

تشخیص اغتشاشات آیرودینامیکی باد و شکسته شدن چرخ‌دنده گیربکس توربین بادی با استفاده از تابع تبدیل موجک

ابوالقاسم قابل و اصغر اکبری فرود

زیادی به منظور بررسی عوامل کاهش‌دهنده کیفیت توان توربین‌های بادی صورت گرفته است. در [۲] به بررسی تأثیرات آیرودینامیکی باد روی یک سیستم بادی-دیزلی با استفاده از نرم‌افزار Turbsim و fastayrodin پرداخته شده است. تأثیر سایه دکل و انحراف باد روی سیستم مورد مطالعه بررسی و تأثیر این دو اغتشاش با یکدیگر مقایسه شده‌اند، با این حال از ابزار تشخیصی برای شناسایی خطاهای شبیه‌سازی شده استفاده نشده است. در [۳] تأثیر اغتشاشات آیرودینامیکی باد روی کیفیت توان شبکه و به طور مشخص فلیکر ایجادشده در سیستم نشان داده شده است. با توجه به مشخص بودن نوع اغتشاش ایجادشده در سیستم از قبل، از یک STATCOM جهت تثبیت ولتاژ تولیدی نیروگاه بادی و بهبود کیفیت توان استفاده شده و همچنین می‌توان در [۴] مشاهده کرد که اغتشاشات باد روی خروجی باد تأثیر گذاشته‌اند و باعث ایجاد نوسان در باد شده‌اند. تأثیر این خروجی‌ها بر روی ژنراتور متصل به توربین باد مشخص نشده است.

اکثر مطالعات روی بخش‌های مکانیکی توربین‌های بادی به صورت عملی و در محیط آزمایشگاه انجام گرفته است. مرجع [۵] خروجی‌های یک گیربکس معیوب را در محیط آزمایشگاهی بررسی کرده و این خروجی‌ها را با استفاده از تبدیل موجک مورد تحلیل قرار داده است. در [۶] نیز اشاره شده که سیگنال‌های خروجی یک گیربکس دارای ترک در چرخ‌دنده کاملاً نوسانی و دارای نویز می‌باشد. به دلیل این که این نوع خروجی‌ها مربوط به گیربکس‌های خاصی هستند که در آزمایشگاه مورد آزمایش قرار گرفته‌اند، نمی‌توان خروجی‌های مربوط به آنها را به سایر گیربکس‌ها تعمیم داد.

امروزه مسأله اصلی تولیدکنندگان انرژی، رساندن برق با بهترین کیفیت به دست مشترکین می‌باشد. برای بهبود کیفیت توان، اولین گام، شناسایی و دسته‌بندی عوامل دخیل در کاهش کیفیت توان است. در این مقاله معادلات مربوط به مهم‌ترین اغتشاشات آیرودینامیکی باد شامل سایه دکل و انحراف باد که بیش از ۵۰٪ خطاهای آیرودینامیکی را تشکیل می‌دهند و همچنین معادلات مکانیکی گیربکس با چرخ‌دنده شکسته که ۲۰٪ از کار افتادگی توربین‌های بادی را باعث می‌شود، به طور دقیق محاسبه و بررسی می‌شوند. در ادامه تأثیر این اغتشاشات بر روی خروجی باد و گشتاور توربین‌های بادی با استفاده از نرم‌افزار Matlab نشان داده می‌شود. شبکه نمونه متصل به توربین بادی و گیربکس یک شبکه با ژنراتور DFIG می‌باشد که از کنترل‌کننده مد لغزشی^۴ برای کنترل بهره می‌برد. برای شبیه‌سازی از مدل مرتبه ۵ DFIG و به دلیل وجود خطاهای غیر خطی از کنترل‌کننده مد لغزشی استفاده شده است. تابع تبدیل موجک یک ابزار ریاضی است که وسیله تشخیص اغتشاشات کیفیت توان را فراهم ساخته است. در انتها خروجی ولتاژ شبکه بادی به عنوان ورودی تابع موجک مورد بررسی و تحلیل قرار می‌گیرد.

چکیده: به منظور بهبود کیفیت توان، تشخیص و شناسایی عوامل دخیل در کاهش کیفیت توان از اولویت برخوردار هستند. از جمله عوامل اصلی در ایجاد فلیکر و هارمونیک در سیستم‌های متصل به توربین‌های بادی، اغتشاشات آیرودینامیکی باد و خطاهای مکانیکی توربین‌های بادی می‌باشد. در این مقاله معادلات ریاضی اغتشاشات باد شامل سایه دکل و انحراف باد و همچنین معادلات مکانیکی مربوط به شکسته شدن چرخ‌دنده‌های گیربکس به طور دقیق بررسی و با استفاده از نرم‌افزار Matlab شبیه‌سازی شده است. در ادامه تأثیر این اغتشاشات بر روی پارامترهای خروجی شبکه نمونه مشاهده شده است. در پایان نشان داده می‌شود که با استفاده از تابع موجک مناسب، می‌توان این اغتشاشات را شناسایی و دسته‌بندی کرد.

کلیدواژه: کیفیت توان، اغتشاشات باد، سایه دکل، انحراف باد، گیربکس، توربین باد، تبدیل موجک.

