





دانشکده مهندسی برق و رباتیک

گروه قدرت

عنوان:

مدلسازی، طراحی و ساخت یک ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم شار متقاطع  
برای توربین‌های بادی به منظور تغذیه بارهای DC

دانشجو:

مریم صالحی

اساتید راهنما:

پروفسور احمد دارابی

دکتر محمد حسین تبار مرزبالی

پایان نامه کارشناسی ارشد

تیر ۱۳۹۸

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای/ خانم مریم صالحی

تحت عنوان:

مدلسازی، طراحی و ساخت یک ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم شار متقاطع برای توربین‌های بادی به منظور تغذیه بارهای DC

در تاریخ ..... توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه ..... مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

سپاس خدای را که سخنوران، در ستودن او بمانند و شمارندگان، شمردن نعمت‌های او ندانند و کوشندگان، حق او را گزاردن نتوانند.

✓ از پدر دلسوز و مادر فداکارم، این دو معلم بزرگوار، که همواره بر کوتاهی و درشتی من قلم عفو کشیده و کریمانه از کنار غفلت‌هایم گذشته‌اند. آن‌ها که در تمام عرصه‌های زندگی یار و یاور بی چشم داشت برای من بوده‌اند و با حمایت‌های خود در محیطی مطلوب، آرامش روحی و آسایش فکری لازم را فراهم نموده‌اند تا مراتب تحصیلی و پایان نامه خود را به نحو احسن به اتمام برسانم؛

✓ از استاد شایسته، جناب آقای پروفسور دارابی، که در کمال سعه صدر، با حسن خلق و فروتنی، از هیچ کمکی در این عرصه برای من دریغ ننمودند و زحمت راهنمایی این رساله را به عهده گرفتند؛

✓ از استاد با کمالات، جناب آقای دکتر حسین تبار که زحمت راهنمایی این رساله را در حالی متقبل شدند که بدون مساعدت ایشان، این پروژه به نتیجه مطلوب نمی‌رسید؛

کمال تشکر و قدردانی را دارم.

مریم صالحی

تیر ۱۳۹۸

## تشکر و قدردانی

تشکر و قدردانی ویژه اینجانب تقدیم به استاد گرانقدر و دلسوز جناب آقای دکتر دارابی و دکتر حسین تبار که همواره از لطف و بزرگواری ایشان بهره‌مند شده‌ام. بدون شک به سرانجام رساندن این کار تحقیقاتی حاصل حمایت‌ها و هدایت‌های عالمانه آنان می‌باشد. سلامتی، سعادت، سربلندی، طول عمر و توفیق روز افزون این دو استاد ارجمند را از خداوند بزرگ خواستارم.

و نیز از تمام عزیزانی که در طول دوره تحصیل کمک‌هایشان شامل حال اینجانب شده تشکر و قدردانی می‌نمایم.

اینجانب مریم صالحی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق- قدرت دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه مدلسازی، طراحی و ساخت یک ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم شار متقاطع برای توربین‌های بادی به منظور تغذیه بارهای DC تحت راهنمایی دکتر دارابی و دکتر محمد حسین تبار مرزبالی متعهد می‌شوم که:

- ✓ تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- ✓ در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- ✓ مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- ✓ کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- ✓ حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بودند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- ✓ استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر می‌شود.

## چکیده

روند رو به رشد انرژی بادی، انگیزه محققان را برای تحقیق در این زمینه افزایش داده است. بنابراین یکی از مهم‌ترین دغدغه‌های محققان انتخاب ژنراتور برای سیستم توربین بادی است. برای این منظور انواع ساختارهای توربین بادی بررسی می‌شود و ماشین شار متقاطع به عنوان بهترین ژنراتور برای سیستم‌های بادی انتخاب می‌شود. به منظور استخراج ویژگی‌های مهم ماشین‌های شار متقاطع، این ماشین‌ها از نظر ساختار و عملکرد مطالعه می‌شوند. با استفاده از فرمول‌های ارائه شده یک نوع ماشین شار متقاطع که هندسه و ساختار آن برای کاربرد در نیروگاه‌های بادی مناسب‌تر است برای ادامه کار معرفی می‌شود. عملکرد ژنراتور طراحی شده با انجام تحلیل‌های الکترومغناطیسی به روش اجزاء محدود مورد بررسی قرار می‌گیرد. عملکرد خوب ژنراتور طراحی شده در سیستم توربین بادی نشان داده می‌شود. با ایجاد اصلاحات ساختاری به کمک روش‌های جابه‌جایی قطب‌های روتور و تورب هسته‌های استاتور در زوایای بهینه بدست آمده با استفاده از تحلیل فوریه و طرح هندسی ارائه شده، می‌توان ریبیل گشتاور را به طور قابل ملاحظه‌ای کاهش داد. تاثیر این دو روش بر شار پیوندی، گشتاور، بازده و سایر پارامترهای مهم طراحی، مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور تایید صحت الگوریتم طراحی، نمونه اولیه ژنراتور طراحی شده ساخته می‌شود. نتایج حاصل از آزمایشات عملی نشان می‌دهد که خطای مدل تحلیلی ارائه شده کمتر از ۱۰٪ است که معتبر بودن الگوریتم طراحی را ثابت می‌کند.

## کلمات کلیدی

ژنراتور مغناطیس دائم شار متقاطع، گشتاور دندانه‌ای، روش اجزاء محدود، جابه‌جایی قطب‌های روتور، مورب سازی هسته‌های استاتور

## مقالات مستخرج از پایان نامه

مریم صالحی، احمد دارابی و محمد حسین تبار مرزبالی، (۱۳۹۸) "کاهش گشتاور دندانه‌ای با استفاده از روش جابه‌جایی قطب‌های روتور در ژنراتور مغناطیس دائم شار متقاطع" بیست و هفتمین کنفرانس بین‌المللی برق ایران (ICEE)، یزد، ایران



## فهرست مطالب

فصل اول:	۱
مقدمه	۱
۱-۱- سیستم توربین بادی	۲
۱-۲- توربین‌های بادی سرعت ثابت	۴
۱-۳- توربین‌های بادی سرعت متغیر	۶
۱-۴- سیستم درایو در سیستم توربین‌های بادی	۸
۱-۵- انتخاب نوع ژنراتور برای توربین بادی درایو مستقیم	۱۴
فصل دوم:	۱۷
مشخصه‌های ساختاری، عملکردی و ویژگی‌های ماشینهای مغناطیس دائم شارمتقاطع	۱۷
۱-۲- مقدمه	۱۸
۲-۲- ساختار ماشینهای مغناطیس دائم شار متقاطع	۲۰
۲-۲-۱- ساختار روتور	۲۰
۲-۲-۲- ساختار استاتور	۲۳
۲-۲-۳- ساختار سیم‌پیچی	۲۴
۲-۲-۴- ساختارهای چند فاز	۲۶
۲-۲-۵- ساختار فاصله هوایی	۲۷
۲-۳- ویژگی‌های مهم ماشینهای مغناطیس دائم شار متقاطع	۳۰
۲-۳-۱- ریپل گشتاور بالا	۳۰
۲-۳-۲- ضریب توان پایین	۳۱
۲-۳-۳- چگالی گشتاور بالا	۳۳
فصل سوم:	۳۹
طراحی ژنراتور مغناطیس دائم شار متقاطع نمونه	۳۹

۴۰	۱-۳- مقدمه
۴۱	۲-۳- معرفی مختصر ساختار و عملکرد ژنراتور مغناطیس دائم شار متقاطع
۴۲	۳-۳- طراحی ژنراتور مغناطیس دائم شار متقاطع
۴۶	۱-۳-۳- بارگذاری الکتریکی
۴۷	۴-۳- تحلیل الکترومغناطیسی ژنراتور مغناطیس دائم شار متقاطع طراحی شده
۵۳	فصل چهارم:
۵۳	مدلسازی ژنراتور طراحی شده در سیستم توربین بادی به منظور تغذیه بارهای DC
۵۴	۲-۴- مدلسازی باد
۵۶	۳-۴- مدلسازی توربین بادی
۵۸	۴-۴- مدلسازی درایو و ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم شار متقاطع طراحی شده
۶۴	۵-۴- تحلیل عملکرد ژنراتور در سرعت‌های باد متفاوت
۶۵	فصل پنجم:
۶۵	تحلیل گشتاور دندانه‌ای در ژنراتور مغناطیس دائم شار متقاطع طراحی شده
۶۶	۱-۵- مقدمه
۶۶	۲-۵- تحلیل گشتاور الکترومغناطیسی و ریپل گشتاور
۷۱	۳-۵- کاهش گشتاور دندانه‌ای به روش جابه‌جایی قطب‌های روتور
۷۴	۴-۵- کاهش گشتاور دندانه‌ای به روش تورب هسته‌های استاتور
۷۹	فصل ششم:
۷۹	راست آزمایی عملکرد ژنراتور به روش تجربی
۸۰	۱-۶- مقدمه
۸۰	۲-۶- استاتور
۸۴	۲-۶- روتور
۸۶	۳-۶- آزمایش ژنراتور

فصل هفتم: ..... ۹۱

نتیجه‌گیری و پیشنهادات ..... ۹۱

۱-۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ..... ۹۲

۲-۷- پیشنهادات ..... ۹۳

## فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۱): ساختار توربین بادی ..... ۴
- شکل (۲-۱): ساختار توربین بادی سرعت ثابت ..... ۴
- شکل (۳-۱): ساختار توربین بادی سرعت متغیر با ژنراتور القایی مقاومت متغیر ..... ۶
- شکل (۱-۲): طرح سیم‌پیچ ..... ۲۵
- شکل (۲-۲): ساختارهای چند فاز ..... ۲۶
- شکل (۳-۲): ساختار فاصله هوایی ..... ۲۶
- شکل (۴-۲): ساختارهای مختلف ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع ..... ۲۹
- شکل (۱-۳): ساختار تکفاز ژنراتور مغناطیس دائم شار متقاطع ..... ۴۲
- شکل (۲-۳): روند کلی طراحی ژنراتور شار متقاطع مغناطیس دائم ..... ۴۴
- شکل (۳-۳): طرح مش‌بندی یک جفت قطب ژنراتور طراحی شده ..... ۵۰
- شکل (۴-۳): نقشه رنگی توزیع چگالی شار در ژنراتور طراحی شده در حالت مدار باز ..... ۵۰
- شکل (۵-۳): توزیع برداری شار در ژنراتور طراحی شده در حالت مدار باز ..... ۵۱
- شکل (۶-۳): (الف) نمودار شار پیوندی یک فاز (ب) نمودار ولتاژ بیباری بر حسب موقعیت الکتریکی ..... ۵۲
- شکل (۷-۳): (الف) نمودار ولتاژ القایی (ب) نمودار جریان الکتریکی در شرایط بار کامل بر حسب موقعیت الکتریکی ..... ۵۲
- شکل (۱-۴): شماتیک کلی سیستم توربین بادی به همراه ژنراتور مغناطیس دائم شار متقاطع، مدار سه فاز یکسوساز DC دیودی و بار ..... ۵۴
- شکل (۲-۴): شکل موج باد بر حسب زمان ..... ۵۸

- شکل (۳-۴): مدل توربین بادی ..... ۵۸
- شکل (۴-۴): بلوک دیاگرام توربین بادی ..... ۵۸
- شکل (۵-۴): بلوک دیاگرام درایو ..... ۵۹
- شکل (۶-۴): گشتاور مکانیکی خروجی توربین ..... ۵۹
- شکل (۷-۴): مدار معادل یک فاز ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم شار متقاطع ..... ۵۹
- شکل (۸-۴): مدار معادل ژنراتور سه فاز شار متقاطع به همراه یکسوساز و بار DC ..... ۶۱
- شکل (۹-۴): بلوک دیاگرام ژنراتور به همراه یکسوساز پل دیودی و بار مقاومتی DC ..... ۶۱
- شکل (۱۰-۴): (الف): سرعت ژنراتور بر حسب رادیان مکانیکی، (ب): گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور در حالت سه فاز (ج): شکل موج emf ژنراتور ..... ۶۲
- شکل (۱۱-۴): نمودار ولتاژ DC خروجی ..... ۶۳
- شکل (۱۲-۴): نمودار بازده ژنراتور بر حسب سرعت باد ..... ۶۴
- شکل (۱-۵): مدل MEC ژنراتور طراحی شده ..... ۶۷
- شکل (۲-۵): نمودار گشتاور لحظه‌ای الکترومغناطیسی در بار کامل بر حسب موقعیت الکتریکی ..... ۷۰
- شکل (۳-۵): نمودار گشتاور دندانه‌ای بر حسب موقعیت الکتریکی ..... ۷۰
- شکل (۴-۵): ساختار ردیف‌های هسته‌های رتور در یک فاز، Motor A: ساختار هسته‌های رتور در Motor B، TFPMG A : ساختار جابه‌جا شده هسته‌های رتور در TFPMG B ..... ۷۱
- شکل (۵-۵): نمودار مقایسه گشتاورهای دندانه‌ای و متوسط در زاویه‌های جابه‌جایی متفاوت قطب‌های رتور ..... ۷۲
- شکل (۶-۵): مقایسه گشتاورهای دندانه‌ای در TFPMG A، TFPMG B و TFPMG C ..... ۷۳

- شکل (۷-۵): مقایسه شارهای پیوندی در TFPMG A, TFPMG B و TFPMG C ..... ۷۳
- شکل (۸-۵): طرح هندسی برای محاسبه زاویه بهینه تورب هسته‌های U شکل استاتور ..... ۷۵
- شکل (۹-۵): طرح تورب هسته‌های U شکل استاتور ..... ۷۶
- شکل (۱۰-۵): نمودار مقایسه گشتاورهای دندانه‌ای و متوسط در زاویه‌های تورب متفاوت هسته‌های استاتور ..... ۷۶
- شکل (۱-۶): ساختار بدنه استاتور ..... ۸۲
- شکل (۲-۶): نحوه ثابت شدن هسته‌های U شکل درون شیارهای بدنه و صفحه نگهدارنده هسته‌ها و سیم‌پیچی ..... ۸۳
- شکل (۳-۶): ساختار دو فاز استاتور ..... ۸۳
- شکل (۴-۶): ساختار سه فاز استاتور ..... ۸۴
- شکل (۵-۶): بدنه نگهدارنده روتور به همراه شفت ..... ۸۵
- شکل (۶-۶): روتور شامل رینگ‌های فایبر گلاس، متمرکز کننده‌های شار، آهنرباها، شفت، بدنه، یاتاقان و دو دیسک انتهایی ..... ۸۶
- شکل (۷-۶): مونتاژ نهایی ماشین مغناطیس دائم شار متقاطع ساخته شده ..... ۸۷
- شکل (۸-۶): پلتفرم آزمایشگاهی در شرایط بی‌باری ..... ۸۸
- شکل (۹-۶): مقایسه شکل موج‌های ولتاژ بی‌باری حاصل از اندازه‌گیری‌های عملی و نتایج شبیه‌سازی ..... ۸۸
- شکل (۱۰-۶): مقایسه شکل موج‌های ولتاژ حاصل از اندازه‌گیری‌های عملی و نتایج شبیه‌سازی در شرایط حداکثر بار نامی ..... ۸۹

## فهرست جدول‌ها

- جدول (۱-۱): مقایسه ماشین‌های مغناطیس دائم شار شعاعی، شار محوری و شار متقاطع از نظر عملکرد، مزایا، محدودیت‌ها و مشخصه‌های ساختاری ..... ۱۴
- جدول (۱-۲): ویژگی‌ها، دلایل و روش‌های بهبود ویژگی‌های مهم ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع ..... ۳۷
- جدول (۱-۳): پارامترهای اساسی ژنراتور پیشنهادی ..... ۴۴
- جدول (۱-۵): مقایسه پارامترهای اساسی در سه ساختار TFPMG A ، TFPMG B و ۷۷TFPMG C ..... ۷۷





## فصل اول:

### مقدمه

هدف از این فصل پاسخ به سه سوال اولیه و اساسی است، که در هر تحقیق بنیادی باید مطرح شوند:

چه چیز؟ چرا؟ چگونه؟

محدودیت سوخت های فسیلی و همچنین گرم شدن کره زمین منجر به استفاده از انرژی های تجدید پذیر شده است. بنابراین، استفاده از منابع تجدیدپذیر مانند انرژی باد، انرژی خورشیدی و ... افزایش یافته است. در سالهای اخیر، سهم توان بادی در تأمین توان شبکه افزایش یافته است و توان بادی بخش بزرگی از منابع تولید توان الکتریکی را تشکیل داده است. بنابراین با گسترش استفاده از توربین های بادی جهت تامین انرژی، نیاز به انتخاب تجهیزات مناسب از جمله ژنراتور برای این ساختارها است.

در این فصل پس از معرفی انواع ساختارهای توربین بادی، به بحث در مورد ویژگی های مهم ماشین های شار متقاطع و دلیل انتخاب آنها به عنوان ژنراتور سیستم بادی می پردازیم. یکی از مهم ترین ویژگی های ماشین شار متقاطع عملکرد مناسب آنها در سرعت پایین است که سبب حذف جعبه دنده و همچنین موجب افزایش بازده و کاهش هزینه تعمیر و نگهداری سیستم می شود. بنابراین اهداف مشخص این پایان نامه عبارتند از:

- ۱) مقایسه سه نوع ماشین مغناطیس دائم به منظور کاربرد به عنوان ژنراتور سیستم بادی
- ۲) بررسی اصول کار ماشین شار متقاطع
- ۳) طراحی و مدل سازی ماشین شار متقاطع مناسب به منظور کاربرد در نیروگاه های بادی
- ۴) ارائه دو روش کاهش گشتاور دندانه ای در ژنراتور طراحی شده
- ۵) ارزیابی مدل طراحی شده با مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی های اجزاء محدود و راست آزمایی مشخصه های ماشین با آزمون تجربی بر مبنای یک نمونه عملی ساخته شده

## ۱-۱- سیستم توربین بادی

از آنجایی که منابع فسیلی مانند نفت و گاز تجدید ناپذیر بوده و روزی به پایان می رسند، باد به عنوان یک منبع انرژی پاک محسوب شده و هزینه تولید برق بوسیله آن کمتر از تولید برق با استفاده

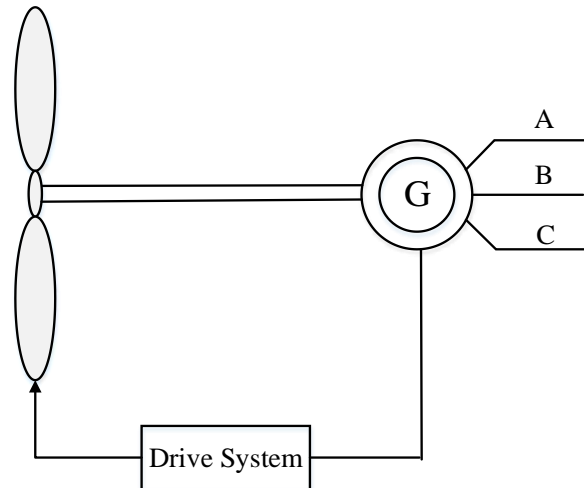
از سوخت‌های فسیلی است و همچنین آلودگی و گاز گلخانه‌ای کمتری تولید می‌کند. شکل (۱-۱) ساختار کلی سیستم توربین بادی را نشان می‌دهد. در حال حاضر ژنراتورهایی که در این سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرند عبارتند از:

- ✓ ژنراتور القایی قفس سنجابی<sup>۱</sup>
- ✓ ژنراتور القایی مقاومت متغیر<sup>۲</sup>
- ✓ ژنراتور القایی دو سو تغذیه<sup>۳</sup>
- ✓ ژنراتور سنکرون دارای تحریک الکتریکی<sup>۴</sup>
- ✓ ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم<sup>۵</sup>

انرژی باد به وسیله توربین بادی به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود. بخش دیگر توربین جعبه دنده است که قسمت سرعت پایین توربین را به سرعت بالا برای حرکت ژنراتور تبدیل می‌کند. در بعضی از توربین‌ها به منظور کنترل توان انتقالی توربین مجهز به کنترل زاویه پیچش پره می‌شود. سیستم‌های توربین بادی براساس بیشینه کردن بازده انرژی، کمینه کردن هزینه، بهبود کیفیت توان و قابلیت اطمینان بیشتر گسترش یافته‌اند. مقایسه کلی بین سیستم ژنراتورهای درایو مستقیم و سیستم دارای جعبه دنده از نظر بازده، هزینه و جرم ساختاری صورت می‌گیرد.

توربین‌های بادی را می‌توان از نظر سرعت چرخش، سیستم درایو و روش‌های تنظیم توان طبقه بندی کرد [۱]. ژنراتورهای مورد استفاده در کاربرد توربین‌های بادی بر اساس سرعت به دو نوع زیر تقسیم می‌شوند.

- 
- 1 Squirrel Cage Induction Generator
  - 2 Variable Resistance Induction Generator
  - 3 double Fed Induction Generator
  - 4 Electrical Excited Synchronos Generator
  - 5 Permanent Magnet Synchronos Generator



شکل (۱-۱): ساختار توربین بادی

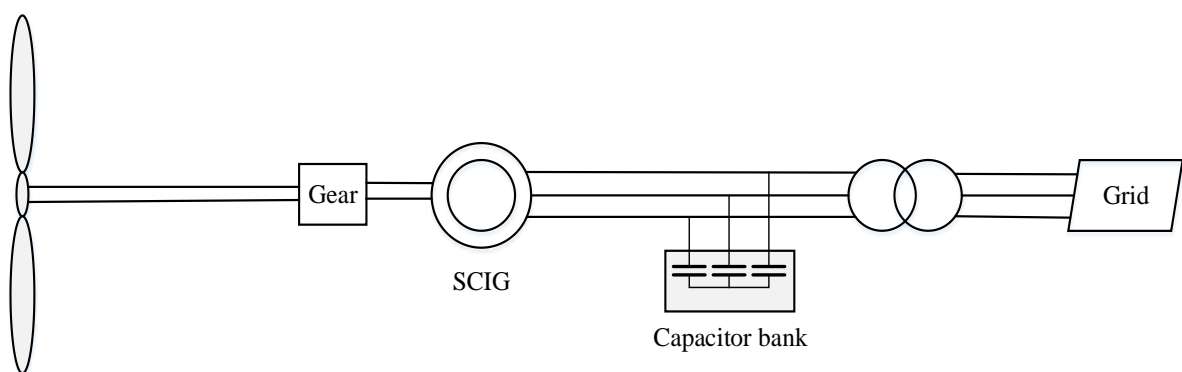
✓ سیستم توربین بادی سرعت ثابت<sup>۱</sup>

✓ سیستم توربین بادی سرعت متغیر<sup>۲</sup>

### ۲-۱- توربین‌های بادی سرعت ثابت

در اوایل دهه ۱۹۹۰ توربین‌های بادی نصب شده با سرعت ثابت کار می‌کردند. یک نمونه ساختار

توربین‌های بادی سرعت ثابت در شکل (۲-۱) نشان داده شده است.



شکل (۲-۱): ساختار توربین بادی سرعت ثابت

1 Fixed Speed Wind Turbine  
2 Variable Speed Wind Turbine

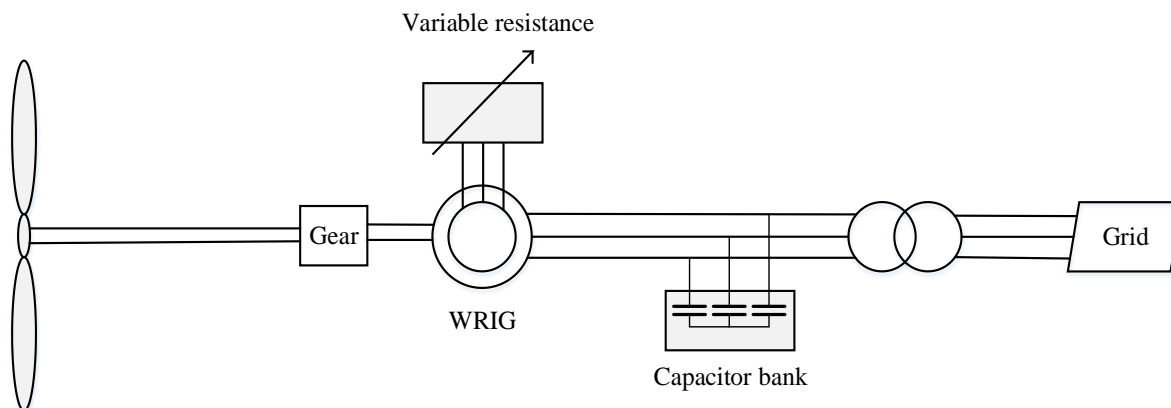
ژنراتور سیستم توربین‌های بادی سرعت ثابت شامل ژنراتور القایی قفس سنجابی است. ژنراتور قفس سنجابی به طور مستقیم و توسط یک ترانسفورماتور به شبکه متصل می‌شود. سرعت روتور این توربین‌ها ثابت بوده و بر اساس فرکانس شبکه تعیین می‌شود [۱]. تغییرات سرعت خیلی کم و در حدود یک تا دو درصد سرعت نامی است. با توجه به اینکه ژنراتورهای قفس سنجابی نزدیک به سرعت سنکرون کار می‌کنند به این نوع توربین‌ها، توربین‌های بادی سرعت ثابت می‌گویند. سرعت ژنراتور قفس سنجابی با مقدار توان تولید شده تغییر می‌کند و با توجه به این که در توربین‌های بادی سرعت ثابت، کنترل توان صورت نمی‌گیرد، نوسانات باد به نوسانات مکانیکی و به تبع آن به نوسانات الکتریکی تبدیل می‌شود. بنابراین مهمترین نقطه ضعف این نوع از توربین‌های بادی این است که هیچ نوع کنترل سرعتی ندارد به همین خاطر به یک شبکه مقاوم نیاز دارد و علاوه بر این موضوع، ساختار مکانیکی آن می‌بایست بگونه‌ای طراحی شود تا بتواند تنش‌های مکانیکی را بخوبی تحمل کند. در این ساختارها اختلاف زیاد بین سرعت توربین و ژنراتور به وسیله جعبه دنده حل می‌شود. یکی از بزرگترین مشکلات ژنراتورهای القایی قفس سنجابی، مصرف توان راکتیو این نوع ژنراتورها است. در توربین‌های بزرگ و شبکه‌های ضعیف مصرف توان راکتیو ژنراتور قفس سنجابی مشکل ساز است. بنابراین باید توان راکتیو مصرفی ژنراتور قفس سنجابی به وسیله بانک‌های خازنی تامین شود.

مزایای توربین‌های بادی سرعت ثابت:

(۱) سادگی

(۲) استحکام

(۳) قابلیت اطمینان بالا



شکل (۳-۱): ساختار توربین بادی سرعت متغیر با ژنراتور القایی مقاومت متغیر

۴) هزینه پایین قسمت‌های الکتریکی

محدودیت‌های توربین‌های بادی سرعت ثابت:

۱) تنش‌های مکانیکی بالا

۲) کنترل کیفیت توان پایین

### ۳-۱- توربین‌های بادی سرعت متغیر

در طی چند سال اخیر استفاده از توربین‌های بادی سرعت متغیر رشد چشم‌گیری داشته است. از سال ۱۹۹۰ به بعد به دلیل نیروی محوری وارد شده به تیغه‌های رتور توربین سرعت ثابت و مشکلات دیگر بیشتر توربین‌های بادی با رنج توان ۱/۵ مگاوات به بالا به توربین‌های سرعت متغیر تبدیل شدند [۱]. این توربین‌ها در یک محدوده وسیعی از سرعت‌ها برای بیشینه کردن اثر آیرودینامیکی گسترش یافتند. یک نمونه ساختار توربین بادی سرعت متغیر با ژنراتور القایی مقاومت متغیر در شکل (۳-۱) نشان داده شده است. ژنراتور سیستم توربین‌های بادی سرعت متغیر شامل موارد زیر است.

۱) ژنراتور القایی دو سو تغذیه

۲) ژنراتور القایی رتور سیم‌پیچی شده با مقاومت متغیر

۳) ژنراتور سنکرون دارای تحریک الکتریکی

#### ۴) ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم

مزایای توربین های بادی سرعت متغیر نسبت به سرعت ثابت:

۱) بهبود کیفیت توان خروجی

۲) افزایش انرژی دریافتی

۳) کاهش نویز صوتی

۴) کاهش فشار مکانیکی سیستم درایو

محدودیت های توربین های بادی سرعت متغیر نسبت به سرعت ثابت:

۱) تلفات در تجهیزات الکترونیک قدرت

۲) افزایش هزینه ناشی از تجهیزات الکترونیک قدرت

یکی از مزیت های مهم سیستم های بادی سرعت متغیر تولید توان بیشتر در سرعت باد مشخص است. در سیستم سرعت متغیر گشتاور ژنراتور تا حدی ثابت نگه داشته می شود و نوسانات باد به وسیله سرعت ژنراتور تنظیم می شود. این توربین ها عملکرد مناسبی در محدوده وسیعی از سرعت باد دارند. در مجموع عملکرد به صورت سرعت متغیر سبب افزایش بازده می شود به گونه ای که پیوسته سرعت چرخش روتور توربین بادی با سرعت باد هماهنگ می شود. سیستم توربین بادی سرعت متغیر از نظر سیستم درایو به دو نوع درایو مستقیم<sup>۱</sup> و سیستم دارای جعبه دنده<sup>۲</sup> تقسیم می شود.

در مرجع [۲]، مقایسه کلی بین سیستم ژنراتورهای درایو مستقیم و دارای جعبه دنده صورت گرفته است. که از آن مفاهیم زیر را می توان استنتاج کرد:

- ژنراتور القایی دو سو تغذیه با جعبه دنده سه مرحله ای دارای وزن کم و قیمت بالایی است.

---

1 Direct Drive  
2 Gearbox Based

- بازده و قابلیت اطمینان سیستم‌های درایو مستقیم نسبت به سیستم دارای جعبه دنده بیشتر است.

- سیستم ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم درایو مستقیم دارای بازده بیشتر و تلفات کمتر نسبت به سایر سیستم‌ها است.

- سیستم ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم دارای جعبه دنده یک مرحله ای دارای بالاترین نسبت بازده به هزینه سالانه است.

در صورتی که بتوان هزینه ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم درایو مستقیم را نسبت به ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه کاهش داد آنگاه ساختار ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم درایو مستقیم بسیار مناسب‌تر از ساختار ژنراتورهای القایی دو سو تغذیه است. بنابراین کاهش هزینه سیستم‌های درایو مستقیم مهم‌ترین مسئله در طراحی این نوع ژنراتورها است. برای کاهش هزینه واضح است که باید مقدار مواد سازنده را کاهش داد برای کاهش هزینه می‌توان ساختار الکترومغناطیسی و ساختار مکانیکی را در نظر گرفت [۳].

ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم دارای مزیت‌هایی همچون عدم نیاز به منبع تحریک، حلقه‌های لغزان و جاروبک است. همچنین، از جمله عوامل استفاده از ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم بازده بالاتر، نگهداری کمتر، عدم نیاز به جعبه دنده و ... است. سیستم کنترل توان در ژنراتور مغناطیس دائم می‌تواند بطور جداگانه توان اکتیو و راکتیو را کنترل کند به گونه‌ای که کنترل توان اکتیو بوسیله مبدل سمت ژنراتور و کنترل توان راکتیو بوسیله مبدل سمت شبکه صورت می‌پذیرد.

