

مقایسه و تحلیل فلیکر ناشی از توربین‌های بادی محور افقی و محور عمودی

حسین دوست محمدی^۱، اصغر اکبری فرود^۲

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد برق قدرت، دانشگاه سمنان hossein.doustmohammadi@semnan.ac.ir

^۲عضو هیئت علمی دانشگاه سمنان، دانشکده برق و کامپیوتر، گروه برق قدرت aakbari@semnan.ac.ir

چکیده - توربین های بادی مانند برخی از منابع تولید پراکنده می‌توانند باعث ایجاد اختلالات کیفیت توان شوند، یکی از مهمترین اختلالات کیفیت توان، فلیکر است که می‌تواند بر روی بارهای حساس اثر بگذارد. توربین های بادی به طور کلی به دو دسته توربین های محور عمودی و محور افقی تقسیم می‌شوند. توربین های بادی به دلیل عوامل آیرودینامیکی و همچنین خطاهای مکانیکی موجب ایجاد فلیکر می‌شوند. در این مقاله، شدت فلیکر تولید شده توسط توربین‌های محور عمودی و محور افقی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. ابتدا مدلسازی برخی عیوب مکانیکی که منجر به ایجاد فلیکر میشود انجام پذیرفته، سپس فلیکر ناشی از توربین های یاد شده، در سه سناریو مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. در سناریو اول دو توربین کاملا سالم بوده و فلیکر ایجاد شده ناشی از عوامل آیرودینامیکی موجود در این دو توربین مورد بررسی قرار می‌گیرد، در سناریو دوم خطای شکستگی دندانه برای دو توربین شبیه سازی شده و شدت فلیکر تولیدی توسط دو توربین مقایسه شده است و در سناریو سوم خطای شکستگی یکی از سه پره برای دو توربین شبیه سازی و شدت فلیکر تولیدی توسط دو توربین‌ها مقایسه شده است. در این مقاله از شاخص شدت فلیکر کوتاه مدت (Pst) برای مقایسه شدت فلیکر در دو توربین استفاده شده است.

کلید واژه- توربین بادی، کیفیت توان، فلیکر، شاخص Pst

۱- مقدمه

می‌تواند باعث ایجاد فلیکر شود به دو دسته آیرودینامیکی و خطاهای مکانیکی تقسیم می‌شوند. به عنوان مثال، در دسته مکانیکی، عملکرد نادرست سیستم کنترل زاویه توربین بادی (pitch angle control)، شکستن یکی از پره های توربین بادی و شکستن دندانه های گیربکس توربین بادی در هر دو نوع توربین [۳] و در دسته آیرودینامیکی آشفتگی جریان باد در داخل توربین و جریان غیر یکنواخت باد در سطح پره‌ها در VAWT [۴] و سایه برج (tower shadow) و قیچی باد (wind shear) برای توربین بادی از نوع HAWT [۵] موجب ایجاد نوسانات توان می‌شوند که این نوسانات توان موجب ایجاد فلیکر می‌شود.

تا کنون مدل‌های آیرودینامیکی مختلفی جهت مدلسازی توربین های بادی Darrieus ارائه شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به مدل Momentum، مدل Vortex و مدل Cascade اشاره کرد که در بین این مدل‌های آیرودینامیکی، مدل Vortex از همه مدل‌ها کامل تر است [۲].

