بررسی انواع سیستم های محرک ژنراتور در توربین های بادی مولد برق

حامد حوری جعفری ـ کاوه مجلسی
کارشناس ارشد سیستم های انرژی ـ کارشناس ارشد NBA
گروه توربین باد ـ شرکت مدیریت هیربدان

واژه های کلیدی :
توربین بادی– ضریب توان توربین های بادی (C_p)– نسبت سرعت نوک پره (Tip Speed Ratio)
– محرک ژنراتور (Generator Drrive) – تولید قدرت (Power Production)

چکیده

امروزه با توجه به نیاز فزاینده صنایع مختلف به منابع انـرژی , کـاهش ذخـایر نفـت و گـاز جهانی و توجه جانی به مسائل زیست محیطی , بهره برداری از انرژی های تجدیدپذیر و پاک بویـژه باد بطور گسترده ای آغاز شده است . در این راستا ساخت و بهره برداری از نیروگاه هـای بـادی بـه منظور تولید توان الکتریکی , از پیشرفت روز افزونی برخوردار می باشد .

به منظور بهرهبرداری از حداکثر انرژی باد , کاهش هزینه تمـام شـده و همچنیـن افزایـش قابلیت اعتماد سیستم , اعمال روش های کنـترل بهینـه مولدهـای بـادی در جـهت افزایـش تولیـد سالیانه انرژی ,لازم می باشد .

در مولدهای بادی سرعت چرخش توربین تابع سرعت باد است و حال آنکه برای تولید بـرق با فرکانس ثابت ۵۰Hz باید سرعت چرخش ژنراتور با توجه بـه تعـداد زوج قطـب هـای آن در حـد ثابتی نگه داشته شو . از آنجا که سرعت چرخش توربیـن معمـولاً بسـیار پـایین تـر از سـرعت لازم برای چرخش ژنراتور است (حدود ۵۰ برابر) از سیستم های محـرک ژنراتـور بـرای تطبیـق ایـن دو سرعت استفاده می شود , همچنین در بادهای شدید با افزایش سرعت توربین اسـتفاده از ترمزهـای مکانیکی و آیرودینامیکی به همراه سیستم کنترلی محـرک ژنراتـور جـهت تنظیـم سـرعت در حـد مطلوب استفاده می گردد .

نقش محرک ژنراتور در کنترل سرعت چرخش روتور و توان خروجی ژنراتور الکتریکی , بـه بگونه ای است که ضریب توان توربین در حداکثر مقدار ممکـن نگـه داشـته شـود و تـوان خروجـی ژنراتور از مقدار نامی آن تجاوز نکند .

در این مقاله به بررسی فنی لزوم استفاده از سیستم محرک ژنراتور و انواع مورد استفاده آن در مولدهای بادی پرداخته و نکات مهم در طراحی و ساخت آنها مورد ارزیابی قرار می گیرد .

مقدمه

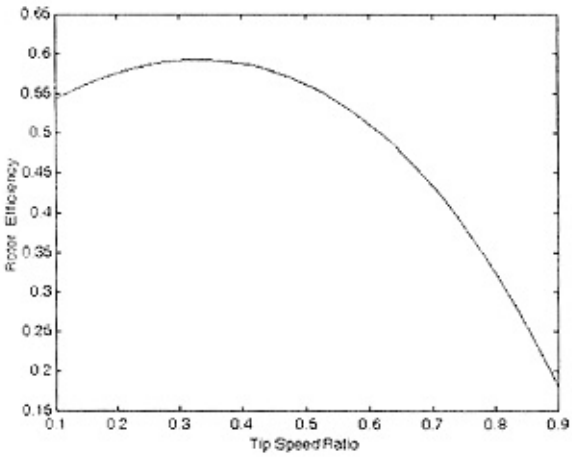
سرعت چرخش روتور توربین بادی از سرعت مورد نیاز ژنراتور الکتریکی پایی تر می باشد . از این رو بسیاری از سیستم های بادی از سیستم محرک ژنراتور استفاده می گردد . بدیت ترتیب توربین بادی می تواند سرعت ثابت یا متغییر داشته باشد . انرژی قابل دریافت از باد طبق رابطه (۱) محاسبه می گردد :

$$P = \frac{1}{2}\rho A V^3 . C_p \qquad (۱)$$

در رابطه (۱) , چگالی هوا ρ , A سطح جاروب شده توسط روتور توربین بادی , V سرعت هوا و C_p ضریب توان توربین باید می باشد . تغییرات C_p با نسبت سرعت نوک پره [1] در شکل ۱ نشان داده شده است . نسبت سرعت نوک پره برابر با سرعت خطی نوک پره توربین بادی تقسیم بر سرعت باد می باشد و با علامت TRS نمایش داده می شود . با تغییر سرعت باد مقدار TRS و ضریب توان تغییر می نماید . همانطور که در شکل ۱ مشاهده می شود ضریب توان به ازای نسبت های مختلف سرعت نوک پره تنها دارای یک نقطه ماکزیمم می باشد و بنابراین در صورت کارکرد روتور در سرعت ثابت , ضریب توان بازای سرعت مشخصی از باد ماکزیمم می گردد . حداکثر بهره‌برداری از انرژی باد زمانی روی می دهد که به ازای سرعت های مختلف باد ضریب توان توربین بادی در مقدار ماکزیمم خود ثابت نگه داشته شود . مقدار تئوری حداکثر ضریب توان برابر با ۰.۵۹۳ و در حالت واقعی بین ۰.۴ با ۰.۵ می باشد .

