بسم الله الرحمن الرحيم

پژوهشگاه مواد و انرژی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی انرژی‌های تجدید پذیر

موضوع

طراحی ژنراتور مغناطیس دائم شار محوری مخصوص توربین بادی

استادان راهنما

دکتر سید محمود هاشمی نژاد

دکتر محمود جورابیان

استاد مشاور

دکتر احسان مرزبان

نگارنده

هانی فکری

سال تحصیلی ۱۳۸۸-۱۳۸۹

سپاس نامه

اکنون که این پایان نامه را با یاری خداوند متعال به نحو شایسته‌ای به پایان می رسانم برخود لازم می دارم تا از تمام عزیزانی که به هر نحو در انجام این پروژه از راهنمایی و همکاری آن‌ها بهره‌مند شده‌ام تشکر نمایم بخصوص پدر و مادر بزرگوارم که همواره دعای ایشان در تمامی مراحل زندگی روشنگر راه من بوده است. همچنین سپاس مخصوص خود را به پاس تمامی محبت‌ها و راهنمایی‌ها به استاد فرزانه دانشمند فرهیخته جناب آقای *دکتر سید محمود هاشمی نژاد* تقدیم می‌نمایم.

ونیز بسی شایسته است از استاد راهنمای دوم جناب آقای دکتر محمود جورابیان که در راهبرد این پایان نامه نقش اساسی داشتند و نیز جناب آقای دکتر احسان مرزبان که از مشاوره ایشان در طول انجام این پایان نامه استفاده کرده‌ام کمال تشکر و امتنان نمایم.

از خداوند متعال موفقیت و سلامتی روز افزون را برای تمامی این عزیزان خواستارم.

.

حق تألیف و تحقیق

این پروژه تحقیقاتی به شماره شناسه ۵۷۸۷۷۴ در پژوهشگاه مواد و انرژی به ثبت رسیده است و کلیه دستاوردهای تحقیقاتی شامل نتایج نظری، علمی، دانش فنی و سایر موارد مربوط به این پروژه متعلق به پژوهشگاه مواد و انرژی می‌باشد. بهره برداری از نتایج پروژه برای مؤسسات دولتی و غیردولتی با مجوز پژوهشگاه مواد و انرژی و درج نام پژوهشگاه مواد و انرژی امکان پذیر است.

فهرست

فهرست شکل‌ها و جداول ۳
چکیده ۸
فصل اول:مقدمه ۹
۱-۱- مقدمه ۱۰
۱-۲-انواع ژنراتورهای مورد استفاده در توربین های بادی ۱۳
۱-۲-۱-ژنراتورهای القایی ۱۵
۱-۲-۲-ژنراتور مغناطیس دائم ۱۷
فصل دوم:مواد مغناطیسی و طراحی مدارهای مغناطیسی ۳۹
۲-۱-مقدمه ۴۰
۲-۲-مواد مغناطیسی ۴۲
۲-۲-۱-دیامغناطیس ۴۲
۲-۲-۲-پارامغناطیس ۴۲
۲-۲-۳-مواد فرومغناطیس ۴۳
۲-۲-۴-آنتی‌فرومغناطیس ۴۴
۲-۲-۵-فری‌مغناطیس ۴۴
۲-۳-هسته استاتور[۳۶] ۴۶
۲-۳-۱-فولادهای الکتریکی غیر جهتی ۴۷

