

تخمین منحنی آیرودینامیک و بهبود پروفیل توان توربین بادی ۷۱۰ کیلووات بینالود

امید دلاوری^۱، سید عباس طاهر^۲ و محسن رحیمی^۳

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه کاشان، omidela@yahoo.com

^۲ عضو هیات علمی، دانشگاه کاشان، sataher@kashanu.ac.ir

^۳ عضو هیات علمی، دانشگاه کاشان، rahimi_mohsen@yahoo.com

چکیده - جهت ارزیابی بازدهی یک توربین و بهره‌وری از انرژی باد، باید اطلاعات دقیقی از تبدیل انرژی جنبشی باد به انرژی مکانیکی برای هر توربین بادی موجود باشد که لازمه آن اطلاع دقیق از عملکرد سیستم آیرودینامیک آن است. یکی از فاکتورهای اساسی در طراحی آیرودینامیک توربین‌ها ضریب بازدهی (C_p) است. در مطالعات ضریب بازدهی توسط عباراتی محاسبه می‌شود که ضعف اساسی آنها وابستگی به عوامل فنی توربین و شرایط محیطی می‌باشد. بنابراین تخمین منحنی آیرودینامیک از روی داده‌های عملی به ویژه برای واردکنندگان این سیستم‌ها از لحاظ فنی و اقتصادی حائز اهمیت است. در این مقاله با استفاده از داده‌های عملی به تخمین منحنی آیرودینامیک توربین بادی ۷۱۰ کیلووات بینالود پرداخته شده است. سپس با استفاده از منحنی آیرودینامیک تخمین زده شده روش کنترل توان بهینه (OPC) جهت بهبود پروفیل توان در زیر سرعت نامی باد ارائه گردیده است. از طرفی برای سرعت‌های نامی باد با مقایسه حالات مختلف در منحنی توان، بهترین عملکرد جهت بهره‌وری بیشتر با حفظ محدودیت‌های موجود انتخاب شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان‌دهنده دقت بالای منحنی آیرودینامیک تخمینی و ضرورت استفاده از داده‌های عملی برای مطالعه، تحلیل و بهینه‌سازی سیستم‌های تبدیل انرژی بادی می‌باشد؛ بگونه‌ای که با مقایسه نتایج، زوایای کار به صورت عملی مشخص و تبیین می‌شود.

کلید واژه - توربین بادی، سیستم آیرودینامیک، ضریب بازدهی، منحنی توان

۱- مقدمه

ضریب بازدهی C_p که وابسته به پارامترهای پره توربین (طراحی پره، نرخ سرعت نوک و زاویه پیچ^(۱)) [۲]، ابعاد رتور و چگالی هوای مرجع می‌باشد تعیین گردد. برای مثال در [۳] ضریب بازدهی از طریق یک عبارت که با شعاع پره‌ها، ثابت طراحی پره و سرعت زاویه‌ای شفت توربین مرتبط است محاسبه شده است. در [۴] یک عبارت برای تقریب C_p پیشنهاد می‌شود که پارامترهایی از قبیل ضریب بازدهی نامی، سرعت باد نامی و یک پارامتر که بیان کننده محدوده عملکرد سرعت باد می‌باشد را در نظر می‌گیرد. ضعف اساسی استفاده از مدل‌های پیشنهادی در [۳] و [۴] وابستگی‌شان به عوامل فنی توربین‌های بادی می‌باشد که دستیابی آن‌ها از طریق سازندگان مشکل است. همچنین عملکرد آیرودینامیک یک توربین در شرایط زیست محیطی و جوی (دما، فشار، رطوبت، توزیع و جهت باد) مختلف متفاوت است. در این مطالعه با استفاده از داده‌های عملی به تخمین منحنی آیرودینامیک توربین بادی ۷۱۰ کیلووات بینالود پرداخته می‌شود. پس از تخمین منحنی آیرودینامیک و تست آن از طریق مقایسه داده‌های عملی و شبیه‌سازی توسط نرم افزار MATLAB در صدد بهبود پروفیل توان سیستم مورد مطالعه بر می‌آییم؛ بدین صورت که برای سرعت‌های زیر سرعت نامی باد، توربین در نقطه‌ی بهینه‌ی منحنی آیرودینامیک تخمینی، یعنی نقطه توان

