

ارزیابی و مقایسه توربین های سرعت ثابت و متغیر به منظور بهینه سازی دریافت انرژی نیروگاه بادی دیزباد

مسعود اکبری ثانی - حمید خالوزاده

دانشگاه فردوسی مشهد - کمیته تحقیقات شرکت توزیع برق مشهد

مشهد، ایران

واژه های کلیدی: توزیع احتمالی ویبول، تابع گرما، توربین های بادی سرعت ثابت و متغیر، انرژی سالیانه باد

چکیده:

۱. مقدمه

برای استفاده حداکثر و بهینه سازی دریافت انرژی بادی، توربین های بادی سرعت متغیر و ثابت مورد بررسی قرار می گیرند. سنجش این بهینگی به وسیله میزان تولید سالیانه انرژی الکتریکی توسط این توربین ها صورت می گیرد. بدین منظور، توزیع چگالی احتمال باد برای تعیین تعداد ساعت های یک سرعت خاص باد، در یک سال مورد نیاز می باشد. به کمک روابط ریاضی، مجموع انرژی سالیانه توربین بادی در منطقه دیزباد خراسان با توجه به مشخصه باد آن منطقه محاسبه می شود. در این مقاله، بهترین ضریب گیربکس با توجه به توزیع سالیانه برای توربین سرعت ثابت محاسبه می شود. سپس، مجموع توان سالانه توربین بادی سرعت متغیر و ثابت برای منطقه دیزباد خراسان، محاسبه و مقایسه می شود.

در سال های اخیر بحران های نفتی و آلودگی های ناشی از احتراق سوخت های فسیلی و شتاب فزاینده بشر در جهت پایان بردن این منابع، تمایلات جدیدی در زمینه فن آوری استفاده از باد جهت تولید برق، متصل به شبکه ایجاد کرده است. به طوری که تا پایان سال ۲۰۰۱ ظرفیت توربین های بادی متصل به شبکه ۵۰۰۰ مگاوات بوده است، که عمدتاً در امریکا (۲۰۰۰ مگاوات) و دانمارک می باشد. عوامل این پیشرفت شامل کاهش قیمت انرژی بادی و افزایش قیمت سوخت های فسیلی و مسائل زیست محیطی بوده است. در راستای کاهش قیمت ها عواملی از قبیل: افزایش اندازه توربین ها، کاهش وزن توربین ها، تولید انبوه، پیشرفت در زمینه کنترل و الکترونیک قدرت و پیشرفت در طراحی پره ها مؤثر بوده است. [1]

همگام با پیشرفت های جهانی در زمینه انرژی بادی، وزارت نیرو تصمیم به احداث نیروگاه ۲۸/۴

نتایج نشان می دهد که در حالت کارکرد سرعت متغیر، توان نیروگاه بادی بیشتر خواهد بود.

سیکل سالانه باد در یک منطقه خاص مانند دیزباد، میزان انرژی سالیانه توربین بایستی محاسبه گردد. این امر مستلزم توزیع احتمالی سالیانه سرعت باد در یک منطقه خاص و ترکیب آن با مشخصه های کنترلی توربین بادی است. تا میزان انرژی سالیانه توربین بادی حاصل گردد.

۲. محاسبه انرژی سالیانه توربین بادی دیزباد

یک روش برای تعیین تولید انرژی سالیانه نیروگاه بادی دیزباد، تعیین میزان تولید توان آن با توجه به توزیع سرعت باد است. با توجه به ماهیت تصادفی باد و با اندازه گیری های فراوان در بازه های مختلف زمانی تابع چگالی احتمال سرعت باد^۱ (PDF) به دست آمده است. برای هر چارچوب زمانی، سرعت باد به عنوان یک متغیر تصادفی به صورت یک توزیع احتمال ویبول^۲ است، که تابع احتمال آن به صورت زیر است.

$$f(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (1)$$

که در آن v سرعت باد به صورت متر بر ثانیه و c فاکتور قیاس^۳ و k فاکتور شکل^۴ است. که بسته به رژیم باد در هر نقطه از کره زمین فرق می کند. در شکل های (۱) و (۲) تأثیر تغییرات c و k در تابع چگالی احتمال نشان داده شده است. بایستی توجه داشت که مقادیر k, c از توزیع سالیانه سرعت باد و نمونه گیری ساعت به ساعت در مدت یکسال (۸۶۴۰ نمونه) حاصل می شود. [7]

مگاواتی در منطقه دیزباد خراسان گرفته است. این نیروگاه شامل ۴۳ توربین ۶۶۰ کیلوواتی می باشد. این توربین ها ساخت شرکت (Nordex) دانمارک می باشند. مشخصات فنی توربین ها در ضمیمه آمده است.