#### ۱-۴- سیستم درایو در سیستم توربین‌های بادی

توربین‌های بادی بر اساس سیستم درایو به دو نوع زیر طبقه بندی می‌شوند:

(۱) ژنراتورهای توربین بادی دارای جعبه دنده

(۲) ژنراتورهای توربین بادی درایو مستقیم



ژنراتورهای بادی دارای جعبه دنده:

مزایای ژنراتورهای توربین بادی دارای جعبه دنده نسبت به ژنراتورهای توربین بادی درایو مستقیم:

(۱) ابعاد کوچکتر

(۲) جرم کمتر

(۳) هزینه کمتر

محدودیت های سیستم جعبه دنده نسبت به درایو مستقیم:

(۱) تلفات و گرمای زیاد ناشی از اصطکاک جعبه دنده

(۲) تعمیر و نگهداری منظم جعبه دنده

(۳) تولید صدای زیاد

روتور ژنراتور درایو مستقیم بطور مستقیم به روتور توربین بادی متصل است بنابراین این ساختار در سرعت کم کاربرد دارد. سیستم درایو مستقیم را می توان طوری طراحی کرد که دارای قطر بزرگتر و گام قطب کوچکتر جهت افزایش بازده، کاهش مواد و کاهش تلفات سیم پیچ انتهایی شود.

مزایای سیستم درایو مستقیم نسبت به سیستم دارای جعبه دنده:

(۱) سادگی سیستم درایو بدلیل حذف جعبه دنده

(۲) راندمان بالاتر در بارهای جزئی

(۳) قابلیت اطمینان و دسترسی بالا

(۴) نویز صوتی کمتر در سیستم درایو

(۵) کنترل انعطاف پذیر سیستم به وسیله مبدل های الکترونیک قدرت

محدودیت های سیستم ژنراتور درایو مستقیم نسبت به ژنراتور دارای جعبه دنده:

(۱) ابعاد بزرگ

(۲) جرم بیشتر

(۳) هزینه بیشتر

(۴) طراحی خاص برای گشتاور بالا در سرعت های پایین

بطور کلی ژنراتورهای درایو مستقیم به دو گروه زیر تقسیم می شوند:

(۱) ژنراتورهای سنکرون دارای تحریک الکتریکی

(۲) ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم

ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم به وسیله مغناطیس های دائم<sup>۱</sup> تحریک می شوند. این ژنراتورها به

کمک مبدل های الکترونیک قدرت به شبکه متصل می شوند.

از مزایای ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم نسبت به ژنراتور سنکرون دارای تحریک الکتریکی می توان به

موارد زیر اشاره کرد.

(۱) بازده بالاتر

(۲) عدم نیاز به منبع تحریک

(۳) تلفات حرارتی کمتر بدلیل عدم سیم پیچی تحریک

(۴) نسبت توان به جرم بالاتر

از محدودیت های ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم می توان به موارد زیر اشاره کرد.

(۱) هزینه بالای مغناطیس های دائم

(۲) قیمت بالای مبدل ها

(۳) ساخت دشوار

#### ۴) مغناطیس زدایی مغناطیس‌های دائم در دمای بالا

اخیرا بهبودهایی در زمینه مواد مغناطیس دائم صورت گرفته و هزینه آن‌ها کاهش یافته است بنابراین استفاده از مغناطیس‌های دائم جذاب‌تر از گذشته شده است. همچنین قیمت مبدل‌های الکترونیک قدرت کاهش یافته است. بنابراین ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم درایو مستقیم با مبدل‌های الکترونیک قدرت رواج یافته است.

ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم درایو مستقیم برای کاربرد توربین بادی به سه گروه اصلی زیر تقسیم می‌شوند:

(۱) ژنراتورهای مغناطیس دائم شار شعاعی<sup>۱</sup> (RFPM)

(۲) ژنراتورهای مغناطیس دائم شار محوری<sup>۲</sup> (AFPM)

(۳) ژنراتورهای مغناطیس دائم شار متقاطع<sup>۳</sup> (TFPM)

معمول‌ترین نوع ماشین‌های مغناطیس دائم، ماشین‌های مغناطیس دائم شار شعاعی هستند چون مزایای زیادی از جمله استحکام زیاد و ساختار کامل در توان‌های بالا را دارند. این نوع ماشین‌ها همانند ماشین‌های سنکرون روتور سیم‌پیچی شده هستند. مسیر شار در این ماشین‌ها به موازات جهت چرخش روتور است. ماشین‌های شار شعاعی دارای مسیر شار شعاعی در فاصله هوایی هستند. اندوکتانس‌های دو محور  $d$  و  $q$  تقریباً یکسان بوده و فاصله هوایی معادل این نوع ماشین‌ها زیاد است. بنابراین اشباع در آن‌ها کم می‌باشد [۲]. در ماشین‌های شار محوری سیم‌پیچی‌های استاتور به صورت شعاعی بوده و خطوط شار فاصله هوایی به صورت موازی با محور ماشین است. مغناطیس‌های دائم در روتور به دو نوع داخلی و سطحی تقسیم می‌شوند. در نوع داخلی جهت مغناطیس شوندگی آهنرباها به صورت شعاعی و در نوع سطحی جهت مغناطیس شوندگی آهنرباها به صورت محوری است. ماشین‌های مغناطیس دائم

---

1 Radial Flux Permanent Magnet

2 Axial Flux Permanent Magnet

3 Transverse Flux Permanent Magnet

شار محوری، طول محوری کوتاه‌تری نسبت به ماشین‌های مغناطیس دائم شار شعاعی و شار متقاطع دارند. ماشین‌های مغناطیس دائم شار محوری نسبت گشتاور به حجم بیشتری نسبت به ماشین‌های مغناطیس دائم شار شعاعی دارند هر چند که این ماشین‌ها در رنج توان‌های بالا نیاز به قطر بزرگتر دارند. همچنین این ماشین‌ها دارای ساختار محکمی نیستند و ثابت نگه داشتن طول فاصله هوایی در یک اندازه معین کار دشواری است [۴]. ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع دارای ساختار انعطاف پذیرتری هستند و رتور و استاتور آن‌ها را می‌توان با چگالی گشتاور بالا و تلفات مس کم طراحی کرد. ویژگی‌های ماشین‌های مغناطیس دائم شار شعاعی:

(۱) ساختار محکم

(۲) ساخت آسان (نسبت به ماشین‌های شارمحوری و ماشین‌های شارمتقاطع)

(۳) عملکرد مناسب در کاربردهای سرعت بالا

مزایای ماشین‌های مغناطیس دائم شار محوری نسبت به ماشین‌های مغناطیس دائم شار شعاعی:

(۱) سیم‌پیچی ساده

(۲) گشتاور دندانه‌ای<sup>۱</sup> و نویز کمتر

(۳) طول محوری کم

(۴) نسبت گشتاور به حجم بیشتر

محدودیت‌های ماشین مغناطیس دائم شار محوری نسبت به ماشین‌های مغناطیس دائم شار شعاعی:

(۱) نسبت گشتاور به جرم کمتر

(۲) جرم مغناطیس‌های دائم بیشتر

(۳) استحکام مکانیکی کمتر

(۴) ساخت دشوار برای ابعاد بزرگ

(۵) ساخت دشوار هسته های استاتور

مزایای ماشین مغناطیس دائم شار متقاطع نسبت به ماشین های مغناطیس دائم دیگر: [۵]

(۱) چگالی نیروی بیشتر

(۲) تلفات مسی کمتر

(۳) سیم پیچی ساده

(۴) با توجه به ساختار تکفاز و با طراحی مناسب می توان انزوای حرارتی و مغناطیسی بین فازها

ایجاد کرد و همچنین انزوای الکتریکی را می توان با تغذیه جداگانه هر یک از فازها با مبدل های

الکترونیک قدرت جداگانه بدست آورد و در نتیجه قابلیت تحمل خطا را بالا برد.

(۵) بدلیل تکرار منظم محاسبات برای هر جفت قطب، برای آنالیز عددی و تحلیلی می توان فقط

یک جفت قطب را در نظر گرفت.

(۶) مشخصه الکتریکی ماشین مغناطیس دائم شار متقاطع شبیه ماشین سنکرون مغناطیس دائم

معمولی است. بنابراین مبدل های ۳ فاز استاندارد و شیوه های استاندارد کنترل را می توان اجرا

کرد.

(۷) از لحاظ تئوری گشتاور خروجی با افزایش تعداد جفت قطب ها افزایش می یابد.

محدودیت های ماشین های مغناطیس دائم شار متقاطع:

(۱) ساختار پیچیده

(۲) ضریب توان پایین

(۳) الگو شار در ماشین های مغناطیس دائم شار متقاطع به صورت سه بعدی است بنابراین آنالیز

المان محدود در این ماشین ها دشوار است.

۴) ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع دارای گشتاور دندانه‌ای بالایی هستند که علت آن تغییرات زیاد رلوکتانس فاصله هوایی در اثر چرخش رتور است.

### ۱-۵- انتخاب نوع ژنراتور برای توربین بادی درایو مستقیم

ژنراتورهایی با حداکثر بازده و حداقل هزینه را می‌توان به عنوان مناسب‌ترین ژنراتورها برای سیستم توربین بادی معرفی کرد. ژنراتورهای درایو مستقیم دارای بازده بالاتری نسبت به ژنراتورهای دارای جعبه‌دنده هستند. ساختارهای مختلف ژنراتورهای مغناطیس دائم در مراجع زیادی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با توجه به جدول (۱-۱) و مقایسه انواع مختلف ماشین‌های مغناطیس دائم، بهترین نوع ژنراتورها برای کاربردهای سرعت پایین و گشتاور بالا، ماشین‌های شار متقاطع هستند.

جدول (۱-۱): مقایسه ماشین‌های مغناطیس دائم شار شعاعی، شار محوری و شار متقاطع از نظر عملکرد، مزایا، محدودیت‌ها و مشخصه‌های ساختاری

مشخصه	AFPM	RFPM	TFPM
مزیت‌ها	✓ نسبت طول محوری به قطر فاصله هوایی کم (برای کاربردهای خاص)	✓ ساختار ساده	✓ تلفات مسی پایین
	✓ سطح فعال بزرگ فاصله هوایی	✓ ساختاری مستحکم‌تر از ساختار ماشین‌های TFPM و AFPM	✓ سیم پیچی ساده
	✓ انتقال حرارت و خنک سازی خوب	✓ اشباع کمتر	✓ مستقل بودن بارگذاری‌های الکتریکی و مغناطیسی
	✓ نسبت توان به جرم پایین		✓ چگالی گشتاور بالا
	✓ وابسته بودن بارگذاری‌های الکتریکی و مغناطیسی		✓ نسبت گشتاور به جرم بالا در مقایسه با دو نوع دیگر
	✓ دارای وزن زیاد در قطرهای بزرگ		✓ نسبت هزینه به گشتاور پایین در مقایسه با دو نوع دیگر
	✓ تلفات مسی بالا		✓ ساختار مستحکم در گام قطب کوچک و تعداد قطب بالا
	✓ وابسته بودن بارگذاری‌های الکتریکی و مغناطیسی	✓ وابسته بودن بارگذاری‌های الکتریکی و مغناطیسی	
	✓ تلفات مسی پایین		
	✓ تلفات مسی پایین		
مشخصه ساختاری	✓ طول محوری کوتاه	—	✓ نسبت طول محوری به قطر خارجی بزرگ
	✓ کاربردهای توان به حجم بالا	✓ کاربردهای سرعت بالا	✓ کاربردهای سرعت پایین و گشتاور بالا
عملکرد مناسب			

در ماشین‌های الکتریکی سرعت پایین به علت فرکانس پایین، تلفات مسی دارای اهمیت بیشتری نسبت به تلفات آهنی است. بنابراین، ژنراتورهای دارای تلفات مسی کمتر در سیستم توربین بادی درایو مستقیم مورد نیاز است. با توجه به تلفات مسی کمتر ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع نسبت به ماشین‌های مغناطیس دائم دیگر، این‌گونه ماشین‌ها را می‌توان بعنوان بهترین نوع ژنراتور برای کاربرد-های سرعت پایین انتخاب کرد. همچنین، برای کاهش تلفات مسی می‌توان سیم پیچ ابررسانا را جایگزین سیم‌پیچ‌های مسی معمولی کرد.

همواره کاهش هزینه برای سیستم‌های درایو مستقیم مهم‌ترین مساله در هر دو طراحی الکترومغناطیسی و مکانیکی است. بنابراین، موضوعات جدیدی برای ژنراتور مغناطیس دائم درایو مستقیم برای کاهش هزینه و جرم وجود دارد. در واقع اگر به طریقی بتوان جرم ژنراتور درایو مستقیم را کاهش داد این سیستم‌ها بهترین سیستم برای توربین‌های بادی هستند.

کاهش مواد مصرفی منجر به کاهش هزینه سیستم می‌شود. برای کاهش مقدار مواد الکترومغناطیسی می‌توان مسیر شار مغناطیسی را کوتاه کرد و این با کوتاه کردن گام شیار و عمق شیار محقق می‌شود. در ماشین‌های مغناطیس دائم شار شعاعی و شار محوری با کوتاه شدن گام شیار گام قطب نیز کوتاه می‌شود در نتیجه شار نشتی افزایش می‌یابد. بنابراین در ماشین‌های مغناطیس دائم شار شعاعی و شار محوری امکان کاهش مقدار مواد الکترومغناطیسی با کوتاه کردن مسیر شار وجود ندارد. اما ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع برای کاهش مواد مناسب ترند زیرا با کوتاه شدن گام شیار، گام قطب کوتاه نمی‌شود.

یکی دیگر از روش‌های کاهش مقدار مواد الکترومغناطیسی استفاده از ساختار مدولار است. در ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع بر خلاف دیگر ماشین‌های مغناطیس دائم به دلیل مستقل بودن گام قطب و گام شیار امکان ساخت هسته‌های استاتور به صورت مدولار وجود دارد. بدین صورت که هر فاز استاتور ماشین شار متقاطع را می‌توان به چندین قسمت تقسیم کرد. این تقسیم بندی از مقدار شار

القایی در استاتور و مقدار مس به کار رفته نمی‌کاهد اما گشتاور متناسب با حجم ماشین افزایش می‌یابد. تعداد این قسمت‌ها در هر فاز محدود به تکنولوژی ساخت، جنبه‌های اقتصادی و افزایش شار ناشی از افزایش شیارهای سیم‌پیچی است. به طور کلی تعداد این بخش‌ها وابسته به هندسه ماشین است. در یک مقایسه کلی هرچند که ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع دارای ضریب توان پایین با توجه به شار ناشی بالا هستند اما چگالی گشتاور بالاتری نسبت به ماشین‌های مغناطیس دائم دیگر دارند. در تکنولوژی تولید نیرو از باد تمایل به سمت ژنراتورهایی با ابعاد کوچکتر، نسبت توان به وزن بالا، قابلیت کنترل و نصب ساده، تعمیرات کمتر و توان خروجی بالا است. بنابراین، با توجه به مقایسه‌های صورت گرفته در این بخش ژنراتورهای مغناطیس دائم شار متقاطع بهترین گزینه برای اهداف نام برده هستند. در این پژوهش پس از توضیحات بیشتر در مورد ساختارهای مختلف ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع، به معرفی ژنراتور ۱ کیلوواتی مغناطیس دائم شار متقاطع با هسته‌های I شکل برای انجام مطالعات بیشتر مورد نظر این پژوهش پرداخته می‌شود. از موانع اصلی توسعه و کاربرد ژنراتورهای مغناطیس دائم شار متقاطع علی‌رغم داشتن مزیت‌های نام برده، عوامل مزاحمی مانند گشتاور دندانه-ای و ریپل گشتاور است. بنابراین، دو روش موثر جابه‌جایی قطب‌های روتور و تورب هسته‌های استاتور در زوایای بهینه محاسبه شده با استفاده از تحلیل فوریه برای کاهش گشتاور دندانه‌ای مطرح می‌شود. در نهایت با استفاده از نتایج حاصل از اندازه‌گیری مشخصه‌های نمونه ساخته شده، معتبر بودن مدل ارائه شده اثبات می‌گردد.



## فصل دوم:

مشخصه‌های ساختاری، عملکردی و ویژگی‌های ماشین‌های مغناطیس دائم  
شارم‌تقاطع

معمولا در سیستم‌های توربین بادی به منظور کاهش سرعت و افزایش گشتاور از جعبه دنده استفاده می‌شود که محدودیت‌هایی مانند اتلاف انرژی، کاهش بازده و افزایش هزینه تعمیر و نگهداری را به همراه دارد. یک روش حذف جعبه دنده استفاده از ژنراتورهای با تعداد قطب زیاد است. ماشین‌های شار متقاطع در دسته ماشین‌های با تعداد قطب زیاد و گشتاور بالا هستند.

ماشین‌های شار متقاطع یکی از انواع ماشین‌های سنکرون هستند که در آن‌ها مسیر شار سه بعدی و به صورت عمود بر جهت حرکت روتور و جهت جریان است و چون مسیر شار در هسته‌های استاتور در این نوع ماشین‌ها کوتاه‌تر از ماشین‌های معمولی است چگالی شار فاصله هوایی در مقایسه با سایر ماشین‌های الکتریکی بیشتر است [۶-۷]. این امر سبب شده تا ماشین‌های شار متقاطع دارای ویژگی‌ها و مزایای منحصر بفردی نظیر الگوی سیم‌پیچی ساده، عدم وابستگی تعداد قطب و فضای سیم‌پیچی و چگالی توان بالا و ... شود. اما به دلیل معایبی مانند ضریب توان پایین و پیچیدگی ساخت، به مدت طولانی از زمان مطرح شدن این نوع ماشین‌ها، کنار گذاشته شدند. با پیشرفت علوم در زمینه ادوات الکترونیک قدرت و ارائه راه‌کارهای متعدد به منظور بهبود معایب، مجددا در سال‌های اخیر ماشین‌های شار متقاطع، مورد توجه گسترده قرار گرفته‌اند.

از زمان مطرح شدن تئوری ماشین‌های شار متقاطع توسط آقای Weh در سال ۱۹۸۶، تغییرات بسیاری در ساختار این‌گونه ماشین‌ها صورت گرفته است. در تحقیقات انجام شده آن‌چه بیشتر مورد توجه قرار گرفته است یافتن ساختار هندسی مناسب برای کاهش ریپل گشتاور و شار نشتی و نیز بهینه کردن هسته‌های استاتور و روتور برای افزایش کارایی ماشین بوده است [۸-۱۰]. در سال‌های اخیر تحقیقات وسیعی در زمینه ماشین‌های شار متقاطع انجام گرفته است. این تحقیقات را می‌توان در دو زمینه طراحی هندسه مناسب به منظور بهبود در عملکرد ماشین و همچنین مدل‌سازی و طراحی و بهبود مشخصه‌های الکترومغناطیسی ماشین تقسیم بندی نمود.

ماشین‌های شار متقاطع را می‌توان براساس نوع حرکت به دو نوع خطی و دوار دسته‌بندی کرد. ماشین‌های شار متقاطع مغناطیس دائم خطی، به دلیل چگالی نیرو و بازده بالای آن‌ها در کاربردهای متنوعی از جمله رباتیک مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۱-۱۳]. اصولاً سیم‌پیچی و آهنرباها در ماشین‌های مغناطیس دائم خطی، به صورت جداگانه در اولیه و ثانویه قرار می‌گیرند. بنابراین، این نوع ماشین‌ها در کاربردهای حمل و نقل طولانی از نظر اقتصادی مناسب نیستند [۱۴]. یک راه حل مناسب برای کاهش هزینه در کاربردهای حمل و نقل طولانی نصب آهنرباها و سیم‌پیچی در اولیه و یا ثانویه کوتاه است. برای این منظور ماشین‌های خطی FRPM<sup>۱</sup> انتخاب مناسبی در کاربردهای حمل و نقل طولانی هستند [۱۵]. هرچند از جمله معایب این ساختارها می‌توان به خطر مغناطیس زدایی در آهنرباها به دلیل سری شدن جهت مغناطیس شوندگی آهنرباها با میدان آرمیچر اشاره نمود [۱۶]. ماشین‌های شار متقاطع مغناطیس دائم خطی همانند دیگر ماشین‌های خطی دارای دو محدودیت مهم: (۱) نیروی جاذبه قوی بین اولیه و ثانویه و (۲) اثر انتهایی هستند. ساختارهای متعددی برای برطرف نمودن این محدودیت‌ها مطرح شده‌اند، که در مراجع [۱۷-۱۹] می‌توان اطلاعات بیشتری از این ساختارها به دست آورد. در موارد بسیاری برای بهبود ماشین‌های شار متقاطع، ساختار این نوع ماشین‌ها را با ساختار ماشین‌های دیگر ترکیب می‌کنند که همه این نوع ماشین‌ها را تحت عنوان ماشین‌های شار متقاطع می‌شناسیم.

- ماشین‌های شار متقاطع سنکرون رلوکتانسی [۲۰]
- ماشین‌های شار متقاطع سوئیچ رلوکتانس [۲۱]
- ماشین‌های شار متقاطع سوئیچ رلوکتانس با مغناطیس دائم کمکی [۲۲]
- ماشین‌های شار متقاطع فلاکس سوئیچینگ با مغناطیس دائم کمکی [۲۳] و [۲۴]
- ماشین‌های شار متقاطع رلوکتانسی با مغناطیس‌های دائم کمکی [۲۵]

---

1 Flux Reversal Permanent Magnet

## ۲-۲- ساختار ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع

در این پژوهش ماشین‌های شار متقاطع مغناطیس دائم برای انجام مطالعات بیشتر انتخاب شده است. با این حال، بسیاری از مطالب این پژوهش جنبه عمومی دارد و در مورد دیگر ساختارها نیز قابل استفاده است. ماشین‌های شار متقاطع مغناطیس دائم اساساً دارای ساختاری با مغناطیس‌های دائم دوار همراه با مجموعه هادی‌های حامل جریان است. در این ماشین‌ها به منظور ثابت ماندن جهت گشتاور در یک جهت، باید پلاریته جریان هادی‌ها در هر زمان که یک قطب مغناطیسی از روبروی آن عبور می‌کند، معکوس شود.

ماشین‌های شار متقاطع مغناطیس دائم را می‌توان براساس ساختار روتور، ساختار استاتور، مسیر شار فاصله هوایی، ساختارهای چند فاز و سیم‌پیچی طبقه بندی کرد:

### ۲-۲-۱- ساختار روتور<sup>۱</sup>

ماشین‌های شار متقاطع را می‌توان براساس ساختار روتور به صورت زیر طبقه بندی کرد:

- ✓ روتور رینگی<sup>۲</sup> و یا دیسکی<sup>۳</sup> شکل
- ✓ روتور اکتیو<sup>۴</sup> و یا پسیو<sup>۵</sup>
- ✓ روتور داخلی<sup>۶</sup>، خارجی<sup>۷</sup> و یا روتور ساندویچی<sup>۸</sup> [۵]
- ✓ آهنرباهای سطحی<sup>۹</sup>، شار متمرکز<sup>۱۰</sup> و یا قطب‌های متوالی<sup>۱۱</sup>

- 
- 1 Rotor Structure
  - 2 Ring Shaped Rotor
  - 3 Disk Shaped Rotor
  - 4 Active Rotor
  - 5 Passive Rotor
  - 6 Inner Rotor
  - 7 Outer Rotor
  - 8 Sandwich Rotor
  - 9 Surface Mounted PMs
  - 10 Flux Concentrated PMs
  - 11 Consequent Poles

ساختار روتور رینگی (سیم‌پیچی تروئیدال) شکل به صورت استوانه‌های تو در تو بوده و سطح فاصله هوایی به صورت پوسته استوانه‌ای شکل است. بنابراین، جهت شار گذرنده از سطح فاصله هوایی به صورت شعاعی است. در ساختار روتور دیسکی، سطح فاصله هوایی به صورت استوانه‌ای است که قطر آن بزرگتر از طولش است و این دیسکی بودن باعث می‌شود که جهت شار عبوری از سطح فاصله هوایی به صورت محوری باشد. بنابراین، سطح موثر فاصله هوایی در ساختار روتور دیسکی شکل بیشتر از ساختار روتور رینگی شکل است. بنابراین، دارای رلوکتانس فاصله هوایی کمتر و چگالی گشتاور بیشتر در مقایسه با ساختار روتور رینگی شکل است. اما در ساختار روتور دیسکی شکل تنظیم فاصله هوایی و ساخت هسته‌های ورقه ورقه شده بسیار پیچیده است.

در ساختار روتور اکتیو میدان الکتریکی در روتور توسط مغناطیس‌های دائم و یا سیم‌پیچ‌های روتور به وجود می‌آید. در ساختار روتور پسیو هیچ گونه منبع تحریکی در سمت روتور وجود ندارد. هرچند که استاتور باید به گونه‌ای روتور را با خود همراه کند که این مهم می‌تواند به کمک گشتاور رلوکتانسی و یا انتقال میدان تحریک به سمت استاتور مانند ساختارهای شار سوئیچ شونده و FRPM امکان پذیر شود.

نوع روتور خارجی، دارای مقاومت سیم‌پیچی کمتر (مقاومت سیم‌پیچی با شعاع سیم‌پیچی رابطه مستقیم دارد.) و شار نشتی کمتر در مقدار آهنربای یکسان در مقایسه با ساختار روتور داخلی است [۲۶]. ساختار روتور خارجی پیچیده‌تر بوده و همچنین بدلیل واقع شدن سیم‌پیچی دور از مسیر عبور هوا، انتقال حرارت به سختی صورت می‌پذیرد. علاوه بر این امکان ساخت ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع با ساختار دو روتوره نیز وجود دارد [۲۷-۲۸]. در مرجع [۲۹]، یک ماشین مغناطیس دائم شار متقاطع دو روتوره با سرعت‌های متفاوت طراحی شده است. ساختار این ماشین بسیار مناسب برای خودروهای الکتریکی است.

جهت مغناطیس شوندگی آهنرباهای روتور می‌تواند به صورت موازی با فاصله هوایی (آهنربای سطحی) و یا به صورت عمود بر فاصله هوایی (شار متمرکز) باشد. در ماشین‌های مغناطیس دائم با آهنرباهای سطحی آهنرباها روی سطح قرار می‌گیرند و پرکاربردترین ساختار روتور را این نوع ماشین‌ها دارا هستند. بزرگترین عیب این ماشین‌ها، ناپایداری آن‌ها در برابر میدان‌های مغناطیس زداست. همچنین در این نوع، آهنرباها تحت نیروی گریز از مرکز شدیدی است و از آنجا که ضریب نفوذ پذیری هوا با آهنرباها یکی است راکتانس محورهای  $d$  و  $q$  یکسان است و گشتاور تولید شده تنها ناشی از تاثیر متقابل بین جریان استاتور و آهنرباهای روتور است. شار ناشی بین هسته‌های استاتور و آهنرباهای روتور در نوع شار متمرکز کمتر از آهنربای سطحی است [۵]. بنابراین، ساختار شار متمرکز چگالی گشتاور بیشتری در مقایسه با ساختار آهنربای سطحی دارد [۳۰-۳۲]. یکی از مهم‌ترین مزیت‌های ساختار شار متمرکز امکان استفاده از آهنرباهای فریتی است [۳۳-۳۴]. پراکندگی شار بین قطب‌های مجاور در ساختار شار متمرکز در مقایسه با ساختار آهنربای سطحی به شدت کاهش می‌یابد. استفاده از تکنیک شار متمرکز، میزان آزادی بیشتری در انتخاب ابعاد آهنرباها ایجاد می‌کند. در ساختار شار متمرکز، می‌توان عرض آهنرباها را بدون تغییر در گام قطب، افزایش داد. یکی از مهم‌ترین مزایای ماشین‌های شار متمرکز این است که چگالی شار در فاصله هوایی می‌تواند به بالاتر از چگالی شار پسماند آهنرباهای دائم رتور نیز برسد. ساختار قطب‌های متوالی پیشنهاد شده در مرجع [۳۵]، ترکیبی از دو ساختار شار متمرکز و آهنربای سطحی است. این ساختار نوعی ساختار آهنربای سطحی است که مواد نرم مغناطیسی جایگزین قطب‌های  $S$  آن شده است. در نتیجه راکتانس محورهای  $d$  و  $q$  یکسان نیست. در این ساختار راکتانس محور  $d$  متغیر با زمان است. از مزیت‌های این ساختار می‌توان به حجم آهنربای کم به کار برده شده و اضافه شدن گشتاور رلوکتانسی به گشتاور کل اشاره نمود.

## ۲-۲-۲- ساختار استاتور<sup>۱</sup>

ماشین‌های شار متقاطع را می‌توان براساس ساختار روتور به صورت زیر طبقه بندی کرد:

✓ شکل هسته‌ها شامل C, U, E, Z شکل و ساختار قطب چنگالی<sup>۲</sup>

✓ استاتور با هسته‌های یک طرفه<sup>۳</sup> و یا دو طرفه<sup>۴</sup>

ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع با هسته‌های U شکل، ساختار اصلی و پایه ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع را تشکیل می‌دهند. نشان داده شده است که در توان‌های مساوی، ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع با هسته‌های C شکل دارای جرم کمتری در مقایسه با ساختار U شکل است [۳۶]. در ساختارهای معمولی ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع با هسته‌های U، C و E شکل، گام قطب در هسته‌های استاتور دو برابر گام قطب در آهنرباهای روتور است [۳۷]. اخیراً ساختارهای مغناطیس دائم شار متقاطع با هسته‌های Z شکل و یا ساختارهای پیوند دو طرفه<sup>۲</sup> با شکل هسته‌های منحصر بفرد ارائه شده است که در آن‌ها گام قطب استاتور با گام قطب روتور برابر است [۳۸-۳۹]. ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع با ساختار هسته‌های Z شکل مزیت‌های بسیاری در مقایسه با ساختارهای معمول ماشین‌هایی مغناطیس دائم شار متقاطع دارند که از جمله آن‌ها می‌توان به کاهش سیم پیچ انتهایی، کاهش شار نشت حاشیه‌ها و آهنرباها، و بهبود مشخصه حرارتی اشاره کرد [۴۰]. تلفات مسی، جرم فعال و هزینه در ماشین مغناطیس دائم شار شعاعی و چهار نوع از ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع در مرجع [۴۱] مورد بررسی قرار گرفته‌اند. بر اساس مقایسات صورت گرفته ماشین مغناطیس دائم شار متقاطع با ساختار دو طرفه و یک سیم پیچی با هسته‌های C شکل بهتر از انواع دیگر و ماشین مغناطیس دائم شار شعاعی است.

---

1 Stator Structure  
2 Clawpole  
3 Single Sided Structure  
4 Double Sided Structure  
1 Bidirectional Cross linking

ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع با ساختار استاتور دو طرفه بازده، ضریب توان و گشتاور خروجی بالاتری در مقایسه با ساختارهای یک طرفه به دلیل استفاده بهتر از فضای ماشین دارند [۴۲]. ساختارهای دوطرفه پیچیده‌تر بوده و تنها در کاربردهای تک‌فاز و یا دو فاز می‌توان از این نوع استفاده کرد [۴۳]. اگرچه ساختارهای یک طرفه از ضریب توان پایین رنج می‌برند ولی به راحتی می‌توان آن‌ها را برای ساختارهای سه فاز طراحی کرد [۴۴-۴۵]. ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع قطب چنگالی سادگی ساختار یک طرفه را دارند به‌گونه‌ای که هسته‌های استاتور در یک سمت روتور واقع شده‌اند و از سوی دیگر عملکرد و بازده بالایی نظیر انواع دو طرفه دارند. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های نوع قطب چنگالی ساخت دشوار استاتور با هسته‌های ورقه ورقه شده است [۴۶-۴۷]. امروزه به منظور ساخت هسته‌های ماشین‌های شار متقاطع از یک نوع ماده مغناطیسی نرم به نام SMC<sup>۱</sup> به جای هسته‌های ورقه ورقه شده استفاده می‌شود. این مواد رسانایی الکتریکی پایینی دارند که سبب تلفات گردابی پایین در این مواد می‌شود. اما دارای تلفات هیستریزیس بیشتری نسبت به هسته‌های ورقه ورقه شده است. همچنین اندازه چگالی شار در ناحیه اشباع و نفوذ پذیری مغناطیسی آن‌ها کمتر از هسته‌های ورقه ورقه شده است.

