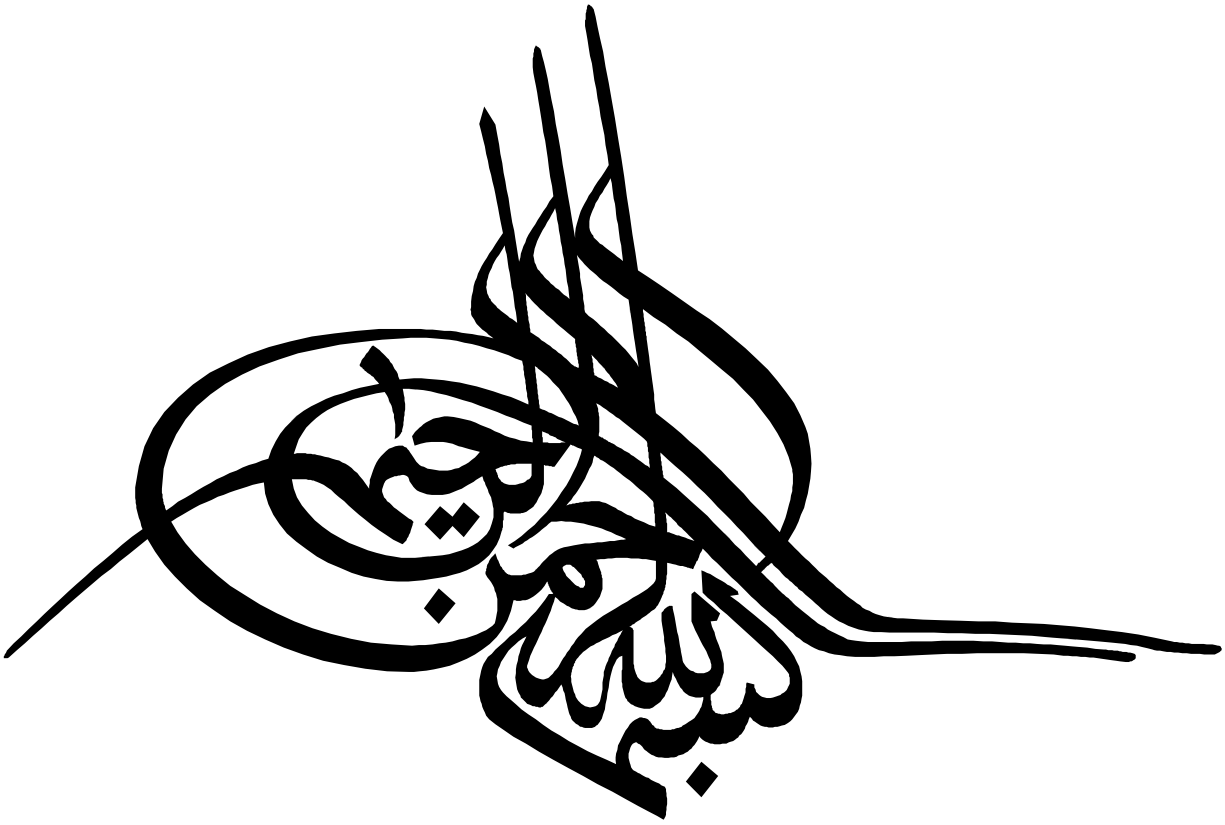

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشکده مهندسی

گروه مهندسی برق- قدرت

پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد

ارزیابی قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت انواع توربین باد متصل به شبکه

دانشجو: حسین جباری

استاد راهنما: دکتر علی پیروی

زمستان ۱۳۹۱

سپاس خداوند حکیم و بلند مرتبه که با لطف بی‌کران خود، آدمی را با زیور عقل آراست. سپاس او را که بـه مـن این فرصت را داد، تا به این مرحله از علم رسیده، و از هیچ محبتی دریغ نکرد. و در تمـام مراحـل زنـدگیم مـرا قوت قلب بود.

در آغاز وظیفه خود می‌دانم، که از زحمات بی‌دریغ اساتید ارجمند و گرامی گروه بـرق گـرایش قـدرت، بـه ویـژه جناب آقای دکتر پیروی که به من جدیت، پشتکار و روش تفکر عمیـق در مـورد مسـائل را آموخـت ، صـمیمانه تشکر و قدردانی نمایم. همچنین از اساتید محترم، دکتر رجبـی مشـهدی و دکتـر منفـرد کـه زحمـت مطالعـه و ارزیابی پایان‌نامه را کشیدند، کمال تشکر را دارم.

چکیده

در این تحقیق، قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت را برای سه تکنولوژی توربین باد متصل به شبکه، شامل توربین بادی با ژنراتور القایی سرعت ثابت، توربین بادی سرعت متغیر با ژنراتور القایی تغذیه دوگانه و توربین بادی سرعت متغیر با ژنراتور القایی و مبدل فرکانسی ظرفیت کامل محاسبه کرده و با هم مقایسه می‌کنیم. در حالت کلی برای اتصال به شبکه توربین باد سرعت ثابت، به یک راه‌اندازنرم نیاز است. در توربین باد با مبدل ظرفیت کامل به یک مبدل پشت به پشت نیاز بوده و در توربین باد با ژنراتور القایی تغذیه دوگانه که استاتور مستقیم به شبکه وصل می‌شود. در سمت روتور به یک مبدل پشت به پشت نیاز است. قابلیت اطمینان این مبدل‌ها را برای بدترین شرایط (بیشترین تلفات مبدل) و در یک سرعت باد از پیش تعیین شده، محاسبه می‌کنیم. و در انتها تاثیر دو روش مدولاسیون را بر قابلیت اطمینان مبدل بررسی می‌کنیم. با فرض اینکه مبدل الکترونیک قدرت در توربین باد سرعت ثابت دائما در مدار باشد. به این نتیجه رسیدیم که مبدل توربین بادی سرعت ثابت، قابلیت اطمینان بیشتری نسبت به مبدل توربین بادی با ژنراتور القایی تغذیه دوگانه دارد. و توربین بادی با ژنراتور القایی تغذیه دوگانه، از این نظر بر توربین بادی با مبدل ظرفیت کامل برتری دارد. و در بین دو روش مدولاسیون در مبدل‌های الکترونیک قدرت، هر دو روش تاثیر یکسان و ناچیزی بر قابلیت اطمینان مبدل دارند.