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، نوآوری‌های تکنولوژی، مسایل اقتصادی و محیط زیست، محرکی برای استفاده از انرژی‌های بادی در شبکه‌های قدرت بوده است. یکی از مشکلات مهم اتصال توربین‌های بادی به شبکه، مسأله کیفیت توان و ولتاژ تولیدی توسط این توربین‌ها می‌باشد. تداخل در کیفیت توان شبکه‌های متصل به توربین‌های بادی نه تنها متأثر از پارامترهای الکتریکی مربوط به ژنراتورها، ترانسفورماتورها و غیره است، بلکه متأثر از رفتار آیرودینامیکی باد و مکانیکی رتور و گیربکس نیز می‌باشد. ولتاژ و توان تولیدی ژنراتورهای بادی دارای تغییرات و نوساناتی متأثر از پدیده‌های آیرودینامیکی حاکم بر توربین‌های بادی از جمله خطاهای انحراف زاویه^۱، انحراف باد^۲ و سایه دکل^۳ می‌باشند. با این وجود عملکرد بخش‌های مکانیکی توربین‌های بادی مانند گیربکس هم می‌تواند تأثیراتی روی کیفیت توان شبکه داشته باشد. به همین جهت بعضی از معیارها و مشکلات کیفیت توان از جمله مهم‌ترین محدودیت‌ها برای به کارگیری توربین‌های بادی و اتصال آنها به شبکه‌های قدرت بوده است. خصوصاً اگر شبکه مورد نظر یک شبکه ضعیف بوده و حجم قابل توجهی از تولید توسط توربین‌های بادی تأمین گردد [۱].

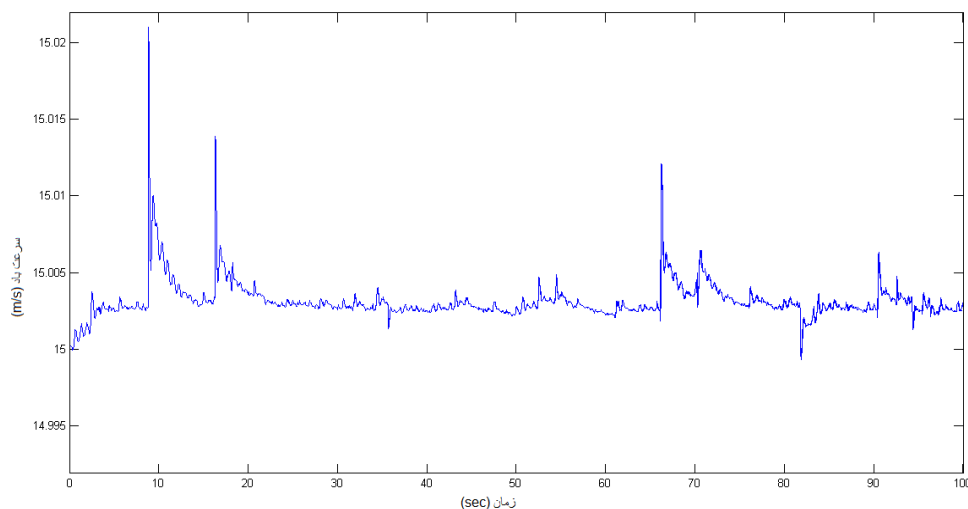
در سال‌های اخیر به دلیل گسترده‌گی استفاده از انرژی باد، مطالعات

این مقاله در تاریخ ۲۹ تیر ماه ۱۳۹۳ دریافت و در تاریخ ۶ تیر ماه ۱۳۹۴ بازنگری شد.

ابوالقاسم قابل، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، (email: ghasem.ghabel@gmail.com).

اصغر اکبری فرود، دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه سمنان، سمنان، (email: aakbari@semnan.ac.ir).

1. Yaw Error
2. Wind Shear
3. Tower Shadow



شکل ۱: سرعت باد معادل ۱۵ m/s.

تابع W_s سرعت باد در مرکز پره‌ها، r فاصله شعاعی از محور رتور، W_s تابع انحراف باد، α مؤلفه فضایی انحراف باد، H ارتفاع از مرکز پره‌ها و z ارتفاع نوک پره از سطح زمین می‌باشد. مؤلفه $W_s(r, \theta)$ اغتشاشی است که در سرعت باد به دلیل انحراف باد در ارتفاع دیده می‌شود که با سرعت باد اصلی جمع شده است. تقریب مرتبه ۲ این تابع با استفاده از سری تیلور به صورت (۳) است

$$W_s(r, \theta) \approx \alpha \frac{r}{H} \cos \theta + \frac{\alpha(\alpha-1)}{2} \left(\frac{r}{H}\right)^2 \cos^2 \theta \quad (3)$$

با توجه به (۳) در توربین‌های سه‌پره‌ای، نوسان‌های گشتاور به دلیل تغییر جهت باد برای هر سه پره باید با هم جمع شوند. وقتی سهم سه پره با هم جمع می‌شوند، مقدار عبارت $\cos \theta$ صفر می‌شود در حالی که عبارت $\cos^2 \theta$ یک مؤلفه dc برای تنظیم متوسط سرعت از ارتفاع مرکز پره‌ها نسبت به سرعت متوسط در مختصات فضایی می‌باشد. به منظور اعمال اثر تغییر جهت باد در مدل مرتبه ۳ عبارت $\cos^2 \theta$ ضروری است که احتیاج به بسط تیلور مرتبه ۳ می‌باشد. بنابراین برای تولید نوسان گشتاور به دلیل انحراف باد از (۴) استفاده می‌کنیم [۹]

$$W_s(r, \theta) \approx \alpha \frac{r}{H} \cos \theta + \frac{\alpha(\alpha-1)}{2} \left(\frac{r}{H}\right)^2 \cos^2 \theta + \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{6} \left(\frac{r}{H}\right)^3 \cos^3 \theta \quad (4)$$

۳-۲ سایه دکل

سرعت باد با حضور دکل‌های توربین بادی تغییر می‌کند. برج‌ها مانع عبور آزاد باد می‌شوند و یک کاهش جریان در جلوی برج و یک جریان گردابی مغشوش در پشت برج ایجاد می‌کنند، بنابراین گشتاور در هر پره کاهش می‌یابد که به این اثر سایه دکل گفته می‌شود. نوسان‌های گشتاور بر اثر سایه دکل برای توربین‌های پشت به باد شدیدتر از توربین‌های رو به باد است. در اینجا نوسان‌های گشتاور مرتبه ۳ ناشی از سایه دکل در جهت افقی محور رتور در نظر گرفته می‌شوند. میدان باد تنها با در نظر گرفتن سایه دکل در (۵) نشان داده شده که در آن V_H سرعت باد در مرکز پره‌ها می‌باشد. عبارت $V_{tower}(x, y)$ اغتشاش مشاهده شده ناشی از سایه دکل است که با سرعت اصلی جمع شده است. در [۴] اغتشاش ناشی از سایه دکل را با استفاده از تئوری جریان پتانسیل برای حرکت باد در اطراف دکل به صورت (۵) مدل کرده است