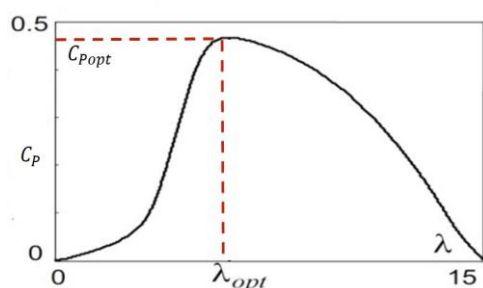
با توجه به کمبود سوخت‌های فسیلی و نیاز به حفاظت از محیط زیست استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر توجه زیادی را در سراسر جهان به خود جلب نموده است. در این زمینه انرژی بادی یکی از امیدبخش‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد. امروزه توربین‌های بادی رقابت شدیدی با سایر منابع انرژی دارند و لذا بازدهی و مقرون به صرفه بودن آنها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار می‌باشد. جهت باقی‌ماندن این سیستم‌ها در صحنه رقابت باید مشخصه‌های عملکرد توربین از جمله توان خروجی به ازای سرعت باد بهینه شود. با توجه به شکل (۱) توربین‌های بادی سیستم‌هایی هستند که می‌توانند انرژی جنبشی در وزش باد را در ابتدا به انرژی مکانیکی و سپس به انرژی الکتریکی تبدیل نمایند؛ که در واقع تبدیل انرژی جنبشی باد به انرژی مکانیکی همان عملکرد آیرودینامیک توربین است [۱]. در این زمینه استفاده از یک معادله جهت نمایش منحنی آیرودینامیک یک سیستم تبدیل انرژی در یک سایت مشخص مسئله مهمی می‌باشد. مشکل اصلی استفاده از یک معادله کلی این است که نمی‌تواند رفتار آیرودینامیک یک توربین بادی در هر منطقه آب و هوایی را توصیف نماید. منحنی آیرودینامیک می‌تواند توسط

پره (β) بیان می‌کنند. نرخ سرعت نوک توسط رابطه (۲) محاسبه می‌شود [۱۲]. ω_t سرعت زاویه‌ای توربین بر حسب رادیان بر ثانیه و R شعاع پره‌های رتور بر حسب متر می‌باشد.

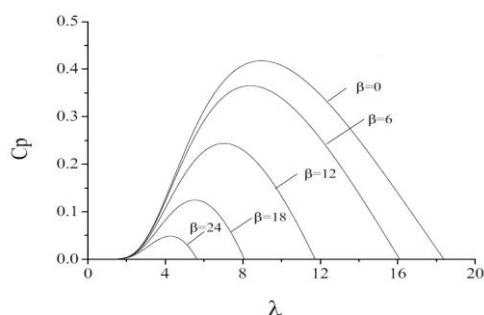
$$\lambda = \frac{R\omega_t}{V_w} \quad (2)$$

ضریب بازدهی به ازای یک λ به نام λ_{opt} بهینه می‌شود ($\lambda_{opt} \rightarrow C_{Popt}$).

به ازای یک زاویه‌ی پره ثابت، C_p تنها تابعی از λ است و مطابق شکل (۲) تغییر می‌کند [۱۱]. برای توربین‌های مختلف حدوداً در بازه ۸ تا ۱۰ می‌باشد. همانطور که قبلاً ذکر شد ضریب بازدهی علاوه بر سرعت نوک پره‌ها به زاویه‌ی آنها (β) نیز وابسته می‌باشد. این زاویه در ناحیه بار جزئی توربین بادی که هدف بیشینه کردن توان دریافتی از باد می‌باشد برابر با صفر بوده و در ناحیه بار کامل به منظور کاهش تنش‌های مکانیکی، افزایش یافته و توان و سرعت ژنراتور را به مقدار نامی محدود می‌کند. در شکل (۳) منحنی C_p بر حسب سرعت نوک λ را به ازای زوایای مختلف پره‌های توربین (β) ملاحظه می‌نمایید [۱۱].