در این مقاله دو توربین بادی HAWT و VAWT با توان ۵۰ کیلووات برای بررسی و مطالعه انتخاب شده است و شدت فلیکر کوتاه مدت (شاخص Pst) آن‌ها بر اساس استاندارد (IEC) 61000-4-15 [۶] در سه سناریو مختلف محاسبه شده و مورد

باد از هزاران سال قبل به عنوان منبعی از انرژی، به منظور پیشرانی برای کشتی‌ها، آسیاب غلات و پمپ آب استفاده شده است. اولین توربین بادی دنیا در سال ۱۸۹۱ میلادی توسط فردی دانمارکی به نام Poul la Cour، به منظور تولید الکتریسیته از انرژی باد ساخته شد. امروزه توربین‌های بادی نقش بسیار مهمی را در تولید انرژی الکتریکی ایفا می‌کنند. به طور کلی می‌توان توربین‌های بادی را به دو دسته ی، توربین‌های بادی محور افقی یا HAWT (horizontal axis wind turbine) و توربین‌های بادی محور عمودی یا VAWT (vertical axis wind turbine) تقسیم کرد. VAWT‌ها خود به چند دسته، توربین‌های بادی Savonius، توربین‌های بادی H-Rotors و توربین‌های بادی Darrieus تقسیم می‌شوند که در بین این‌ها، تنها توربین بادی نوع Darrieus موفقیت تجاری داشته است [۱، ۲].

توربین های بادی مانند برخی دیگر از منابع تولید پراکنده می‌توانند باعث ایجاد اختلالات کیفیت توان شوند. یکی از مهمترین اختلالات کیفیت توان، فلیکر است که می‌تواند بر روی بارهای حساس اثر بگذارد. عواملی که در توربین‌های بادی

است. بنابراین با محاسبه گشتاور هر پره و جمع سه گشتاور، معادله گشتاور کل توربین بادی Darrieus بدست می‌آید که در معادله (۲) آمده است.

$$\bar{Q} = \left[\rho \pi c R V_{\infty}^2 \left(1 - \frac{3cX}{2R} |\sin\theta| \right)^2 \sin^2\theta \right] + \left[\rho \pi c R V_{\infty}^2 \left(1 - \frac{3cX}{2R} |\sin(\theta + 120)| \right)^2 \sin^2(\theta + 120) \right] + \left[\rho \pi c R V_{\infty}^2 \left(1 - \frac{3cX}{2R} |\sin(\theta - 120)| \right)^2 \sin^2(\theta - 120) \right] \quad (2)$$

۲-۲- مدل کردن خطای شکستگی پره در توربین

Darrieus

شکسته شدن یک پره باعث می‌شود که گشتاور کاملی که در معادله (۱) نشان داده شد، توسط پره شکسته شده تولید نشود و تنها درصدی از آن گشتاور تولید گردد. لذا برای پره شکسته شده، ضریب k در نظر گرفته می‌شود که این ضریب نشان دهنده درصد سالم پره است. به منظور نشان دادن گشتاور تولید شده توسط پره شکسته شده، ضریب k در گشتاور پره شکسته شده ضرب شده است. در اینجا فرض شده است پره اول شکسته شده و گشتاور تولید شده توربین در حضور یک پره شکسته، در معادله (۳) آمده است.

$$\bar{Q} = k \left[\rho \pi c R V_{\infty}^2 \left(1 - \frac{3cX}{2R} |\sin\theta| \right)^2 \sin^2\theta \right] + \left[\rho \pi c R V_{\infty}^2 \left(1 - \frac{3cX}{2R} |\sin(\theta + 120)| \right)^2 \sin^2(\theta + 120) \right] + \left[\rho \pi c R V_{\infty}^2 \left(1 - \frac{3cX}{2R} |\sin(\theta - 120)| \right)^2 \sin^2(\theta - 120) \right] \quad (3)$$

۲-۳- مدل کردن خطای شکستگی دندانه در توربین

Darrieus

همانطور که در [۳] اشاره شده است، زمانی که یک دندانه شکسته می‌شود، گشتاور برای مدت کوتاهی از توربین بادی به شفت ژنراتور منتقل نمی‌شود. معادله (۴) گشتاور انتقال داده شده به توربین را در حالتی که N دندانه از گیربکس شکسته است نشان می‌دهد.

$$Q = \begin{cases} Q_0 & 0 \leq t \leq \frac{N-1}{N} \tau \\ 0 & \frac{N-1}{N} \tau \leq t \leq \tau \end{cases} \quad (4)$$