۲- بررسی معادلات مربوط به اغتشاشات آیرودینامیکی باد

۱-۲ سرعت باد معادل

محاسبه سرعت باد اعمال شده به پره‌های توربین باد از اهمیت زیادی در بررسی مدل‌سازی توربین باد برخوردار است چرا که سرعت باد منشأ اصلی گشتاور و در نتیجه توان تولیدی توسط توربین باد می‌باشد و به همین جهت هر گونه نوسان و تغییر در سرعت باد توان تولیدی و کیفیت آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. مدل سرعت باد معادل، یک مدل باد معادل برای کل رتور است که بخش‌های احتمالی و نیز مشخص سرعت باد در محدوده رتور را به حساب می‌آورد. مدل‌سازی سرعت باد در این روش نیازمند بررسی معادلات پیچیده آیرودینامیکی است که در [۷] و [۸] شرح داده شده‌اند. در این مقاله پس از بررسی این معادلات در مراجع ذکر شده و با اعمال اندکی تقریب، یک مدل مؤثر سرعت باد^۱ (EWS) به صورت نشان داده شده در شکل ۱ شبیه‌سازی شده است که این مدل بر اساس طیف Kaimal می‌باشد.

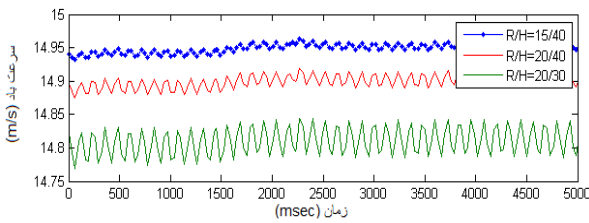
۲-۲ انحراف باد

سرعت باد با تغییر ارتفاع افزایش می‌یابد و به این افزایش سرعت باد و در نتیجه تغییر مسیر آن در سطح روتور انحراف باد گفته می‌شود. برای مثال در یک توربین باد با سه پره، پره‌ای که در نقطه بالا قرار دارد ممکن است با سرعت بیشتری از باد نسبت به پره‌ای که در نقطه پایین قرار دارد مواجه شود. در مدت هر چرخش، گشتاور سه بار نوسان می‌کند چرا که هر پره از مقدار مینیمم و ماکسیمم سرعت باد عبور می‌کند. یک مدل رایج انحراف جهت باد در (۱) نشان داده شده است

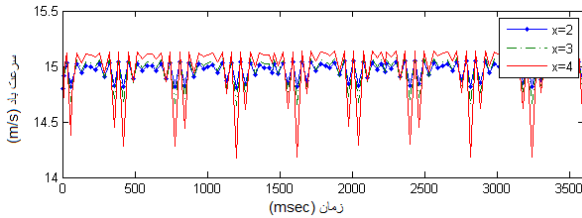
$$V(Z) = V_H \left(\frac{Z}{H}\right)^\alpha \quad (1)$$

برای آنالیز این معادله را به صورت تابعی در مختصات فضایی بر حسب r (فاصله شعاعی از محور رتور) و θ (زاویه فضایی) بیان می‌کنیم

$$V(r, \theta) = V_H \left(\frac{r \cos \theta + H}{H}\right)^\alpha = V_H [1 + W_s(r, \theta)] \quad (2)$$



شکل ۲: تأثیر انحراف باد بر روی سرعت معادل در مقادیر مختلف R/H.



شکل ۳: تأثیر سایه دکل روی سرعت باد در مقادیر مختلف x.

۳-۱ محاسبه سرعت باد ناشی از انحراف باد V_{eqws}

قسمتی از سرعت باد معادل ناشی از انحراف باد می‌باشد که در این بخش محاسبه می‌شود. برای توزیع معادله r را برابر صفر در نظر می‌گیریم. برای ساده‌کردن معادله $n = 0$ و $s = 1$ در نظر گرفته می‌شود

$$V_{eqws} = \frac{2V_H}{3sR} \sum_{b=1}^r \left[\frac{R^\alpha}{H} \cos \theta_b + \frac{R^\alpha}{4} \frac{\alpha(\alpha-1)}{2H^\alpha} \cos^\alpha \theta_b + \frac{R^\alpha}{5} \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{6H^\alpha} \cos^\alpha \theta_b \right] \quad (13)$$

برای ساده‌تر شدن معادله بالا می‌توانیم عبارت سیگما را گسترش دهیم. با محاسبات مثلثاتی (۱۳) به صورت زیر ساده می‌شود

$$V_{eqws} = V_H \left[\frac{\alpha(\alpha-1)}{\lambda} \left(\frac{R}{H} \right)^\alpha + \frac{R^\alpha}{5} \frac{\alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{6H^\alpha} \cos^\alpha \theta_b \right] \quad (14)$$

اکنون سرعت باد به دست آمده ناشی از انحراف باد (V_{eqws}) را با سرعت باد معادل در ارتفاع (V_{eq}) جمع می‌کنیم. با توجه به مقادیر داده شده در جدول ۱ برای ضرایب (۱۴)، نتیجه باد ایجاد شده در مقادیر مختلف شعاع و ارتفاع دکل در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که از شکل ۲ مشخص است خطای ناشی از انحراف باد با نسبت شعاع پره‌ها به ارتفاع دکل (R/H) در ارتباط است. با افزایش این نسبت، خطای انحراف باد افزایش می‌یابد.

