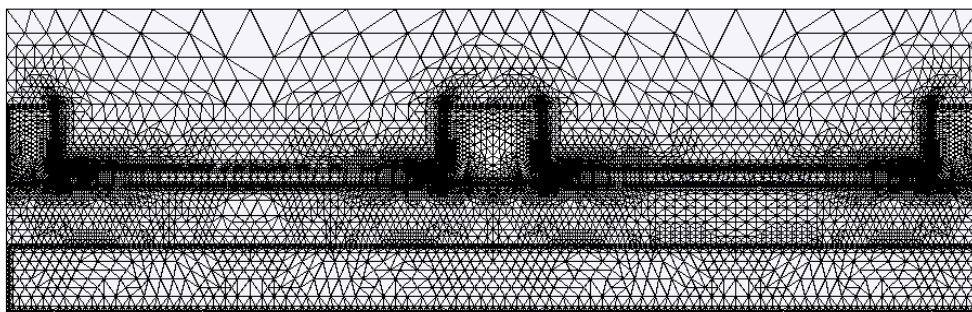
۰/۰۴۴۰	[m]	L_r	طول محوری روتور	۳۱
۰/۱۶۹۱	[m]	L_e	طول محوری ماشین	۳۲
۶۶	turn	N_t	تعداد دور سیم‌پیچی سری هر فاز	۳۵
۴۵۲/۵۲	[A]	I_{rms}	جریان موثر سیم‌پیچی	۳۶
۰/۰۱۵۹	[m]	l_w	ضخامت لایه سیم‌پیچی	۳۷
۴۵/۲۵۲	[mm ²]	s_a	سطح مقطع هادی سیم‌پیچی	۳۸
۱	[mm]	d_{str}	قطر رشته هادی	۳۹
۰/۷۸۵	[mm ²]	s_{str}	سطح مقطع هر رشته هادی	۴۰
۵۸	-	N_{str}	تعداد رشته‌های هادی	۴۱
۰/۲۵۹۴	[m]	L_i	طول مؤثر هسته استاتور در جهت شعاعی (طول آهن‌ربا)	۴۲
۰/۶۸۱۱	[m]	L_{1av}	طول متوسط یک دور سیم‌پیچی	۴۳

در شکل ۴-۱۵ ابعاد اساسی طراحی شده ماشین بر حسب متر نشان داده شده است.



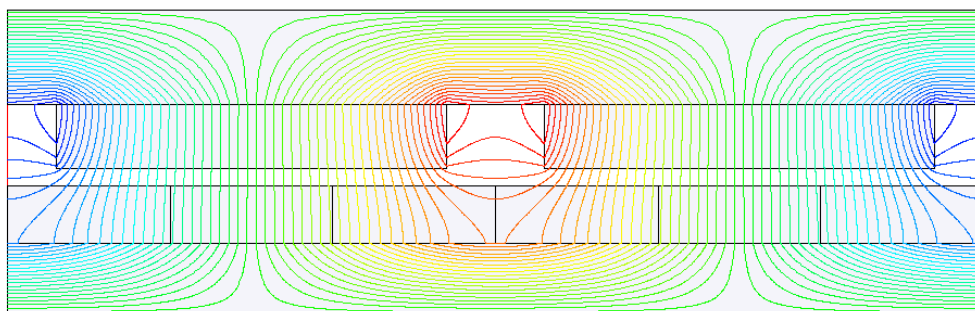
شکل ۴-۱۵- ابعاد اساسی طراحی شده ماشین مورد مطالعه (ابعاد بر حسب متر)

در شکل ۴-۱۶ مش‌بندی مدل ماشین مورد مطالعه نشان داده شده است.



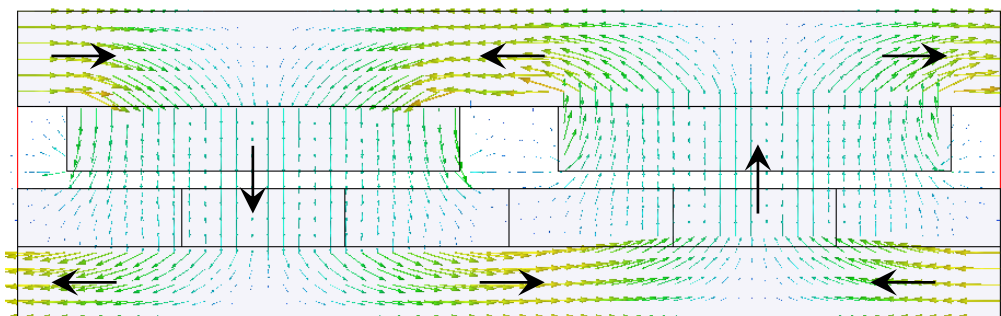
شکل ۴-۱۶- مش بندی قسمتی از مدل ماشین مورد مطالعه

در شکل ۴-۱۷ خطوط شار مغناطیسی ماشین مورد مطالعه به صورت دو بعدی نشان داده شده است.



شکل ۴-۱۷- خطوط شار مغناطیسی بی باری ماشین مورد مطالعه

در شکل ۴-۱۸ نیز چگالی شار مغناطیسی به صورت برداری مشاهده می شود.



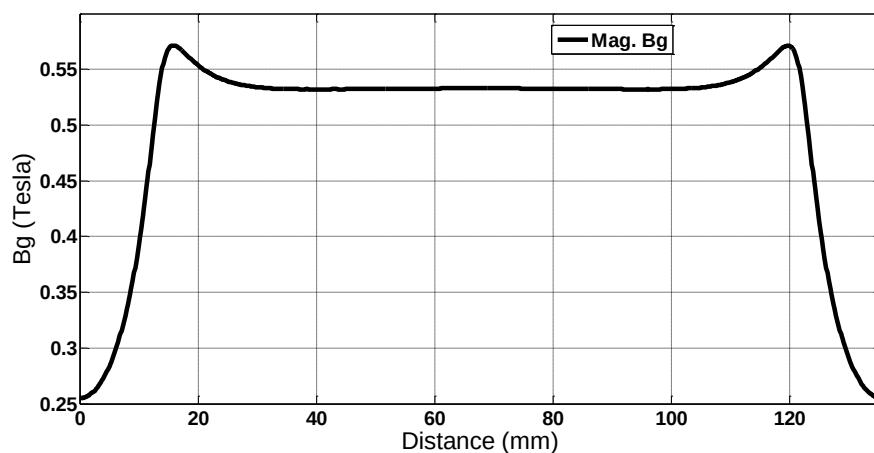
شکل ۴-۱۸- چگالی شار مغناطیسی بی باری به صورت برداری در ماشین مورد مطالعه

در جدول ۷-۴ نتایج حاصل از محاسبات تحلیلی و FEM چگالی شار مغناطیسی بی‌باری ماشین با هم مقایسه شده‌اند.

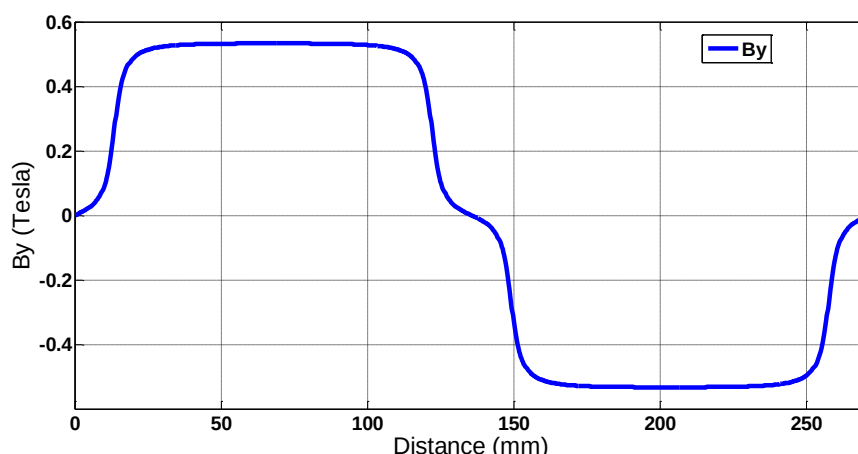
جدول ۷-۴- مقایسه چگالی شار مغناطیسی بی‌باری حاصل از محاسبات تحلیلی و FEM

چگالی شار مغناطیسی	هسته استاتور	هسته روتور	فاصله هوایی	
	B_{cs-max}	B_{cr-max}	B_{g-max}	B_{g-avg}
FEM	۱/۳۵	۱/۷۷	۰/۵۷	۰/۴۹
محاسبات تحلیلی	۱/۵۱	۱/۸	۰/۵۵	۰/۴۴

در شکل ۱۹-۴ توزیع چگالی شار مغناطیسی بی‌باری زیر یک قطب بر حسب فاصله رسم شده است. محور عمودی چگالی شار مغناطیسی در مرکز فاصله هوایی بر حسب تسلا و محور افقی فاصله از محور عرضی بر حسب میلی‌متر است. از شکل ۱۹-۴ مشاهده می‌شود که مقدار ماکزیمم و متوسط چگالی شار در مرکز فاصله هوایی به ترتیب حدود ۰/۵۷ و ۰/۴۹ تسلا می‌باشد. در شکل ۲۰-۴ نیز مولفه عمودی توزیع چگالی شار مغناطیسی بی‌باری زیر دو قطب بر حسب فاصله بر حسب میلی‌متر تا محور عرضی نشان داده شده است.