شکل ۲: منحنی C_p بر حسب λ (در β ثابت)

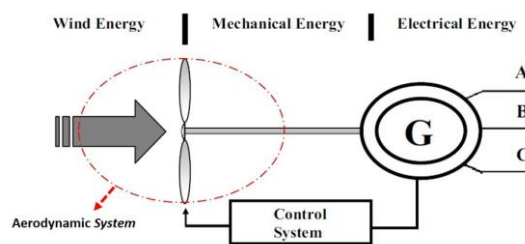


شکل ۳: منحنی C_p بر حسب λ (در β متغیر)

۳- تخمین منحنی آیرودینامیک

پس از شبیه‌سازی توربین مورد نظر شاهد تفاوت‌هایی بین نتایج شبیه‌سازی و داده‌های عملی در توان انتقالی به شبکه

ماکزیمم عمل کند. به طور کلی روش‌های MPPT^۱ به دو دسته‌ی استفاده از حسگر و بدون استفاده از حسگر طبقه‌بندی می‌شوند. روش‌های بدون حسگر نقطه ماکزیمم توان را توسط نظارت بر تغییرات توان دنبال می‌کنند. مهم‌ترین این الگوریتم‌ها، منطق فازی (FLC)^۲، جستجوی آشوب و مشاهده (P&O)^۳، جستجوی قله تپه (HCS)^۴ و غیره می‌باشند. این روش‌ها اگرچه به هیچ‌گونه حسگر اضافی برای اندازه‌گیری سرعت باد یا سرعت رتور نیازمند نمی‌باشند، اما به دلیل عدم حساسیت به تغییرات سرعت باد ویژگی‌های دینامیکی ضعیفی دارند و لذا در سیستم‌های کم هزینه و با ظرفیت کوچک استفاده می‌شوند [۸]. روش‌هایی که از حسگر استفاده می‌کنند تا توسط کنترل سرعت یا گشتاور، نقطه ماکزیمم توان را دنبال کنند اساساً با نام‌های نرخ سرعت نوک (TSR)^۵ و بازخورد سیگنال توان (PSF)^۶ [۱۰] بیان می‌شوند. در این مقاله با استفاده از منحنی آیرودینامیک تخمین زده شده روشی تحت عنوان کنترل توان بهینه (OPC)^۷ ارائه می‌گردد.



شکل ۱: جایگاه سیستم آیرودینامیک در عملکرد توربین بادی

۲- مدل آیرودینامیک توربین بادی

آیرودینامیک توربین بادی به تشریح نیروهای تاثیرکننده بر توربین بادی در اثر جریان هوا می‌پردازد. توان مکانیکی یک توربین بادی توسط رابطه (۱) بدست می‌آید [۱۱].

$$P_t = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi R^2 \cdot V_w^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

که در آن P_t ، ρ ، R و V_w به ترتیب توان مکانیکی توربین، چگالی هوا، شعاع رتور و سرعت باد می‌باشند. $C_p(\lambda, \beta)$ ضریب بازدهی توربین نامیده می‌شود و توسط یک رابطه غیرخطی تعریف می‌گردد. حد بالای C_p در حالت ایده آل ۰/۵۹۳ می‌باشد به این معنا که به لحاظ تئوری می‌توان تقریباً ۵۹٪ انرژی باد را به شفت توربین منتقل نمود. در طراحی‌های مختلف C_p را به صورت تابعی از نرخ سرعت نوک (λ) و زاویه‌ی

۱- Maximum Power Point Tracking

۲-Fuzzy Logic Controller

۳-Perturbation and Observation

۴-Hill Climbing Searching

۵- Tip Speed Ratio

۶- Power Signal Feedback

۷-Optimal Power Control

همانطور که در شکل (۵) مشاهده می‌کنید با استفاده از منحنی آیرودینامیک تخمینی نتایج شبیه‌سازی با تقریب خوبی به داده‌های عملی استخراج شده از سایت بینالود (برای توربین-ژنراتور بادی ۷۱۰ کیلووات) نزدیک می‌شوند.

۴- بهبود پروفیل توان

مطابق شکل (۶) ملاحظه می‌شود که برای هر سرعت باد تنها یک سرعت چرخش توربین (ω_{opt}) مشخص وجود دارد که ضریب بازدهی بهینه (C_{Popl}) و در نتیجه توان ماکزیمم توربین را نتیجه می‌دهد. لذا زمانی که سرعت باد تغییر می‌کند سرعت چرخشی توربین جهت دنبال کردن مسیر بیشترین توان کنترل می‌شود. بنابراین دسترسی به روش کنترلی جهت ردیابی نقطه بیشترین توان (MPPT) برای هر سرعت باد، توان تولیدی در VSWT^۱ را افزایش خواهد داد. همانطور که در شکل (۷) نشان داده شده است پس از تخمین منحنی آیرودینامیک، مقادیر نرخ سرعت نوک بهینه (λ_{opt}) و ضریب بازدهی بهینه (C_{Popl}) برای توربین مورد نظر استخراج می‌شوند. با استفاده از این دو مقدار و اندازه‌گیری سرعت توربین، مطابق رابطه (۶) ماکزیمم توان مکانیکی توربین حاصل می‌شود.