۳- شبیه سازی و تحلیل نتایج

برای شبیه سازی توربین‌های بادی و خطاهایشان از نرم افزار

مطالعه قرار گرفته شده است. سه سناریو در نظر گرفته شده برای دو توربین به شرح زیر است:

- مقایسه Pst دو توربین در شرایطی که هیچ مشکل مکانیکی در دو توربین رخ نداده و دو توربین کاملاً سالمند.
- مقایسه Pst دو توربین در شرایطی که ۳ دندانه گیربکس در هر دو توربین شکسته است.
- مقایسه Pst دو توربین در شرایطی که ۲۰٪ یکی از سه پره در هر دو توربین شکسته است.

در این مقاله برای VAWT مدل Darrieus از نوع پره صاف در نظر گرفته شده است و این توربین با مدل آیرودینامیکی Vortex شبیه سازی شده است و دو خطای شکستن پره و شکستن دندانه برای آن در این مقاله مدل سازی شده است. مدل سازی خطاهای شکستن پره و شکستن دندانه برای HAWT در [۳] ارائه شده است.

۲- مدلسازی توربین ها و خطاهایشان

همانطور که گفته شد برای مدلسازی HAWT و خطاهایی چون شکستن پره و شکستن دندانه گیربکس در این توربین، مطابق [۳] عمل شده است. نحوه مدلسازی VAWT از نوع Darrieus و خطاهایی چون شکستن پره و شکستن دندانه گیربکس در این توربین در ادامه بحث شده است.

۲-۱- مدل کردن آیرودینامیک توربین Darrieus

در [۲] سه مدل آیرودینامیکی برای توربین Darrieus از نوع پره صاف ارائه شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به مدل Momentum، مدل Vortex و مدل Cascade اشاره کرد. در بین این مدل‌های آیرودینامیکی، مدل Vortex از همه مدل‌ها کامل‌تر است. در [۷]، گشتاور هر پره توربین Darrieus محاسبه شده است که در معادله (۱) آمده است.

$$Q = \rho \pi c R V_{\infty}^2 \left(1 - \frac{3cX}{2R} |\sin\theta| \right)^2 \sin^2\theta \quad (1)$$

در این معادله Q ، ρ ، R ، V_{∞} و X به ترتیب نشان دهنده توان پره توربین بادی، چگالی هوا، شعاع روتور، سرعت باد، نسبت سرعت نوک و زاویه چرخش پره هستند.

در توربین Darrieus سه پره‌ای، زاویه ای که سه پره دو به دو با یکدیگر می‌سازند برابر ۱۲۰ درجه است. یعنی زاویه پره اول برابر θ زاویه پره دوم برابر $\theta - 120$ و زاویه پره سوم برابر $\theta + 120$

۳-۱- مقایسه Pst دو توربین در شرایط کاملا سالم

با توجه به شکل ۱-الف مشاهده می‌شود که شدت Pst در توربین از نوع VAWT نسبت به نوع HAWT بیشتر است. در توربین‌های از نوع HAWT با وجود اثرات آیرودینامیکی نظیر سایه برج و قیچی باد، باد تقریباً به صورت یکنواخت در سطح روتور جریان می‌یابد و گشتاور تولید شده توسط روتور تقریباً ثابت و با نوسانات کم بوده و لذا ژنراتور توانی تقریباً ثابت و با نوسان کم تولید کرده و فلیکر ایجاد شده کم است. در توربین‌های از نوع VAWT بادی که در توربین جریان می‌یابد آشفته شده و این امر باعث عدم یکنواختی جریان باد در سطح پره‌ها می‌شود که این موضوع باعث ایجاد نوسانات بزرگ گشتاور شده و لذا نوسانات بزرگ توان را در پی خواهد داشت، در نتیجه شدت فلیکر ایجاد شده در این توربین زیاد خواهد بود [۵,۴].