شکل ۱۹-۴- توزیع چگالی شار مغناطیسی بی‌باری زیر یک قطب بر حسب فاصله تا محور عرضی ماشین TORUS-NS مورد مطالعه



شکل ۴-۲۰- مولفه عمودی چگالی شار مغناطیسی زیر دو قطب در بی‌باری در ماشین TORUS-NS مورد مطالعه

۴-۵- محاسبه مقاومت، اندوکتانس‌ها و راکتانس سنکرون ماشین TORUS-NS

همانطور که در بخش ۳-۴-۲ از فصل ۳ توضیح داده شد می‌توان مقاومت سیم‌پیچی سری هر فاز را به دست آورد. لذا داریم:

$$R = \frac{N_t l_{av} \rho_{cu, \theta}}{a_p a_w s_a} = \frac{66 \times 0.6811 \times 1.678 \times 10^{-8}}{1 \times 1 \times 45.252 \times 10^{-6}} = 0.0167 \, \Omega$$

برای به دست آوردن اندوکتانس‌های خودی و متقابل سیم‌پیچی‌های ماشین در شرایطی که یکی از فازهای ماشین دارای جریان نامی در حالی که دو فاز دیگر دارای جریان صفر می‌باشند محاسبات انجام می‌گیرد. نتایج حاصل از محاسبات اندوکتانس‌های خودی و متقابل به صورت زیر می‌باشد:

$$L = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.372262 & -0.15 & -0.15 \\ -0.15 & 0.372262 & -0.15 \\ -0.15 & -0.15 & 0.372262 \end{bmatrix} mH$$

همچنین مقدار راکتانس سنکرون ماشین به صورت زیر به دست می‌آید:

$$X_s = 2\pi f (L_{aa} - L_{ab}) = 2\pi(55)(0.372262 - (-0.15)) = 0.1804 \, \Omega$$

۴-۶- بهینه‌سازی ماشین شار محوری توپولوژی TORUS-NS

در ماشین‌های شار محوری نسبت قطر داخلی به قطر خارجی هسته، λ ، و چگالی شار فاصله هوایی، B_g ، پارامترهای مهم طراحی هستند که تاثیر قابل توجهی بر روی مشخصات ماشین مانند گشتاور، چگالی گشتاور و راندمان دارند. بنابراین به منظور بهینه‌سازی عملکرد ماشین شار محوری نسبت λ و چگالی شار فاصله هوایی B_g باید به دقت انتخاب شوند.

یکی از مشخصات مهم این ماشین چگالی توان است. در شکل ۴-۲ چگالی توان به صورت تابعی از چگالی شار فاصله هوایی B_g و نسبت λ برای ماشین شار محوری توپولوژی TORUS-NS نشان داده شده است. از این منحنی مشاهده می‌شود که چگالی توان (یا چگالی گشتاور) ماکزیمم $P_{d,max} = 2.772 [W / Cm^3]$ در چگالی شار فاصله هوایی $B_g = 0.37 [T]$ و نسبت قطر $\lambda = 0.4$ رخ می‌دهد. راندمان در این نقطه $\eta = 0.95$ است. در جدول ۴-۸ پارامترهای طراحی بهینه ماشین شار محوری توپولوژی TORUS-NS در نقطه چگالی توان ماکزیمم آمده است.

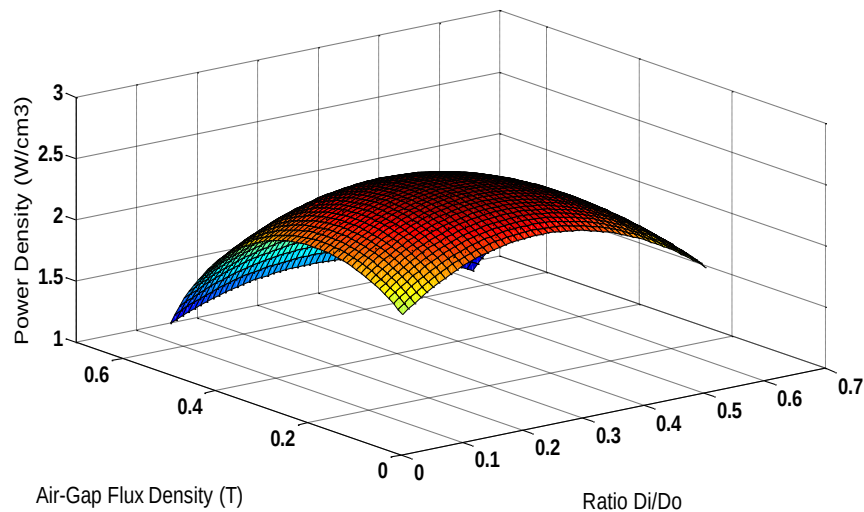
جدول ۴-۸- بهینه‌سازی ماشین TORUS-NS برای چگالی توان ماکزیمم

$P_{d,max} = 2.772 [W / Cm^3]$	چگالی توان ماکزیمم
$\lambda = 0.4$	نسبت قطر (λ) در نقطه چگالی توان ماکزیمم
$B_g = 0.37 [T]$	چگالی شار فاصله هوایی در نقطه چگالی توان ماکزیمم
$\eta = 0.95$	راندمان در نقطه چگالی توان ماکزیمم

به علاوه شکل ۴-۲۲ نمای دو بعدی چگالی توان (یا چگالی گشتاور) ماشین را به صورت تابعی از نسبت قطر (λ) نشان می‌دهد. از این منحنی می‌توان مشاهده نمود که مقدار چگالی توان ماکزیمم با تغییر

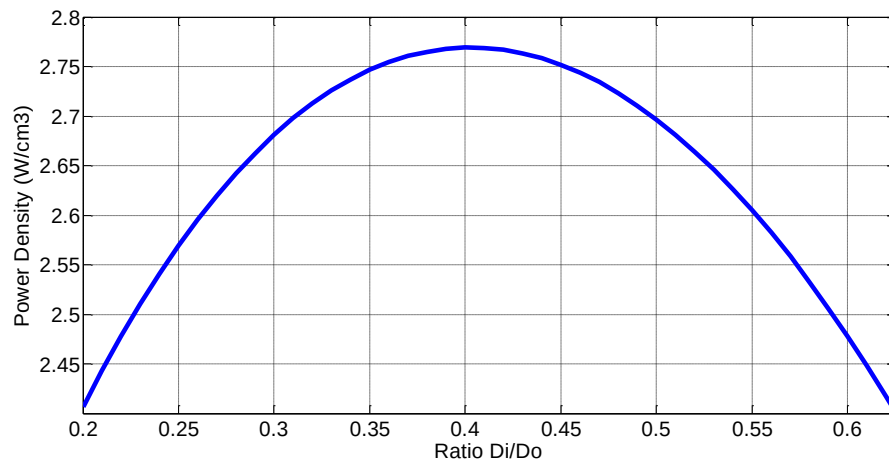
نسبت قطر (λ) تغییرات قابل ملاحظه‌ای دارد. همچنین از این منحنی مقدار چگالی توان ماکزیمم

به ازای نسبت قطر $\lambda = 0.4$ به دست می‌آید. $P_{d,max} = 2.772 [W / Cm^3]$



شکل ۴-۲۱- چگالی توان ماشین TORUS-NS به عنوان تابعی از چگالی شار فاصله هوایی (B_g) و نسبت قطر (λ)

$$(P_R=500KW, n_s=300rpm, p=11, A=600A/cm, J_s=10A/mm^2)$$



شکل ۴-۲۲- نمای دو بعدی چگالی توان ماشین TORUS-NS به عنوان تابعی از نسبت قطر (λ)

$$(n_s=300rpm, p=11, A=600A/cm, B_g=0.35T, J_s=10A/mm^2)$$

فصل ۵

طراحی، ساخت و آزمایش یک نمونه
ماشین کوچک شار محوری آهنربای دائم

۵-۱- مقدمه

در این فصل طراحی، ساخت و آزمایش یک نمونه ماشین TORUS-NS کوچک با مشخصات ۱۵ وات، ۶۰۰ دور بر دقیقه و فرکانس ۵۰ هرتز انجام گرفته است. طراحی ماشین با استفاده از الگوریتم طراحی ارائه شده در فصل ۳ انجام گرفته است و ابعاد و پارامترهای اساسی ماشین به دست آمده‌اند. پس از طراحی، نقشه‌های مهندسی این ماشین در محیط نرم افزار SolidWork ترسیم شده و در نهایت با استفاده از این نقشه‌ها و تهیه مواد اولیه مورد نیاز این ماشین ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفت. ساختار کلی این ماشین شامل یک هسته استاتور مارپیچ و سیم پیچی سه فاز حلقوی^۱ قرار گرفته بر روی آن، دو روتور دیسکی شکل مشابه و هر کدام شامل ۱۰ آهنربای دائم تعبیه شده در سطح یک فولاد یکپارچه، پایه‌های نگهدارنده استاتور، محور، یاتاقان‌ها و درپوش‌ها می‌باشد.

۵-۲- جزئیات طرح و نقشه اجزاء ماشین

در این بخش جزئیات طرح و نقشه‌های تهیه شده و همچنین نحوه ساخت هر کدام از اجزای ماشین به تفصیل شرح داده می‌شود.

