

2-6 انواع توربین بادی

توربین های بادی اولیه برای آسیاب گندم و تبدیل آن به آرد مورد استفاده قرار می گرفتند به همین خاطر نام آن را آسیاب بادی نهادند. اگر بخواهیم دقیق صحبت کنیم، یک دستگاه را که آب پمپاژ میکند یا الکتریسیته تولید میکند آسیاب بادی، ژنراتور توربین - بادی⁶⁹ (WTG) و سیستم تبدیل انرژی بادی⁷⁰ (WECS) نامیدند.

برای اهداف ما اصطلاح توربین بادی کفایت خواهد کرد اگرچه ما میخواهیم در رابطه با اجزای سیستم صحبت کنیم (مانند برج، ژنراتور و غیره) که این قسمت ها به وضوح جز یک توربین نمیباشد.

یک راه برای طبقه بندی کردن توربین های بادی نوع محوری است که تیغه های پره توربین به دور آن میگردند اکثر آنها توربین های بادی با محور افقی میباشند⁷¹ (HAWT) اما بعضی از آنها همراه با تیغه ها می باشند که دور محور عمودی⁷² (VAWT) میچرخند مثال هایی از این دو نمونه در شکل (4-6) نشان داده شده است.

تنها دستگاه با محور عمودی که به موفقیت تجاری دست یافت روتور داریوس بود، که نامش را از مهندس فرانسوی جی ام داریوس گرفته است، که در دهه 1920 این توربین ها را اختراع کرد. شکل تیغه ها مانند حالتی است که شما یک طناب را از دو طرف میگیرد و به صورت عمودی میچرخانید و تقریباً شبیه یک دستگاه تخم مرغ همزن غول پیکری می ماند. پیشرفت قابل توجهی در این نوع توربین ها در دهه 1980 توسط یک دستگاه آزمایشگاه ملی ساندا در آمریکا صورت گرفت که شامل یک دستگاه 500 کیلو واتی با قطر 34 متر میشد. یک شرکت آمریکایی به نام فلوویند تعدادی از توربین های بادی را قبل از این که این کار را در سال 1997 برای همیشه ترک کند تولید و نصب کرد.

مزیت عمده دستگاه های محور عمودی، مانند روتور داریوس، این بود که آنها هیچگونه نیازی به کنترل عمودی که آنها را در معرض باد قرار بدهد نداشتند. مزیت دوم آن این بود که ماشین آلات سنگین موجود در گهواره (بدنه اطراف ژنراتور گیربکس و تجهیزات مکانیکی دیگر) را میتوان بر روی زمین قرار داد که در این صورت دادن سرویس به آن ساده تر می باشد لذا از آنجایی که تجهیزات سنگین بالای برج قرار گرفته نشده است نیازی نیست که برج مورد استفاده در HAWT قوی و محکم باشد. هنگامی که سیم مهار مورد استفاده قرار میگیرد برج را میتوان سبک تر هم

⁶⁹ Wind turbine generator

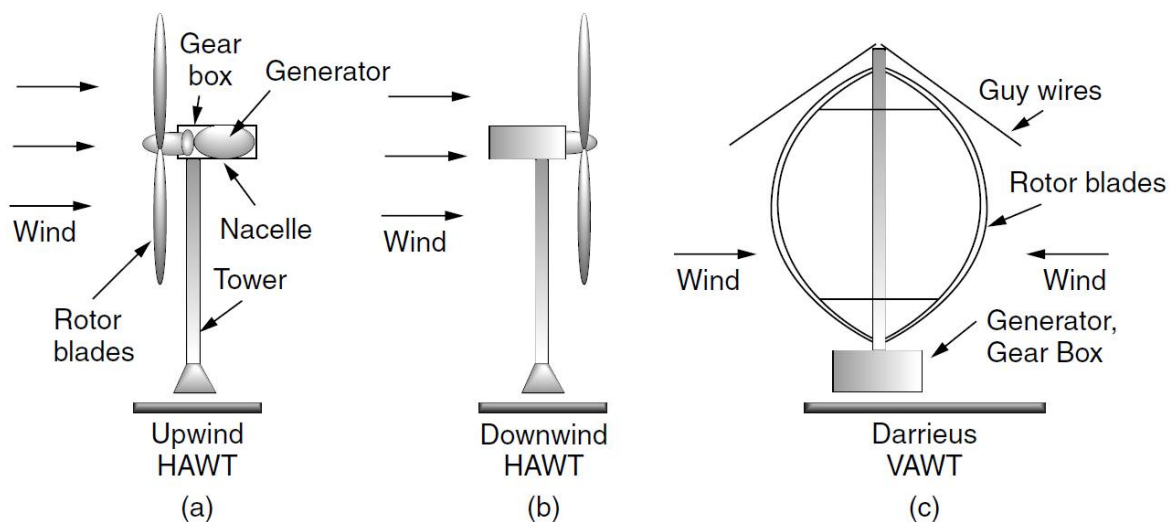
⁷⁰ Wind energy conversion system

⁷¹ Horizontal axis wind turbines

⁷² Vertical axis wind turbines

ساخت که این عمل سبک کردن برای برج هایی که بر روی خشکی قرار گرفته اند امکان پذیر است اما برای آنهایی که در مناطق ساحلی نصب میشدند امکان پذیر نمی باشد.

تیغه های روتور داریوس هنگامی که میچرخند در کشش میباشند که به این معناست که آنها میتوانند نسبتاً سبک وزن و ارزان باشند زیرا آنها نیازی به خم شدن دائم که در تیغه های دستگاه های محور افقی اتفاق می افتد ندارند.



شکل (4-6) توربین های بادی محور افقی (HAWT) که خلاف جهت باد (a) و یادر جهت باد (b) متصل میشوند. توربین های بادی محور عمودی (VAWT) با قابلیت مطابقت با شرایط باد از هر جهت (c)

توربین های محور عمودی مشکلاتی هم دارند، مشکل اصلی این است که تیغه ها در این توربین به زمین جایی که سرعت باد در آن کمتر است نزدیک تر هستند. همانطور که بعداً خواهیم دید انرژی باد با توان سوم سرعت رابطه مستقیم دارد پس انگیزه کافی برای قرار دادن تیغه ها در معرض بادهای تندتر وجود دارد. بادهای نزدیک سطح زمین نه تنها آرام تر میباشند بلکه پر تلاطم تر نیز هستند، که موجب افزایش تنش و کشیدگی در VAWT ها میشود در نهایت در بادهای آرام روتور های داریوس گشتاور راه اندازی بسیار کوچکی دارند و در بادهای تندتر هنگامی که توان خروجی میبایست برای حفاظت از ژنراتور کنترل گردد، نمیتوان آنها را مانند تیغه های HAWT که گام ملخ آنها قابل کنترل است به گونه ای ساخت که سرعت چرخش آنها را بتوان کنترل کرد. در حالی که تقریباً اغلب توربین های بادی از نوع محور افقی میباشند هنوز بحث بر روی این موضوع وجود دارد که کدام یک از دستگاه های در خلاف جهت باد یا در جهت باد بهتر است. یک دستگاه در جهت باد دارای این مزیت میباشد که به باد اجازه میدهد که خود حرکت چپ-راست را کنترل کند. بنابراین خودش را به طور طبیعی با جهت باد تطبیق میدهد. اگرچه آن

دارای مشکلی با پدیده سایه باد میباشد هر موقع که یک تیغه در پشت برج میچرخد با یک دوره زمانی کوتاه کاهش باد مواجه میشود که موجب خم شدن تیغه میگردد. این خمیدگی نه تنها پتانسیل این را دارد که موجب شکستن تیغه به خاطر حد تحمل آن میشود بلکه موجب افزایش صدای تیغه و کاهش توان خروجی نیز میگردد.

توربین های در خلاف جهت باد، از طرف دیگر، نیازمند سیستم ها کنترل حرکت چپ-راست پیچیده ای میباشند تا تیغه ها را در معرض باد قرار بدهد در عوض آن پیچیدگی افزوده شده، دستگاههای در خلاف جهت باد آسان تر عمل میکنند و توان بیشتری تولید میکنند. بیشتر توربین های بادی مدرن از نوع خلاف جهت باد می باشد.

تصمیم اساسی دیگری در طراحی توربین های بادی مربوط تعداد تیغه های دوار آن میباشد شاید آشنا ترین توربین بادی برای بیشتر مردم آسیاب بادی چند تیغه ای که آب پمپاژ میکند و اغلب در مزرعه ها دیده میشود باشد. این دستگاه ها اساساً با آنهایی که برای تولید الکتریسته طراحی شده اند متفاوت میباشد. برای پمپاژ آب، آسیاب بادی میبایست گشتاور راه اندازی بالایی فراهم کند تا بتواند بر وزن و اصطکاک میله پمپاژ که در چاه بالا و پائین میرود غلبه کند. آنها همچنین میبایست با بادهایی که سرعت پائینی دارند کار کنند تا بتوانند به طور مداوم در طول سال آب پمپاژ کنند. به خاطر طراحی چند تیغه ای آنها مساحت زیادی از روتور در معرض باد قرار میگیرد، که موجب عملکردی با گشتاور بالا و سرعت کم گردد.

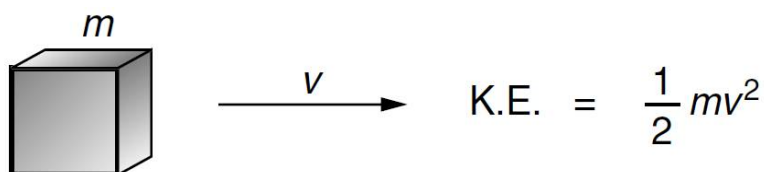
توربین های بادی با تیغه های بسیار دارای سرعت چرخش کمتری نسبت به توربین هایی هستند که تیغه های کمتری دارند. هر چقدر rpm توربین افزایش یابد، آشفتگی که توسط یک تیغه ایجاد میشود بر بازدهی تیغه ای که آن را دنبال میکند نیز تأثیر میگذارد با تیغه های کمتر توربین میتواند سریعتر بچرخد قبل از اینکه تداخل زیاد شود و ژنراتور با داشتن محوری که سریعتر میتواند حرکت بکند از نظر فیزیکی کوچکتر می باشد.

بیشتر توربین های بادی مدرن اروپایی دارای روتور سه تیغه میباشند، در حالی که توربین های آمریکایی دارای دو تیغه میباشند. توربین های سه تیغه ای آسانتر عمل میکند زیرا تأثیرات تداخل برج و تغییر سرعت باد با توجه به ارتفاع به صورت هموار تری از روتور به محور محرکه یا میل لنگ انتقال داد میشود، آنها همچنین سرو صدای کمتری دارند. تیغه سوم، به طور قابل توجهی به وزن و قیمت توربین می افزاید همین طور بالا بردن یک روتور سه تیغه ای برای قرار دادن آن در محل گهواره در طول فرآیند ساخت یا تعویض تیغه ها کار دشوار تری میباشد.

جالب است که متذکر شویم که توربین های یک تیغه ای (با یک وزنه تعادل) هم تا بحال امتحان شده اند اما هیچوقت ارزش پیگیری نداشته است.

3-6 توان باد

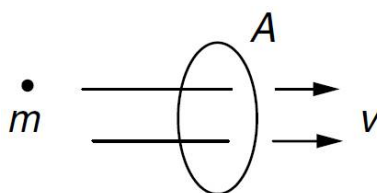
یک بسته کوچک هوا با جرم m که با سرعت v حرکت میکند را در نظر بگیرید. انرژی جنبشی آن به وسیله فرمول آشنای (1-6) ارایه میشود:



$$K.E. = \frac{1}{2}mv^2$$

$$K.E. = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1-6)$$

از آنجایی که توان برابر انرژی در واحد زمان میباشد، توان جرمی از هوا که با سرعت v از مساحت A عبور میکند برابر خواهد بود با:



$$A \text{ توان در ناحیه} = \frac{\text{انرژی}}{\text{زمان}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\text{جرم}}{\text{زمان}} \right) v^2 \quad (2-6)$$

نرخ شارش جرم m ، از میان مساحت A ، برابر حاصلضرب چگالی هوا ρ ، سرعت v و سطح مقطع A میباشد.

$$\frac{\text{جرم عبوری از } A}{\text{زمان}} = \dot{m} = \rho A v \quad (3-6)$$

از ترکیب رابطه (3-6) با (2-6) رابطه مهم زیر بدست می آید:

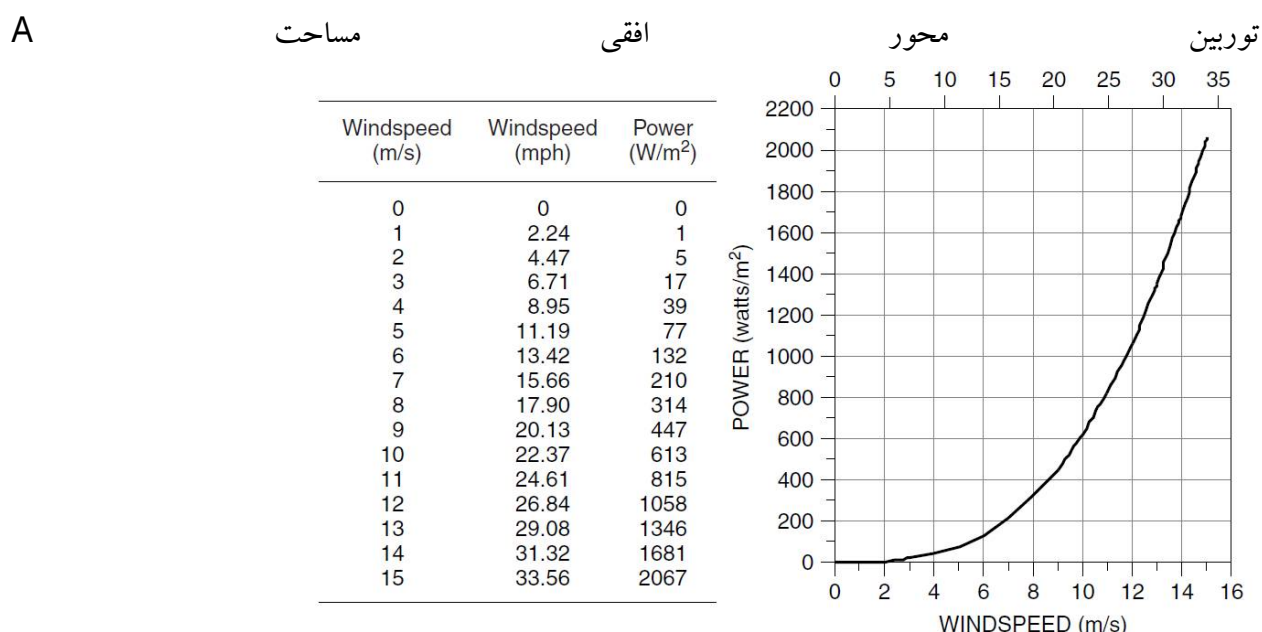
$$\rho_w = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (4-6)$$

در سیستم SI، P_w توان باد میباشد؛ P چگالی هوا (kg/m^3) (در دمای 15°C و فشار 1atm و

میباشد؛ A سطح مقطعی است که باد از آن عبور میکند V ؛ (m^2) = سرعت باد عمود بر سطح مقطع
 $(2.237 \text{ mph} = 1 \frac{m}{s})(\frac{m}{s}) A$ $(p = 1.225 \frac{kg}{m^3})$

یک نمودار از رابطه (4-6) و جدولی از مقادیر در شکل (5-6) نشان داده شده است. توجه داشته باشید که توان نشان داده شده به ازای متر مربع از سطح مقطع میباشد و کمیتی است که آن را توان مخصوص یا چگالی توان^{۷۳} مینامند. توجه داشته باشید که توان باد متناسب با مکعب سرعت باد میباشد. این به این معناست که اگر سرعت باد را دو برابر کنیم توان 8 برابر خواهد شد. به عبارت دیگر انرژی موجود در 1 ساعت باد 20mph برابر با انرژی موجود در 8 ساعت باد 10mph و برابر با 64 ساعت (بیش از دو روز و نیم) باد 5mph میباشد. بعداً خواهیم دید که بیشتر توربین های بادی در بادهای با سرعت پائین حتی روشن هم نمیشوند و رابطه (4-6) متذکر خواهد شد که انرژی تلف شده میتواند قابل چشم پوشی باشد.