۳-۲- مقایسه Pst دو توربین در شرایط شکستگی ۳ دندان از گیربکس

شکستگی دندان گیربکس یکی از مهمترین نقایص در توربین‌های بادی به حساب می‌آید [۸]. شکستگی دندان گیربکس جزو خطاهایی است که به راحتی به چشم نمی‌آید و لازم است توربین به دقت بررسی شود. همانطور که از شکل ۱-ب مشاهده می‌شود Pst ناشی از شکستگی دندان در دو توربین تقریباً برابر بوده و در رنج یکسانی قرار دارند. Pst توربین از نوع HAWT در زمان شکستگی دندان نسبت به حالتی که این توربین سالم است بیشتر شده است، از آنجا که این توربین در حالت سالم، نوسانات توانش تقریباً ثابت است لذا شکستگی Pst در حالت شکستگی دندان در این توربین نسبت به حالت سالم بیشتر شده است، اما در توربین از نوع VAWT شدت فلیکر کاهش یافته؛ لذا به منظور بررسی این پدیده، به بررسی نوسانات توان این توربین در دو حالت شکسته شدن دندان و سالم بودن توربین پرداخته شده است. نوسانات توان این توربین در دو حالت ذکر شده، در شکل ۲ نشان داده شده است. بر طبق شکل ۲، در حالتی که شکستگی دندان در توربین بادی از نوع VAWT رخ داده است توان ژنراتور افت کرده که این موضوع به دلیل عدم انتقال بخشی از گشتاور از توربین به شفت ژنراتور، به دلیل شکستگی دندان گیربکس است. بر اساس محاسبات Pst، فلیکر در حالت شکستگی دندان‌های گیربکس، نسبت به فلیکر توربین سالم است کمتر می‌شود.

PSCAD/EMTDC استفاده شده است. به منظور مقایسه در شرایط یکسان، دو توربین با توان برابر ۵۰ کیلوواتی در نظر گرفته شده است. هر یک از این توربین‌ها با ترانس ۵۰ کیلوواتی به یک شبکه ۵ مگاواتی متصل شده اند و ژنراتور هر دو توربین از نوع ژنراتور القایی است. مشخصات دو توربین در جداول ۱ و ۲ آمده است.