## ۲-۲-۳- ساختار سیم‌پیچی<sup>۲</sup>

ماشین‌های شار متقاطع را می‌توان براساس ساختار سیم‌پیچ به صورت زیر طبقه بندی کرد:

✓ سیم‌پیچ رینگ<sup>۲</sup>

✓ سیم‌پیچ قطبی<sup>۴</sup>

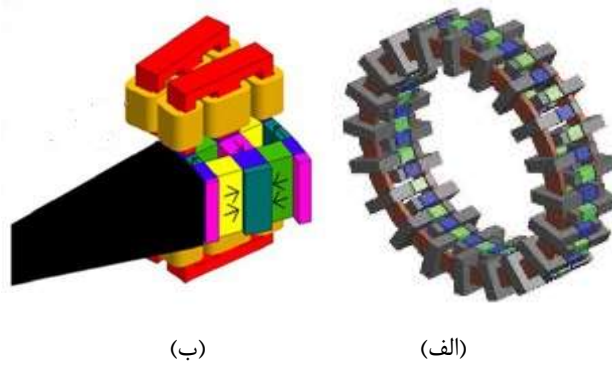
عموما سیم‌پیچ رینگ<sup>۲</sup> به عنوان سیم‌پیچ ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع شناخته شده‌اند (شکل

۲-۱ الف)).

---

1 Winding Structure  
2 Ring Winding  
3 Pole Winding





شکل (۱-۲): طرح سیم‌پیچ، (الف) سیم‌پیچ رینگی [۵] (ب) سیم‌پیچ قطبی [۴۸]

نوع دیگری از سیم‌پیچ که می‌توان به جای سیم‌پیچ رینگی در ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع استفاده کرد سیم‌پیچ قطبی است (شکل ۱-۲ (ب)) [۴۸]. اگرچه در سیم‌پیچ رینگی هیچ فضای اضافی برای سیم‌پیچ انتهایی وجود ندارد اما در هر لحظه نیمی از آهنرباها در این نوع غیر فعال بوده و در نتیجه سبب افزایش وزن مواد فعال ماشین می‌شود [۴۹]. از دیگر مزایای ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع با سیم‌پیچ رینگی در مقایسه با سیم‌پیچ قطبی، امکان افزایش تعداد قطب‌های روتور بدون تاثیر بر فضای شیار سیم‌پیچ است [۵۰].

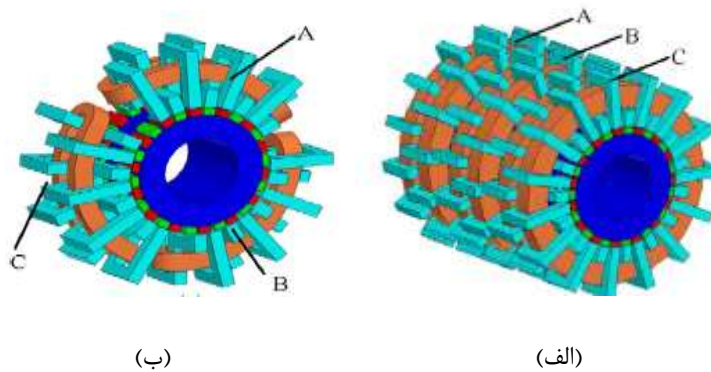
علاوه بر دو ساختار متداول سیم‌پیچی ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع، اخیراً طرح سیم‌پیچی جدیدی برای این نوع ماشین‌ها به منظور انعطاف پذیر کردن توان و گشتاور آن‌ها پیشنهاد شده است [۵۱]. تنظیم شار فاصله هوایی برای کنترل توان بسیاری از ماشین‌های الکتریکی اهمیت بسیاری دارد. به عنوان مثال در وسایل نقلیه الکتریکی و هیبریدی توان ثابت در هر رنج سرعتی مورد نیاز است. در مرجع [۵۲] یک ماشین مغناطیس دائم شار متقاطع با سیم‌پیچ تحریک طراحی شده است که قابلیت کم و زیاد شدن توان توسط کنترل میدان آهنرباهای روتور را دارد.

## ۲-۲-۴- ساختارهای چند فاز<sup>۱</sup>

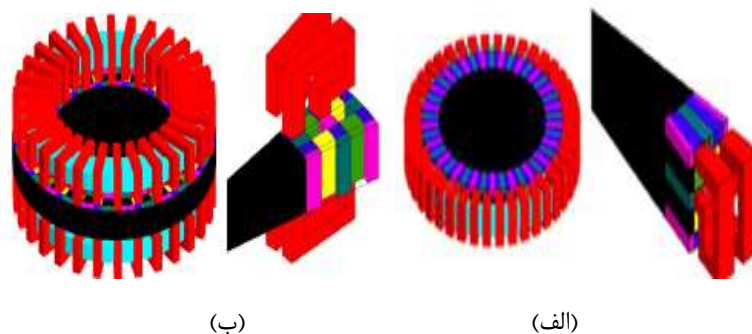
ساختارهای چند فاز هرچند که دارای ساختار اینورتر پیچیده تر و گران تری نسبت به نوع تکفاز هستند اما دارای ریپل کمتری نسبت به نوع تکفاز بوده و همچنین ساختارهای تکفاز قابلیت خود راه اندازی ندارند. بنابراین، در ساختارهای درایو مستقیم پیشنهاد می شود که از نوع چندفاز استفاده شود. دو نوع ساختار برای ماشین های مغناطیس دائم شار متقاطع سه فاز مطرح شده است که قابل تعمیم برای فازهای بیشتر هستند.

✓ ساختار سه فاز محوری

✓ ساختار سه فاز محیطی



شکل (۲-۲): ساختارهای چند فاز، (الف) ساختار سه فاز محوری، (ب) ساختار سه فاز محیطی [۳۹]



شکل (۲-۳): ساختار فاصله هوایی، (الف) شار فاصله هوایی شعاعی، (ب) شار فاصله هوایی محوری [۴۸].

ساختار سه فاز محوری دارای سیم پیچ تروئیدال بوده و سه فاز توسط یک محور ثابت شده اند (شکل ۲-۲ الف)). در این حالت سه فاز کاملاً از یکدیگر مستقل هستند. این نوع ساختارهای سه فاز ماشین-های مغناطیس دائم شار متقاطع برای راه‌اندازی آسان‌تر، عملکرد بهتر و قابلیت اطمینان بالاتر ارائه شده‌اند. همچنین به دلیل عملکرد مجزای فازها در ماشین مغناطیس دائم شار متقاطع، کنترل این نوع ماشین‌ها بسیار ساده است. با توجه به ساختار تکفاز و با طراحی مناسب می‌توان انزوای حرارتی و مغناطیسی بین فازها ایجاد کرد و همچنین انزوای الکتریکی را می‌توان با تغذیه جداگانه هریک از فازها با مبدل‌های الکترونیک قدرت جداگانه بدست آورد و در نتیجه قابلیت تحمل خطا را بالا برد.

ساختار سه فاز محیطی بخش‌های استاتور کمتری اما بزرگتر و سنگین‌تر برای تولید گشتاور یکسان در مقایسه با ساختار سه فاز محوری دارد. اما در ساختار سه فاز محیطی قطر روتور سه برابر حالت سه فاز محوری است. هسته‌های استاتور این نوع ساختار سه فاز بیشتر از نوع Z و E شکل است. در ساختار سه فاز محیطی به دلیل اضافه شدن مسیر شار جدید، اندوکتانس خودی افزایش می‌یابد. بنابراین، ضریب توان در این ساختار کمتر از ساختار سه فاز محوری است. در ساختار سه فاز محیطی به فضای اضافی برای سیم‌پیچ انتهایی نیاز است (شکل ۲-۲ ب)). در نتیجه حجم سیم‌پیچ استفاده شده در این نوع بیشتر از نوع سه فاز محوری است [۵۳] و [۵۴]. یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های عدم تعادل نیروهاست که سبب لرزش و در نهایت کم شدن عمر ماشین می‌شود.

### ۲-۲-۵- ساختار فاصله هوایی<sup>۱</sup>

ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع را می‌توان براساس نوع فاصله هوایی به دو نوع زیر طبقه بندی کرد.

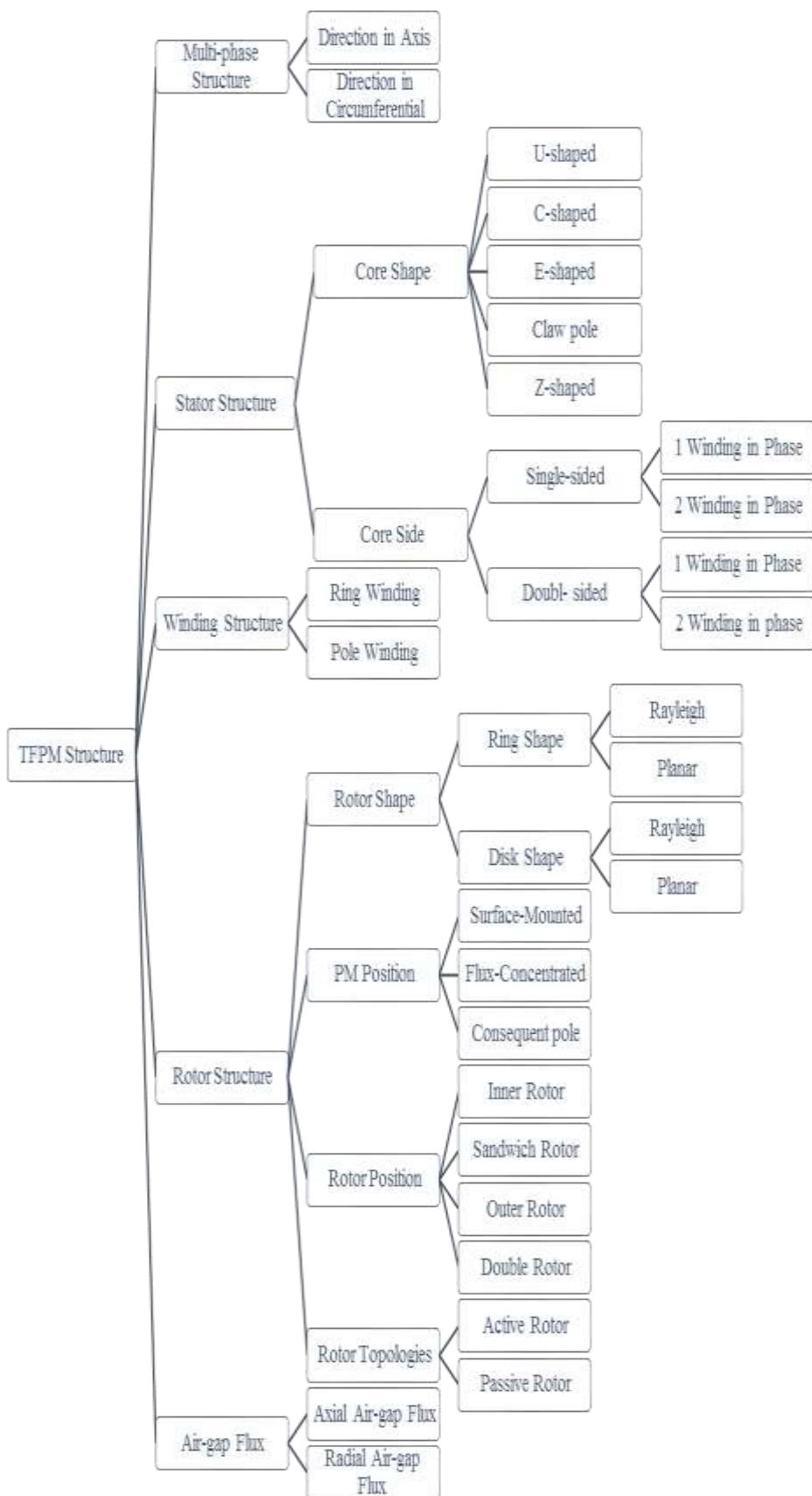
- 
- 1 Air-gap Structure
  - 2 Axial Air-gap Structure
  - 3 Radial Air-gap Structure

✓ فاصله هوایی محوری<sup>۲</sup>

✓ فاصله هوایی شعاعی<sup>۳</sup>

ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع با فاصله هوایی شعاعی (شکل ۳-۲ (الف)) مناسب برای ساختارهای یک طرفه و ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع با فاصله هوایی محوری (شکل ۳-۲ (ب)) برای ساختارهای دو طرفه مناسب تر هستند [۴۸].

در شکل (۴-۲)، ساختارهای مختلف ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع نشان داده شده است.



شکل (۲-۴): ساختارهای مختلف ماشین های مغناطیس دائم شار متقاطع

## ۲-۳- ویژگی‌های مهم ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع

### ۲-۳-۱- ریپل گشتاور بالا

گشتاور دندانه‌ای به عنوان گشتاور بدون جریان شناخته شده است، این گشتاور از تداخل بین شار مغناطیسی تولیدی روتور توسط آهنرباها و تغییر زاویه‌ای مقاومت مغناطیسی استاتور در ماشین‌های آهنربای دائم به وجود می‌آید و وابسته به موقعیت به صورت دوره‌ای تولید می‌شود. در ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع معمولاً تعداد قطب‌های استاتور و تعداد قطب‌های روتور مضرب صحیح یکدیگرند به همین دلیل تغییرات رلوکتانس فاصله هوایی و گشتاور دندانه‌ای در اینگونه ماشین‌ها قابل ملاحظه است [۵]. هرچند به علت عدم نیاز به هیچ گونه جاروبک مکانیکی یا حلقه‌های لغزان در ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع، تمامی ریپل‌های مکانیکی به استثنای ریپل‌های مربوط به بلبرینگ<sup>۱</sup>ها، کوپلینگ‌ها و بار حذف می‌شوند. بنابراین، در این سیستم به علت عدم حضور جاروبک‌ها و حلقه‌های لغزان، طول عمر ماشین وابسته به طول عمر عایقی بلبرینگ‌ها و عمر مغناطیس‌های دائم است.

ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع نوع آهنربای داخلی دارای چگالی گشتاور بالاتری نسبت به نوع آهنربای سطحی است هرچند که نوع آهنربای سطحی بدلیل عدم وجود قطب‌های نرم مغناطیسی در روتور، تغییرات رلوکتانس فاصله هوایی و در نتیجه گشتاور دندانه‌ای کمتری نسبت به نوع شار متمرکز دارد. یکی از مسائل مهم در ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع خصوصاً در نوع آهنربای داخلی کاهش گشتاور دندانه‌ای است. در صورت بی توجهی به میزان دامنه این گشتاور مزاحم در هنگام طراحی، ممکن است راه اندازی موتور با مشکل مواجه شود و یا در صورت راه اندازی، حرکت موتور با ارتعاش و نویز همراه باشد. بطور معمول با کاهش تغییرات رلوکتانس فاصله هوایی و کاهش هارمونیک‌های مزاحم موجود در گشتاور، ریپل گشتاور کاهش می‌یابد. هرچند که کاهش گشتاور دندانه‌ای سبب کاهش شار پیوندی و در نتیجه کاهش گشتاور متوسط الکترومغناطیسی می‌شود. مطالعات بسیاری برای کاهش

---

1 Ballbearing

گشتاور دندانه‌ای توسط پژوهشگران انجام شده است. در مرجع [۵۵] تاثیر شکل دهی مناسب قطب‌های رتور و استاتور بر روی ریپل گشتاور در ساختار ماشین شار متقاطع بررسی شده و یک روش موثر به منظور کاهش ریپل گشتاور ارائه شده است. اکثر روش‌های کاهش گشتاور دندانه‌ای به شرح زیر است.

✓ استفاده از پل‌های مغناطیسی [۵۶].

✓ روش جابه‌جایی<sup>۱</sup>

✓ روش جابه‌جایی هسته‌های استاتور و عرض دندانه‌های نامساوی در هسته‌های استاتور در یک

فاز [۵۵].

✓ روش تورب<sup>۲</sup> هسته‌های استاتور و قطب‌های رتور [۵۸] و [۵۹].

✓ تورب هسته‌های استاتور و با فاصله‌های نامساوی از یکدیگر [۴۴]

در مرجع [۶۰] نشان داده شده است که با افزایش زاویه تورب هسته‌های رتور، ریپل گشتاور و گشتاور الکترومغناطیسی کاهش یافته است.

## ۲-۳-۲- ضریب توان پایین

یکی از مهم‌ترین محدودیت‌های ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع ضریب توان پایین بدلیل مسیر شار پیچیده سه بعدی است. نشان داده شده است که با افزایش نرخ جریان و اندوکتانس فازها، ضریب توان کاهش می‌یابد [۶۱] و [۴۴]. بنابراین افزایش MMF و یا بارگذاری الکتریکی سبب کاهش ضریب توان می‌شود. یکی از روش‌های کاهش شار نشتی، افزایش گام قطب است که باعث کاهش چگالی گشتاور ماشین می‌شود. برای این منظور، بهبود ضریب توان می‌تواند سبب کاهش چگالی گشتاور ماشین شود [۶۲]. بنابراین باید تعادلی بین آن‌ها برقرار شود.

---

1 Shifted method  
2 Skewed Method

ضریب توان پایین سبب محدودیت‌هایی همچون افزایش نرخ ولتاژ و جریان در سیستم اینورتر می‌شود [۶۳] و [۶۴]. از سوی دیگر، اندوکتانس سیم‌پیچی بالا در ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع که یکی از مهم‌ترین دلایل ضریب توان پایین است سبب افزایش نرخ سیستم اینورتر در این نوع ماشین‌ها می‌شود [۶۵]. یکی از ویژگی‌های مهم ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع خصوصا در ساختارهای چند فاز محوری، مستقل بودن هر یک از فازها از نظر الکترومغناطیسی است که سبب حذف اندوکتانس متقابل بین فازها می‌شود [۶۶]. علاوه بر این، در این ساختارها در صورت کوچک در نظر گرفتن فاصله بین فازها اندوکتانس متقابل بین فازها غیر قابل چشم‌پوشی است [۶۷]. یکی دیگر از محدودیت‌های کوچک در نظر گرفتن فاصله بین فازها، عدم تعادل بین فازها بوده به گونه‌ای که فاز میانی نسبت به دو فاز دیگر دارای اندوکتانس بزرگتری است [۶۸].

یکی از کلیدی‌ترین نکات در روند تحلیل و طراحی ماشین‌های الکتریکی تخمین و اندازه‌گیری شارهای ناشی است. شارهای ناشی به صورت زیر طبقه‌بندی می‌شوند.

(۱) شار ناشی بی‌باری که توسط آهنرباها بوجود می‌آیند.

(۲) شار ناشی عکس العمل آرمیچر

مهم‌ترین شارهای ناشی بی‌باری در ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع عبارتند از:

(۱) شار ناشی آهنربای مجاور هنگام تولید شار پیوندی توسط یک آهنربا [۶۹]

(۲) شار ناشی در راستای محیطی بین دو آهنربای مجاور [۶۳]

(۳) شار ناشی انتهایی در آهنرباها [۷۰]

(۴) شار ناشی بین قطب‌های استاتور

بنابراین کاهش شارهای ناشی به منظور افزایش ضریب قدرت بدون کاهش اثر متقابل بین قطب‌های روتور و استاتور در ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع از اهمیت بسیاری برخوردار است [۷۱]. تعدادی از روش‌های کاهش شارهای ناشی به صورت زیر مطرح می‌شوند.



✓ افزایش رلوکتانس بین دو آهنربا به منظور کاهش شار نشتی بین دو آهنربای مجاور [۷۲]

✓ شکل‌دهی مناسب قطب‌ها به منظور کاهش انحرافات شار در فاصله هوایی [۷۳] و [۸۱]

✓ استفاده از پل‌های مغناطیسی به منظور جلوگیری از نشت شار آهنربای غیر فعال

یکی از مزایای مهم ساختار شار متمرکز نسبت به ساختار آهنربای سطحی، شار نشت بسیار کم بین آهنرباهای روتور و هسته‌های استاتور است. بنابراین، ساختار شار متمرکز با هسته‌های I شکل برای انجام مطالعات بیشتر در این پژوهش انتخاب شده است.

### ۲-۳-۳- چگالی گشتاور بالا

ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع از چگالی گشتاور حدود سه تا پنج برابر بیشتر از ماشین‌های معمول DC، سنکرون و آسنکرون برخوردار هستند [۷۴]. درحالی‌که از لحاظ وزن سه تا پنج برابر سبک‌تر از سایر انواع ماشین‌های الکتریکی با توان یکسان هستند. نسبت توان تولیدی به کل وزن ماشین برای ماشین‌های شار متقاطع با روتور اکتیو بین محدوده ۰/۵ تا ۲ کیلووات بر کیلوگرم است، درحالی‌که این نسبت برای ماشین‌های معمول ذکر شده حدود ۰/۲۴ تا ۰/۸ کیلووات بر کیلوگرم گزارش شده است [۷۵]. در این نوع ماشین‌ها چگالی گشتاور به راحتی با استفاده از افزایش تعداد قطب‌ها، کاهش مواد مصرفی و همچنین افزایش بارگذاری‌های الکتریکی و یا مغناطیسی بدون تاثیر متقابل بریکدیگر امکان پذیر است. در ادامه به بررسی هر کدام از این موارد می‌پردازیم. یک راه‌کار بسیار موثر برای افزایش چگالی گشتاور کلیه ماشین‌های الکتریکی، کاهش فاصله هوایی می‌باشد. کاهش فاصله هوایی منجر به افزایش دامنه ولتاژ داخلی می‌شود هرچند که افزایش گشتاور دندانه‌ای و مسائلی مانند ناهم محوری کاهش طول فاصله هوایی را محدود می‌کند.

### ۲-۳-۳-۱- افزایش تعداد قطب‌ها

برخلاف ماشین‌های متداول، توپولوژی ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع به‌گونه‌ای است که امکان افزایش تعداد قطب‌ها، بدون کاهش شار پیوندی وجود دارد [۷۳]. با ثابت ماندن شار پیوندی و افزایش تعداد قطب‌ها (یا همان فرکانس)، نرخ تغییرات شار پیوندی سیم‌پیچ استاتور افزایش می‌یابد و

در نتیجه ولتاژ القایی بی‌باری نیز افزایش می‌یابد [۷۶]. همچنین، بدلیل وجود شار هموپلار در هسته‌های استاتور ماشین مغناطیس دائم شار متقاطع، امکان افزایش تعداد قطب‌ها در حجم و مقدار مواد مصرفی یکسان (حجم، ارتفاع، مس و مواد نرم مغناطیسی یکسان) وجود دارد [۷۷-۷۸]. هرچند که افزایش تعداد قطب‌ها سبب افزایش شار نشتی و جریان ماشین می‌شود و در نتیجه کاهش ضریب توان را به همراه دارد. در ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع نیمی از قطب‌های روتور در تولید نیرو محرکه در سیم‌پیچی‌ها نقش دارند. مغناطیس‌های دائمی که در مقابل دندانه‌های استاتور قرار دارند، شار مفیدی را در اطراف سیم‌پیچی‌های استاتور ایجاد می‌کنند، در حالی که مغناطیس‌های دائمی که مقابل دندانه‌های استاتور قرار ندارند، باعث پراکندگی شار در هوا می‌شوند. بنابراین اگر گام قطب در این ماشین‌ها به قدر کافی کوچک انتخاب شود، با افزایش جریان بارگذاری، باعث بهبود این مشکل می‌شود. با قاطعیت می‌توان گفت در هیچ ماشین طولی این مسئله به این شکل قابل حل نیست. وجود گام قطب کوچک در ساختار ماشین‌های شار متقاطع با مغناطیس‌های دائم سطحی، طول فاصله هوایی موثر و در نتیجه اثر لبه عکس‌العمل آرمیچر را افزایش می‌دهد. بخش بزرگی از شار آرمیچر به بیرون از نواحی قطب‌ها نشت می‌کند و بخش بزرگی از شار ایجاد شده توسط مغناطیس‌های دائم وارد هسته استاتور نمی‌شود بلکه به مغناطیس‌های دائم کناری نشت می‌کند. این موضوع باعث کاهش چگالی شار بی‌باری و در نتیجه کاهش ولتاژ بی‌باری می‌شود. از سوی دیگر افزایش تعداد قطب‌ها محدود به عرض قطب بوده و تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر تلفات مسی و آهنی دارد [۴۹] و [۳۲]. بنابراین، افزایش تعداد قطب‌ها، تا جایی که ملاحظات مکانیکی و نشت شار اجازه دهد، سبب افزایش ولت-آمپر ماشین می‌شود. این موضوع در مورد ماشین‌های متداول صادق نیست و افزایش تعداد قطب‌ها تاثیری در ولت-آمپر این ماشین‌ها ندارد. این ویژگی ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع باعث شده است که چگالی توان این ماشین‌ها نسبت به ماشین‌های متداول بیشتر باشد. بنابراین، یکی از نکات کلیدی در طراحی ماشین‌های شار متقاطع انتخاب تعداد قطب‌ها است زیرا علاوه بر تاثیر مستقیم بر چگالی گشتاور بر ضریب توان نیز تاثیر می‌گذارد. از سوی دیگر، با افزایش تعداد قطب‌ها خنک‌سازی این نوع ماشین‌ها اهمیت ویژه‌ای می‌یابد اما

در سیستم‌های توربین بادی به علت عدم عملکرد مداوم ژنراتور در نقطه کار نامی خود، ملاحظات گرمایی در طراحی را می‌توان نادیده گرفت.

## ۲-۳-۳-۲- کاهش مواد مصرفی و استفاده بهتر از فضای ماشین

ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع دارای ساختار مدولار بوده و هیچ‌گونه یوغ اضافه‌ای در هسته‌های استاتور وجود ندارد. این ویژگی‌ها سبب افزایش چگالی گشتاور این نوع ماشین‌ها در مقایسه با سایر ماشین‌های الکتریکی است. یکی دیگر از روش‌های افزایش چگالی گشتاور استفاده بهتر از فضا و کاهش جرم مواد فعال ماشین است که سبب جذابیت هرچه بیشتر این نوع ماشین‌ها در کاربرد ژنراتورهای سیستم‌های بادی می‌شود [۷۹]. برای کاهش مقدار مواد الکترومغناطیسی می‌توان مسیر شار مغناطیسی را کوتاه کرد و این با کوتاه کردن گام شیار و عمق شیار محقق می‌شود. در ماشین‌های مغناطیس دائم شار محوری و شار شعاعی با کوتاه شدن گام شیار گام قطب نیز کوتاه می‌شود در نتیجه شار نشتی افزایش می‌یابد. بنابراین در ماشین‌های مغناطیس دائم شار محوری و شار شعاعی امکان کاهش مقدار مواد الکترومغناطیسی با کوتاه کردن مسیر شار وجود ندارد. اما ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع برای کاهش مواد مناسب ترند زیرا با کوتاه شدن گام شیار گام قطب کوتاه نمی‌شود. ساختارهای متعددی به منظور کاهش وزن مواد فعال ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع با استفاده از روش کوتاه کردن مسیر شار مغناطیسی مطرح شده‌اند، که در مراجع [۸۰] و [۳۶] می‌توان اطلاعات بیشتری از این ساختارها به دست آورد. همچنین استفاده از مواد HTS<sup>۱</sup> سبب کاهش وزن و تلفات در ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع می‌شود [۸۱]. با این حال، ملاحظات گرمایی به منظور استقامت اجزای ماشین در دمای کار کرد ماشین یکی از مهم‌ترین نکاتی است که هنگام کاهش وزن ماشین بایستی مورد توجه قرار گیرد.

در ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع در هر لحظه تنها نیمی از آهنرباها در تولید شار پیوندی و در نتیجه تولید ولتاژ داخلی مشارکت می‌کنند و نیمی دیگر غیر فعال هستند. این آهنرباهای غیر فعال برای تولید شار هموپلار در هسته‌های استاتور مورد نیاز هستند. به منظور جلوگیری از این مشکلات، می‌توان مسیرهای فرعی شار بین هر یک از زوج قطب‌ها قرار داد تا از نشت شار و تضعیف شار اصلی جلوگیری شود. اضافه کردن این مسیرها علاوه بر کاهش شار نشتی و جلوگیری از تضعیف شار، باعث افزایش توان و گشتاور خروجی و کاهش گشتاور دندانه‌ای نیز می‌شود. اما باعث افزایش وزن ماشین و همچنین کاهش فضای مربوط به سیم پیچی استاتور می‌شود.

ساختارهای متعددی برای کاهش فضای بلااستفاده و ایجاد مسیرهای فرعی شار در ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع همانند دو ساختار قطب‌های متوالی و فال بک<sup>۱</sup> ارائه شده‌اند [۳۵]، [۵۵] و [۸۲].

### ۲-۳-۳-۳- مستقل بودن بارگزاری‌های الکتریکی و مغناطیسی

مقدار گشتاور تولیدی در این ماشین‌ها بستگی به شدت میدان مغناطیسی تولید شده توسط مغناطیس‌های دائم و جریان بارگزاری دارد. تفاوت اصلی ماشین‌های شار متقاطع با ماشین‌های شار شعاعی و شار محوری در این است که در ماشین‌های شار متقاطع امکان افزایش فضای سیم‌پیچی، بدون کاهش مسیر عبوری شار وجود دارد. در ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع بارگزاری مغناطیسی وابسته به قطر فاصله هوایی بوده و بارگزاری الکتریکی وابسته به طول محوری ماشین است در حالی که در ماشین‌های شار شعاعی بارگزاری الکتریکی و مغناطیسی وابسته به قطر فاصله هوایی‌اند که این وابستگی سبب محدودیت در طراحی می‌شود [۴۱]. چگالی توان و گشتاور بالا در ماشین‌های شار متقاطع با استفاده از بارگزاری مغناطیسی و یا الکتریکی بالا به دست می‌آیند [۶۶]. بارگزاری مغناطیسی با استفاده از افزایش گام قطب و تعداد قطب امکان پذیر بوده و بارگزاری الکتریکی با استفاده از افزایش MMF امکان پذیر

---

1 Fall Back

است [۸۳]. بنابراین، با افزایش بارگزاری الکتریکی و یا مغناطیسی بدون هیچ تاثیری بر یکدیگر، چگالی گشتاور افزایش می‌یابد. شایان ذکر است که تعداد قطب زیاد و بارگزاری الکتریکی بالا سبب افزایش شار نشستی و کاهش شار پیوندی و در نتیجه کاهش ضریب توان می‌شود.

با توجه به توضیحات مطرح شده و بررسی ویژگی‌های مهم ماشین‌های شار متقاطع در جدول (۱-۲) خلاصه‌ای از ویژگی‌های مهم اینگونه ماشین‌ها، دلایل اصلی این ویژگی‌ها و روش‌های بهبود آن‌ها ارائه شده است.