فهرست عناوین

صفحه

۱ مقدمه ۱
۱.۱ اهداف پایان‌نامه ۴
۲.۱ ساختار پایان‌نامه ۴
۲ آشنایی با ساختمان و عملکرد انواع توربین‌های باد ۵
۱.۲ تاریخچه استفاده از انرژی باد ۵
۲.۲ تعریف توربین باد ۶
۳.۲ قسمت‌های اصلی توربین باد ۶
۴.۲ طبقه‌بندی توربین‌های بادی برمبنای ظرفیت تولید انرژی الکتریکی ۹
۱.۴.۲ توربین‌های بادی کوچک ۹
۲.۴.۲ توربین‌های بادی متوسط ۱۰
۳.۴.۲ توربین‌های بادی بزرگ ۱۰
۵.۲ طبقه‌بندی توربین‌های بادی برمبنای محور توربین ۱۰
۱.۵.۲ توربین باد محور افقی ۱۱
۲.۵.۲ توربین باد محور عمودی ۱۱
۶.۲ انواع توربین‌های بادی برمبنای سرعت روتور ۱۱
۱.۶.۲ توربین‌های بادی سرعت ثابت ۱۲
۲.۶.۲ توربین‌های بادی سرعت متغیر ۱۳
۷.۲ انواع ژنراتور سیستم‌های توربین باد ۱۳
۱.۷.۲ سرعت ثابت ۱۳
۲.۷.۲ سرعت متغیر محدود ۱۴
۳.۷.۲ سرعت متغیر با مبدل ظرفیت کسری ۱۵
۴.۷.۲ سرعت متغیر با مبدل ظرفیت کامل ۱۶
۳ تعاریف و مفاهیم قابلیت اطمینان ۱۷
۱.۳ اهمیت بررسی قابلیت اطمینان در سیستم‌های قدرت ۱۷
۲.۳ مفاهیم کیفیت برق و دسترسی به سیستم ۱۸
۳.۳ تعریف قابلیت اطمینان ۱۸
۴.۳ زمینه‌های مطالعاتی قابلیت اطمینان ۲۰
۱.۴.۳ روش‌های ارزیابی قابلیت اطمینان ۲۰
۲.۴.۳ روش‌های بهبود قابلیت اطمینان ۲۱

۵.۳ مدل‌های قابلیت اطمینان ۲۲
۱.۵.۳ مدل عمر Arrhenius ۲۳
۲.۵.۳ مدل عمر نمایی ۲۴
۶.۳ مدل‌سازی عمر نیمه‌هادی‌های قدرت ۲۵
۴ مرور مقالات ۲۷
۵ ارزیابی قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت ۳۴
۱.۵ محاسبه قابلیت اطمینان مبدل‌های توربین بادی‌های متصل به شبکه ۳۴
۱.۱.۵ محاسبه قابلیت اطمینان مبدل الکترونیک قدرت توربین باد سرعت ثابت ۳۵
۲.۱.۵ محاسبه قابلیت اطمینان مبدل الکترونیک قدرت توربین باد سرعت متغیر با DFIG ۳۸
۳.۱.۵ محاسبه قابلیت اطمینان مبدل الکترونیک قدرت توربین باد سرعت متغیر با مبدل ظرفیت کامل ... ۴۳
۴.۱.۵ مقایسه قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت سه توربین باد متصل به شبکه ۴۴
۲.۵ روش‌های مدولاسیون در مبدل‌های الکترونیک قدرت ۴۶
۱.۲.۵ روش مدولاسیون پهنای پالس سینوسی (SPWM) ۴۶
۲.۲.۵ روش مدولاسیون پهنای پالس بردار فضایی (SVPWM) ۴۸
۱.۲.۲.۵ محاسبه ولتاژهای V_d, V_q, V_{ref} و زاویه α ۵۱
۲.۲.۲.۵ محاسبه زمان‌های T_1, T_2, T_0 ..... ۵۳
۳.۲.۲.۵ تعیین ترتیب کلیدزنی هر ترانزیستور ۵۴
۳.۲.۵ بررسی تاثیر روش‌های مدولاسیون بر قابلیت اطمینان مبدل ۵۶
۶ جمع بندی و نتیجه گیری ۵۹
پیشنهادات ۶۰
منابع و مراجع ۶۱

فهرست اشکال

صفحه

شکل ۱.۱ رشد تولید توان بادی در ۱۶ سال اخیر[۶]..... ۲
شکل ۱.۲ اجزای توربین بادی محور افقی و محور عمودی[۸]..... ۱۲
شکل ۱.۳ ارتباط مفاهیم کیفیت برق، قابلیت اطمینان و دسترسی سیستم[۱۲]..... ۱۹
شکل ۲.۳ منحنی تغییرات نرخ خرابی نسبت به زمان[۱۵]..... ۲۲
شکل ۱.۴ بلوک دیاگرام استفاده شده برای محاسبه قابلیت اطمینان[۱۸]..... ۲۹
شکل ۲.۴ سیستم توربین باد کوچک با ژنراتور مغناطیس دائم متصل به شبکه[۱۹]..... ۳۰
شکل ۳.۴ سیستم توربین باد کوچک با ژنراتور القایی روتور سیم‌بندی شده متصل به شبکه[۲۰]..... ۳۲
شکل ۱.۵ سیستم توربین باد سرعت ثابت با ژنراتور القایی قفس سنجابی و راه‌انداز نرم[۱۰]..... ۳۶
شکل ۲.۵ سیستم توربین باد سرعت متغیر با DFIG [۲۵]..... ۳۹
شکل ۳.۵ مدار معادل اینورتر[۲۷]..... ۳۹
شکل ۴.۵ سیستم توربین باد سرعت متغیر با مبدل ظرفیت کامل[۱۰]..... ۴۳
شکل ۵.۵ قابلیت اطمینان سیستم‌های حالت‌دهی توان در مدت یک سال..... ۴۵
شکل ۶.۵ قابلیت اطمینان سیستم‌های حالت‌دهی توان در طول زمان..... ۴۵
شکل ۷.۵ نحوه تولید سیگنال‌های گیت در روش SPWM برای اینورتر پل سه فاز منبع ولتاژ..... ۴۷
شکل ۸.۵ تقاطع موج مرجع با موج مثلثی فرکانس بالا و نمودار ولتاژ خروجی اینورتر[۳۱]..... ۴۷
شکل ۹.۵ مدار معادل اینورتر منبع ولتاژ سه فاز و یک موتور القایی سه فاز به عنوان بار[۳۱]..... ۴۸
شکل ۱۰.۵ هشت بردار ولتاژ اینورتر[۳۲]..... ۵۰
شکل ۱۱.۵ ارتباط قاب مرجع abc و dq [۳۱]..... ۵۱
شکل ۱۲.۵ تقسیم‌بندی فضای برداری و بردارهای کلیدزنی پایه[۳۱]..... ۵۲
شکل ۱۳.۵ بردار فضایی ولتاژ و مولفه‌های dq آن[۳۱]..... ۵۲
شکل ۱۴.۵ بردار مرجع به صورت مجموع بردارها در بخش یک[۳۱]..... ۵۴
شکل ۱۵.۵ ترتیب کلیدزنی در روش SVPWM برای بخش یک[۳۱]..... ۵۴
شکل ۱۶.۵ ولتاژ خط به خط (V_{ab}) و جریان (i_a) خروجی اینورتردر روش (۱) SPWM و (۲) SVPWM..... ۵۷
شکل ۱۷.۵ مقایسه طیف هارمونیکی ولتاژ خط به خط خروجی در روش (۱) SPWM و (۲) SVPWM..... ۵۸