جدول ۱: مشخصات توربین HAWT

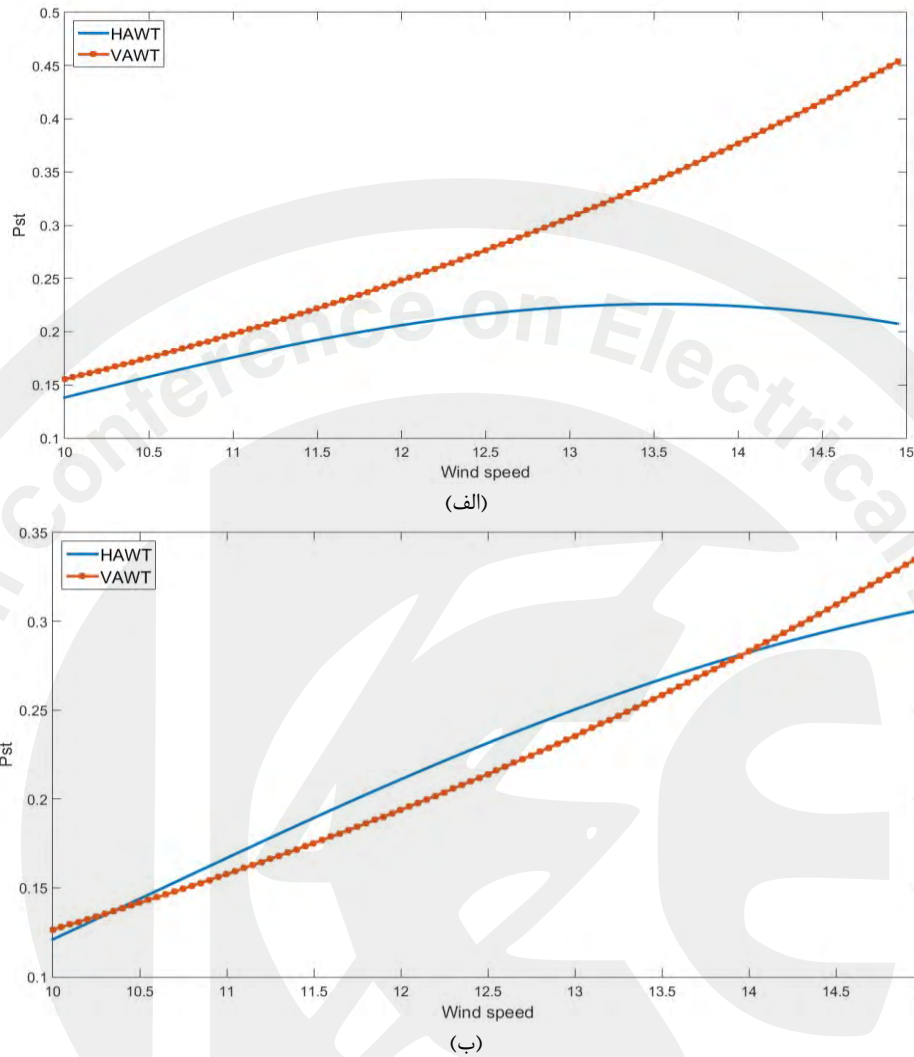
مقدار	پارامتر
۱۲ متر	شعاع پره
۳۰ متر	ارتفاع برج
ژنراتور القایی	نوع ژنراتور
۵۰ کیلووات	توان نامی ژنراتور
۰/۴ کیلوولت	ولتاژ نامی ژنراتور
۵۰ هرتز	فرکانس نامی ژنراتور

جدول ۲: مشخصات توربین VAWT

مقدار	پارامتر
۶ متر	شعاع توربین
۵ متر	طول پره
ژنراتور القایی	نوع ژنراتور
۵۰ کیلووات	توان نامی ژنراتور
۰/۴ کیلوولت	ولتاژ نامی ژنراتور
۵۰ هرتز	فرکانس نامی ژنراتور

لازم به توضیح است که از آنجا که سرعت بادی که در آن توربین به توان نامی میرسد برابر ۱۵ متر بر ثانیه است و از این سرعت به بالا توان تولیدی ثابت شده و برابر توان نامی توربین می‌باشد، شدت فلیکر نیز ثابت خواهد شد بنابراین در تمامی سناریوها، سرعت باد بین ۱۰ تا ۱۵ متر بر ثانیه مورد در نظر گرفته شده است. در ادامه، سه سناریو به شرح زیر مورد بررسی قرار می‌گیرند.

- مقایسه Pst دو توربین در شرایطی که هیچ مشکل مکانیکی در دو توربین رخ نداده و دو توربین کاملاً سالمند.
- مقایسه Pst دو توربین در شرایطی که ۳ دندان گیربکس در هر دو توربین شکسته است.
- مقایسه Pst دو توربین در شرایطی که ۲۰٪ یکی از سه پره در هر دو توربین شکسته است.