به منظور ثابت نگه داشتن ضریب توان در مقدار ماکزیمم می بایست سرعت روتور به ازای سرعت های مختلف باد به گونه ای مناسب تغییر داده شود .

شکل ۱ ـ ضریب توان توربین بادی بازای نسبت سرعت نوک پره

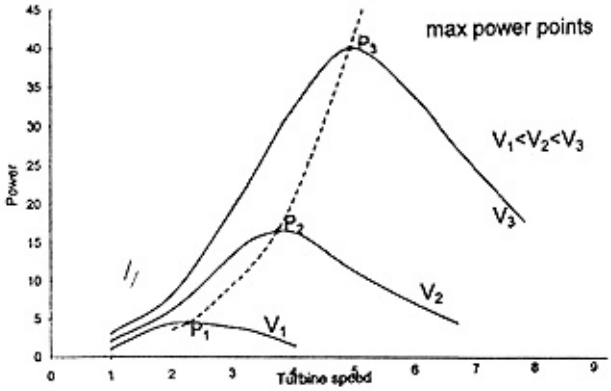


در شکل ۲ منحنی توان توربین بادی بازای سرعت های مختلف روتور (V_1 , V_2 , V_3) رسم شده است . برای دریافت بیشترین انرژی ممکن , باید توربین بادی به ازای سرعت های مختلف باد

[1]. Tip – Speed - Ratio

در نقاط ماکزیمم منحنی توان کار کند . ماکزیمم توان بـازای سـرعت هـای V_1 , V_2 , V_3 در نقاط P_1 , P_2 , P_3 رخ می دهد , در این نقاط ضریب توان ثابت و نزدیک به ۰.۵ است .

شکل ۲ ـ توان توربین بادی بازای سرعت روتور در سرعت های مختلف وزش باد



عملکرد سیستم بادی در نسبت سرعت نوک پره ثـابت (متنـاظر بـا تـوان مـاکزیمم) بـاعث چرخش شدید روتور در بادهای بسیار شدید (طوفـان) شـده و در نتیجـه نـیروی گریـز از مرکـز در بالهای روتور باعث تخریب آن می گردد . بعلاوه تولید قدرت الکتریکی توسط ژنراتور با سرعتی بیش از سرعت نامی , باعث صدمه به تجهیزات الکترونیکی آن می شود.

محدوده های کنترل سرعت (Speed Control Regions)

اعمال کنترل بر سرعت توربین بادی و توان تولید شده توسط ژنراتور در نواحی زیر صـورت می پذیرد :

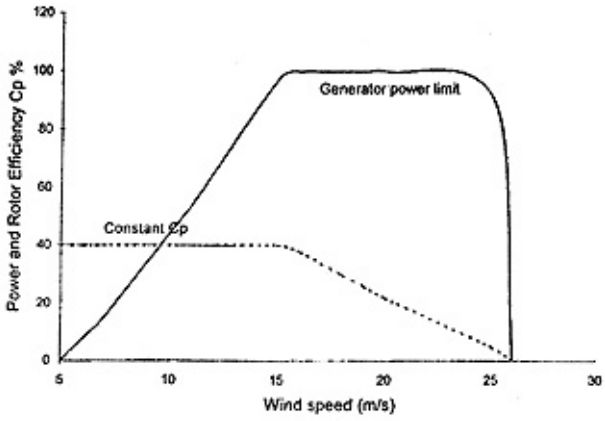
۱- ناحیه ماکزیمم ضریب توان ثابت C_p

۲- ناحیه محدودیت سرعت

۳- ناحیه محدودیت توان

نواحی مذکور در شکل ۳ نشان داده شـده اسـت . معمـولاً شـروع چرخـش توربیـن بـادی در سرعت ۴/۵ m/s می باشد و هنگامی که سرعت وزش باد بـه حـدود ۲۵ الـی ۳۰ مـتر بـر ثانیـه می رسد , توربین بادی از حرکت متوقف می گردد . در سرعت های بین ۴/۵ تـا ۳۰ مـتر بـر ثانیـه توربین بادی در یکی از سه ناحیه مذکور , کار می کند . بدین ترتیب ممکن اسا یک توربیـن بـادی بطور متوسط حدود ۷۰ تا ۸۰ درصد اوقات کار کند . در مواقعی که سرعت باد خیلی کم و یا خیلـی زیاد باشد توربین متوقف می گردد . در صورت افزایش سرعت باد , نقطه تـوان مـاکزیمم بـه طـرف راست متمایل می شود .

