

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیر و تشکر

خداوند جان و جهان را شاکریم که نعمت علم را بر پیکر این موجود خاکی زینتی گرانبها قرار داد و آن را همچون نردبانی برای رسیدن به مطلوب آشکار ساخت تا بندگان به نور علم معرفت گیرند و به فضل آن فضیلت.

بدین وسیله از اساتید محترم گروه مهندسی برق که در مقطع کارشناسی ارشد، ما را در تحصیل علم و دانش کمک فرمودند تقدیر و تشکر می نمایم، به ویژه از استاد عزیز جناب آقای دکتر بنائی که در طول انجام این پایان نامه همواره با راهنمایی های بی دریغ خویش بنده را یاری فرمودند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از استاد عزیز جناب آقای دکتر سید حسین حسینی که قبول زحمت فرموده و مرا از مشورت های ارزشمند خویش بهره مند ساخته اند تشکر می نمایم.

علیرضا دهقان زاده

بهمن ماه یکهزار و سیصد و هشتاد و نه

تبریز، ایران

تقدیم به :

پدر دلسوز

و

مادر مهربانم

چکیده

ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده یکی از انواع ساختارهای موجود برای توربین بادی است که روتور از طریق مبدل الکترونیک قدرت به شبکه متصل می شود. ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده دارای دو حلقه کنترلی می باشد که قابلیت کنترل توان راکتیو ژنراتور، فرکانس الکتریکی خروجی و سرعت روتور را دارا است. این نوع ژنراتور برای تولید حداکثر توان از انرژی باد در عملکرد سرعت متغیر استفاده می شود. ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده نسبت به دیگر ساختارهای توربین بادی سرعت متغیر، به مبدل الکترونیک قدرت با توان نامی پایین تر نیاز دارد. در این پایان نامه مبدل نه سویچه AC/AC برای ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده پیشنهاد شده است که این مبدل نسبت به مبدل های مرسوم از تعداد سویچ کمتری استفاده می کند و همچنین نسبت به کموتاسیون حساس نیست. برای مبدل نه سویچه در این پایان نامه از الگوریتم کلید زنی PWM استفاده شده و سپس استراتژی کنترلی توربین بادی با ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده مجهز به مبدل نه سویچه پیشنهادی بحث شده است و نیز عملکرد سرعت ثابت و سرعت متغیر برای ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده در برابر تغییر سرعت باد مورد مطالعه قرار گرفته و نتایج شبیه سازی کارآیی مناسب توربین بادی با مبدل پیشنهادی در هر دو عملکرد سرعت ثابت و سرعت متغیر را نشان می دهند.

کلید واژه : انرژی بادی، ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده، مبدل نه سویچه، الگوریتم کلید زنی

فهرست مطالب

عنوان

فهرست جداول.....	ث
فهرست شکل ها.....	ث
چکیده.....	یک
مقدمه.....	۱

فصل اول : مروری بر مطالعات انجام گرفته

مقدمه.....	۵
۱-۱: انرژی های تجدید پذیر.....	۵
۲-۱: تاریخچه انرژی باد.....	۶
۳-۱: ساختار کلی توربین بادی.....	۷
۴-۱: مدل آیرودینامیکی توربین بادی.....	۹
۵-۱: حداکثر توان انتقالی توربین بادی.....	۱۲
۶-۱: انواع سیستم های توربین بادی.....	۱۳
۶-۱-۱: انواع ساختار های ارائه شده برای توربین بادی.....	۱۴
۶-۱-۱-۱: توربین های سرعت ثابت با ژنراتور القایی.....	۱۴
۶-۱-۱-۲: توربین های سرعت متغیر با ژنراتور های القایی قفس سنجابی یا ژنراتور سنکرون.....	۱۵
۶-۱-۳: توربین های سرعت متغیر با ژنراتور سنکرون با تعداد قطب بیشتر.....	۱۶
۶-۱-۴: توربین های سرعت متغیر با ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده.....	۱۸
۷-۱: مشخصه گشتاور- سرعت ژنراتورهای القایی از دو سو تغذیه شده.....	۲۰
۸-۱: روابط فرکانس روتور و استاتور.....	۲۱
۹-۱: مدار معادل ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده.....	۲۲
۱۰-۱: مبادله توان در ژنراتورهای القایی از دو سو تغذیه شده.....	۲۳
۱۱-۱: بررسی منابع از نظر مبدل پیشنهاد شده.....	۲۵