۳-۲ محاسبه سرعت باد ناشی از سایه دکل (V_{eqts})

در این بخش قسمتی از سرعت باد که ناشی از حضور سایه دکل می‌باشد، محاسبه شده است. با محاسبه انتگرال (۱۲) و پس از قراردادن $s = 1$ و $r = 0$ به دست می‌آید [۹]

$$V_{eqts} = \frac{mV_H}{3R} \sum_{b=1}^r \left[\frac{a^\alpha}{\sin^\alpha \theta_b} \ln \left(\frac{R^\alpha \sin^\alpha \theta_b}{x^\alpha} + 1 \right) - \frac{2a^\alpha R^\alpha}{R^\alpha \sin^\alpha \theta_b + x^\alpha} \right] \quad (15)$$

با استفاده از مقادیر جدول ۱ مقدار باد ناشی از مجموع باد معادل و انحراف سایه دکل را در محیط Matlab شبیه‌سازی می‌کنیم. همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، با کم‌شدن فاصله پره‌ها از دکل (x)، تأثیر سایه

جدول ۱: ضرایب مربوط به معادلات باد.

α : مؤلفه فضایی انحراف باد بین ۰٫۱ تا ۱	۰٫۴۲۳
a : شعاع برج	۰٫۸۵
x : فاصله پره‌ها از برج	۳ m
H : ارتفاع برج	۴۰ m
R : شعاع پره تا مرکز برج	۲۰ m
V_H : سرعت باد	۱۲ m/s
$m = V/V_H$: بین ۰٫۹۸ تا ۱	۱

$$V(x, y) = V_H + V_{tower}(x, y) \quad (5)$$

$$V_{tower} = V_H a^\alpha \frac{y^\alpha - x^\alpha}{(y^\alpha + x^\alpha)^\alpha} \quad (6)$$

در معادله بالا V متوسط سرعت فضایی، a شعاع دکل، y فاصله جانبی پره از وسط دکل و x فاصله افقی پره از وسط دکل می‌باشند. با تبدیل (۶) از مختصات دکارتی (x, y) به مختصات فضایی (r, θ) ، (۷) نتیجه می‌شود [۹]

$$V_{tower}(r, \theta, x) = ma^\alpha \frac{r^\alpha \sin^\alpha \theta - x^\alpha}{(r^\alpha \sin^\alpha \theta + x^\alpha)^\alpha} \quad (7)$$

۳-۳ محاسبه سرعت معادل باد و شبیه‌سازی در نرم‌افزار MATLAB

میدان باد کل، شامل تأثیرات سایه دکل و انحراف باد اکنون می‌تواند به یک سرعت باد معادل تبدیل شود. سه مؤلفه این باد معادل که از سایه دکل، انحراف باد و سرعت باد در مرکز پره‌ها تأثیر می‌پذیرند، می‌توانند به صورت جدا حل شوند. فرض کنید که $\varphi(r) = kr$ باشد و تعریف کنیم $n = r/R$ و $s = 1 - n$ در نتیجه پس از حل معادلات داریم

$$V_{eq}(t, \theta) = \frac{2V_H}{3sR} \sum_{b=1}^r \int_{r_c}^R \left[r + \frac{r^\alpha \alpha}{H} \cos \theta_b + \frac{r^\alpha \alpha(\alpha-1)}{2H^\alpha} \cos^\alpha \theta_b + \frac{r^\alpha \alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{6H^\alpha} \cos^\alpha \theta_b + ma^\alpha \frac{r^\alpha \sin^\alpha \theta_b - rx^\alpha}{(r^\alpha \sin^\alpha \theta_b + x^\alpha)^\alpha} \right] dr \quad (8)$$

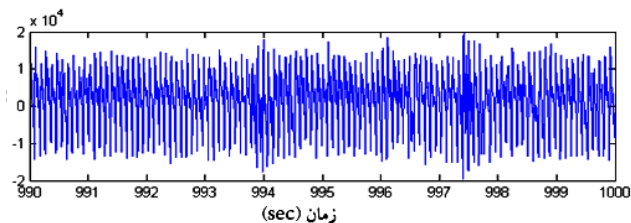
این سرعت باد معادل دارای سه مؤلفه است. مؤلفه اول (V_{eq}) مربوط به سرعت باد در مرکز پره‌ها، مؤلفه دوم (V_{eqws}) مربوط به انحراف باد و مؤلفه سوم (V_{eqts}) مربوط به سایه دکل می‌باشد. بنابراین (۸) می‌تواند به صورت (۹) نوشته شود که نهایتاً به (۱۰) تا (۱۲) تجزیه شود [۹]

$$V_{eq}(t, \theta) = V_{eq} + V_{eqws} + V_{eqts} \quad (9)$$

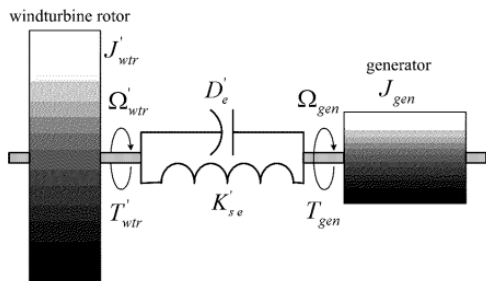
$$V_{eqws} = \frac{2V_H}{3sR} \sum_{b=1}^r \int_{r_c}^R [r] dr \quad (10)$$

$$V_{eqws} = \frac{2V_H}{3sR} \sum_{b=1}^r \int_{r_c}^R \left[\frac{r^\alpha \alpha}{H} \cos \theta_b + \frac{r^\alpha \alpha(\alpha-1)}{2H^\alpha} \cos^\alpha \theta_b + \frac{r^\alpha \alpha(\alpha-1)(\alpha-2)}{6H^\alpha} \cos^\alpha \theta_b \right] dr \quad (11)$$

$$V_{eqts} = \frac{2V_H}{3sR} \sum_{b=1}^r \int_{r_c}^R ma^\alpha \frac{r^\alpha \sin^\alpha \theta_b - rx^\alpha}{(r^\alpha \sin^\alpha \theta_b + x^\alpha)^\alpha} dr \quad (12)$$



شکل ۳: گشتاور توربین باد ناشی از تأثیر اغتشاشات باد.