$$P_{tmax} = 0.5 \rho \pi R^5 \frac{C_{Popl}}{\lambda_{opt}^3} \omega_t^3 \quad (۶)$$

همچنین واضح است که:

$$P_{tmax} \propto \omega_t^3 \quad (۷)$$

با احتساب تلفات توان به اندازه ۵٪ توان توربین، توان فاصله هوایی محاسبه و در نهایت با استفاده از رابطه (۱۰) ماکزیمم توان خروجی استاتور بدست می‌آید.

$$P_{rot} \cong 0.05 P_{tmax} \quad (۸)$$

$$P_{agmax} = P_{tmax} - P_{rot} \quad (۹)$$

$$P_{smax} = \frac{P_{agmax}}{1 \pm |s|} \quad (۱۰)$$

که در آن s لغزش بوده و برابر است با: $s = \frac{n_{syn} - n_r}{n_{syn}}$ می‌باشند. توجه شود که در رابطه (۱۰) برای $s > 0$ علامت منفی و برای $s < 0$ علامت مثبت در نظر گرفته می‌شود.

با توجه به روابط و توضیحات فوق، برای سیستم مورد مطالعه در سرعت‌های باد ۶ تا ۹ متر بر ثانیه جدولی مطابق جدول (۲) حاصل می‌شود؛ که ستون‌های دوم (n_{ropt}) و پنجم (P_{smax}) آن در واقع مختصات ناحیه اول از منحنی توان سیستم می‌باشند.

هستیم که سعی می‌شود این اختلاف با تخمین منحنی آیرودینامیک به حداقل رسانده شود. برای تخمین منحنی آیرودینامیک ابتدا با منحنی آزمایشی رابطه (۳)، برگرفته از مرجع [۱۱] که با $C_{P_test}(\lambda, \beta)$ نشان داده شده است، نتایج بررسی می‌گردد.

$$C_{P_test}(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (۳)$$

که در آن:

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (۴)$$

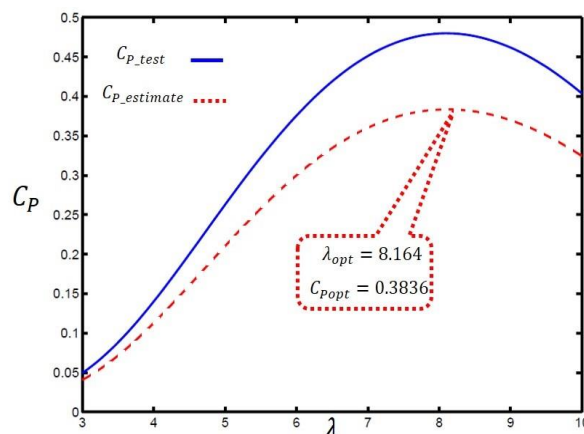
ضرائب C_1 تا C_6 نیز مطابق جدول (۱) می‌باشند.