- ۱-۱۱-۱: انواع مبدل های پیشنهاد شده برای ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده..... ۲۶
- ۱-۱۱-۱: مبدل کرامر استاتیک ۲۶
- ۲-۱-۱۱-۱: مبدل AC/AC از نوع پشت به پشت (PWM) ۲۸
- ۳-۱-۱۱-۱: مبدل ماتریسی AC/AC ۳۰
- ۲-۱۱-۱: نتیجه گیری از بررسی منابع ۳۱
- ۱۲-۱: نتیجه گیری ۳۱

فصل دوم : ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده با استفاده از مبدل نه سویچه

- مقدمه ۳۴
- ۱-۲: مبدل AC/AC نه سویچه جدید ۳۴
- ۲-۲: نمونه ایی از کاربردهای مبدل AC/AC نه سویچه ۳۶
- ۱-۲-۲: مبدل نه سویچه برای کنترل دو بار سه فاز به طور مستقل ۳۷
- ۲-۲-۲: مبدل نه سویچه برای کاربرد در منابع انرژی بدون وقفه ۳۷
- ۳-۲-۲: مبدل نه سویچه به همراه منبع امپدانس برای کنترل دو بار سه فاز به طور مستقل ۳۸
- ۴-۲-۲: مبدل نه سویچه به عنوان مبدل AC/AC در مبادله توان ۳۹
- ۵-۲-۲: مبدل نه سویچه در ساختار UPQC ۴۰
- ۳-۲: حالت های کلیدزنی مبدل نه سویچه ۴۱
- ۴-۲: الگوریتم PWM ارائه شده ۴۲
- ۱-۴-۲: مدولاسیون فرکانس ثابت (CF) ۴۳
- ۲-۴-۲: مدولاسیون فرکانس متغیر (VF) ۴۵
- ۵-۲: ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده پیشنهادی ۴۹
- ۱-۵-۲: مدلسازی ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده ۵۲
- ۲-۵-۲: مدار کنترلی مبدل سمت روتور ۵۳
- ۳-۵-۲: مدار کنترلی مبدل سمت شبکه ۵۶
- ۶-۲: نتیجه گیری ۵۸

فصل سوم : نتایج شبیه سازی

۶۰	.....مقدمه
۶۰	.....۱-۳: شبیه سازی مبدل AC/AC نه سویچه جدید به صورت حلقه باز
۶۱	.....۱-۳-۱: نتایج شبیه سازی مبدل AC/AC نه سویچه به صورت حلقه باز
۶۲	.....۲-۱-۳: تحلیل نتایج شبیه سازی مبدل نه سویچه
۶۳	.....۲-۳: توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده پیشنهادی به صورت حلقه بسته
	.....افزایش سرعت باد از ۹,۶ به ۱۰,۸ متر بر ثانیه
۶۵	.....۲-۳-۱: نتایج شبیه سازی در عملکرد سرعت ثابت
۶۸	.....۲-۳-۲: تحلیل نتایج شبیه سازی
	.....افزایش سرعت باد از ۹,۶ به ۱۲ متر بر ثانیه
۶۹	.....۳-۳: نتایج شبیه سازی در عملکرد سرعت ثابت
۷۲	.....۱-۳-۱: تحلیل نتایج شبیه سازی
	.....افزایش سرعت باد از ۹,۶ به ۱۲ متر بر ثانیه
۷۳	.....۴-۳: نتایج شبیه سازی در عملکرد سرعت متغیر
۷۶	.....۴-۳-۱: تحلیل نتایج شبیه سازی
۷۷	.....۴-۳-۲: مقایسه عملکرد سرعت ثابت و سرعت متغیر
۷۸	.....۵-۳: نتیجه گیری
۸۰	.....نتایج و پیشنهادات
۸۳	.....ضمائم
۸۵	.....مراجع

فهرست جداول

عنوان

- جدول (۱-۱) مثال هایی از شارش توان در روتور و استاتور بر حسب لغزش ۲۵
- جدول (۲-۱) حالات کلید زنی مبدل پشت به پشت ۲۹
- جدول (۱-۲) حالات کلید زنی مبدل نه سویچه ۴۲