جدول (۱-۲): ویژگی‌ها، دلایل و روش‌های بهبود ویژگی‌های مهم ماشین‌های مغناطیسی دائم شار متقاطع

ویژگی‌ها	دلایل	روش‌های بهبود
ریپل گشتاور و گشتاور دندانه‌ای بالا	✓ مضرب صحیح بودن تعداد قطب‌های روتور و استاتور	✓ افزایش تعداد قطب‌های روتور و استاتور
	✓ ساختار مدولار	✓ بهبود شکل قطب‌های روتور و استاتور
	✓ رلوکتانس فاصله هوایی زیاد	✓ روش‌های جابه‌جایی و تورب قطب‌های روتور و استاتور
	✓ انحرافات شار مغناطیسی در فاصله هوایی	✓ استفاده از مسیرهای فرعی شار مثل هسته‌های I شکل
		✓ استفاده از روتور مجهز به آرایه هالباخ
		✓ شکل مناسب قطب‌های روتور و استاتور
ضریب توان پایین	✓ مسیرهای شار نشستی پیچیده	✓ استفاده از مسیرهای فرعی شار مثل هسته‌های I شکل
	✓ نرخ جریان بالا	✓ استفاده از ساختارهای شار متمرکز
	✓ اندوکتانس بالا	✓ طول فاصله هوایی کوچک
	✓ MMF و یا بارگزاری الکتریکی بالا	✓ افزایش رلوکتانس بین دو آهنربا
		✓ افزایش رلوکتانس بین دو هسته استاتور
چگالی گشتاور بالا	✓ هموپلار بودن شار	✓ کاهش مواد فعال موجود در ساختار ماشین
	✓ بارگزاری الکتریکی و مغناطیسی جدا	✓ افزایش بارگزاری‌های الکتریکی و مغناطیسی
	✓ امکان طراحی با تعداد قطب بالا	✓ انتخاب بهینه تعداد قطب با مصالحه نشت شار



فصل سوم:

طراحی ژنراتور مغناطیس دائم شار متقاطع نمونه

در فصل قبل تحقیقات گسترده‌ای در ساختار و عملکرد ماشین‌های شار متقاطع صورت گرفت و ویژگی‌های مهم این نوع ماشین‌ها استخراج شد. این ویژگی‌ها شامل ویژگی‌های الکتریکی، ساختاری و مغناطیسی بوده که هر کدام از آن‌ها از یکدیگر مستقل نبوده و ارتباط نزدیکی با یکدیگر دارند. با توجه به این تحقیقات و براساس کاهش محدودیت‌ها و معایب و برجسته تر کردن مزایای آن‌ها ما را به طراحی یک ژنراتور مغناطیس دائم شار متقاطع مناسب با ضریب توان بالا، گشتاور دندانه‌ای اندک و چگالی گشتاور بالا برای ساختار درایو مستقیم توربین بادی هدایت کرد. در طراحی هر ماشین الکتریکی، اصول و روش‌های خاصی مشترکی است و آنچه در این میان تغییر می‌یابد، میزان پیچیدگی برآورده شدن مجموعه مشخصات داده‌شده است. طراحی ماشین‌های الکتریکی نیز مانند هر وسیله دیگری طی مراحل منظمی صورت می‌گیرد. بنابراین، روند طراحی ماشین‌های الکتریکی به صورت زیر خلاصه می‌شود:

(۱) جزئیات و مشخصات مطلوب طراحی ماشین الکتریکی مورد نظر

(۲) انتخاب ساختار

(۳) مدل‌سازی (شامل مدل الکترومغناطیسی، حرارتی و مکانیکی)

(۴) محاسبات ابعادی (الگوریتم طراحی)

(۵) تحلیل عملکرد

(۶) اصلاح طرح

(۷) بهینه‌سازی

در مرجع [۸۴] یک ژنراتور شار متقاطع جدید به منظور کاربرد به عنوان ژنراتور سیستم‌های توربین بادی بزرگ طراحی شده است. برای طراحی این ژنراتور دو شرط حداکثر انرژی تولیدی توسط ماشین و حداقل هزینه برای ساخت ماشین در نظر گرفته شده است. سپس یک مدل تحلیلی برای یک ژنراتور شار متقاطع با توان کمتر ارائه شده است و با نتایج اجزاء محدود و نتایج حاصل از آزمایشات عملی

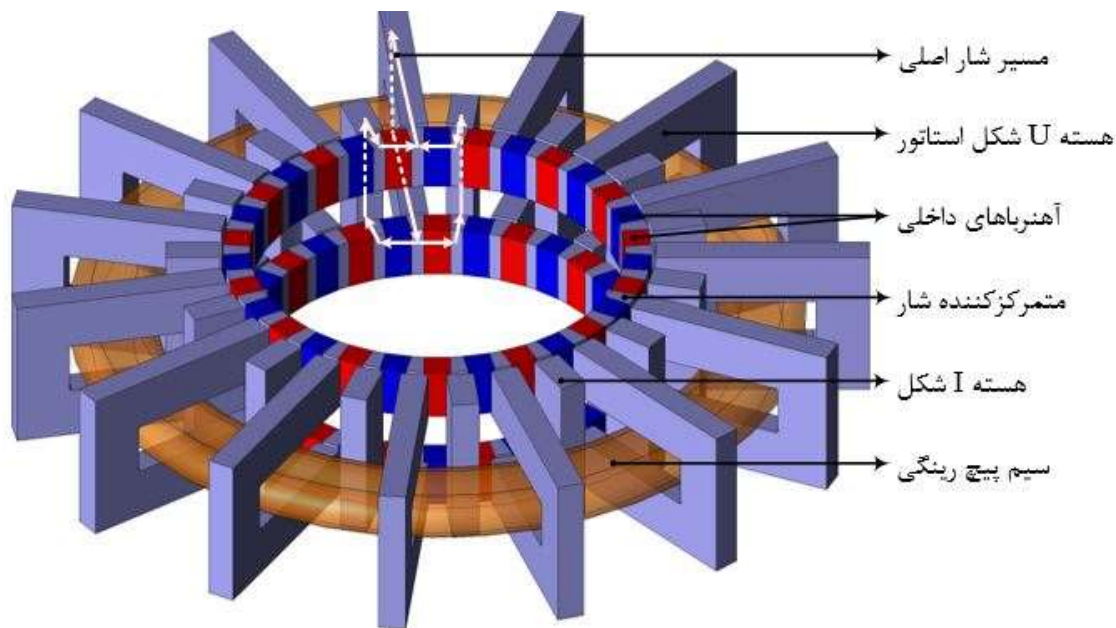


مقایسه شده است. سپس با استفاده از این مدل کوچک یک ژنراتور ۱۰ مگاوات برای نیروگاه‌های بادی بزرگ طراحی شده است.

به منظور طراحی ماشینهای الکتریکی معمولاً ابتدا با استفاده از مدل ساده شده ابعاد تقریبی ماشین بدست می‌آید. سپس با استفاده از روشهای دقیق مانند روش اجزاء محدود و یا روش تقسیمات محدود مشخصات ماشین مانند گشتاور و اندوکتانس سیم پیچی‌ها محاسبه و با نتایج مورد انتظار مقایسه می‌شود.

### ۳-۲- معرفی مختصر ساختار و عملکرد ژنراتور مغناطیس دائم شار متقاطع

مطابق با شکل (۳-۱) در این ژنراتور هسته‌های استاتور در بیرون و روتور در داخل قرار گرفته است و هر دو طرف فعالانه در تولید گشتاور شرکت می‌کنند. ساختار روتور، استوانه‌ای و شامل دو ردیف در هر فاز است. مطابق شکل (۳-۱) در یک فاز ژنراتور مد نظر، استاتور متشکل از سیم پیچ چنبره‌ای و هسته‌های U شکل بوده و از هسته‌های I شکل جهت استفاده بهتر از فضای استاتور و آهنرباهای روتور استفاده شده است. در ماشینهای شار متقاطع، شار در هر سه جهت مختصات مقدار دارد. به همین دلیل با ورقه ورقه کردن، یک بعد از شار از دست می‌رود. یکی از مهم‌ترین مزیت‌های ساختار ارائه شده امکان ورقه سازی هسته‌ها بدون از بین بردن یک بعد مسیر عبوری شار است. جهت ورقه ورقه کردن هسته‌ها باید به گونه ای باشد که عمود بر مسیر شار باشد. در قسمت رتور شار بصورت محیطی وارد هسته‌ها میشود و به بصورت شعاعی از هسته‌ها عبور می‌کند. بنابراین جهت ورقه ورقه کردن در هسته‌های استاتور و هسته‌های روتور متفاوت است. آهنرباها بصورت شار متمرکز در این دو ردیف نصب شده‌اند. جهت مغناطیس شوندگی این آهنرباها به صورت محیطی بوده و مسیر مغناطیس شوندگی در هریک از ردیف‌های روتور مخالف ردیف دیگر است. بدنه استاتور نقش ثابت نگه‌داشتن هسته‌های U شکل را به عهده دارد. جنس بدنه نیز باید از مواد عایق مغناطیس باشد تا نشت شار بین قطب‌های مجاور به حداقل برسد. ساختار سه فاز از کنار هم قرار گرفتن سه ساختار ۳۰ قطب تکفاز با ۱۲۰ درجه



شکل (۳-۱): ساختار تکفاز ژنراتور مغناطیس دائم شار متقاطع

الکتریکی اختلاف فاز نسبت به یکدیگر تشکیل می‌شود. هر فاز ژنراتور کاملاً از فازهای دیگر مجزا است، بنابراین از لحاظ الکترومغناطیسی هیچ تزویجی بین فازها وجود ندارد. هنگامیکه هسته روتور در مقابل دندانه استاتور قرار می‌گیرد (همپوشانی کامل) رلوکتانس مسیر شار حداقل و بیشترین شار سیم پیچ استاتور را قطع می‌کند و برعکس زمانی است که هسته روتور و دندانه استاتور هیچ همپوشانی ندارند کمترین شار سیم‌پیچ استاتور را قطع می‌کند.

### ۳-۳- طراحی ژنراتور مغناطیس دائم شار متقاطع

در بخش قبل توپولوژی ژنراتور مغناطیس دائم شار متقاطع ارائه شده به صورت کامل معرفی شد. در این بخش به طراحی ژنراتور مغناطیس دائم شار متقاطع با در نظر گرفتن ولتاژ داخلی سینوسی می‌پردازیم. روند طراحی ساختار و ابعاد اساسی ماشین شار متقاطع مغناطیس دائم با جزئیات لازم ارائه می‌شود. روابط ریاضی به کار رفته در طراحی نیز توصیف و یا اثبات می‌شوند. شار درون دندانه‌های قطب‌ها می‌تواند در طیف وسیعی منحرف شود بنابراین انتظار می‌رود که یک توزیع میدان پیچیده داشته باشد. هدف در این طراحی یافتن شکل قطبی است که توزیع چگالی شار تقریباً مساوی را بر روی مقطع دندانه تضمین کند. در طراحی ماشین‌های الکتریکی معمولاً حالتی پیش می‌آید که از بین چندین

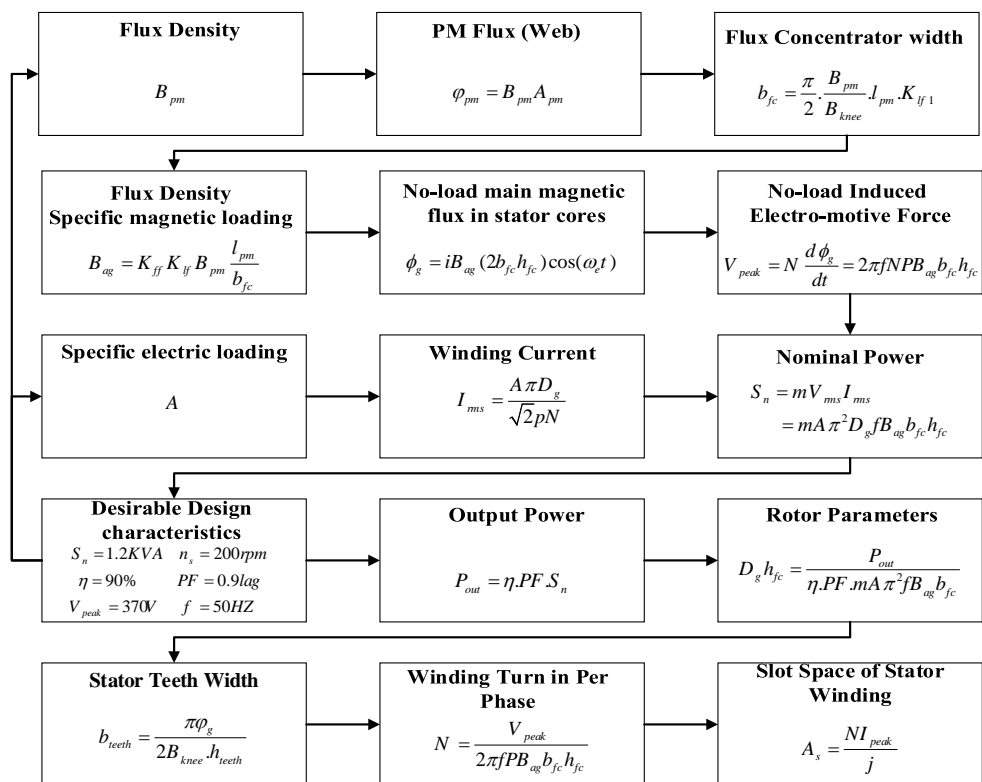
پارامتر طراحی، باید تعدادی را به عنوان متغیرهای انتخابی و مستقل انتخاب کرد. محدوده این متغیرها باید با ملاحظات خاصی که معمولاً در اثر تجربه به دست می‌آیند، انتخاب شوند. در طراحی ماشین‌های الکتریکی با توجه به اینکه تعداد مجهولات از معادلات بیشتر است باید با توجه به تعریف مسئله و محدودیت‌های طراحی، تعدادی از پارامترهای طراحی به‌عنوان متغیرهای انتخابی، انتخاب شوند. به منظور طراحی ژنراتور مورد نظر در روند محاسبات تحلیلی فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

✓ اثر متقابل مغناطیسی بین فازها صفر در نظر گرفته شده است

✓ چگالی شار یکنواخت در هسته‌های استاتور

✓ ولتاژ داخلی سینوسی

اگر چگالی شار هسته تقریباً یکنواخت و تا حد امکان بزرگ و کمتر از مقدار اشباع توسط طراح انتخاب شود بخش بلااستفاده هسته حداقل می‌شود. برای رسیدن به این هدف باید سطح مقطع هسته در طول مسیر شار ثابت بماند. باید توجه داشت که در هنگام تلاش برای دستیابی به توزیع شار یکنواخت در هسته استاتور، نباید از شار نشتی غافل شد. در هنگام طراحی، شارهای نشتی با اعمال یک سری ضرایب که با تحلیل اجزاء محدود بدست می‌آیند، در نظر گرفته می‌شوند. برای تعیین طول شعاعی آهنربای دائم و متمرکزکننده شار باید نقطه کار آهنربای دائم تعیین شود. با توجه به منحنی تغییرات چگالی شار بر حسب شدت میدان مغناطیسی مربوط به ربع دوم آهنربای دائم قابل دستیابی است. شکل مناسب هسته‌ها باید با استفاده از روشهای بهینه‌سازی در محیط اجزاء محدود بدست آید. طراحی باید به‌گونه‌ای باشد که در هیچ نقطه‌ای از متمرکزکننده شار اشباع رخ ندهد. بنابراین به ازای هر تغییری در ابعاد، ماشین باید در محیط اجزاء محدود شبیه‌سازی شود و توزیع چگالی شار در بخش‌های مختلف آن بررسی شود. روند محاسبه پارامترهای ابعادی ماشین شامل به دست آوردن مشخصات نامی و محدودیت‌های کلی ماشین موردنظر در شکل (۲-۳) خلاصه شده است.



شکل (۳-۲): روند کلی طراحی ژنراتور شار متقاطع مغناطیس دائم

جدول (۳-۱): پارامترهای اساسی ژنراتور پیشنهادی

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۱۴۱/۵mm	شعاع خارجی استاتور	۱kw	توان نامی
۷۰mm	شعاع داخلی روتور	۱/۵A	جریان نامی
۸۰mm	شعاع خارجی روتور	۳۷۰V	ولتاژ نامی
۳۰	تعداد قطبها	۱/۵mm	طول فاصله هوایی
۲۰۰rpm	سرعت نامی	۲۵۰mm	طول محوری ماشین
۶/۵mm	عرض متمرکزکننده‌های شار	۸۱/۵mm	قطر داخلی استاتور
۲۲۵	تعداد دورهای سیم‌پیچ در هر فاز	۷۰mm	طول محوری هسته‌های U شکل استاتور
۳۰mm	ارتفاع شیارهای استاتور	۱۰mm	عرض دندانه استاتور

برای تعیین ابعاد ماشین ابتدا باید پارامترهای اصلی خواسته شده مشخص شوند. این پارامترها معمولاً با توجه به سفارش کارفرما و محدودیت‌های موجود تعیین می‌شوند. در جدول (۱-۳) برخی پارامترهای کلیدی انتخابی و پارامترهای بدست آمده با استفاده از روش اجزاء محدود برای ژنراتور طراحی شده داده شده است.

طراحی را با استفاده از معادله خروجی ژنراتور آغاز می‌کنیم. معادله خروجی حاوی همه جزئیات مهم یک طرح، شامل ابعاد فیزیکی و ضرایبی که وابسته به خواص مواد مورد استفاده است می‌باشد. با استفاده از توان ظاهری خروجی ماشین‌های الکتریکی که بخشی از مشخصات مفروض آن‌هاست داریم:

$$S_n = m/T \int_0^T v(t).i(t)dt \quad (1-3)$$

$$S_n = m.V_{rms}.I_{rms} \quad (2-3)$$

که در این رابطه  $m$  تعداد فازها و  $V_{rms}$  و  $I_{rms}$  به ترتیب مقادیر  $rms$  ولتاژ و جریان نامی هر فاز است. ضریب متمرکزکنندگی شار ( $K_{ff}$ )، تاثیر مستقیمی بر چگالی شار فاصله هوایی ( $B_g$ ) دارد. این ضریب وابسته به هندسه ماشین است و از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$K_{ff} = \frac{A_{fc}}{A_{pa}} \quad (3-3)$$

مقدار ضرایب شار ناشی بین قسمت‌های مختلف به کمک نرم افزار اجزاء محدود تعیین شده است. بنابراین، با در نظر گرفتن ضریب نشت شار ( $K_{lf}$ )، چگالی شار فاصله هوایی به صورت رابطه (۴-۳) حاصل می‌شود.

$$B_{ag} = K_{lf}.K_{ff}.B_{pm} \frac{l_{pm}}{b_{fc}} \quad (4-3)$$

بارگذاری الکتریکی از رابطه (۵-۳) بدست می‌آید.

$$A = p \sqrt{2} I_{ms} N / \pi D_g \quad (5-3)$$

حال به محاسبه شار اصلی بی‌باری ( $\phi_g$ ) در هسته‌های استاتور می‌پردازیم:

$$\phi_g = i B_{ag} (2b_{fc} h_{fc}) \cos(\omega_e t) \quad (6-3)$$

ولتاژ داخلی هر فاز با استفاده از رابطه (3-7) حاصل می‌شود.

$$\begin{aligned} V_{Peak} &= N \frac{d\phi_g}{dt} \\ &= 2\pi f . N P B_{ag} (2b_{fc} h_{fc}) \end{aligned} \quad (7-3)$$

با استفاده از روابط (3-5) و (3-7) توان خروجی به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{out} = \eta . PF . mA \pi^2 f B_{ag} D_g (2b_{fc} h_{fc}) \quad (8-3)$$

بنابراین، توان نامی ژنراتور به پارامترهای زیر وابسته است:

- ✓ ضریب بارگذاری الکتریکی ویژه
- ✓ ضریب بارگذاری مغناطیسی ویژه
- ✓ فرکانس چرخش
- ✓ حجم ماشین

با در نظر گرفتن معادله (3-8)، یک ژنراتور مغناطیس دائم شار متقاطع با 30 قطب در هر فاز طراحی شده است. در ادامه به بررسی متغیرها و پارامترهای گوناگونی که در طراحی ژنراتور وجود دارد، می‌پردازیم.

### 3-3-1- بارگذاری الکتریکی

بارگذاری الکتریکی ویژه با افزایش توان و جریان نامی ماشین افزایش می‌یابد. همچنین، برای یک ماشین الکتریکی با توان نامی، جریان و تعداد دور سیم پیچ مشخص، انتخاب مقدار بزرگتر برای بارگذاری الکتریکی ویژه (A) به معنی طراحی ماشین با قطر خارجی کوچکتر است. با کاهش قطر خارجی ماشین،

طول محوری سیم‌پیچی و در نتیجه رلوکتانس مسیر شار افزایش یافته و همچنین طول محوری مغناطیس‌های دائم مورد نیاز برای تولید شار افزایش می‌یابد. از سوی دیگر، بارگذاری الکتریکی بزرگتر سبب تلفات اهمی بیشتر و در نتیجه نیاز به سیستم خنک ساز قوی‌تر است.

بارگذاری الکتریکی ویژه دارای هیچ مقدار مشخصی نیست زیرا مقدار این پارامتر وابسته به روش‌های خنک سازی، اندازه و نوع ماشین است.

بارگذاری الکتریکی ویژه در ماشین مغناطیس دائم شار متقاطع ارائه شده می‌تواند طبق رابطه (۹-۳) محاسبه شود.

$$A = \frac{\sqrt{2pNI_{ms}}}{\pi D_g} \quad (9-3)$$

### ۳-۲- محاسبه قطر سیم

برای تعیین قطر سیم، ابتدا با توجه به چگالی جریان هادی‌های مسی، سطح مقطع سیم طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$A_s = \frac{NI_{Peak}}{j} \quad (10-3)$$

سیم استاتور با توجه به سیم‌های استاندارد و با احتساب روکش عایق موجود انتخاب می‌شود حال اگر سطح مقطع هادی‌ها دایره‌ای شکل در نظر گرفته شود و با توجه به اینکه هر هادی گرد یک سطح مربعی اشغال می‌کند به محاسبه سطح مقطع لازم برای شیار سیم‌پیچی می‌پردازیم.

### ۳-۴- تحلیل الکترومغناطیسی ژنراتور مغناطیس دائم شار متقاطع طراحی شده

در بخش قبل ژنراتوری با فرض دستیابی به چگالی شار یکنواخت و ولتاژ داخلی سینوسی، طراحی شد. در این بخش عملکرد صحیح ژنراتور طراحی شده با شبیه‌سازی به روش اجزاء محدود مورد تایید قرار می‌گیرد. روش اجزاء محدود یکی از روش‌های متداولی است که در اکثر مقالات از آن برای تحلیل الکترومغناطیسی ماشین شار متقاطع استفاده شده است. از آن جا که در ماشین‌های شار متقاطع مسیر

شار و مسیر حرکت روتور در دو صفحه مجزا و عمود بر هم قرار دارند، تحلیل‌های عددی و ساختاری نیز در این نوع ماشین‌ها به صورت سه بعدی انجام می‌گیرد. هر فاز ژنراتور از ۱۵ جفت قطب تشکیل شده است. بنابراین، می‌توان به منظور صرفه‌جویی در زمان و کاهش حجم محاسبات، از یک جفت قطب برای تحلیل الکترومغناطیسی استفاده کرد. جهت بررسی ماشین به روش اجزاء محدود نیاز است تا مدلی ۳ بعدی از ماشین به دلیل مسیر شار ۳ بعدی رسم شود. برای ترسیم هندسه ماشین مورد نظر از نرم‌افزار Solidworks استفاده شده است. سپس با وارد کردن هندسه ترسیم شده در محیط نرم افزار JMag Designer، به تحلیل الکترومغناطیسی آن پرداخته می‌شود. برای آنالیز عددی و تحلیلی می‌توان فقط یک جفت قطب را در نظر گرفت و علت آن هم این است که محاسبات بطور منظم برای هر جفت قطب تکرار می‌شود. برای اینکه بتوان با شبیه‌سازی یک جفت قطب، ژنراتور مورد نظر را مورد تحلیل الکترومغناطیسی قرار داد، نیاز به اعمال شرایط مرزی زیر است:

#### (۱) شرایط مرزی تقارن

یکی از این شرایط، شرط مرزی مربوط به تقارن است که با توجه به متقارن بودن ژنراتور و از کنار هم قرار گرفتن تعدادی جفت قطب در یک فاز تشکیل شده است.

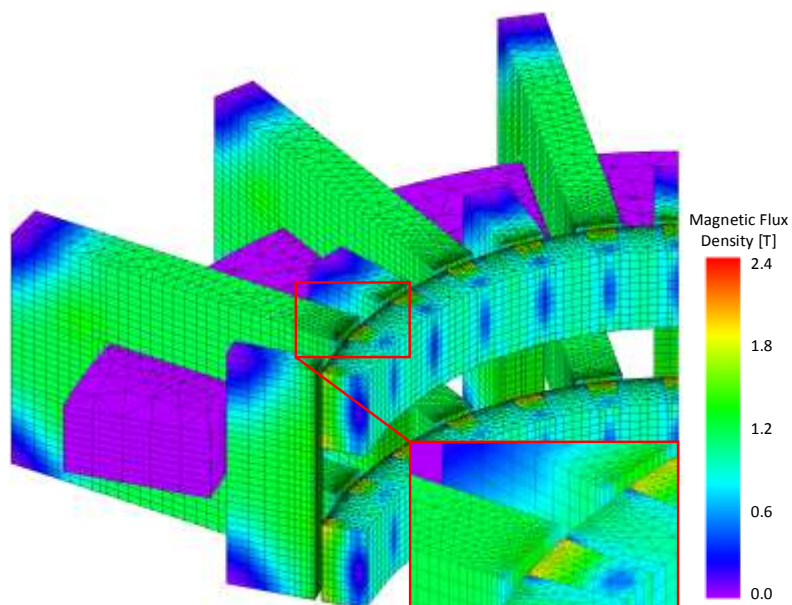
#### (۲) شرایط مرزی عایق مغناطیسی

از شرط مرزی عایق مغناطیسی برای مشخص کردن مرز محدوده‌ای که در آن میدان مغناطیسی وجود ندارد، استفاده می‌شود. این شرط مرزی برای اطمینان بیشتر با یک فاصله هوایی روی سطح در برگیرنده ماشین اعمال می‌شود. در این صورت نرم‌افزار فرض خواهد کرد که مؤلفه عمودی شار مغناطیسی بر روی این سطح صفر است.

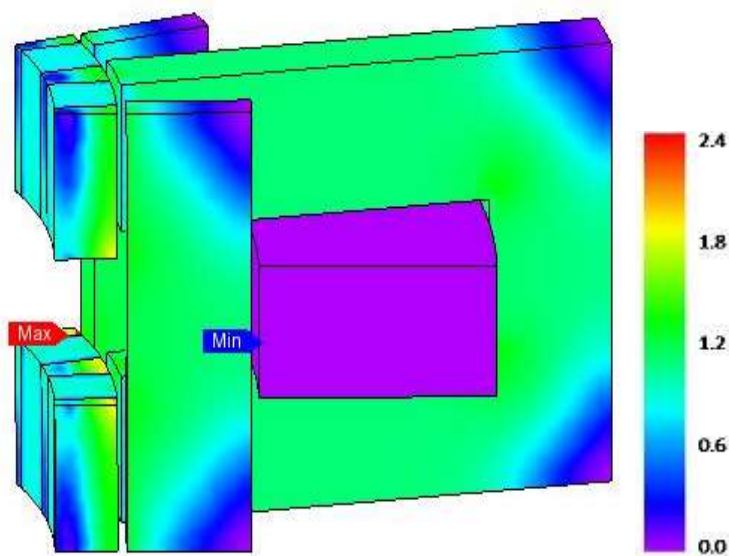
چون هدف، تحلیل عملکرد حالت دائمی ژنراتور با سرعت چرخش ثابت ۲۰۰۰ rpm است، بنابراین باید به مناسب‌ترین حالت ممکن به نرم افزار معرفی گردد. این سرعت دوران ثابت مربوط به مجموعه اجزاء تشکیل دهنده روتور شامل متمرکزکننده‌های شار و آهنرباهای دائم روتور است.



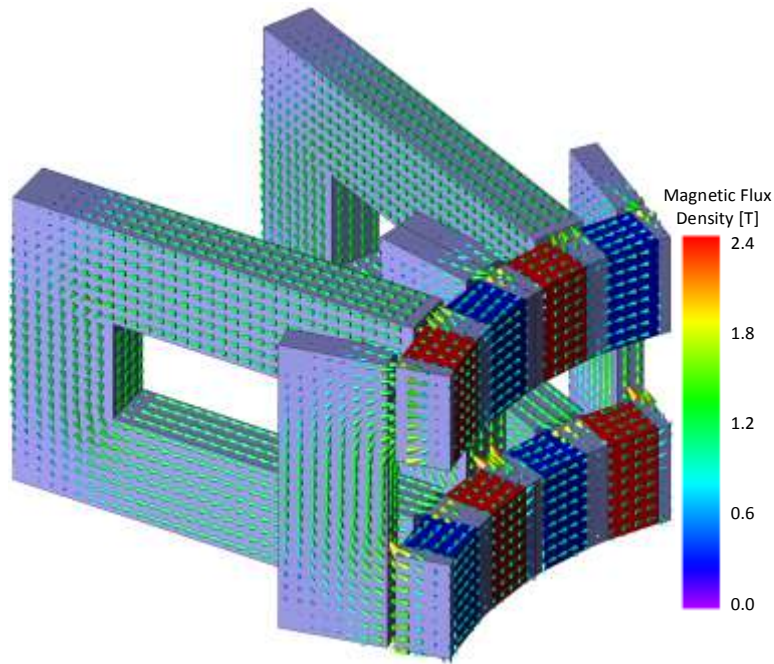
از جمله عواملی که تاثیر زیادی بر دقت جواب‌های بدست آمده می‌گذارد مش‌بندی است. مش‌بندی با مش‌های بزرگ باعث افزایش خطا در جواب‌های حاصله شده و چنانچه مش‌بندی بیش از اندازه ریز باشد باعث افزایش زمان حل مسئله می‌گردد. شکل (۳-۳) یک مش‌بندی سه بعدی مناسب بر روی یک جفت قطب ژنراتور مغناطیس دائم شار متقاطع طراحی شده را نشان می‌دهد. با توجه به مدل سه بعدی به منظور کاهش زمان محاسبات و همچنین کاهش تعداد المان‌های مش‌بندی از مش‌بندی اکستروود<sup>۱</sup> استفاده شده است. شکل (۴-۳)، توزیع چگالی شار مغناطیسی را در حالتی که متمرکزکننده‌های شار در مقابل دندان‌های استاتور قرار دارد نشان می‌دهد. این توزیع چگالی شار در حالت مدار باز که چگالی شار تنها ناشی از حضور آهنرباهای دائم است، بدست آمده است. همانطور که از شکل مشاهده می‌شود اشباع در هیچ نقطه‌ای از ماشین اتفاق نمی‌افتد. همچنین در شکل (۵-۳) نقشه خطوط شار مغناطیسی نشان داده شده است. شار مغناطیسی از دو قطب N مجاور هم شروع شده و پس از گذشتن از متمرکزکننده شار وارد فاصله هوایی می‌شود و سپس از طریق هسته‌های استاتور مسیر خود را طی می‌کند. شار مغناطیسی در هسته‌های U شکل، عمود بر جهت جریان و چرخش روتور است. شار پیوندی بوجود آمده در هسته‌های استاتور، جریان سینوسی را در سیم پیچی چنبره‌ای استاتور القا می‌کند. طبق قانون فارادی به منظور تولید ولتاژ در یک سیم‌پیچ، باید به نحوی شار پیوندی سیم پیچ تغییر کند. در این ژنراتور با حرکت رتور رلوکتانس مسیر عبور شار تغییر کرده و بدین ترتیب شار پیوندی سیم پیچ استاتور تغییر می‌کند. تغییرات شار پیوندی و ولتاژ بی‌باری (ولتاژ داخلی) محاسبه شده در یک سیکل الکتریکی توسط نرم‌افزار JMAG Designer به ترتیب در شکل‌های (۶-۳ الف)) و شکل (۶-۳ ب))، نشان داده شده است.