شکل ۳ ـ نواحی سه گانه کنترل سرعت روتور در توربین بادی



در ناحیه C_p ثابت , سیستم کنترل , سرعت روتور را به ازای افزایش سرعت باد تا جایی افزایش می دهد که از سرعت حد فزونی نیابد , (شکل ۳).

هنگامی که سرعت از میزان حدی خود فراتر رود , سیستم کنترل به ناحیه سرعت محدود منتقل می گردد همچنین اگر افزایش سرعت ادامه پیدا کند سیستم کنترل به ناحیه توان محدود ژنراتور الکتریکی هدایت می شود . در چنین مواقعی سرعت توربین کاهش می یابد و ضریب توان از نقطه ماکزیمم دور می گردد و توان خروجی ژنراتور در محدوده طراحی شده ثابت باقی خواهد ماند . هنگامی که محدوده سرعت و توان را نتوان تحت شرایط بادهای شدید (طوفان) کنترل نمود , سیستم متوقف می گردد . دو روش شناخته شده در کنترل سرعت توربین و توان خروجی ژنراتور به شرح زیر می باشند :

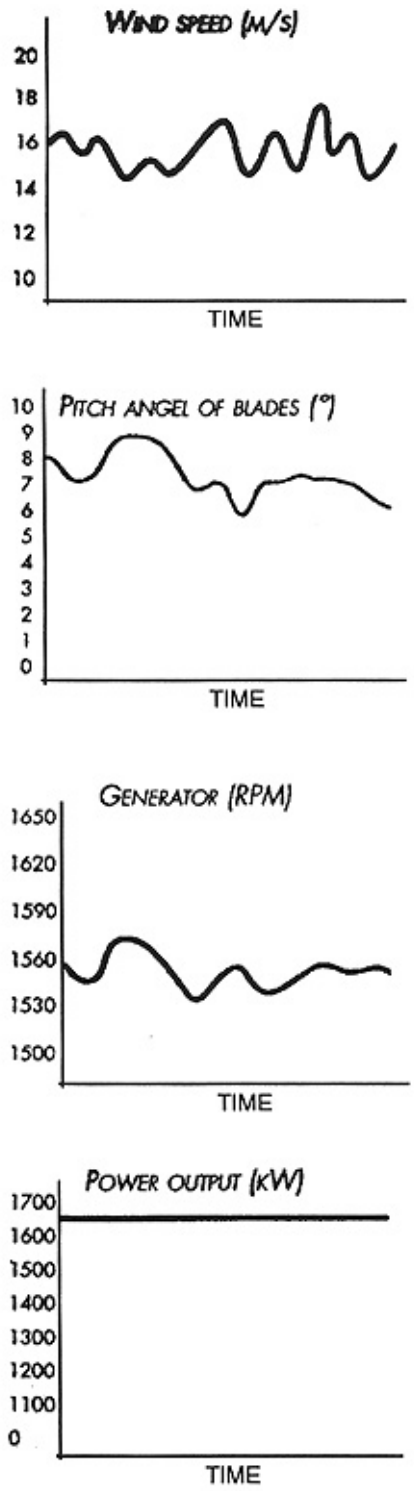
۱- کنترل **گام** (Pitch Control) : سرعت توربین توسط اعمال کنترل مکانیکی و یا هیدرولیکی زاویه گام بال , کنترل می گردد . به همراه تغییر سرعت باد , کنترل زاویه گام بال اعمال گشته و باعث می گردد ضریب توان حول مقدار ماکزیمم خود نوسان کند . اعمال کنترل گام به دلیل اینرسی بالای موتور مقدار طول می کشد .

شکل ۴ تغییرات زاویه گام بال ها , سرعت ژنراتور و توان خروجی را به همراه تغییر سرعت باد , بر حسب زمان نمایش می دهد . منحنی مذکور نمایش اندازه گیری های بعمل آمده در یک توربین های بادی 1.56MW شرکت VESTAS می باشد و همانطور که مشاهده می شود توان خروجی ژنراتور حتی به ازای ۱۰ درصد تغییر در سرعت ژنراتور , ثابت نگه داشته شده است . این امر باعث حداقل شدن نوسانات نامطلوب سیستم می گردد .