جدول ۱: مقادیر ضرائب C_1 تا C_6

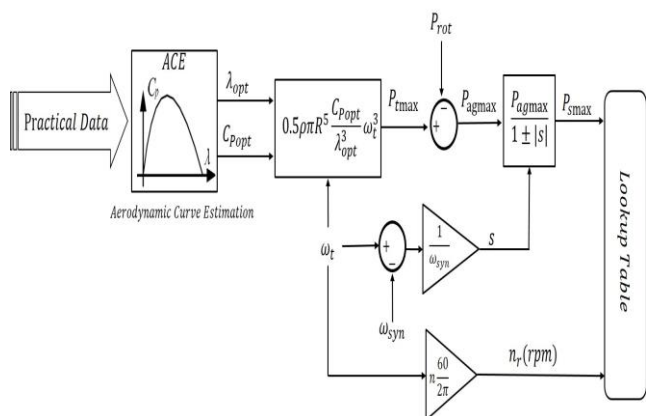
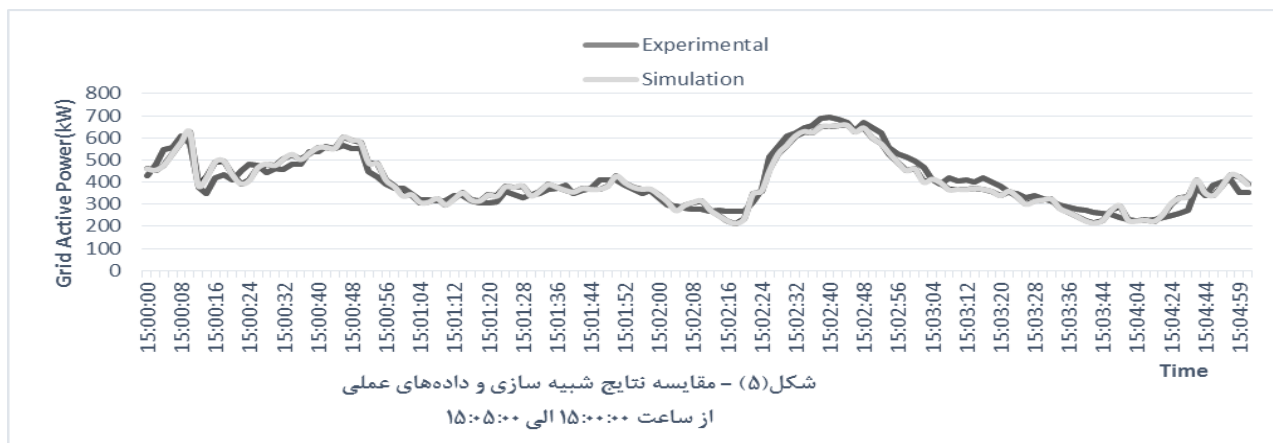
C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
0.5176	116	0.4	5	21	0.0068

پس از معتبرسازی، مرتب نمودن و میانگین‌گیری از داده‌های عملی استخراج شده از سایت، سعی می‌شود با تغییر ضرایب رابطه C_{P_test} ، نتایج حاصل از شبیه‌سازی را با داده‌های عملی تطبیق داده و در نتیجه منحنی آیرودینامیک به درستی تخمین زده شود. در نهایت با تغییر ضریب C_1 به مقدار 0.47 و افزودن ضریب $C_7 = 0.87$ ، منحنی آیرودینامیک مطابق رابطه (۵) تعریف می‌شود. همانطور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود در منحنی آیرودینامیک تخمین زده شده مقدار بهینه ضریب بازدهی در $\beta = 0$ و $\lambda_{opt} = 8.164$ برابر است با $C_{Popl} = 0.3836$.

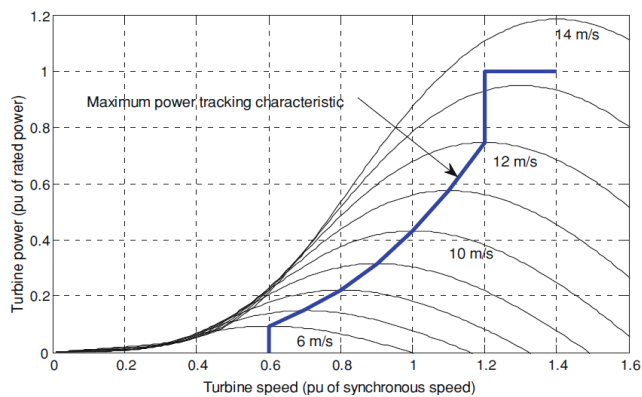
$$C_{P_estimate}(\lambda, \beta) = c_7 \left(c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \right) \quad (۵)$$