۵-۲-۱- هسته استاتور

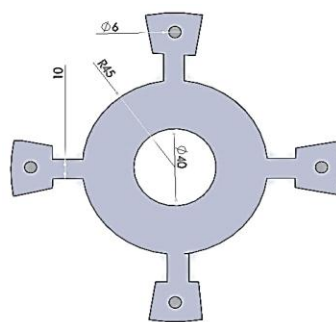
جزئیات طرح هسته استاتور با پایه‌های غیر مغناطیسی ماشین در شکل ۵-۱ نمایش داده شده است. برای ساخت هسته استاتور ابتدا یک ورق سیلیکون به صورت نوار باریک و بلند با عرض 10 mm برش داده شده و به صورت حلقوی پیچیده شده است تا به صورت یک استوانه توخالی با ارتفاع کوتاه درآید. ابتدا و انتهای ورق جوشکاری می‌شود تا ورق رُل شده باز نشود. حاصل این کار یک استوانه فولادی با

¹ Toroidal

ارتفاع 10 mm، شعاع داخلی 20 mm و شعاع بیرونی 45 mm می‌باشد. سپس هسته در قالبی مطابق شکل ۵-۲ قرار گرفته و قالب با ماده‌ای عایق، متشکل از پلی‌استر، گل اخرا و الیاف پشمی پُر می‌شود. بعد از قرار دادن آن به مدت ۴۸ ساعت در کوره با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده می‌شود. در نهایت هسته استاتور با چهار پایه عایق برای تثبیت و محکم نمودن آن در بخش ساکن در می‌آید. هسته استاتور ساخته شده در شکل ۵-۳ نشان داده شده است.



ب



الف

شکل ۵-۱- جزئیات طرح هسته استاتور و پایه‌ها (الف) نمای دو بعدی (ب) نمای سه بعدی



ب



الف

شکل ۵-۲- (الف) قالب ساخته شده برای استاتور (ب) هسته استاتور ساخته شده پس از قالب‌ریزی و نصب پایه‌ها

۵-۲-۲- سیم‌پیچی استاتور

برای سیم‌پیچی استاتور از سیم مسی لاکی با قطر 0.5 mm استفاده شده است. سیم‌پیچی استاتور شامل

۳۰ کلاف می‌باشد ($N_{coil} = m \times 2p = 3 \times 10 = 30$) که m تعداد فازها و $2p$ تعداد کل قطب‌های ماشین است) که هر کلاف آن دارای ۴۰ دور سیم می‌باشد. همچنین سیم استفاده شده برای هر کلاف حدود چهار متر می‌باشد. دو سر هر کلاف به صورت $x-x'$ نام‌گذاری شده است. بنابراین کلاف‌ها از 1-1' تا 30-30' نام‌گذاری شده است. در زیر نحوه اتصال سیم‌پیچ‌های هر فاز استاتور نمایش داده شده است.

فاز A: 1'-4' , 4-7 , 7'-10' , 10-13 , 13'-16' , 16-19 , 19'-22' , 22-25 , 25'-28' به عنوان دو سر خروجی فاز A می‌باشد. ۱ و ۲۸

فاز B: 3'-6' , 6-9 , 9'-12' , 12-15 , 15'-18' , 18-21 , 21'-24' , 24-27 , 27'-30'

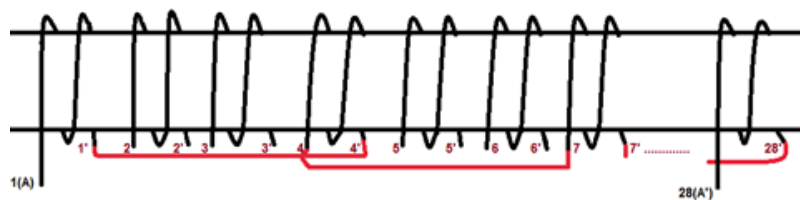
دو سر سیم شماره ۳ و ۳۰ به عنوان دو سر خروجی فاز B می‌باشد.

فاز C: 5'-8' , 8-11 , 11'-14' , 14-17 , 17'-20' , 20-23 , 23'-26' , 26-29 , 29'-2'

دو سر سیم شماره ۵ و ۲ به عنوان دو سر خروجی فاز C می‌باشد.

اتصال سیم‌پیچ‌های استاتور به صورت ستاره می‌باشد. بدین منظور سرهای ۲۸ و ۳۰ و ۲ به یکدیگر متصل می‌شود تا آرایش ستاره حاصل شود.

سر سیم‌های شماره ۱ و ۳ و ۵ به عنوان خروجی به ترتیب به فازهای A، B و C متصل می‌شوند. در شکل ۲-۴ قسمتی از نقشه سیم‌پیچی یکی از فازها نمایش داده شده است.

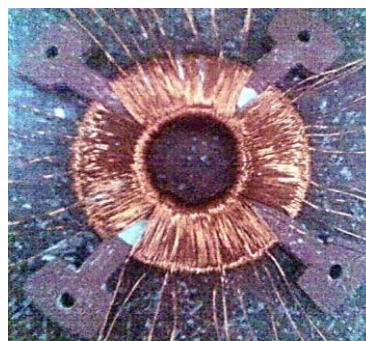


شکل ۵-۳- نقشه سیم‌پیچی فاز A

در شکل ۴-۵ الف استاتور سیم‌پیچی شده با ۳۰ کلاف و ۶۰ سر سیم مشاهده می‌شود. در ادامه سربندی استاتور برای سه فاز مطابق با توضیحات داده شده و نیز شکل ۳-۵ انجام می‌گیرد. در شکل ۴-۵ ب تصویر استاتور سیم‌پیچی شده، سربندی و لاک‌ریزی شده مشاهده می‌شود. پس از سربندی، استاتور شش سرسیم خروجی خواهد داشت که با بستن اتصال ستاره، سه سر سیم به عنوان نقطه مشترک به هم متصل می‌شوند و سه سر سیم جهت اتصال به شبکه، بیرون خواهند آمد. ضخامت استاتور ساخته شده پس از اتمام سیم‌پیچی، همان‌طور که در شکل ۴-۵ ب نشان داده شده است به 20 mm افزایش یافت.



ب



الف

شکل ۴-۵ الف) استاتور سیم‌پیچی شده با ۳۰ کلاف و ۶۰ سر سیم ب) تصویر استاتور بعد از سیم‌پیچی و سربندی آن

۵-۲-۳- روتور

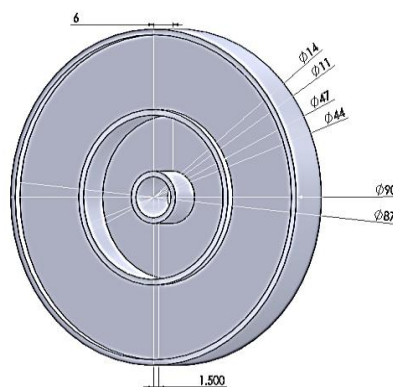
هسته آهنی (پشتی آهنی)^۱ روتورهای این ماشین از جنس فولاد VCN150 می‌باشد. شکل ۵-۵ الف جزئیات طرح یوغ روتورها را نشان می‌دهد. ضخامت یوغ روتورها 8 mm می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۵-۵ الف مشاهده می‌شود دو ردیف شیار در یوغ روتور وجود دارد. شیار داخلی جهت کاهش وزن روتور می‌باشد که 6 mm عمق دارد. شیار بیرونی دارای 21 mm عرض و 1.5 mm عمق می‌باشد و هدف از ایجاد آن قرار دادن آهن‌رباها درون آن جهت استحکام بیشتر می‌باشد. در شکل ۵-۵ ب عکس یکی از یوغ

¹ - Back-Iron

روتورهای ساخته شده مشاهده می‌شود. شکل ۵-۶ نیز عکس یکی از روتورهای ماشین را پس از قرار دادن آهنرباها درون شیار و پر کردن فضای بین آهنرباها با یک ماده غیر مغناطیس سخت نشان می‌دهد.



ب



الف

شکل ۵-۵- الف) جزئیات طرح یوغ روتورها ب) تصویر یکی از یوغ روتورهای ساخته شده



ب



الف

شکل ۵-۶- عکس یکی از روتورها پس از قرار دادن آهنرباها بر روی آن. الف- نمای دو بعدی ب- نمای سه بعدی

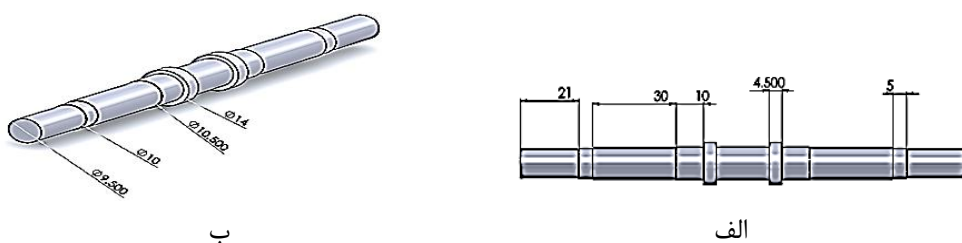
همان‌طور که در شکل ۵-۷ مشاهده می‌شود آهنرباهای استفاده شده دارای ابعاد $10\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ می‌باشند و در جهت عمود بر سطح جانبی بزرگ‌تر مغناطیس شده‌اند. پس از جایگذاری آهنرباها ضخامت روتور به 11.5 mm افزایش یافته است. در شکل ۲-۸ هیچ یک از آهنرباهای مجاور دارای قطب‌های یکسان نمی‌باشند. فضای بین آهنرباها از مخلوط سیمان و پودر سنگ جهت ثابت نگه داشتن موقعیت آهنرباها استفاده شده است.