فهرست شکل ها

عنوان

- شکل (۱-۱) اجزای توربین بادی ۸
- شکل (۲-۱) منحنی ضریب توان بر حسب λ به ازای β ثابت ۱۱
- شکل (۳-۱) منحنی ضریب توان بر حسب λ به ازای β متغیر ۱۱
- شکل (۴-۱) منحنی توان خروجی توربین بر حسب سرعت روتور ۱۲
- شکل (۵-۱) توربین سرعت ثابت با ژنراتور های القایی ۱۵
- شکل (۶-۱) توربین سرعت متغیر با ژنراتور های القایی قفس سنجابی یا ژنراتور سنکرون ۱۶
- شکل (۷-۱) توربین سرعت متغیر با ژنراتور های با قطب بیشتر ۱۷
- شکل (۸-۱) جزئیات مبدل ژنراتور های PMSG ۱۸
- شکل (۹-۱) توربین بادی سرعت متغیر با ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده (DFIG) ۱۹
- شکل (۱۰-۱) جزئیات مبدل پست به پشت DFIG ۲۰
- شکل (۱۱-۱) منحنی گشتاور-سرعت DFIG ۲۱
- شکل (۱۲-۱) مدار معادل DFIG ۲۲
- شکل (۱۳-۱) جهت شارش توان ها ۲۵
- شکل (۱۴-۱) ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده با مبدل کرامر ۲۶
- شکل (۱۵-۱) مبدل استاتیک کرامر ۲۷

- شکل (۱۶-۱) مبدل استاتیک کرامر اصلاح شده ۲۸
- شکل (۱۷-۱) مبدل پشت به پشت (PWM) ۲۹
- شکل (۱۸-۱) ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده با استفاده از مبدل ماتریسی ۳۰
- شکل (۱-۲) مبدل ۹ سویچه AC/AC ۳۵
- شکل (۲-۲) مبدل ۹ سویچه برای درایو دو موتور سه فاز به طور مستقل ۳۷
- شکل (۳-۲) UPS با استفاده از مبدل ۹ سویچه ۳۸
- شکل (۴-۲) مبدل ۹ سویچه مبتنی بر منبع امپدانسی ۳۹
- شکل (۵-۲) مبدل ۹ سویچه برای کنترل بار اهمی - سلفی ۴۰
- شکل (۶-۲) UPQC مبتنی بر مبدل نه سویچه ۴۱
- شکل (۷-۲) مدولاسیون فرکانس ثابت (CF) ۴۳
- شکل (۸-۲) حالت غیر مجاز مدولاسیون فرکانس ثابت (CF) ۴۵
- شکل (۹-۲) مدولاسیون فرکانس متغیر (VF) ۴۶
- شکل (۱۰-۲) نحوه تولید سیگنال فرمان سویچ میانی ۴۸
- شکل (۱۱-۲) کلید زنی یک ستون با جزئیات ۴۹
- شکل (۱۲-۲) ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده پیشنهادی ۵۱
- شکل (۱۳-۲) مدار کنترلی مبدل سمت روتور ۵۶
- شکل (۱۴-۲) مدار کنترلی مبدل سمت شبکه ۵۷
- شکل (۱-۳) مدولاسیون فرکانس متغیر در نظر گرفته شده برای مبدل ۶۱
- شکل (۲-۳) ولتاژ خروجی اینورتر بالایی مبدل نه سویچه ۶۲
- شکل (۳-۳) ولتاژ خروجی اینورتر پایینی مبدل نه سویچه ۶۲
- افزایش سرعت باد از ۹,۶ به ۱۰,۸ متر بر ثانیه
- شکل (۴-۳) سرعت باد ۶۵
- شکل (۵-۳) توان تحویلی استاتور به شبکه ۶۶
- شکل (۶-۳) توان تحویلی روتور به شبکه ۶۶
- شکل (۷-۳) توان تحویلی ژنراتور به شبکه ۶۶
- شکل (۸-۳) سیگنال های سینوسی برای کلیدزنی طرف روتور ۶۷

- شکل (۹-۳) ولتاژ و جریان استاتور قبل از تغییرات سرعت باد..... ۶۷
- شکل (۱۰-۳) ولتاژ و جریان استاتور بعد از تغییرات سرعت باد..... ۶۷
- شکل (۱۱-۳) سرعت مکانیکی روتور..... ۶۸
- افزایش سرعت باد از ۹,۶ به ۱۲ متر بر ثانیه (عملکرد سرعت ثابت)
- شکل (۱۲-۳) سرعت باد..... ۶۹
- شکل (۱۳-۳) توان تحویلی استاتور به شبکه..... ۷۰
- شکل (۱۴-۳) توان تحویلی روتور به شبکه..... ۷۰
- شکل (۱۵-۳) توان تحویلی ژنراتور به شبکه..... ۷۰
- شکل (۱۶-۳) سیگنال های سینوسی برای کلیدزنی طرف روتور..... ۷۱
- شکل (۱۷-۳) ولتاژ و جریان استاتور قبل از تغییرات سرعت باد..... ۷۱
- شکل (۱۸-۳) ولتاژ و جریان استاتور بعد از تغییرات سرعت باد..... ۷۱
- شکل (۱۹-۳) سرعت مکانیکی روتور..... ۷۲
- افزایش سرعت باد از ۹,۶ به ۱۲ متر بر ثانیه (عملکرد سرعت متغیر)
- شکل (۲۰-۳) سرعت باد..... ۷۳
- شکل (۲۱-۳) سرعت مکانیکی روتور..... ۷۳
- شکل (۲۲-۳) سیگنال های سینوسی برای کلیدزنی طرف روتور قبل از تغییر سرعت باد..... ۷۴
- شکل (۲۳-۳) سیگنال های سینوسی برای کلیدزنی طرف روتور بعد از تغییر سرعت باد..... ۷۴
- شکل (۲۴-۳) توان تحویلی استاتور به شبکه..... ۷۴
- شکل (۲۵-۳) توان تحویلی روتور به شبکه..... ۷۵
- شکل (۲۶-۳) توان تحویلی ژنراتور به شبکه..... ۷۵
- شکل (۲۷-۳) ولتاژ و جریان استاتور قبل از تغییرات سرعت باد..... ۷۵
- شکل (۲۸-۳) ولتاژ و جریان استاتور بعد از تغییرات سرعت باد..... ۷۶