رابطه (4-6) همانطور که نشان میدهد توان باد با مساحت جاروب شده توسط روتور توربین متناسب است در یک



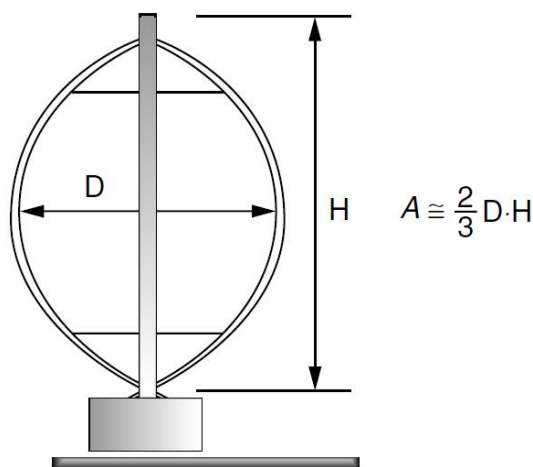
شکل (5-6) قدرت باد در هر متر مربع از سطح مقطع، در دمای $15^{\circ}C$ و فشار یک اتمسفر.

با توجه به این که میدانیم $A = \left(\frac{m}{4}\right) * (D^2)$ ، بنابراین توان باد با مربع قطر تیغه متناسب میباشد. 2 برابر کردن قطر موجب 4 برابر شدن توان میشود که با یک مشاهده ساده میتوان سبب صرفه جویی عظیمی در تولیدات انبوه که با

^{۷۳} Specific power or power density

توربین های بزرگ انجام میشود، نمود. هزینه یک توربین به تناسب قطر تیغه افزایش میابد. اما توان متناسب با مربع قطر می باشد، بنابراین دستگاه های بزرگ تر از نظر اقتصادی به صرفه تر میباشند.

پیدا کردن مساحت جاروب شده توسط یک روتور داریوس محور عمودی کمی دشوارتر میباشد به طور تقریبی مساحت جاروب شده برابر است با دوسوم مساحت مستطیلی که عرضی برابر با عرض ماکزیمم روتور و ارتفاعی برابر با اندازه عمودی تیغه ها میباشد.



شکل 6-6 نمایش مساحت تقریبی روتور Darrieus.

یک موضوع مورد علاقه انرژی موجود در ترکیبی از سرعت های باد میباشد.

با معادله غیر خطی داده شده بین توان و باد ما نمیتوانیم سرعت باد متوسط را در رابطه (6-4) جایگذاری کنیم تا کل انرژی قابل دسترس را حساب کنیم، همانطور که در مثال پائین نشان داده شده است.

مثال 6-1 از میانگین سرعت باد استفاده نکنید. در 15°C فشار 1atm انرژی موجود در یک متر مربع از سیستم بادی زیر را مقایسه نمایید.

الف) 50 ساعت با سرعت 6m/s ($13,4\text{ mph}$)

ب) 50 ساعت در سرعت 3m/s به اضافه 50 ساعت با سرعت 9m/s (میانگین سرعت باد 6m/s است).

حل:

الف) برای باد های پایدار 6m/s تنها کاری که باید انجام داد ضرب توان بدست آمده از رابطه 6-4 در زمان است.

$$6m/s \text{ انرژی} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \Delta t = \frac{1}{2} \cdot 1.225 \text{ kg/m}^3 \cdot 1m^2 \cdot (6m/s)^3 \cdot 100h = 13.230kwh$$

ب) برای 50 ساعت در 3m/s

$$3 \frac{m}{s} \text{ انرژی} = \frac{1}{2} \cdot 1.225 \text{ kg/m}^3 \cdot 1m^2 \cdot \left(\frac{3m}{s}\right)^3 \cdot 50h = 827kwh$$

و 50 ساعت در 9m/s شامل

$$9 \frac{m}{s} \text{ انرژی} = \frac{1}{2} \cdot 1.225 \text{ kg/m}^3 \cdot 1m^2 \cdot \left(\frac{9m}{s}\right)^3 \cdot 50h = 22.326kwh$$

جمعا برابر با

$$827+22,326=23152kwh$$

مثال 6-1 به طور چشمگیری نادرستی استفاده از سرعت بادمیانگین را در رابطه (6-4) نشان میدهد. در حالی که هر یک از بادهای دارای سرعت میانگین یکسانی بودند، ترکیب بادهای 3m/s و 9m/s (میانگین 6m/s) 75% انرژی بیشتری تولید میکند نسبت به حالتی که بادهای با سرعت ثابت 6m/s میوزند. بعداً خواهیم دید تحت فرضیات خاصی درباره توزیع احتمال سرعت باد، انرژی باد تقریباً دوبرابر مقداری خواهد بود که ما با استفاده از سرعت میانگین در رابطه (6-4) بدست می آوریم.

6-3-1 تصحیح دمایی برای چگالی هوا

وقتی که اطلاعات توان باد ارایه میشود، اغلب فرض میشود که چگالی هوا $1,225 \frac{kg}{m^3}$ میباشد و به عبارت دیگر، فرض میشود که دمای هوا $15^\circ C$ ($59^\circ F$) میباشد و فشار 1 atm میباشد. با استفاده از قانون گاز ایده آل، ما میتوانیم به آسانی چگالی هوا را تحت شرایط دیگری تعیین کنیم.

$$PV=nRT \quad (5-6)$$

که P فشار مطلق (atm) میباشد، V حجم میباشد (m^3)، n جرم (mol) میباشد و R ثابت گاز ایده آل $R=8,2056 \cdot 10^{-5} m^3 \cdot atm \cdot K^{-1} mol^{-1}$ می باشد و T دمای مطلق است (K)، که $k=^\circ C + 373.15$ میباشد.

فشار 1atm برابر با 101,532kpa (پاسکال) می باشد که $1\text{pa} = 1 \frac{\text{newton}}{\text{m}^2}$ یک اتمسفر همچنین برابر با 14,7 پوند بر اینچ مربع (psi) می باشد بنابراین $1\text{psi} = 6,89\text{pa}$ در نهایت ، 100kpa یک بار نامیده میشود و 100pa یک میلی بار نامیده میشود ، که این واحد فشاری است که اغلب در کار هواشناسی مورد استفاده قرار میگیرد.

وزن مولکولی گاز $\left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right)$ را M.W. مینامیم ، آنگاه میتوانیم عبارت پائین را برای چگالی هوا ، ρ بنویسیم:

$$\rho \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) = \frac{n(\text{mol}) \cdot M.W. (\text{g/mol}) \cdot 10^{-3} (\text{kg/g})}{V(\text{m}^3)} \quad (6-6)$$

از ترکیب رابطه 5-6 با رابطه 6-7 را میتوان نوشت.

$$\rho = \frac{P \cdot M.W. \cdot 10^3}{RT} \quad (7-6)$$

تنها چیزی که میخواهیم وزن مولکولی هوا می باشد. هوا البته ، ترکیبی از مولکول ها می باشد که بیشتر آن را نیتروژن (78,08%) و اکسیژن (20,95%) ، با میزان کمی آرگون (0,93%) کربن دی اکسید (0,035%) نئون (0,0018%) و... تشکیل داده است. با استفاده از وزن مولکولی اجزای سازنده

$$(NE=20,18, \text{CO}_2 = 44.01, \text{AR} = 39.95, \text{O}_2 = 32.00, \text{N}_2 = 28.02)$$

ما میتوانیم وزن مولکولی هوا را که 28,97 می باشد بدست آوریم.

$$(0,780,8 \cdot 28,20 + 0,2095 \cdot 32,00 + 0,0093 \cdot 39,95 + 0,000035 \cdot 44,01 + 0,000018 \cdot 20,18 = 28,97)$$

مثال 2-6 چگالی هوای گرمتر. چگالی هوا را در فشار 1atm و 30 درجه سانتیگراد (86°f) بدست آورید.

حل: طبق رابطه (6-7)

$$\rho = \frac{1\text{atm} \cdot 28.97\text{g/mol} \cdot 10^{-3}\text{kg/g}}{8.2056 \cdot 10^{-5}\text{m}^3 \cdot \text{atm}/(\text{k} \cdot \text{mol}) \cdot (273.15 + 30)\text{k}} = 1.165\text{kg/m}^3$$

که نسبت به مقدار مرجع 1.225kg/m^3 کاهش 5% چگالی را شاهد هستیم ، چون توان متناسب با چگالی است ، در توان باد هم 5% کاهش داریم.

جدول 1-6 چگالی هوای خشک در 1 اتمسفر

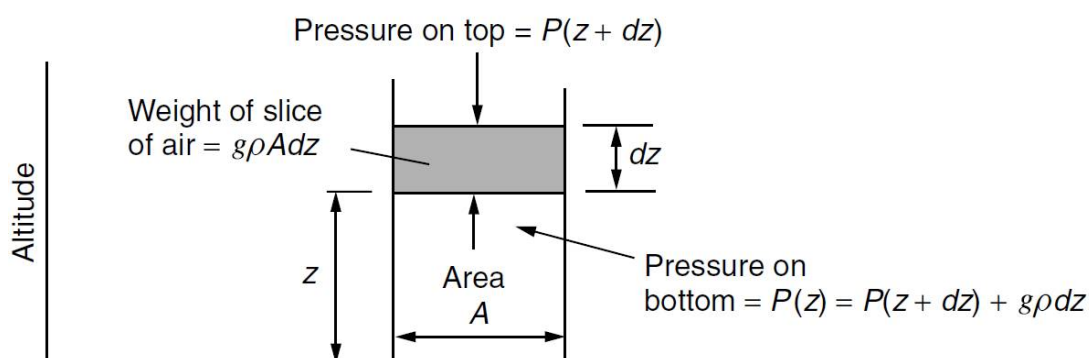
Temperature (°C)	Temperature (°F)	Density (kg/m ³)	Density Ratio (K_T)
-15	5.0	1.368	1.12
-10	14.0	1.342	1.10
-5	23.0	1.317	1.07
0	32.0	1.293	1.05
5	41.0	1.269	1.04
10	50.0	1.247	1.02
15	59.0	1.225	1.00
20	68.0	1.204	0.98
25	77.0	1.184	0.97
30	86.0	1.165	0.95
35	95.0	1.146	0.94
40	104.0	1.127	0.92

نسبت تراکم K_T ، نسبت تراکم در T بر اساس استاندارد در دمای 15°C است.

برای راحتی، جدول (1-6) چگالی هوا را برای دامنه ای از دماها نشان می‌دهد.

2-3-6 تصحیح ارتفاع برای چگالی هوا

چگالی هوا، و از این رو توان باد، به فشار اتمسفر و دما بستگی دارند. از آنجایی که فشار هوا تابع ارتفاع می‌باشد داشتن ضریب تصحیحی برای تخمین توان باد در مکان هایی بالاتر از ارتفاع سطح دریا مفید خواهد بود.



شکل 7-6 ستون هوا در حالت تعادل استاتیکی برای تعیین رابطه بین فشار هوا و ارتفاع

ستون ساکنی از هوا را با سطح مقطع A همان طور که در شکل (6-7) نشان داده شده است. در نظر بگیرید یک برش افقی از هوا با ضخامت dz و چگالی P جرمی برابر با $P.A.dz$ خواهد داشت اگر فشار بالای سرویس ارایه دهنده برق برش که به خاطر وزن هوای بالای آن است برابر با $p(z+dz)$ باشد آنگاه فشار در سمت پائین برش، $P(z)$ ، برابر با $p(z+dz)$ بعلاوه وزن اضافه شده خود برش به ازای واحد سطح خواهد بود:

$$P(z) = P(z + dz) + \frac{g\rho A dz}{A} \quad (8-6)$$

که g ثابت گرانشی، $9,806 \frac{m}{s^2}$ می باشد. بنابراین ما میتوانیم بنویسیم که فشار نموی dp برای تغییر نموی dz خواهد داد:

$$dp = P(z+dz) - P(z) = -g\rho dz \quad (9-6)$$

به عبارت دیگر

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g \quad (10-6)$$

چگالی هوا P که در رابطه (10-6) داده شده است همان طور که در رابطه (7-6) توصیف شد خودش تابعی از فشار می باشد بنابراین ما اکنون میتوانیم بنویسیم:

$$\frac{dp}{dz} = - \left(\frac{gM.W*10^{-3}}{RT} \right) . P \quad (11-6)$$

دما در ستون هوا با توجه به ارتفاع تغییر کند، به طور نمونه با نرخ افت $6.5^\circ C$ به ازای هر کیلومتر افزایش ارتفاع. اگر ما این فرض ساده کننده را که دما در ستون هوا ثابت است را بکنیم آن گاه ما میتوانیم رابطه (11-6) را با خطای کمی حل کنیم با جایگذاری ثوابت و ضرایب تبدیل و در حالی که فرض میکنیم دما $15^\circ C$ خواهیم داشت:

$$\frac{dp}{dz} = - \left[\frac{9.806(m/s^2) * 18.97(g/mol) * 10^{-3}(\frac{kg}{g})}{8.2056 * 10^{-5}(m^3.atm.K^{-1}.mol^{-1}) * 288.15k} \right] * \left(\frac{atm}{101.35Pa} \right) . \left(\frac{IPa}{N/m^2} \right) \left(\frac{IN}{kg.m/s^2} \right) . P$$

$$\frac{dp}{dz} = -1.185 * 10^{-4} P \quad (12-6)$$

که حل این می باشد.

$$P = P_0 e^{-1.185 * 10^{-4} H} = 1(atm) e^{-1.185 * 10^{-4} H} \quad (13-6)$$

که P_0 فشار مربع 1 اتمسفری می باشد و واحد H متر است.

مثال 3-6. چگالی ارتفاعات بالاتر. چگالی هوا را در الف) دمای 15°C ($288,15\text{K}$) و در ارتفاع 2000 متری (6562ft) بیابید. سپس: ب) با فرض دمای هوای 5°C در ارتفاع 2000 m را بیابید.

حل :

الف) طبق رابطه 6-13 داریم

$$p = 1\text{atm} * e^{-1.185*10^{-4}*2000} = 0.789\text{atm}$$

از رابطه 6-7 داریم

$$\rho = \frac{P.M.W * 10^{-3}}{RT} = \frac{0.789(\text{atm}) * 28.97 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right) * 10^{-3} \left(\frac{\text{kg}}{\text{g}}\right)}{8.2056 * 10^{-5}(\text{m}^3.\text{atm}.\text{K}^{-1}.\text{mol}^{-1}) * 288.15\text{K}} = 0.967\text{kg/m}^3$$

ب) در ارتفاع 2000 متری و دمای 5°C چگالی هوا میشود

$$\rho = \frac{0.789(\text{atm}) * 28.97 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}}\right) * 10^{-3} \left(\frac{\text{kg}}{\text{g}}\right)}{8.2056 * 10^{-5}(\text{m}^3.\text{atm}.\text{K}^{-1}.\text{mol}^{-1})(273.15 + 5)\text{K}} = 1\text{kg/m}^3$$

جدول (2-6) بعضی از ضرایب های تصحیح فشار را که بر مبنای رابطه (6-13) میباشند خلاصه کرده است. یک راه ساده برای ترکیب تصحیحات فشار و دما برای چگالی به ترتیب زیر است :

$$\rho = 1.225K_T K_A \quad (14-6)$$

در رابطه (14-6) ضرایب تصحیح K_T برای دما و K_A برای ارتفاع در جداول (6-1) و (6-2) فهرست بندی شده اند.

جدول (2-6) فشار هوا در 15°C با توجه به رابطه آن با ارتفاع

Altitude (meters)	Altitude (feet)	Pressure (atm)	Pressure Ratio (K_A)
0	0	1	1
200	656	0.977	0.977
400	1312	0.954	0.954
600	1968	0.931	0.931
800	2625	0.910	0.910
1000	3281	0.888	0.888
1200	3937	0.868	0.868
1400	4593	0.847	0.847
1600	5249	0.827	0.827
1800	5905	0.808	0.808
2000	6562	0.789	0.789
2200	7218	0.771	0.771

مثال 4-6. ادغام دما و اصلاحات ارتفاع. چگالی توان (W/m^2) در باد $10 m/s$ در ارتفاع 2000 متری و دمای $5^\circ C$ را بیابید.

حل: با استفاده از ضرایب K_A و K_T از جدول 1-6 و 2-6 در کنار رابطه 14-6 داریم

$$\rho = 1.225 K_T K_A = 1.225 * 1.04 * 0.789 = 1 kg/m^3$$

که با جواب مثال 3-6 یکسان است. چگالی توان در بادهای $10 m/s$ میشود.