شکل ۵-۷- تصویر یکی از آهن‌ریزهای ماشین (دارای ابعاد $10\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 5\text{ mm}$)

۵-۲-۴- شفت (محور)

در شکل ۵-۸ جزئیات طرح شفت استفاده شده در این ماشین به صورت دو بعدی و سه بعدی مشاهده می‌شود. جهت حفظ فاصله هوایی متقارن بین استاتور سیم‌پیچی شده و دیسک‌های روتور از هر دو طرف به اندازه 1 mm ، از دو پله در وسط شفت استفاده شده است که در صورت قرار دادن قطعات در کنار یکدیگر این فاصله هوایی ایجاد خواهد شد.



شکل ۵-۸- جزئیات طرح شفت. الف- نمای دو بعدی ب- نمای سه بعدی

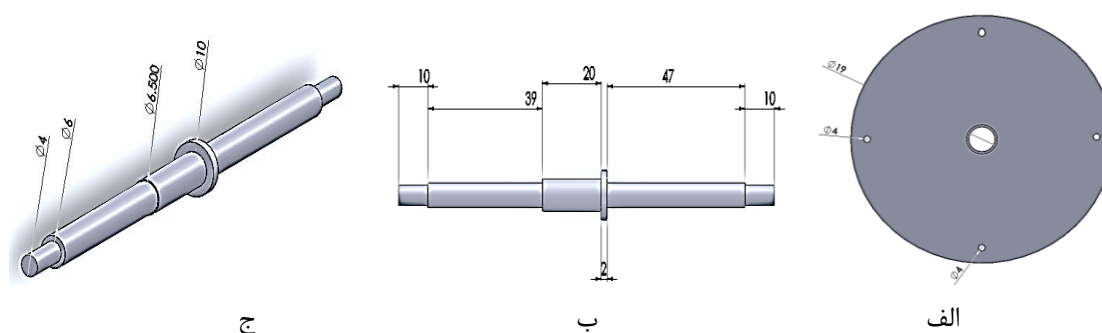
در شکل ۵-۹ شفت ساخته شده از جنس فولاد نشان داده شده است. سوراخ تعبیه شده بر روی شفت به این دلیل است که پس از قرار دادن روتور بر روی شفت یک خار (پین) در سوراخ قرار گیرد تا از جابجایی روتور جلوگیری کرده و روتور را در جای خود ثابت و محکم نگه دارد.



شکل ۵-۹- تصویر شفت ساخته شده از جنس فولاد

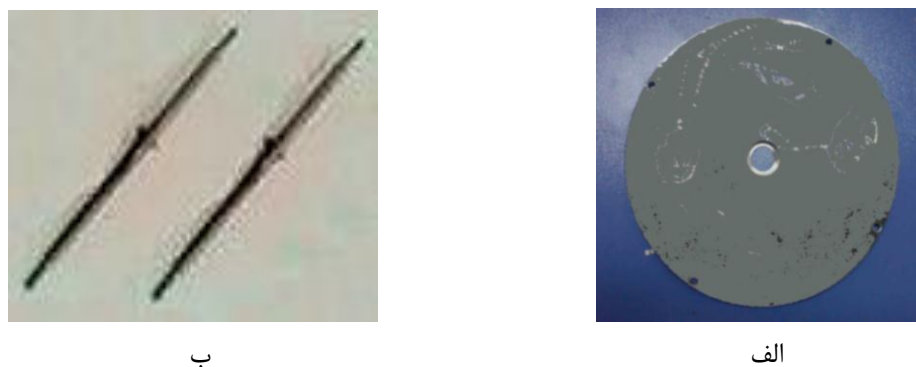
۵-۲-۵- نگه‌دارنده‌ها

جهت ثابت نگه داشتن روتور و استاتور از ۴ پایه و ۲ صفحه آهنی به ضخامت 6 mm استفاده شده است. در وسط صفحات سوراخی به قطر 10 mm جهت عبور شفت تعبیه شده است. همچنین جهت ثابت نگه داشتن موقعیت بلبرینگ‌ها حفره‌ای به قطر 20 mm و عمق 5 mm در وسط صفحات تعبیه شده است. جزئیات طرح صفحات و پایه‌های نگه‌دارنده در شکل ۵-۱۰ مشاهده می‌شود.



شکل ۵-۱۰- جزئیات طرح نگه‌دارنده‌ها. الف- صفحه نگه‌دارنده ب- نمای دو بعدی پایه نگه‌دارنده ج- نمای سه بعدی پایه نگه‌دارنده

در شکل ۵-۱۱ تصویر صفحات و پایه‌های نگه‌دارنده ساخته شده مشاهده می‌شود.



شکل ۵-۱۱- عکس نگه‌دارنده‌ها. الف- صفحه نگه‌دارنده ب- پایه‌های نگه‌دارنده

۵-۲-۶- بلبرینگ

به منظور چرخش روتور از ۲ عدد بلبرینگ با ابعاد $10 \times 20 \times 5$ در شیارهای ایجاد شده در صفحات نگه‌دارنده استفاده شده است که دو سر شفت درون آن‌ها قرار گرفته و باعث چرخش نرم روتور می‌شود. در شکل ۵-۱۲ تصویر یکی از بلبرینگ‌ها مشاهده می‌شود.



شکل ۵-۱۲- تصویر بلبرینگ استفاده شده در ماشین

۵-۲-۷- ماشین مونتاز شده

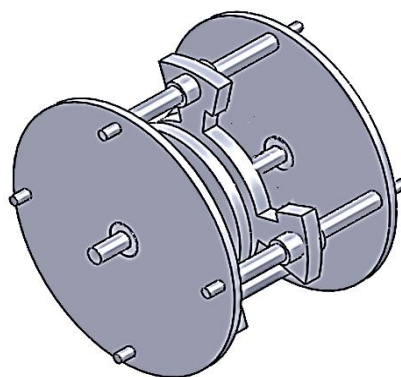
مشخصات نامی ماشین مربوطه به صورت زیر است:

- | | |
|-----------------|-----------------------|
| $P_R = 15$ [W] | - توان خروجی نامی |
| $m = 3$ | - تعداد فازها |
| $f = 50$ [Hz] | - فرکانس |
| $n = 600$ [RPM] | - سرعت نامی موتور |
| $V = 15$ [V] | - مقدار موثر ولتاژ خط |
| $2p = 10$ | - تعداد قطب‌ها |

در شکل ۵-۱۳ طرح کلی ماشین و در شکل ۵-۱۴ نمای کلی ماشین ساخته شده با دو دیسک روتور نمایش داده شده است.



ب



الف

شکل ۵-۱۳- الف- طرح کلی ماشین مورد نظر ب- تصویر کامل ماشین ساخته شده

۵-۳- آزمایشات

پس از مونتاژ کامل ماشین و فراهم آوردن مقدمات لازم در این بخش به آزمایش ماشین پرداخته می-شود. لازم به ذکر است که در این قسمت جهت مقایسه، ماشین با یک و دو دیسک روتور و همچنین در دو حالت مولدی و موتوری مورد آزمایش قرار می گیرد.

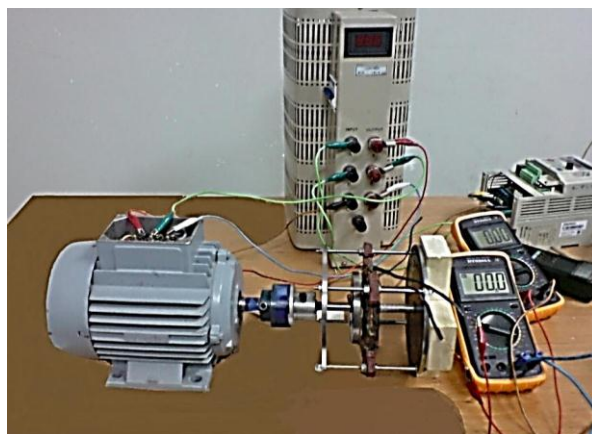
۵-۳-۱- ماشین با یک دیسک روتور

برای آزمایش ماشین با یک دیسک روتور همچنین می توان به منظور تعادل ماشین به جای یکی از روتورهای دارای آهنرباهای دائم از یک هسته روتور، تنها با این تفاوت که فاقد آهنرباهای دائم است استفاده نمود.

۵-۳-۱-۱- حالت مولدی

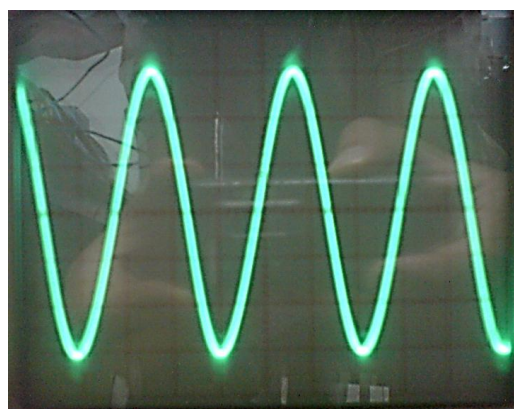
مطابق شکل ۵-۱۴ ماشین مورد نظر با یک موتور الکتریکی که توسط یک اینورتر که فرکانس آن روی ۲۰ هرتز تنظیم شده و ولتاژ اعمالی به آن برای دستیابی به سرعت ثابت ۶۰۰ دور بر دقیقه توسط یک

اتوترانسفورماتور کنترل می‌شود کوپل مکانیکی شده است. با به حرکت در آوردن موتور، ماشین مورد نظر به چرخش در می‌آید و در سیم پیچ‌های استاتور آن ولتاژ القا می‌شود.