اگر چه توربین های بادی سرعت ثابت به علت سادگی و دارا بودن فرکانس ثابت، هم اکنون سهم زیادی از توربین های بادی ساخته شده در دنیا را به خود اختصاص داده اند. اما با پیشرفت هایی که در زمینه الکترونیک قدرت در سال های اخیر صورت گرفته است، کارکرد این توربین ها به صورت سرعت متغیر امکان پذیر شده است. با تنظیم سرعت رتور در این توربین ها، توربین بادی برای سرعت های مختلف باد، همواره در نقطه بهینه توان قرار می گیرد. [2]

برای کارکرد سرعت متغیر توربین بادی طرح های مختلفی پیشنهاد شده است. در [3] از یک روش فازی برای کنترل گشتاور الکترومغناطیسی در جهت بهبود عملکرد دینامیکی و دریافت حداکثر توان استفاده شده است. در [4] با کنترل زاویه آتش مبدل کموتاسیون خط از اضافه ولتاژ در طرف شبکه در سرعت های بالای باد جلوگیری شده است. همچنین برخی روش های پیچیده برای کنترل انحراف میدان در جهت تعیین جهت جریان توان موتورها استفاده شده است [5]. یکی دیگر از روشهای کنترلی، استفاده از یک مبدل ساده ولتاژ/فرکانس برای تنظیم سرعت توربین است. [6]

عمده این مقالات، بر روی روش های کنترلی در تبدیل انرژی تکیه دارند و کمتر بر روی برتری روش های سرعت متغیر نسبت به سرعت ثابت اشاره می کنند. معیار برتری سیستم های سرعت متغیر، میزان استخراج انرژی از توربین بادی است. با توجه به

1. Probability Density Function
2. Weibull Distribution
3. Scale Factor
4. Shape Factor

در ادامه سرعت بیشترین احتمال وقوع باد (V_{mp}) نیز از رابطه (6) حاصل می گردد.

$$V_{mp} = c \left(1 - \frac{1}{k}\right)^{\frac{1}{k}} \quad (6)$$

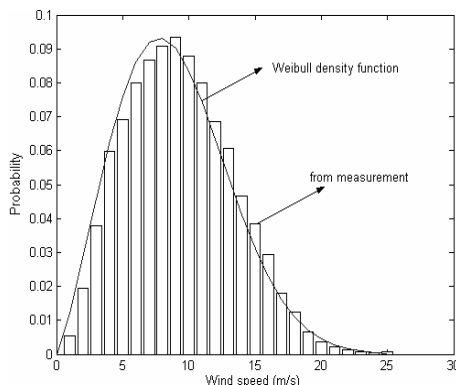
اثبات روابط (6)-(2) در ضمیمه ۲ آورده شده است.

با در نظر گرفتن حالت خاص $k=2$ و $c = \frac{2\bar{v}}{\sqrt{\pi}}$ توزیع رایلی^۵ برای تخمین باد به دست می آید. این توزیع به علت داشتن پارامتر کمتر برای محاسبات سالانه مناسب است. این توزیع به شکل صفحه بعد قابل بیان است.

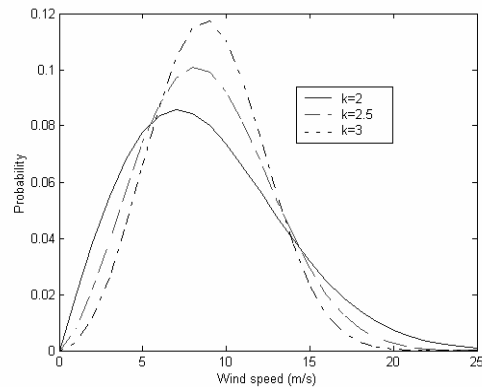
$$f(v) = \frac{\pi v}{2\bar{v}^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{v}{\bar{v}}\right)^2\right] \quad (7)$$

که در آن \bar{v} متوسط سرعت باد است.