شکل ۴: مقایسه منحنی آیرودینامیک تخمینی و آزمایشی



شکل ۷: بلوک دیاگرام روش کنترلی پیشنهادی



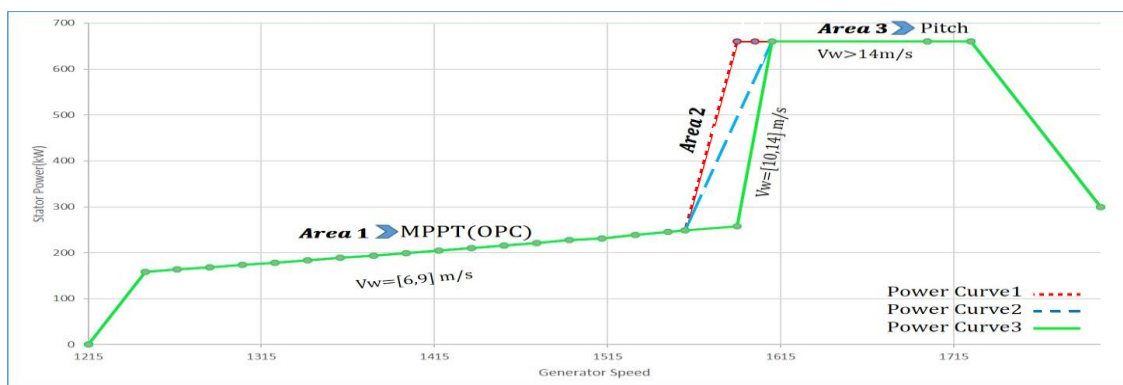
شکل ۶: منحنی سرعت-توان توربین با ردیابی نقطه بیشترین توان

لازم به ذکر است ناحیه‌ی II در واقع انتقال از ناحیه‌ی منحنی توان بهینه (ناحیه I) به ناحیه توان ثابت (ناحیه III) می‌باشد. در این ناحیه سرعت توربین، جهت کاهش آلودگی صوتی و حفظ نیروی گریز از مرکز در مقدار قابل قبول محدود می‌شود [۱۲]. در صورتی که یک چنین محدودیتی برای سرعت روتور نداشته باشیم ناحیه II وجود نمی‌داشت و منحنی توان بهینه (ناحیه I) تا رسیدن به توان نامی ادامه می‌یافت. همچنین حدود ناحیه III از منحنی توان که ناحیه توان ثابت نامیده می‌شود، توسط سیستم کنترل زاویه گام پره مشخص می‌شود تا از تنش‌های مکانیکی و آسیب به توربین در سرعت‌های زیاد جلوگیری شود [۱۳]. در نهایت منحنی توان بدست آمده مطابق شکل (۹) توسط یک جدول تحت عنوان Lookup Table برای تولید سیگنال توان مرجع در مبدل سمت روتور اعمال می‌شود.

جدول ۲: مقادیر ارائه شده جهت کنترل OPC سیستم مورد مطالعه

V_w (m/s)	n_{opt} (rpm)	Slip	P_{tmax} (kW)	P_{smax} (kW)
5	874.1	0.41	47.81	77.94
6	1049	0.3	82.61	112.2
7	1223.8	0.18	131.19	152.7
8	1398.6	0.067	195.83	199.5
9	1573.5	-0.049	278.82	252.5

همانطور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود سیستم مورد مطالعه در سرعت‌های زیر سرعت نامی باد (ناحیه I) به روش OPC کنترل می‌گردد. همچنین برای بهبود پروفیل توان در نواحی سرعت نامی باد (ناحیه II) که شامل سرعت‌های ۱۰ تا ۱۴ متر بر ثانیه می‌باشد، می‌توان حالات مختلفی را متصور شد که با توجه به نتایج شبیه‌سازی بهترین حالت انتخاب می‌شود.



شکل ۸: نواحی عملکرد منحنی توان

۵- نتایج شبیه‌سازی

The figure consists of three vertically stacked plots sharing a common x-axis representing Time in seconds (s), ranging from 0 to 14. The top plot shows the Efficiency Factor (C_p) on the y-axis, ranging from 0.378 to 0.384. The middle plot shows Grid Power (kW) on the y-axis, ranging from 200 to 300. The bottom plot shows Generator Speed (rpm) on the y-axis, ranging from 1300 to 1600. All three plots exhibit a transient response with oscillations before settling to a steady-state value.

Time (s)	Efficiency Factor (C_p)	Grid Power (kW)	Generator Speed (rpm)
0	0.381	300	1600
2	0.3835	260	1530
4	0.384	270	1550
6	0.384	275	1560
8	0.384	278	1565
10	0.384	280	1568
12	0.384	280	1570
14	0.384	280	1570

(الف) ضریب بازدهی توان. (ب) توان تزریقی به شبکه. (ج) سرعت ژنراتور

The figure consists of three vertically stacked plots sharing a common x-axis representing Time (s) from 0 to 8. The plots show the dynamic response of a power system for three different power curves: Power Curve 1 (dotted red line), Power Curve 2 (dashed blue line), and Power Curve 3 (solid green line).