شکل ۵-۱۴- آزمایش حالت مولدی

شکل موج ولتاژ القایی در سیم‌پیچ‌های استاتور (ولتاژ خط) که توسط اسیلوسکوپ مشاهده می‌گردد، مطابق شکل ۵-۱۵ می‌باشد. در شکل ۵-۱۵ پیک ولتاژ $9V$ و فرکانس آن $f = 50Hz$ می‌باشد و شکل موج حاصله بسیار خالص بوده و اعوجاج قابل توجهی ندارد.



شکل ۵-۱۵- شکل موج ولتاژ خروجی در حالت مولدی

در یک مرحله دیگر از آزمایش با اتصال یک بار مقاومتی با قابلیت تغییر آن در هر مرحله از آزمایش و اندازه گیری ولتاژ و جریان خروجی در هر مرحله نتایج حاصل از آزمایش در جدول ۵-۱ یادداشت می‌شود.

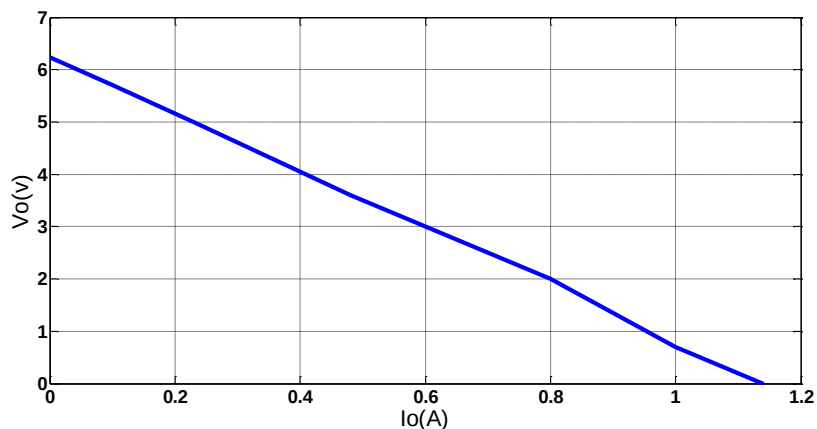
جدول ۵-۱- نتایج حاصل از آزمایش در حالت مولدی

مراحل آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
I_{out}	۰	۰/۱	۰/۲۳	۰/۴۸	۰/۸	۱	۱/۱۴
V_{out}	۶/۲۳	۵/۷	۵/۰	۳/۶	۲	۰/۷	۰
P_{in}	۰	۱/۰۷	۲/۴۳	۴/۹۲	۸/۱۴	۹/۶۱	–
P_o	۰	۰/۹۸	۱/۹۹	۲/۹۹	۲/۷۷	۱/۲۱	۰
$\eta(\%)$	۰	۹۲	۸۱/۷۶	۶۰/۷۳	۳۴/۰۱	۱۲/۶۱	–

۵-۳-۱-۱-۱- مشخصه ولتاژ-جریان ماشین در حالت مولدی

با استفاده از نتایج آزمایش بدست آمده در بخش قبل که در جدول ۵-۱ درج شده است منحنی مشخصه

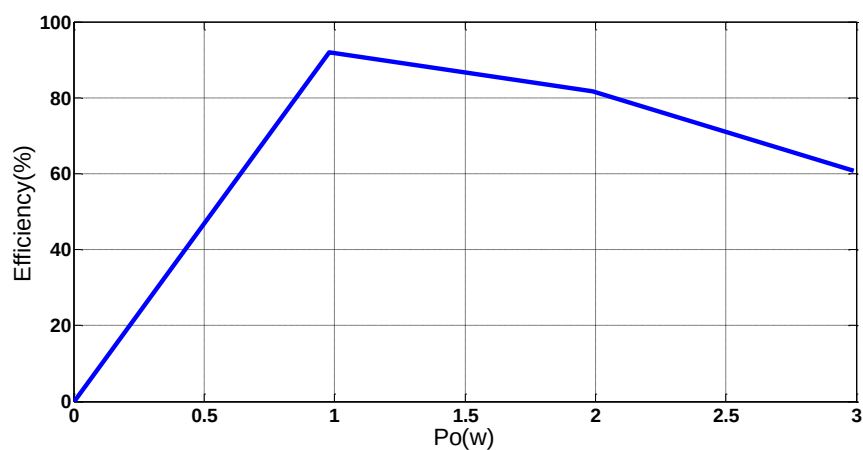
ولتاژ-جریان ماشین به صورت شکل ۵-۱۶ به دست می‌آید.



شکل ۵-۱۶- مشخصه ولتاژ-جریان در حالت مولدی

۵-۳-۱-۱-۲- مشخصه راندمان-توان ماشین در حالت مولدی

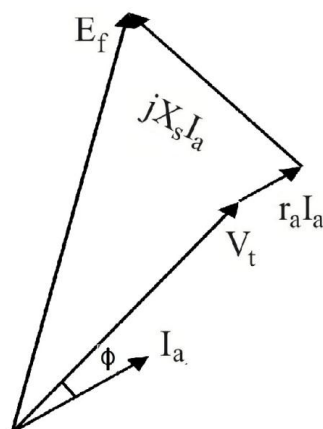
در شکل ۴-۳ مشخصه راندمان-توان در حالت مولدی مشاهده می‌شود.



شکل ۵-۱۷- مشخصه راندمان-توان در حالت مولدی

۵-۳-۱-۱-۳- راکتانس سنکرون ماشین در حالت مولدی با یک دیسک روتور

دیاگرام برداری ماشین سنکرون در حالت مولدی پس فاز، به صورت شکل ۵-۱۸ می باشد:



شکل ۵-۱۸- دیاگرام برداری مولدی پس فاز

مطابق شکل ۵-۱۸ داریم:

$$E_f^2 = (V_t \cos(\phi) + r_a I_a)^2 + (X_s I_a + V_t \sin(\phi))^2 \quad (۱-۵)$$

بنابراین داریم:

$$X_s = \left[(E_f^2 - (V_t \cos(\phi) + r_a I_a)^2)^{0.5} - V_t \sin(\phi) \right] / I_a \quad (۲-۵)$$

از نتایج جدول ۵-۱ و توضیحات فوق راکتانس سنکرون در حالت مولدی به صورت جدول ۵-۲ به دست می‌آید.

جدول ۵-۲- راکتانس سنکرون ماشین (مولدی)

مراحل آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
$X_s(\Omega)$	۱/۴	۱/۴۴	۱/۴۳	۱/۴۷	۱/۴۵	۱/۴۶	۱/۴۲
$R_a(\Omega)$	۲/۸	۲/۸	۲/۸	۲/۸	۲/۸	۲/۸	۲/۸

۵-۳-۱-۲- حالت موتوری

در این حالت سیم پیچ استاتور را به منظور توانایی کنترل فرکانس و ولتاژ توسط یک اینورتر که فرکانس آن روی ۵۰ هرتز تنظیم شده است و یک اتو ترانسفورماتور سه فاز تغذیه می‌کنیم. ولتاژ اعمالی را در ۱۳ ولت ثابت کرده و به خط اعمال می‌کنیم و روی شفت بار اعمال کردیم. بار اعمال شده را به صورت پله‌ای افزایش داده و نتایج حاصل در جدول ۵-۳ آورده شده است. سپس از رابطه‌ی زیر توان خروجی و تلفات آهن را بدست می‌آوریم که در آن P_{in} توان ورودی می‌باشد.

$$P_{out} = P_{in} - (P_{Fe} + P_{fr} + 3r_a I_a^2) \quad (۵-۳)$$

جدول ۵-۳- نتایج حاصل از آزمایش در حالت موتوری

مراحل بارگذاری	۱	۲	۳	۴	۵	۶
$V_{L_{in}}$	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰	۱۰
I_{in}	۱/۱۲	۰/۹۱	۰/۸۳	۰/۷۷	۰/۷۳	۰/۶۹
$\cos\varphi$	۰/۷۵	۰/۷۹	۰/۸۶	۰/۸۴	۰/۹	۰/۹۵
P_{in}	۱۴/۶	۱۲/۵	۱۲/۱۳	۱۱/۶۱	۱۱/۴۲	۱۱/۴
P_o	۳/۹	۵/۴۸	۶/۲۹	۶/۵	۶/۹	۷/۳
$\eta(\%)$	۲۷	۴۳/۵	۵۱/۸	۵۶	۶۰	۶۴