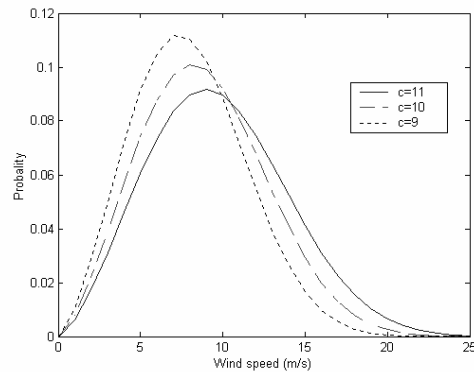
در این مقاله اندازه گیری ساعت به ساعت سرعت باد در سال ۷۶ در منطقه دیزباد روستای حسین آباد در جدول (۱) ارائه می شود [8]. با استفاده از نرم افزار (Wind Data Analyzer) مقادیر k, c برای این توزیع به دست آمده است. در شکل (۳) تابع چگالی احتمال باد با k, c محاسبه شده در یک طرف و با اندازه گیری و احتمال اتفاق در طرف دیگر رسم شده است. همان طور که شکل (۳) نشان می دهد، شباهت زیادی بین مدل سازی و اندازه گیری وجود دارد.



شکل (۳) نمودار تابع چگالی احتمال باد از روی مدل و اندازه گیری



شکل (۱) تغییرات تابع چگالی احتمال به ازاء تغییرات $c=10$ و k



شکل (۲) نمودار تغییرات تابع چگالی احتمال به ازاء تغییرات $k=2.5$ و c

متوسط سرعت باد از رابطه زیر حاصل می شود.

$$\bar{v} = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (2)$$

که Γ تابع گاما است؛ که به صورت زیر تعریف می شود [7].

$$\Gamma(a) = \int_0^{\infty} x^{a-1} e^{-x} dx \quad (3)$$

همچنین واریانس باد به صورت تابعی از گاما و k به دست می آید.

$$S^2 = c^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right] \quad (4)$$

همچنین سرعت حاوی بیشترین مقدار انرژی از رابطه زیر حاصل می شود.

$$V_{mec} = c \left(1 + \frac{2}{k}\right)^{\frac{1}{k}} \quad (5)$$

برای به دست آوردن توان متوسط سالیانه هر توربین بادی دیزباد (\bar{P}_T) تنها نیازمند توان تولیدی متناظر $P(v)$ با هر سرعت باد می باشیم. با توجه به رابطه صفحه بعد میزان توان متوسط سالیانه هر توربین بادی محاسبه می شود.

$$\bar{P}_T = \sum_{v=v_{cut-in}}^{v=v_{cut-out}} P(v) \times p(V=v) \quad (8)$$

که در آن (\bar{P}_T) توان متوسط سالیانه هر توربین بادی بر حسب کیلووات و v_{cut-in} ، $v_{cut-out}$ سرعت قطع پایین و بالای توربین ها و $P(v)$ توان تولیدی متناظر بر حسب کیلووات و $p(V=v)$ احتمال وقوع سرعت باد در مقدار (v) می باشد.

پس از محاسبه توان متوسط سالیانه، میزان انرژی تولیدی سالیانه توربین بادی بر حسب کیلووات ساعت از رابطه زیر حاصل می شود.

$$E_{total} = 8760 \times \bar{P}_T \quad (9)$$

میزان توان تولیدی متناظر با سرعت باد که در محاسبات بالا استفاده شده است، وابسته به کنترلی است که به توربین اعمال می شود. در تمامی این حالات، توان تولید شده به سرعت باد و سرعت توربین بستگی دارد.

۳. محاسبه توان توربین بادی دیزباد

میزان توان تولیدی یک توربین بادی، به سرعت باد و سرعت رتور و زاویه فراز^۱ توربین بادی بستگی دارد. با تعریف فوق رابطه توان به شکل رابطه (10) نوشته خواهد شد.