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho v^3 = \frac{1}{2} \times 1 \times 10^3 = 500 w/m^3$$

4-6 تأثیر ارتفاع برج

از آنجایی که توان باد متناسب با مکعب سرعت باد میباشد، حتی تأثیر اقتصادی کمترین افزایش در سرعت باد میتواند مهم باشد. یک راه برای این که توربین را در معرض بادهای شدید تری قرار دهیم قرار دادن بر بالای برج بلند تری میباشد. در ارتفاع چند صد متر بالای زمین سرعت باد به شدت متأثر از اصطحاکاکی است که با آن مواجه میشود. سطوح هموار مانند یک دریای آرام، اغلب دارای مقاومت کمی در برابر باد میباشند و تغییر سرعت به خاطر ارتفاع خیلی اندک است از طرف دیگر، سرعت بادهای سطحی به طور قابل توجهی توسط مواردی چون جنگل ها و ساختمان ها کاهش می یابد.

یک عبارت که اغلب برای توصیف تأثیر ناهمواری سطح زمین بر سرعت باد استفاده میشود به صورت زیر می باشد:

$$\left(\frac{V}{V_0}\right) = \left(\frac{H}{H_0}\right)^\alpha \quad (15-6)$$

که V سرعت باد در ارتفاع H می باشد، V_0 سرعت باد در ارتفاع H_0 می باشد و α تابعی است از نوع زمینی که باد بر روی آن می وزد. جدول (3-6) تعدادی مقادیر برای انواع زمین (که این تعریف ضعیفی از انواع زمین می باشد) نشان می دهد. بعضی از اوقات در تقریبات خام (سردستی) برای زمین های به طور تقریبی مقدار α را برابر $\frac{1}{7}$ قرار می دهیم. در حالی که قانون توان داده شده در رابطه (6-15) اغلب مواقع در آمریکا مورد استفاده قرار می گیرد. روش دیگری نیز وجود دارد که در اروپا متداول است فرمول ان این می باشد:

$$\left(\frac{V}{V_0}\right) = \frac{\ln(H/z)}{\ln(H_0/z)} \quad (16-6)$$

جدول 3-6 ضریب اصطکاک بر اساس ویژگی های زمین مختلف

Terrain Characteristics	Friction Coefficient α
Smooth hard ground, calm water	0.10
Tall grass on level ground	0.15
High crops, hedges and shrubs	0.20
Wooded countryside, many trees	0.25
Small town with trees and shrubs	0.30
Large city with tall buildings	0.40

جدول 4-6 طبقه بندی زیری برای استفاده در رابطه (6-16)

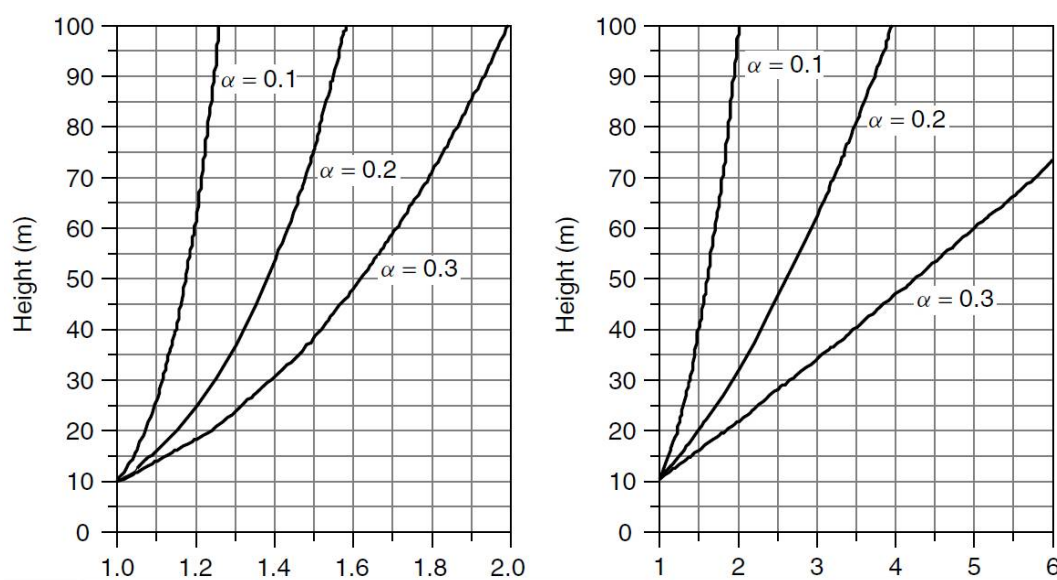
Roughness Class	Description	Roughness Length $z(m)$
0	Water surface	0.0002
1	Open areas with a few windbreaks	0.03
2	Farm land with some windbreaks more than 1 km apart	0.1
3	Urban districts and farm land with many windbreaks	0.4
4	Dense urban or forest	1.6

که Z طول زبری نامیده میشود فهرستی از طبقه بندی زبری و طول های زبری در جدول (6-4) داده شده است. رابطه (6-16) توسط عده ای ترجیح داده میشود زیرا دارای مبنایی در آیرودینامیک میباشد در حالی که رابطه (6-15) این گونه نیست.

در این فصل ما با رابطه نهایی (6-15) کار خواهیم کرد. آشکارا، هر دو رابطه چه نهائی (6-15) و چه لگاریتمی (6-16) تنها تقریبی اولیه از تغییر سرعت باد با توجه به ارتفاع ارایه میدهند.

در واقعیت هیچ چیزی بهتر از اندازه گیری واقعی در محل نمیشد.

شکل (6-8a) تأثیر ضریب اصطحاک را بر سرعت باد با فرض ارتفاع مرجع 10m نشان میدهد که ارتفاع استاندارد و رایج مورد استفاده برای یک باد سنج میباشد. همانطور که در شکل مشاهده میشود برای یک سطح هموار ($\alpha = 0.1$)، سرعت باد در ارتفاع 100 متری تنها حدود 25% بیش از ارتفاع 10 متری میباشد در حالی که برای یک محل در شهری کوچک سرعت باد در ارتفاع 100 متری دو برابر ارتفاع 10 متری میباشد همانطور که در شکل (6-8b) نشان داده شده است تأثیر ارتفاع بر توان حتی از سرعت باد نیز بیشتر است.



شکل 6-8 تأثیر ارتفاع بر سرعت باد

مثال 6-5. توان بادی افزایش یافته با یک برج بلند تر. یک باد سنج 10 متر بالاتر از سطح مزارع، پرچین ها و درختچه ها قرار دارد و سرعت باد 5m/s را نشان میدهد. سرعت و قدرت باد را در ارتفاع 50 متری حساب نمایید. فرض نمایید دما 15°C و فشار 1atm است.

حل : از جدول 3-6 اصطحکاک α برای زمین با پرچین و مراتع برابر 0,2 است. طبق شرایط 1atm و 15°C چگالی هوا $\rho = 1.225\text{kg/m}^3$ میگردد. با استفاده از رابطه 6-15 سرعت باد در 50 متری برابر است با

$$v_{s0} = 5\left(\frac{50}{10}\right)^{0.2} = 6.9\text{m/s}$$

توان ویژه برابر است با

$$P_{50} = \frac{1}{2}\rho v^3 = 0.5 * 1.225 * 6.9^3 = 201\text{w/m}^3$$

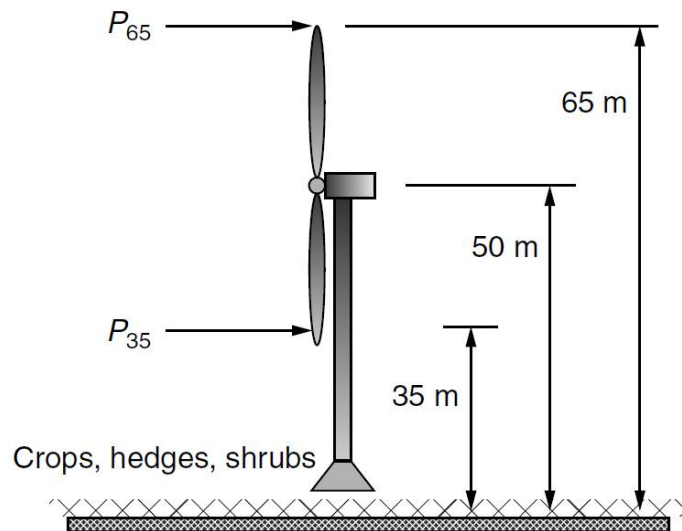
مشخص میگردد که بیش از 2/5 برابر توان 76.5w/m^3 در ارتفاع 10 متری است.

از آنجایی که توان باد متناسب با مکعب سرعت باد میباشد، ما میتوانیم رابطه (6-15) را بازنویسی کنیم تا فرمول توان سنجی باد را در ارتفاع H در مقابل توان باد در ارتفاع مرجع H_0 نشان میدهد.

$$\left(\frac{P}{P_0}\right) = \left(\frac{1/2\rho Av^3}{1/2\rho Av_0^3}\right) = \left(\frac{V}{V_0}\right)^3 = \left(\frac{H}{H_0}\right)^{3\alpha} \quad (6-17)$$

در شکل (6-8 b) نسبت توان باد در ارتفاعات دیگر نسبت به ارتفاع مرجع 10 متری نشان دهنده تأثیر شدید رابطه مکعبی بین سرعت باد و توان میباشد. حتی برای یک سطح زمینی هموار برای مثال یک منطقه ساحلی - هنگامی که ارتفاع از 10 متر به 100 متر افزایش می یابد توان 2 برابر میگردد. در یک سطح ناهموارتر با ضریب اصطحکاک $\alpha = 0.3$ هنگامی که ارتفاع تا 22 متر افزایش پیدا کند توان 2 برابر میگردد. هنگامی که ارتفاع تا 47 متر افزایش پیدا کند 4 برابر میگردد.

مثال 6-6 تنش (نیرو) روتور. تویی چرخ یک توربین بادی با قطر 30 متر پنجاه متر بالاتر از سطح زمین دارای حصار و گل بوته قرار گرفته است. نسبت (نرخ) توان ویژه باد در بالاترین نقطه پره دوار روتور به پائین ترین نقطه ای که میرسد را حساب نمائید.



حل: طبق جدول 3-6، ضریب اصطحکاک برای زمینی شامل حصار و محصول 0,2 است. با استفاده از رابطه (6-17) نسبت توان در نقطه اوج (65 متر) به پائین ترین نقطه (35) متر برابر است با:

$$\left(\frac{P}{P_0}\right) = \left(\frac{H}{H_0}\right)^{3\alpha} = \left(\frac{65}{35}\right)^{3 \times 0.2} = 1.45$$

قدرت باد در نقطه اوج 45% بیشتر از پائین ترین نقطه است.

مثال (6-6) نکته مهمی را درباره تغییر توان و سرعت باد در امتداد روبروی یک روتور در حال چرخش نشان میدهد. در دستگاه های بزرگ، هنگامی که یک تیغه در بالاترین نقطه مسیر قرار دارد میتواند در معرض نیروهای بسیار بزرگتر بادی قرار بگیرد نسبت زمانی که در پائین ترین نقطه مسیر قرار دارد. این تغییر در کشش هنگامی که تیغه یک دور کامل میزند با تأثیر خود برج بر سرعت باد آمیخته شده است بخصوص برای دستگاه های در جهت باد که هنگامی که تیغه پشت برج عبور میکند دارای مقدار قابل توجهی سایه باد میباشد نتیجه خم و راست شدن های تیغه میتواند منجر به افزایش صدای تولید شده توسط توربین بادی گردد و موجب شکنندگی تیغه گردد.

5-6 حداکثر بازدهی روتور

شایان ذکر است که تعدادی از فناوری های انرژی محدودیت اساسی مشخص دارند که موجب محدودیت حداکثر بازدهی تبدیل ممکن از یک شکل انرژی به شکل دیگر میگردد. برای موتورهای حرارتی این بازدهی سیکل کارنو میباشد که حداکثر قابل اخذ از یک موتور که بین منابع سرد و گرم کار میکند را محدود میکند. برای فوتوولتائیک ها، ما خواهیم دید که این باند های فاصله یا گاف انرژی ماده میباشند که بازدهی تبدیل نور خورشید به انرژی

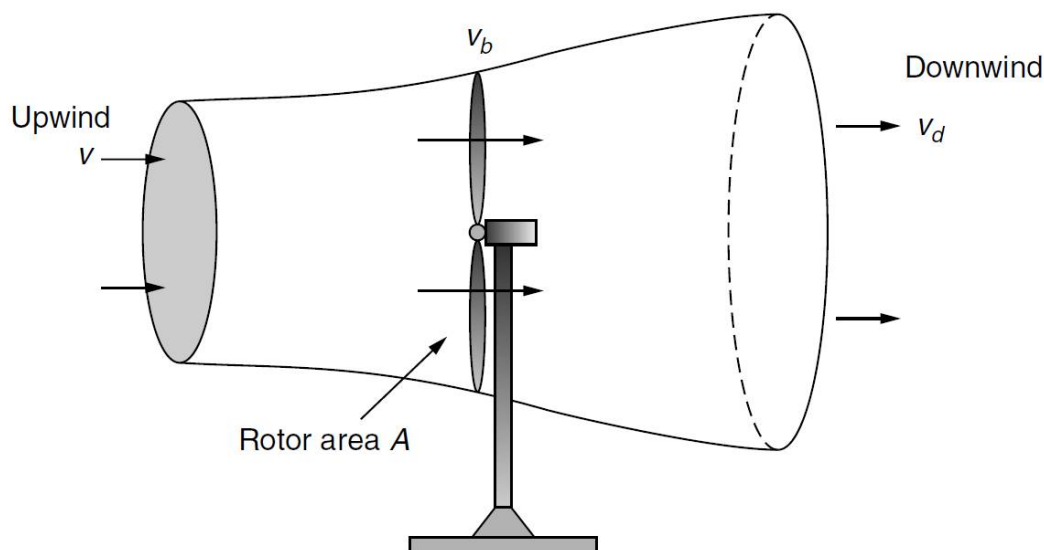
الکتریکی را محدود کنند. برای پیل های سوختی، این انرژی آزاد گیس می باشد که تبدیل انرژی از فرم شیمیایی به الکتریکی را محدود میکند. و اکنون ما محدودیتی را مورد بررسی قرار می دهیم که موجب محدود شدن توانایی یک توربین بادی در تبدیل انرژی جنبشی باد به انرژی مکانیکی می گردد. تعیین حداکثر توانی که یک توربین میتواند از باد بگیرد توسط یک فیزیک دان آلمانی به نام آلبرت بتز در سال 1919 انجام شد. بررسی او بیان کننده چگونگی کار سیستم تولید برق با استفاده از توربین بادی می باشد هنگامی که از یک توربین بادی میگذرد همانطور که در شکل (9-6) نشان داده شده است. باد که از سمت چپ نزدیک میشود توربین آرام شروع به حرکت میکند زیرا بخشی از انرژی جنبشی آن توسط توربین گرفته شده است. بادی که توربین را ترک میکند سرعت کمتری پیدا میکند و فشارش کاهش میابد و موجب میشود که هوای پائین دست توربین انبساط یابد. محفظه ای که در برگیرنده هوای گذرنده از توربین می باشد را تونل جریان مینامند. همان طور که در شکل نشان داده شده است.

پس چرا توربین نمیتواند همه انرژی جنبشی موجود باد را بگیرد؟

اگر اینگونه بود هوا میبایست در پشت توربین کاملاً متوقف میگشت و چون جایی برای رفتن نداشت موجب می شد که دیگر بادی نتواند از روتور عبور کند بنابراین سرعت باد خروجی نمیتواند صفر شود و این بی معناست که سرعت باد در خروجی با ورودی برابر باشد زیرا به این معناست که توربین هیچ انرژی از باد جذب نکرده است و این موضوع به ما میگوید که باید سرعتی برای باد خروجی وجود داشته باشد که منجر به گرفتن ماکزیمم انرژی از باد توسط توربین بگردد. آنچه که آلبرت بتز نشان داده این بود که یک توربین بادی ایده آل باد را تا $\frac{1}{3}$ سرعت اولیه کند میکند.