صفحه

فهرست جداول

جدول ۱.۱ فهرست ۱۰ کشور پیش‌رو در ظرفیت نصب شده واحد بادی تا انتهای سال ۲۰۱۱ [۶]..... ۲
جدول ۱.۵ پارامترهای ژنراتور[۲۳]..... ۳۷
جدول ۲.۵ محاسبات انجام شده برای نیمه‌هادی در توربین باد سرعت ثابت..... ۳۸
جدول ۳.۵ داده‌های نیمه‌هادی‌های قدرت[۲۴]، [۲۹]..... ۴۲
جدول ۴.۵ محاسبات انجام شده برای نیمه‌هادی‌ها در توربین باد سرعت متغیر با DFIG ۴۲
جدول ۵.۵ محاسبات انجام شده برای نیمه‌هادی‌ها در توربین باد سرعت متغیر با مبدل ظرفیت کامل..... ۴۳
جدول ۶.۵ بردارهای کلیدزنی، ولتاژهای فاز و ولتاژهای خط محاسبه شده ۴۹
جدول ۷.۵ محاسبه زمان کلیدزنی در هر بخش..... ۵۵
جدول ۸.۵ مقایسه THD جریان خروجی در روش SPWM و SVPWM..... ۵۶

۱ مقدمه

با افزایش قیمت سوخت و جدی شدن مسائل زیست محیطی، گرایش به استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر فزونی یافته و درصد استفاده از این منابع نیز سال به سال گسترش می‌یابد؛ به‌طوری که تا سال ۲۰۲۰ ، پیش‌بینی می‌شود ۲۰ درصد انرژی الکتریکی تولید شده، از طریق منابع بادی فراهم شود[۱].

از آنجا که هزینه‌های مربوط به ژنراتورهای بادی روزبه‌روز در حال کاهش است. لذا بهره‌برداری از انرژی باد جهت تولید برق می‌تواند از لحاظ اقتصادی و زیست محیطی به‌صرفه باشد. و همچنین امروزه حمایت‌های زیادی از این منبع تجدیدپذیر در مناطق بادخیز شده است[۲].

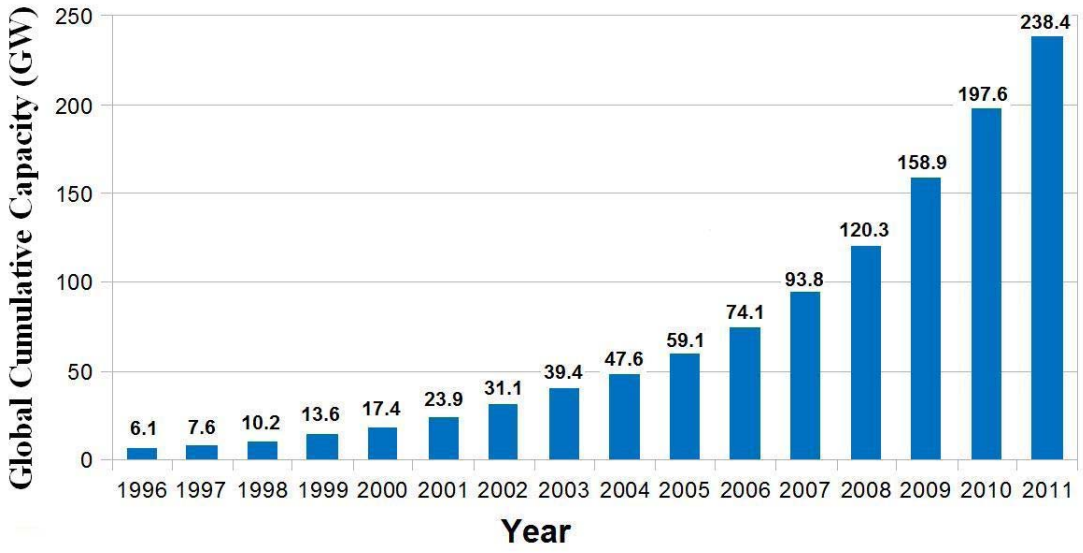
تولید انرژی بادی بسیار متفاوت با سایر انواع تولیدات انرژی الکتریکی است. و آن این که علاوه بر تاثیر خرابی واحد تولیدی، عامل مهم‌تر دیگری که تاثیر زیادی در تولید دارد، حالت رندم بودن و وابستگی بسیار شدید واحد بادی به تغییرات سرعت باد است. این عامل باعث می‌شود، ما تخمین کاملاً دقیقی از میزان تولید انرژی الکتریکی در هر لحظه نداشته‌باشیم. بنابراین اهمیت زیادی دارد، که ما از قابلیت اطمینان واحدهای تولیدی بادیمان آگاهی داشته باشیم. و از این اطلاعات در برنامه‌ریزی سیستم قدرت استفاده نمائیم. البته میزان تولید انرژی الکتریکی از طریق نیروگاه بادی در طی زمان مشخص نسبتاً بلند، با تقریب بسیار خوبی قابل محاسبه است[۳].