$$P_T = A_R \cdot \frac{\rho}{2} C_p V^3 \quad (10)$$

که در سیستم فوق P_T قدرت مکانیکی توربین،

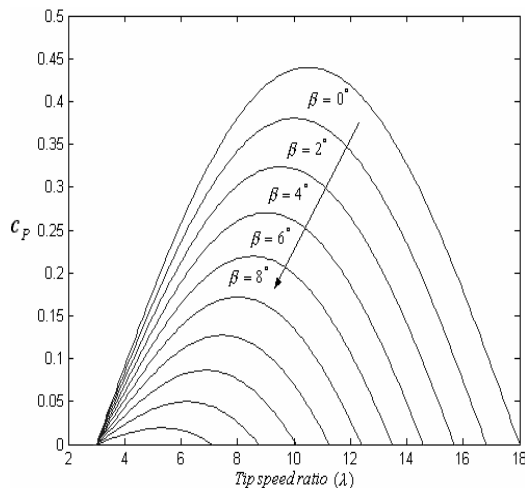
با توجه به تغییرات پیوسته سرعت باد، برای جلوگیری از حجم بالای محاسبات، تغییرات سرعت باد را با بازه $1m/s$ تقسیم کرده. و وسط هر بازه به عنوان نماینده آن در نظر گرفته شده است.

ردیف	دسته	سرعت متوسط	فراوانی	درصد احتمال
۱	۰/۵-۱/۵	۱	۴۷	۰/۵۳
۲	۱/۵-۲/۵	۲	۱۷۰	۱/۹۴
۳	۲/۵-۳/۵	۳	۳۳۲	۳/۷۹
۴	۳/۵-۴/۵	۴	۵۲۳	۵/۹۷
۵	۴/۵-۵/۵	۵	۶۰۵	۶/۹۱
۶	۵/۵-۶/۵	۶	۷۰۲	۸/۰۱
۷	۶/۵-۷/۵	۷	۷۵۹	۸/۶۶
۸	۷/۵-۸/۵	۸	۷۹۵	۹/۰۷
۹	۸/۵-۹/۵	۹	۸۱۸	۹/۳۴
۱۰	۹/۵-۱۰/۵	۱۰	۷۷۱	۸/۷۹
۱۱	۱۰/۵-۱۱/۵	۱۱	۶۹۹	۷/۹۹
۱۲	۱۱/۵-۱۲/۵	۱۲	۶۰۱	۶/۸۵
۱۳	۱۲/۵-۱۳/۵	۱۳	۵۳۲	۶/۰۸
۱۴	۱۳/۵-۱۴/۵	۱۴	۴۰۸	۴/۶۶
۱۵	۱۴/۵-۱۵/۵	۱۵	۳۳۷	۳/۸۵
۱۶	۱۵/۵-۱۶/۵	۱۶	۲۵۷	۲/۹۴
۱۷	۱۶/۵-۱۷/۵	۱۷	۱۵۷	۱/۷۹
۱۸	۱۷/۵-۱۸/۵	۱۸	۱۰۹	۱/۲۴
۱۹	۱۸/۵-۱۹/۵	۱۹	۵۸	۰/۶۶
۲۰	۱۹/۵-۲۰/۵	۲۰	۳۳	۰/۳۸
۲۱	۲۰/۵-۲۱/۵	۲۱	۱۹	۰/۲۲
۲۲	۲۱/۵-۲۲/۵	۲۲	۱۱	۰/۱۳
۲۳	۲۲/۵-۲۳/۵	۲۳	۷	۰/۰۸
۲۴	۲۳/۵-۲۴/۵	۲۴	۴	۰/۰۵
۲۵	۲۴/۵<	۲۵	۶	۰/۰۷

c	K	V_{av}	\bar{V}	V_{mec}	V_{mp}	S
۱۰/۰۴	۲/۴۷	۹/۴	۸/۹۰	۱۲/۷۵	۸/۱	۳/۸

جدول (۱) اطلاعات آماری وزش باد در دیزباد(۷۶)

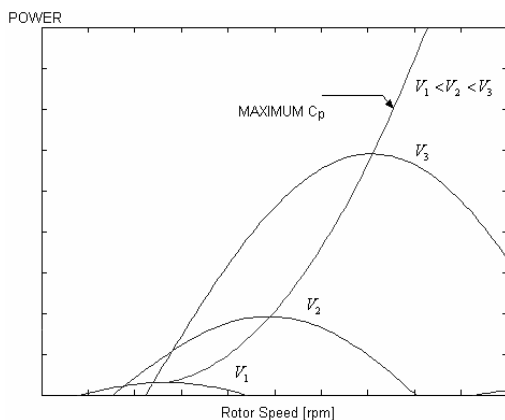
6. Pitch angle



شکل (۴) تغییرات ضریب توان نسبت به (λ) برای زوایای فراز مختلف

۴. کنترل توربین بادی سرعت متغیر

در توربین بادی سرعت متغیر، برخلاف حالت سرعت ثابت، تغییرات سرعت رتور در ازاء تغییرات سرعت باد خواهد بود. در نتیجه همواره در نقطه بهینه ضریب توان خواهیم بود. همان طور که شکل (۵) نشان می دهد، برای هر سرعت خاص باد، یک منحنی توان بر حسب سرعت رتور وجود دارد.