در شکل (9-6) سرعت باد بالا دست V ، سرعت بادی که از میان صفحه تیغه های روتور میگذرد V_b و سرعت باد پائین دست V_d می باشد. نرخ شمارش جرم هوا در داخل تونل جریان همه جا یکسان می باشد. که آن را $\dot{m}$ مینامیم. توان گرفته شده توسط تیغه ها P_b برابر اختلاف انرژی جنبشی میان بادهای بالا دست و پائین دست می باشد.

$$P_b = \frac{1}{2} \dot{m} (V^2 - V_d^2) \quad (18-6)$$



شکل 9-6 عبور باد از توربین بادی

راحت ترین موضع برای تعیین نرخ عبور جرم $\dot{m}$ در صفحه روتور جایی می باشد که سطح مقطع عرضی فقط سطح جاروب شده توسط روتور یعنی A می باشد. بنابراین نرخ عبور برابر است با :

$$\dot{m} = \rho A V_b \quad (19-6)$$

اگر ما فرض کنیم که سرعت باد گذرنده از صفحه روتور میانگین سرعت های بالا دست و پائین دست می باشد. (نتیجه گرفته شده توسط آلبرت بتز شامل این فرض نمیشود) آنگاه میتوانیم بنویسیم که :

$$P_b = \frac{1}{2} \rho A \left(\frac{V+V_b}{2} \right) (V^2 - V_d^2) \quad (20-6)$$

برای ساده تر کردن عبارات فرض میکنیم که نسبت سرعت باد پائین دست به بالا دست برابر است با :

$$\lambda = \left(\frac{V_d}{V} \right) \quad (21-6)$$

با جایگذاری رابطه (21-6) در رابطه (20-6):

$$P_b = \frac{1}{2} \rho A \left(\frac{V+\lambda V}{2} \right) (V^2 - \lambda^2 V^2) = \frac{1}{2} \rho A V^3 \cdot \left[\frac{1}{2} (1 + \lambda) (1 - \lambda^2) \right] \quad (22-6)$$

رابطه (22-6) به ما نشان میدهد که توان گرفته شده از باد برابر است با توان باد بالا دست ضرب در کمیت داخل براکت. بنابراین کمیت داخل براکت کسری از توان باد می باشد که توسط تیغه ها جذب گردیده است ؛ به عبارت دیگر این بازدهی روتور می باشد که معمولاً با C_p نشان داده میشود.

$$\text{rotore efficiency} = C_P = \frac{1}{2}(1 + \lambda)(1 - \lambda^2) \quad (23-6)$$

بنابراین رابطه اساسی ما برای توان تحویلی روتور به این ترتیب میشود.

$$P_b = \frac{1}{2} \rho A V^3 \cdot C_P \quad (24-6)$$

برای پیدا کردن حداکثر بازدهی ممکن روتور از (23-6) نسبت به λ مشتق میگیریم و آن را برابر با صفر قرار میدهیم:

$$\begin{aligned} \frac{dC_P}{d\lambda} &= \frac{1}{2} [(1 + \lambda)(-2\lambda) + (1 - \lambda^2)] = 0 = \frac{1}{2} [(1 + \lambda)(2\lambda) + (1 + \lambda)(1 - \lambda)] \\ &= \frac{1}{2} (1 + \lambda)(1 - 3\lambda) = 0 \end{aligned}$$

که جواب آن برابر است با :

$$\lambda = \frac{V_d}{V} = \frac{1}{3} \quad (25-6)$$

به عبارتی دیگر، بازدهی تیغه حداکثر خواهد گردید اگر سرعت باد بالادست را به $\frac{1}{3}$ کاهش دهد.

حال اگر ما $\lambda = 1/3$ را در معادله مربوط به بازدهی روتور (23-6) جایگذاری کنیم خواهیم داشت که حداکثر راندمان نظری روتور برابر است با :

$$\text{Maximum rotor efficiency} = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{3}\right) \left(1 - \frac{1}{3^2}\right) = \frac{16}{27} = 0.593 = 59.3\% \quad (26-6)$$

این نتیجه که حداکثر راندمان نظری یک روتور 59/3% میباشد را بازدهی بتز یا گاهی اوقات قانون بتز مینامیم. طرحی از (22-6) که نشان دهنده این موضوع باشد که راندمان حداکثر هنگامی اتفاق میافتد که سرعت باد به $1/3$ کاهش یابد در شکل (10-6) نشان داده شده است.

سوال واضح این است که تیغه های توربین های بادی مدرن تا چه حدی به محدودیت بتز برای بازدهی روتور که 59/3% میباشد نزدیک هستند ؟

تحت بهترین شرایط عملکرد، آنها تنها میتوانند به 80 درصد از آن محدودیت دست یابند که به عبارت دیگر بازدهی آنها در تبدیل توان باد به توان گرداننده محور یک ژنراتور چرخان حدود 45 تا 50 درصد میباشد. در یک سرعت باد معین، بازدهی روتور تابعی از نرخ چرخش روتور میباشد. اگر چرخش روتور کند باشد بازدهی افت خواهد کرد زیرا تیغه ها به مقدار هوا زیاده تری اجازه خواهند داد بدون تأثیر گذاشتن بر تیغه ها عبور کنند. اگر سرعت چرخش

روتور زیاد باشد بازدهی افت میکند زیرا آشفتگی ایجاد شده توسط یک تیغه به صورت افزایشده ای بر تیغه دیگری که به دنبال آن می آید تأثیر میگذارد.

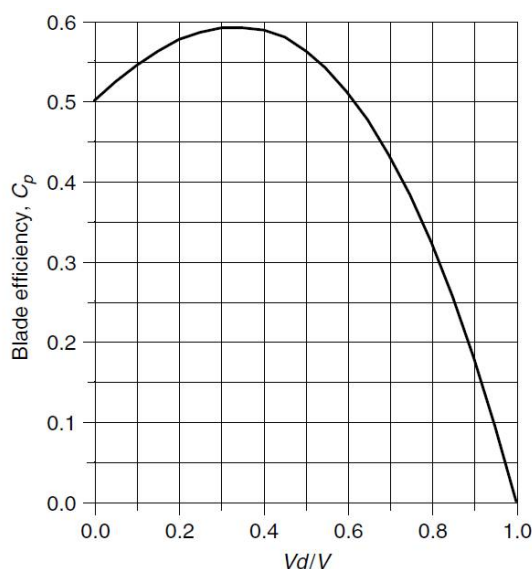
راه معمول برای نشان دادن بازدهی روتور ارایه کردن آن به عنوان تابعی از نسبت سرعت نوک 74 (TSR) خودش میباشد.

نسبت سرعتی که در آن نوک خارجی تیغه حرکت میکند بر سرعت باد نسبت سرعت نوک تعریف میشود:

$$(27-6) \quad \text{نسبت سرعت نوک (TSR)} = \frac{\text{سرعت نوک روتور}}{\text{سرعت باد}} = \frac{rpm * \pi D}{60 V}$$

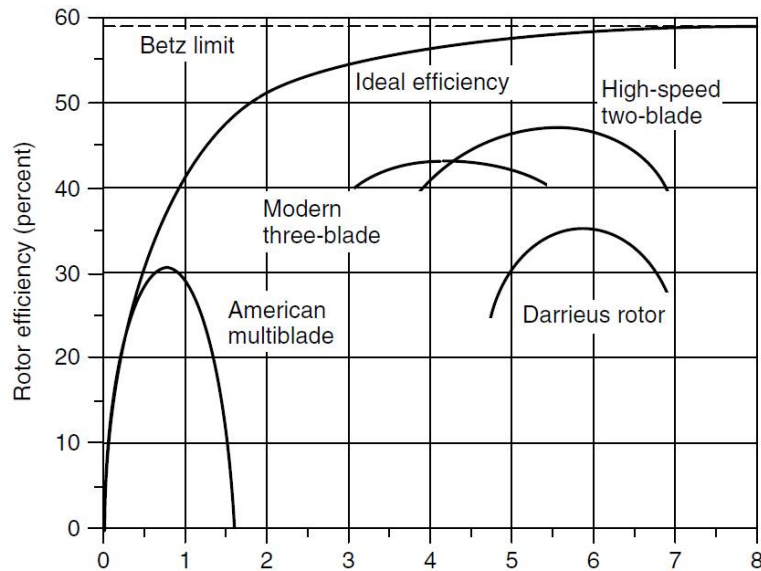
که rpm سرعت روتور؛ و دور دقیقه؛ D قطر روتور میباشد؛ V سرعت باد (m/s) بالادست توربین میباشد.

طرحی از بازدهی معمولی برای انواع روتورهای گوناگون در مقابل TSR در شکل (6-11) نشان داده شده است. روتورهای چند تیغه ای آمریکایی نسبتاً آرام میچرخند که دارای TSR بهینه کمتر از یک بازدهی ماکزیمم بالای 30% میباشد.



شکل 6-10 راند مان تیغه زمانی که باد به یک سوم مقدار نهایی آن میرسد حداکثر میشود

^{۷۴} Tip Speed. Ratio



شکل 6-11 روتور با تیغه های کمتر به راندمان بهینه خود با سرعت دورانی بالاتر میرسد .

روتور های 2 و 3 تیغه ای بسیار سریعتر میچرخند . و دارای TSR بهینه 4 تا 6 و بازدهی ماکزیمم 40 تا 50% میباشند. همین طور خط نشان داده شده است که مطابق با یک " بازدهی ایده آل " می باشد ، که همچنان که سرعت روتور افزایش می یابد به حد بتز نزدیک میگردد. انحنای موجود در خط ماکزیمم بازدهی نشان دهنده این حقیقت است که یک روتور با چرخش کند مانع گذر همه باد نمیشود که این امر موجب میگردد که بازدهی ماکزیمم ممکن از حد بتز کمتر گردد.

مثال 6-7. یک توربین بادی بزرگ با چه سرعتی باید بچرخد ؟ یک توربین با سه پره 40-m

، در سرعت 14m/s، 600 کیلو وات تولید می نماید . چگالی استاندارد هوا $1,225 \frac{kg}{m^3}$ است. تحت این شرایط :

الف) روتور در چه سرعتی با $TR=4$ کار مینماید؟

ب) سرعت نوک روتور چقدر است؟

ج) اگر لازم باشد ژنراتور با 1800 rpm بچرخد ، چه نسبت دنده ای لازم است تا سرعت روتور با ژنراتور برابری نماید؟

د) بازدهی توربین بادی کامل تحت این شرایط چقدر است ؟

حل:

با استفاده از رابطه 6-27 داریم:

$$\text{rpm} = \frac{TSR * 60v}{\pi D} = \frac{4 * 60s/min * 14m/s}{40\pi m/rev} = 26.7 \text{ rev/min}$$

حدود 2/2 ثانیه برای هر دور که واقعا آهسته است!

ب) سرعت نوک هر پره

$$\text{سرعت نوک} = \frac{26.7 \text{ rev/min} * \pi 40 \text{ m/rev}}{60 \text{ s/min}} = 55.9 \text{ m/s}$$

نتیجه به دست آمده در مثال بالا برای توربین های بادی بزرگ رایج میباشد.

به عبارت دیگر، یک توربین بزرگ حدود 20-30rpm میچرخد؛ و گیربکس این سرعت چرخش را 50 تا 70 برابر افزایش میدهد؛ و بازدهی کلی دستگاه در حدود 25 تا 30% میباشد.

6-6 ژنراتورهای توربین بادی

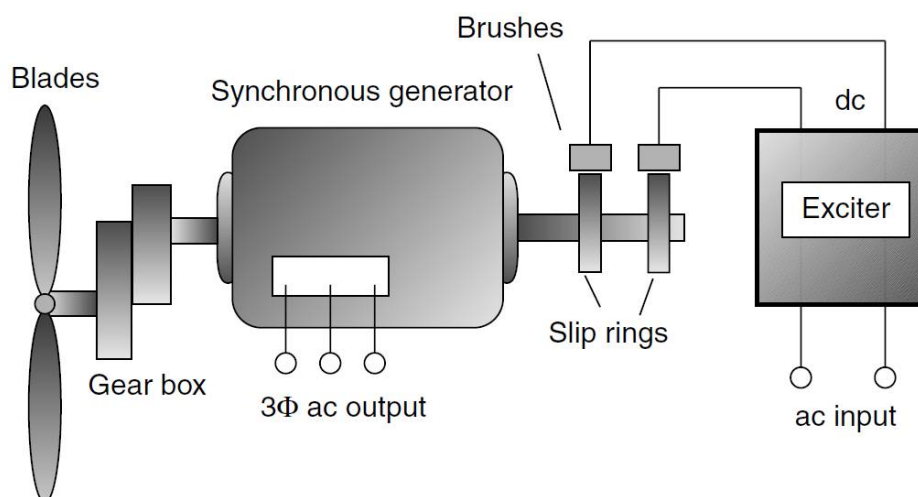
کارکرد پره های تبدیل انرژی جنبشی باد به توان چرخشی محور برای چرخاندن یک رتور ژنراتور که برق تولید میکند میباشد. ژنراتورها از یک روتور تشکیل میشوند که درون یک محفظه ثابت به نام استاتور میچرخد و الکتریسته هنگامی تولید میگردد که یک رسانا درون یک میدان مغناطیسی حرکت کند و خطوط میدان را قطع کند تا ولتاژ و جریان تولید کند. در حالی که توربین های بادی کوچک باتری شارژ کن از ژنراتور های dc استفاده میکنند اما دستگاه های متصل به شبکه برق از ژنراتور های ac استفاده میکنند که در بخش بعدی توضیح داده خواهد شد.

6-6-1 - ژنراتور سنکرون

ژنراتور های سنکرون⁷⁵ تقریباً تمام توان الکتریکی را در جهان تولید میکنند. ژنراتور های سنکرون در یک سرعت دورانی معین میچرخد که این سرعت توسط تعداد قطب ها و فرکانس مورد نیاز برای خطوط توان تعیین میگردد. میدان مغناطیسی ماشین سنکرون بر روی روتور ایجاد میگردد. در حالی که ژنراتور های سنکرون خیلی کوچک میتوانند میدان مغناطیسی مورد نیاز را با استفاده از یک روتور مغناطیسی دائمی تولید کنند، تقریباً تمام توربین های بادی که از ژنراتورهای سنکرون استفاده میکنند میدان را با استفاده از جریان مستقیم سیم پیچ دور هسته روتور تولید میکنند. این حقیقت که روتورهای ژنراتور های سنکرون برای سیم پیچ های میدان خود نیاز جریان DC دارند دو مشکل ایجاد میکند. اولاً میبایست جریان DC فراهم گردد، یعنی یک مدار یکسو کننده، که محرک نامیده میشود، مورد نیاز است جریان ac شبکه را به DC برای روتور تبدیل کند. دوماً، این جریان DC میبایست به روتور در حال

⁷⁵ Synchronous generator

چرخش برسد که به این معناست که حلقه های لغزان بر روی محور روتور مورد نیاز است همراه با جاروبک هایی که در مقابل آنها فشار وارد کنند تعویض جاروبک ها و تمیز کردن حلقه های لغزان⁷⁶ بر وظایف نگهداری این ژنراتور های هم زمان می افزاید شکل 6-12 سیستم پایه ای مورد نیاز در یک توربین بادی با ژنراتور سنکرون را نشان میدهد که یاد آور این میباشد که ژنراتور و تیغه ها از میان یک گیربکس به هم متصل شده اند تا به سرعت مورد نیازشان برسند.



شکل 6-12 ژنراتور سنکرون سه فاز نیاز منبع DC برای سیم پیچ روتور است که به این معنی است که حلقه های لغزش و جاروبکها نیازمند یک انتقال از منبع تحریک به روتور است.

2-6-6 ژنراتور آسنکرون⁷⁷ (القایی)

بیشتر توربین های بادی جهان از ژنراتور های القایی به جای ماشین های سنکرون که توضیح داده شد استفاده میکنند. برخلاف یک ژنراتور سنکرون (با موتور)، ماشین های القایی در یک سرعت ثابت نمی چرخند بنابراین از آنها اغلب به عنوان ژنراتور های آسنکرون یاد میشود. در حالی که ژنراتور های القایی به جز توربین های بادی در سیستم های قدرت متداول نیستند همتای آنها یعنی موتور های القایی رایج ترین موتور های موجود میباشند که حدود یک سوم الکتریسیته تولید شده در جهان را مصرف میکنند. در حقیقت، یک ماشین القایی میتواند به عنوان یک موتور یا ژنراتور عمل کند، که بستگی به این دارد که سرعت رتور نسبت به میدان دوار استاتور کمتر است (موتوری) یا بیشتر است (ژنراتوری). هر دو حالت عملکرد، چه با عنوان یک موتور هنگام راه اندازی و چه به عنوان یک ژنراتور هنگامی

⁷⁶ slip rings

⁷⁷ asynchronous generator(induction generator)

که باد می وزد، در توربین های بادی دارای ژنراتور های القایی اتفاق می افتد. در حالت موتوری، روتور کمی آهسته تر از سرعت سنکرون که توسط سیم پیچ استاتور تولید میگردد میچرخد، و در راستای تلاشی که برای رسیدن به آن سرعت بالاتر میکند به محور چرخاندن خود توان تحویل میدهد.