امروزه حدود ۱۸ درصد توان الکتریکی مورد نیاز جهان با استفاده از منابع تجدیدپذیر بدست می‌آید. نیروگاه‌های آبی در این میان بیشترین نقش را ایفا می‌کنند و پس از آن نیروگاه‌های بادی در رتبه‌ی دوم قرار دارند[۴]. تمایل کشورها به استفاده از منابع بادی در جهان طی سال‌های اخیر رشد چشم‌گیری داشته‌است. نمودار شکل۱.۱، میزان توان بادی تولید شده در جهان را از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۱ نشان می‌دهد.

میزان توان بادی نصب شده در سال ۱۹۹۰، برابر ۱/۷۴۳ گیگاوات بوده که در سال ۲۰۱۱ به ۲۳۸/۴ گیگاوات رسیده-است. این میزان تولید در سال ۲۰۱۱ حدود ۲/۵ درصد توان الکتریکی تولیدی در جهان را شامل شد[۵].

جدول ۱.۱، فهرست کشورهای پیش‌رو در تولید توان بادی را تا انتهای سال ۲۰۱۱ نشان می‌دهد.

مطالعات و محاسبات انجام شده در زمینه تخمین پتانسیل انرژی باد در ایران نشان می دهد، که تنها در ۲۶ منطقه کشور(شامل بیش از ۴۵ سایت مناسب) قابلیت نصب توربین‌های بادی را دارا می‌باشد. که از این میان می‌توان به استان گیلان سایت‌های رودبار، منجیل، پسکولان، هرزویل و بابائیان، استان خراسان رضوی سایت‌های بینالود و ونتیس (دیزباد) و استان‌های قزوین و آذربایجان شرقی اشاره کرد.



شکل ۱.۱ رشد تولید توان بادی در ۱۶ سال اخیر [۶].

جدول ۱.۱ فهرست ۱۰ کشور پیش‌رو در ظرفیت نصب شده‌ی واحد بادی تا انتهای سال ۲۰۱۱ [۶].

کشور	ظرفیت توان بادی نصب شده (MW)	درصد نسبت به مجموع کل نصب شده
چین	۶۲۷۳۳	۲۶/۳
آمریکا	۴۶۹۱۹	۱۹/۷
آلمان	۲۹۰۶۰	۱۲/۲
اسپانیا	۲۱۶۷۴	۹/۱
هند	۱۶۰۸۴	۶/۷
فرانسه	۶۸۰۰	۲/۸
ایتالیا	۶۷۴۷	۲/۸
انگلیس	۶۵۴۰	۲/۷
کانادا	۵۲۶۵	۲/۲
پرتغال	۴۰۸۳	۱/۷

دلایل این توسعه در استفاده از انرژی باد را می‌توان در گزینه‌های زیر خلاصه کرد[۷].

۱. پشتیبانی‌های سازمانی و دولتی بر روی منابع انرژی تجدیدپذیر

۲. هشدارهای عمومی و فهم جامعه در مورد پتانسیل انرژی باد

۳. محدودیت منابع سنتی مصرف انرژی و در حال اتمام بودن سوخت‌های فسیلی

۴. امنیت و سلامت عموم جامعه و افزایش کیفیت زندگی

۵. وجود منابع بادی وسیع در سرتاسر جهان

۶. بهبود راندمان در فن‌آوری‌های جدید بادی

۷. پاک بودن، فراوانی و تجدیدپذیری کامل این انرژی

۸. افزایش آلودگی شهرها، مشکلات ایجاد شده برای لایه‌های جو زمین ناشی از پدیده گلخانه‌ای و تغییر وضعیت جهانی آب و هوا

۹. رشد و توسعه سریع الکترونیک قدرت

۱۰. قدرت مانور زیاد در بهره‌برداری (از چند وات تا چندین مگاوات)

۱۱. عدم نیاز به آب و زمین زیاد برای نصب

۱۲. هزینه پایین تعمیر و نگهداری

۱۳. ایجاد اشتغال

۱۴. خسارت کمتر نسبت به سایر نیروگاه‌ها در مواقع جنگ و بلایای طبیعی، به علت پراکندگی توربین‌های بادی

۱۵. کمتر بودن نسبی قیمت انرژی حاصل از باد در بلندمدت

۱۶. توانایی تأمین بخشی از تقاضای انرژی برق

۱۷. تنوع بخشیدن به منابع انرژی و ایجاد سیستم پایدار انرژی

با توجه به این دلایل، ظرفیت نصب شده تولید توان بادی در سال‌های گذشته دارای رشد بسیار سریعی بوده و در آینده‌ی نزدیک سطح نفوذ توان بادی افزایش چشمگیرتری خواهدداشت. به بیان بهتر می‌توان گفت، که انرژی فردا، انرژی باد خواهد بود. برآوردها حاکی از وجود ۷۲ تراوات انرژی باد بر روی زمین است، که پتانسیل تبدیل به انرژی الکتریکی را دارد و این مقدار قابل ترقی نیز هست[۳].

اما با وجود این مزایا، استفاده از انرژی باد معایبی نیز دارد. بزرگ‌ترین معضل منابع بادی، مسئله عدم قطعیت در تولید این منابع می‌باشد. این مسئله باعث می‌گردد، که قابلیت آمادگی و کنترل این منابع کاهش یابد. و تولید آنها کاملا

احتمالاتی شود. همچنین استفاده بیش از حد منابع بادی ممکن است، باعث بروز مشکلاتی از قبیل تراکم در خطوط انتقال و ناپایداری ولتاژ در بعضی از شین‌ها شود[۱].

۱.۱ اهداف پایان‌نامه

با توجه به افزایش ظرفیت مزارع بادی و پیشرفت در ادوات الکترونیک قدرت و همچنین استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت در توربین بادی‌های متصل به شبکه، محاسبه قابلیت اطمینان این مبدل‌ها جهت عملکرد قابل اعتماد در دوره‌های طولانی مدت بهره‌برداری کاملا ضروری است. بنابراین در این پایان‌نامه قابلیت اطمینان این مبدل‌ها را برای سه تکنولوژی توربین باد متصل به شبکه، از قبیل توربین بادی سرعت ثابت، توربین بادی با ژنراتور القایی تغذیه دوگانه و توربین باد با ژنراتور القایی و مبدل فرکانسی ظرفیت کامل محاسبه کرده و با هم مقایسه می‌کنیم. و همچنین تاثیر روش‌های مختلف مدولاسیون مورد استفاده در مبدل‌های الکترونیک قدرت توربین باد را بر قابلیت اطمینان مبدل بررسی می‌کنیم.