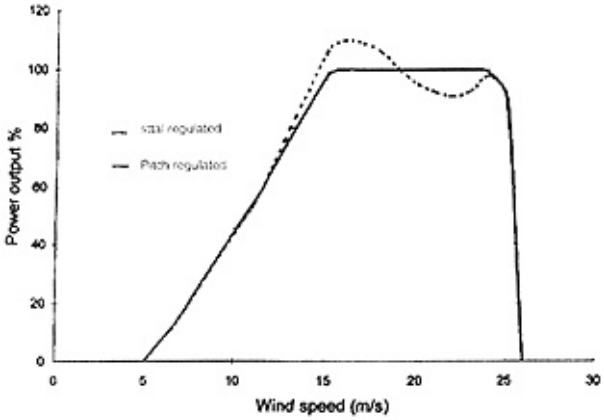
۲- کنترل واماندگی (Staall Control) : برای انطباق توربین بادی با وزش بادهای شدید از واماندگی آیرودینامیکی استفاده می گردد . همانطور که در شکل ۵ ملاحظه می شود هنگامی که توان تولیدی از مقدار نامی آن زیادتر گردد , توان خروجی تا زمانی که سرعت قطع اتفاق بیافتد , کاهش می یابد . در سرعت هایی بیشتر از سرعت قطع , توربین وا می ماند و تولید

قدرت به صفر می رسد . در دو روش مذکور (کنترل زاویه گام بال و کنترل واماندگی) توان خروجی ماشین بادی یکنواخت نمی باشد .

شکل ۴ـ سرعت باد , زاویه گام , سرعت ژنراتور و توان خروجی در سرعت های متناوب باد در توربین بادی 1650kw وستاس



شکل ۵ ـ توان خروجی ژنراتور به ازای تغییرات سرعت باد در توربین های با کنترل گام و کنترل واماندگی



انواع محرک های ژنراتور (Generateor Drives)

انتخاب سرعت عملکرد ژنراتور و کنترل آن متناسب با تغییر سرعت باد باید در طراحی سیستم محاسبه گردد . این مسئله در محاسبه اجزای اصلی و انتخاب آنها حائز اهمیت می باشد . انواع محرک های کنترل سرعت توربین بادی و ژنراتور الکتریکی به صورت زیر تقسیم بندی می گردند :

محرک تک سرعته (One Fixed – Speed Drive)

عملکرد سرعت ثابت ژنراتور طبیعتاً با استفاده از ژنراتور القایی تک سرعته صورت می‌پذیرد . عموماً سرعت تربین کم می باشد و ژنراتورهای الکتریکی در سرعت های بالا عملکرد بهتری دارند . تطبیق سرعت بین توربین و ژنراتور توسط گیربکس صورت می پذیرد . تغییر سرعت باد باعث کاهش و یا افزایش میدان الکترومغناطیسی و متعاقباً کاهش و یا افزایش لغزش (Slip) روتور در مقابل استاتور می گردد . ژنراتور توربین بادی معمولاً در لغزش ۱ تا ۲ درصد کار می کند . سرعت بالاتر باعث چرخش سریعتر گیربکس شده اما تلفات الکتریکی را بیشتر می نماید و باعث می گردد که خنک کاری بیشتر را لازم می گرداند .

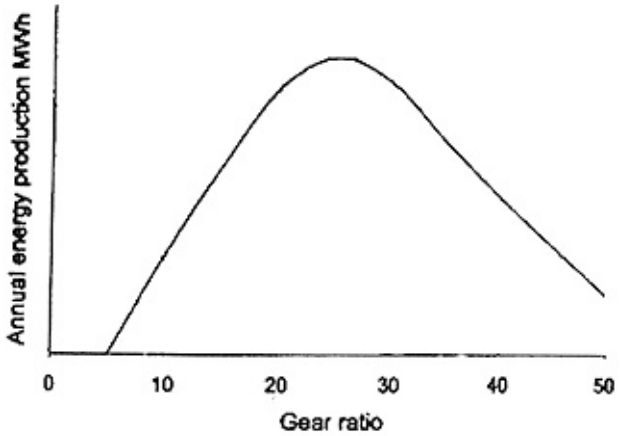
انرژی سالانه توربین های سرعت ثابت را باید با بررسی توزیع سرعت باد منطقه مورد نظر بدست آورد . تا زمانی که سرعت ثابت نگه داشته می شود , افزایش سرعت توربین نسبت به سرعت نامی مشکلی است که باید در طراحی مورد توجه قرار داد . در این حالت ژنراتور توسط ترمز متوقف می گردد و تولید توان الکتریکی به صفر می رسد .

نکته مهم در ارتباط با تربین های سرعت ثابت این است که از این توربین ها معمولا در نقطه ای غیر از نقطه بالاترین ضریب توان عمل می نماید .

در کارکرد سرعت ژنراتور , تولید انرژی سالانه بستگی به سرعت باد و نسبت گیربکس دارد. به دلیل تغییرات بار ژنراتور به واسطه تغییر مصرف که در این حالت با داشتن نسبت گیربکس های

مختلف نسبت سرعت نوک پره در سرعت باد ثابت , متغیر خواهد بود . شکل ۶ انرژی سالیانه را در مقابل نسبت گیربکس نشان می دهد . همانطور که مشاهده می گردد تولید انرژی سالیانه وابستگی شدیدی به نسبت گیربکس دارد.