مقدمه:

امروزه سهم انرژی الکتریکی در زندگی روزمره انسان ها رو به افزایش بوده، به طوری که تقاضا برای مصرف انرژی الکتریکی در واحدهای مسکونی، تجاری، کشاورزی، صنعتی و ... با رشد قابل توجهی همراه است. از طرف دیگر توجه به منابع متعارف تامین انرژی الکتریکی مانند سوخت های فسیلی به علت تاثیرات نامطلوب زیست محیطی با محدودیت مواجه شده است. همچنین خطر پایان پذیر بودن سوخت های فسیلی به علت تجدید ناپذیر بودن موجب افزایش قیمت این نوع سوخت ها می شود. امروزه منابع انرژی تجدید پذیر به علت پاکی و رایگان بودن جهت افزایش تولید برق بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند. انرژی بادی به علت پاک بودن، رایگان و پیوسته بودن بیشتر مورد توجه قرار گرفته به طوریکه پیش بینی می شود تا سال ۲۰۲۰ حدود ۱۲٪ برق جهان از انرژی باد تامین شود.

توربین های بادی به دو نوع سرعت ثابت و سرعت متغیر تقسیم بندی می شوند. در توربین های سرعت ثابت ژنراتور مستقیماً به شبکه متصل می شود و سرعت روتور ثابت می ماند که این موجب افزایش فشار مکانیکی به توربین می شود و همچنین حداکثر توان ممکن از ژنراتور قابل تولید نیست. برای توربین های سرعت متغیر ساختارهای متنوعی ارائه شده است که همه این ساختارها مجهز به مبدل الکترونیک قدرت هستند. ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده به علت اینکه نیاز به مبدل با توان نامی کمتر را دارد بیشتر مورد توجه قرار گرفته است، بطوریکه در دیگر ساختارها، همه توان تولیدی ژنراتور از مبدل الکترونیک قدرت عبور می کند اما در ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده، مبدل تقریباً ۳۰ درصد توان نامی ژنراتور را تحمل می کند.

در فصل اول این پایان نامه به اهمیت انرژی باد و انواع ساختار های پیشنهاد شده برای توربین بادی پرداخته می شود و همچنین مروری بر مطالعات انجام شده در رابطه با ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده انجام می گیرد. در ادامه انواع مبدل های الکترونیک قدرت به کار رفته در ساختار ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده معرفی می شوند و مزایا و معایب هر یک از مبدل ها بررسی می شود.

در فصل دوم این پایان نامه مبدل AC/AC نه سویچه جدید به عنوان جایگزین مناسبی برای مبدل های مرسوم پیشنهاد می شود و نحوه عملکرد و الگوریتم کلید زنی مبدل پیشنهادی بررسی شده است. مبدل پیشنهادی نسبت به مبدل های مرسوم، از تعداد سویچ کمتری استفاده می کند و نسبت به کموتاسیون حساس نبوده بطوریکه با روش کلیدزنی PWM قابل کلید زنی است. در ادامه فصل دوم مدلسازی و مدارهای کنترلی ژنراتور القایی با مبدل پیشنهادی بررسی شده است.