۲.۱ ساختار پایان‌نامه

مفاد پایان‌نامه در شش فصل به شرح زیر تنظیم شده‌است.

در فصل اول به بیان مقدمه‌ای درباره اهمیت انرژی باد می‌پردازیم و سپس اهداف و ساختار پایان‌نامه را بیان می‌کنیم.

در فصل دوم تاریخچه استفاده از انرژی باد، قسمت‌های اصلی توربین باد، انواع طبقه‌بندی توربین‌های بادی و ساختمان و عملکرد آنها و انواع ژنراتورهای مورد استفاده در سیستم‌های توربین باد بیان می‌گردد.

در فصل سوم به بیان اهمیت بررسی قابلیت اطمینان در سیستم‌های قدرت، مفاهیم کیفیت برق و دسترسی به سیستم، تعریف قابلیت اطمینان، زمینه‌های مطالعاتی قابلیت اطمینان، مدل‌های قابلیت اطمینان استفاده شده در محاسبه قابلیت اطمینان ادوات الکترونیک قدرت و نحوه مدل‌سازی عمر نیمه‌هادی‌های قدرت و روابط مورد نیاز می‌پردازیم.

در فصل چهارم مقالات مرتبط با قابلیت اطمینان ادوات الکترونیک قدرت بیان می‌شود.

در فصل پنجم محاسبه قابلیت اطمینان مبدل‌های الکترونیک قدرت مورد استفاده در سه تکنولوژی توربین باد اشاره شده و مقایسه آنها با هم، تعریف مختصر روش‌های مختلف مدولاسیون مبدل‌های الکترونیک قدرت و بررسی تاثیرشان بر قابلیت اطمینان مبدل بیان شده‌است.

در فصل ششم جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه شده، و در انتها پیشنهادها برای ادامه کار و منابع و مراجع به صورت نمونه آورده شده‌اند.

۲ آشنایی با ساختمان و عملکرد انواع توربین‌های بادی

با توسعه نگرش‌های زیست محیطی و راهبردهای صرفه‌جویانه در بهره‌برداری از منابع انرژی‌های تجدید ناپذیر، استفاده از انرژی باد در مقایسه با سایر منابع انرژی مطرح در کشورهای جهان، روبه‌فزونی گذاشته است.

۱.۲ تاریخچه استفاده از انرژی باد

بشر از زمان‌های بسیار دور، انرژی باد را به شیوه‌های مختلف بکار گرفته است. ایرانیان اولین کسانی بودند که در حدود ۲۰۰ سال قبل از میلاد مسیح برای آردکردن غلات از آسیاب‌های بادی استفاده کرده‌اند. که امروزه آثار آن در نواحی خواف و تایباد در شرق کشور به چشم می‌خورد. همچنین مصریان باستان از نیروی باد برای راندن کشتی‌های خود برروی رودخانه نیل استفاده می‌کردند. در قرن هفدهم میلادی، مردم هلند طرح پایه آسیاب‌های بادی را بهبود دادند. همین امر باعث شد، تا این کشور در زمره غنی‌ترین و صنعتی‌ترین کشورهای اروپا قرار گیرد. برخی از کشورها آسیاب‌های بادی را برای آسیاب گندم و ذرت، پمپ کردن آب و قطع درختان استفاده می‌کردند. در آغاز قرن بیستم، اولین توربین‌های بادی سریع و مدرن ساخته شد.

پس از جنگ جهانی دوم، با وجود نیاز شدیدی که صنایع رو به توسعه کشورهای مترقی به منابع انرژی داشت. تولید نیروگاه‌های بادی و حتی تحقیق درباره آنها به علت در دسترس بودن سوخت‌های فسیلی ارزان قیمت متوقف گردید. اما با بروز بحران انرژی به سبب کاهش ذخایر هیدروکربن جهان و همچنین افزایش تقاضای انرژی و نگرانی از افزایش آلودگی، موجب شد تا توجه دانشمندان به منابع دیگر از جمله انرژی باد که می‌تواند به طور مناسبی در مناطق بادخیز مورد استفاده قرار گیرد، معطوف و فعالیت‌های دامنه‌داری از سال ۱۹۷۰ میلادی در این زمینه آغاز گردید. امروزه فعال‌ترین کشورها در این زمینه چین، آمریکا، آلمان، اسپانیا و هند می‌باشند[۷].

۲.۲ تعریف توربین باد

توربین‌های بادی تجهیزاتی هستند، که انرژی پتانسیل باد را به انرژی مکانیکی و سپس به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کنند. این توربین‌ها چنانچه در معرض وزش باد کافی قرار گیرند برق تولید می‌کنند. مراحل کار یک توربین بادی کاملاً عکس مراحل کار پنکه می‌باشد. در پنکه انرژی الکتریسیته به انرژی مکانیکی تبدیل شده و باعث چرخیدن پره می‌شود. در توربین‌های بادی چرخش پره‌ها، شفت متصل به پره‌ها را می‌چرخاند، که در نهایت ژنراتور متصل به این شافت به حرکت درآمده و الکتریسیته تولید می‌شود.

۳.۲ قسمت‌های اصلی توربین بادی

یک توربین بادی به طور کلی از قسمت‌هایی مانند روتور، جعبه‌دنده، محور سرعت پایین، محور سرعت بالا، ژنراتور، برج نگهداری سیستم روتور، مکانیزم ترمز و مکانیزم‌های انحراف توربین، بادنما، بادسنج و بدنه توربین تشکیل شده است. که هر یک از این اجزاء، نقش خاصی را در توربین ایفا می‌کنند. حال با طرز کار، عملکرد و وظیفه هر جز به طور مختصر آشنا می‌شویم[۸].

۱. روتور

روتور یک توربین از پره‌ها، توپی و اجزای داخل آن تشکیل شده‌است. روتور از طریق توپی خود به محور سرعت پایین متصل است. و انرژی دورانی خود را به محور سرعت پایین منتقل می‌کند. روتورها بر دو نوع محور افقی و محور عمودی ساخته می‌شوند. و پره‌های آنها را می‌توان از فایبرگلاس تقویت شده با پلی استر و یا چوب چند لایه و یا فولاد ساخت. که پره‌های ساخته شده با فایبرگلاس تقویت شده سبک می‌باشند. و تنش کمتری بر یاتاقان‌ها و توپی وارد می‌کنند. پره‌های ساخته شده با چوب چند لایه دارای مقاومت بسیار مطلوب در برابر خستگی می‌باشند. و پره‌های فولادی به خاطر تکنولوژی ساده ساخت، استحکام بالا و هزینه ساخت کم، مورد استفاده قرار می‌گیرند. قطر پره‌های توربین می‌تواند از چند متر تا حدود چند ده متر ساخته شود. توان قابل تولید در یک توربین بادی متناسب با سطح دایره‌ای شکلی است، که از چرخش پره‌های روتور به حول محور روتور حاصل می‌شود. و به این دلیل و با توجه به شرایط محیطی و بادخیز بودن منطقه و میزان توان مورد نیاز، پره‌های توربین در اندازه‌های مختلف ساخته می‌شود.