شکل (۵) رابطه توان توربین بادی برای سرعت های مختلف باد

کلید روش های کنترلی در جهت برقراری و قراردادن توربین در نقطه پیک توان خود می باشند.

[3],[4],[5],[6]

A_R سطح جاروب شده پره های رتور، ρ چگالی هوا، V سرعت متوسط ورودی باد و C_p ثابت قدرت توربین می باشد. [9]

ثابت قدرت C_p را می توان از طریق اندازه گیری مستقیم و یا از طریق محاسبات آیرودینامیکی به دست آورد. ثابت قدرت تابعی از زاویه پره ها و نسبت سرعت نوک پره به سرعت باد و تعداد پره ها می باشد. $(C_p(\lambda, \beta))$ و معمولاً توسط سازندگان در اختیار مصرف کننده قرار می گیرد. این ثابت قدرت به صورت زیر تعریف شده است. [10]

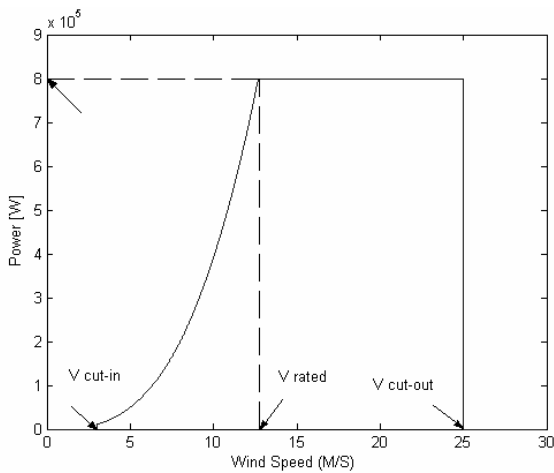
$$C_p(\lambda, \beta) = (0.44 - 0.0167\beta) \sin\left[\frac{\pi(\lambda-3)}{15-0.3\beta}\right] - 0.00184(\lambda-3) \cdot \beta \quad (11)$$

که در آن β زاویه فراز پره ها و $\lambda = \frac{R \cdot \omega_R}{V}$ است. ω_R سرعت زاویه ای چرخش پره های توربین و R شعاع رتور است.

همان طور که دیده می شود، عملاً قدرت مکانیکی توربین بادی به سه عامل سرعت باد، زاویه پره ها و سرعت زاویه ای رتور ارتباط دارد.

در نیروگاه بادی دیزباد، توربین ها مکانیزم کنترل زاویه فراز ندارند و زاویه انحراف آنها ثابت است. شکل (۴) تغییرات ضریب توان با تغییرات (λ) نشان داده شده است.

در توربین های بادی سرعت ثابت، سرعت رتور همواره ثابت است. بنابراین، وقتی که سرعت باد تغییر کند، مقدار (λ) و در نهایت ضریب توان تغییر خواهد کرد. از آنجایی که منحنی مشخصه ضریب توان تنها در یک مقدار (λ) ماکزیمم دارد، می توان نتیجه گرفت که توربین های بادی سرعت ثابت تنها در یک سرعت باد دارای ضریب بهینه ماکزیمم می باشند.