در حالت ژنراتوری، تیغه های توربین روتور را کمی سریعتر از سرعت سنکرون می چرخاند در نتیجه انرژی به سیم پیچ های ثابت میدانی خودش تحویل داده میشود. مزیت اصلی ژنراتور های القایی این است که روتور آنها نیازی به تحریک، جاروبک و حلقه های لغزان که اکثر ژنراتور های سنکرون به آنها احتیاج دارند، ندارد. آنها این کار را با تولید مغناطیسی مورد نیاز در استاتور انجام میدهند.

این به این معناست که آنها پیچیدگی کمتری دارند. ژنراتور های القایی همچنین فشار کمتری به اجزای مکانیکی توربین بادی در شرایط طوفانی وارد می کنند.

میدان مغناطیسی دوار

برای این که اصول کار یک ژنراتور یا موتور القایی را بفهمیم، باید مفهوم میدان مغناطیسی دوار را معرفی کنیم. ابتدا سیم پیچی مجزای درون استاتور یک ژنراتور سه فاز را مطابق شکل (6-13) در نظر بگیرید. این سیم ها شامل یک هادی مسی میباشند که در طول استاتور کشیده میشوند و دور استاتور میچرخد به طرف دیگر ختم میشود. در اینجا فرض میکنیم که جریان مثبت در هر فازی به معنای عبور جریان از حرف بدون پریم به حرف پریم دار میباشد. (برای مثال $i_A +$ یعنی عبور جریان از A به A') هنگامی که جریان در یک فاز مثبت است؛ میدان مغناطیسی حاصل شده را با یک بردار پر رنگ نشان میدهم؛ هنگامی که جریان منفی است از بردار نقطه چین استفاده میگردد و نهاد پیکان را به یاد آورید.

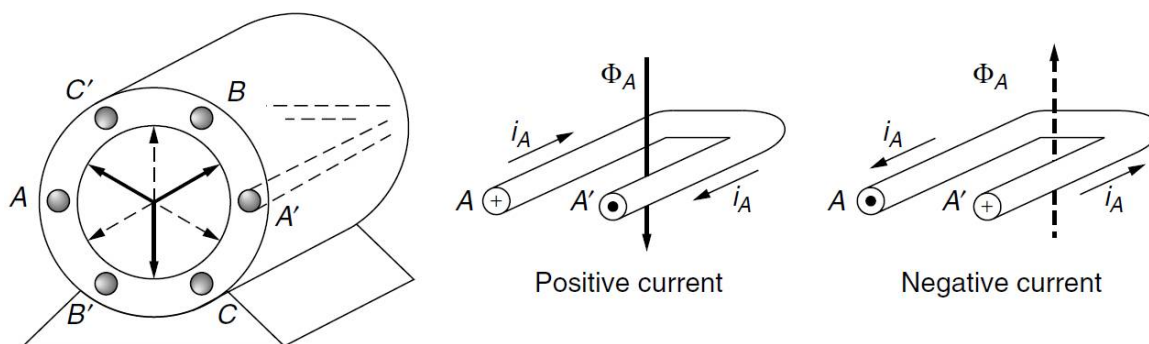
علامت "+" در آخر یک سیم به معنای عبور جریان به داخل صفحه و علامت نقطه به معنای عبور خارج از صفحه میباشد.

اکنون، میدان مغناطیسی که ناشی از عبور جریان های سه فاز استاتور میباشد را در نظر بگیرید. در شکل (6-14) زمان در $\omega t = 0$ متوقف شده است، در نقطه ای که i_A به ماکزیمم مقدار مثبت خود میرسد و i_B و i_C هر دو منفی و از نظر اندازه باهم برابر میباشند. شار مغناطیسی هر سه جریان نشان داده شده است، که مجموع آنها یک بردار شار میباشد که به طور عمودی به سمت پائین میباشد. کمی بعدتر، زمان را در $\omega t = \frac{\pi}{3} = 60^\circ$ متوقف میکنیم. اکنون $i_A = i_B$ و هر دو مثبت میباشند، در حالی که i_C در ماکزیمم مقدار منفی خود میباشد حاصل جمع شار ها اکنون 60° در جهت

عقربه های ساعت چرخیده است. ما میتوانیم این عمل را با افزایش مقدار ωt ادامه دهیم و میتوانیم ببینیم که شار حاصل شده به چرخش ادامه خواهد داد. این مفهوم مهمی برای ژنراتور القایی میباشد: با عبور جریان های سه فاز در استاتور، یک میدان مغناطیسی دوار درون استاتور ایجاد خواهد شد. میدان با سرعت سنکرون N_s میچرخد که این سرعت توسط فرکانس جریان ها f و تعداد قطب ها P تعیین میگردد. به عبارت دیگر، $N_s = 120f/p$ همانطور که در ژنراتور های سنکرون بود.

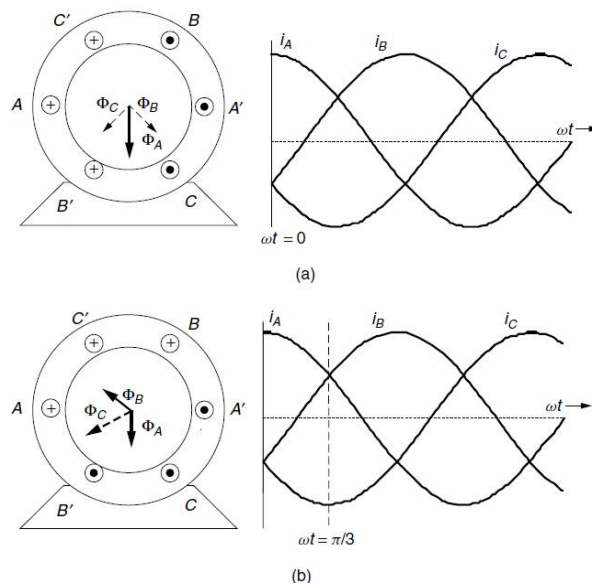
روتور قفسه سنجابی⁷⁸

یک ژنراتور القایی سه فاز میبایست با جریان های سه فاز ac تغذیه شود، که این جریان ها از میان استاتور آن عبور می یابند، و موجب ایجاد میدان مغناطیسی دوار میشود. روتور بسیاری از ژنراتور های القایی (و موتور ها) شامل تعدادی میله های مسی با آلومینیومی که اتصال کوتاه شده اند و یک قفسه را تشکیل میدهند که بی شباهت به قفسه ای سنجاب نیست.



شکل 6-13 استاتور موتور القایی

⁷⁸Squirrel cage rotor



شکل 14-6 (a) در $\omega t = 0$ ، i_A مقدار ماکزیمم است اما i_B و i_C هر دو منفی می‌باشند و با یکدیگر جمع می‌شوند.

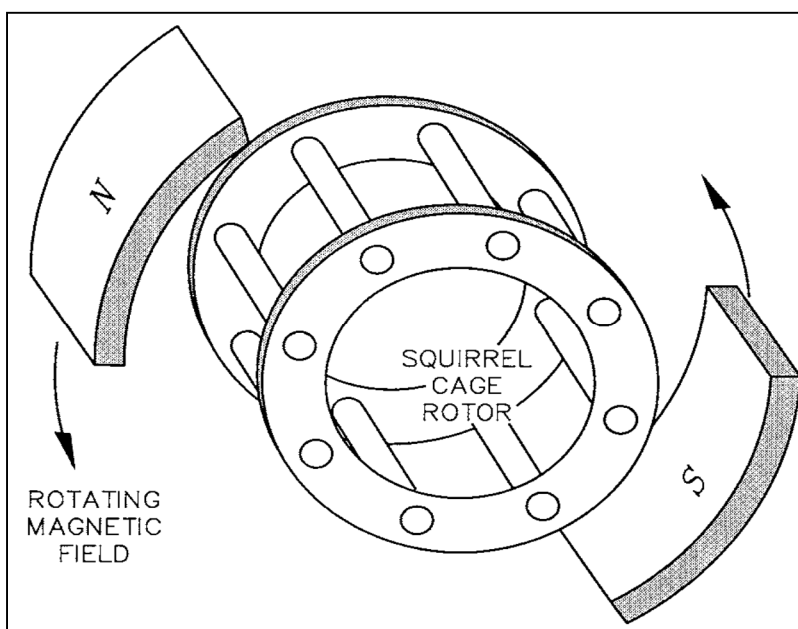
قبلاً آنها را روتور های قفسه سنجابی می‌نامیدند اما امروزه رتور قفسی می‌نامند. قفسه درون یک هسته آهنی که شامل ورقه های استیل لایه دار نازک (0,5mm) می‌باشد قرار داده شده است. ورقه ورقه بودن هسته موجب کنترل تلفات فوکو⁷⁹ میشود. شکل (15-6) رابطه اصلی بین استاتور و روتور را نشان می‌دهد که میتوان آن را به عنوان یک جفت آهن ربا (درون استاتور) تصور کرد که دور قفسه (روتور) می‌چرخند. برای این که بفهمیم که میدان دوار استاتور چگونه بر روتور قفسه ای اثر میکند، شکل (a16-6) را در نظر بگیرید. میدان دوار استاتور در حال حرکت به سمت راست نشان داده شده است در حالی که هادی درون روتور قفسه ای ساکن است. به گونه ای دیگر، میدان استاتور را میتوان ساکن تصور کرد و نسبت به آن رسانا در حال حرکت به سمت چپ و قطع کردن خطوط شار های مغناطیسی همانطور که در شکل (b16-6) نشان داده شده است مشاهده خواهید گردید.

قانون فارادی درباره القای الکترو مغناطیسی می‌گوید هرگاه یک هادی خطوط شار را قطع کند، نیروی محرکه الکتریکی در راستای رسانا به وجود می‌آید و جریان اگر بتواند در هادی به حرکت در می‌آید.

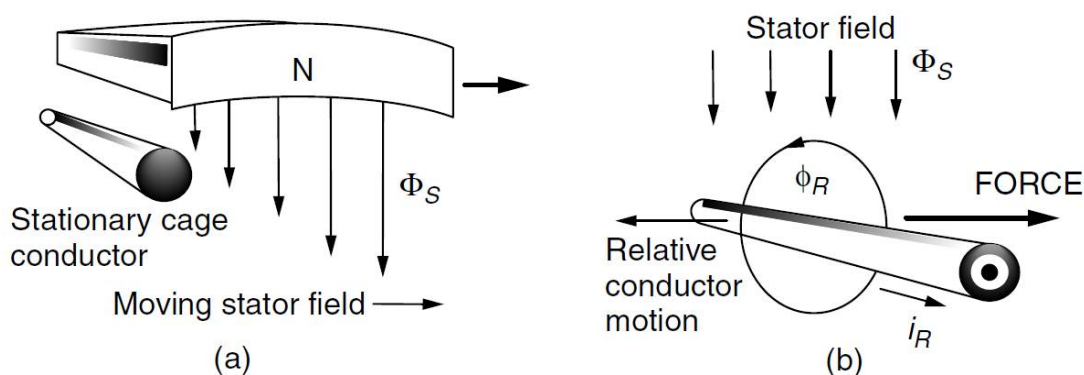
در حقیقت، روتور قفسه ای میله های هادی ضخیمی دارد که دارای مقاومت کمی می‌باشند، بنابراین جریان زیادی به آسانی میتواند حرکت بکند مانند جریان روتور که در شکل (b 16-6) i_R نامگذاری شده است. این جریان میدان مغناطیسی خودش را تولید خواهد کرد، که دور رسانا می‌پیچد. آنگاه میدان مغناطیسی روتور بر میدان مغناطیسی استاتور تأثیر می‌گذارد و نیرویی تولید میکند که هادی های قفسه را وادار به حرکت به سمت راست میکند. به عبارت

⁷⁹ Eddy loss

دیگر، روتور می‌خواهد در همان جهتی بچرخد که میدان دوار استاتور می‌چرخد در اینجا یعنی در جهت عقربه های ساعت.



شکل 6-15 روتور قفسه سنجابی شامل هادی ضخیم است که هدایت جریان اتصال کوتاه را در میدان مغناطیسی دوار به عهده دارد.



شکل 6-16

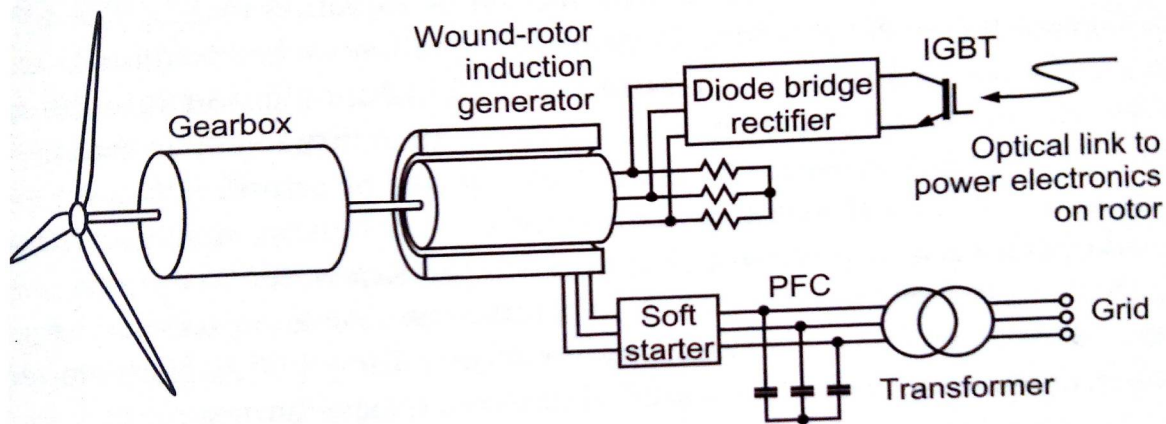
در شکل 6-16 (a) میدان استاتور به سمت راست حرکت میکند در حالی که هادی روتور قفسه ایی ثابت است. همانطور که در (b) نشان داده شده است، این درست معادل ثابت بودن استاتور است در حالی که هادی به سمت چپ

حرکت میکند و باعث برش خطوط شار میشود. هادی سپس با یک نیروی جدید مواجه میشود که تلاش میکند تا روتور را به میدان مغناطیسی دوار استاتور برساند.

ماشین القای به عنوان یک موتور

از آنجایی که فهم یک موتور القایی ساده تر از یک ژنراتور است ما با موتور القایی بحث مان را شروع میکنیم. میدان مغناطیسی دوار درون استاتور یک ماشین القایی موجب چرخش روتور در همان جهت میشود. (جهت چرخش میدان مغناطیسی دوار) به عبارت دیگر، ماشین یک موتور است - یک موتور القایی دقت داشته باشید که هیچ گونه اتصالات الکتریکی با روتور وجود ندارد؛ هیچ گونه جاروبک یا حلقه لغزان مورد نیاز نیست. همانطور که سرعت روتور به سرعت سنکرون میدان مغناطیسی دوار نزدیک میشود، حرکت نسبی بین آنها کوچک تر و کوچک تر و نیروی اعمالی بر روتور کمتر و کمتر میگردد.

اگر روتور میتواند با سرعت سنکرون حرکت کند، آن گاه حرکت نسبی وجود نداشت و هیچ جریانی در هادیهای قفسه ای القا نمیشد و هیچ نیرویی تولید نمیشد تا موجب شود که روتور به حرکت خود ادامه دهد.



شکل 6-17 ژنراتور رتور سیم پیچی شده

از آنجایی که همیشه اصطحکاکی وجود دارد که باید بر آن غلبه کرد ماشین القایی که به صورت یک موتور کار میکند با سرعتی کمتر از سرعت هم زمان تعیین شده توسط استاتور می چرخد. این اختلاف سرعت را لغزش می نامند که به زبان ریاضی این گونه تعریف میگردد.

$$s = \frac{N_s - N_R}{N_s} = 1 - \frac{N_R}{N_s} \quad (28-6)$$

که S لغزش روتور میباشد و N_s سرعت سنکرون بدون بار برابر با $120f/p$ rpm میباشد، که f فرکانس و P قطب ها میباشد و N_R سرعت روتور است هر چقدر بار موتور افزایش یابد، سرعت روتور کاهش می یابد و موجب افزایش لغزش میشود تا زمانی که گشتاور کافی برای پاسخ دادن به تقاضا تولید گردد. در حقیقت برای بیشتر موتور های القایی لغزش در بازه رایج و مجاز لغزش به صورت تقریباً خطی نسبت به گشتاور افزایش می یابد. هنگامی که بار از حد خود تجاوز کند به نقطه ای می رسیم که "گشتاور پرتگاهی"⁸⁰ نامیده میشود و افزایش میزان لغزش پاسخ گوی میزان بار نیست و روتور متوقف خواهد شد.