۲-۳-۲-آلیاژهای فرومغناطیسی آمورف ۴۷
۲-۳-۳-کامپوزیت های نرم مغناطیس [۳۷]-[۳۹] ۴۷
۲-۴-مغناطیس دائم و مدارهای مغناطیسی[۴۱] ۵۶
۲-۴-۱-مدارهای مغناطیسی ۶۳
۲-۴-۲-محاسبه شار مغناطیسی ۶۸
۲-۴-۳-عکس‌العمل آرمیچر و مغناطیس زدایی ۷۵
۲-۴-۴-گشتاور دندانه ۷۶
فصل سوم:طراحی اولیه ۷۸
۳-۱-اصول کار ۷۹
۳-۲-پارامترهای طراحی ۸۱
۳-۲-۱-محاسبه تلفات: ۸۶
۳-۲-۲-بازده: ۹۰
۳-۳-طراحی اولیه: ۹۰
فصل چهارم:روش المان محدود ۹۴
۴-۱-مقدمه: ۹۵
۴-۱-۱-پیش پردازش ۹۷
۴-۱-۲-حل میدان ۹۸
۴-۱-۳-پس پردازش ۹۹
۴-۲-تنظیمات اولیه ۹۹
۴-۳-بهینه سازی ۱۰۱

۴-۴-تحلیل بدون بار. ۱۰۴
۴-۴-تحلیل تحت بار ۱۰۸
نتیجه گیری و پیشنهادات ۱۱۲
مراجع ۱۱۴
ضمائم ۱۲۲
ضمیمه الف: ضریب کارتر ۱۲۳
ضمیمه ب : کدهای نوشته شده در MATLAB ۱۲۴
طراحی اولیه: ۱۲۴
بهینه سازی ۱۲۴
تحلیل هارمونیکی ۱۲۷

فهرست شکل ها و جداول

شکل ۱-۱ ظرفیت تجمعی توربین‌های نصب شده در جهان و اروپا ۲۰۰۸-۱۹۹۶[۲] ۱۱
شکل ۱- ۲ نمایی از سیستم سرعت متغییر ۱۳
شکل ۱- ۳ ژنراتورالقایی ۱۶
شکل ۱- ۴ ژنراتور مغناطیس دائم ۱۸
شکل ۱- ۵ ژنراتور مغناطیس دائم شار شعاعی ۱۹

شکل۱- ۶ ژنراتور مغناطیس دائم شار شعاعی روتور داخلی ۲۰

شکل۱- ۷ ژنراتور مغناطیس دائم روتور خارجی [۵]..... ۲۱

شکل۱- ۸ ژنراتورمغناطیس دائم دو روتوره [۶]..... ۲۲

شکل۱- ۹ ژنراتور مغناطیس دائم شار محوری ۲۶

شکل۱- ۱۰ ساختار چند قسمتی در ژنراتورهای شار محوری [۱۸]..... ۲۷

شکل۱- ۱۱ ماشین شار محوری شیاردار دارای دو روتور[۱۹]..... ۲۸

شکل۱- ۱۲ ماشین شار محوری بدون شیار..... ۲۹

شکل۱- ۱۳ ژنراتور ۹ فازه ساخت استفان بریست (۲۰۰۸)..... ۳۱

شکل۱- ۱۴ نمایی از سیستم کنترلی ژنراتور فابیو گیولی کاپونی (۲۰۰۹)..... ۳۲

شکل۱- ۱۵ ژنراتور ساخت فدریکو کاریچی(۲۰۱۰)..... ۳۳

شکل۱- ۱۶ عکس‌های مادون قرمز از ژنراتور ساخته شده توسط فابریزیو ماریگنتی (۲۰۱۰)..... ۳۴

شکل۱- ۱۷ ژنراتور ساخته شده توسط دکتر میرسلیم- دانشگاه امیرکبیر ۳۵

شکل۱- ۱۸ ژنراتور شار محوری ۵۰KW ساخته شده دکتر جورابیان-دانشگاه شهید چمران اهواز..... ۳۶