در فصل سوم نرم افزار MATLAB/SIMULINK برای شبیه سازی مبدل پیشنهادی به صورت حلقه باز و همچنین به صورت حلقه بسته در ساختار ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده استفاده می شود و در سه بخش تنظیم شده است که در بخش اول نتایج شبیه سازی های انجام گرفته برای مبدل پیشنهادی به صورت حلقه باز نشان داده شده است. در بخش دوم نیز نتایج شبیه سازی های انجام گرفته برای توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی با مبدل پیشنهادی با مد عملکرد سرعت ثابت در برابر تغییرات سرعت باد نشان داده شده است. در بخش آخر توربین بادی با ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده با مبدل پیشنهادی برای عملکرد در مد سرعت متغیر برای استحصال حداکثر توان در برابر تغییرات سرعت باد شبیه سازی شده و نتایج مربوطه با مد عملکرد سرعت ثابت مقایسه می شود.

مقدمه

در این فصل به اهمیت انرژی باد و انواع ساختار های پیشنهاد شده برای توربین بادی پرداخته می شود و همچنین مروری بر عناوین مربوط به مطالعات انجام شده در رابطه با ژنراتورهای القایی از دو سو تغذیه شده انجام می گیرد. در ادامه منابع مربوط به انواع مبدل های الکترونیک قدرت به کار رفته در ساختار ژنراتور القایی از دو سو تغذیه شده بررسی می شود و مزایا و معایب هر یک از مبدل ها بیان می شود.

۱-۱: انرژی های تجدید پذیر

امروزه سهم انرژی الکتریکی در زندگی روزمره انسان ها رو به افزایش بوده، به طوری که تقاضا برای مصرف انرژی الکتریکی در واحدهای مسکونی، تجاری، کشاورزی، صنعتی و ... با رشد قابل توجهی همراه است. از طرف دیگر توجه به منابع متعارف تامین انرژی الکتریکی مانند سوخت های فسیلی^۱ به علت تاثیرات نامطلوب زیست محیطی با محدودیت مواجه شده است. همچنین خطر پایان پذیر بودن سوخت های فسیلی به علت تجدید ناپذیر بودن موجب افزایش قیمت این نوع سوخت ها می شود [۱]، [۲].

^۱ . Fossil Fuel

امروزه منابع انرژی تجدید پذیر^۱ به علت پاکی و رایگان بودن جهت افزایش تولید برق بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند، از برنامه ریزی کشورهای مختلف برای بهره مندی از منابع تجدیدپذیر می توان به عنوان نمونه موارد زیر را ذکر کرد:

- (۱) اتحادیه اروپا برای تولید ۲۰٪ انرژی الکتریکی از منابع تجدید پذیر تا سال ۲۰۲۰
- (۲) انگلستان برای تولید ۱۵٪ انرژی الکتریکی از منابع تجدید پذیر تا سال ۲۰۱۵
- (۳) کره جنوبی برای تولید ۵٪ برق از انرژی های تجدید پذیر تا سال ۲۰۱۱ [۱]، [۳]، [۴].

از انرژی های تجدید پذیر می توان انرژی های بادی^۲، خورشیدی، هیدرولیکی، زمین گرمایی، بیوماس و ... را نام برد. انرژی بادی به علت پاک بودن، رایگان و پیوسته بودن بیشتر مورد توجه است. از طرف دیگر انرژی بادی نسبت به سایر انرژی های نو مانند زمین گرمایی به آسانی قابل دسترس است. همچنین نسبت به انرژی خورشیدی پیوسته تر است [۵].

۲-۱: تاریخچه انرژی بادی

بشر از دیر باز به اهمیت انرژی بادی آگاه بوده به طوری که هزاران سال قبل از انرژی باد برای راه اندازی آسیاب ها و کشتی ها استفاده می شده است و این امر تا زمان اختراع موتور بخار توسط آقای وات^۳ برای کشتی ها ادامه یافت. قدیمی ترین روش استفاده از انرژی باد به ایران باستان باز می گردد که با استفاده از نیروی باد چرخ چاه را به راه می انداختند و آب را از چاه برای آبیاری مزارع استخراج می کردند [۶].

^۱ . Renewable Sources

^۲ . Wind Energy

^۳ .Watt

در اواخر قرن ۱۹ اولین بار توربین بادی برای تولید برق مورد استفاده قرار گرفت. با توجه به افزایش قیمت نفت از سال ۱۹۷۲ توجه به انرژی های تجدید پذیر روز افزون شد که سهم انرژی بادی در این میان بیشتر از بقیه انرژی های تجدید پذیر بود.

استفاده از تکنولوژی های جدید در ساخت توربین های بادی و همچنین تولید انبوه از سال ۱۹۸۰ منجر به کاهش قیمت تولید برق از انرژی باد شد. امروزه توربین های بادی با ظرفیت ، بازدهی و اطمینان پذیری بالا در حال تولید هستند. به طوریکه امروزه توربین های بادی با ظرفیت های بالای ۵ و ۴ مگا وات تجاری شده اند. قیمت انرژی باد به حدی کاهش یافته است که برق بادی با بقیه منابع انرژی رقابت پذیر شده است [۷].