شکل ۶ ـ انرژی سالیانه تولید شده بازای نسبت گیربکس در سرعت ثابت 8m/s

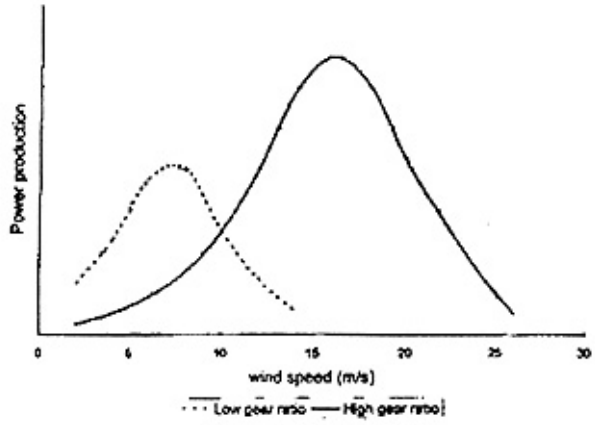


به ازای یک توزیع سرعت مشخص , تولید انرژی در نسبت گیربکس ۲۰ دارای بیشترین مقدار می باشد . هنگامی که نسبت گیربکس انتخاب می گردد , توجه به مقدار متوسط سرعت سالانه در منطقه بسیار مهم می باشد . نسبت گیربکس بهینه برای یک توربین بادی از منطقه ای به منطقه دیگر تغییر می کند . به دلیل انرژی سالانه کم , استفاده از محرک های سرعت ثابت به ماشین های بادی کوچک محدود می گردند .

محرک دو سرعته (Two Fixed- Speeds Drives):

محرک های دو سرعته انرژی قابل حصول را افزایش , تلفات الکتریکی روتور و صدای گیربکس را کاهش می دهد . سرعت با تغییر نسبت گیربکس تغییر خواهد نمود. دو سرعت مورد نظر به گونه ای انتخاب می گردند که انرژی سالانه تولیدی با توجه به توزیع سرعت باد جایگاه , حداکثر گردد . توان سالانه تولید شده با نسبت گیربکس و سرعت باد تغییر می کند , (شکل ۷).

شکل ۷ ـ توزیع احتمالی توان تولید شده بازای سرعت باد در دو نسبت گیربکس کم و زیاد

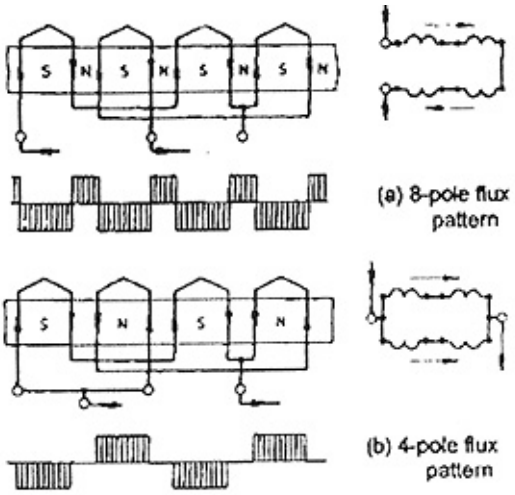


در شکل ۷ سرعت های متناظر به نقـاط مـاکزیمم تـوان (V_1,V_2) , در دو طـرف سـرعت متناظر با انرژی متوسط سالانه می باشند . به عنوان مثال در این شکل فرض شده است که سیسـتم از نسبت گیربکس کوچکتر برای سرعت باد کمـتر از ۱۰m/s و از نسـبت گـیربکس بـزرگـتر بـرای سرعتهای بیش از ۱۰m/s اسـتفاده کنـد کـه در ایـن صـورت نسـبت گـیربکس در ۱۰m/s تغیـیر می کند .

در بعضی موارد به منظور دستیابی به دو سرعت مختلف از دو ژنراتور کاملاً مجزا همـراه بـا سوئیچی در بین آنها استفاده شده است . روش اقتصادی تر آن است که ژنراتور به گونه ای طراحـی گردد که بتواند در دو سرعت مختلف کار کند. برای این منظور می توان از یک روتور قفسه ای با دو سیم پیچی مجزا و تعداد قطب های مختلف استفاده نمود. همچنین می توان از یـک ژنراتـور قطـب متغیر استفاده نمود. این نوع ژنراتور دارای یک سیم پیچی هستند که با تغیـیر نقطـه اتصـال تعـداد قطب های مختلف بدست می آید . در روش تغییر قطب با یک سـیم پیچـی , اسـتاتور دارای سـیم پیچی ای می باشد که می تواند در p یا $2p$ قطب کار کند. از اتصال سیم پیچی استاتور قطب هـای کمتر در سرعت کم توربین و از اتصال با تعداد قطب های بیشتر را در سرعت زیاد توربیـن اسـتفاده می شود و این امر نسبت نوک پره را در نزدیک نقطه ماکزیمم C_p نگـه داشـته تـا قـدرت تولیـدی حداکثر گردد. در سیستم هایی که از روش تغییر قطبهای ژنراتور برای کنترل سرعت روتور استفاده می کنند , به دلیل نسبت ۲:۱ قطب های اتصالات , نسبت سرعت ۲:۱ می باشد .