شکل۱- ۱۹ ژنراتور طراحی شده در دانشگاه تهران..... ۳۷

شکل۱- ۲۰ نمایی از ساختار ژنراتور شار متقاطع ۳۸

شکل۲- ۱ مواد مغناطیسی ۴۵

شکل۲- ۲ مقایسه حلقه هیسترزیس مغناطیس‌های نرم و سخت..... ۴۶

شکل۲- ۳ ذرات کامپوزیت نرم مغناطیس ۴۸
شکل۲- ۴ تأثیر عملیات حرارتی بر منحنی هیسترزیس ۴۹
شکل۲- ۵ جدا سازی آسان در چرخه بازیافت با خردکردن مواد کامپوزیتی ۵۰
شکل۲- ۶ کاهش تلفات با استفاده از SMC ۵۱
شکل۲- ۷ مقایسه نفوذپذیری نسبی Somaloy^{TM}500 و Transil 315 ..... ۵۲
شکل۲- ۸ مقایسه منحنی تلفات SMC و فولاد مورق در فرکانس‌های مختلف ۵۴
شکل۲- ۹ مقایسه منحنی اشباع SMC و فولاد مورق ۵۵
شکل۲- ۱۰ منحنی مغناطیس زدایی ۵۷
شکل۲- ۱۱ مدار معادل مغناطیسی تونن نورتن ۶۴
شکل۲- ۱۲ مشخصه مغناطیسی، خط بازگشت، خط بار مدار باز و تحت بار ۶۶
شکل۲- ۱۳ تأثیر نیروی مغناطیس‌زدای شدید بر روی خط بازگشت ۶۷
شکل۲- ۱۴ تأثیر دما بر خواص مغناطیسی ۶۸
شکل۲- ۱۵ مدار معادل مغناطیسی برای یک گام قطبی ۷۱
شکل۲- ۱۶ خطوط انرژی ثابت و منحنی مغناطیس زدایی ۷۴

شکل ۳- ۱ نمایی سه بعدی از ژنراتور ۸۰
شکل ۳- ۲ نحوه عملکرد ماشین ۸۱
شکل ۳- ۳ مدار معادل مغناطیسی ۸۲