۲. محورهای سرعت بالا و پایین

محور سرعت پایین از یک طرف به پره‌های روتور و از طرف دیگر به جعبه‌دنده متصل است. و سرعت چرخش آن برابر سرعت پره‌های روتور می‌باشد. وظیفه این محور انتقال انرژی دورانی تولید شده در اثر وزش باد به جعبه دنده است.

محور سرعت بالا از یک طرف به جعبه دنده و از طرف دیگر به شافت ژنراتور متصل است. و وظیفه آن انتقال انرژی تغییر یافته چرخشی در جعبه دنده به محور ژنراتور می‌باشد.

۳. جعبه‌دنده

سرعت چرخش روتور در توربین‌های بادی پایین است. و با توجه به شرایط و نوع توربین در حدود ۳۰ تا ۴۰ دور در دقیقه خواهد بود. در حالی که برای تولید انرژی در محدوده فرکانس ۶۰ هرتز با توجه به تعداد قطب‌های ژنراتور نیاز به سرعتی بین ۱۲۰۰ تا ۱۸۰۰ دور در دقیقه می باشد. که جهت ایجاد چنین سرعتی نیاز به یک مکانیزم انتقال قدرت داریم، که سرعت پایین و گشتاور بالای محور سرعت پایین را به سرعت بالا و گشتاور پایین در محور سرعت بالا تبدیل کند. این مکانیزم جعبه‌دنده نام دارد. در جعبه دنده توربین‌های بادی نرخ افزایش سرعت ثابت است. و چرخ‌دنده‌های موجود در آن فقط سرعت چرخش محور سرعت پایین را به یک نسبت مشخص بالا خواهند برد، که معمولاً این نسبت در حدود یک به پنجاه است که باعث می‌شود، سرعت چرخش محور سرعت بالا پنجاه برابر سرعت چرخش محور سرعت پائین باشد. استفاده از جعبه‌دنده به دلیل اصطکاک بالای قطعات مکانیکی آن و وزن بسیار سنگین و هزینه بسیار بالا مطلوب نیست. و بدین دلیل تحقیقات بسیاری برای حذف مکانیزم جعبه‌دنده از سیستم توربین‌ها انجام شده‌است، که یکی از راهکارهای آن افزایش تعداد قطب‌های ژنراتور به حدی است، که با همان سرعت چرخش پایین روتور بتوان به فرکانس حوالی ۶۰ هرتز رسید، که این راهکار از لحاظ عملی به دلیل بزرگ شدن حجم ژنراتور و نیاز به نصب ژنراتور در بالای سطح زمین منتفی است. و روش دیگر افزایش سرعت چرخش روتور به مقدار مطلوب برای ژنراتور (در حدود ۱۲۰۰ تا ۱۶۰۰ دور در دقیقه) است، که این راهکار هم به علت افزایش تلفات مکانیکی سیستم و محدودیت‌های مکانیکی موجود غیر قابل استفاده است.

۴. ژنراتور

ژنراتورهای مورد استفاده در توربین‌های بادی معمولاً از نوع ژنراتورهای القائی (آسنکرون) هستند، که اغلب دارای ۴ یا ۶ قطب می‌باشند. ولی در برخی موارد از ژنراتورهای سنکرون نیز استفاده می‌کنند. ساختمان ساده، قیمت ارزان و رنج وسیع توان از چند وات تا چندین مگاوات باعث شده ژنراتورهای القایی در بیشتر توربین‌های بادی مورد استفاده قرار گیرند. ولی نقص عمده این ژنراتورها مصرف توان راکتیو از شبکه است، که باعث پایین‌آمدن ظرفیت موجود در خطوط انتقال می‌شود. و برای حل این مشکل باید از واحدهای جبران ساز راکتیو در محل نیروگاه برای تامین توان راکتیو مورد نیاز ژنراتور القائی استفاده کرد. این خازن‌ها باعث افزایش هزینه احداث نیروگاه می‌شود، ولی این هزینه در مقایسه با استفاده از ژنراتورهای سنکرون گران‌قیمت که نیاز به نصب خازن ندارند بسیار کمتر است.

۵. بدنه توربین

بدنه توربین به محفظه‌ای گویند که پوشش مستحکمی را برای اجزای مختلف سیستم از قبیل محورهای سرعت بالا و پایین، ژنراتور، جعبه‌دنده و مکانیزم‌های کنترل و ترمز فراهم می‌کند. و بدین صورت این تجهیزات در برابر آسیب‌های جوی محافظت می‌شوند.

۶. بادنما و بادسنج

بادنما و بادسنج وظیفه اندازه‌گیری، تشخیص سرعت و جهت باد را دارند. سیگنال الکتریکی خروجی از باد سنج به سیستم کنترل برای شروع به حرکت، متوقف کردن یا ثابت نگه داشتن دورتوربین داده می‌شود. و نیز سیگنال خروجی به سیستم انحراف توربین برای فرمان حرکت به سمت چپ یا راست محور توربین ارسال می‌شود.

۷. سیستم گرداننده راستای محور توربین (انحراف به سمت چپ و راست)

این سیستم در توربین‌های بادی با محور افقی استفاده می‌شود. وظیفه آن این است که راستای محور توربین را به صورتی تغییر دهد، که همواره بر راستای ورزش باد عمود باشد. و کارکرد این سیستم تحت فرمان سیگنال ارسال شده از بادنما و باد سنج است. استفاده از این سیستم باعث افزایش انرژی دریافت شده از باد و در نتیجه افزایش راندمان کاری توربین می‌شود.