شکل (۳-۳): طرح مش بندی یک جفت قطب ژنراتور طراحی شده

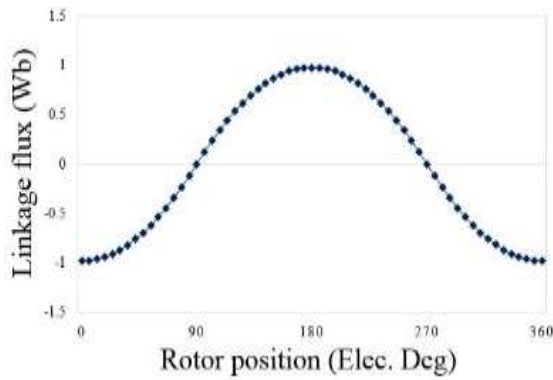


شکل (۴-۳): نقشه رنگی توزیع چگالی شار در ژنراتور طراحی شده در حالت مدار باز

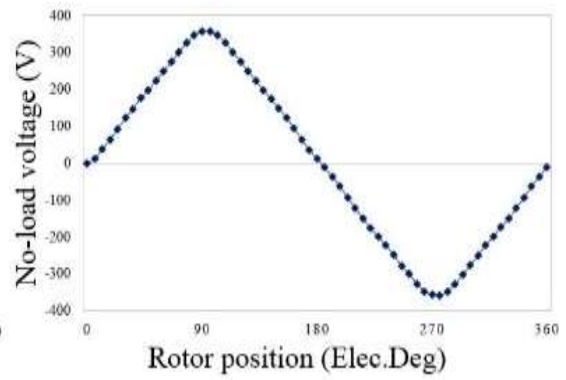


شکل (۳-۵): توزیع برداری شار در ژنراتور طراحی شده در حالت مدار باز

چنانچه مشاهده می‌شود ولتاژ داخلی این ماشین سینوسی است که این امر صحت الگوریتم طراحی برای دستیابی به ولتاژ داخلی سینوسی را تایید می‌کند. مطابق نتایج، نسبت دامنه هارمونیک سوم به حداکثر ولتاژ داخلی ۰/۰۹۲ است. این مقدار مولفه هارمونیک ولتاژ داخلی برای اینگونه ژنراتورها قابل قبول است. البته این ژنراتورها در تعداد قطب پایین، دارای مولفه هارمونیک بالاتری خواهند بود. شکل موج‌های ولتاژ القایی و جریان تحت شرایط بار کامل در شکل ((۳-۷ الف)) و شکل ((۳-۷ ب)) نشان داده شده است. با توجه به شکل، اندازه ولتاژ القایی در شرایط بار کامل نسبت به شرایط بی‌باری کاهش یافته است. با توجه به نتایج، ضریب قدرت در این ژنراتور ۰/۹۷ است. دلیل اصلی این مقدار ۳٪ کاهش مسائلی از جمله نشت شار، پایین آمدن نقطه کار آهنرباها و یا حتی اشباع است.

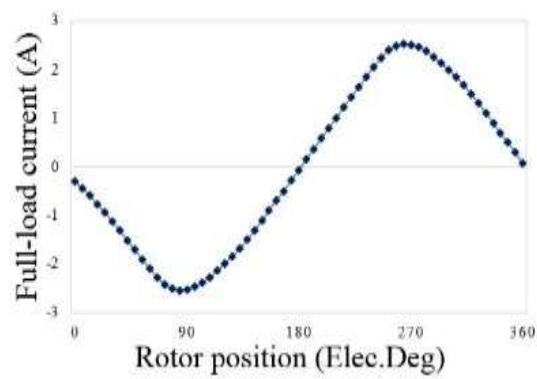


(ب)

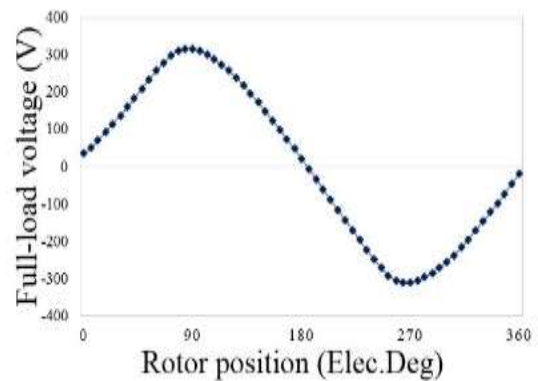


(الف)

شکل (۳-۶): (الف) نمودار شار پیوندی یک فاز (ب) نمودار ولتاژ بی‌باری بر حسب موقعیت الکتریکی



(ب)



(الف)

شکل (۳-۷): (الف) نمودار ولتاژ القایی (ب) نمودار جریان الکتریکی در شرایط بار کامل بر حسب موقعیت الکتریکی

## فصل چهارم:

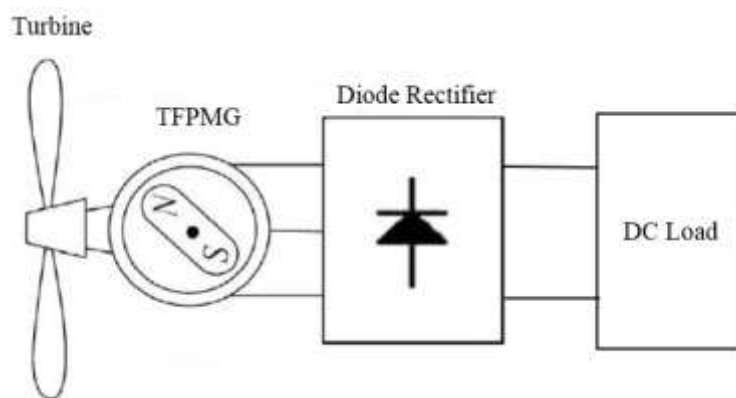
مدل سازی ژنراتور طراحی شده در سیستم توربین بادی به منظور تغذیه بارهای  
DC

#### ۱-۴- مقدمه

در این بخش به مدل سازی ژنراتور طراحی شده در سیستم توربین بادی به منظور تغذیه بارهای DC می پردازیم. شکل (۱-۴) شماتیک کلی سیستم توربین بادی به همراه ژنراتور مغناطیس دائم شار متقاطع طراحی شده در فصل قبل، مدار سه فاز یکسوساز دیودی و بار DC را نشان می دهد. در ادامه به شرح هر کدام از این قسمت ها و نحوه عملکرد آن ها می پردازیم.

#### ۲-۴- مدل سازی باد

وزش باد در روزهای گرم و سرد سال، وزش باد در اطراف سواحل دریاها و اقیانوسها، وزش باد از کوه به دره و برعکس و... همه مثال های یاد شده یک نوع حرکت فیزیکی هستند که بر اثر نیروی وارده رخ می دهند که در حالت طبیعی وزش باد، این نیرو می تواند در اثر تغییرات دمایی و فشار بین دو نقطه از یک توده هوا (گرادیان حرارتی و فشاری) صورت گیرد. امروزه انرژی باد به یک فعالیت اقتصادی بین المللی تبدیل شده است و با نرخ سریع تر از دیگر انواع انرژی رشد می نماید. توان تولیدی توسط



شکل (۱-۴): شماتیک کلی سیستم توربین بادی به همراه ژنراتور مغناطیس دائم شار متقاطع، مدار سه فاز یکسوساز دیودی و بار DC

توربین وابسته به سرعت باد ( $V_w$ ) است. سرعت باد با استفاده از جمع جبری سرعت باد پایه<sup>۱</sup>، سرعت باد ناگهانی<sup>۲</sup>، سرعت باد رمپ<sup>۳</sup>، سرعت باد نویز<sup>۴</sup> حاصل می‌شود [۸۵]. مولفه سرعت باد پایه با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$V_{WB} = K_B \quad (1-4)$$

که در رابطه سرعت باد این مولفه سرعت باد همیشه مقدار ثابت فرض می‌شود.

مقدار مولفه سرعت باد ناگهانی با استفاده از معادله (۲-۴) بدست می‌آید.

$$V_{WG} = \begin{cases} 0, & t < T_{1G} \\ V_{\cos} & T_{1G} < t < T_{1G} + T_G \\ 0 & T_{1G} + T_G < t \end{cases} \quad (2-4)$$

در این رابطه

$$V_{\cos} = (MAXG / 2) \{1 - \cos 2\pi[(t / T_G) - (T_{1G} / T_G)]\} \quad (3-4)$$

و  $T_G$  دوره تناوب وزش باد ناگهانی،  $T_{1G}$  زمان شروع باد ناگهانی و  $MAXG$  مقدار ماکزیمم باد ناگهانی است.

مقدار سرعت باد رمپ نیز با استفاده از رابطه (۴-۴) حاصل می‌شود.

$$V_{WR} = \begin{cases} 0, & t < T_{1R} \\ V_{ramp}, & T_{1R} < t < T_{2R} \\ 0 & T_{2R} < t \end{cases} \quad (4-4)$$

در این رابطه

$$V_{\cos} = MAXR [1 - (t - T_{2R}) / (T_{1R} - T_{2R})] \quad (5-4)$$

- 
- 1 Base Wind Speed
  - 2 Gust Wind Speed
  - 3 Ramp Wind Speed
  - 4 Noise Wind Speed

MAXR مقدار ماکزیمم رمپ،  $T_{1R}$  زمان شروع رمپ و  $T_{2R}$  مقدار ماکزیمم زمان رمپ است.

مقدار مولفه نویز سرعت باد با استفاده از رابطه (۴-۶) حاصل می‌شود.

$$V_{WN} = 2 \sum_{i=1}^N \sqrt{S_V(\omega_i) \Delta\omega} \cos(\omega_i t + \varphi_i) \quad (۴-۶)$$

که در این رابطه  $\omega_i = (i - 1/2) \Delta\omega$  و  $\varphi_i$  مقدار متغیر تصادفی رابطه است.

$$S_V(\omega_i) = \frac{2K_N F^2 |\omega_i|}{\pi^2 \left[ 1 + \left( \frac{F_{\omega_i}}{\mu\pi} \right)^2 \right]^{4/3}} \quad (۴-۷)$$

بر اساس روابط معرفی شده برای چهار مولفه سرعت باد ذکر شده، سرعت باد به صورت رابطه زیر بدست می‌آید.

$$V_W = V_{WB} + V_{WG} + V_{WR} + V_{WN} \quad (۴-۸)$$

شکل (۴-۲) شکل موج باد شبیه‌سازی شده توسط نرم افزار MATLAB نشان می‌دهد.

#### ۴-۳- مدل‌سازی توربین بادی

انرژی باد به وسیله توربین بادی به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود. مقدار گشتاور آیرودینامیکی

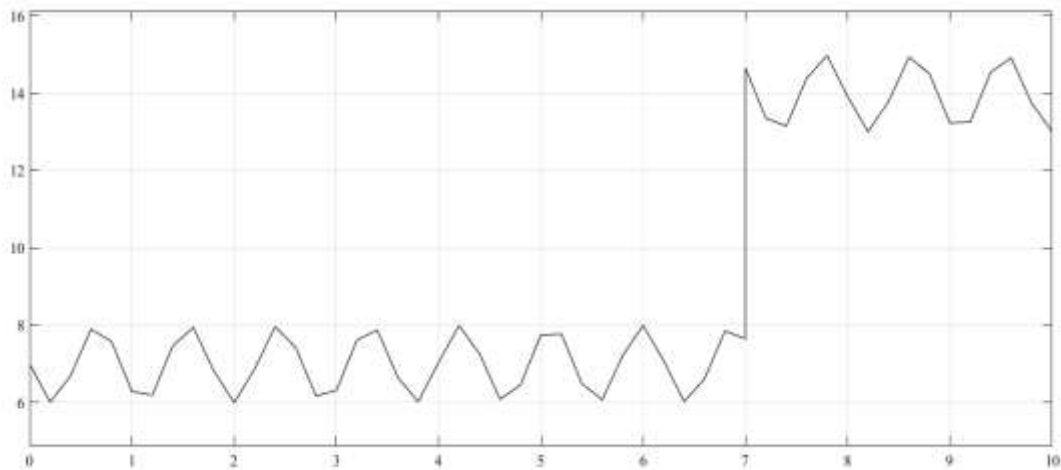
توربین وابسته به سرعت باد بوده و از رابطه (۴-۲) حاصل می‌شود [۸۵].

$$T_w = \frac{0.5 \rho \pi R^3 V_w^2 C_p(\theta, \gamma)}{\gamma} \quad (۴-۹)$$

که در این رابطه  $C_p$  ضریب توان توربین،  $\rho$  چگالی هوا،  $R$  شعاع روتور توربین بادی،  $V_w$  سرعت باد،  $\theta$  زاویه پیچشی و  $\gamma$  سرعت نسبی توربین است و از رابطه (۴-۱۰) حاصل می‌شود.

$$\gamma = \frac{\omega_w R}{V_w} \quad (۴-۱۰)$$





شکل (۲-۴): شکل موج باد بر حسب زمان

که در آن  $\omega_w$  سرعت روتور توربین است. ضریب توان از رابطه (۱۱-۴) قابل محاسبه است.

$$C_p = 0.22\left(\frac{116}{\beta} - 0.4\theta - 0.5\right) \quad (11-4)$$

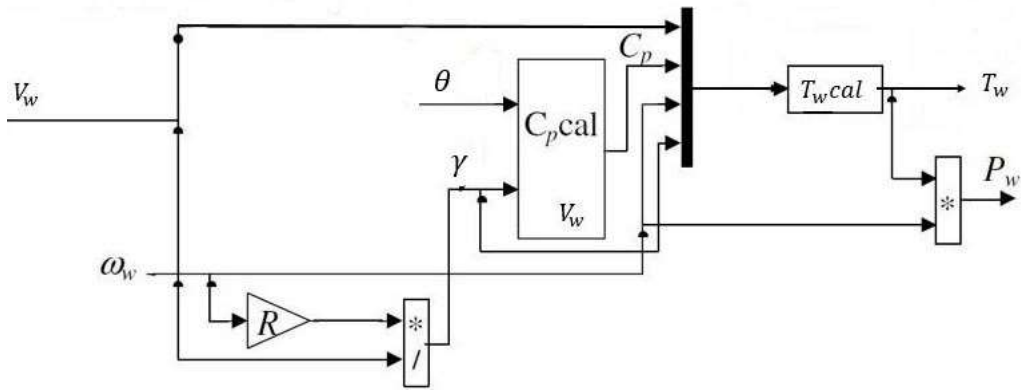
که  $\beta$  در این رابطه از رابطه (۱۲-۴) حاصل می‌شود.

$$\beta = \frac{1}{\frac{1}{\gamma + 0.08\theta} - \frac{0.035}{\theta^3 + 1}} \quad (12-4)$$

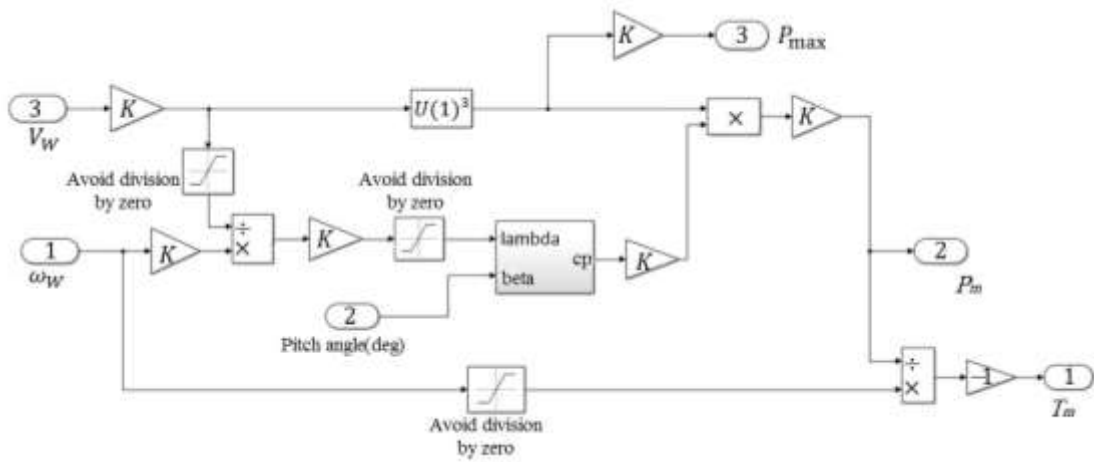
توان توربین از رابطه (۱۳-۴) حاصل می‌شود.

$$P_w = T_w \cdot \omega_w \quad (13-4)$$

شکل (۳-۴) و شکل (۴-۴) به ترتیب مدل توربین بادی مستخرج از معادلات (۹-۴) تا (۱۳-۴) و بلوک دیاگرام آن را نشان می‌دهد.



شکل (۳-۴): مدل توربین بادی



شکل (۴-۴): بلوک دیاگرام توربین بادی

#### ۴-۴- مدل سازی درایو و ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم شار متقاطع طراحی شده

در ادامه به مدل سازی سیستم درایو و ژنراتور به همراه یکسوساز می پردازیم. معادلات درایو با

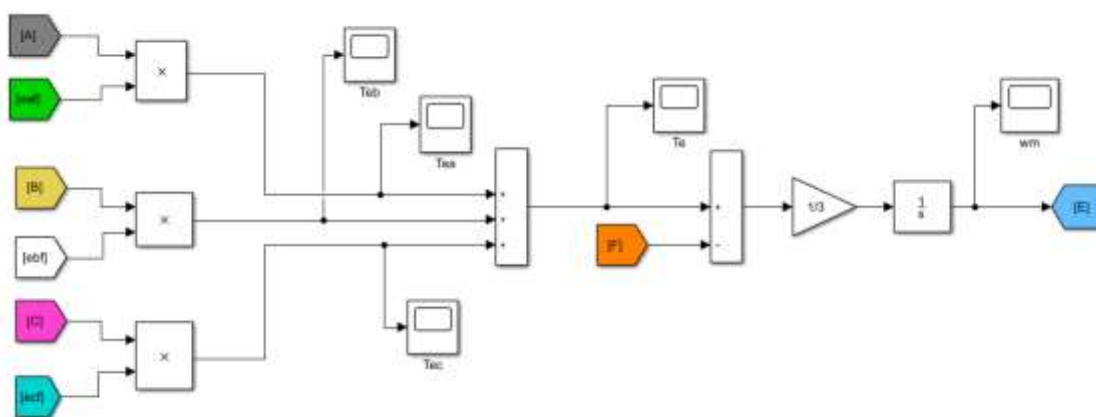
استفاده از رابطه (۱۴-۴) محاسبه می شود.

$$\frac{d\omega_w}{dt} = \frac{(T_e - T_w - B_m \omega_w)}{J} \quad (14-4)$$

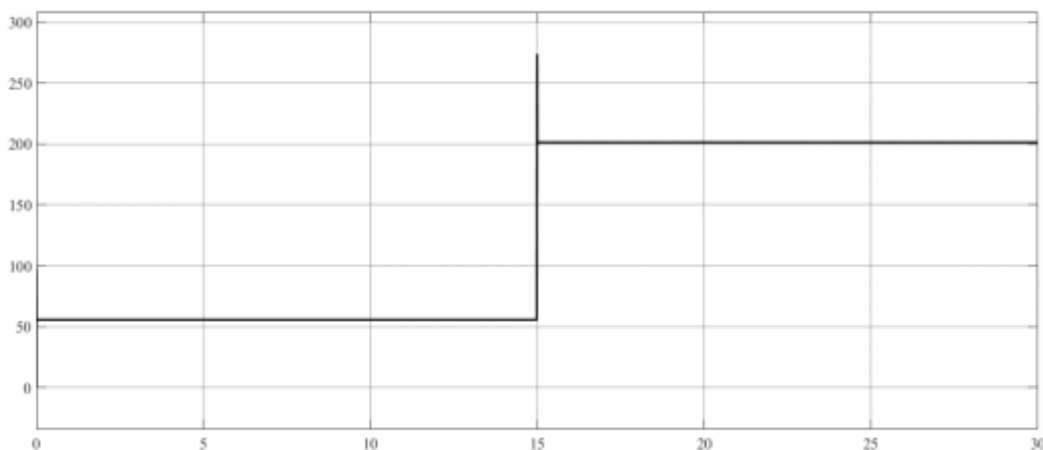
که در این رابطه  $J$  اینرسی ژنراتور،  $T_e$  گشتاور الکترومغناطیسی است. شکل (۵-۴) بلوک دیاگرام سیستم

درایو را نشان می دهد. با توجه به شکل (۶-۴)، با افزایش سرعت باد گشتاور خروجی توربین بادی نیز

افزایش می یابد.

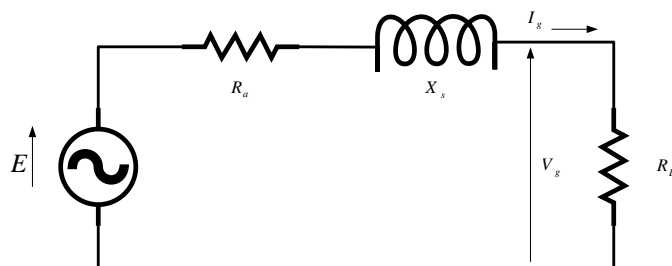


شکل (۴-۵): بلوک دیاگرام درایو



شکل (۴-۶): گشتاور مکانیکی خروجی توربین

در شکل (۴-۷) مدار معادل یک فاز ژنراتور طراحی شده نشان داده شده است.



شکل (۴-۷): مدار معادل یک فاز ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم شار متقاطع

مقدار ولتاژ داخلی در ژنراتور مطرح شده از رابطه زیر حاصل می‌شود. مقدار این پارامتر وابسته به سرعت باد است.

$$E = \frac{d\lambda_m(\theta_m)}{dt} \quad (15-4)$$

که در این رابطه  $\lambda_m$  شار پیوندی سیم‌پیچ است. با توجه به متغیر بودن سرعت باد، مقدار ولتاژ داخلی تولیدی و همچنین ولتاژ خروجی نیز متغیر است. مقدار و شکل موج شار پیوندی و اندوکتانس خودی  $L(\theta)$  با استفاده از شبیه سازی‌های صورت گرفته در نرم افزار اجزا محدود بدست می‌آید.

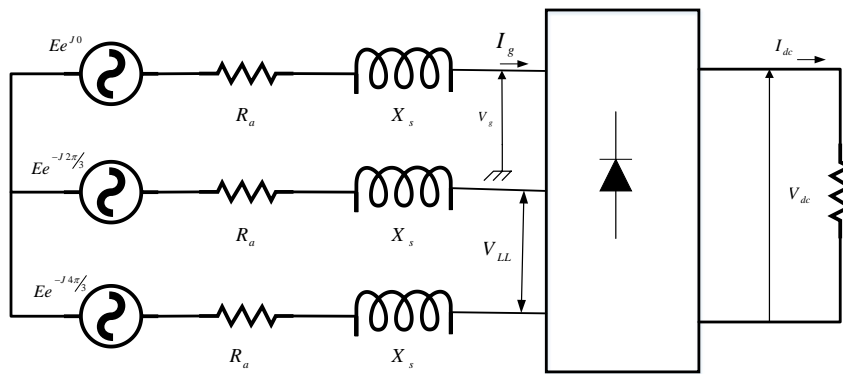
$$\lambda_m(\theta) = \lambda_A \cos(\omega_m t + \theta_0) \quad (16-4)$$

$$L(\theta) = L_A + L_B \cos(2\theta_m + \theta_0) \quad (17-4)$$

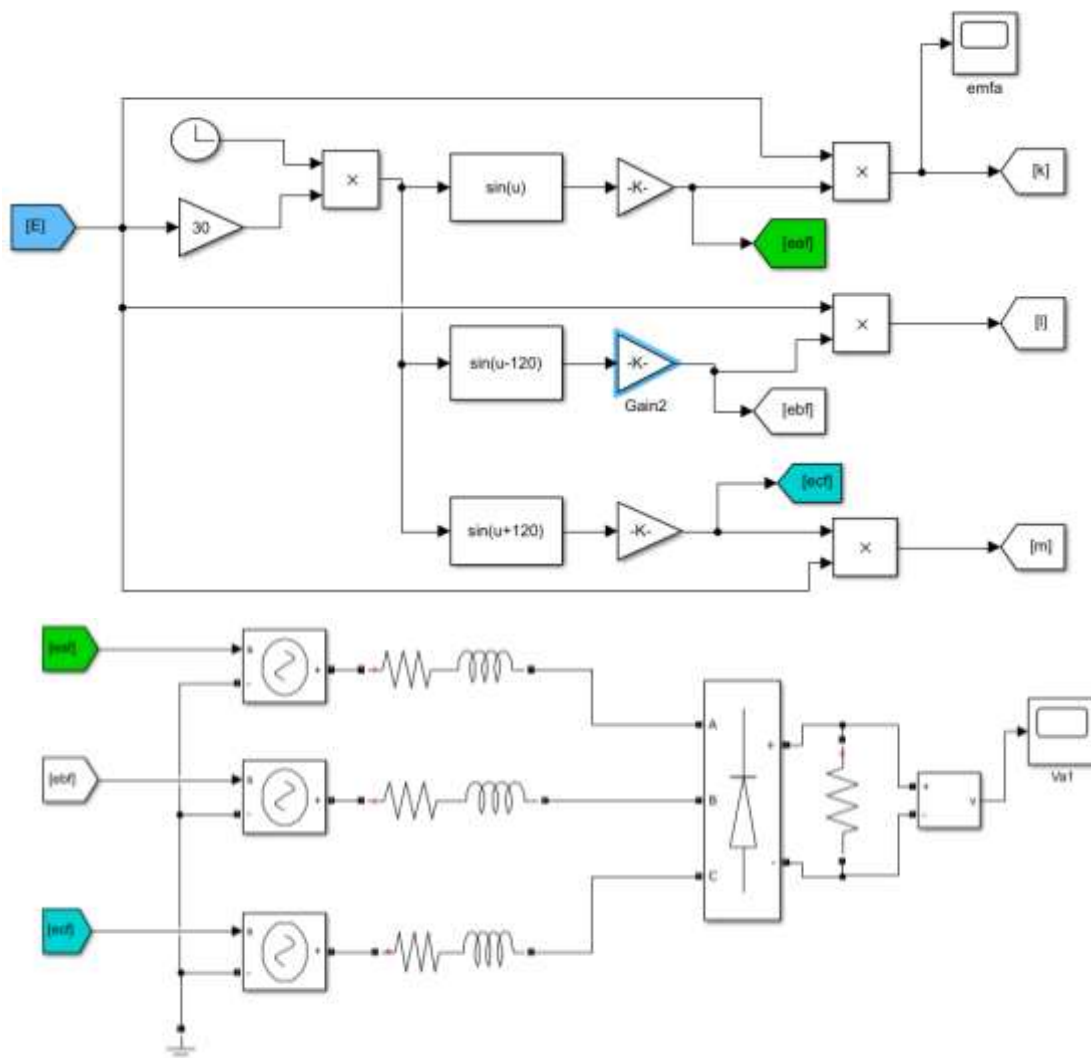
با توجه به نتایج و با توجه به کوچک بودن مقدار  $L_B$  می‌توان از مقدار متغیر این رابطه صرف نظر نمود. گشتاور الکترومغناطیسی نیز از رابطه (4-18) بدست می‌آید. که با توجه به ثابت بودن اندوکتانس می‌توان از بخش دوم آن صرف نظر نمود.

$$T_e = \frac{d\lambda_m(\theta)}{dt} i + \frac{1}{2} \frac{dL(\theta)}{dt} i^2 \quad (18-4)$$

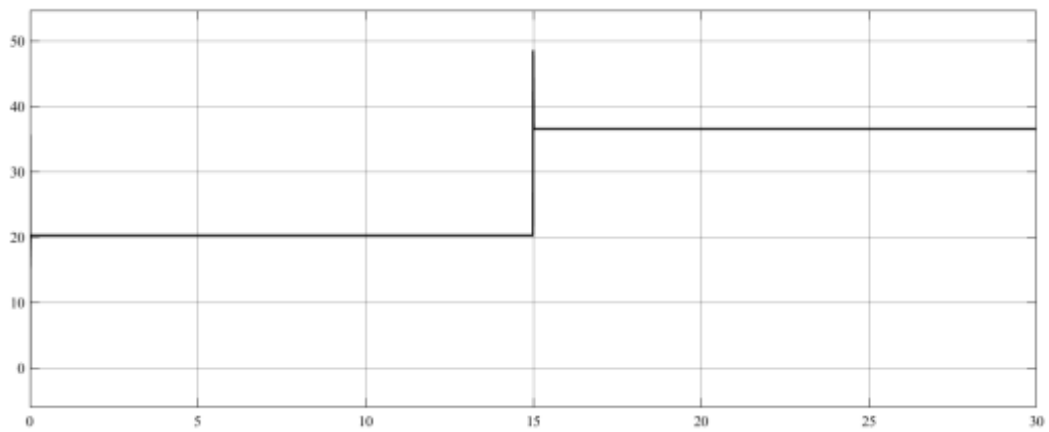
ژنراتور به یک یکسوساز دیودی برای تبدیل توان AC به توان DC و در نهایت تغذیه بار DC متصل است. در شکل (4-8) طرح کلی ژنراتور سه فاز مغناطیس دائم شار متقاطع طراحی شده به همراه یکسوساز دیودی و بار DC نشان داده شده است. در شکل (4-9) نیز بلوک دیاگرام آن نشان داده شده است. در شکل (4-10) شکل موج سرعت زاویه‌ای مکانیکی ژنراتور، گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور، شکل موج emf نشان داده شده است.