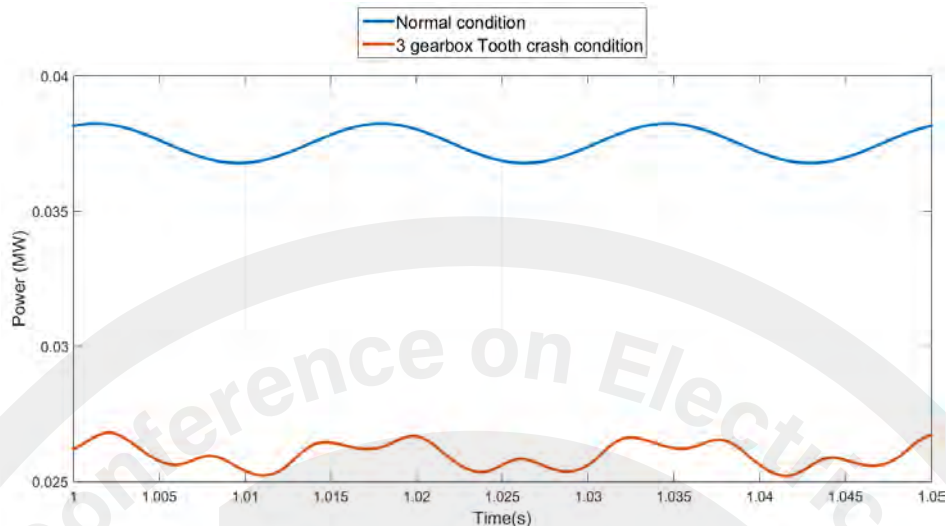


شکل ۱: مقایسه Pst دو نوع توربین HAWT و VAWT در سرعت باد بین ۱۰ تا ۱۵ متر بر ثانیه الف) در شرایط کاملا سالم ب) در شرایط شکستگی ۳ دندانه از گیربکس

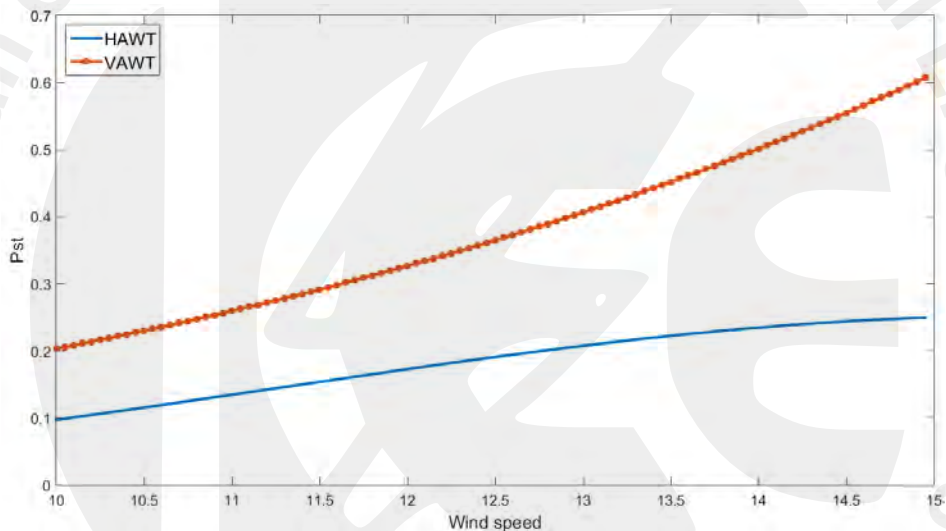
توربین‌های از نوع HAWT، باد تقریباً به صورت یکنواخت به سه پره برخورد داشته و هر سه پره در یک لحظه گشتاوری در جهت یکسان ایجاد می‌کنند و توانی تقریباً یکنواخت ایجاد می‌شود در حالی که در توربین از نوع VAWT در یک لحظه تمامی پره‌ها گشتاور مثبت ایجاد نکرده بلکه به دلیل شکل و آیرودینامیک پره‌ها، پره‌ای که در جهت باد در حال حرکت است بیشتر انرژی جنبشی باد را دریافت کرده و گشتاور مثبت ایجاد می‌کند و پره‌ای که در خلاف جهت باد در حال حرکت است بیشتر انرژی جنبشی باد را از خود عبور می‌دهد و با این حال باعث ایجاد گشتاور منفی می‌شود؛ اما به دلیل اینکه گشتاور مثبت ایجاد شده توسط پره‌ای که در جهت باد در حال حرکت است نسبت به گشتاور پره‌ای که در خلاف جهت باد در حال حرکت است بیشتر