در شکل ۸ یک مرحله تغییر قطب سیم پیچی استاتور را نشان مـی دهـد . در اتصـالی کـه قطب های بیشتر را نتیجه می دهد , سیم پیچی ها به صورت سـری و در اتصـالی کـه قطـب هـای کمتر را نتیجه می هد , سیم پیچی ها به سورت سـری و مـوازی طراحـی شـده انـد و درنـهایت دو اتصال ۴ و ۸ قطبی شکل می گیرد .

شکل ۸ ـ تغییر قطب سیم پیچی استاتور در نسبت سرعت ۲:۱



نکته مهم در طراحی این گونه سیم پیچی ها محدود کردن هارمونیک های فضائی است که باعث کاهش راندمان ژنراتور می گردد.

گام سیم پیچی استاتور ثابت می باشد , اما فاصله الکتریکی آن به تعداد قطب ها بستگی دارد . یک گام سیم پیچی یک هشتم محیط , سیم پیچی ای با گام کامل را برای اتصال هشت قطبی فراهم می کند . به همین ترتیب گام دو سوم برای اتصال شش قطبی و گام یک دوم برای اتصال چهار قطبی .

محرک های سرعت متغیر به وسیله گیربکس

به منظور داشتن سیستم های سرعت متغییر از گیربکس هایی با نسبت های مختلف نیز استفاده می گردد . این سیستم ها بدلیل مشکلات فراوان , کمتر مورد استفاده قرار می گیرند .

سیستم های الکترونیک قدرت (Power Electronics)

در محرک های مدرن تغییر سرعت از سیستم های الکترونیک قدرت برای تبدیل ولتاژ و فرکانس خروجی ژنراتور به یک خروجی با ولتاژ و فرکانس ثابت استفاده می شود . این تکنولوژی شبیه آن چیزی است که در سیستم های قدرت هواپیما بکار می رود . تمایل به استفاده از این سیستم ه با کاهش قیمت نیمه هادی ها , افزایش یافته است . همچنین می توان از یکسو کننده و مبدل های سیلسکونی قابل کنترل مرسوم و جدید استفاده کرد ولی طراحی های جدید صورت گرفته در صنعت باد نشان می هد که تمایل به استفاده از ترستورهای Pulse- Width- Modulate بیشتر می باشد .

از نظر تئوری , دست یابی به سرعت های مختلف روتور توربین بادی با استفاده از سیستم‌های الکترونیک قدرت محدود نمی باشد اما در عمل نسبت سرعت به ۳:۱ محدود می گردد, که وسیعتر از محدوده سرعت در روشهای تغییر قطب و ماشین Scherbius (توضیح داده خواهد شد), می باشد .

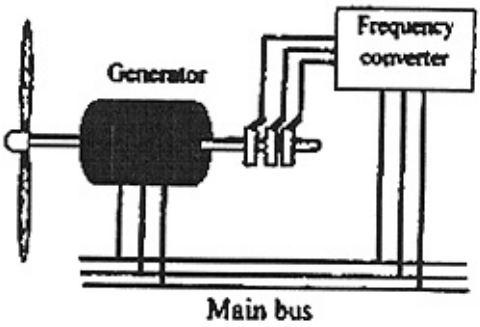
استفاده از سیستم الکترونیک قدرت سرعت متغیر باعث ایجاد هامورنیک های با فرکانس بالا (نویزهای الکتریکی) می شود , که کیفیت قدرت تولیدی را تنزل می بخشد . بنابراین برای دستیابی به کیفیت مورد نیاز به شبکه نیاز به درجه بالاتری از فیلتر می باشد . علاوه بر تولید انرژی سالانه بالا در سیستم های الکترونیک قدرت سرعت متغیر کیفیت برق قابل کنترل و تنظیم از راه دور می باشد . این امر دارای دو مزیت مهم است که در سیتم های دیگر قابل دسترس نیست :

× امکان کنترل از راه دور
× قابلیت تنظیم برای اتصال به شبکه های با کیفیت بالا

محرک سرعت متغیر Scherbius

در مقایسه با سیستم های الکترونیک قدرت سرعت متغیر , ماشین Scherbius هزینه پایین تری داشته و باعث کاهش زیان وارده به کیفیت قدرت تولیدی می گردد . این سیستم در بالا بر چاهها , کارخانه و معادن استفاده می گردد . دراین محرک ها از ژنراتورهای القائی استفاده می شود . سرعت ماشین القایی می

تواند با تغییر مقاومت روتور و با القای یک ولتاژ خارجی با فرکانسی مطابق با لغزش روتور , تغییر کند . بـه دلیل اینکه روتور قفسه سنجابی اجازه هیچ القایی را از خارج نمی دهد از روتور سیم پیچی شد با حلقـه هـای لغزشی استفاده می گردد (شکل ۹).