شکل (۷) تغییرات توان توربین بادی سرعت متغیر نسبت به باد

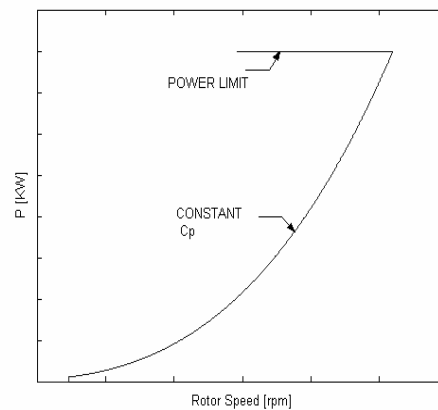
۵. تولید انرژی در کارکرد سرعت ثابت

در سال های اخیر سیستم های بادی سرعت ثابت به دلیل سادگی و قابلیت اطمینان بالاتر، بیشتر مورد توجه قرار گرفته اند. این امر خصوصاً در توربینهای با ظرفیت بالاتر از ۱۰۰ کیلووات نمود بیشتری داشته است.

از آنجایی که توان تولیدی توربین بادی به سرعت باد و سرعت رتور بستگی دارد، در صورتی که ژنراتور بخواهد در سرعت ثابت کار کند، مجموع انرژی سالیانه هر توربین بادی کاملاً وابسته به چگالی احتمال سالیانه باد و ضریب گیربکس انتقال دهنده خواهد شد. شکل (۸) تغییرات انرژی سالیانه یک توربین بادی دیزباد را به ازاء ضریب گیربکس های متفاوت، با توجه به سیمای خاص باد در آن منطقه ($k = 2.27, c = 10.04$) نشان می دهد. نمودار نشان می دهد که یک ضریب گیربکس بهینه برای کارکرد توربین بادی سرعت ثابت، بر پایه توزیع سالیانه باد در آن محل وجود دارد. برای منطقه دیزباد، بهترین ضریب گیربکس برابر با $۳۴/۵$: ۱ است که در آن شرایط مجموع انرژی سالیانه توربین بادی برابر با $۲۶۴۲/۲$ مگاوات ساعت شده و متوسط تولید توان آن $۳۰۱/۵$

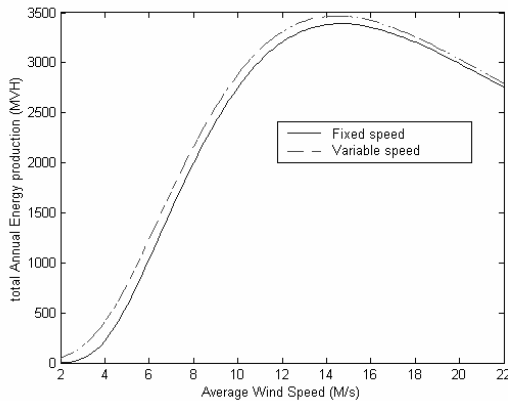
بایستی توجه داشت که در زمان راه اندازی محدودیتی از لحاظ توان وجود دارد. به این ترتیب، کنترل ما به دو ناحیه تقسیم می شود. ناحیه حداکثر ضریب توان و ناحیه توان محدود.

همان طور که در شکل (۶) دیده می شود، از سرعت قطع پایین، که توربین شروع به کار می کند تا سرعت نامی که توربین به توان نامی خود می رسد، همواره در مسیر حداکثر ضریب توان خواهیم بود. اگر سرعت باد از مقدار نامی خود بیشتر شود، در این صورت وارد ناحیه توان محدود خواهیم شد. در این شرایط با کاهش سرعت توربین، توان را در حد توان نامی ژنراتور قرار خواهیم داد. اگر سرعت باد در این حالت از سرعت قطع بالای توربین بیشتر شود، سیستم تنظیم قطع (Stall regulation) برای جلوگیری از وارد آمدن فشار اضافی بر شافت ژنراتور وارد عمل شده و توربین را قطع می کند.



شکل (۶) ناحیه های مختلف کارکرد توربین بادی سرعت متغیر

شکل (۷) نمودار تغییرات توان خروجی توربین بادی سرعت متغیر را نسبت به تغییرات سرعت باد بیان می کند.