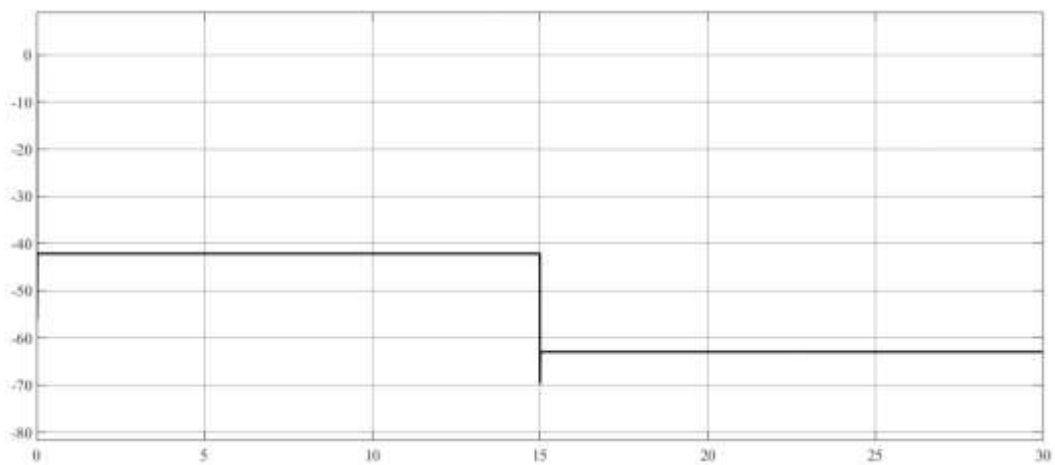
شکل (۴-۸): مدار معادل ژنراتور سه فاز شار متقاطع به همراه یکسوساز و بار DC



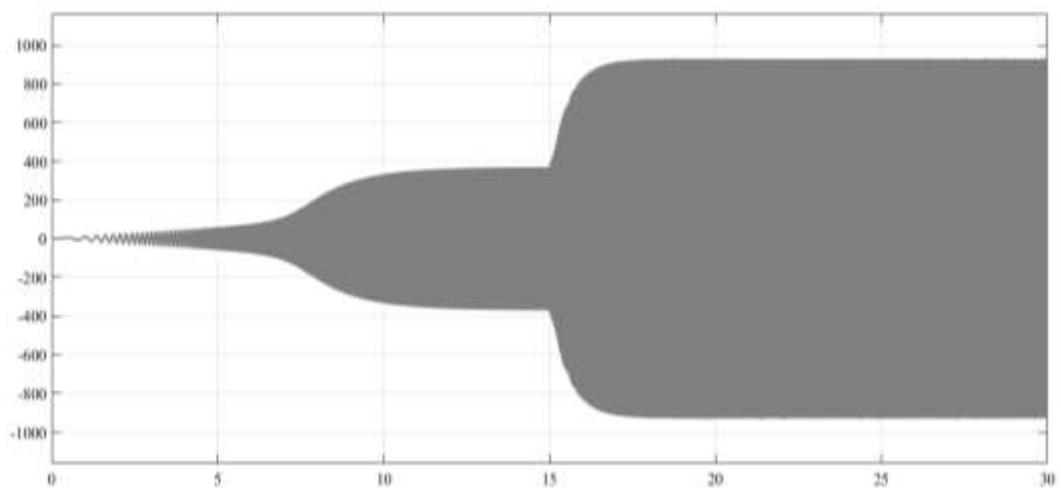
شکل (۴-۹): بلوک دیاگرام ژنراتور به همراه یکسوساز پل دیودی و بار DC



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۴-۱۰): (الف): سرعت ژنراتور بر حسب رادیان مکانیکی، (ب): گشتاور الکترومغناطیسی ژنراتور در حالت سه فاز  
(ج): شکل موج emf ژنراتور

با توجه به رابطه بین ولتاژ DC خروجی و ولتاژ خط، ولتاژ فاز به صورت رابطه (۱۹-۴) بدست می‌آید.

$$\begin{aligned} V_{dc} &= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} V_{LL} \\ &= \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_g \end{aligned} \quad (19-4)$$

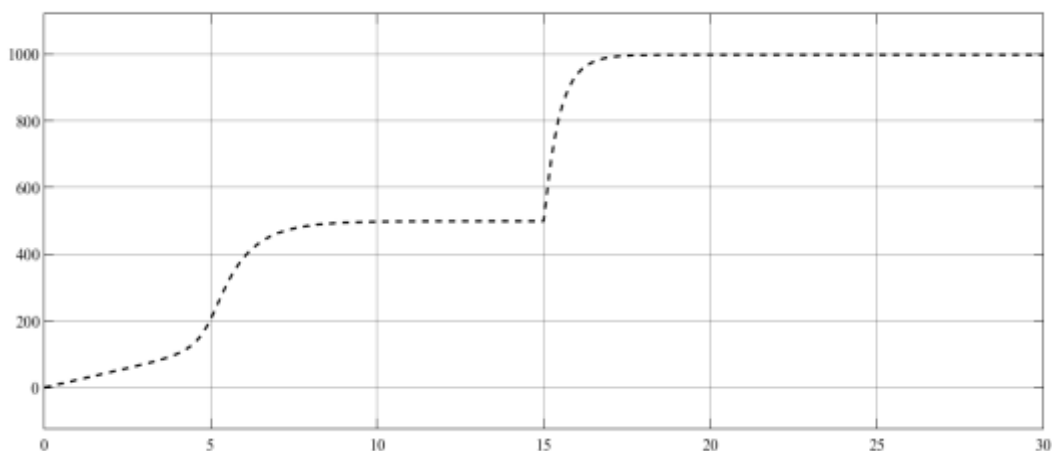
توان AC تولید شده توسط ژنراتور به کمک یکسوساز دیودی به توان DC تبدیل می‌شود.

$$3V_g I_g = V_{dc} I_{dc} \quad (20-4)$$

با توجه به دو رابطه (۱۹-۴) و (۲۰-۴) روابط جریان‌ها با استفاده از رابطه (۲۱-۴) بدست می‌آید.

$$I_{dc} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} I_g \quad (21-4)$$

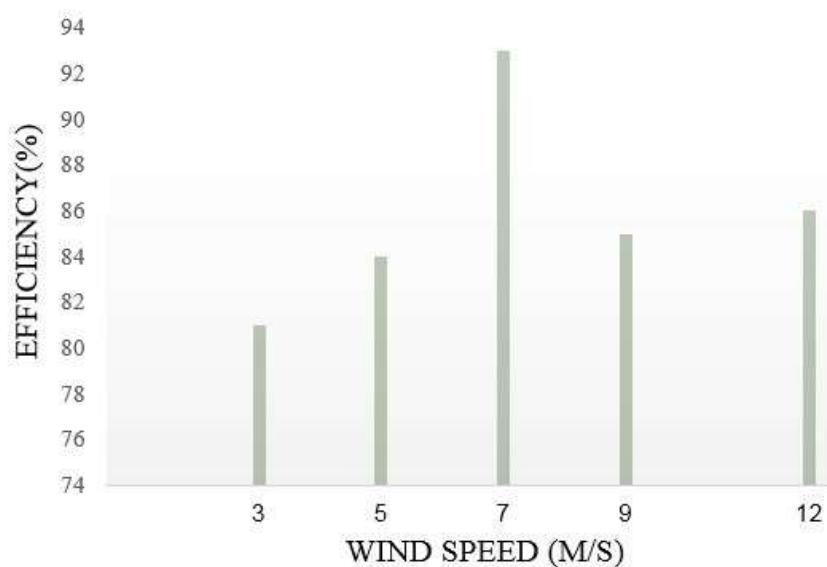
شکل (۱۱-۴) مقدار ولتاژ DC خروجی را نشان می‌دهد. با توجه به روابط مطرح شده ژنراتور دارای بالاترین بازده و بهترین عملکرد در سرعت باد ۷ متر بر ثانیه است. بنابراین انتخاب ناحیه مناسب برای نصب این سیستم بسیار ضروری است. همچنین در صورت بادخیز بودن ناحیه ای مشخص و با توجه به میانگین سرعت باد در طول سال می‌توان به طراحی ژنراتور شار متقاطع مغناطیس دائم مناسب برای ناحیه ای مشخص پرداخت.



شکل (۱۱-۴): نمودار ولتاژ DC خروجی

#### ۴-۵- تحلیل عملکرد ژنراتور در سرعت‌های باد متفاوت

با توجه به محاسبات ولتاژ و جریان DC بهینه خروجی و در سرعت باد ۷ متر بر ثانیه به ترتیب مقادیر ۵۰۰V و ۲A است. در شکل (۴-۱۳) مقادیر بازده به ازای سرعت‌های باد متفاوت نشان داده شده‌است. با توجه به شبیه‌سازی‌های صورت گرفته با استفاده از نرم افزار MATLAB، ژنراتور دارای بالاترین بازده و بهترین عملکرد از نظر ولتاژ و جریان خروجی در سرعت نامی خود یعنی سرعت ۲۰۰rpm و یا سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه است.



شکل (۴-۱۳): نمودار بازده ژنراتور بر حسب سرعت باد



## فصل پنجم:

تحلیل گشتاور دندانه‌ای در ژنراتور مغناطیس دائم شار متقاطع طراحی شده

## ۵-۱- مقدمه

ژنراتورهای مغناطیس دائم شار متقاطع به دلیل چگالی توان بالا و تعداد قطب‌های زیاد برای کاربردهای سرعت پایین همانند سیستم توربین بادی مناسب هستند. از موانع اصلی توسعه و کاربرد ژنراتورهای مغناطیس دائم شار متقاطع علی‌رغم داشتن چگالی گشتاور بالا، عوامل مزاحمی مانند ریپل گشتاور است. به بیان دیگر ریپل گشتاور یکی از مهم‌ترین محدودیت‌ها در ساختارهای درایو مستقیم بویژه در ژنراتورهای توربین‌های بادی است. بنابراین در این فصل به تحلیل ریپل گشتاور و ارائه دو روش موثر برای کاهش این گشتاور مزاحم می‌پردازیم. مدل ارائه شده جهت پیش‌بینی ریپل گشتاور بصورت دینامیکی است. این مدل با استفاده از روابط الکترومغناطیسی و بسط فوریه بدست می‌آید.

## ۵-۲- تحلیل گشتاور الکترومغناطیسی و ریپل گشتاور

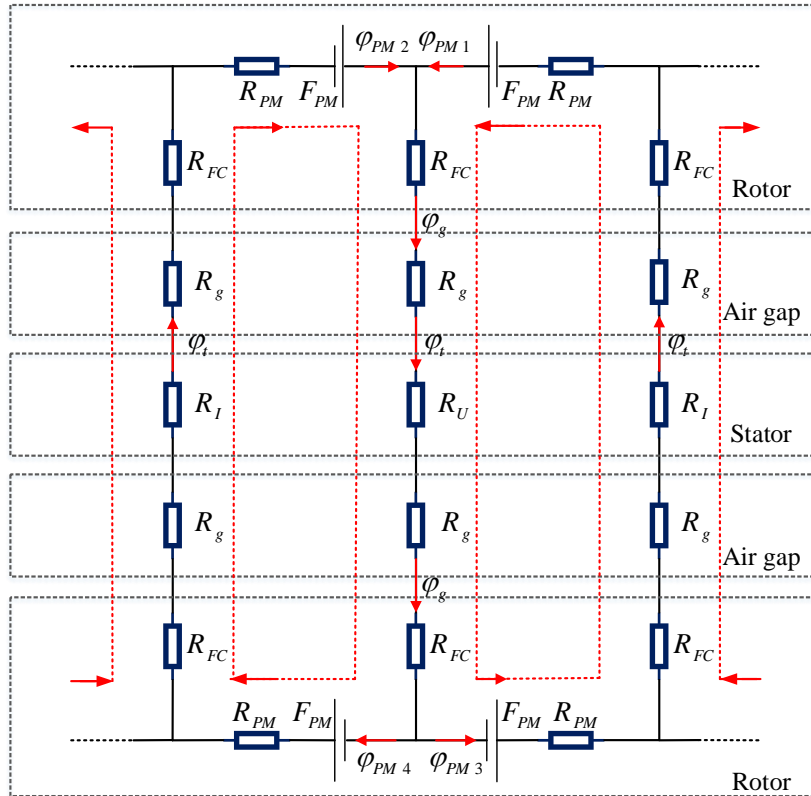
در بسیاری از موارد، از مدار معادل مغناطیسی<sup>۱</sup> (MEC)، برای تحلیل ماشین‌های الکتریکی استفاده می‌شود. در این پژوهش از مدل MEC برای نشان دادن مسیر شار و رلوکتانس‌های موجود در مسیر شار استفاده شده است. در ژنراتور طراحی شده هر جفت قطب یک مدول را تشکیل می‌دهند. بنابراین، در مدل MEC این ژنراتور برای تحلیل یک فاز، یک جفت قطب مدل می‌شود. در این مدل از اشباع و شارهای ناشی صرف‌نظر می‌شود. با توجه به مسیر شار، مدل MEC ژنراتور طراحی شده در شکل (۵-۱) نشان داده شده است. با توجه به شکل، دو فاصله هوایی در مسیر شار وجود دارد.  $R_U$ ،  $R_{FC}$ ،  $R_{PM}$  و  $R_I$  به ترتیب رلوکتانس‌های مغناطیس‌های دائم، متمرکزکننده‌های شار، هسته‌های U شکل و هسته‌های I شکل است.  $R_{g1}$  و  $R_{g2}$  به ترتیب رلوکتانس‌های فاصله هوایی ردیف بالا و پایین است. معادله MMF برای PM ها طبق رابطه زیر بدست می‌آید.

$$F_m = H_c h_m \quad (۱-۵)$$

که در این رابطه،  $H_c$  و  $h_m$  به ترتیب شدت میدان و ارتفاع مغناطیس‌های دائم است.

---

1 Magnetic Equivalent Circuit



شکل (۵-۱): مدل MEC ژنراتور طراحی شده

باتوجه به مدل MEC ارائه شده، ژنراتور طراحی شده دارای شار هموپلار در هر لحظه است و در هر جفت قطب تکرار می‌شود. با چرخش روتور، شار معادل ماکزیمم در موقعیتی که در آن متمرکزکننده‌های شار در راستای مرکز دندانه‌های هسته‌های استاتور قرار می‌گیرند، حاصل می‌شود. بنابراین، شار  $\varphi_i$  تعیین کننده شار پیوندی اصلی در سیم‌پیچ است. شار پیوندی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\psi_{tot} = \sum_{k=1}^{\infty} iN \varphi_{tk} \cos(kp\theta_m) \quad (۲-۵)$$

که در آن  $i$  و  $N$  به ترتیب تعداد هسته‌های استاتور و تعداد دوره‌های سیم‌پیچی است.  $p$ ،  $f$  و  $\varphi_{tk}$  به ترتیب تعداد جفت قطب‌ها، فرکانس و مقدار هارمونیک  $k$ ام شار بی‌باری است. بنابراین، ولتاژ بی‌باری القایی طبق رابطه زیر بدست می‌آید:

$$e = -\frac{d\psi_{tot}}{dt} = \sum_{k=1}^{\infty} 2\pi f k i N \varphi_{tk} \sin(kp\theta_m) \quad (3-5)$$

با توجه به مدل MEC و با توجه به مشخص نمودن مسیرهای شار اصلی به تحلیل گشتاور دندانه‌ای می‌پردازیم. گشتاور دندانه‌ای در ماشین‌های PM از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$T_{cog} = \frac{1}{2} \varphi_g \frac{dR_g}{d\theta_m} \quad (4-5)$$

که در این رابطه،  $\varphi_g$ ،  $R_g$  و  $\theta_m$  به ترتیب شار فاصله هوایی، رلوکتانس فاصله هوایی و موقعیت زاویه‌ای روتور است [50]. با توجه به رابطه (4-5)، با کاهش هارمونیک‌های مخرب موجود در شار فاصله هوایی و کاهش تغییرات رلوکتانس فاصله هوایی بر اثر چرخش روتور، گشتاور دندانه‌ای کاهش می‌یابد. در این ساختار از رلوکتانس فاصله هوایی به دلیل وجود قطب‌های متمرکزکننده شار نمی‌توان صرف نظر کرد. بنابراین، رلوکتانس فاصله هوایی به صورت رابطه (5-5) می‌توان نوشت.

$$R_g = R_A \pm \sum_{k=1}^{\infty} R_k \cos(2kp\theta_m) \quad (5-5)$$

گشتاور دندانه‌ای نیز با استفاده از مجموع هارمونیک‌های موجود و با استفاده از سری فوریه از رابطه (5-5) بدست می‌آید.

$$T_{Cog\_T} = \sum_{K=1}^{\infty} T_k \sin(2k \rho \theta_m + \theta_{k0}) \quad (6-5)$$

که در این رابطه،  $T_k$  و  $\theta_{k0}$  به ترتیب مقدار و زاویه فاز هارمونیک  $k$ ام گشتاور دندانه‌ای است. طبق رابطه (6-5)، گشتاور دندانه‌ای با تعداد قطب‌های ماشین به طور مستقیم رابطه دارد.

در ژنراتور طراحی شده دو فاصله هوایی در مسیر شار اصلی وجود دارد. بنابراین، هر کدام از آن‌ها سهم مساوی در تولید گشتاور دندانه‌ای دارند. مجموع گشتاور دندانه‌ای طبق رابطه زیر بدست می‌آید.

$$T_{cog-T} = T_{cog1} + T_{cog2} \quad (7-5)$$

که در این رابطه،  $T_{cog1}$  و  $T_{cog2}$  به ترتیب گشتاورهای دندانه‌ای در هرکدام از فاصله هوایی‌ها است. برای کمینه کردن مجموع گشتاور دندانه‌ای، می‌توان شکل موج هریک از گشتاورهای دندانه‌ای را نسبت به دیگری جابه‌جا کرد. زاویه جابه‌جایی بهینه ( $\alpha$ ) از رابطه زیر استخراج می‌شود.

$$T_{cog-T} = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{T_k}{2} [\sin(2kp\theta_m + \theta_{k0}) + \sin(2kp(\theta_m + \alpha) + \theta_{k0})] = \sum_{k=1}^{\infty} T_k \sin(2kp(\theta_m + \frac{\alpha}{2}) + \theta_{k0}) \cos(kp\alpha) \quad (8-5)$$

با توجه به معادله ساده‌سازی شده، هارمونیک  $k$ ام گشتاور دندانه‌ای از رابطه (۹-۵) حذف می‌شود.

$$\cos(kp\alpha) = 0 \quad (9-5)$$

براساس رابطه بالا، زاویه جابه‌جایی بهینه برای حذف هارمونیک اصلی و مخرب گشتاور دندانه‌ای (۶ام) ژنراتور طراحی شده، ۲ درجه مکانیکی است.

وقتی که ژنراتور مغناطیس دائم شار متقاطع<sup>۱</sup> طراحی شده (TFPMG A)، با سرعت ثابت ۲۰۰rpm می‌چرخد، گشتاور متوسط الکترومغناطیسی ۴۹NM تولید می‌شود. وزن مواد فعال (آهنرباها، آهن و سیم‌پیچی) در این ژنراتور حدود ۱۰/۲ کیلوگرم است. بنابراین، نسبت گشتاور متوسط الکترومغناطیسی به وزن در TFPMG A حدود ۴/۸۳ نیوتن متر بر کیلوگرم است.

ریپل گشتاور طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود.

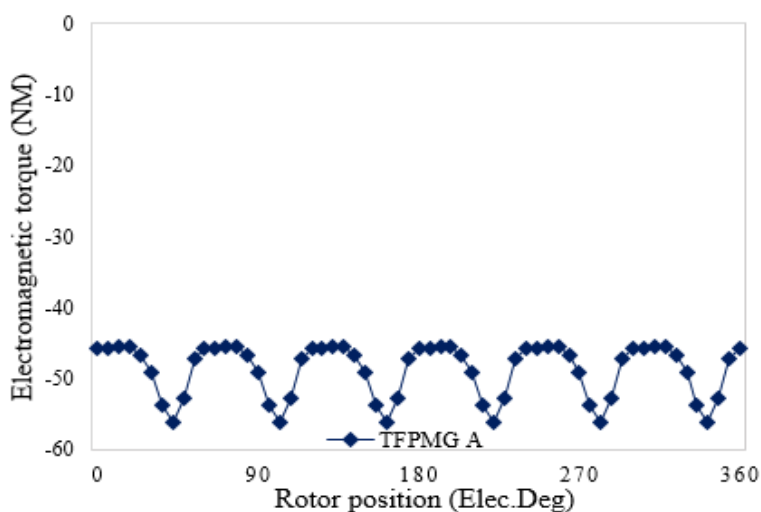
$$T_{rip} = (T_{max} - T_{min}) / T_{ave} \quad (10-4)$$

که در این رابطه  $T_{max}$ ،  $T_{min}$  و  $T_{ave}$  به ترتیب گشتاورهای بیشینه، کمینه و متوسط در گشتاور الکترومغناطیسی است. با توجه به شبیه‌سازی‌های المان محدود شکل (۵-۲) ریپل گشتاور سه فاز در

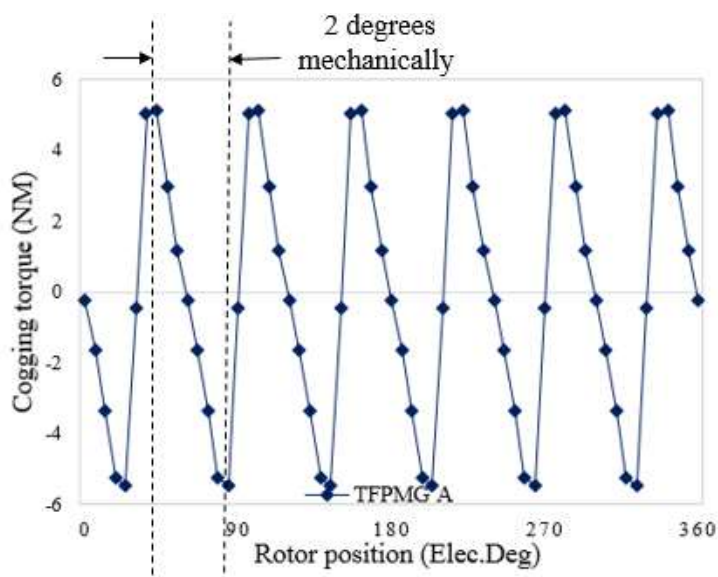
---

1 Transverse Flux Permanent Magnet Generator

این ژنراتور ۲۲٪ است. بخش اصلی ریپل گشتاور در ماشین‌های شار متقاطع بدلیل اثر گشتاور دندانه‌ای است که در شکل (۳-۵) نشان داده شده است. بنابراین، تحقیقات بیشتر برای کاهش گشتاور دندانه‌ای ضروری است. در نمودار گشتاور دندانه‌ای، اختلاف زاویه ۲ درجه مکانیکی بین نقاط بیشینه و کمینه در شکل موج نشان داده شده است.



شکل (۲-۵): نمودار گشتاور لحظه‌ای الکترومغناطیسی در بار کامل بر حسب موقعیت الکتریکی

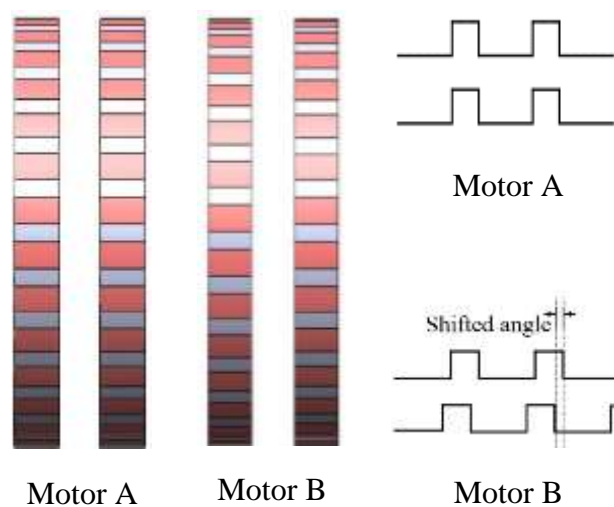


شکل (۳-۵): نمودار گشتاور دندانه‌ای بر حسب موقعیت الکتریکی

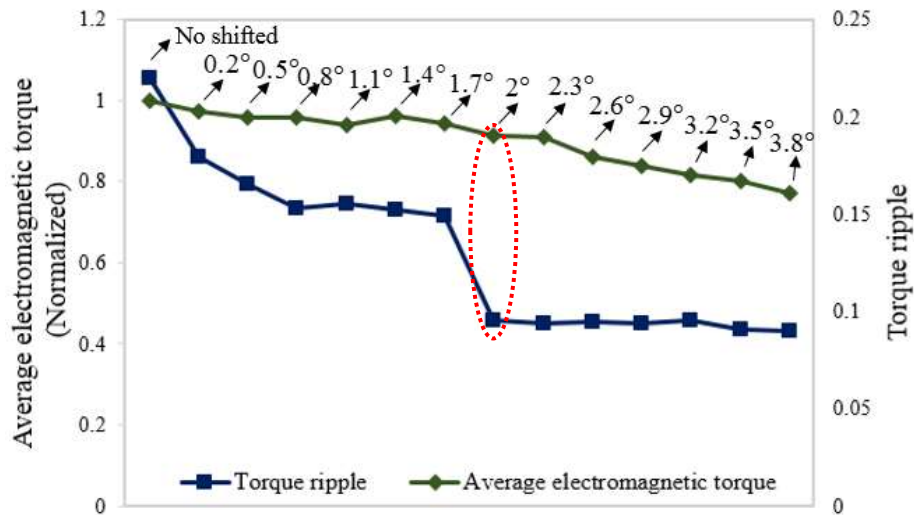
در این پژوهش، برای اعمال زاویه جابه‌جایی بهینه از روش تورب هسته‌های U شکل استاتور استفاده شده‌است. علاوه بر این، روش جابه‌جایی قطب‌های روتور که ایده آن برگرفته از مقاله [۲۲] است، ارائه شده‌است. در نهایت، دو روش جابه‌جایی قطب‌های روتور و تورب هسته‌های استاتور مقایسه شده‌اند.

### ۳-۵- کاهش گشتاور دندانه‌ای به روش جابه‌جایی قطب‌های روتور

با توجه به شکل (۴-۵) روتور در هر فاز شامل دو ردیف مجزا است در نتیجه امکان کاهش گشتاور دندانه‌ای با استفاده از روش جابه‌جایی یکی از ردیف‌ها نسبت به ردیف دیگر، بدون تاثیر قابل ملاحظه بر گشتاور الکترومغناطیسی وجود دارد. با جابه‌جایی یکی از ردیف‌ها به میزان  $\alpha$ ، هارمونیک مخرب گشتاور الکترومغناطیسی را می‌توان حذف کرد. در شکل (۵-۵) طرح جابه‌جا شده ردیف‌های روتور در ژنراتور مورد نظر نشان داده شده است. در این روش هیچ تغییری در موقعیت هسته‌های استاتور و سیم‌پیچ داده نشده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که روش جابه‌جایی قطب‌های روتور باعث کاهش هارمونیک‌های مخرب موجود در گشتاور TFPMG A شده است. رپل گشتاور به آرامی با افزایش زاویه جابه‌جایی کاهش می‌یابد (شکل ۵-۵). در زاویه جابه‌جایی ۲ درجه مکانیکی، به دلیل حذف هارمونیک اصلی، گشتاور دندانه‌ای کاهش چشم‌گیری داشته است.



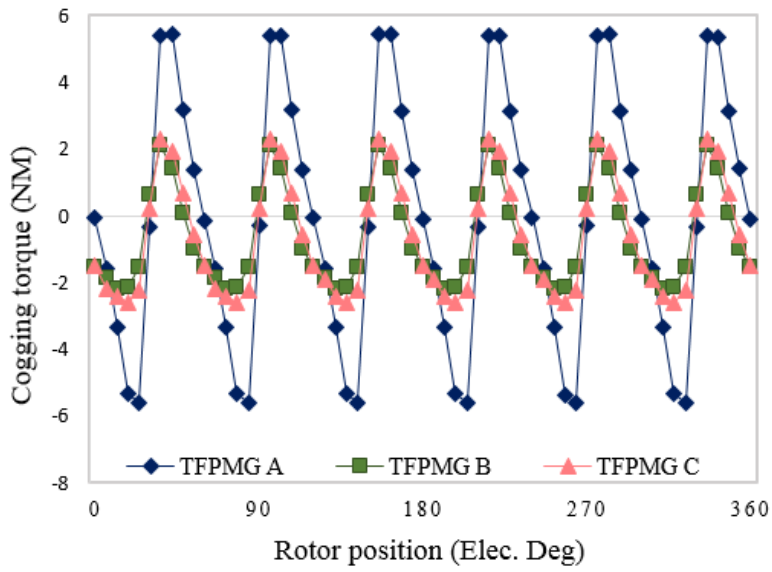
شکل (۴-۵): ساختار ردیف‌های هسته‌های رتور در یک فاز، A Motor: ساختار هسته‌های روتور در TFPMG A، Motor B: ساختار جابه‌جا شده هسته‌های روتور در TFPMG B



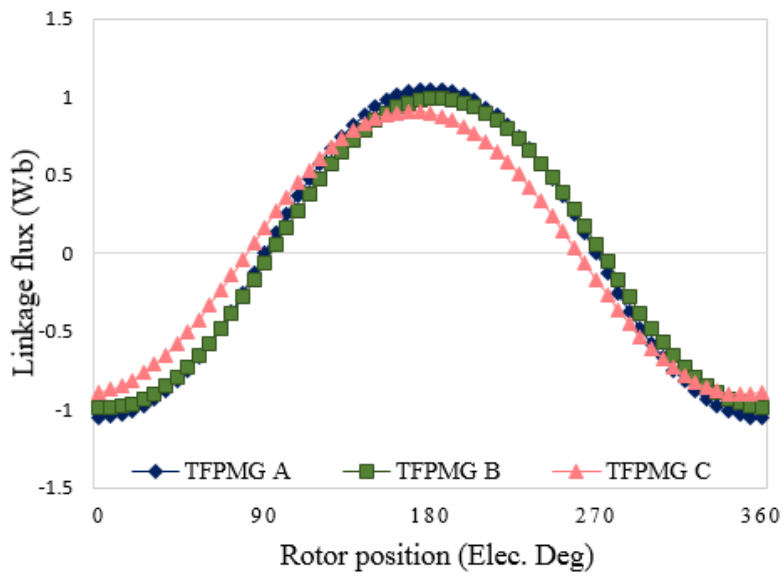
شکل (۵-۵): نمودار مقایسه گشتاورهای دندانه‌ای و متوسط در زاویه‌های جابه‌جایی متفاوت قطب‌های روتور

پس از این و با افزایش زاویه جابه‌جایی، روند کاهش گشتاور دندانه‌ای کند می‌شود. با افزایش زاویه جابه‌جایی، اندوکتانس‌های ناشی و در نتیجه گشتاور الکترومغناطیسی کاهش می‌یابد. بنابراین کمترین و موثرترین زاویه از نظر ریپل گشتاور برای طرح مورد نظر این پژوهش، ۲ درجه مکانیکی است. گشتاور دندانه‌ای در ژنراتور TFPMG A و ژنراتور TFPMG با هسته‌های روتور جابه‌جا شده (TFPMG B) در شکل (۶-۵) مقایسه شده است. با استفاده از روش جابه‌جایی قطب‌های روتور، پیک گشتاور دندانه‌ای در TFPMG B به مقدار ۶۰/۲۲٪ کاهش یافته است. با کاهش گشتاور دندانه‌ای، مطابق شکل (۷-۵)، شار پیوندی نیز کاهش یافته و به دلیل وابستگی مستقیم شار پیوندی با ولتاژ داخلی و گشتاور الکترومغناطیسی، منجر به کاهش این دو پارامتر نیز می‌شود.





شکل (۵-۶): مقایسه گشتاورهای دندانه‌ای در TFPMG A، TFPMG B و TFPMG C



شکل (۵-۷): مقایسه شارهای پیوندی در TFPMG A، TFPMG B و TFPMG C

#### ۵-۴- کاهش گشتاور دندانه‌ای به روش تورب هسته‌های استاتور

در بسیاری از ساختارهای ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع، امکان جابه‌جایی قطب‌های روتور و یا استاتور وجود ندارد. به این دلیل، در این پژوهش روش تورب هسته‌های استاتور به منظور اعمال زاویه جابه‌جایی ( $\alpha$ )، ارائه شده‌است. در حقیقت، روش تورب هسته‌های U شکل براساس تغییر در زاویه هسته‌ها در صفحه عمود بر صفحه چرخش روتور است ( شکل ۵-۹).