شکل ۷: سیستم معادل گیربکس در سمت ژنراتور.

مدل سه جرم می‌تواند با در نظر گرفتن یک سیستم معادل با ضریب سختی و ضریب میرایی معادل، به مدل دو جرم تبدیل شود. می‌توان از ممان اینرسی شفت‌ها و چرخ‌دنده‌ها در مقابل ممان اینرسی توربین و ژنراتور به دلیل کوچک بودن صرف نظر کرد. بنابراین مدل منتهی در اصل یک مدل دو جرم متصل به یک شفت انعطاف‌پذیر می‌باشد. تنها نسبت گیربکس روی یک سیستم معادل جدید تأثیر می‌گذارد [۱۱].

معادلات دینامیکی می‌توانند در دو نقطه نوشته شوند، در سمت توربین باد با تأثیر مؤلفه ژنراتور روی گیربکس یا در سمت ژنراتور. در این مقاله از سیستم معادل سمت ژنراتور که در شکل ۷ آمده است، استفاده می‌شود. معادلات دینامیکی پیشرانه در سمت ژنراتور در زیر آورده شده است

$$T_{wtr} = J_{wtr} \frac{d\Omega_{wtr}}{dt} + D_e (\Omega_{wtr} - \Omega_{gen}) + k_{se} (\theta_{wtr} - \theta_{gen}) \quad (18)$$

$$-T_{gen} = J_{gen} \frac{d\Omega_{gen}}{dt} + D_e (\Omega_{gen} - \Omega_{wtr}) + k_{se} (\theta_{gen} - \theta_{wtr}) \quad (19)$$

$$\frac{d\theta_{wtr}}{dt} = \Omega_{wtr}, \quad \frac{d\theta_{gen}}{dt} = \Omega_{gen}$$

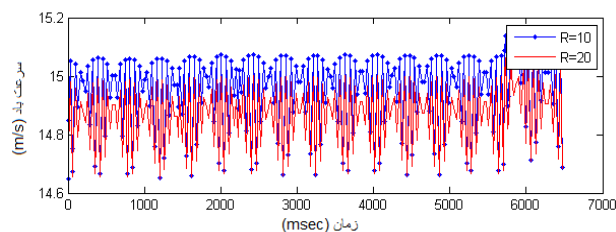
سختی معادل برابر است با

$$\frac{1}{k_{se}} = \frac{1}{k_{wtr}} + \frac{1}{k_{gen}} \quad (20)$$

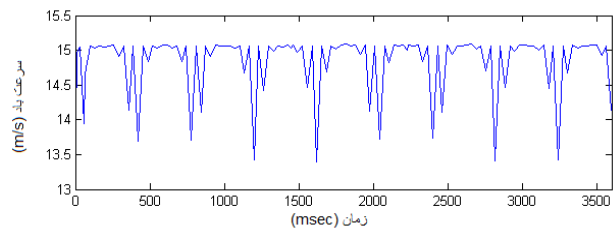
و ممان اینرسی برای رتور برابر است با

$$J_{wtr} = \frac{1}{k_{gear}^2} J_{gen} \quad (21)$$

با توجه به معادلات بالا، سرعت زاویه‌ای توربین باد Ω_{wt} (سرعت باد قبل از گیربکس) و همچنین سرعت زاویه‌ای ژنراتور Ω_{gen} (سرعت باد بعد از گیربکس) برای مقادیر داده شده در جدول ۲ مربوط به گیربکس نمونه، برای دو حالت بدون اغتشاش آیرودینامیکی باد و با اغتشاش آیرودینامیکی باد به ترتیب به صورت شکل‌های ۸ و ۹ نمایش داده شده است.



شکل ۴: تأثیر سایه دکل روی باد در مقادیر مختلف R (شعاع دکل).



شکل ۵: باد معادل ناشی از مجموع سایه دکل و انحراف باد.

دکل بر روی سرعت باد بیشتر می‌شود. می‌توان دید که تأثیر این اغتشاش از انحراف باد بیشتر است و در بعضی مواقع باعث ایجاد چیزی در حدود ۳ درصد نوسان در سرعت باد می‌شود. همچنین در شکل ۴ تأثیر سایه دکل بر روی سرعت باد در دکل‌های با شعاع مختلف آمده است. از آنجا که خطای باد ناشی از انحراف باد و سایه دکل به صورت هم‌زمان رخ می‌دهند، در این صورت سرعت باد با حضور این دو خطا به صورت شکل ۵ مشاهده می‌شود.

۳-۳ معادله گشتاور و تأثیر اغتشاشات بر روی آن

رتور آیرودینامیک سرعت باد را به توان مکانیکی تبدیل می‌کند. در واقع تأثیر آیرودینامیک باد روی پره‌ها، سرعت باد را به گشتاور آیرودینامیک تبدیل می‌کند. مجموع گشتاور ایجادشده روی پره، گشتاور آیرودینامیک روی شفت اصلی را نتیجه می‌دهد و توان روی شفت اصلی به صورت زیر بیان می‌شود

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 V^3 C_p(\lambda, \theta_{pitch}) \quad (16)$$

که ρ چگالی هوا، R شعاع رتور، V سرعت باد و C_p مؤلفه آیرودینامیک می‌باشد.