(الف) Efficiency Factor (C_p): The y-axis ranges from 0.28 to 0.32. All three curves start around 0.29, dip slightly, and then rise to a steady state. Power Curve 3 reaches the highest steady-state value of approximately 0.325, followed by Power Curve 2 at approximately 0.315, and Power Curve 1 at approximately 0.305.

(ب) Mechanical Power (kW): The y-axis ranges from 480 to 560. All three curves start around 500 kW, dip slightly, and then rise to a steady state. Power Curve 3 reaches the highest steady-state value of approximately 560 kW, followed by Power Curve 2 at approximately 545 kW, and Power Curve 1 at approximately 530 kW.

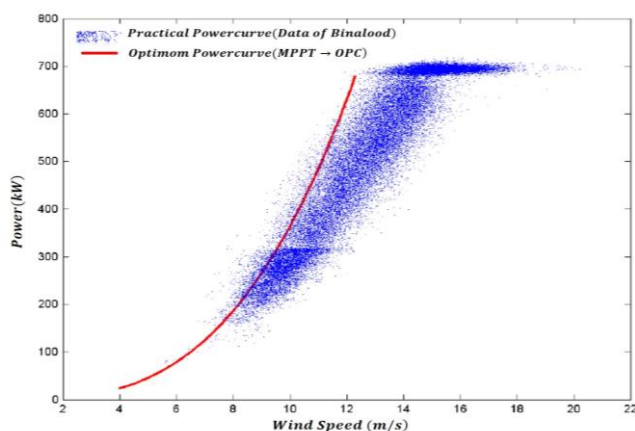
(ج) Generator Speed (rpm): The y-axis ranges from 1400 to 1600. All three curves start around 1580 rpm, dip slightly, and then rise to a steady state. Power Curve 3 reaches the highest steady-state value of approximately 1600 rpm, followed by Power Curve 2 at approximately 1580 rpm, and Power Curve 1 at approximately 1570 rpm.

جدول (۳) - مقایسه مشخصه‌های توربین در حالات مختلف ناحیه II منحنی توان

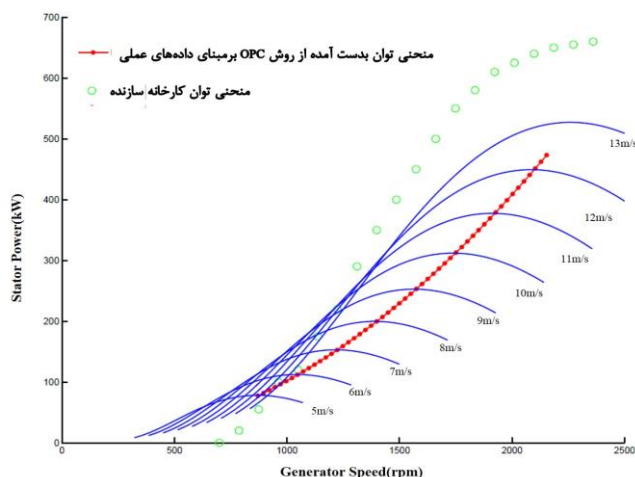
Parameter	Power Curve1	Power Curve2	Power Curve3
C _P	0.306	0.3125	0.3225
P _m (kW)	530	542	556
P _g (kW)	515	530	545
ω _o (rpm)	1575	1587	1600

5

در کل می‌توان چنین گفت که در زیر سرعت نامی باد، توربین مذکور روند کارکرد بی نقصی را نداشته است و باید مورد بررسی قرار گیرد.