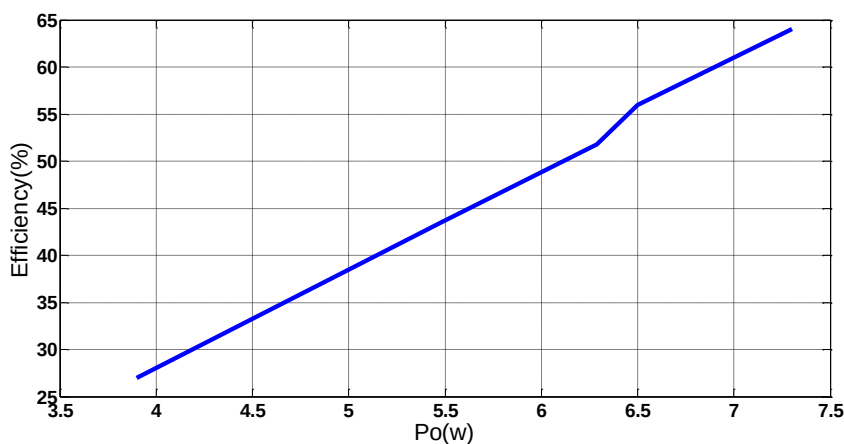
برای به دست آوردن توان خروجی در هر مرحله از آزمایش باید مجموع تلفات آهنی، اصطکاک و تلفات اهمی سیم‌پیچی استاتور را از توان ورودی به موتور کم نمود. پس می‌توان نوشت:

$$P_{out} = P_{in} - (P_{Fe} + P_{fr} + P_{cu}) \quad (4-5)$$

از آن جایی که در طی مراحل آزمایش ولتاژ و سرعت ثابت است، مجموع تلفات آهنی و اصطکاک تقریباً بدون تغییر باقی می‌ماند ولی تلفات مسی با تغییر جریان در حال تغییر است. در هر مرحله آزمایش با افزودن بار روی موتور با توجه به اینکه سرعت ثابت است گشتاور افزایش می‌یابد و به تبع آن مطابق رابطه $P_{out} = T.\omega$ توان خروجی نیز افزایش می‌یابد که مطابق رابطه ۴-۵ این امر مستلزم کاهش $P_{cu} = RI^2$ است و چون مقاومت سیم‌پیچ‌ها ثابت است لذا باید جریان ورودی کاهش یابد که منجر به افزایش ضریب توان می‌شود.

۵-۳-۱-۲-۱- مشخصه راندمان-توان ماشین در حالت موتوری

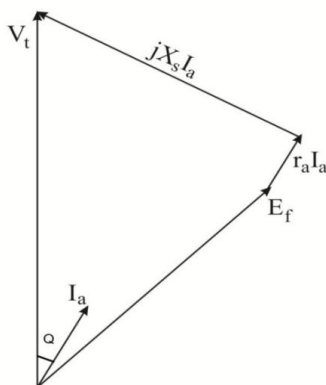
در شکل ۵-۱۹ مشخصه راندمان-توان در حالت موتوری مشاهده می‌شود.



شکل ۵-۱۹- مشخصه راندمان-توان در حالت موتوری

۵-۳-۱-۲- راکتانس سنکرون ماشین در حالت موتوری با یک دیسک روتور

دیاگرام برداری ماشین سنکرون در حالت موتوری پس فاز، به صورت شکل ۵-۲۰ می باشد



شکل ۵-۲۰- دیاگرام برداری موتور پس فاز

مطابق شکل ۵-۲۰ داریم:

$$E_f^2 = (V_t \cos(\phi) - r_a I_a)^2 + (X_s I_a - V_t \sin(\phi))^2 \quad (۵-۵)$$

بنابراین داریم:

$$X_s = \left[(E_f^2 - (V_t \cos(\phi) - r_a I_a)^2)^{0.5} + V_t \sin(\phi) \right] / I_a \quad (۶-۵)$$

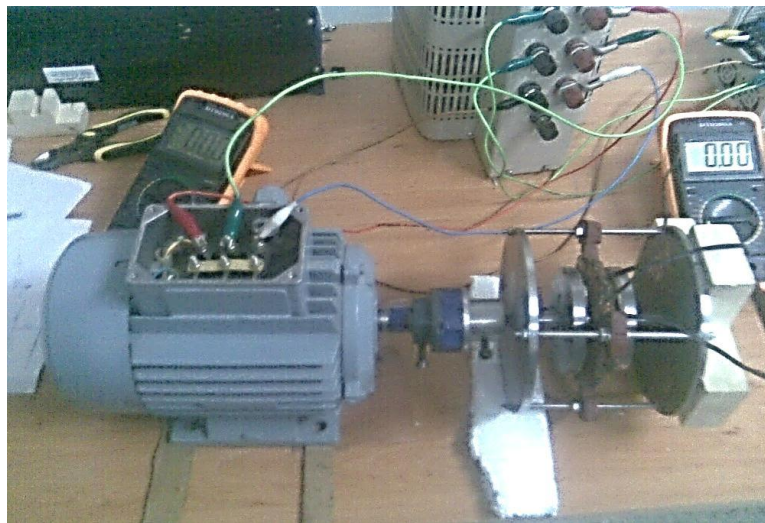
از رابطه فوق و نتایج حاصل از آزمایش موتوری که در جدول ۵-۳ مشاهده می شود، راکتانس سنکرون ماشین مقدار ۱/۵ اهم بدست می آید.

۵-۳-۲- ماشین با دو دیسک روتور

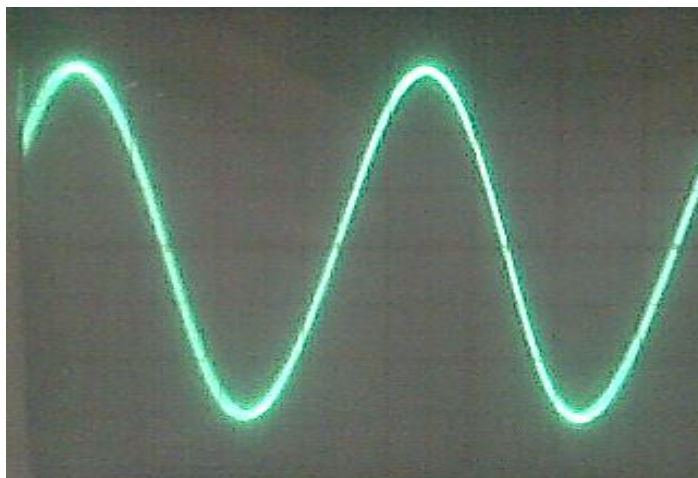
در این حالت ماشین با دو دیسک روتور و یک استاتور سیم پیچی شده، که طرح اصلی ساخت ماشین است، مانند آزمایش های قبلی ماشین در دو حالت مولدی و موتوری مورد آزمایش قرار می گیرند.

۵-۳-۲-۱- حالت مولدی

در حالت آزمایش مولدی مطابق شکل ۵-۲۱ محور ماشین با محور یک موتور کوپل شده و توسط آن با سرعت سنکرون (600 rpm) چرخانده می‌شود. در این آزمایش ژنراتور با سرعت سنکرون چرخانده شده و ولتاژ خط خروجی بر روی صفحه اسیلوسکوپ به صورت شکل ۵-۲۲ است.



شکل ۵-۲۱- شکل اتصالات ماشین با دو دیسک روتور



شکل ۵-۲۲- شکل موج ولتاژ خروجی در حالت مولدی با دو دیسک روتور

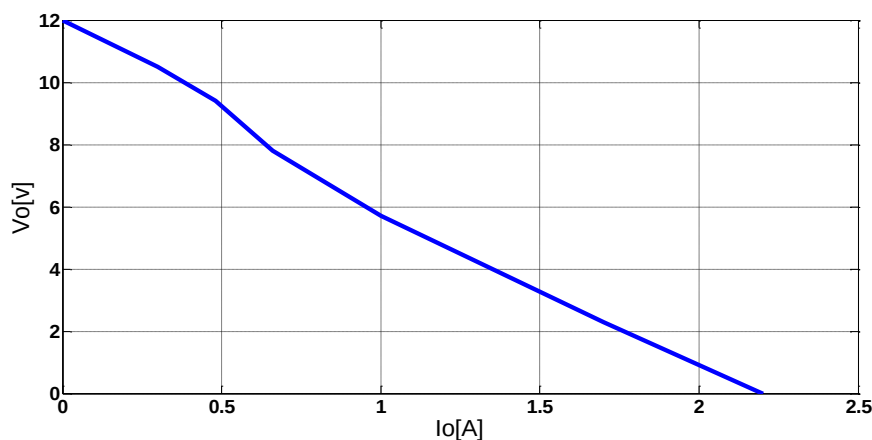
در مرحله دیگر از آزمایش حالت مولدی با استفاده از یک بار مقاومتی در رنج‌های مختلف و اندازه‌گیری ولتاژ و جریان خروجی در هر مرحله جدول ۴-۵ کامل می‌شود.