۳-۳- مقایسه Pst دو توربین در شرایط شکستگی ۲۰٪ یکی از سه پره

با توجه به شکل ۳ مشاهده می‌شود، زمانی که ۲۰٪ یکی از پره‌ها، در هر دو نوع توربین شکسته است، توربین بادی از نوع VAWT، Pst بیشتری نسبت به نوع HAWT ایجاد می‌کند. همچنین، Pst ایجاد شده توسط VAWT در حالت شکستگی پره نسبت به حالتی که توربین سالم است بیشتر شده است. دلیل این مسئله این است که در توربین‌های از نوع VAWT آشفستگی جریان باد در داخل توربین و جریان غیر یکنواخت باد در سطح پره‌ها [۴] در حالت نرمال باعث ایجاد نوسانات توان شدیدی می‌شود، حال اگر یکی از پره‌ها دچار شکستگی شود این نوسانات تشدید می‌شوند، لذا Pst این توربین در حالتی که شکستگی پره اتفاق افتاده است نسبت به سالم مقداری بیشتر است. در



شکل ۲: مقایسه نوسانات توان در دو حالت سالم بودن و شکستگی ۳ دندانه از گیربکس VAWT در سرعت باد ۱۳ متر بر ثانیه

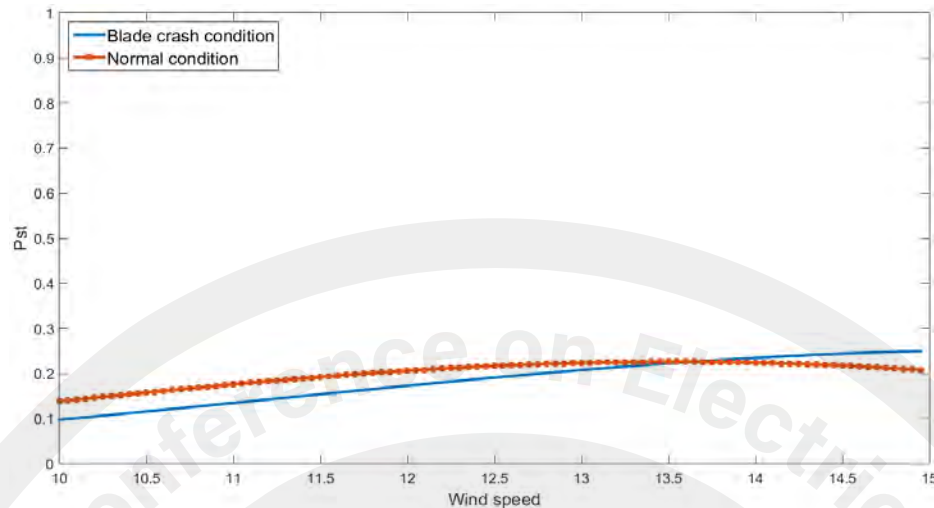


شکل ۳: مقایسه Pst دو نوع توربین HAWT و VAWT در سرعت باد بین ۱۰ تا ۱۵ متر بر ثانیه در شرایط شکستگی ۲۰٪ یکی از سه پره

۴- نتیجه گیری

با بررسی سه سناریو مختلف برای دو توربین ۵۰ کیلوواتی از نوع HAWT و VAWT مشاهده شد، در شرایطی که دو توربین کاملاً سالم هستند به دلیل آیرودینامیک متفاوت این دو توربین و غیر یکنواختی زیاد جریان باد در سطح روتور VAWT نسبت به HAWT، فلیکر ناشی از VAWT نسبت به HAWT بیشتر است. در شرایطی که ۳ دندانه از گیربکس شکسته شد مشاهده شد که Pst دو توربین تقریباً با اختلاف کمی در رنج یکسانی قرار گرفت. با توجه به اینکه نوسانات توان در HAWT به دلیل آیرودینامیکش در شرایطی که کاملاً سالم است بسیار کم است لذا شکستگی دندانه گیربکس به دلیل ایجاد نوسانات توان موجب می‌شود Pst این توربین در شرایط شکستگی دندانه گیربکس