در سال ۱۹۹۴ کل ظرفیت نصب شده توربین بادی در سراسر جهان حدود ۳۵۰۰ مگا وات بود. در سال ۲۰۰۷ رکورد جدیدی در نصب توربین بادی ثبت شد و مطابق گزارش GWEC^۱ حدود ۲۰ گیگا وات ظرفیت جدید احداث شد، که نسبت به ظرفیت جدید نصب شده در سال ۲۰۰۶ حدود ۳۰ درصد رشد را نشان می دهد. این در حالی است که سال ۲۰۰۷ ظرفیت کل تولید برق از انرژی باد نسبت به قبل ۲۷٪ افزایش یافت. در سال ۲۰۰۷ ظرفیت برق تولیدی از باد به ۹۴ گیگا وات رسید. رشد سالیانه تولید برق از انرژی بادی در پنج سال گذشته به طور متوسط ۲۰ درصد بوده است و پیش بینی می شود تا سال ۲۰۲۰ حدود ۱۲ درصد برق جهان از انرژی بادی تامین شود [۶]، [۸]، [۹].

۳-۱: ساختار کلی توربین بادی

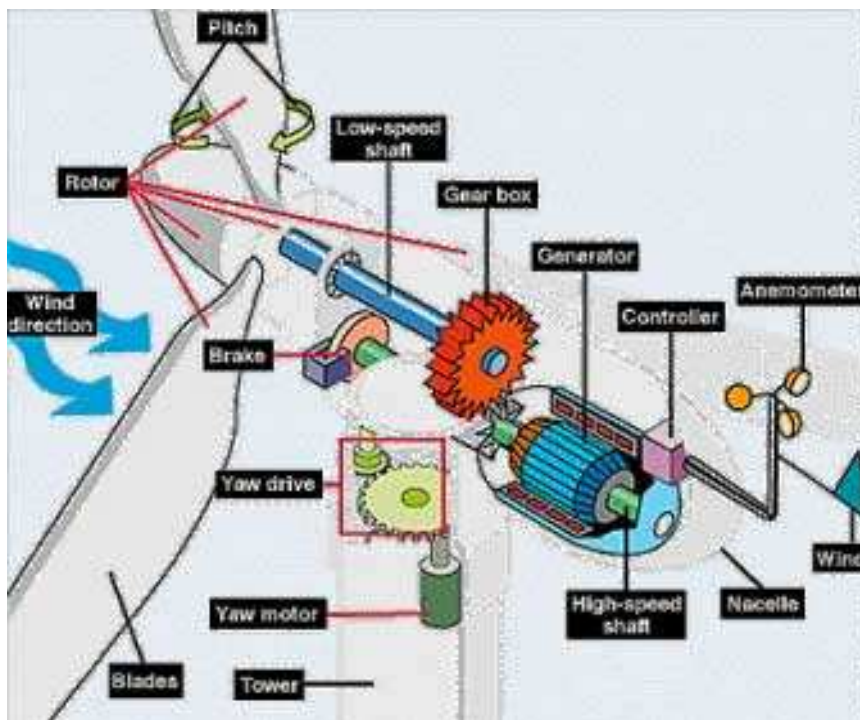
اجزای عمده توربین بادی در شکل (۱-۱) نشان داده شده است. در حالت کلی توربین بادی از اجزای مهم زیر تشکیل شده است:

^۱. Global Wind Energy Council

(۱) باد سنج^۱ : این وسیله سرعت باد را اندازه گرفته و اطلاعات حاصله را به مدارات کنترلی انتقال می دهد.

(۲) پره ها^۲ : بیشتر توربین ها دارای ۲ یا ۳ پره هستند. قطر پره ها ارتباط مستقیم با توان توربین دارد. در توربین های ۵ مگاوات، قطر پره ها ۱۱۵ متر است.

(۳) ترمز^۳ : برای توقف روتور در مواقع اضطرار استفاده می شود.



شکل (۱-۲) اجزای توربین بادی

(۴) گیربکس^۴ : در ادامه اهمیت این جز توربین بادی بیشتر توضیح داده خواهد شد. گیر بکس در بیشتر انواع توربین های بادی وجود دارد و وظیفه آن افزایش سرعت پره ها و اعمال آن به شفت

¹ . Anemometer

² . Blades

³ . Brake

⁴ . Gear Box

روتور است. این افزایش سرعت منجر می شود که فرکانس الکتریکی تولیدی ژنراتور نزدیک به مقدار نامی باشد. به یک طرف گیربکس شفت با سرعت بالا و به طرف دیگر آن شفت با سرعت پایین متصل است. شفت با سرعت بالا به ژنراتور و شفت سرعت پایین به پره ها متصل است.