شکل ۹ ـ محرک سرعت تغییر Scherbius

مدار روتور بوسیله حلقه های لغزشی به یک منبع فرکانس متغیر و استاتور به شبکه متصل است به همین دلیل ماشین Scherbius به ماشین القایی دو تغذیه ای (Doyble- Fed) معروف است . این سیستم هم از طریق استاتور و هم از طریق روتور تغذیه می گردد . سرعت با تنظیم فرکانس منبع خارجی جریان روتور , کنترل می شود . محدوده سرعت کنترل شده در ماشین های Scherbius معولاً به ۲:۱ محدود می شود . بعضی از سازندگان سیستم هایی را طراحی کرده و ساخته اند که در توربین های بادی با توان چند صد کیلو متر وات مورد استفاده قرار می گیرند . در این نوع ماشین ها احتیاج به منبع فرکانس متغیر هزینه ها را افزایش می دهد . برای سیتم های بزرگ , هزینه افزوده شده کمتر از منافع انرژی تولیدی افزوده شده با استفاده از سیستم سرعت متغیر می باشد .

محرک سرعت متغیر مستقیم

محرک های مستقیم , به گیربکس و سیستم الکترونیک قدرت نیازی ندارند و این امر دارای چند فادیه می باشد :

* وزن کمتر دماغه توربین بادی
* کاهش نویز و ارتعاش
* چندین درصد کاهش در اتلاف انرژی
* عدم احتیاج به سرویس متناوب در توربین بادی
* کاربرد در نواحی دور از دسترس

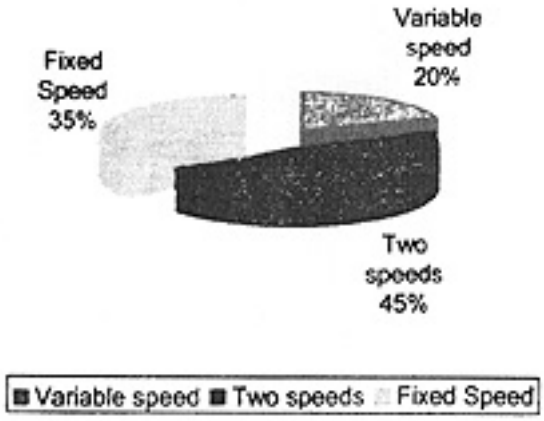
در روتورهای بزرگ به دلیل کم بودن سرعت احتیاج به تغییر طراحی ژنراتور الکتریکی و افزایش قطب های آن می باشد . این ماشینها باید دارای گام قطب کمتری باشند که نتیجه آن طراحی مغناطیسی ضعیف می باشد . به منظور رفع محدودیت های مذکور , استفاده از مغناطیس

دائم و ژنراتورهای سنکرون روتور سیم پیچی شده , مورد توجه قــرار گرفتــه اســت . راه حــل دیگــر استفاده از ماشین القایی با شکاف محوری (Axial Gap Induction Machine) مــی باشــد . بــرای محرک های بدون گیربکس کوچک استفاده از ژنراتورهای با مغناطیس دائ و شار محوری اســتفاده می گردد .

انتخاب سیستم محرک (Drive Selection)

سیستم های سرعت متغیر حدود ۱/۳ برابر بیشتر از سیستم های سرعت ثابت در طول سال انــرژی الکتریکی تولید می کنند . معمولاً ببود در انرژی قابل حصول توسط سیستم های سرعت متغیر را حدود ۲۰ الی ۳۵ درصد معرفی کرده اند اما بطور تجربی می توان حدود ۱۵ تا ۲۰ درصد در انرژی سالانه حاصل شــده ببود ایجاد نمود (در مناطق کم باد). این امر باعث رویکرد قابل توجهی به انرژی باد در بسیاری از کشــورهای جهان شده است .

بسیاری از سیستم های کنونی نصب شده دارای سیستم سرعت متغیر می باشند . تــا ســال ۱۹۹۷ در دنیا حدود ۳۵ درصد توربین های طراحی شده سرعت ثابت , ۴۵ درصد دو ســرعته و ۲۰ درصد سرعت متغیر می باشند , (شکل ۱۰). روند استفاده از سیستم های سرعت متغیر به طــرز روز افزونی در حال افزایش می باشد .