اگر روتور را وادار کنیم که در جهت عکس میدان استاتور بچرخد، آن گاه ماشین القایی به صورت یک ترمز عمل خواهد کرد.

مثال 6-8 لغزش موتور . یک موتور القایی 4 قطب 60 هرتزی وقتی لغزش آن 4% باشد، به توان نامی خود میرسد. سرعت موتور در توان نامی چقدر است؟

حل: سرعت سنکرون (هم زمان) بی بار در موتور 60 هرتز 4 قطبی عبارت است از

$$N_s = \frac{120f}{p} = \frac{120 * 60}{4} = 1800 \text{rpm}$$

طبق 6-28 در لغزش 4 در صد سرعت موتور میشود

$$N_s = (1 - s)N_s = (1 - 0.04)1800 = 1728 \text{rpm}$$

ماشین القایی به عنوان یک ژنراتور

هنگامی که جریان تحریک سه فاز برای استاتور فراهم شود و محور به توربین بادی و گیربکس متصل گردد آن گاه ماشین شروع به کار میکند تا سرعتش را به سرعت سنکرون برساند. هنگامی که سرعت باد به حد کافی باشد تا به محور ژنراتور نیرو وارد بکند تا از سرعت سنکرون بیشتر شود آنگاه ماشین القایی به صورت خودکار به یک ژنراتور سه فاز تبدیل میگردد که توان الکتریکی را سیم پیچ های استاتور بر میگردداند.

اما این جریان مغناطیس کننده سه فاز که این فرایند را شروع کرد از کجا می آید؟

⁸⁰ Pull out torque

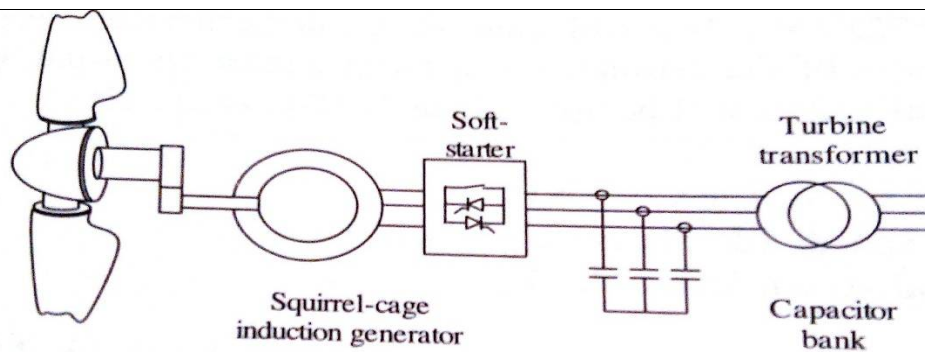
اگر به شبکه برق وصل باشد ، آنگاه خطوط توان جریان را فراهم کنند. همچنین ممکن است که ژنراتور القایی داشته باشیم که جریان تحریک ac مورد نیازش را خودش با ترکیب شدن با خازن های خارجی ، فراهم کند که این کار موجب تولید توان بدون استفاده از شبکه برق میگردد.

کار اصلی یک ژنراتور خود تحریک ایجاد شرایط تشدید یا رزونانسی میان القای داخلی سیم پیچ های میدان داخل استاتور و خازنهای خارجی اضافه شده می باشد. خازن و سلفی که به صورت موازی بهم متصل شده اند مبنای اسیلاتورهای الکترونیکی را تشکیل میدهند. به عبارت دیگر آنها فرکانس تشدید دارند که در آن ، آنها خود به خود شروع به نوسان خواهند کرد اگر آنها را در آن جهت کمی حرکت دهیم این حرکت کوچک توسط میدان مغناطیسی باقی مانده در روتور صورت می پذیرد. فرکانس نوسان و در نتیجه فرکانس تحریک روتور ، بستگی به سائز خازن های خارجی دارد که راهی را برای کنترل سرعت توربین بادی فراهم میکند. در شکل (6-18 a) یک ژنراتور القایی ، خود تحریک کشیده شده است که ظرفیت خازنی خارجی را نشان میدهد.

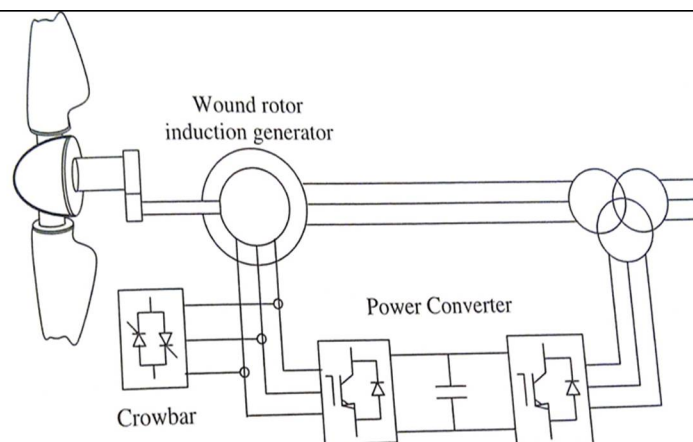
پس یک ژنراتور القایی با چه سرعتی میچرخد ؟ همان عامل لغزش که ما برای موتورهای القایی از آن استفاده کردیم در این جا به کار خواهیم برد به استثنای این که حالا لغزش عددی منفی میباشد زیرا روتور از سرعت سنکرون سریعتر میچرخد. در ژنراتور های القایی متصل به شبکه برق لغزش معمولاً بیش از 1% نمیباشد. یعنی ، برای مثال ، یک ژنراتور 60HZ دو قطبی با سرعت هم زمان 3600rpm با این سرعت می چرخد:

$$N_R = (1 - s)N_s = [1 - (-0.01)]. 3600 = 3636 \text{rpm}$$

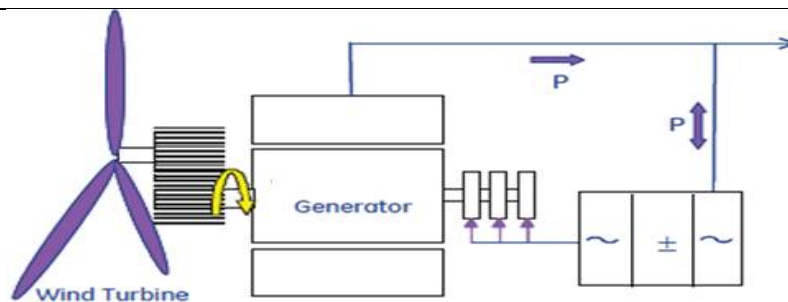
یک مزیت افزوده شده در ژنراتور های القایی این است که آنها میتوانند ضربات وارد شده توسط تغییرات سریع در سرعت باد را خنثی کنند. هنگامی که سرعت باد به طور ناگهانی تغییر میکند لغزش مطابق آن افزایش یا کاهش می یابد که به خنثی کردن ضربه وارد شده به تجهیزات مکانیکی توربین بادی کمک میکند.



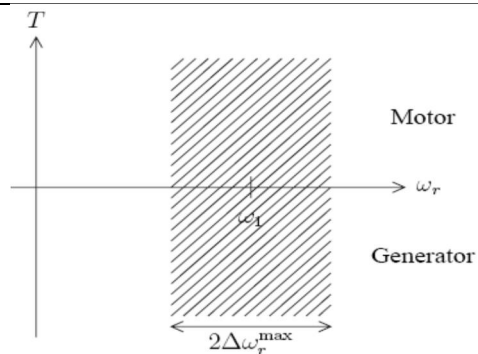
(a) توربین بادی سرعت ثابت با بانک خازنی و راه انداز نرم



(b) GFD توربین بادی سرعت متغیر



(c) (تبادل توان از رتور و استاتور



(c) مشخصه گشتاور سرعت

شکل 6-18 ژنراتور القایی در حالت های مختلف

اساساً سه نوع ژنراتور القایی در سیستم‌های تبدیل انرژی بادی مورد استفاده قرار می‌گیرد:

1- ژنراتورهای القایی رتور قفس سنجابی⁸¹ (SCIG)

2- ژنراتورهای القایی رتور سیم‌بندی شده⁸² (WRIG)

3- ژنراتورهای القایی با تغذیه‌ی دو گانه⁸³ (DFIG)

در ژنراتورهای القایی رتور قفس سنجابی رتور ساختار کاملاً متفاوتی دارد. به این دلیل که از میله‌های رسانای حالت جامدی ساخته شده که در شکاف‌های هسته مغناطیسی تعبیه شده است. این میله‌ها بوسیله‌ی هر دو انتهای اتصالات و حلقه‌ها به هم متصل می‌شوند. به علت شباهت، این دسته از رتورها "رتور قفس سنجابی"⁸⁴ یا به اختصار "رتور قفسی" نامیده می‌شوند. (شکل 6-15)

ژنراتور القایی قفس سنجابی بطور مستقیم به شبکه متصل می‌شود. به علت ساختمان مستحکم و استاندارد و سادگی ابزارهای الکترونیک قدرت که در آن استفاده می‌شود قابلیت اطمینان بالایی دارند. شکل (6-18 a) یک ژنراتور القایی قفس سنجابی در ساختار توربین بادی را نشان می‌دهد.

ژنراتورهای القایی قفس سنجابی در توربین‌های سرعت ثابت یا سرعت متغیر مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین با تغییر زوج قطب سیم‌بندی استاتور آنها در دو سرعت متفاوت قابل بهره‌برداری هستند.

بطور کلی مزایا و معایب این نوع از ژنراتورها بصورت زیر خلاصه می‌شوند:

مزایا: ساختمان ساده، حفاظت ساده، نوسانات کم، کم هزینه و اتصال مستقیم به شبکه‌ی توزیع.

معایب: نیاز به توان راکتیو، نیاز به راه‌اندازی نرم برای اتصال اولیه به شبکه، قابل استفاده تنها در توربین سرعت ثابت، نیاز به گیربکس و برای تعداد زیاد قطب‌ها ($p > 20$) مورد استفاده قرار نمی‌گیرد.

سیم‌بندی‌های ژنراتور رتور سیم‌بندی شده با استفاده از سیم‌پیچی حلقه‌های لغزان رتور صورت می‌گیرد. در این روش مشخصه‌های الکتریکی رتور از بیرون و بوسیله‌ی تجهیزات الکتریکی کنترل می‌شود.

⁸¹ Squirrel cage induction generator

⁸² Wound rotor induction generator

⁸³ Doubly fed induction generator

⁸⁴ Squirrel cage rotor

ماشین القایی رتور سیم‌بندی شده برای کنترل مشخصات الکتریکی از مقاومت متغیر خارجی رتور استفاده می‌کند. تغییر مقاومت رتور مشخصه‌ی گشتاور ماشین را اصلاح می‌کند.

در توربین‌های بادی مدرن این نوع مقاومت خارجی از طریق تجهیزات الکترونیک قدرت که تغییرات سریع ایجاد می‌کنند کنترل می‌شود. محدوده‌ی تغییرات سرعت 10% است که محدوده‌ی بهینه‌ای برای ذخیره انرژی باد و همچنین خروجی توان یکنواخت و بار مکانیکی تحمیلی به ماشین در زمان وجود اغتشاش و تندباد می‌باشد.

مقاومت خارجی ترکیبی از مقاومت خارجی (3 فاز) است که بصورت موازی با مدارهای الکترونیک قدرت (پل دیودی و چار DC) بکار برده می‌شوند. ترکیب ایجاد شده در نهایت به رتور سیم‌بندی شده متصل می‌شود. برای تغییر مقاومت خارجی رتور، سیکل کاری⁸⁵ چار DC را باید تنظیم کرد (شکل 6-17).

زمانی که سرعت رتور به بالاتر از سرعت سنکرون می‌رسد توربین بادی شروع به تولید توان می‌کند. بنابراین با افزایش سرعت باد، توان آیرودینامیکی ورودی و لغزش رتور و توان الکتریکی خروجی افزایش می‌یابد. در این ناحیه ($p < p_{rated}$) مقاومت‌های خارجی رتور اتصال کوتاه می‌شود و تساوی $duty\ ratio = 1$ برقرار می‌باشد. با افزایش توان تولیدی تا مقدار نامی مقاومت رتور برای حفظ خروجی در مقدار ثابت نامی تنظیم می‌شود.

بطور مشابه با ماشین‌های القایی قفس سنجابی این دسته نیز نیاز به توان راکتیو دارند که معمولاً بوسیله‌ی نصب بانک‌های خازنی فراهم می‌شود.

ژنراتور القایی با تغذیه‌ی دوگانه (DFIG) هم اکنون به طور وسیعی در نیروگاه‌های بادی بکار می‌رود در حالت عادی استاتور بطور مستقیم به شبکه برق متصل شده و روتور نیز از طریق یک مبدل توان فرکانس متغیر، به شبکه متصل می‌باشد. به منظور پوشش منطقه وسیعی از عملکرد شامل سرعت‌های زیر سنکرون تا فوق سنکرون، مبدل توان بکار رفته در مدار روتور باید قابلیت عبور توان در هر دو جهت را داشته باشد. عملکرد DFIG با استفاده از تئوری کلاسیک میدان‌های دوار و بکار بردن تبدیل‌های 2 محوری به 3 محوری و بالعکس تحلیل می‌شود. مبدل الکترونیک قدرت پشت به پشت از دو مبدل مجزا که توسط یک خازن با کوپل dc به هم متصل شده اند تشکیل یافته است که به نامهای مبدل طرف شبکه (GSC⁸⁶) و مبدل طرف روتور (RSC⁸⁷) شناخته می‌شوند شکل 6-18).

⁸⁵ Duty ratio

⁸⁶ Grid side convertor

⁸⁷ Rotor side convertor

وظیفه مبدل طرف روتور کنترل گشتاور یا سرعت DFIG و همچنین کنترل ضریب قدرت در ترمینالهای استاتور است در حالیکه هدف اصلی از مبدل طرف شبکه، ثابت نگه داشتن ولتاژ لینک dc است. از خازن کوپل dc بمنظور ذخیره انرژی و صافتر نمودن ولتاژ در زمان تغییرات ولتاژ یا نوسانات کوچک در ولتاژ لینک استفاده می شود مشخصه گشتاور سرعت سیستم DFIG در شکل نشان داده شده است. همچنانکه از شکل مشخص است از DFIG میتوان به صورت موتور و ژنراتور در بازه تغییرات سرعت روتور $\Delta\omega r$ در محدوده سرعت سنکرون 1 ω استفاده کرد. شکل (3-18 d) در این سیستمها محدوده سرعت سنکرون در حدود $\pm 30\%$ درصد می باشد.

تحریک AC باعث می شود که میدان شار رتور، دورانی ظاهری نسبت به رتور داشته باشد. توالی فرکانسی و فازی جریان رتور بوسیلهی مبدلها کنترل می شود تا اینکه مجموع دوران فیزیکی رتور و دوران ظاهری میدان مغناطیسی نسبت به رتور، تحت سرعت سنکرون بچرخد. زیر سرعت سنکرون توان رتور از خط به سیم بندی رتور جریان می یابد. در سرعت بالای سنکرون توان رتور از سیم بندی رتور به سمت استاتور و رتور توربین بادی حرکت می کند در این هنگام کنترلر زاویه پره را برای محدود کردن توان آیرودینامیک تنظیم می کند و بنابراین سرعت رتور محدود می شود. یک ژنراتور القایی با تغذیه دوگانه منبع توان راکتیو می باشد. با تنظیم دامنه و موقعیت زاویه، شار بوسیلهی کنترل مبدل، خروجی توان واقعی و راکتیو ژنراتور با دقت تنظیم می شود. به علت محدودیت رتور ثابت های زمانی شار بسیار کوتاه است که باعث می شود پهنای باند ژنراتور بزرگتر از 60 هرتز شود. این به آن معنی است که این ژنراتور می تواند در بازه های زمانی کمتر از میلی ثانیه کنترل شود.

ژنراتورهای تغذیه دوگانه برای فراهم کردن ولتاژ کم حتی صفر بدون نیاز به ترکیب شدن با ابزارهای جبران سازی راکتیو طراحی می شوند.