۵) ژنراتور الکتریکی : وظیفه آن تولید برق است و بیشتر از ژنراتور های القایی و یا ژنراتور سنکرون آهن ربای دائم استفاده می شود.

۶) برج^۱ : برج ها معمولا از فولاد هایی که به شکل لوله در آمده اند ساخته می شوند. توربین هایی که بر روی برج های با ارتفاع بیشتر نصب می شوند انرژی بیشتری دریافت می کنند. با پیشرفت تکنولوژی ارتفاع برج ها افزایش یافته و در نتیجه توان الکتریکی توربین ها افزایش پیدا می کند. اولین نسل توربین های بادی با ارتفاع برج ۳۰ متر و توان ۳۰ کیلو وات ساخته می شدند. اما امروزه با ارتفاع برج ۱۲۰ متر و توان نامی ۵ مگا وات ساخته می شوند.

۱-۴: مدل آیرودینامیکی توربین بادی

انرژی بادی توسط پره های توربین بادی به انرژی مکانیکی تبدیل شده و به شفت روتور ژنراتور اعمال می شود. برای مطالعه توربین بادی معمولا از مدل حالت دائم استفاده می شود. برای مطالعه توربین بادی فرضیات زیر در نظر گرفته می شود [۱۰]، [۱۱]:

- ۱) کشش اصطکاکی در سیستم وجود ندارد.
- ۲) تعداد پره ها بی نهایت در نظر گرفته می شود.
- ۳) کل پره ها و شفت روتور یک جسم صلب فرض می شود که نیرو در سراسر روتور یکسان است.

^۱ . Tower

با فرضیات فوق توان خروجی توربین با رابطه زیر تقریب می شود:

$$P_{mech} = \frac{1}{2} \times \rho \times A \times C_p(\lambda, \beta) \times \omega^3 \quad (1-1)$$

در رابطه (1-1)،

ρ : چگالی هوا^۱ (kg/m^3)

A : سطح جاروب شده^۲ توسط پره ها (m^2)

ω : سرعت باد (m/s)

β : زاویه پیچ توربین^۳

λ : نسبت سرعت نوک پره ها^۴ به سرعت باد، که از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\lambda = \frac{\Omega_r r_r}{\omega} \quad (2-1)$$

که Ω_r و r_r به ترتیب سرعت روتور قبل از جعبه دنده و طول پره ها است.

$C_p(\lambda, \beta)$: ضریب توان توربین است که بیانگر بازده و کارایی توربین است و تابعی از

λ و β می باشد. رابطه C_p به صورت زیر بیان می شود:

$$C_p(\lambda, \beta) = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^4 \alpha_{ij} \beta^i \lambda^j \quad (3-1)$$

α_{ij} ضرایب ثابت هستند. منحنی های $C_p(\lambda, \beta)$ بستگی به طراحی توربین دارد و توسط

سازندگان توربین ها در اختیار بهره برداران قرار داده می شود.

شکل (۲-۱) برای نمونه رابطه $C_p(\lambda, \beta)$ بر حسب λ را در β ثابت نشان می دهد و

ملاحظه می شود که در λ مشخص C_p حداکثر شده و بیشترین توان را انتقال می دهد. نتیجه گرفته