تورب هسته‌های استاتور باعث کاهش تغییرات رلوکتانس فاصله هوایی و کاهش گشتاور دندانه‌ای می‌شود. هرچند در این روش، سطح مقطع موثر عبوری شار فاصله هوایی کاهش یافته و در نتیجه سبب کاهش گشتاور متوسط الکترومغناطیسی می‌شود. بنابراین، بدست آوردن زاویه بهینه تورب هسته‌های استاتور به منظور دستیابی به رپیل گشتاور کمینه و گشتاور متوسط الکترومغناطیسی بیشینه، یکی از نکات کلیدی در این روش است.

مراجع مربوط به کاهش گشتاور دندانه‌ای به روش تورب هسته‌های استاتور در ماشین‌های مغناطیس دائم شار متقاطع بسیار اندک است و با توجه به بررسی‌های انجام شده تعیین زاویه بهینه برای هسته‌های استاتور به طور خاص در هیچ مقاله‌ای بررسی نشده‌است. به این دلیل در این پژوهش، زاویه بهینه تورب هسته‌های استاتور به کمک زاویه جابه‌جایی و محاسبات هندسی محاسبه شده‌است. صحت زاویه به دست آمده به کمک شبیه‌سازی‌های متعدد در زوایای مختلف تورب تایید شده‌است.

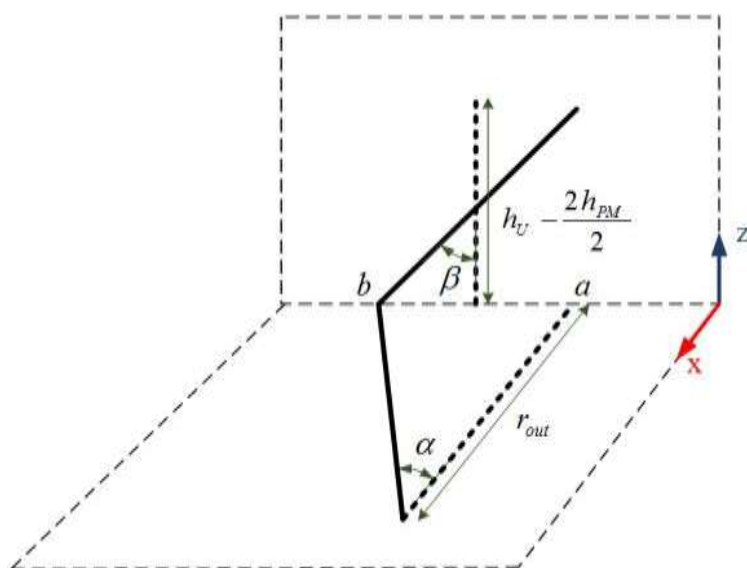
در روش جابه‌جایی قطب‌های روتور، تمام نقاط موجود در یکی از ردیف‌های روتور به اندازه  $r_{out} \cdot \alpha$  نسبت به دیگری جابه‌جا شده‌است. در واقع در روش تورب، به‌جای جابه‌جایی یکی از ردیف‌های روتور، یکی از دندانه‌های استاتور نسبت به دیگری جابه‌جا می‌شود. این زاویه تورب به کمک طرح هندسی (۵-۸) بدست می‌آید. همان‌طور که در شکل (۵-۹) نشان داده شده‌است، تورب هسته‌های استاتور در ژنراتور طراحی شده به سادگی امکان پذیر است.

با استفاده از طرح هندسی، زاویه بهینه تورب هسته‌های استاتور طبق معادله زیر بدست می‌آید:

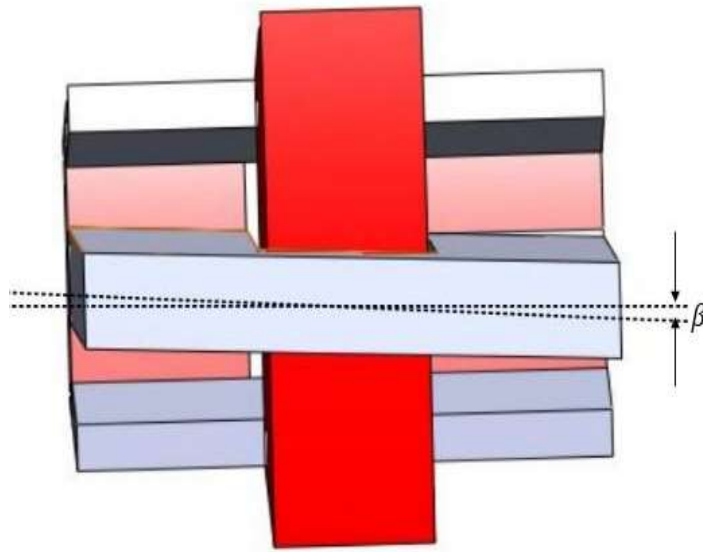
$$\beta = \arctg\left(\frac{r_{out} \cdot \alpha}{h_u - h_{PM}}\right) \quad (11-5)$$

که در این رابطه  $r_{out}$ ،  $h_u$  و  $\beta$  و  $h_{PM}$  به ترتیب زاویه خارجی روتور، ارتفاع هسته‌های U شکل، زاویه تورب هسته‌ها و ارتفاع مغناطیس‌های دائم هستند. با توجه به ساختار ژنراتور طراحی شده، زاویه بهینه تورب هسته‌های استاتور ۳/۱۸ درجه مکانیکی است. نتایج شبیه‌سازی در زوایای متفاوت تورب نشان دهنده کاهش چشم‌گیر گشتاور دندانه‌ای در زاویه بهینه محاسبه شده است.

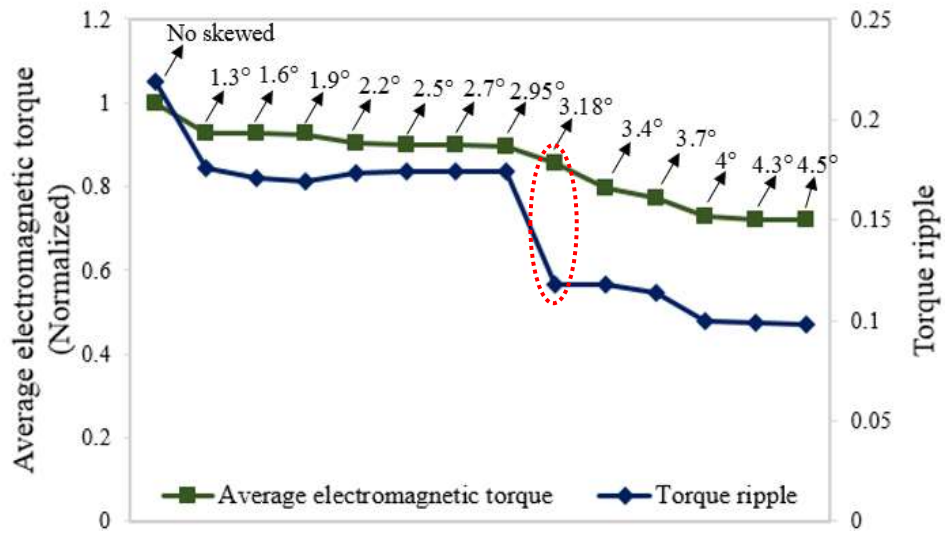
همان‌طور که در شکل (۶-۵) نشان داده شده است، گشتاور دندانه‌ای در ژنراتور مغناطیس دائم شار متقاطع با هسته‌های مورب بهینه (TFPMG C)، به اندازه ۵۵/۸٪ کاهش یافته است. مقایسه بین سه ساختار TFPMG A، TFPMG B و TFPMG C براساس ریپل گشتاور ( $T_{rip}$ )، گشتاور متوسط الکترومغناطیسی ( $T_{ave}$ )، گشتاور دندانه‌ای پیک تو پیک ( $T_{p-p}$ )، تلفات ( $P_{loss}$ )، بازده ( $\eta$ )، مقدار ولتاژ بی‌باری ( $V_{fa}$ ) و مقدار هارمونیک سوم ولتاژ بی‌باری ( $V_{3-th}$ ) در جدول (۱-۵) داده شده است. در جدول (۲-۵) پارامترهای کلیدی طراحی در ژنراتورهای TFPMG A، TFPMG B و TFPMG C با ژنراتورهای PMTF، PMTF With Magnetic shunt، TFPM (conv) و PM MWSM مقایسه شده اند [۸۶-۸۹].



شکل (۸-۵): طرح هندسی برای محاسبه زاویه بهینه تورب هسته‌های U شکل استاتور



شکل (۵-۹): طرح تورب هسته‌های U شکل استاتور



شکل (۵-۱۰): نمودار مقایسه گشتاورهای دندانه‌ای و متوسط در زاویه‌های تورب متفاوت هسته‌های استاتور

جدول (۵-۱): مقایسه پارامترهای اساسی در سه ساختار TFPMG A ، TFPMG B و TFPMG C

TFPMG C	TFPMG B	TFPMG A	مشخصه
۱۱/۵۴٪	۹/۵۱٪	٪۲۲/۶	$T_{rip}$
۴۲/۱ NM	۴۴/۹NM	۴۸/۷NM	$T_{ave}$
۴/۸۶ NM	۴/۲۷ NM	۱۱/۰۱ NM	$T_{P-P}$
۳۵/۱ W	۳۳ W	۲۷/۱۲ W	$P_{loss}$
٪۹۰	٪۹۱	٪۹۷	$\eta$
۲۹۹۷	۳۱۱۷	۳۳۴۷	$V_{fa}$
۱۴۷	۲۰۷	۳۱۷	$V_{3-th}$

جدول (۵-۲): مقایسه پارامترهای کلیدی در ژنراتورهای TFPMG A ، TFPMG B و TFPMG C با ژنراتورهای

PM MWSM و TFPM (conv) ،PMTF With Magnetic shunt ،PMTF

PM MWSM	TFPM (conv)	PMTF with Double Coil	PMTF with Magnetic shunt	PMTF	TFPMG C	TFPMG B	TFPMG A	مشخصه
۱۶٪	۹۳٪	۹۷٪	۱۴٪	۲۶٪	۱۱/۵۴٪	۹/۵۱٪	٪۲۲/۶	$T_{rip}$
-	۲۲/۵ NM	۲۲/۵ NM	۱۴۰ NM	۱۵۰ NM	۴۲/۱ NM	۴۴/۹NM	۴۸/۷NM	$T_{ave}$
-	۲۱ NM	۲۲ NM	۲۰ NM	۴۰ NM	۴/۸۶ NM	۴/۲۷ NM	NM ۱۱/۰۱	$T_{P-P}$
٪۸۳	٪۸۰	٪۹۰	٪۹۰	٪۷۰	٪۹۰	٪۹۱	٪۹۷	$\eta$
۰/۷۸	۰/۷۵	۰/۸۵	۰/۷	۰/۵	۰/۹۵	۰/۹۳	۰/۹۱	PF
۰/۰۲۵	۰/۰۲	۰/۰۵	-	-	۰/۰۹۵	۰/۰۹۵	۰/۰۹۵	P/W



## فصل ششم :

راست آزمایی عملکرد ژنراتور به روش تجربی

## ۶-۱- مقدمه

در این فصل راست آزمایی مدل ارائه شده با استفاده از یک نمونه عملی ۳۰ قطبی ساخته شده برای ژنراتور شار متقاطع مغناطیس دائم مورد مطالعه انجام می‌گردد. در این فصل ابتدا روش و مراحل ساخت نمونه عملی شرح داده شده و ساختار ماشین ساخته شده از لحاظ جنس و ابعاد توضیح داده می‌شود. در این بخش به توضیح کامل روند ساخت ماشین مغناطیس دائم شار متقاطع سه فاز یک طرفه یک سیم‌پیچ با هسته U شکل و هسته‌های I شکل پرداخته می‌شود. اجزاء ماشین طراحی شده شامل روتور، استاتور و سیم‌پیچ است که هر یک شامل چند قطعه دیگر است که با در نظر گرفتن قیود مورد نظر و محدودیت‌های موجود، طراحی و ساخته شده‌اند. در ادامه نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج حاصل از اندازه گیری مشخصه‌های نمونه ساخته شده مقایسه می‌گردد. در ادامه به تفصیل روند طراحی و ساخت این اجزاء پرداخته می‌شود.

## ۶-۲- استاتور

استاتور شامل هسته‌های U شکل، صفحه نگهدارنده هسته‌ها، سیم‌پیچی، بدنه استاتور، نگهدارنده‌های غیر مغناطیسی و هسته‌های I شکل است. با توجه به شکل (۶-۱) بدنه استاتور این ماشین به صورت پوسته استوانه‌ای شکل و شامل سه ردیف شیار برای ثابت نگه داشتن هسته‌های U شکل هر یک از فازها است. جنس بدنه استاتور باید از مواد غیر مغناطیسی یا عایق شار مغناطیسی باشد. همچنین این ماده باید از استحکام مکانیکی و حرارتی نسبتاً خوبی برخوردار باشد. از طرف دیگر محدودیت وزن و قیمت ماده به کار رفته باید در نظر گرفته شود. برای این منظور از آلومینیوم برای ساخت بدنه استاتور استفاده شده است. در ابتدا یک پوسته استوانه‌ای شکل با ابعاد بزرگتر ریخته‌گری شده و سپس به کمک دستگاه تراش یک پوسته یکنواخت با ابعاد مورد نظر طراحی تراشکاری شده است. در نهایت برای ایجاد هر کدام از شیارهای ردیف‌ها از روش فرز کاری صنعتی (با استفاده از دستگاه CNC) استفاده شده است. روی هر ردیف استاتور ۱۵ عدد شیار با فاصله ۲۴ درجه مکانیکی قرار می‌گیرند. شیارهای هر کدام از ردیف‌های استاتور نسبت به شیارهای ردیف دیگر ۸ درجه مکانیکی اختلاف فاز دارد. از یک پله



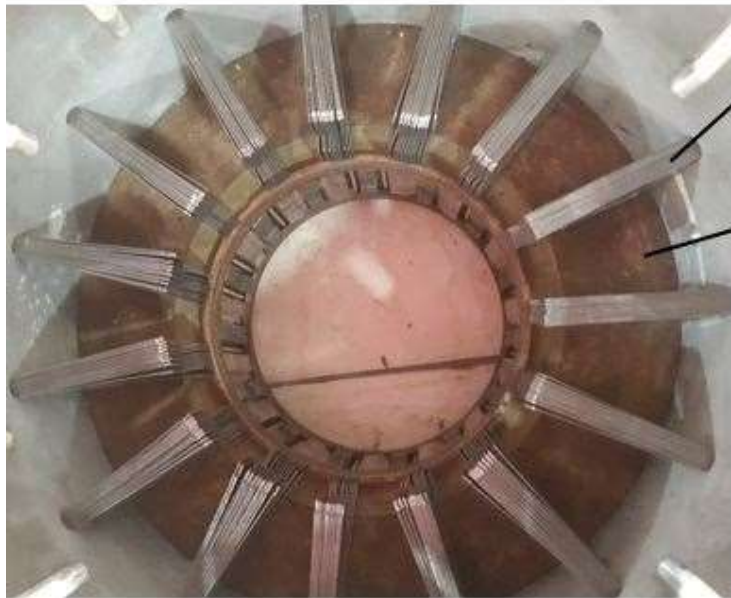
داخلی درون بدنه استاتور یا به اصطلاح نافی برای ثابت نگه داشتن صفحه نگهدارنده هسته‌ها و سیم-پیچی هر فاز استفاده شده است.

قسمت دوم تشکیل دهنده استاتور هسته‌های U شکل است. اولین نکته مهم که دلیل اصلی ساخت هسته استاتور را ایجاب می‌کند قرار گرفتن سیم‌پیچ‌های استاتور بر روی آن است تا چگالی شار مغناطیسی و چگالی انرژی لازم برای راه اندازی و عملکرد ژنراتور پدید آید. علاوه بر این هسته‌ها می‌توانند به شار مغناطیسی تولید شده توسط سیم‌پیچ‌ها جهت داده و به توزیع آن شکل دلخواه دهند. قابلیت نفوذپذیری در فولاد بارها بیشتر از نفوذپذیری درخلا است. با استفاده از هسته‌های فولادی جریان مغناطیس کننده مورد نیاز برای هسته به شدت کاهش می‌یابد و شار در مسیری کاملاً نزدیک سیم‌پیچ‌ها محبوس می‌شود. این هسته‌ها باید دارای نفوذپذیری مغناطیسی بالا، وزن و قیمت کم و همچنین در دسترس باشند. با توجه به معیارهای موجود جنس هسته‌ها از ورق‌های ۰/۵ میلی‌متر 50JN470 و یا به اصطلاح m470 موجود در بازار انتخاب شده است که علاوه بر دارا بودن معیارهای ذکر شده در فرکانس‌های بالا عملکرد بهتری دارند. یکی از بزرگترین مزیت‌های این هسته‌ها نسبت به فریت غیرقابل شکنندگی و انعطاف پذیر بودن آن‌هاست. استفاده از هسته یکپارچه باعث افزایش تلفات گردابی در هسته‌ها می‌شود گرچه استفاده از هسته‌های با لایه‌های نازک‌تر تلفات را کاهش می‌دهد اما از طرفی باعث افزایش هزینه ساخت می‌شود. با استفاده از دستگاه CNC شیارهایی به عمق ۱ میلی‌متر و عرض ۱۰ میلی‌متر مطابق شکل (۶-۲) در صفحه‌های نگهدارنده هسته‌ها و سیم‌پیچی هر کدام از فازها ایجاد شده است تا هسته‌های U شکل در داخل این شیارها قرار گیرند. همچنین به منظور تنظیم فاصله هوایی و جلوگیری از حرکت رو به جلوی این هسته‌ها بر روی صفحه نگهدارنده هسته‌ها، یک پله داخلی به ضخامت ۱ میلی‌متر ایجاد شده است. با توجه به معیارهای مورد نظر طراحی جنس صفحه‌های نگهدارنده هسته‌ها و سیم‌پیچی از فایبر گلاس مرغوب است. یکی از بارزترین مشخصه‌های این نوع ماده غیر قابل شکنندگی و استحکام مکانیکی بالای آن در دما و فشار زیاد است. سپس هسته‌های U شکل در جای خود و در داخل شیارهای موجود در بدنه استاتور با استفاده از چسب مخصوص محکم می‌شوند. شکل

(۲-۶) نحوه قرار گرفتن هسته‌های U شکل درون شیارهای بدنه و صفحه نگهدارنده هسته‌ها و سیم‌پیچی استاتور را نشان می‌دهد. شکل (۳-۶) و شکل (۴-۶) ساختار دو فاز استاتور و ساختار استاتور سه فاز و همچنین نحوه قرار گرفتن هسته‌های I شکل و هسته‌های U شکل به همراه پایه‌های نگهدارنده را نشان می‌دهد. سیم‌پیچی این ماشین شامل ۳ کلاف دایره‌ای است (۱ کلاف در هر فاز)، که از سیم مسی با تعداد دور ۲۲۵ دور در هر کلاف و شعاع متوسط ۱۲۱/۵ میلی‌متر ساخته شده است. این ۳ کلاف به صورت دایره‌ای و با استفاده از قالب مناسب پیچیده شده است. بعد از پیچاندن سیم و خارج کردن آن از قالب کلاف به وسیله چسب شار لاک محکم کاری شده است. سپس ۳ کلاف ساخته شده کاملاً یکسان در بین پایه‌های هسته‌های U شکل قرار می‌گیرند. برای اطمینان از اتصال نیافتن سیم‌پیچ با سطح هسته‌های U شکل، سیم‌پیچی با استفاده از پارچه مخصوص عایق کاری شده است. از هر کدام از کلاف‌های سیم‌پیچ دو سر سیم برای اتصال سه فاز خارج می‌شوند.



شکل (۱-۶): ساختار بدنه استاتور



هسته U شکل

صفحه نگهدارنده  
هسته ها و سیم پیچی

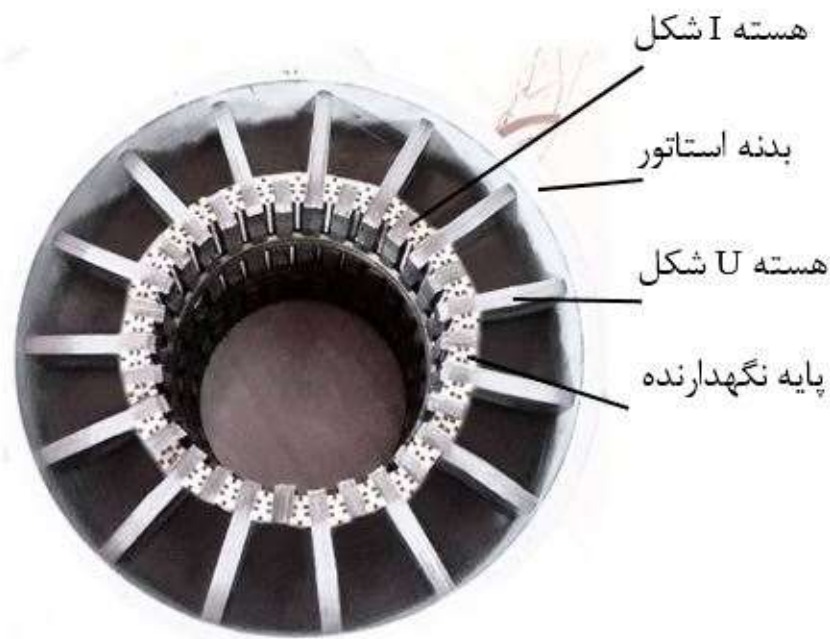
شکل (۶-۲): نحوه ثابت شدن هسته‌های U شکل درون شیارهای بدنه و صفحه نگهدارنده هسته‌ها و سیم‌پیچی



شیار

بدنه استاتور

شکل (۶-۳): ساختار دو فاز استاتور



شکل (۴-۶): ساختار سه فاز استاتور

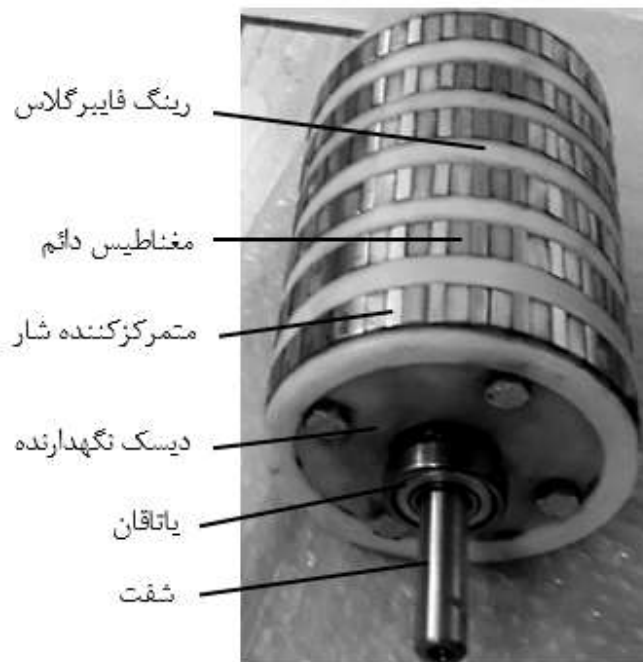
## ۶-۲- روتور

روتور شامل بدنه نگهدارنده، شفت، مغناطیس‌های دائم نئودیموم برم، متمرکزکننده‌های شار، رینگ‌های جدا کننده و دو دیسک انتهایی است. با توجه به شکل (۵-۶) بدنه روتور این ماشین به صورت پوسته استوانه‌ای شکل و شامل دو ردیف شیار در هر فاز برای ثابت کردن متمرکز کننده‌ها و مغناطیس‌های دائم روی بدنه است. جنس بدنه استاتور باید از مواد غیر مغناطیسی باشد و از استحکام مکانیکی خوبی برخوردار باشد برای این منظور از آلومینیوم برای ساخت بدنه نگهدارنده روتور استفاده شده است. مشابه ساخت بدنه استاتور برای ساخت بدنه نگهدارنده روتور در ابتدا یک پوسته استوانه‌ای شکل با ابعاد بزرگتر ریخته‌گری شده و سپس به کمک دستگاه تراش یک پوسته یکنواخت با ابعاد مورد نظر طراحی تراشکاری شده است. از شیارهای به عمق  $0/5$  میلی‌متر برای ثابت کردن متمرکزکننده‌های شار و مغناطیس‌های دائم استفاده شده است. جنس مغناطیس‌های دائم از نئودیموم برم و متمرکزکننده‌های شار از ورق‌های  $0/5$  میلی‌متر 50JN470 انتخاب شده است. مطابق شکل از دو دیسک در دو طرف بدنه نگهدارنده روتور برای ثابت کردن بدنه نگهدارنده و شفت استفاده شده است. این بدنه طوری طراحی

شده است که محل قرارگیری آهنربا و آهن در قسمت رینگ دارای لبه است علت این طراحی ثابت نگه داشتن آهن و آهنربا کنار یکدیگر است. شفت شامل دو پله برای قرا گرفتن یا تاقانها در طرفین روتور و نیز یک پله برای قرار گرفتن قالبها است. وظیفه قالبها ثابت نگه داشتن روتور در مرکز استاتور توسط شفت است. شکل (۶-۶) ساختار روتور و نحوه کنارهم قرار گرفتن متمرکزکنندههای شار و آهنرباها را نشان می‌دهد. هردو رینگ شامل ۶۰ قسمت است که در هر قسمت تعدادی متمرکزکننده شار و آهنربا کنار یکدیگر قرار گرفته اند. در ساختار روتور در مجموع ۳۶۰ آهنربا به ابعاد ۱۰، ۱۰، ۲۰ میلی‌متر به کار برده شده است. رینگهای فایبر گلاس موجود بین هر فاز و ردیفهای موجود نقش ثابت نگه داشتن آهنرباها و متمرکزکنندهها را به عهده دارند.



شکل (۶-۵): بدنه نگهدارنده روتور به همراه شفت



شکل (۶-۶): روتور شامل رینگ‌های فایبر گلاس، متمركز کننده‌های شار، آهنرباها، شفت، بدنه، یاتاقان و دو دیسک انتهایی

### ۳-۶- آزمایش ژنراتور

در مرحله پایانی تمام قطعات ساخته شده در جای خود قرار می‌گیرند. شکل (۶-۷) ماشین مونتاز شده را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل مشخص است، روتور و استاتور توسط قالب‌های پروانه‌ای شکل در مرکز ماشین تنظیم شده‌اند. هنگامی که ساخت ژنراتور به پایان رسید سر بندی سیم پیچی‌های استاتور را انجام می‌دهیم تا برای تست آماده گردد.

برای راه اندازی ژنراتور از درایو استفاده می‌کنیم تا کلید زنی و انرژی لازم برای حرکت موتور تامین شود و بتوانیم فرکانس را به مقادیر دلخواه و در زمان‌های معین اعمال کنیم. پلت فرم آزمایشگاهی شامل درایو، موتور راه‌انداز، ژنراتور مغناطیس دائم شار متقاطع و اسیلوسکوپ در شکل (۶-۸) نشان داده شده است. با تنظیم درایو و چرخش روتور ژنراتور مغناطیس دائم شار متقاطع توسط موتور راه‌انداز در سرعت ۲۰۰ rpm نتایج مورد نیاز حاصل از اندازه‌گیری‌های بی‌باری را توسط اسیلوسکوپ ذخیره سازی می‌کنیم.

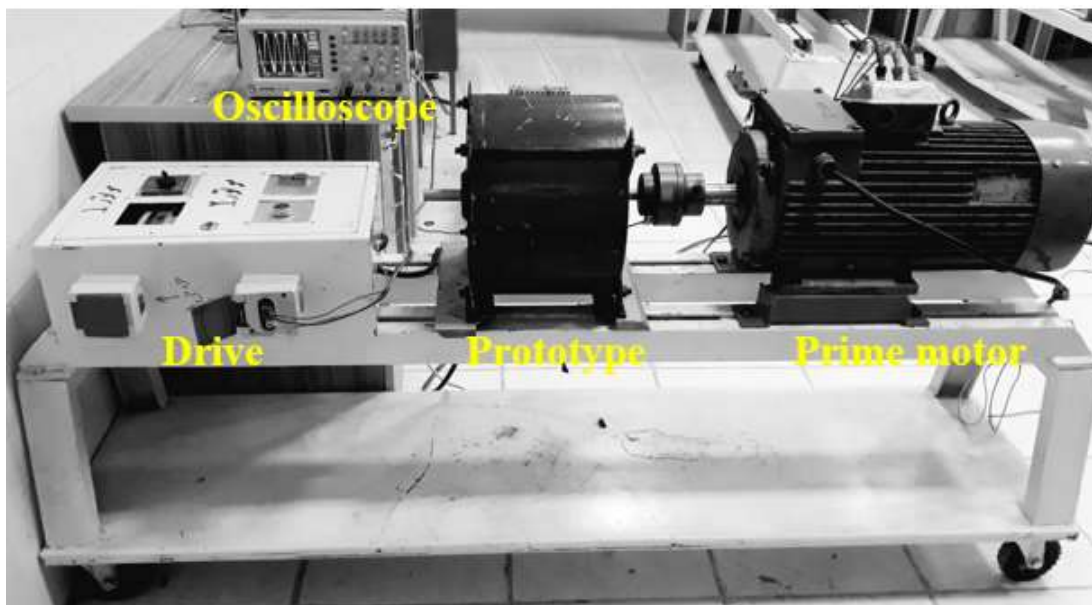


شکل (۶-۷): مونتاژ نهایی ماشین مغناطیس دائم شار متقاطع ساخته شده

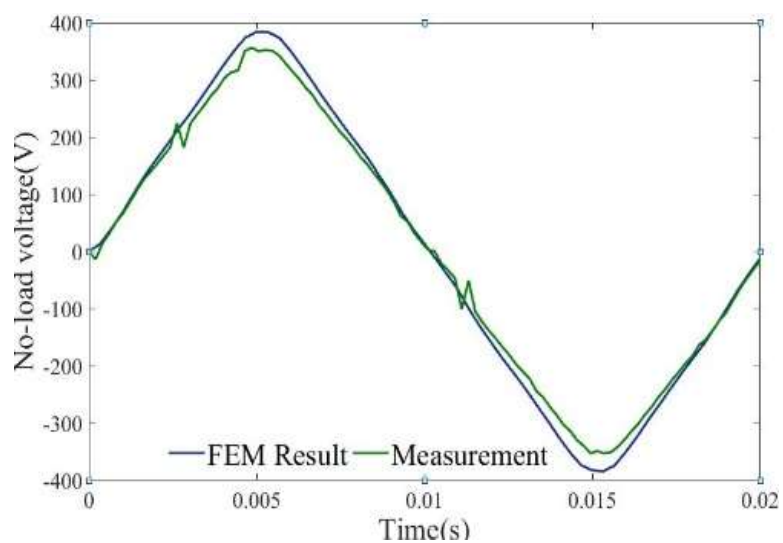
شکل موج‌های بی‌باری حاصل از اندازه‌گیری و شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود در شکل (۶-۹) مقایسه شده‌اند. با توجه به بررسی‌های انجام شده، مقدار دامنه اصلی ولتاژ بی‌باری حاصل از اندازه‌گیری‌ها و شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود به ترتیب ۲۹۴۷ و ۳۳۴۷ است.