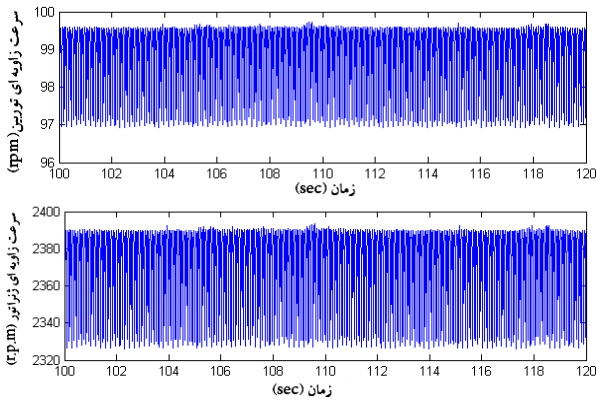
با توجه به (۱۶) گشتاور آیرودینامیک به صورت زیر محاسبه می‌شود

$$T = \frac{P}{\omega_{rotor}} = \frac{\rho \pi R^3 V^3 C_p(\lambda, \theta_{pitch})}{2 \omega_{rotor}} \quad (17)$$

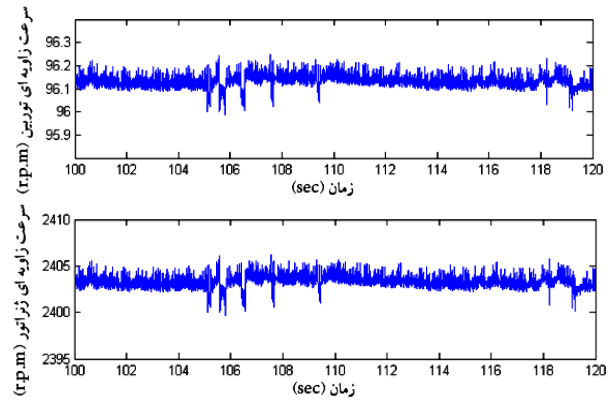
که ω_{rotor} سرعت چرخش رتور است. همان طور که از معادله بالا مشخص است، گشتاور با توان سوم سرعت باد معادل رابطه مستقیم دارد. مشخصاً هر گونه تغییر روی سرعت باد، با شدتی سه برابر روی گشتاور خروجی رتور و در نتیجه توان توربین باد اثرگذار می‌باشد. با توجه به اغتشاشات ایجادشده روی باد معادل، می‌توان نتایج حاصل را روی گشتاور در شکل ۶ مشاهده کرد [۱۰].

۴- معادلات گیربکس توربین بادی

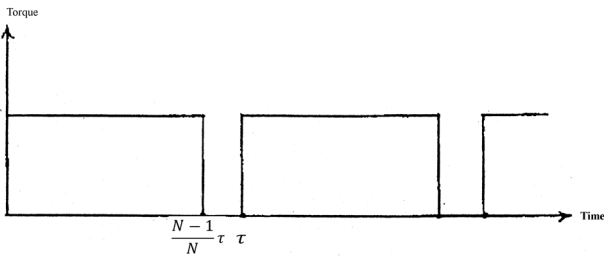
مجموعه چرخان توربین بادی و ژنراتور به همراه گیربکس، مجموعه دینامیکی پیچیده‌ای را تشکیل می‌دهند که نوسانات مکانیکی خاص خود را به همراه دارند. جرم‌های متناظر این مجموعه شامل یک جرم بزرگ توربین بادی، اجرام گیربکس و چرخ‌دنده‌ها و جرم ژنراتور می‌باشند. این



شکل ۹: سرعت زاویه‌ای ورودی Ω_{wt} و خروجی Ω_{gen} گیربکس توربین باد در حضور اغتشاشات باد.



شکل ۸: سرعت زاویه‌ای ورودی Ω_{wt} و خروجی Ω_{gen} گیربکس توربین باد بدون حضور اغتشاشات باد.



شکل ۱۱: گشتاور انتقال داده شده با یک چرخ‌دنده شکسته.

جدول ۲: پارامترهای مربوط به گیربکس.

ممان اینرسی ژنراتور	$J_{gen} = 90 \text{ kg.m}^2$
ممان اینرسی توربین باد	$J_{wt} = 40 \text{ e}^5 \text{ kg.m}^2$
سختی شفت	$K_{shaft} = 90 \text{ e}^7 \text{ Nm/rad}$
مؤلفه میرایی شفت	$D_{shaft} = 60 \text{ e}^7 \text{ Nm.sec/rad}$
ضریب گیربکس	$K_{gear} = 24$

با توجه به (۲۳) می‌توان تغییر مکان زاویه‌ای خروجی را با استفاده از سری فوریه گشتاور خروجی به صورت زیر محاسبه کرد

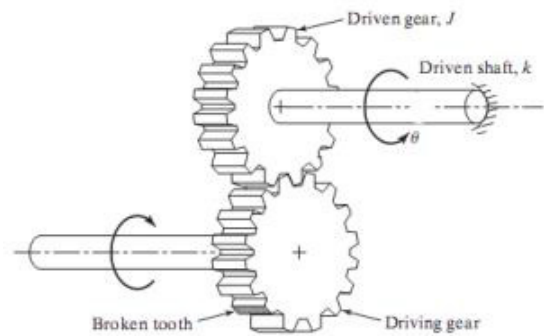
$$J\ddot{\theta} + k\theta = T = \frac{a}{\tau} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (24)$$

در نتیجه معادله θ خروجی را می‌توان به صورت زیر به دست آورد

$$\theta(t) = \frac{a}{\tau k} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t}{k - J(n\omega)^2} (t) \quad (25)$$

حال می‌توان با استفاده از معادله بالا در نرم افزار Matlab معادله گشتاور و سرعت زاویه خروجی یک گیربکس با چرخ‌دنده شکسته را به صورت زیر به دست آورد. با توجه به پارامترهای داده‌شده در جدول ۲ مربوط به گیربکس توربین باد شبیه‌سازی شده، در صورت شکسته شدن یکی از چرخ‌دنده گیربکس توربین نمونه، گشتاور و سرعت زاویه‌ای خروجی به صورت شکل ۱۲ و ۱۳ به دست می‌آید.