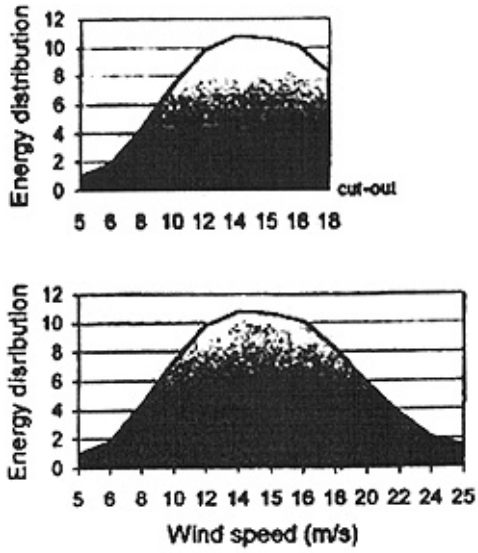
شکل ۱۰ ـ انتخاب سرعت درایو ژنراتور

انتخاب سرعت قطع (Cut- Out Speed Selection)

این مسئله که توربین بادی در سرعت و توان پایین تر از حد فوقانی کار می کند بسیار مهم می باشد . رسیدن سرعت توربین به بیش از مقدار طراحی شده می توانــد بــاعث آســیب دیــده‌گــی ماشین بادی گردد . بنابراین در طراحی سیستم سرعت متغیر انتخــاب حــد بــالایی ســرعت توربیــن بادی دارای اهمیت فراوان می باشد .

در توزیع انرژی نمایش داده شده در شکل ۱۱ , اگر توربین بادی برای عملکــرد در ســرعت ثابت V_1 طراحی شده باشد , در طول سال انرژی E_1 را دریافت می دارد , اگر طراحی بــه گونــه ای

باشد که سرعت V_2 تغییر کند , در دوره یکسانی می توانـد انـرژی E_2 را دریـافت نمـاید . افزایـش هزینه ها به دلیل طراحی توربین بادی و ژنراتور به صورت سرعت متغیر می باشد . برای یافتن نقطه بهینه حد بالایی سرعت باید هزینه ها و فواید حاصله به تعادل برسند . انرژی اضافی که بـا اسـتفاده از سیستم سرعت متغیر در طول سال بدست می آید , (E_2-E_1) می باشد .



شکل ۱۱ ـ توزیع احتمالی تولید انرژی سالانه در سرعت های مختلف قطع

اگر درآمد حاصل از الکتریسیته تولیدی بر حسب $/kwh و برابر p باشد , ارزش افزوده در سال برابر $p.(E_2-E_1)$ دلار خواهد بود . ارزش کنونی این در آمد (p) سالانه در طول عمـر توربیـن بادی(n سال) و با در نظر گرفتن سود سرمایه i به صورت زیر می باشد :

$$P = p.(E_۲ - E_۱)[\frac{(۱+i)^n - ۱}{i(۱+i)^n}] \qquad (۲)$$

در نهایت اگر افزایش هزینه سالانه توربین بادی به دلیل استفاده از سیستم سرعت متغسـر برابر به C باشد , آنگاه سیستم سرعت متغیر در صورتی سود آور خواهد بود که C<P باشد .

نتیجه گیری

اعمال کنترل بر سرعت چرخش روتور توربین بـادی امـری لازم در جـهت افزایـش ضریـب توان توربین بادی می باشد و همچنین ژنراتور الکتریکی را از آسیب دیدگی در مقابل چرخش سـرع روتور توربین بادی در بادهای شدید محفوظ می دارد . امروزه به دلیل خصوصیات ویژه محرک های مستقیم تمایل به سمت استفاده از این محـرک هـا سـوق پیـدا کـرده و اسـتفاده از آنـها بـه طـرز چشمگیری رو به افزایش است .

در توربین های بادی مولد برق , محرک های ژنراتور از نوع سرعت متغیر به دلیـل توانـایی کارکردن در نزدیکی نقطه ماکزیمم ضریب توان در محدود های مختلف سرعت باد , تـوان بیشـتری

(حدود ۳۰٪) نسبت به توربین های بادی با محرک های سرعت ثابت , تولید مـی کننـد . همچنیـن امکان کنترل از راه دور و قابلیت تنظیم برای اتصال به شبکه های مدرن برای این سیستم ها وجـود دارد .

منابع

1. Chalmers, B. J. & Spooner, E. 1998. " Axial flux permanent magnet generator for gearless wind energy system " IEEE paper No. PE- P13-EC- 02, July 1998.
2. Zinger, D. S. & Muljadi, E. 1997. " Annualized wind energy improvement using variable – speed " IEEE Transactions on Industry Application, Vol. 33- 6, p. 144447, 1997.
3. Gerdner, p. 1997. " Wind turbine generator and drive system " winds Directions, Magazine of the European Wind Energy Assocition, London, and October. 1997.