در شرایط حداکثر بار بازده در این ژنراتور ۹۲٪ است، که نسبت به شبیه‌سازی‌ها ۵٪ کاهش یافته است. همچنین در همین شرایط بار با توجه به شکل (۶-۱۰) مقدار دامنه اصلی ولتاژ اندازه‌گیری شده و ولتاژ حاصل از نتایج شبیه‌سازی‌های اجزاء محدود نیز به ترتیب ۲۶۹۷ و ۲۹۵۷ است. در شرایط ۷۵٪ و ۵۰٪ بار نامی مقدار بازده به ترتیب ۸۸٪ و ۸۵٪ است. از روی نتایج مشخص است که حداکثر خطای روش اجزاء محدود با نتایج حاصل از اندازه‌گیری نمونه ساخته شده کمتر از ۱۰٪ است و این نشان دهنده این است که این روش جهت طراحی اولیه روشی مناسب است. همچنین از روی نتایج مشخص است که ژنراتور در نقطه کار نامی خود بهترین عملکرد و بالاترین بازده را دارد.



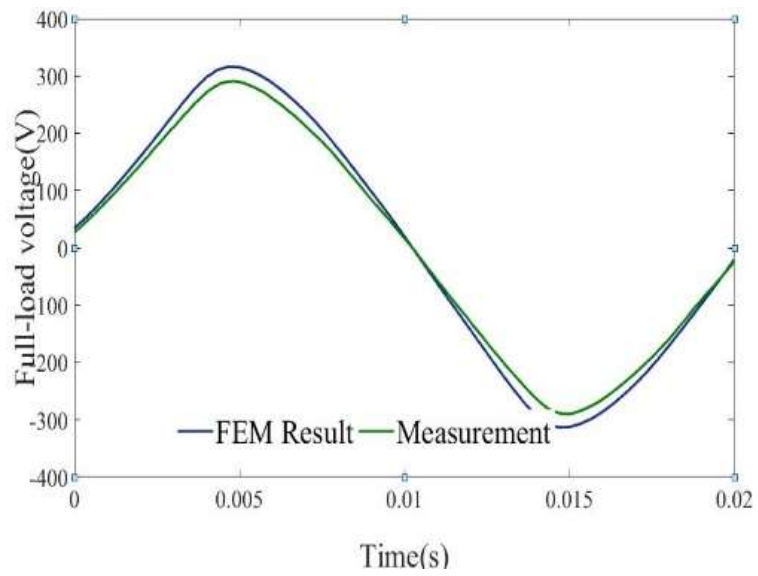


شکل (۶-۸): پلتفرم آزمایشگاهی در شرایط بی‌باری



شکل (۶-۹): مقایسه شکل موج‌های ولتاژ بی‌باری حاصل از اندازه‌گیری‌های عملی و نتایج شبیه‌سازی





شکل (۶-۱۰): مقایسه شکل موج‌های ولتاژ حاصل از اندازه‌گیری‌های عملی و نتایج شبیه‌سازی در شرایط حداکثر بار نامی



فصل هفتم:

نتیجه‌گیری و پیشنهادات

## ۷-۱- جمع بندی و نتیجه گیری

ژنراتورهای با حداکثر بازده و حداقل هزینه را می توان به عنوان مناسب ترین ژنراتورها برای کاربرد در سیستم های بادی معرفی کرد. ژنراتورهای درایو مستقیم بازده بیشتری نسبت به ژنراتورهای دارای جعبه دنده دارند. از محدودیت های مهم ژنراتورهای سیستم های درایو مستقیم بزرگ و سنگین بودن آن ها بدلیل عملکرد در سرعت پایین و در نتیجه نیاز به گشتاور بالا و قطر فاصله هوایی بزرگ است. در این پایان نامه ماشین های شار متقاطع به عنوان گروهی از ماشین های سنکرون با آهنربای دائمی که دارای چگالی گشتاور بالا نسبت به سایر انواع ماشین ها هستند معرفی شده و اصول عملکرد آنها مورد بررسی قرار گرفت. همچنین نشان داده شد که این نوع ماشین ها دارای عملکرد مناسب در تعداد قطب بالا، سرعت پایین و دارای تلفات مسی کم نسبت به سایر ماشین های مغناطیس دائم هستند. بنابراین ماشین های شار متقاطع مغناطیس دائم به عنوان مناسب ترین نوع ماشین های مغناطیس دائم برای کاربردهای سیستم توربین بادی درایو مستقیم معرفی شد.

در این پایان نامه پس از بررسی ویژگی های مهم ماشین های شار متقاطع، با استفاده از فرمول های ارائه شده یک نوع ماشین شار متقاطع مغناطیس دائم که هندسه و ساختار آن مناسب برای کاربرد در نیروگاه های بادی است معرفی و طراحی شد. صحت طراحی با استفاده از نتایج حاصل از شبیه سازی به روش اجزاء محدود و به کمک نرم افزار MATLAB مورد تایید قرار گرفت.

یکی از مهم ترین محدودیت ها در ساختارهای توربین بادی ریپل گشتاور است. بنابراین، با انجام تحلیل های الکترومغناطیسی ریپل گشتاور موتور مورد بررسی قرار گرفت. نشان داده شد که با استفاده از سری فوریه و تحلیل تمامی هارمونیک های موجود در ریپل گشتاور می توان زوایای بهینه جابه جایی قطب های روتور را بدست آورد. سپس برای بدست آوردن زاویه تورب بهینه هسته های استاتور یک طرح هندسی با توجه به ساختار ژنراتور طراحی شده پیشنهاد گردید. با استفاده از شبیه سازی اجزاء محدود نشان داده شد که زوایای بدست آمده برای جابه جایی قطب های روتور و تورب هسته های استاتور، زوایای بهینه

هستند. تاثیر این دو روش بر شار پیوندی، گشتاور، تلفات و بازده و سایر پارامترهای مهم طراحی، مورد بررسی قرار گرفت.

در نهایت به منظور راست آزمایی روش مدل سازی و طراحی با استفاده از یک نمونه عملی ساخته شده برای ماشین مغناطیس دائم شار متقاطع مورد مطالعه مورد ارزیابی قرار گرفت. ابتدا مراحل و روش ساخت این نمونه شرح داده شده است. نتایج حاصل از شبیه سازی های اجزاء محدود با نتایج اندازه گیری مقایسه شد. حداکثر خطای روش اجزاء محدود با نتایج حاصل از اندازه گیری نمونه ساخته شده کمتر از ۱۰٪ است و این نشان دهنده این است که این روش جهت طراحی اولیه روشی مناسب است. همچنین از نتایج مشخص است که ژنراتور در نقطه کار نامی خود بهترین عملکرد و بالاترین بازده را دارد.

#### ۲-۷- پیشنهادات

زمینه های تحقیقی زیر جهت ادامه تحقیق در زمینه ماشین های شار متقاطع پیشنهاد می گردند:

- ✓ بررسی منابع مکانیکی ریپل گشتاور ماشین های شار متقاطع؛
- ✓ تعیین ریپل گشتاور ماشین های شار متقاطع در محیط آزمایشگاهی و مقایسه آن با نتایج شبیه سازی؛
- ✓ کاهش ریپل گشتاور با استفاده از بهینه سازی شکل قطب های روتور و استاتور؛

## پیوست

$B_{pm}$ : چگالی شار آهنربا

$\Phi_{pm}$ : شار آهنربا

$A_{pm}$ : سطحی از آهنربا که در جهت شارژ میدان است

$\omega_e$ : سرعت الکتریکی زاویه‌ای

$P$ : تعداد جفت قطب‌ها

$B_{ag}$ : چگالی شار متوسط فاصله هوایی

$A$ : بارگزاری الکتریکی ویژه (چگالی جریان سطحی)

$N$ : تعداد دورهای سیم‌پیچی در هر فاز

$D_g$ : قطر فاصله هوایی

$b_{fc}$ : عرض متمرکزکننده‌های شار

$h_{fc}$ : طول محوری متمرکزکننده‌های شار

$B_{knee}$ : چگالی شار نقطه زانویی در هسته‌های روتور

$l_{pm}$ : طول آهنرباها

$K_{lf}$ : ضریب نشستی شار

$K_{ff}$ : ضریب متمرکزکنندگی شار

$\phi_g$ : شار فاصله هوایی

$i$ : تعداد هسته‌های استاتور

$f$ : فرکانس نامی

$S_n$ : توان ظاهری

$b_{teeth}$ : عرض دندانه‌های استاتور

$h_{teeth}$ : طول محوری دندانه‌های استاتور

$A_s$ : سطح مقطع سیم‌پیچی

$J$ : چگالی جریان

$n_s$ : سرعت (rpm)

$A_{fc}$ : سطح مقطع متمرکزکننده‌های شار در تماس با آهنرباها

$A_{pa}$ : سطح مقطع قطب

- [1] B. Deok-je, (2010), PhD. Thesis, "Design of transverse flux permanent magnet machines for large direct-drive wind turbines", TU Delft, Delft University of Technology
- [2] Bang. D, Polinder. H, Shrestha. G, and Ferreira. J.A, (2008), "Review of generator systems for direct-drive wind turbines", European Wind Energy Conference & Exhibition, Belgium, vol. 31
- [3] Polinder. H, Van der Pijl. F.F, De Vilder. G.J, and Tavner. P.J, (2006), "Comparison of direct-drive and geared generator concepts for wind turbines", IEEE Trans. Energy Convers, 21, 3, pp.725-733
- [4] Cavagnino. A, Mario. L, Francesco. P, and Alberto. T, (2002), "A comparison between the axial flux and the radial flux structures for PM synchronous motors", IEEE Transactions on Industry Applications, 38, 6, pp. 1517-1524.
- [5] Tovar-Barranco. A, Gómez. D. J, López-de-Heredia. A, and Villar. I, (2016), "High torque density transverse flux permanent magnet machine design for wind power generation", In XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM), pp. 782-788.
- [6] Hasan. I, Husain. T, Uddin. M.W, Sozer. Y, Husain. I, and Muljadi. E, (2015), "Analytical modeling of a novel transverse flux machine for direct drive wind turbine applications", IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Montreal, QC, Canada, pp. 2161-2168.
- [7] Lu. Q.F, Li. Y.X, Huang. X.Y, and Ye. Y.Y, (2015), "Analysis of transverse-flux linear switched-flux permanent magnet machine", IEEE Trans. Magn., 51, 11, pp.1-4.
- [8] Liu. C, Lei. G, Ma. B, Wang. Y, Guo. Y, and Zhu. J, (2017), "Development of a New Low-Cost 3-D Flux Transverse Flux FSPMM with Soft Magnetic Composite Cores and Ferrite Magnets", IEEE Trans. Magn., 53, 11, pp.1-5.
- [9] Shin. J.S, Watanabe. R, Koseki. T, Kim. H.J, and Takada. Y, (2014), "The design for cogging force reduction of a double-sided transverse flux permanent magnet linear synchronous motor", IEEE Trans. Magn., 50, 11, pp.1-4.
- [10] Masmoudi. A, Njeh. A, and Elantably. A, (2005), "On the analysis and reduction of the cogging torque of a claw pole transverse flux permanent magnet machine", European Trans. Electrical Power, 15, 6, pp. 513-526
- [11] Jia. Z, Chen. W, Yu. L, Cai. J, and Jia. H, (2016), "A novel transverse-flux PM linear machine with double  $\Omega$ -hoop stator", IEEE Trans. Appl. Supercond, 26, 7, pp. 1-4.
- [12] Zheng. P, Zhu. S, Yu. B, Cheng. L, and Fan. Y, (2015), "Analysis and optimization of a novel tubular staggered-tooth transverse-flux PM linear machine", IEEE Trans. Magn, 51, 11, pp .1-4.



- [13] Wang. Q, Xu. Y, Li. Y, and Zou. J, (2016), “Design Criteria, Modeling, and Verification of Tubular Transverse Flux Machines for Force-to-Current Ratio Improvement in Direct Drive Applications”, *IEEE Trans. Magn*, 52, 7, pp. 1-4.
- [14] Wang. Q, Huang. W, and Dong. D, (2017), “Force ripples suppression of tubular transverse flux and flux reversal linear permanent magnet motor based on ADRC”. *Electr*”, *Mach. Syst. Conf.*, Sydney, NSW, Australia August, pp. 1-5.
- [15] Zhu. S, Cox. T, and Gerada. C, (2017), “Comparative study of novel tubular flux-reversal transverse flux permanent magnet linear machine”, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, Cincinnati, Ohio, USA, pp. 4272-4287.
- [16] Kou. B, Luo. J, Yang. X, and Zhang. L, (2016), “Modeling and analysis of a novel transverse-flux flux-reversal linear motor for long-stroke application”, *IEEE Trans. Industry Elec*, 63, 10, pp. 6238-6248.
- [17] Shin. J.S, Koseki. T, and Kim. H.J, (2013), “Proposal of double-sided transverse flux linear synchronous motor and a simplified design for maximum thrust in Nonsaturation region”, *IEEE Trans. Magn*, 49, 7, pp.4104-4108.
- [18] Polinder. H, Mecrow. B.C, Jack. A.G, Dickinson. P.G, and Mueller. M.A, (2005), “Conventional and TFFPM linear generators for direct-drive wave energy conversion”, *IEEE Trans. Energy Convers*, 20, 2, pp. 260-267.
- [19] Ahmed. S, Koseki. T, and Kim. H.J, (2017), “Detent force reduction for a novel transverse flux permanent magnet linear synchronous motor without compromising stroke length”, *Proc. Int. Symp. Linear Drives for Industry Applications*, Osaka, Japan, pp. 1-5.
- [20] Klöck. J, and Schumacher. W, (2014), “Modeling and control of Transverse Flux Reluctance Machines”, *European Conference on Power Electronics and Applications*, Lappeenranta, Finland, pp. 1-10.
- [21] Du. J, Lu. P, and Yang. X, (2016), “Analysis and modeling of mutually coupled linear switched reluctance machine with transverse flux for wave energy conversion”, *Proc. IEEE Int. Electric Vehicle Conf*, Monte Carlo, Monaco, pp. 1-6.
- [22] Oh. J.H, and Kwon. B.I, (2016), “Design, optimization, and prototyping of a transverse flux-type-switched reluctance generator with an integrated rotor”, *IEEE Trans. Energy Convers*, 31, 4, pp.1521-1529.
- [23] Yan. J, Lin. H, Huang. Y, Liu. H, and Zhu. Z.Q, (2009), “Magnetic field analysis of a novel flux switching transverse flux permanent magnet wind generator with 3-D FEM”, *Proc. Int. Conf. Power Electronics and Drive Systems*, Taipei, Taiwan, pp. 332-335.
- [24] Wan. Z, and Husain. I, (2017), “Design, analysis and prototyping of a flux switching transverse flux machine with ferrite magnets”, *Proc. Int. Conf. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 1227-1233.

- [25] Oh. J.H, Lee. J.H, Kang. S.I, Shin. K.S, and Kwon. B.I, (2014), “Analysis of a novel transverse flux type permanent magnet reluctance generator”, *IEEE Trans. Magn*, 50, 2, pp. 809-812.
- [26] Kremers. M.F, Paulides. J.J, and Lomonova. E.A, (2015), “Toward accurate design of a transverse flux machine using an analytical 3-D magnetic charge model”, *IEEE Trans. Magn*, 51, 11, pp.1-4.
- [27] Lu. K, and Wu. W, (2015), “High torque density transverse flux machine without the need to use SMC material for 3-D flux paths”, *IEEE Trans. Magn*, 51, 3, pp.1-4.
- [28] Zheng. P, Zhao. Q, Bai. J, Yu. B, Song. Z, and Shang. J, (2013), “Analysis and design of a transverse-flux dual rotor machine for power-split hybrid electric vehicle applications”, *Energies*, 6, 12, pp. 6548-6568.
- [29] Bomela. W, Bird. J.Z, and Acharya. V.M, (2014), “The performance of a transverse flux magnetic gear”, *IEEE trans. Magn*, 50, 1, pp.1-4.
- [30] Huan. W, Yi-kai. S, Bo. T, and Xiao-qing. Y, (2009), “An investigation of four-phase flat-type TFPM and control system”, *Proc. Int. Conf. Innovative Computing*, Kaohsiung, Taiwan.
- [31] Elantably. A.M.A, (2000), “An approach to sizing high power density TFPM intended for hybrid bus electric propulsion”, *Electric Machines & Power Systems*, 28, 4, pp.341-354
- [32]. Husain. T, Hasan. I, Sozer. Y, Husain. I, and Muljadi. E, (2018), “Design considerations of a transverse flux machine for direct-drive wind turbine applications”, *IEEE Trans. Industry App*, 54, 4, pp.3604-3615.
- [33] Wan. Z, Ahmed. A, Husain. I, and Muljadi. E, (2015), “A novel transverse flux machine for vehicle traction applications”, *IEEE Power & Energy Society General Meeting*, pp. 1-5.
- [34] Husain. T, Hasan. I, Sozer. Y, Husain. I, and Muljadi. E, (2018), “Design of a Modular E-Core Flux Concentrating Transverse Flux Machine”, *IEEE Trans. Industry App.*, 2018, 54, 3, pp. 2115-2128.
- [35] Ueda. Y, Takahashi. H, Akiba. T, and Yoshida. M, (2013), “Fundamental design of a consequent-pole transverse-flux motor for direct-drive systems”, *IEEE Trans. Magn.*, 49, 7, pp. 4096-4099.
- [36] Popa. D.C, Micu. D.D, Miron. O.R, and Szabo. L, (2013), “Optimized design of a novel modular tubular transverse flux reluctance machine”, *IEEE Trans. Magn.*, 49, 11, pp. 5533-5542.
- [37] Guo. Y, Zhu. J.G, and Lu. H, (2005), “Design and Analysis of a Permanent Magnet Claw Pole/Transverse Flux Motor with SMC Core”, *Proc. Int. Conf. Power Electronics and Drives Systems*, Kuala Lumpur, Malaysia, 2, pp. 1413-1418.

- [38] Von Zweybergk, (1992), "Permanent magnetized synchronous machine designed according to the transverse flux principle." U.S. Patent No. 5,117,142
- [39] Yang. G, Cheng. D, Zhang. H, and Kou. B, (2013), "Bidirectional cross-linking transverse flux permanent magnet synchronous motor." IEEE Trans. Magn., 49, 3, pp. 1242-1248.
- [40] Arshad. W.M, Backstrom. T, and Sadarangani. C, (2002), "Investigating a transverse flux machine with intermediate poles," Proc. Int. Conf. Power Electronics Machines and Drives, Sante Fe, NM, USA.
- [41] Bang. D, Polinder. H, Shrestha. G, and Ferreira. J.A, (2008), "Review of generator systems for direct-drive wind turbines," European Wind Energy Conference & Exhibition, Belgium, vol. 31.
- [42] Guo. Y, Zhu. J.G, Lin. Z.W, and Zhong. J.J, (2005), "Measurement and modeling of core losses of soft magnetic composites under 3-D magnetic excitations in rotating motors," IEEE trans. Magn., 41, 10, pp. 3925-3927.
- [43] Henneberger. G, Viorel. I.A, Blissenbach. R, and Popan. A.D, (2001), "On the parameters computation of a single sided transverse flux motor". Proc. Int. Conf. Electrical Machines," Parameters, Technical University of Cluj-Napoca, pp. 35-40.
- [44] Harris. M.R, Pajooman. G.H, and Sharkh. S.A, (1997), "The problem of power factor in VRPM (transverse-flux) machines," Proc. Int. Conf. Electrical Machines and Drives, Cambridge, UK, No. 444.
- [45] Schmidt. E, (2011), "Finite element analysis of a novel design of a three phase transverse flux machine with an external rotor," IEEE Trans. Magn., 47, 5, pp. 982-985.
- [46] Zhang. B, Wang. A, and Doppelbauer. M, (2016), "Multi-objective optimization of a transverse flux machine with claw-pole and flux-concentrating structure," IEEE Trans. Magn., 52, 8, pp. 1-10.
- [47] Masmoudi. A, Njeh. A, Mansouri. A, Trabelsi. H, and Elantably. A, (2004), "Optimizing the overlap between the stator teeth of a claw pole transverse-flux permanent-magnet machine," IEEE Trans. Magn., 40, 3, pp. 1573-1578.
- [48] Husain. T, Hasan. I, Sozer. Y, Husain. I, and Muljadi. E, (2017), "A comprehensive review of permanent magnet transverse flux machines for direct drive applications," IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Cincinnati, OH, USA, pp. 1255-1262.
- [49] Arshad. W.M, Backstrom. T, and Sadarangani. C, (2001), "Analytical design and analysis procedure for a transverse flux machine," Proc. Int. Conf. Electrical Machines and Drives, Cambridge, MA, USA, pp. 115-121.

- [50] Husain. T, Hasan. I, Sozer. Y, Husain. I, and Muljadi. E, (2019), "Cogging torque minimization in transverse flux machines," IEEE Trans. Industry App, 55, 1, pp. 385-397.
- [51] Aydin. E, Kim. J.H, Yildiriz. E, Aydemir. M.T, and Sarlioglu. B, (2016), "A hybrid-excited axial transverse flux permanent magnet generator," IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, Milwaukee, WI, USA, pp. 1-6.
- [52] Doering. J, Steinborn. G, and Hofmann. W, (2015), "Torque, power, losses, and heat calculation of a transverse flux reluctance machine with soft magnetic composite materials and disk-shaped rotor," IEEE Trans. Industry App., 51, 2, pp. 1494-1504.
- [53] Kastinger. G, (2002), "August. Design of a novel transverse flux machine," Proc. Int. Conf. Electrical Machines.
- [54] Zhu. S, Cox. T, Gerada. C, and Xu. Z, (2017), "Comparative study and optimal design of alternative PM configuration transverse flux linear machine," Electr. Mach. Syst. Conf., Sydney, NSW, Australia, pp. 1-6.
- [55] C. Pompermaier, J. Washington, L. Sjöberg, and N. Ahmed, (2016), "Reduction of cogging torque in transverse flux machines by stator and rotor pole shaping," IEEE in Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 1-7.
- [56] Y. Ueda, H. Takahashi, T. Akiba and M. Yoshida, (2014), "Small cogging-torque transverse-flux motor with magnetic short circuit under unloaded condition," IEEE Transactions on Magnetics, 50, 11, pp. 1-4.
- [57] C. Liu, J. Zhu, Y. Wang, G. Lei and Y. Guo, (2016), "Cogging torque minimization of SMC PM transverse flux machines using shifted and unequal-width stator teeth," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 26, no. 4, pp. 1-4.
- [58] Z. Jia, H. Lin, S. Fang, and Y. Huang, (2015), "Cogging torque optimization of novel transverse flux permanent magnet generator with double C-hoop stator," IEEE Transactions on Magnetics, 51, 11, PP. 1-4.
- [59] Y. Ueda, H. Takahashi, A. Ogawa, T. Akiba and M. Yoshida, (2016), "Cogging-torque reduction of transverse-flux motor by skewing stator poles," IEEE Transactions on Magnetics, 52, 7, pp. 1-4.
- [60] H. Ahu, G. Jang, J. Chang, S. Chung and D. Kang, (2008), "Reduction of the Torque Ripple and Magnetic Force of a Rotatory Two-Phase Transverse Flux Machine Using Herringbone Teeth," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 44, no. 11, pp. 4066-4069.
- [61] Anglada. J.R, and Sharkh. S.M, (2017), "An insight into torque production and power factor in transverse-flux machines," IEEE Trans. Industry App, 53, 3, pp. 1971-1977.
- [62] Yu. Z, and Jianyun. C, (2005), "Power factor analysis of transverse flux permanent machines," Electr. Mach. Syst. Conf., 1, pp. 450-459.

- [63] Lu. K, Rasmussen. P.O, and Ritchie. E, (2011), "Design considerations of permanent magnet transverse flux machines," *IEEE Trans. Magn.*, 47, 10, pp. 2804-2807.
- [64] Henneberger. G, and Bork. M, (1997), "Development of a new transverse flux motor," *IEE Colloquium on New Topologies for Permanent Magnet Machines*.
- [65] Jordan. S, and Baker. N.J, (2016), "Design and build of a mass critical, air-cooled transverse flux machine for aerospace," *Proc. XXII Int. Conf. Electrical Machines, Lausanne, Switzerland*, pp. 1453-1458.
- [66] Chen. Y, Fu. W.N, Ho. S.L, and Liu. H, (2014), "A quantitative comparison analysis of radial-flux, transverse-flux, and axial-flux magnetic gears," *IEEE Trans. Magn.*, 50, 11, pp.1-4.
- [67] Frieder. S, Marcel. M, Peter. S, and Nejila. P, (2016), "Modeling and parameter estimation of a three phase permanent magnet excited transverse flux machine," *Proc. XXII Int. Conf. Electrical Machines, Lausanne, Switzerland*. Pp. 439-444.
- [68] Ahmed. A, and Husain. I, (2018), "Power factor improvement of a transverse flux machine with high torque density," *IEEE Trans. Industry App*, 54, 5, pp. 4297-4305.
- [69] Harris. M.R, Pajooman. G.H, and Sharkh. S.A, (1996), "Performance and design optimisation of electric motors with heteropolar surface magnets and homopolar windings," *IET Electr. Power Appl.*, 143, 6, pp. 429-436.
- [70] Xia. J, Li. W, Peng. R, and Su. H, (2016), "Analysis on axial end flux leakage and resonance characteristic of TFPM linear generator for thermoacoustic electric generation system," *IEEE Trans. Magn.*, 52, 12, pp. 1-7.
- [71] Anpalahan. P, Soulard. J, and Nee. H.P, (2001), "Design steps towards a high power factor transverse flux machine," *European Conference on Power Electronics and Applications*.
- [72] Yan. H, Yu. B, Xiao. C, Song. Z, Lin. J, and Zheng. P, (2011), "Research on a novel tubular transverse-flux permanent-magnet linear machine for free-piston energy converter," *Electr. Mach. Syst. Conf.*, pp. 1-5.
- [73] Dehlinger. N, and Dubois. M.R, (2010), "A new design method for the clawpole transverse flux machine. Application to the machine no-load flux optimization. Part I: Accurate magnetic model with error compensation," *Proc. XIX Int. Conf. Electrical Machines, Rome, Italy*, pp. 1-7.
- [74] Parspour. N, Babazadeh. A, and Orlik. B, (2004), "Transverse flux machine design for manipulating system applications," *PCIM Europe*, 1, pp. 481-485.
- [75] Beyer. S, (1997), "Investigations on design of magnetic circuit of permanent magnet excited transverse flux", *Technical university of Brunswick*.

- [76] Svehkarenko. D, Soulard. J, and Sadarangani. C, (2006), "A novel transverse flux generator in direct-driven wind turbines," Proc. Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics.
- [77] Bastawade. P, Chaudhari. B.N, Ugale. R.T, and Pramanik. A, (2016), "Analytical and FEA based analysis of homopolar poly-phase transverse flux machine," IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES), pp. 1-6.
- [78] Ibala. A, Masmoudi. A, Atkinson. G, and Jack. A.G, (2009), "A New Reluctance Model of a Claw Pole TFPM using SMC for the Magnetic Circuit," Proc. Int. Conf. Ecologic Vehicles & Renewable Energies, Monaco.
- [79] Nica. F.V.T, Leban. K, and Ritchie. E, (2013), "Direct drive TFPM wind generator analytical design optimised for minimum active mass usage," Proc. Int. Symp. Advanced Topics in Electrical Engineering, Bucharest, Romania, pp. 1-6.
- [80] Zhiyu. S, Xiaqing. P, and Yuanjun. Z, (2016), "The analysis of a kind of modularization transverse flux motor used in electrical vehicle," Proc. Int. Conf. Aircraft Utility Systems, Beijing, China, pp. 641-645.
- [81] Dreher. F, and Parspour. N, (2012), "A novel high-speed permanent magnet claw pole transverse flux machine for use in automation," Proc. Int. Symp. Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, Sorrento, Italy, pp. 1240-1245.
- [82] Ueda. Y, and Takahashi. H, (2017), "Transverse-Flux Motor Design with Skewed and Unequally Distributed Armature Cores for Reducing Cogging Torque," IEEE Trans. Magn., 53, 11, pp. 1-5.
- [83] Bao. G.Q, and Jiang. J.Z, (2008), "A modular multiphase permanent magnet machine optimization for direct propulsion systems," IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Harbin, China, pp. 1-5.
- [84] Ahn. H, Gunhee. J, Junghwan. C, Shiuk. C, and Dohyun. K, (2008), "Reduction of the torque ripple and magnetic force of a rotatory two-phase transverse flux machine using herringbone teeth," IEEE Transactions on Magnetics, 44, 11, pp. 4066-4069.
- [85] Yin. M, Gengyin. L, Ming. Z, and Chengyong, (2007), "Modeling of the wind turbine with a permanent magnet synchronous generator for integration," In 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 1-6.
- [86] Dobzhanskyi. O, Pavani. G, Ekrem. K, Xiaozhong. L, Ernest A. M, and Andrzej M. T, (2012), "Multilayer-winding versus switched-flux permanent-magnet AC machines for gearless applications in clean-energy systems," IEEE Transactions on Industry Applications, 48, 6, pp. 2296-2302.
- [87] Lee.J, Jung-Hwan. C, Do-Hyun. K, Sung. K, and Jung-Pyo. H, (2007), "Tooth shape optimization for cogging torque reduction of transverse flux rotary motor using design of

experiment and response surface methodology,” IEEE Transactions on Magnetics 43, 4, pp. 1817-1820.

[88] Dobzhanskyi. O, Rupert. G, and E. Amiri, (2016), “On the role of magnetic shunts for increasing performance of transverse flux machines,” IEEE Transactions on Magnetics 53, 2, pp. 1-8.

[89] Dobzhanskyi. O, and Rupert. G, (2015), “Performance analysis of a permanent magnet transverse flux generator with double coil,” IEEE Transactions on Magnetics 52, 1, pp. 1-11.



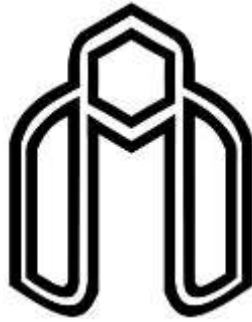


## **Abstract**

Wind energy is an increasing percentage of the energy supplied to the public electricity network. Chapter 1 gives a wide overview of wind turbine structures. Also, shows that transverse Flux permanent magnet machines offers a higher torque and power density which make them as promising choices for using in wind power generation systems. In chapter 2, the basic structure and operation of transverse flux permanent magnet machines are introduced and compared. An overview on important features of these machines are classified in detail. In chapter 3, Based on investigation of varies structures, a new simple structure with a quiet large torque density and high power factor is desined. FEM results show that this generator has high efficiency, high power factor and low power losses.

Higher cogging torque is the main concerns in use of these generators in direct-drive applications especially in the types of generators used in small scaled wind turbine. In chapter 4, the 3D magnetic equivalent circuit of this generator is obtained to analysis the cogging torque effects. Then, numerical analysis based on displacement of torque waveform is proposed in order to eliminate the major harmonic of cogging torque. By using skewing stator U-shaped cores, this displacement can be employed. In this regard, an optimum angle of skewing method for minimization of cogging torque is calculated by proposed geometric scheme. FEM results indicate that proposed methods used for calculation of skewed and shifted angle are an effective ways for remarkable minimization of total cogging torque. In chapter 5, the designed prototype is manufactured and tested in a laboratory. The measurement results are in agreement with FEM results.

*Keywords:* transverse flux permanent magnet generator, cogging torque, low losses, high efficiency, finite elements methods.



**Shahrood University of Technology**  
**Faculty of Electrical Engineering and Robotics**

**Modeling, Design and Implementation of a Prototype TFPM  
Generator for a Wind Turbine in Order to Feed the DC  
Loads**

By:

Maryam Salehi

Supervisors:

Prof. Ahmad Darabi

Dr. Mohammad hoseintabar Marzebali

July 2019