اعمال یک چنین سرعت زاویه‌ای (r.p.m) به ژنراتور DFIG توربین باد قطعاً باعث به وجود آمدن مشکلاتی در تولید توان و ولتاژ خروجی می‌شود که این تغییرات در بخش بعد روی یک شبکه نمونه مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. با تغییر ضرایب مربوط به معادلات گیربکس مانند سختی شفت، ممان اینرسی توربین باد و ژنراتور، مؤلفه میرایی و نسبت گیربکس، می‌توان معادلات بالا را با توجه به نوع گیربکس استفاده‌شده در توربین بادی برای هر نوع گیربکس به کار برد.



شکل ۱۰: چرخ‌دنده با یک دنده شکسته.

۵- مدل ریاضی چرخ‌دنده شکسته گیربکس

گیربکس به عنوان یکی از قسمت‌های پرخا در توربین‌های بادی مدرن در نظر گرفته می‌شود. خطاهای ایجادشده روی گیربکس قطعاً باعث خارج کردن گیربکس از ناسل برای تعویض یا تعمیر گیربکس می‌شود. از مهم‌ترین مشکلات در گیربکس‌ها، شکستن یا ترک خوردن چرخ‌دنده‌ها می‌باشد (شکل ۱۰). مرجع [۱۲] یک مدل ریاضی را برای معادلات مکانیکی چرخ‌دنده با یک دنده شکسته ارائه کرده است. معادلات مکانیکی یک چرخ‌دنده را به صورت زیر در نظر می‌گیریم

$$J\ddot{\theta} + k\dot{\theta} = T \quad (22)$$

که در آن k سفتی پیچشی شفت، J ممان اینرسی، θ تغییر مکان زاویه‌ای و T گشتاور وارده می‌باشد. فرض می‌کنیم یکی از n چرخ‌دنده موجود شکسته باشد (شکل ۱۰).

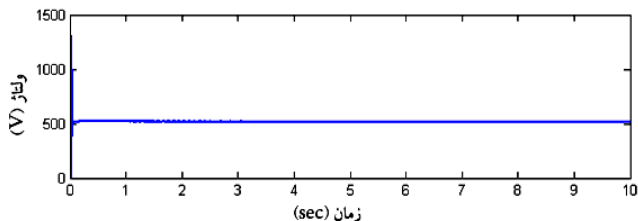
گشتاور انتقال داده شده به شفت با یک چرخ‌دنده شکسته را می‌توان به صورت شکل ۱۱ نشان داد. با توجه به شکل ۱۱ می‌توان معادله گشتاور انتقال داده شده با یک چرخ‌دنده شکسته را به صورت زیر به دست آورد

$$T = \frac{a}{\tau} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (23)$$

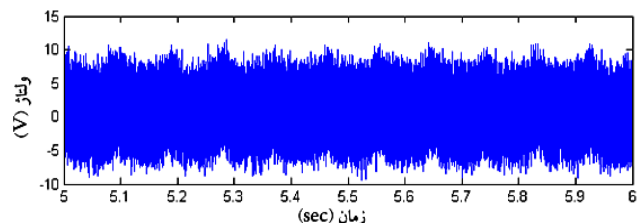
$$\omega = \frac{\gamma \pi n}{60} \text{ rad/sec}$$

$$\tau = \frac{\gamma \pi}{\omega}$$

$$\begin{cases} T = T_0 & , 0 \leq t \leq \frac{N-1}{N} \tau \\ T = 0 & , \frac{N-1}{N} \tau \leq t \leq \tau \end{cases}$$



شکل ۱۶: ولتاژ خروجی ژنراتور در حضور اغتشاشات آیرودینامیکی باد (انحراف باد + سایه دکل).



شکل ۱۷: اختلاف ولتاژ تولیدی در دو حالت با حضور اغتشاش و بدون حضور اغتشاش باد.

جدول ۳: پارامترهای DFIG.

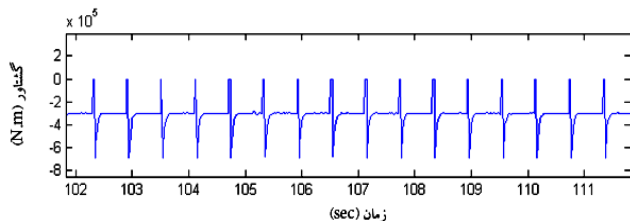
P	۱٫۵ MW
$pole$	۲
V_{L-L}	۶۹۰ V
L_m	$۲٫۵e^{-۳}$
L_{lr}	$۸۳٫۳۶۹e^{-۳}$
R_r	$۲٫۹e^{-۳}$
R_s	$۲٫۶e^{-۳}$
L_{ls}	$۷۷٫۳۰۶e^{-۳}$
L_g	$۰٫۲۵e^{-۳}$
R_g	.

می‌شود ولتاژ خروجی DFIG به صورت مطلوب و بدون خطا می‌باشد. ولتاژ باس متصل به توربین بادی در مقدار مؤثر ۵۲۵ ولت که در شبکه نمونه مورد نظر بوده است ثابت می‌باشد.

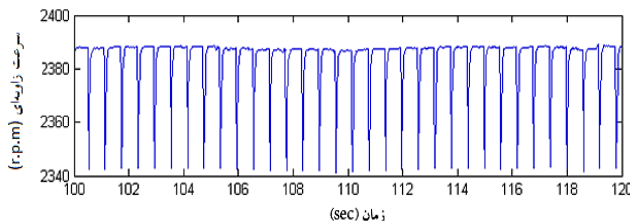
حال تأثیر اغتشاشات آیرودینامیکی باد بر روی پارامترهای خروجی ژنراتور متصل به توربین باد در شبکه نمونه مورد محاسبه قرار می‌گیرد. ولتاژ تزریقی به شبکه توسط ژنراتور DFIG متصل به توربین باد در حضور این اغتشاشات در شکل ۱۶ نشان داده شده است. همان طور که دیده می‌شود، شکل خروجی ولتاژ در حضور اغتشاشات باد، تأثیر این اغتشاشات را به طور واضح نشان نمی‌دهد.