شکل ۳- ۴ مدار معادل مغناطیسی ساده شده ۸۲

شکل ۳- ۵ تلفات هسته آهنی..... ۹۰

شکل ۳- ۶ ابعاد ژنراتور ۹۳

شکل۴- ۱ منحنی BH برای $Somaloy^{TM}$ 1P ۱۰۰

شکل۴- ۲ وابستگی لتاژ ترمینال به شعاع ماشین ۱۰۲

شکل۴- ۳ مشتق رابطه ولتاژ بر حسب شعاع..... ۱۰۲

شکل۴- ۴ رابطه گشتاور دندانه با عرض تیغه..... ۱۰۳

شکل۴- ۵ شبکه مورد استفاده در تحلیل سه بعدی بدون بار..... ۱۰۴

شکل۴- ۶ مش‌بندی برای هر یک از اجزاء ۱۰۵

شکل۴- ۷ توزیع شار مغناطیسی در ژنراتور ۱۰۵

شکل۴- ۸ نمایش برداری توزیع شار مغناطیسی برای یک گام سیم پیچی..... ۱۰۶

شکل۴- ۹ شار پیوندی..... ۱۰۶

شکل۴- ۱۰ ولتاژ بی‌باری سه‌فاز ۱۰۷

شکل۴- ۱۱ هارمونیک های ولتاژ بی‌باری (بیان به صورت درصد هارمونیک اول)..... ۱۰۷

شکل۴- ۱۲ گشاور بی‌باری..... ۱۰۸

شکل۴- ۱۳ شبکه بندی برای تحلیل تحت بار ۱۰۹

شکل۴- ۱۴ جریان سه فاز تحت بار..... ۱۰۹

شکل۴- ۱۵ ولتاژ سه فاز تحت بار ۱۱۰

شکل۴- ۱۶ هارمونیک های ولتاژ بار کامل (بیان به صورت درصد هارمونیک اول) ۱۱۰

شکل۴- ۱۷ گشتاور الکترومغناطیسی ۱۱۱

جدول۲- ۱ خواص مغناطیسی و مکانیکی برخی از انواع آهنرباها ۶۳

جدول۲- ۲ دوگانی بین مدارهای الکتریکی و مغناطیسی ۶۴

جدول۳- ۱ طراحی اولیه ژنراتور ۹۲

جدول۴- ۱ مشخصات آهنربای مورد استفاده در تحلیل..... ۱۰۰

جدول۴- ۲ القاء خودی و متقابل سیم پیچ‌ها(mH)..... ۱۱۱

چکیده

در این پایان نامه نوع جدیدی از ژنراتورهای شار محوری مغناطیس دائم با توان ۱Kw برای استفاده در توربین‌های بادی طراحی و شبیه سازی شده است. مهمترین ویژگی این ساختار این است که آهنرباها به‌جای روتور در استاتور تعبیه شده‌اند. از مزایای این راه‌حل می توان به کاهش وزن روتور و تلفات مکانیکی، افزایش سرعت پاسخ، دسترسی بهتر به آهن‌رباها جهت تهویه و خنک کاری بهتر، حفاظت آهن‌رباها در برابر صدمات مکانیکی اشاره کرد.

جهت به‌دست آوردن مشخصات اولیه ژنراتور مورد نظر ابتدا با استفاده از مدار معادل مغناطیس دائم از روش خط بار استفاده شده است و سپس با استفاده از روش المان محدود و شبیه سازی در نرم افزار Ansoft Maxwell بهینه شده است. روتور نیز بر اساس میزان گشتاور دندانه تولید شده بهینه شده است. برای تحریک آهن‌ربای NdFeB و برای بدنه استاتور نرم مغناطیس کامپوزیتی پیشنهاد شده و مورد استفاده قرار گرفته است. نتایج نشان دهنده کمترین میزان هارمونیک در ولتاژ بی‌باری و بار کامل می‌باشد.