بر خلاف یک ژنراتور القایی که به رتور جریان تحمیل می کند یک ژنراتور تغذیه دوگانه یک ماشین با توانایی تحریک خارجی است.

در نهایت بطور خلاصه می توان گفت:

مزایا: هزینه کاهش یافتهی مورد توجه مبدل، امکان تنظیم سرعت برای کاربرد بهینهی انرژی (معمولا 20-25%)، توان راکتیو برای مغناطیسی کردن ماشین بوسیلهی مبدل توان فراهم می شود و عملکرد زیر سنکرون و فوق سنکرون امکان پذیر است.

معایب: حلقه‌های لغزان و جاروبک‌ها، استهلاک و فرسودگی آنها، تعمیر و نگهداری از آنها، کنترل پیچیده در کل واحد و اتصال مستقیم به شبکه قدری دشوار است.

6-7 کنترل سرعت برای حداکثر توان

در این بخش ما نقشی که گیر بکس و ژنراتور در خصوص سرعت دورانی روتور و انرژی تحویل داده شده توسط ماشین دارند را بررسی خواهیم کرد. بعداً، ما نیاز به کنترل سرعت در تیغه‌های روتور را که موجب عبور باد (جلوگیری از برخورد باد به تیغه‌ها) به منظور جلوگیری از باز کردن بیش از حد اجزای الکتریکی توربین در بادهای تند می‌گردد را توضیح خواهیم داد.

6-7-1 اهمیت تغییر پذیر بودن سرعت روتور

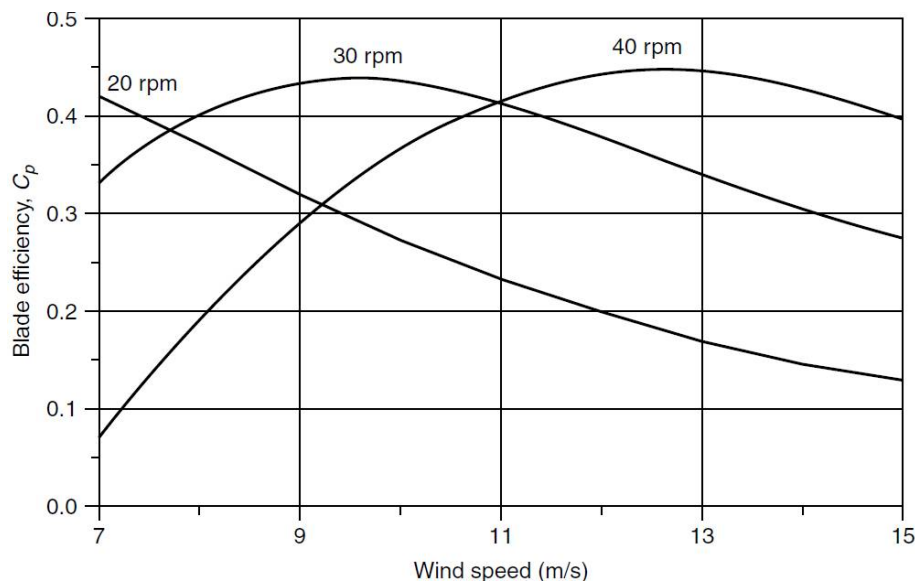
دلایل دیگری علاوه بر عبور بادهای پر سرعت وجود دارد که موجب میشود کنترل سرعت وظیفه مهمی محسوب گردد. شکل 6-11 را به یاد آورید که در آن بازدهی روتور C_p بستگی به نسبت سرعت نوک (TSR) داشت.

توربین‌های بادی مدرن هنگامی که TSR آنها محدوده 4 تا 6 باشد به بهترین نحو عمل میکنند، یعنی این که نوک یک تیغه 4 تا 6 برابر سریعتر از سرعت باد حرکت میکند. بنابراین به طور ایده آل برای رسیدن به حداکثر راندمان، تیغه‌های توربین باید سرعت شان را هنگامی که سرعت باد تغییر میکند تغییر دهند.

شکل 6-19 این مطلب را با ارایه یک مثال بازدهی تیغه در مقابل سرعت باد در سه مرحله مجزا در rpm روتور به عنوان یک متغیر نشان می‌دهد.

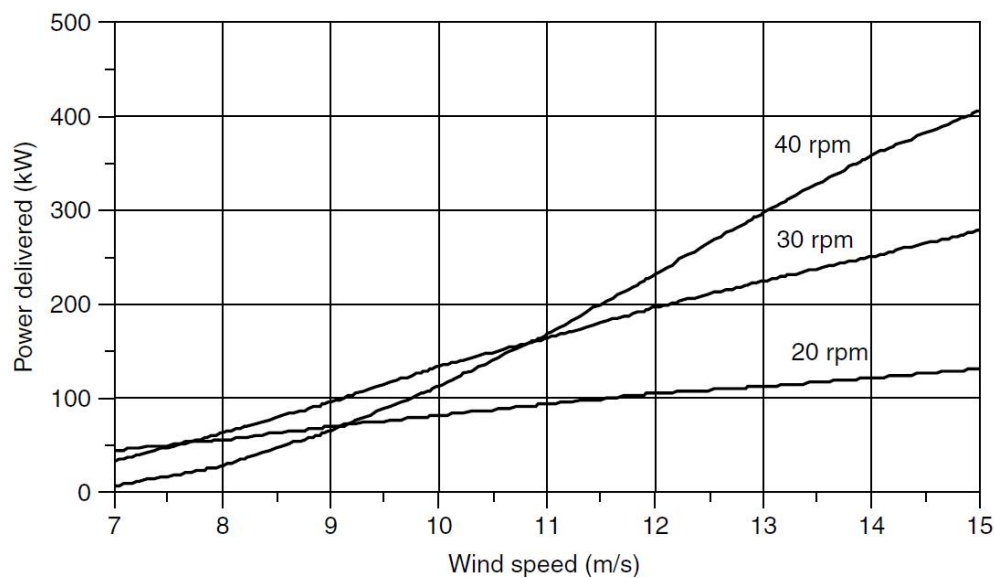
تا وقتی که نتوان سرعت روتور را تنظیم کرد، بازدهی تیغه هر موقعی که سرعت باد تغییر کند تغییر خواهد کرد. قابل توجه می‌باشد که C_p در نزدیکی نقطه ماکزیمم تقریباً صاف می‌باشد بنابراین تنظیم پیوسته rpm بهتر از داشتن تعدادی مرحله مجزای rpm می‌باشد.

در حالی که شکل 6-19 تأثیر سرعت روتور را بر بازدهی تیغه نشان میدهد، آن چه که مهمتر است توان الکتریکی تحویلی توسط توربین بادی میباشد.



شکل 6-19 اگر تغییرات سرعت چرخش رتور با تغییر سرعت باد تغییر کند راندمان تیغه افزایش می یابد. در این شکل سه سرعت گسسته برای روتور فرضی نشان داده شده است.

شکل 6-20 تأثیر تغییر سرعت روتور را از 20 به 30 به 40 دور در دقیقه برای یک روتور 30-m با بازدهی نشان داده شده در شکل 6-19، همراه با ترمز و بازدهی ژنراتور 70% فرض شده را نشان میدهد.



شکل 6-20 نمونه مثال از تأثیری که سه مرحله تنظیم سرعت چرخشی روی توان تحویلی دارد. برای باد زیر $7,5\text{m/s}$ ، 20 دور در دقیقه بهترین است. برای $7,5\text{m/s}$ و 20 و 30 دور در دقیقه بهترین است. و بالاتر از 11 متر/ثانیه، 40 دور در دقیقه بهترین است.

در حالی که بازدهی تیغه از تنظیم سرعت همانطور که در شکل های 6-19 و 6-20 نشان داده شده است سود میبرد، ژنراتور شاید احتیاج داشته باشد که با یک نرخ ثابت بچرخد تا بتواند ولتاژ و جریان هم فاز با شبکه (که در حال تغذیه دادن می باشد) را تولید کند. بنابراین، در توربین هایی که به شبکه برق وصل میباشند، چالش طراحی ماشین هایی می باشد که بتوانند خود را به گونه ای با سرعت متغیر روتور و سرعت ثابت ژنراتور تطبیق بدهند یا حداقل در این راستا تلاش کنند. اگر توربین بادی به شبکه برق متصل نشده باشد آنگاه فرکانس خروجی الکتریکی ژنراتور میتواند تغییر کند (که معمولاً dc تبدیل شده است)، بنابراین این موقعیت دشوار یک مشکل نمیشد.

6-7-2 ژنراتور های القایی با قطب متغیر

ژنراتور های القایی با فرکانسی میچرخد که تا حدود زیادی توسط قطب ها کنترل میگردد. یک ژنراتور 60 هرتزی دو قطبی، با سرعت 3600rpm میچرخد؛ با 4 قطب با سرعت حدود 1800rpm میچرخد؛ و به همین ترتیب. اگر ما بتوانیم تعداد قطب ها را تغییر بدهیم میتوانیم به توربین بادی این امکان را بدهیم که در سرعت های متفاوتی کار کند و به عملکرد نشان داده شده در شکل 6-19 و 6-20 نزدیک گردد. یک نکته کلیدی در این روش این است که تا جایی که روتور مهم می باشد و به آن مربوط است، تعداد قطب های موجود در استاتور یک ژنراتور القایی اهمیتی ندارد. به عبارت دیگر، استاتور میتواند دارای اتصالات خارجی باشد که تعداد قطب ها را تغییر بدهد بدون اینکه نیازی به تغییر در روتور باشد. این روش در موتور های وسایل برقی خانگی مانند آبهایی که در ماشین لباسشویی و فن خروجی مورد استفاده قرار میگیرند تا باعث ایجاد 2 یا 3 سرعت عملکرد شوند متداول است.

6-7-3 گیر بکس های چند گانه

بعضی از توربین های بادی دارای دو گیر بکس همراه با دو ژنراتور مجزا میباشند که به هر کدام متصل شده است و موجب ایجاد ژنراتور و نسبت ترمز با باد کم سرعت و همین طور با باد پر سرعت میشوند.

6-7-4 ژنراتور های القایی با لغزش متغیر

یک ژنراتور معمولی اختلاف سرعتش را در حدود 1% سرعت سنکرون نگاه میدارد. در این گونه ژنراتور ها لغزش تابعی از مقاومت dc موجود در هادی های روتور میباشد. با اضافه کردن مقاومت متغیر به روتور محدوده لغزش میتواند حدود 10% افزایش پیدا کند، یعنی، برای مثال یک ماشین 4 قطبی با سرعت 1800rpm میتواند در بازه 1800rpm تا 2000rpm نیز فعالیت کند. یک راه برای فراهم کردن این قابلیت داشتن مقاومت های قابل تنظیم خارج از ژنراتور می باشد اما اکنون جایگزین آن یک اتصال الکتریکی میان روتور و مقاومت ها می باشد. به این مفهوم که ما مفهوم روتور قفسه ای را فراموش کنیم و به جای آن از یک روتور القایی با حلقه های لغزان و جاروبک، شبیه به آن چه که ژنراتور همزمان دارد استفاده کنیم و آن به این معناست که نگهداری بیشتری مورد نیاز است. راه دیگر برای فراهم کردن مقاومت متغیر نصب و سوار کردن مقاومت ها و تجهیزات الکترونیکی بر روی خود روتور میباشد که برای کنترل آنها مورد نیاز است. اما آنگاه شما نیاز به راهی برای فرستادن سیگنال ها دارید تا به روتور بگویید که به چه میزان لغزش ایجاد کند. در یک سیستم به نام Optistip، یک اتصال فیبری نوری به روتور برای این ارتباط مورد استفاده قرار گیرد.

6-7-5 سیستم های متصل به شبکه

روتور توربین تغییرات در انرژی باد را به انرژی مکانیکی تبدیل می کند و سپس این انرژی توسط ژنراتور به توان الکتریکی تبدیل شده و سپس از طریق ترانسفورماتور و خطوط انتقال به شبکه قدرت منتقل می شود. توربین های بادی به خاطر طراحی آیرودینامیکی پره ها، توان را از باد می گیرند و آن را به توان مکانیکی چرخشی تبدیل می کنند. تعداد پره ها معمولاً سه عدد است و اگر شعاع پره ها افزایش یابد، سرعت چرخشی آن ها کاهش می یابد. برای بازه توانی مگاوات، سرعت دورانی پره های توربین بادی 5-10 دور بر دقیقه می باشد. راه حل موثر تبدیل سرعت پایین و گشتاور بالا به توان الکتریکی، استفاده از گیر بکس و ژنراتور با سرعت استاندارد است. گیربکس سرعت پایین روتور توربین را به سرعت بالا برای ژنراتور تبدیل می کند. ممکن است برای سیستم های ژنراتور چند قطب گیر بکس نیاز نباشد. نقطه اتصال توربین های بادی به شبکه ممکن است در ولتاژ پایین، ولتاژ متوسط، ولتاژ بالا و حتی ولتاژ های خیلی بالا باشد. امروزه بیشتر توربین های بادی به سیستم ولتاژ متوسط

متصل اند و مزارع بادی در دریا به سطح ولتاژ بالا و یا خیلی بالا متصل هستند. برای سیستم های توربین بادی مدرن، هر توربین خود یک ترانسفورماتور برای افزایش ولتاژ از سطح ولتاژ توربین (400 یا 690 ولت) به ولتاژ متوسط دارد. ترانسفورماتور معمولاً نزدیک به توربین بادی است تا از طولانی شدن کابل های ولتاژ پایین جلوگیری شود. فقط توربین های بادی کوچک به طور مستقیم به خطوط ولتاژ پایین بدون ترانسفورمر متصل می شوند و یا تعدادی از توربین های کوچک در یک مزرعه بادی به یک ترانسفورمر متصل می شوند. به خاطر تلفات بالا در خطوط ولتاژ پایین، مزارع بادی بزرگ ممکن است یک پست مجزا برای افزایش ولتاژ از سطح ولتاژ متوسط به سطح ولتاژ بالا داشته باشند.

امروزه انواع زیادی از سیستم های توربین بادی در بازار رقابت می کنند که آن ها را در دو گروه اصلی می توان جمع کرد.

گروه اول، توربین های بادی سرعت ثابت هستند که ژنراتور به طور مستقیم به شبکه متصل شده است. ساختار و عملکرد این سیستم وابستگی زیادی به خصوصیات مکانیکی سیستم مکانیکی توربین و نوع کنترل دارد. در واقع هیچ گونه کنترل الکتریکی برای این سیستم وجود ندارد. به علاوه تغییرات سریع در سرعت باد به سرعت روی بار القا می شود (به خاطر تغییرات توان). این تغییرات برای توربین بادی که متصل به شبکه است خوشایند نیست و باعث ایجاد فشار های مکانیکی روی توربین شده و عمر توربین را کم می کند و کیفیت توان را نیز می کاهش دهد. در توربین سرعت ثابت فقط یک سرعت باد وجود دارد که ضریب سرعت بهینه را نتیجه می دهد. یعنی فقط یک سرعت وجود دارد که توربین در آن سرعت بهینه کار می کند از این رو توربین بادی سرعت ثابت اغلب خارج از عملکرد بهینه خود کار می کند و به طور معمول ماکزیمم توان از باد گرفته نمی شود. راه اندازی یک توربین بادی سرعت ثابت توسط گیربکس چند مرحله ای که بین محور توربین و ژنراتور قرار گرفته است تا گشتاور بزرگ در محور توربین را به یک سرعت بالاتر در ژنراتور تبدیل کند، انجام می شود. یک

ژنراتور القایی قفسی با 4 یا 6 قطب در این ایده استفاده می شود و به طور مستقیم از طریق یک ترانسفورمر به شبکه متصل می شود. توربین بادی سرعت ثابت از روش کنترل استال⁸⁸ (در ادامه فصل شرح داده میشود) برای کنترل سرعت توربین استفاده می کند. محور توربین در یک سرعت ثابت پایین و در سرعت نامی باد می چرخد. هنگامی که سرعت باد بالاتر از سرعت نامی شود، توان بوسیله اثر STALLING تیغه های روتور محدود می شود. این ایده به عنوان یک ایده دانمارکی شناخته می شود چون این ایده بوسیله کارخانه توربین بادی دانمارکی در سال های 1980 تا 2000 استفاده شده است. ژنراتور القایی قفسی توان راکتیو را از شبکه می گیرد از این رو برای جبران سازی توان راکتیو بانک های خازنی برای آن قرار می دهند. در این نوع توربین های بادی برای اتصال نرم به شبکه از راه انداز های نرم⁸⁹ استفاده می شود.