است، گشتاور کل مثبت شده و باد توربین را به چرخش در می‌آورد. به دلیل وجود پدیده‌های آیرودینامیکی نظیر سایه برج و قیچی باد در HAWT، نوساناتی در گشتاور توربین ایجاد می‌شود که این نوسانات بسیار کم است [۵]. از آن جا که تمامی پره‌ها گشتاوری در یک جهت تولید می‌کنند شکستگی ۲۰٪ یکی از پره‌ها باعث کمتر شدن توان خروجی کل توربین می‌شود چرا که یکی از پره‌ها توان کمتری دریافت می‌کند. همانطور که در شکل ۴ مشخص است، شکستگی پره توربین بادی از نوع HAWT تغییرات زیادی در Pst این توربین ایجاد نمی‌کند، در بعضی از سرعت‌های باد، مقدار کمی بیشتر شده و در بعضی از سرعت‌های باد، مقدار کمی کاهش یافته است. در نتیجه می‌توان گفت تاثیر شکستگی پره در افزایش شدت Pst در توربین VAWT نسبت به HAWT بیشتر است.



شکل ۴: مقایسه pst در دو حالت سالم بودن و شکستگی ۲۰٪ یکی از پره‌ها در HAWT

[5] D.S.L. Dolan, P.W. Lehn, "Simulation model of wind turbine 3p torque oscillations due to wind shear and tower shadow," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 21, no. 3, pp. 717 - 724, 2006.

[6] IEC, IEC 61000-4-15, 1997.

[7] Robert E. Wilson, Peter B. S. Lissaman, Applied aerodynamics of wind power machines, Corvallis, Oregon: Oregon state university, 1974.

[8] Dingguo Lu, Xiang Gong, Wei Qiao, "Current-based diagnosis for gear tooth breaks in wind turbine gearboxes," in IEEE Energy Conversion Congress and

نسبت به حالت سالم بیشتر شود. در توربین VAWT مشاهده شد که به دلیل نوسانات زیاد گشتاور در این توربین در حالت سالم، با اتفاق افتادن شکستگی دندانه گیربکس، گشتاور در لحظاتی از شفت توربین به ژنراتور منتقل نشده و این موضوع باعث تعدیل نوسانات توان شده، لذا Pst در این توربین در حالتی که سالم است نسبت به حالتی که دندانه گیربکس شکسته است مقداری بیشتر است. در نهایت دیده شد شکستگی ۲۰٪ یکی از پره‌ها در دو توربین، تاثیر بیشتری در توربین VAWT در افزایش شدت Pst نسبت به HAWT دارد. با دقت در سناریوهای مختلفی که بررسی شد می‌توان نتیجه گرفت توربین از نوع HAWT در کل نسبت به توربین VAWT کمتر موجب ایجاد فلیکر می‌شود.

مراجع

[1] G. M. Masters, Renewable and Efficient Electric Power Systems, Hoboken, New Jersey: Wiley-IEEE Press, 2004.

[2] Mazharul Islam, David S.-K. Ting, Amir Fartaj, "Aerodynamic models for Darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 12, no. 4, pp. 1087-1109, 2008.

[3] Milad Fooladi, Asghar Akbari Foroud, "Recognition and assessment of different factors which affect flicker in wind turbines," IET Renewable Power Generation, vol. 10, no. 2, pp. 250 - 259, 2016.

[4] Qing'an Li a, Takao Maeda b, Yasunari Kamada b, Junsuke Murata b, Kazuma Furukawa b, "Effect of number of blades on aerodynamic forces on a straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine," Energy, vol. 90, no. 1, pp. 784-795, 2015.