کلمات کلیدی: انرژی بادی، ژنراتور مغناطیس دائم، شار محوری

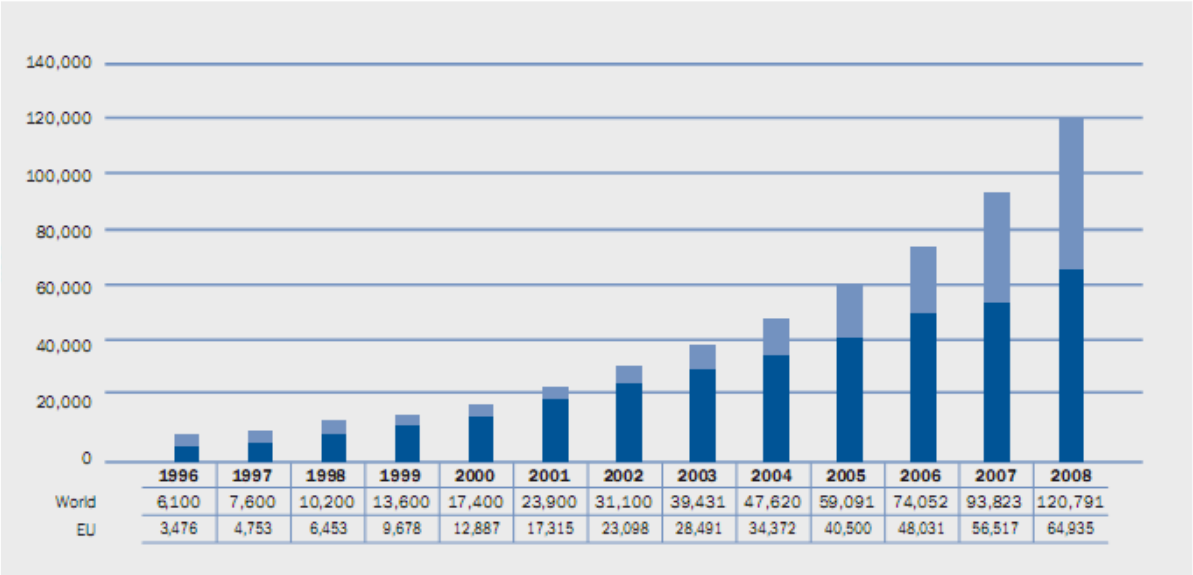
فصل اول

مقدمه

۱-۱- مقدمه

در نیم قرن گذشته و بخصوص پس از بحران نفتی دهه ۷۰ و نوسانات شدید قیمت نفت توجه کشورهای جهان به منابع جایگزین انرژی‌های فسیلی و ازجمله انرژی‌های تجدیدپذیربیشتر شده است. علاوه برآن امضاء پیمان‌نامه کیوتو در سال ۱۹۹۷ به منظور کاهش گازهای گلخانه‌ای و گرم شدن زمین باعث تمایل مضاعف به استفاده از این منابع پاک گردید.

در این میان انرژی بادی به عنوان یکی از مهمترین منابع انرژی‌های تجدیدپذیر که می‌تواند به‌طور گسترده در تولید انرژی الکتریکی نقش داشته باشد مورد توجه بیشتری قرار گرفت. شاید بتوان گفت که مهمترین علت روی‌آوری به این نوع انرژی هزینه تولید نسبی پایین‌تر درمقایسه با دیگر انواع انرژی‌های تجدیدپذیر و نیز کاهش هزینه تولید با افزایش ظرفیت توربین‌ها می‌باشد. گذشته از آن فن آوری نیروگاه های بادی به سرعت در حال پیشرفت است بطوری که امروزه شاهد نسل جدیدی از توربین های بادی عظیم الجثه می باشیم که توانی در حدود ۵MW و حتی در مواردی نادر ۱۰MW تولید می کنند. به‌همین علت میزان استفاده از این انرژی پاک روز به روز در حال افزایش است؛ میزان توربین بادی نصب شده در اتحادیه اروپا در پایان سال ۲۰۰۹ برابر ۷۶۱۵۲MW گزارش شده که ۱۰۵۲۶MW از این میزان در سال ۲۰۰۹ نصب شده است. در این میان آلمان با ظرفیت نصب شده ۲۵۷۷۷MW دارای رتبه اول می‌باشد.[۱] شکل۱-۱ ظرفیت تجمعی توربین‌های نصب شده در جهان و اروپا در بازه سال‌های ۲۰۰۸-۱۹۹۶ را نشان می‌دهد.[۲]



	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
World	6,100	7,600	10,200	13,600	17,400	23,900	31,100	39,431	47,620	59,091	74,052	93,823	120,791
EU	3,476	4,753	6,453	9,678	12,887	17,315	23,098	28,491	34,372	40,500	48,031	56,517	64,935

شکل ۱-۱ ظرفیت تجمعی توربین‌های نصب شده در جهان و اروپا ۲۰۰۸-۱۹۹۶[۲]

از سوی دیگر امروزه تولید برق بصورت متمرکز جای خود را به تولید توزیع شده داده است بدین ترتیب نیاز به توربین هایی که بطور محلی و در سرعت های پایین کار کنند و در عین حال دارای هزینه، ابعاد و وزن کم باشند بیش از پیش احساس میگردد. این گونه توربین ها علاوه بر سهولت استفاده نیاز به تعمیر و نگهداری کمتری داشته ودر نقاط محروم و دور افتاده نیز قابل استفاده هستند. به‌همین دلیل تمرکز این پایان‌نامه بر طراحی یکی از انواع ژنراتورهای توان پایین مورد استفاده در این نوع توربین‌ها قرار گرفته است.