شکل ۱۳: مقایسه منحنی توان بهینه و عملی



شکل ۱۲: ردیابی نقطه ماکزیمم توان به روش OPC بر مبنای داده‌های عملی و مقایسه آن با منحنی داده شده توسط کارخانه سازنده

۶- نتیجه گیری

هدف از این مطالعه، تبیین اهمیت کنترل و بهبود منحنی توان از طریق داده‌های عملی و نیز ضرورت تهیه، تفسیر و بایگانی منحنی‌های توان و دیگر پارامترهای توربین‌های بادی می‌باشد. لذا با تخمین منحنی نیروی دینامیک از روی داده‌های عملی ذخیره شده در سایت بینالود بهبود پروفیل توان توربین مورد مطالعه در تمام سرعت‌های باد حاصل شد؛ به طوری که طراحی‌های انجام شده با شرایط آب و هوایی منطقه نصب توربین کاملاً سازگار می‌باشد. جهت مشخص شدن اهمیت موضوع، با استفاده از اطلاعات سرعت باد سنچ ناسل توربین بادی ۷۱۰ کیلووات بینالود و اندازه گیری توان خروجی آن، منحنی توان- سرعت واقعی توربین مورد مطالعه ترسیم شده و مطابق شکل (۱۳) با منحنی توان بهینه بدست آمده در این مقاله مقایسه می‌گردد. با توجه به شکل می‌توان به نتایج زیر دست یافت:

توربین ژنراتور بادی ۷۱۰ کیلووات بینالود در سرعت‌های زیر سرعت نامی باد عملکرد بهینه‌ای ندارد و توان تولیدی عمدتاً کمتر از مقدار بهینه می‌باشد. با افزایش سرعت باد فاصله داده‌ها از عملکرد بهینه توربین بیشتر می‌شود که این داده‌ها به اصطلاح داده‌های نامعتبر نامیده می‌شوند. دلایل وجود چنین داده‌هایی تاثیر بسزایی در استراتژی نگهداری و بهره‌برداری بهینه توربین و جلوگیری از نقایص احتمالی آن در آینده خواهد داشت. در برخی سرعت‌های باد، تولید توربین بیشتر از مقدار پیش بینی شده توسط روش OPC می‌باشد. با توجه به تعداد معدود داده‌های مذکور احتمال می‌رود خطای اندازه‌گیری یا مشکل مقطعی در عملکرد قطعات مکانیکی یا الکتریکی باشد، که در همان زمان باید بررسی و گزارش گردد.

مراجع

- [1] S. M. Mueeen, J. Tamura, and T. Murata, Stability augmentation of a grid-connected wind farm: Springer Science & Business Media, 2008.
- [2] C. Carrillo, A. Feijoo, and J. Cidras, "Comparative study of flywheel systems in an isolated wind plant," *Renewable Energy*, vol. 34, pp. 890-898, 2009.
- [3] L. Tang and R. Zavadil, "Shunt capacitor failures due to windfarm induction generator self-excitation phenomenon," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, vol. 8, pp. 513-519, 1993.
- [4] C. T. Kiranoudis and Z. B. Maroulis, "Effective short-cut modelling of wind park efficiency," *Renewable Energy*, vol. 11, pp. 439-457, 1997.
- [5] R. M. Hilloowala and A. M. Sharaf, "A rule-based fuzzy logic controller for a PWM inverter in a stand alone wind energy conversion scheme," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 32, pp. 57-65, 1996.
- [6] S. M. R. Kazmi, H. Goto, H.-J. Guo, and O. Ichinokura, "A novel algorithm for fast and efficient speed-sensorless maximum power point tracking in wind energy conversion systems," *Industrial Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 58, pp. 29-36.
- [7] S. S. Mali and B. E. Kushare, "Mpppt algorithms: Extracting maximum power from wind turbines," *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*.
- [8] H. G. Jeong, R. H. Seung, and K. B. Lee, "An improved maximum power point tracking method for wind power systems," *Energies*, vol. 5, pp. 1339-1354.
- [9] M. A. Abdullah, A. H. M. Yatim, C. W. Tan, and R. Saidur, "A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012 vol. 16, pp. 3220-3227.
- [10] N. Manonmani P, P. Kausalyadevi, "A Review of Maximum Power Extraction Techniques For Wind Energy Conversion Systems" *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, Vol. 1 Issue 6, August 2014.
- [11] I. Munteanu, A. I. Bratcu, N. A. Cutululis, and E. Ceanga, *Optimal Control of Wind Energy Systems: Towards a Global Approach*. Springer, 2008.
- [12] F. D. Bianchi, H. De Battista, and R. J. Mantz, *Wind turbine control systems: principles, modelling and gain scheduling design*: Springer Science & Business Media, 2006.
- [13] V. Ramakrishnan and S. K. Srivatsa, "Pitch control of wind turbine generator by using new mechanism," *Journal of Electrical Systems*, vol. 6, pp. 62-87.