۸. سیستم کنترل و ایمنی

سیستم کنترل به صورت پیوسته اطلاعات مورد نیاز مانند شرایط مختلف توربین، وضعیت سرعت و جهت باد را توسط سنسورهای نصب شده در مکان‌های مختلف توربین و نیز توسط تجهیزاتی مانند بادنما و بادسنج دریافت کرده، و با توجه به اطلاعات و شرایط مطلوب کار سیستم، وظایف کنترلی و حفاظتی خود را از قبیل روشن و خاموش کردن توربین انجام می‌دهد.

۹. سیستم ترمز

در شرایطی که سرعت چرخش روتور به علت افزایش بیش از حد انرژی باد از حد مجاز بیشتر است. به منظور جلوگیری از آسیب دیدن قسمت‌های مکانیکی در سرعت‌های بالا، مکانیزمی برای ترمز روتور در شرایط بحرانی در نظر گرفته می‌شود.

۱۰. برج

قسمت‌های مختلف روتور توربین بر روی برج قرار می‌گیرد. جنس برج معمولاً از فولاد می‌باشد. و این برج‌ها در دو نوع برج‌های خرپائی و برج‌های لوله‌ای ساخته می‌شوند. برای توربین‌های با توان بالا با توجه به قطر روتور بیشتر آنها نیاز به برج‌های با ارتفاع بالاتر دارند. هرچه ارتفاع برج بیشتر باشد، می‌توان از سرعت‌های بیشتر باد در ارتفاع‌های بالاتر بهره برد. طراحی سازه برج بسیار مهم و حساس است. زیرا تمام نیروها و گشتاورهای ایجاد شده توسط پره‌های متحرک توربین باید توسط برج و فونداسیون آن مهار گردد. بنابراین طراحی صحیح این قسمت برای عملکرد مطلوب توربین بسیار حائز اهمیت است.

۴.۲ طبقه‌بندی توربین‌های بادی برمبنای ظرفیت تولید انرژی الکتریکی

توربین‌های بادی در یک تقسیم‌بندی کلی به سه دسته تقسیم می‌شوند.

۱. توربین‌های بادی کوچک (خانگی)

۲. توربین‌های بادی متوسط (صنعتی)

۳. توربین‌های بادی بزرگ (نیروگاهی یا مگاواتی)

۱.۴.۲ توربین‌های بادی کوچک

این توربین‌ها برای تامین انرژی الکتریکی مصرف کننده‌هایی مانند پمپ آب، شارژ باتری و یا سیستم‌های گرمایش و سرمایش استفاده می‌شود. و اغلب تا توان ۱۰ کیلووات مورد بهره برداری قرار می گیرند. روتور این توربین‌ها دارای قطر کمی بوده و از تعداد ۲ تا ۶ پره از جنس کربن و آلیاژهای آلومینیم ساخته می‌شود. این توربین‌ها اغلب فاقد جعبه‌دنده هستند. و توربین مستقیماً به ژنراتور متصل است. و در صورتی که کیفیت ولتاژ و فرکانس برق تولیدی برای مصرف کننده‌ها مهم نباشد، (مانند المنت‌های مقاومتی در سیستم‌های گرمایش) می‌توان برق تولید شده در ژنراتور را مستقیماً به بار مورد نظر متصل کرد. ولی در زمانی که مصرف کننده به ولتاژ و فرکانس ثابت و مشخصی نیاز داشته باشد. ابتدا ولتاژ خروجی ژنراتور توسط سیستم یکسوساز به ولتاژ DC تبدیل شده و سپس برای رسیدن به ولتاژ و فرکانس مورد نظر از مبدل DC به AC کنترل شده استفاده می‌کنیم.

۲.۴.۲ توربین‌های بادی متوسط

از این توربین‌ها معمولاً در شبکه‌های کوچک در مناطق دور افتاده مانند روستاهای مرزی استفاده می‌شود. و همچنین برای مناطق دور از شبکه سراسری یا مناطقی کوهستانی که امکان احداث شبکه انتقال در آن وجود ندارد استفاده می‌کنند. ظرفیت تولید توان الکتریکی این نیروگاه‌ها بین ۱۰ تا ۲۵۰ کیلووات است. در کنار توربین‌های بادی از دیگر سیستم‌های تولید انرژی مانند سیستم‌های فتوولتائیک و یا دیزل ژنراتور برای تولید انرژی الکتریکی می‌توان استفاده کرد. و مصرف کننده‌هایی که نیاز به برق با کیفیت پایین دارند، از توربین‌های بادی و مصرف‌کننده‌هایی که نیاز به انرژی الکتریکی با کیفیت ولتاژ و جریان بالا دارند، از دیزل ژنراتور یا سلول خورشیدی تغذیه کرد.

۳.۴.۲ توربین‌های بادی بزرگ

این نوع توربین‌ها معمولاً شامل چند توربین بادی متمرکز با توان تولیدی ۲۵۰ کیلووات به بالا می‌باشند، که به صورت متصل به شبکه و یا جدا از شبکه طراحی می‌گردند. در این نوع توربین‌ها با توجه به سرعت پایین چرخش محور توربین نیاز به سیستم چرخ دنده برای تغییر میزان گشتاور و سرعت محور توربین است.

این توربین‌ها خود به دو دسته تقسیم‌بندی می‌شوند.

۱. مستقر در ساحل[1]

۲. مستقر در دریا[2]

۵.۲ طبقه‌بندی توربین‌های بادی برمبنای محور توربین

در یک تقسیم‌بندی دیگر توربین‌های بادی به دو دسته تقسیم می‌شوند.

۱. توربین بادی محور افقی[3]

۲. توربین بادی محور قائم (عمودی)[4]

[1] On-shore
[2] Off-shore
[3] Horizontal axis wind turbine
[4] Vertical axis wind turbine

۱.۵.۲ توربین بادی محور افقی

در توربین‌های بادی با محور افقی که به اختصار HAWT هم نامیده می‌شوند، روتور و ژنراتور الکتریکی در بالای یک برج بلند قرار می‌گیرند. و برای تولید انرژی الکتریکی باید در راستای باد باشند. این توربین‌ها نسبت به مدل محور عمودی رایج تر بوده، همچنین از لحاظ تکنولوژی پیچیده‌تر و گرانتر نیز می‌باشند. ساخت آنها مشکل‌تر از نوع محور عمودی بوده ولی راندمان بسیار بالایی دارند. به لحاظ راندمان بالای این توربین‌ها نسبت به محور عمودی، امروزه نوع محور عمودی کمتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. این توربین‌ها در سرعت‌های پایین نیز توانایی تولید انرژی الکتریکی را داشته و توانایی تنظیم جهت در مسیر وزش باد را نیز دارند. برای تعیین جهت وزش باد در توربین‌های بادی کوچک از یک بادنمای ساده استفاده می‌کنند. ولی در توربین‌های بزرگ‌تر معمولاً از یک سنسور باد که با یک سروموتور در ارتباط است، استفاده می‌کنند. بیشتر این توربین‌های بادی با استفاده از یک جعبه‌دنده سرعت چرخش کند پره‌ها را به سرعت بیشتری برای ژنراتور تبدیل می‌کنند. بطور کلی یک توربین باد محور افقی از سه قسمت اصلی تشکیل شده است. که عبارتنداز برج، پره، بدنه توربین.