شکل (۹) مقایسه تولید انرژی سالیانه سیستم سرعت متغیر و ثابت

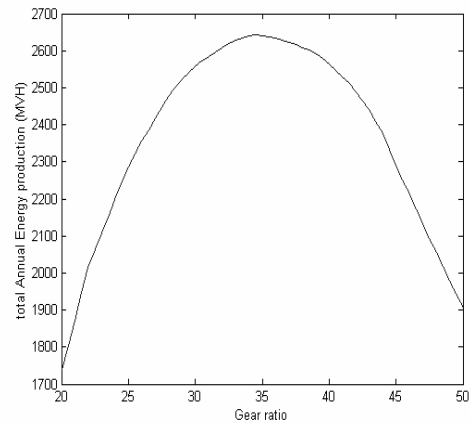
۷. نتیجه گیری

در این مقاله، ابتدا یک روش برای اندازه گیری میزان انرژی بادی تولید شده در نیروگاه بادی دیزباد بیان شد. از آنجایی که میزان انرژی سالیانه تولیدی در سیستم سرعت ثابت با ضریب گیربکس تغییر می کند، یک ضریب گیربکس بهینه برای منطقه دیزباد حاصل شده است. با توجه به این مسأله مقایسه ای بین سیستم سرعت متغیر و ثابت برای مناطق مختلف بیان شد. نتایج این تحقیق نشان می دهد که اگر چه با انتخاب ضریب گیربکس مناسب در سیستم سرعت ثابت می توان تولید انرژی سالیانه را افزایش داد، اما در سیستم سرعت متغیر به علت استفاده بهینه از سرعت باد، میزان انرژی به طور چشمگیری بهتر خواهد بود. زیرا این سیستم قابلیت انعطاف بیشتری در تغییرات سرعت باد دارد.

مراجع

- [1]. Randall Swisher and Christine Real De Azua and Julie Clendenin." Strong Wind on The Horizon: Wind Power Comes of Age." *Proceedings of the IEEE*, Vol. 89, No. 12, Dec 2001

کیلووات خواهد شد. در این شرایط مجموع انرژی سالیانه نیروگاه بادی دیزباد برابر با ۱۱۳/۶ گیگاوات ساعت و متوسط توان آن ۱۲/۹۶ مگاوات خواهد بود.



شکل (۸) نوسانات مجموع انرژی سالیانه نسبت به تغییرات ضریب گیربکس برای منطقه دیزباد

۶. تولید انرژی در کارکرد سرعت متغیر

در مقایسه با سیستم سرعت ثابت، میزان تولید انرژی سالیانه برای سیستم بادی سرعت متغیر نیز محاسبه شده است. در این قسمت توزیع رایلی برای سرعت باد در نظر گرفته شده است. در حالت سرعت ثابت ضریب گیربکس را در مقدار بهینه خود $34/5$ قرار داده و متوسط سالیانه سرعت باد را از مقدار ۲ متر بر ثانیه تا ۲۲ متر بر ثانیه تغییر می دهیم. همان طور که در شکل (۹) دیده می شود، سیستم سرعت متغیر برای هر ساختار باد، توان بیشتری تولید می کند. به عنوان مثال برای منطقه دیزباد با متوسط باد حدود $9/5$ متر بر ثانیه میزان انرژی حدوداً ۲۶۰۰ مگاوات ساعت خواهد بود، که با نتایج قسمت قبل هم خوانی دارد. در این شرایط سیستم سرعت متغیر در حدود ۲۷۳۰ مگاوات ساعت تولید انرژی سالیانه خواهد داشت که ۵٪ بیشتر از سیستم سرعت ثابت (در بهترین شرایط) می باشد. با انتخاب ضرایب دیگر برای گیربکس این درصد بیشتر نیز خواهد شد.

ضمیمه ۱

مشخصات فنی توربین بادی دیزباد

نوع توربین	سه پره ای، محور افقی
قطر رتور	۴۳ متر
تنظیم توان	تنظیم با پدیده قطع (Stall)
سرعت قطع پایین باد	۳-۴ متر بر ثانیه
سرعت نامی باد	۱۳ متر بر ثانیه
سرعت قطع بالای باد	۲۵ متر بر ثانیه
توان نامی ژنراتور	۶۶۰ کیلووات
سرعت سنکرون ژنراتور	۱۵۰۰ دور بر دقیقه

ضمیمه ۲: اثبات روابط ارجاع داده شده:

با توجه به تابع چگالی احتمال باد، سرعت متوسط از رابطه زیر به دست می آید.

$$\bar{v} = \int_0^{\infty} v f(v) dv \quad (\text{ض-1})$$

با توجه به توزیع ویبول:

$$\bar{v} = \int_0^{\infty} v \cdot \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) dv \quad (\text{ض-2})$$