جدول ۴-۵- نتایج حاصل از آزمایش در حالت مولدی

مراحل آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵	۶
I_{out}	۰	۰/۳	۰/۴۸	۰/۶۶	۱/۰	۲/۲
V_{out}	۱۲	۱۰/۵	۹/۴	۷/۸	۵/۷	۰
P_{in}	۰	۶/۲۲	۹/۷۵	۱۲/۵۷	۱۸/۲۷	–
P_o	۰	۵/۴۵	۷/۸	۸/۹۱	۹/۸۷	۰
$\eta(\%)$	۰	۸۷	۸۰/۱۵	۷۰/۹	۵۴	–

۵-۳-۲-۱- مشخصه ولتاژ-جریان ماشین در حالت مولدی

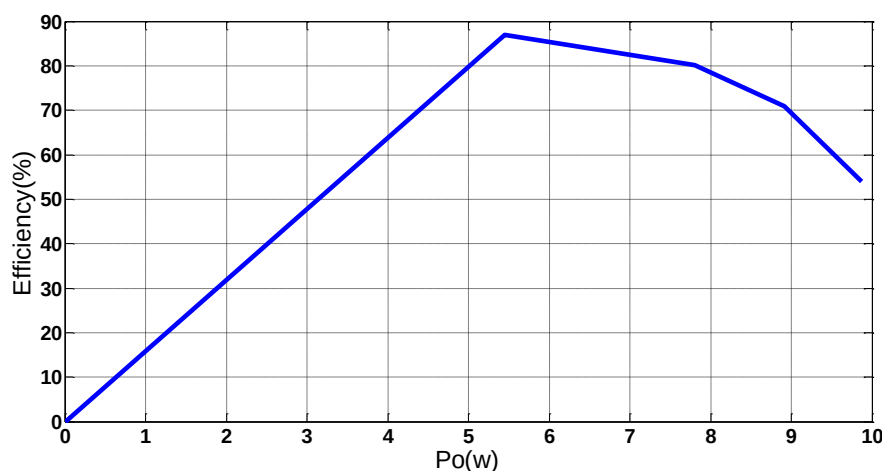
با استفاده از نتایج آزمایش بدست آمده که در جدول ۴-۵ درج شده است منحنی مشخصه ولتاژ-جریان ماشین به صورت شکل ۵-۲۳ به دست می‌آید.



شکل ۵-۲۳- مشخصه ولتاژ-جریان در حالت مولدی

۵-۳-۲-۱- مشخصه راندمان-توان ماشین در حالت مولدی

در شکل ۵-۲۴ مشخصه راندمان-توان در حالت مولدی مشاهده می‌شود.



شکل ۵-۲۴- مشخصه راندمان-توان در حالت مولدی

۵-۳-۲-۱-۳- راکتانس سنکرون ماشین در حالت مولدی با دو دیسک روتور

از نتایج جدول ۵-۴ و توضیحات بخش ۵-۳-۱-۱-۳ راکتانس سنکرون در حالت مولدی با دو دیسک روتور، مقدار راکتانس سنکرون $1/5$ اهم به دست می‌آید.

۵-۳-۲-۲- حالت موتور

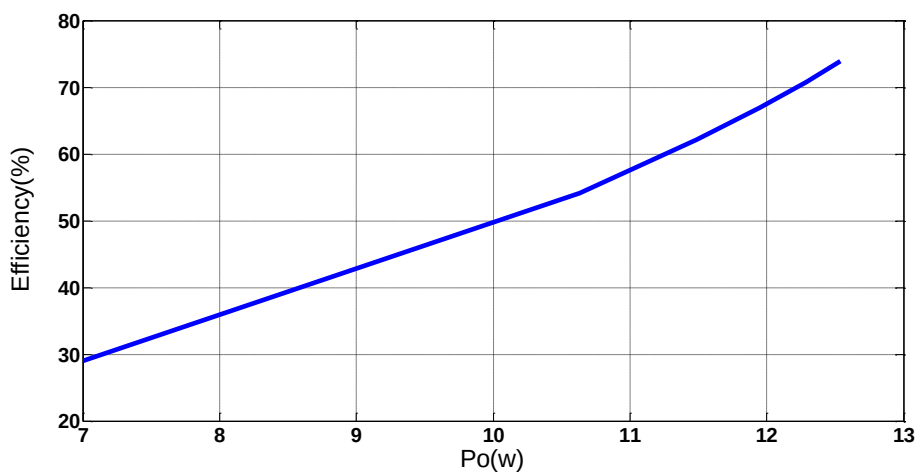
در این قسمت مطابق با توضیحات داده شده در بخش ۵-۳-۱-۲ آزمایش ماشین با دو دیسک روتور صورت می‌گیرد. نتایج حاصل از آزمایش در جدول ۵-۵ یادداشت شده‌اند.

جدول ۵-۵- نتایج حاصل از آزمایش در حالت موتوری

مراحل بارگذاری	۱	۲	۳	۴	۵	۶
V_{in}	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵	۱۵
I_{in}	۱/۴۱	۱/۰۳	۰/۹۱	۰/۸۳	۰/۷۷	۰/۷۲
$\cos\phi$	۰/۶۵	۰/۷۳	۰/۷۸	۰/۸۲	۰/۸۶	۰/۹
P_{in}	۲۳/۸۴	۱۹/۶۲	۱۸/۴۹	۱۷/۸۶	۱۷/۳۷	۱۶/۹۷
P_o	۷	۱۰/۶۳	۱۱/۴۹	۱۱/۹۵	۱۲/۲۹	۱۲/۵۴
$\eta(\%)$	۲۹	۵۴/۱۸	۶۲/۱۶	۶۶/۹۳	۷۰/۷۶	۷۳/۹۲

۵-۳-۲-۱- مشخصه راندمان-توان ماشین در حالت موتوری

در شکل ۵-۲۵ مشخصه راندمان-توان در حالت موتوری مشاهده می‌شود.



شکل ۵-۲۵- مشخصه راندمان-توان در حالت موتوری

۵-۳-۲-۲- راکتانس سنکرون ماشین در حالت موتوری با دو دیسک روتور

از نتایج جدول ۵-۵ و توضیحات بخش ۵-۳-۱-۲-۲ راکتانس سنکرون در حالت موتوری با دو دیسک

روتور نیز مقدار $1/4$ اهم به دست می‌آید.

فصل ۶

نتیجه‌گیری

در این فصل به عنوان فصل پایانی، به جمع‌بندی مطالب و بیان کارهای انجام شده در این پایان‌نامه پرداخته می‌شود. همچنین در ادامه پیشنهاداتی جهت کارهایی که در آینده در مورد این موضوع می‌تواند مورد تحقیق قرار بگیرد ارائه می‌گردد.

۶-۲- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این پایان‌نامه موضوع ماشین‌های شار محوری آهن‌ربای دائم (AFPM) ابتدا با بیان تاریخچه گسترش این ماشین‌ها و سپس ویژگی‌ها، مزایا و معایب کلی و کاربردهای این ماشین‌ها آغاز گردید. پس از این مقدمه مقایسه این ماشین‌ها با ماشین‌های شار شعاعی آهن‌ربای دائم (RFPM) صورت گرفت. در ادامه انواع توپولوژی‌ها و ساختارهای متفاوت این ماشین‌ها ارائه گردید و سپس با بررسی شکل ساختاری، مزایا و معایب هر ساختار مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. در پایان این بررسی‌ها، یک ساختار مناسب با ذکر دلایل کافی برای کاربرد سرعت پایین که به عنوان نمونه در یک موتور زیردریایی مورد استفاده قرار می‌گیرد انتخاب گردید. بر این اساس ساختار دو وجهی TORUS-NS به عنوان گزینه مناسب انتخاب گردید. روابط مورد نیاز جهت طراحی ماشین TORUS-NS جمع‌آوری و لیست شدند. منابع مختلف جهت رسیدن به یک الگوریتم طراحی دقیق و مناسب با هم مقایسه و تحلیل شدند و برای تعیین بعضی از پارامترهای اختیاری و تجربی در روابط به نمونه‌های طراحی مختلف در مراجع معتبر مراجعه شد. پس از بررسی و مقایسه و تحلیل این پارامترها مقادیر مناسب جهت طراحی انتخاب گردیدند. پس از کامل شدن الگوریتم طراحی اولیه پارامترهای یک نمونه ماشین ساخته شده در یکی از مراجع توسط این الگوریتم طراحی مورد بررسی و تحلیل قرار گرفت تا نتایج آن بررسی گردد. با انجام این کار صحت و دقت الگوریتم طراحی تأیید گردید. پس از آن جهت اعتبار سنجی مجدد طراحی انجام شده به روش تحلیل اجزاء

محدود (Finite Element Methode)، مدل ماشین در محیط دو بعدی نرم افزار 14 Maxwell ترسیم و شبیه سازی آن انجام گرفت. پس از به دست آمدن نتایج شبیه سازی و بررسی و مقایسه آن معلوم گردید که الگوریتم طراحی اولیه از دقت نسبتاً بالایی برخوردار است. پس از طراحی اولیه و به دست آمدن پارامترهای اساسی ماشین با توجه به این که ضریب نسبت قطر، λ ، و مقدار چگالی شار فاصله هوایی، B_g ، بر روی پارامترهای ماشین تأثیر بسزایی دارند بهینه سازی ماشین جهت دستیابی به چگالی توان ماکزیمم که یکی از اهداف بهینه سازی است به ازای نسبت قطر، λ ، و چگالی شار فاصله هوایی، B_g ، انجام گرفت و مقادیر بهینه این کمیت ها برای دستیابی به مقدار چگالی توان ماکزیمم به دست آمدند. در ادامه یک ماشین کوچک TORUS-NS نمونه اولیه طراحی و ساخته شد. آزمایش های مختلف بر روی این ماشین در آزمایشگاه ماشین مخصوص دانشگاه صنعتی شاهرود انجام گرفت و نتایج آن ثبت گردید. از جمله پارامترهای ماشین، راکتانس سنکرون ماشین بود که محاسبه گردید. ضمناً ساخت این ماشین به عنوان اختراع در اداره ثبت اختراعات و مالکیت صنعتی با عنوان "ماشین سه فاز سنکرون شار محوری مغناطیس دائم با استاتور بدون شیار" با شماره ثبت ۷۳۳۲۰ - ۱۳۹۰/۱۰/۱۷ ثبت گردید.