۲.۵.۲ توربین بادی محور عمودی

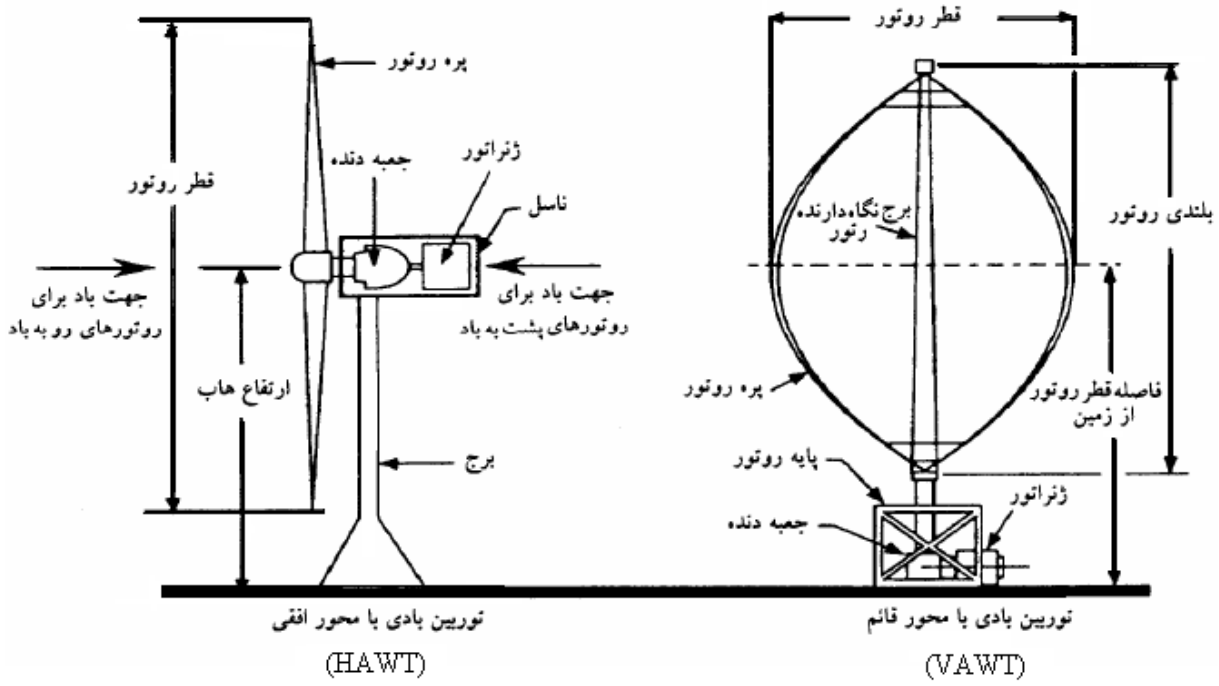
در توربین‌های بادی با محور عمودی که به اختصار VAWT نامیده می‌شود، روتور اصلی به صورت عمودی قرار می‌گیرد. مزیت این نوع توربین‌ها عدم نیاز به یک پایه‌ی مرتفع و عدم نیاز به تنظیم جهت قرارگیری نسبت به جهت وزش باد است. این نکته در مکان‌هایی که جهت وزش باد خیلی متغیر است، مثلاً در بالای ساختمان‌های مسکونی یک امتیاز به‌شمار می‌رود. مهم‌ترین عیب این نوع توربین‌ها کم‌بودن سرعت دورانی آنها و درنتیجه زیاد بودن گشتاور است. با توجه به عمودی بودن محور جعبه‌دنده و ژنراتور می‌تواند در نزدیکی زمین قرار گیرد. که این موضوع دسترسی به این تجهیزات را برای نگهداری و تعمیر آسان‌تر می‌کند. شکل ۱.۲، اجزای یک توربین بادی محور افقی و یک توربین بادی محور عمودی را نشان می‌دهد.

۶.۲ انواع توربین‌های بادی برمبنای سرعت روتور

توربین‌های بادی به طور کلی به دو نوع تقسیم می‌شوند[۹]، [۱۰].

۱. توربین‌های بادی سرعت ثابت

۲. توربین‌های بادی سرعت متغیر



شکل ۱.۲ اجزای توربین بادی محور افقی و محور عمودی[۸].

۱.۶.۲ توربین‌های بادی سرعت ثابت

تا اوایل ۱۹۹۰، استاندارد نصب و بهره‌برداری بر مبنای توربین‌های بادی با سرعت ثابت بود. در این نوع توربین‌ها صرف نظر از سرعت باد، سرعت رتور توربین (محور) ثابت است. این سرعت به فرکانس شبکه، ساختمان ژنراتور و نیز به نسبت دنده‌ها در گیربکس بستگی دارد. این نوع توربین‌ها دارای ژنراتور القایی قفس سنجابی[۱] یا رتور سیم پیچی شده[۲] هستند. که مستقیماً به شبکه قدرت متصل می‌شوند. به منظور افزایش توان تولیدی ژنراتور این توربین‌های بادی، دو نوع تنظیم بر روی سیم پیچی‌های استاتور وجود دارد. یکی در سرعت‌های پایین باد (نوعاً ۸ قطب) و دیگری در سرعت‌های متوسط یا بالا (۴ قطب یا ۶ قطب) می‌باشد. مزایای این نوع توربین‌ها سادگی، استحکام، قابلیت اطمینان بالا و قیمت اجزای الکتریکی و درایو پایین است. و معایب مهم این نوع توربین‌ها توان راکتیو مصرفی غیرقابل کنترل، استرس مکانیکی و کنترل محدود کیفیت توان می‌باشد.

[1] Squirrel cage induction generator
[2] Wound rotor induction generator