می شود که در هر سرعتی از باد، یک سرعت مشخصی برای گردش روتور وجود دارد که موجب

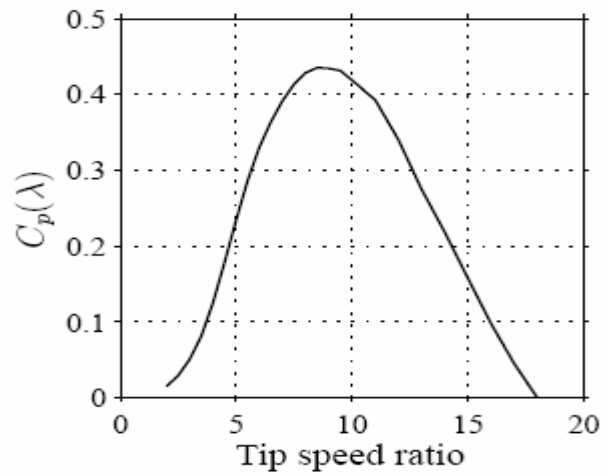
¹ . Air Density

² . Swept Area

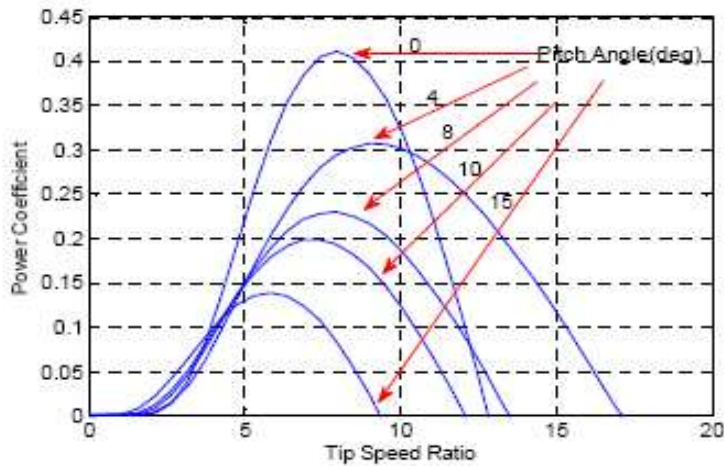
³ . Pitch Angle

⁴ . Tip Speed Ratio

هدایت حداکثر توان از سرعت باد به ژنراتور می شود. شکل (۳-۱) منحنی های C_p بر حسب λ در β های متغیر را نشان می دهد [۱۲]، [۱۳].



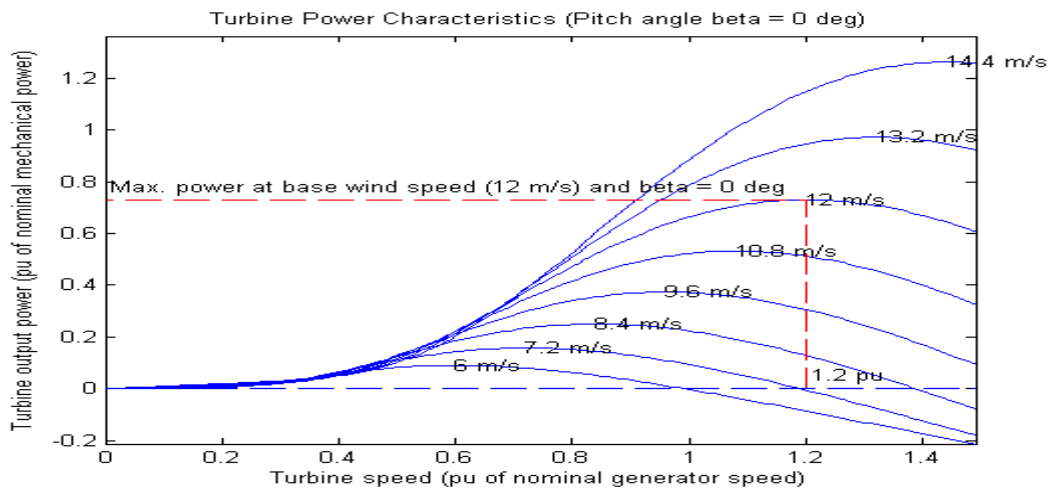
شکل (۲-۱) منحنی ضریب توان بر حسب λ به ازای β ثابت



شکل (۳-۱) منحنی ضریب توان بر حسب λ به ازای β متغیر

۵-۱: حداکثر توان انتقالی توربین بادی

توان خروجی توربین بادی زمانی حداکثر خواهد شد که C_p حداکثر باشد و این مقدار بهینه C_p در λ های متفاوت رخ می دهد. به ازای سرعت باد مشخص، مقدار بهینه ایی برای سرعت روتور وجود دارد که توان گرفته شده از توربین حداکثر می شود. بنابراین در یک سرعت ثابتی از باد، به ازای مقادیر متفاوت سرعت روتور توان های مختلفی از توربین به شفت ژنراتور اعمال می شود. از اینرو با کنترل سرعت روتور توان خروجی ژنراتور کنترل می شود. در شکل (۱-۴) برای یک توربین مشخص، این مسئله نشان داده شده است. به عنوان مثال، اگر سرعت باد ۱۲ متر بر ثانیه باشد، باید سرعت روتور به ۱٫۲ مقدار نامی اش برسد تا حداکثر توان استخراج شود. برای بدست آوردن حداکثر توان از توربین، نیاز به سیستم هایی است که توانایی کار در سرعت های متغیر روتور را داشته باشند [۱۳]، [۱۴]، [۱۵]، [۱۶].



شکل (۱-۴) منحنی توان خروجی توربین بر حسب سرعت روتور