اغلب ژنراتورهای مورد استفاده در سیستم‌های انرژی بادی برای سرعت‌های ۷۵۰rpm تا ۱۸۰۰rpm طراحی شده‌اند در حالی‌که توربین‌های بادی در سرعت‌های ۲۰rpm تا ۲۵۰rpm کار می‌کنند؛ بنابراین استفاده از چرخ‌دنده جهت اتصال ژنراتور و توربین ضروری به‌نظر می‌رسد. چرخ دنده هماهنگ شدن سرعت روتور توربین با سرعت نامی ژنراتور را فراهم می‌کند و این امر در بهینه سازی برخی از مشخصات ژنراتور مؤثر می‌باشد. اما یکی از معایب بزرگ چرخ دنده این است که به عنوان یک جزء مکانیکی در معرض عوامل تنشی و

فرسایشی قرار می‌گیرد و در برخی موارد حتی ممکن است منجر به ناپایداری سیستم گردد. از دیگر معایب چرخ دنده می‌توان به نیاز به تعمیرات دوره‌ای، کاهش بازده سیستم، افزایش وزن سیستم و ... اشاره کرد. گزینه دیگری که برای حل این معضل به نظر می‌رسد استفاده از سیستم‌های اتصال مستقیم[1] (یا بدون چرخ‌دنده[2]) است که در این سیستم‌ها سرعت چرخش توربین و ژنراتور برابر می‌باشد. مهمترین مزایای این نوع سیستم‌ها عبارتست از:

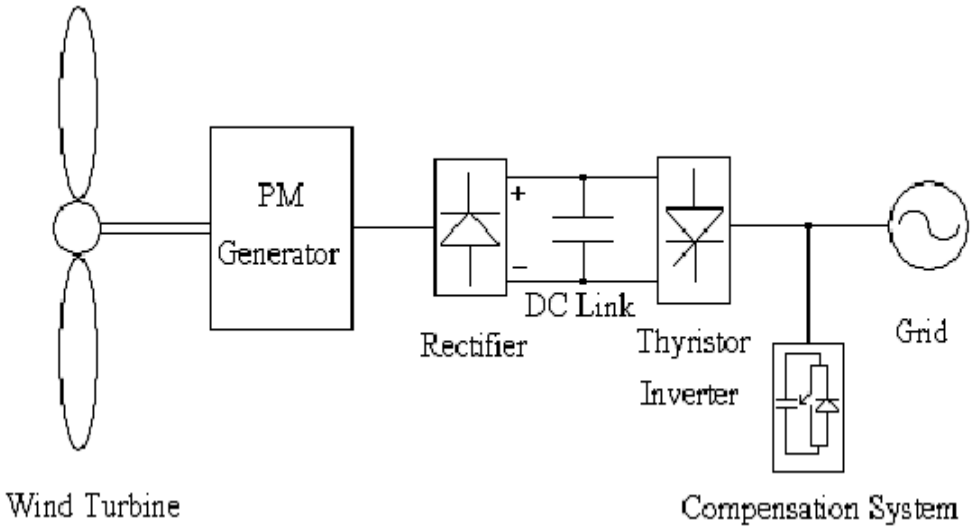
۱. بازدهی بالای
۲. قابلیت اعتماد بالا و نیاز به تعمیرات دوره‌ای کم (به علت حذف جعبه دنده)
۳. حجم و وزن کم
۴. هزینه پایین‌تر تولید الکتریسیته
۵. کاهش صدا و نویز که ناشی از سرعت بالای قطعات می باشد.

فرکانس خروجی این نوع سیستم‌ها معمولاً فرکانسی متفاوت از ۵۰Hz است که جهت اتصال به شبکه معمولاً یک مبدل فرکانس به ترمینال ژنراتور متصل می‌شود. مبدل امکان استفاده از ژنراتور در سرعت‌های گوناگون را فراهم می‌سازد. سرعت می‌تواند با توجه به وضعیت باد منطقه‌ای که توربین در آن نصب شده در یک محدوده نسبتاً وسیع تغییر کند. شکل ۱-۲ نمایی از یک سیستم سرعت متغییر را نشان می‌دهد. در این سیستم که از ژنراتور مغناطیس دائم استفاده شده، ژنراتور مستقیماً به توربین متصل شده است و فرکانس و ولتاژ