۳-۶- پیشنهادات

از آنجایی که در زمینه ماشین های AFPM هنوز جای کار و تحقیق بسیار فراوان است در این بخش پیشنهاداتی جهت ادامه کار در آینده در رابطه با ماشین TORUS-NS برای پژوهشگران و محققینی که علاقمند به کار و تحقیق بیشتر در این زمینه هستند ارائه می گردد که عبارتند از:

۱- بررسی و تحلیل حالت گذرای ماشین و منظور نمودن درایو (تجهیزات الکترونیک قدرت)

۲- بررسی و مطالعه تحلیل حرارتی ماشین به روش FE و به تبع آن طراحی سیستم های خنک سازی

مناسب به منظور بالا بردن سطح عملکردی ماشین

۳- بررسی تلفات جریان گردابی در آهن‌رباهای دائم، تلفات آهن و تلفات روتور

۴- تعریف توابع هدف دقیق و بهینه‌سازی ماشین به روش‌های دیگر

۵- بررسی محدودیت‌های مکانیکی و منظور نمودن آن در طراحی ماشین

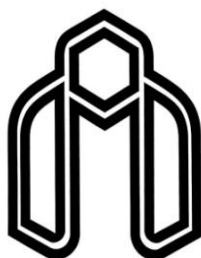
- [1] A. Bellara, Y. Amara, G. Barakat and P. Reghem , “Analytical Modeling of the Magnetic Field in Axial Flux Permanent Magnet Machines with Semi-Closed Slots at No Load” XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, Rome.
- [2] Fabrizio Marignetti, Giovanni Tomassi, Piergiacomo Cancelliere, Vincenzo Delli Colli, Roberto Di Stefano, Maurizio Scarano , “Electromagnetic and Mechanical design of a Fractional-slot-windings Axial-flux PM synchronous machine with Soft Magnetic Compound Stator”, Industry Applications Conference, 2006. 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE.
- [3] A. Parviainen, J. Pyrhönen, M. Niemelä, “AXIAL FLUX INTERIOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR WITH SINUSOIDALLY SHAPED MAGNETS” ISEF 2001 - 10th International Symposium on Electromagnetic Fields in Electrical Engineering Cracow, Poland, September 20-22, 2001.
- [4] Jacek F. Gieras, Rong-Jie Wang and Maarten J. Kamper, "Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines", Publisher: Springer; Second edition, 2008.
- [5] M. Aydin, S. Huang and T. A. Lipo, “Axial Flux Permanent Magnet Disc Machines: A Review”, Research Report, University of Wisconsin-Madison 2004.
- [6] Funda Sahin, “DESIGN AND DEVELOPMENT OF A HIGH-SPEED AXIAL-FLUX PERMANENT- MAGNET MACHINE”, PhD thesis, Technische Universiteit Eindhoven, 2001.
- [7] Janne Kinnunen, “DIRECT-ON-LINE AXIAL FLUX PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR STATIC AND DYNAMIC PERFORMANCE”, PhD thesis, Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland, 2007.
- [8] Asko Parviainen, “DESIGN OF AXIAL-FLUX PERMANENT-MAGNET LOW-SPEED MACHINES AND PERFORMANCE COMPARISON BETWEEN RADIAL-FLUX AND AXIAL-FLUX MACHINES” , PhD thesis, Lappeenranta University of Technology, Lappeenranta, Finland, 2005.
- [9] Metin Aydin, Surong Huang, Thomas A. Lipo, “A New Axial Flux Surface Mounted Permanent Magnet Machine Capable of Field Control”. Industry Applications Conference, 2002. 37th IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2002 IEEE
- [10] M. Aydin, S. Huang and T. A. Lipo, “Optimum Design and 3D Finite Element Analysis of Non-slotted and Slotted Internal Rotor Type Axial Flux PM Disc Machines”, Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2001.
- [11] S. Huang, M. Aydin, and T. A. Lipo, “Comparison of (Non-Slotted and Slotted) Surface Mounted PM Motors and Axial Flux Motors for Submarine ship Drives”, University of Wisconsin-Madison, 3rd Naval Symposium on Electrical Machines, 2000.
- [12] Metin Aydin, Surong Huang, and Thomas A. Lipo, “Torque Quality and Comparison of Internal and External Rotor Axial Flux Surface-Magnet Disc Machines”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 53, No. 3, June 2006.
- [13] S. Huang, M. Aydin, and T. A. Lipo, “Torque Quality Assessment and Sizing Optimization for Surface Mounted Permanent Magnet Machines”, Industry Applications Conference, 2001. Thirty-Sixth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2001 IEEE.

- [14] S. Huang, J. Luo, F. Leonardi and T.A. Lipo, "A Comparison of Power Density for Axial Flux Machines Based on General Purpose Sizing Equations," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 14, No. 2, pp. 185-192, 1999.
- [15] Ernest A. Mendrela, Ryszard Beniak, and Rafal Wrobel, "Influence of Stator Structure on Electromechanical Parameters of Torus-Type Brushless DC Motor", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 18, No. 2, pp. 231-237, 2003.
- [16] S. Huang, J. Luo, F. Leonardi and T.A. Lipo, "A General Approach to Sizing and Power Density Equations for Comparison of Electrical Machines," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 34, No. 1, pp. 92-97, 1998.
- [17] Huang, S., Aydin, M., Lipo, T.A., "TORUS Concept Machines: Pre-Prototyping Design Assessment for Two Major Topologies". In *Proceedings of IEEE Industry Applications Conference, Thirty-Sixth IAS Annual Meeting*. Vol. 3, p. 1619-1625, 2001.
- [18] A. Parviainen, M. Niemelä, J. Pyrhönen and J. Mantere "Performance comparison between low-speed axial-flux and radial-flux permanent magnet machines including mechanical constraints", *Electric Machines and Drives*, IEEE International Conference, pp. 1695-2007, 2005.
- [19] E. Spooner and B. J. Chalmers, "Torus: A slotless, toroidal-stator, permanent-magnet generator," *Proc. Inst. Elect. Eng.*, vol. 139, pt. B, no. 6, pp. 497–506, Nov. 1992.
- [20] M. Aydin, S. Huang and T. A. Lipo, "Design and 3D Electromagnetic Field Analysis of Non-slotted and Slotted TORUS Type Axial Flux Surface Mounted Permanent Magnet Disc Machines," *International Electric Machines and Drives Conference, IEMDC 2001*.
- [21] M. Aydin, "Axial Flux Surface Mounted Permanent Magnet Disc Motors for Smooth Torque Traction Drive Application", PhD Thesis, Wisconsin Madison University, 2004.
- [22] F. Caricchi, F. Crescimbeni, O. Honorati, "Modular Axial-Flux Permanent-Magnet Motor for Ship Propulsion Drives", *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 14, No. 3, September 1999.
- [23] F. Libert, "Design, Optimization and Comparison of Permanent Magnet Motors for a Low-Speed Direct-Driven Mixer", Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm 2004.
- [24] F. Caricchi, B.J. Chalmers, F. Crescimbeni, E. Spooner "Advances in the Design of TORUS Machines", *Power Electronic Drives and Energy Systems for Industrial Growth*, pp. 516-522 Vol. 2, 1-3 Dec.1998.
- [25] B.J. Chalmers, Wu Wei, E. Spooner, "An Axial-Flux Permanent-Magnet Generator for a Gearless Wind Energy System", *IEEE Int. Conf. on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth, PEDES6*, New Delhi, pp. 610-616.
- [26] Gieras J.F., and Wing M. (2002). *Permanent magnet motor technology: design and applications*. 2nd ed., Marcel Dekker, New York.

Abstract

Axial Flux Permanent Magnet machines have found growing interests in the recent years due to its pancake shape, compact construction and high power density. AFPM machines application are suitable for electrical vehicles, small to medium power generators, application for land transport, space area, airplane propulsion systems, paper industry, ship and submarine propulsion drives and other industrial drives. The unique disc-type profile of the rotor and stator of AFPM machines makes it possible to generate diverse and interchangeable designs. In this thesis, the kinds of axial flux permanent magnet machine topologies are introduced and reviewed. The study was conducted to compare the different topologies and is selected the topology used for the desired application. The initial design of the machine performed by the algorithm design and machine modeling done with Finite Element Method and simulation results presented. Machine optimized to obtain maximum power density values versus diameter ratio (λ) and air gap flux density (B_g) made the optimal parameters are obtained. Finally, a small prototype axial flux permanent magnet machine is manufactured and tested.

Keywords: Axial Flux Permanent Magnet (AFPM) Machine, Design Algorithm, Finite Element Method



Shahrood University of Technology
Faculty of Electrical & Robotic Engineering

Modeling, Design and Optimization of Axial Flux Permanent Magnet (AFPM) Machines

Hassan Moradi

Supervisor:

Dr. Ahmad Darabi

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

January 2012