با تغییر متغیر $x = \left(\frac{v}{c}\right)^k$ داریم:

$$\bar{v} = \int_0^{\infty} c x^{\frac{1}{k}} \exp(-x) dx = c \int_0^{\infty} x^{\left(\frac{1}{k}-1\right)} \exp(-x) dx \quad (\text{ض-3})$$

در نتیجه:

$$\bar{v} = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (\text{ض-4})$$

واریانس سرعت باد از رابطه زیر حاصل خواهد شد.

$$S^2 = \overline{v^2} - \bar{v}^2 \quad (\text{ض-5})$$

در نتیجه:

$$S^2 = \int_0^{\infty} v^2 f(v) - c^2 \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (\text{ض-6})$$

مشابه حالت قبل

- [2]. Chris S. A. Brune & Alan. K. Wallace, "Experimental Evaluation of a Variable Speed , Doubly-Fed Wind Power Generation System", *IEEE Trans on Industry Application* , Vol. 30, No. 3, May, June. 1994
- [3]. Z. Chen and M. Mc. CormicK, "A fuzzy logic controlled power electronic system for variable speed wind energy conversion systems". *IEEE Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives*, 18-19 September
- [4]. R. M. Hilloowala & A. M. Sharaf, "A Utility Interaction Wind Energy Conversion Scheme With an Asynchronous DC link Using a Supplementary Control Loop", *IEEE Trans on Energy Conversion*, Vol. 9, No. 3, September 1994
- [5]. L. Xu and W. Cheng , "Torque and reactive power control of a doubly fed induction machine by position sensorless scheme", *IEEE Trans on Ind. Appl*, Vol. 31, No. 3, May 1995, pp. 636-642
- [6]. A. Miller, E. Muljadi, and D. S. Zinger, "A variable speed wind turbine power control.", presented at the *IEEE/PES Summer Meeting*, July, 1996, Denver, CO
- [7]. B. M. Jatzeck and A.M. Robinson, "Estimation of the optimum rated wind velocity for wind turbine generators" *2000 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering* , Edmonton , Alberta , Canada May 9-12 1999
- [۸] علی کیانی فر "بررسی و تحلیل موجودیت انرژی باد در منطقه دیزباد خراسان " دومین همایش ملی انرژی ایران
- [9]. M. U. Kund & R. Patel, 1999. "Wind and Solar Power Systems. " CRC Press, New york. 1999
- [10]. Ezzeldin S. Abdin and Wilson Xu. "Control Design and Dynamic Performance Analysis of a Wind Turbine- Induction Generator Unit" *IEEE Transe on energy conversion*, Vol. 15, No. 1, March 2000

$$\int_0^{\infty} v^2 f(v) dv = \int_0^{\infty} c^2 x^{\frac{2}{k}} \exp(-x) dx \quad \text{(ض-7)}$$

در نتیجه خواهیم داشت:

$$S^2 = c^2 \left[\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right) \right] \quad \text{(ض-8)}$$

با توجه به توزیع احتمالی توان به صورت $P(v) = v^3 f(v)$ سرعت حامل بیشترین احتمال توان از رابطه زیر به دست می آید .

$$\frac{d}{dv}(P(v)) = 0 \Rightarrow V_{mec} = v \quad \text{(ض-9)}$$

با جایگذاری داریم:

$$3f(v) + vf'(v) = 0 \quad \text{(ض-10)}$$

با مشتق گیری داریم:

$$f'(v) = \left(\frac{k}{c}\right)^2 \left(\frac{v}{c}\right)^{k-2} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \left(\frac{k-1}{k} - \left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \quad \text{(ض-11)}$$

با جایگذاری در (ض-10) و ساده سازی داریم:

$$k + 2 = ke^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad \text{(ض-12)}$$

در نهایت V_{mec} به صورت زیر محاسبه می شود:

$$V_{mec} = c \left(1 + \frac{2}{k}\right)^{\frac{1}{k}} \quad \text{(ض-13)}$$

سرعت دارای بیشترین احتمال وقوع باد V_{mp} از رابطه زیر حساب می شود.

$$\frac{d}{dv}(f(v)) = 0 \Rightarrow V_{mp} = v \quad \text{(ض-14)}$$

با توجه به رابطه (ض-11) به سادگی این سرعت محاسبه می شود.

$$V_{mp} = c \left(1 - \frac{1}{k}\right)^{\frac{1}{k}} \quad \text{(ض-15)}$$