1 direct drive

2 gearless

خروجی آن با توجه به تغییرات سرعت باد و توربین متغیر است. بنابراین خروجی ژنراتور توسط یکسوساز به ولتاژ DC تبدیل شده و نهایتاً بوسیله یک اینورتر جهت اتصال به شبکه به ولتاژ AC با اندازه و فرکانسی متناسب با شبکه تبدیل می‌شود. از یک جبرانساز الکترونیکی جهت تأمین توان راکتیو و اعوجاج هارمونیکی ناشی از استفاده از اینورتر در ترمینال ولتاژ متناوب استفاده شده است.[۳]



شکل۱- ۲ نمایی از سیستم سرعت متغییر

۱-۲-انواع ژنراتورهای مورد استفاده در توربین های بادی

ژنراتور در یک توربین بادی واسطه‌ای است بین گشتاور مکانیکی تولید شده در روتور توربین بادی به عنوان محرک اولیه و بار الکتریکی. بار الکتریکی می‌تواند شبکه سراسری قدرت باشد و یا یک بار مستقل از شبکه. اتصال مکانیکی توربین روتور از طریق شفت اصلی صورت می‌گیرد. انواع مختلفی از ژنراتورها وجود دارند که

می‌تواند در توربین‌های بادی مورد استفاده قرار گیرند. در این بین ژنراتور القایی قفس سنجابی بیشترین مورد استفاده را دارد. ژنراتور القایی روتور سیم‌پیچی شده مقام دوم و ژنراتور سنکرون تحریک شده با جریان مقام سوم را دارا می‌باشد. این ژنراتورها مستقیماً به شبکه متصل شده و تقریباً فرکانس ثابتی را برای شبکه فراهم می‌کنند. این ساختار انتخاب ژنراتور را به تعدادی اندک محدود می‌کند که به طور برجسته یا از نوع ژنراتور القایی می‌باشد و یا در مواردی که استفاده از فن‌آوری کنترل فراهم باشد از مواردی همانند ژنراتور سنکرون تحریک مستقل استفاده می‌شود.

با پیشرفت تکنولوژی نیمه‌هادی‌های قدرت برای استفاده در مبدل‌های فرکانس علاقه به سیستم‌های اتصال مستقیم، توربین و ژنراتور دور متغیر به شدت افزایش یافته است. یک مبدل فرکانس در یک سیستم الکتریکی همانند یک چرخ دنده در سیستم‌های مکانیکی عمل می‌کند اما با این تفاوت که قابلیت انعطاف بیشتری دارد، برخلاف چرخ‌دنده می‌تواند در هر مکانی از جمله ناسل[1]، برج و یا هر جای دیگر نصب شود، و همزمان با ابداع روش‌های جدید کنترل و حفاظت انتخاب و طراحی ژنراتورهای جدیدتر را امکان پذیر می‌سازد.بنابراین دایره انتخاب بسیار وسیع‌تر خواهد شد.

در این فصل جهت آشنایی، انواع مختلفی از ژنراتورهای مورد استفاده در توربین‌های بادی و یا در مرحله تحقیق به خصوص ژنراتورهای مغناطیس دائم که مورد بحث این مجموعه می‌باشد معرفی می‌شود و در حد ممکن به مزایا و معایب هر یک اشاره‌ای گذرا خواهد شد.