در سیستم توربین های بادی جدا از شبکه همانطور که از نام آنها مشخص است برق تولید شده در توربین به صورت جدا از شبکه برای تامین انرژی الکتریکی مورد نیاز یک یا چند مصرف کننده استفاده می شود و در این نوع سیستم نیاز به احداث خطوط انتقال نیرو یا احداث پست های فشار قوی و فشار ضعیف نمی باشد و توان تولید شده در توربین در محل نیروگاه یا در همان حوالی مصرف می شود. کاربرد نیروگاه های بادی با توربین های مستقل از شبکه شارژ باتری، گرمایش آب، تولید توان الکتریکی در نواحی دور افتاده، تامین انرژی دستگاه های ناوبری دریائی و شیرین سازی آب می باشد.

سیستم های تامین برق مناطق دور افتاده به کمک نیروگاه های بادی با توربین جدا از شبکه بسیار مقرون به صرفه و با قابلیت اعتماد بالا می باشند و غالباً این سیستم ها دارای یک سیستم ذخیره کننده انرژی (باتری) می باشند و مزیت این سیستم ها این است که می توان از توربین های بادی با سایر منابع

⁸⁸ Stall

⁸⁹ Soft starter

تولید انرژی مانند سلول‌های فتوولتائیک و یا دیزل ژنراتورها برای تامین توان‌های بیشتر به صورت ترکیبی استفاده کرد.

گروه دوم، توربین‌های بادی سرعت متغیر هستند. در این حالت ژنراتور به طور مستقیم به شبکه متصل نمی‌شود. نوع سرعت متغیر قابلیت کنترل سرعت روتور را فراهم می‌کند، این کار به ما اجازه می‌دهد تا توربین بادی نزدیک نقطه بهینه عمل کند. بیشتر توربین‌های بادی با بازه توان بیشتر از 1/5 مگاوات توربین بادی سرعت متغیر می‌باشند. مزایای توربین سرعت متغیر به سرعت ثابت به صورت زیر است:

✓ تولید انرژی سالیانه افزایش می‌یابد چون سرعت توربین می‌تواند به عنوان یک تابعی از سرعت باد برای ماکزیمم کردن توان خروجی تنظیم شود. بسته به آیرودینامیک توربین و وزش باد، به طور میانگین توربین سرعت متغیر 10 درصد بیشتر انرژی سالیانه تولید می‌کند.

✓ فشارهای مکانیکی به خاطر فراهم کردن توان کاهش می‌یابد. تغییرات و قطع باد می‌تواند جذب شود، انرژی در اینرسی مکانیکی توربین ذخیره شده و نوسانات گشتاور را کاهش می‌دهد.

✓ تغییرات توان خروجی از شرایط لحظه‌ای در سیستم‌های مکانیکی و باد مجزا می‌شود. هنگامی که یک باد تند به توربین می‌رسد، سیستم الکتریکی می‌تواند به انتقال توان ثابت به شبکه تا هنگامی که اینرسی مکانیکی انرژی اضافی را بوسیله افزایش سرعت روتور جذب کند ادامه دهد.

✓ کیفیت توان بوسیله کاهش نوسانات توان بهبود می‌یابد. کاهش نوسانات توان باعث کاهش انحراف ولتاژ از مقدار نامی خود در نقطه اشتراک مصرف کننده و شبکه (PCC) می‌شود.

✓ پیچیدگی‌های روش کنترل می‌تواند کاهش یابد. به خاطر آن که ثابت زمانی کنترل پره‌ها با استفاده از توربین بادی سرعت متغیر می‌تواند طولانی تر شود چون در اینجا کنترل الکتریکی میسر است و پاسخ آن بسیار سریعتر از کنترل مکانیکی است از اینرو نیاز کمتری به عملکرد سریع کنترل مکانیکی داریم.

✓ سر و صدا کاهش می‌یابد. سر و صدا عامل مهمی است هنگامی که مزارع بادی نزدیک به مناطق مسکونی باشد.

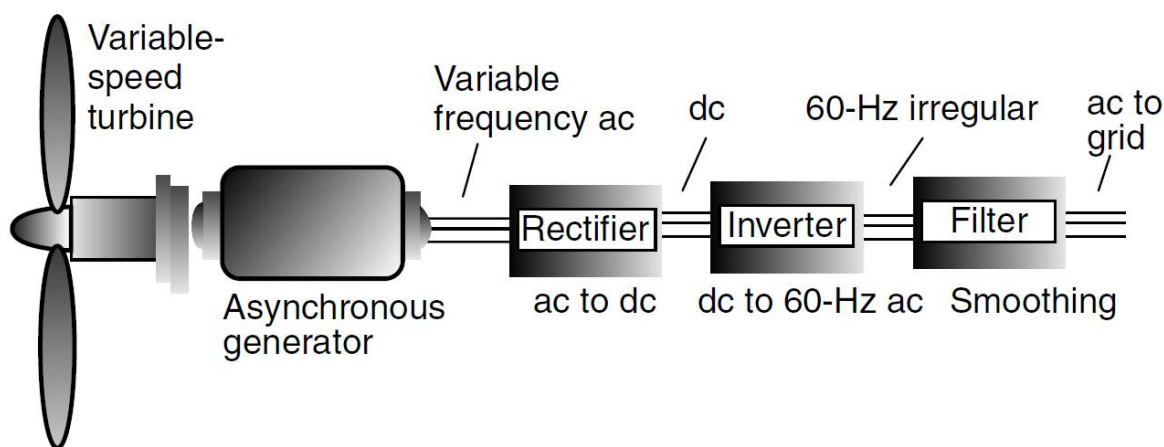
با وجود مزایای مهم توربین بادی سرعت متغیر، اجرای آن هزینه اضافی دارد و پیچیدگی‌های مبدل-های الکترونیک قدرت میان شبکه و ژنراتور در آن‌ها وجود دارد. با این وجود به خاطر مزایای آن استفاده از آن در حال افزایش است.

در روش اتصال غیر مستقیم، توربین بادی مجاز است در هر سرعتی که برای تحویل حداکثر توان مورد نیاز است بچرخد. هنگامی که به یک ژنراتور القایی یا سنکرون متصل می‌گردد خروجی الکتریکی فرکانس متغیری خواهد داشت که این فرکانس بستگی به این دارد که توربین بادی در آن لحظه چه سرعتی داشته باشد. بنابر این ژنراتور به طور مستقیم نمیتواند به شبکه ارایه دهنده برق، متصل شود، زیرا این کار حتما نیاز به جریان ثابت 50 یا 60 هرتز دارد.

شکل 6-21 مفهوم پایه ای این سیستم های غیر مستقیم را نشان میدهد. جریان ac (با فرکانس متغیر) خارج شده از ژنراتور با استفاده از ترانزیستورهای توان بالا یکسو و تبدیل به DC میشود. این جریان به یک اینورتر فرستاده میشود تا آن را به ac تبدیل کند، اما این بار با فرکانس ثابت 50 یا 60 هرتز، خروجی ناخالص یک مبدل بسیار متلاطم می باشد و نیاز دارد که برای هموار شدن فیلتر گردد. زمانی که جریان ac به dc تبدیل شود و برعکس، پتانسیل برای تولید هارمونیک وجود دارد، بنابراین یکی از چالش های مرتبط با این سیستم های توربین بادی غیر مستقیم سرعت متغیر، حفظ کیفیت قابل قبول توان می باشد.

علاوه بر تولید انرژی سالانه بیشتر توربین های بادی با سرعت متغیر مزیت دیگری نیز دارند که موجب کاهش استهلاک و فرسودگی کل سیستم به مقدار زیادی میشوند که این استهلاک ناشی از تغییرات سریع باد می باشد. هنگامی که باد تندی به توربین اصابت میکند، به جای این که باعث افزایش ناگهانی گشتاور شود و به تیغه ها، محور محرکه و گیربکس برخورد کند فقط باعث افزایش سرعت تیغه ها

میشود به همین خاطر تنش در سیستم را کاهش میدهد. علاوه بر این مقداری از انرژی اضافی موجود در آن باد تند را میتوان گرفت و تحویل داد.



شکل 6-21 خروجی فرکانس متغیر ژنراتور آسنکرون تصحیح شده، معکوس شده و فیلتر شده برای تولید توان 60 هرتز به شبکه.

8-6 - توان میانگین باد

معادلات مربوط به توان موجود در باد ارایه گردید و اجزای اصلی یک سیستم توربین بادی توصیف شد، حال زمان این فرا رسیده است تا این دو را در کنار هم بگذاریم تا تعیین کنیم که یک توربین چه مقدار انرژی میتواند در بادهای مختلف تولید کند؟

رابطه مکعبی (توان 3) بین توان باد و سرعت به ما میگوید که ما نمیتوانیم توان میانگین در باد را به سادگی با جایگذاری سرعت باد میانگین در رابطه 6-4 تعیین کنیم. ما این موضوع را در مثال 6-1 مشاهده کردیم. ما میتوانیم شروع کنیم به بررسی این ویژگی مهم غیر خطی با بازنویسی رابطه 6-4 برحسب مقادیر میانگین شروع کنیم:

$$P_{avg} = \left(\frac{1}{2}\rho A v^3\right)_{avg} = \frac{1}{2}\rho A (v^3)_{avg} \quad (29-6)$$

به عبارت دیگر ، ما نیاز داریم که مقدار میانگین مکعب سرعت را پیدا کنیم . برای انجام این کار لازم است که ما تعدادی آمار و ارقام معرفی کنیم.

6-8-1 نمودار میله ای گسسته باد

قصد داریم که با ریاضیات آمار و احتمال که ممکن است برای بعضی از اشخاص حوزه جدیدی باشد کار کنیم . با چند مفهوم ساده شروع میکنیم که شامل توابع گسسته میشود که این توابع خود شامل سرعت های باد میشوند و آن گاه میتوانیم به توابع پیوسته کلی تر پردازیم.

منظور از مقدار میانگین یک کمیت چیست ؟ فرض کنید ، برای مثال ما اطلاعاتی درباره باد در یک محل جمع آوری کرده ایم و میخواهیم بدانیم که چگونه مقدار میانگین سرعت باد را در مدت زمان اندازه گیری بدست آوریم.

سرعت میانگین باد را میتوان مجموع تمام متر ها ، کیلومتر ها یا مایل هایی دانست که باد وزیده است ، تقسیم بر زمانی که این عمل طول کشیده است. فرض کنید برای مثال در طول مدت زمان 10 ساعت ، به مدت 3 ساعت هیچ بادی نوزیده است ، 3 ساعت باد با سرعت 5 مایل بر ساعت و 4 ساعت با سرعت 10 مایل بر ساعت وزیده است ، سرعت باد میانگین برابر خواهد بود با :

$$u_{avg} = \frac{\text{سرعت باد بر حسب مایل}}{\text{مجموع ساعات}} \quad (30-6)$$

با دوباره مرتب کردن بعضی از روابط 6-30 ما میتوانیم به قضیه این گونه نگاه کنیم که 30% اوقات بادی نداریم، 30% اوقات بادی با سرعت 5mph داریم و 40% اوقات بادی با سرعت 10mph خواهیم داشت:

$$v_{avg} = \left(\frac{3h}{10h}\right) \times 0mph + \left(\frac{3h}{10h}\right) \times 5mph + \left(\frac{4h}{10h}\right) \times 10mph = 5.5mph \quad (31-6)$$

ما میتوانیم روابط 6-30 و 6-31 را به صورت کلی تری بنویسیم.

$$v_{avg} = \frac{\sum_i [v_i \cdot (\text{hours @ } v_i)]}{\sum \text{hours}} = \sum_i [v_i \cdot (f \text{ fraction of horse @ } v_i)] \quad (32-6)$$

در نهایت اگر آن بادها معمولی باشند میتوانیم بگوییم احتمال این که باید نباشد 0,3 است. احتمال این که باد با سرعت 5 مایل در ساعت باشد 0/3 است و احتمال این که سرعت 10 مایل در ساعت باشد 0/4 است. میتوانیم مقدار میانگین را توسط عبارات احتمالی توصیف کنیم:

$$v_{avg} = \sum_i [v_i \cdot \text{probability}(v = v_i)] \quad (33-6)$$

از رابطه 6-29 در می یابیم که هدف ما از تعیین توان میانگین باد بدست آوردن مقدار میانگین V^3 میباشد نه V . فرآیند بدست آوردن میانگین دقیقاً شبیه مثال ساده در بالا می باشد:

$$(v^3)_{avg} = \frac{\sum_i [v_i^3 \cdot (\text{hours @ } v_i)]}{\sum \text{hours}} = \quad (34-6)$$

$$\sum_i [v_i^3 \cdot (\text{fraction of hours @ } v_i)] = \frac{3h \cdot 0 \text{mile/hr} + 3h \cdot 5 \text{mile/h} + 4h \cdot 10 \text{mile/h}}{3+3+4h} = 5.5 \text{mph}$$

یا در عبارات احتمالی:

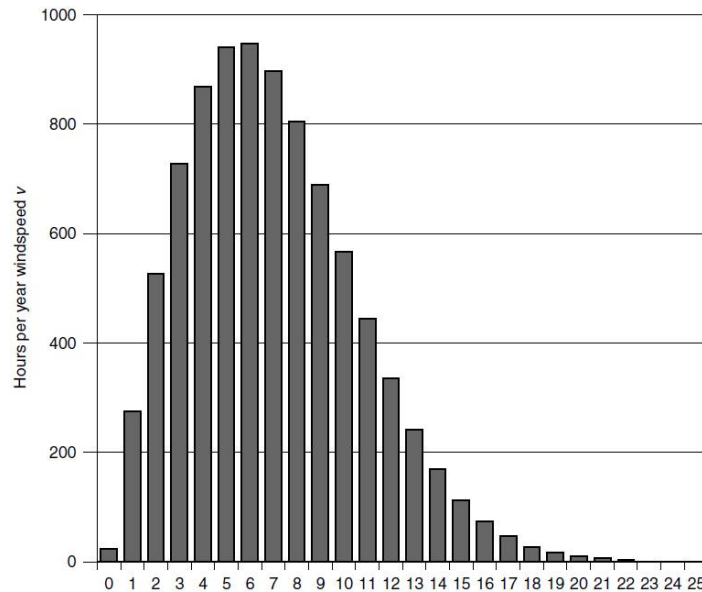
$$(v^3)_{avg} = \sum_i [v_i^3 \cdot \text{probability}(v = v_i)] \quad (35-6)$$

فرض کنید ما بادسنجی داریم که اطلاعات منطقه را برحسب ساعات وزیدن در سال با سرعت 1m/s (0,5m/s تا 1,5m/s)، با سرعت 2m/s (1,5m/s تا 2,5m/s) و به همین ترتیب جمع میکند و روی هم انباشته میکند.

مثال 6-9 میانگین توان باد. با استفاده از داده های شکل 6-22 میانگین سرعت باد و توان متوسط باد را حساب نمایید. فرض کنید چگالی هوای استاندارد 1.225 kg/m^3 است. نتایج را زمانی که توان میانگین با استفاده از سرعت متوسط بار اشتباه پیش بینی شود، مقایسه نمایید.

حل: لازم است داده های جدول را برای تعیین میانگین سرعت و مقدار متوسط V^3 تنظیم نمایید. یک خط از جدول را با استفاده از 805h/yr در 8m/s بدست می آوریم.

v (m/s)	Hrs/yr
0	24
1	276
2	527
3	729
4	869
5	941
6	946
7	896
8	805
9	690
10	565
11	444
12	335
13	243
14	170
15	114
16	74
17	46
18	28
19	16
20	9
21	5
22	3
23	1
24	1
25	0
Total hrs	8,760



شکل 6-22 یک مثال از داده های سایت و در نتیجه نمودار باد که نشان دهنده وزش باد با سرعت های متفاوت است .

$$\frac{8m}{s} \text{ کسر ساعات سالیانه با } = \frac{805h/yr}{24h/d * 365d/y} = 0.0919$$

$$(v_8) * \frac{8m}{s} \text{ کسر ساعت در } = \frac{8m}{s} * 0.0919 = 0.735$$

$$(v_8)^3 * 8 \text{ m/s کسر ساعت در } = 8^3 * 0.0919 = 47.5$$

یک جدول نمونه از این گونه اطلاعات همراه با نمودار میله ای در شکل 6-22 نشان داده شده است .
برای بقیه نقاط تعیین میانگین توان با استفاده از 6-29 به صورت جدول زیر است.