1 nacelle

۱-۲-۱-ژنراتورهای القایی[1]

ژنراتورهای القایی به علت سادگی ساختار و عدم نیاز به تکنولوژی بیشرفته جهت هماهنگی با شبکه در بین ژنراتورهای توربین‌های بادی بیشترین مورد استفاده را دارا می‌باشد. ماشین‌های القایی عمدتاً به دو گروه عمده تقسیم می‌شوند:

۱. قفس سنجابی[2]

۲. روتور سیم‌پیچی[3]

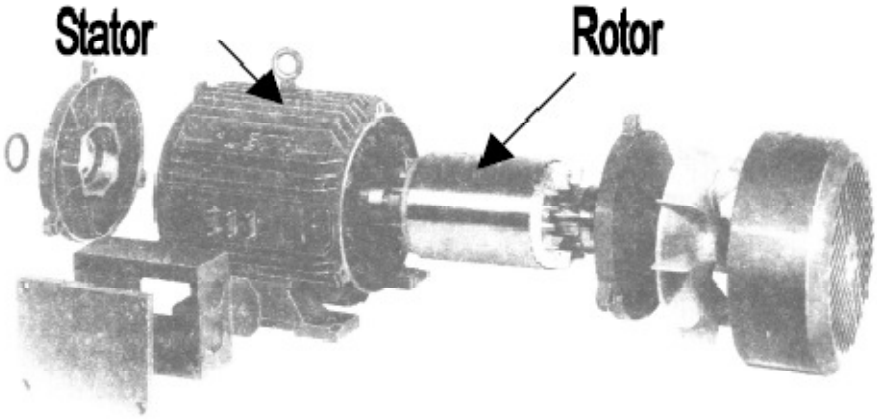
مهمترین مزیت ژنراتور القایی عملکرد آسنکرون[4] آن است که این ویژگی با توجه به تغییرات سرعت باد توانایی‌های قابل ملاحظه‌ای به این ژنراتور می‌دهد. اما مهمترین عیب تحریک میدان مغناطیسی از طریق ترمینال‌های تغذیه آن است.کاربردهای دیگری نیز برای ژنراتور القایی ذکر شده است مانند نیروگاه‌های هیدروالکتریک، سیستم‌های بازیابی انرژی و...

۱-۲-۱-۱-ژنراتور القایی قفس سنجابی

این ژنراتور به علت سادگی مکانیکی و ساختار مقاوم آن بسیار مورد توجه قرار گرفته است. سیم‌پیچی استاتور آن بطور مستقیم به بار یا همان منبع تحریک متصل شده است و دارای عایق است. روتور که از سیم‌پیچی بدون عایق ساخته شده است در برابر ورود گرد و غبار و لرزش بسیار مقاوم است. تعمیر و نگهداری

1 Induction Generator
2 Squirrel Cage Induction Generator
3 Wound rotor Induction Generator
4 asynchronous operation

آن فقط به روغنکاری محدود می‌شود. اما مهمترین مسئله آن همان نیاز به تغذیه تحریک از طریق ترمینال‌های استاتور می‌باشد.



شکل ۱- ۳ ژنراتورالقایی

گشتاور ایجاد شده در شفت در وضعیت‌های اضطراری بسیار زیاد است. در فرکانس قدرت بسیار پایدار عمل می‌کند اما در هنگام اتصال به یک شبکه ضعیف با بار سه فاز نامتعادل گرم شدن و نوسانات گشتاور رخ می‌دهد.

۱-۲-۱-۲-ژنراتور القایی روتور سیم‌پیچی

استفاده از ژنراتور القایی روتور سیم‌پیچی در توربین‌های بادی بسیار مفید به نظر می‌رسد. در این نوع ژنراتور روتور نیز بسیار شبیه استاتور به سیم‌پیچی عایق‌دار سه فاز مجهز شده است که می‌تواند از طریق یک مجموعه حلقه‌های لغزان یا جاروبک به یک منبع تغذیه ساکن خارجی متصل شود. در روش‌های جدیدتر به جای منبع تغذیه از مبدل‌های الکترونیک قدرت استفاده می‌شود که با استفاده از آن می‌توان حلقه‌های لغزان را حذف کرد.

خروجی توان ژنراتور را می‌توان با کنترل تلفات روتور کنترل کرد که روش بسیار مرسومی است. روش دیگر کنترل کامل توان بوسیله کنترل خروجی ژنراتور در ترمینال‌های استاتور است. با ظهور الکترونیک قدرت