به منظور بهتر دیده شدن تأثیر اغتشاشات باد بر روی ولتاژ خروجی، اختلاف ولتاژ در دو حالت بدون حضور اغتشاشات باد و با حضور اغتشاشات باد را محاسبه کرده‌ایم. در شکل ۱۷ این اختلاف ولتاژ نشان داده شده است. با توجه به شکل، میزان تغییرات ولتاژ در حضور اغتشاشات باد چیزی در حدود ۵ تا ۱۰ درصد می‌باشد.

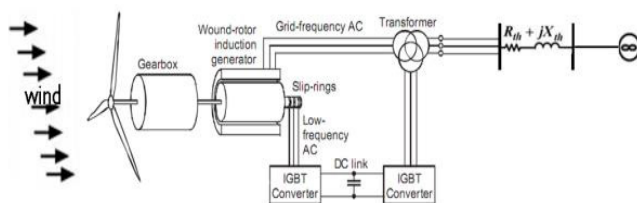
همچنین در بخش قبل یک مدل ریاضی برای یک گیربکس معیوب ارائه شد. تأثیر این گیربکس روی پارامترهای خروجی ژنراتور متصل به توربین بادی در اینجا نشان داده شده است. دقت شود که در این حالت هیچ گونه اغتشاش آیرودینامیکی بادی روی سیستم وجود ندارد و تنها خطای موجود، خطای شکسته‌شدن یکی از چرخ‌دنده‌های گیربکس است. شکل ۱۸ ولتاژ خروجی ژنراتور DFIG را در حضور خطای مکانیکی گیربکس نشان می‌دهد.



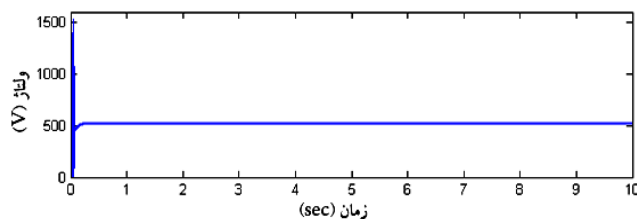
شکل ۱۲: گشتاور توربین باد با یک دنده شکسته در چرخ‌دنده گیربکس.



شکل ۱۳: سرعت زاویه‌ای ژنراتور با یک دنده شکسته در چرخ‌دنده گیربکس.



شکل ۱۴: دیاگرام شبکه دو باس مورد مطالعه.

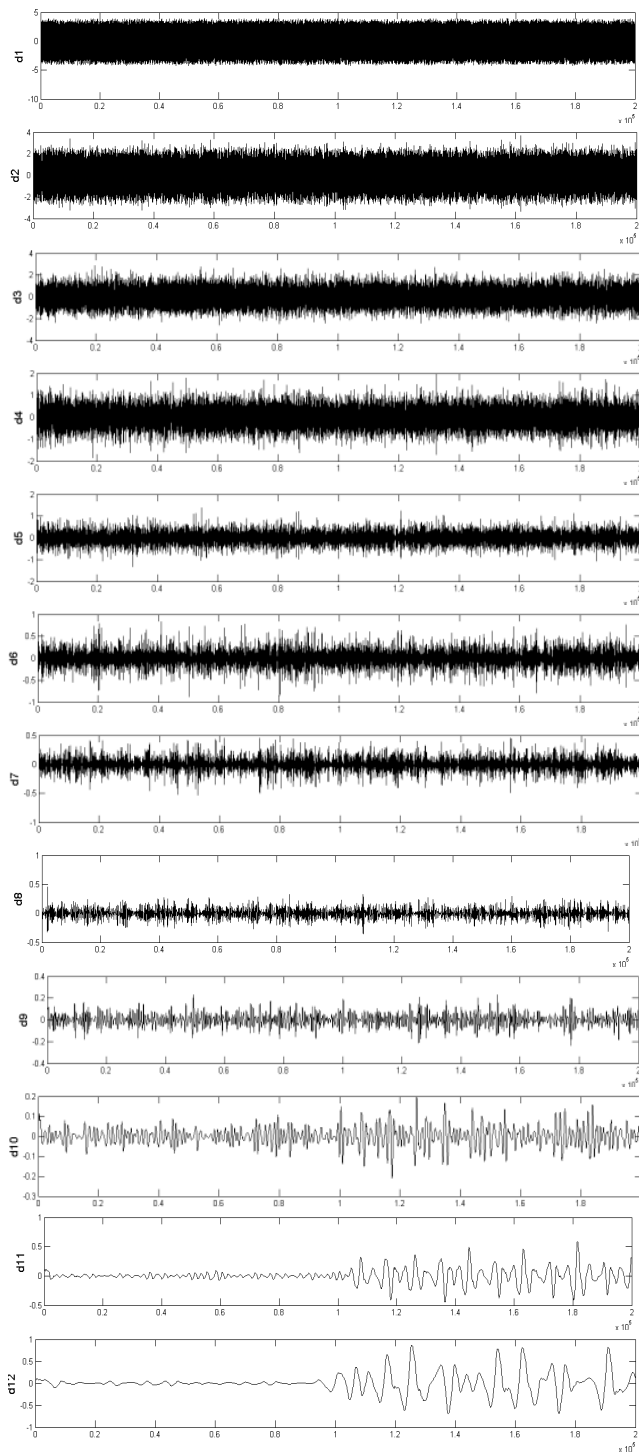


شکل ۱۵: ولتاژ باس متصل به DFIG.

۶- شبیه‌سازی شبکه نمونه

شبکه دو باس مورد مطالعه در این مقاله یک شبکه با یک توربین بادی متصل به ژنراتور DFIG و خط انتقال متصل به باس بی‌نهایت است. اطلاعات مربوط به ژنراتور در جدول ۳ و خطوط انتقال شبکه در [۱۳] آورده شده است. همچنین دیاگرام تک‌خطی شبکه در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

ژنراتور شبیه‌سازی شده در این مقاله از مرتبه ۵ می‌باشد که با کنترل‌کننده مد لغزشی کنترل می‌شود. کنترل‌کننده مد لغزشی استفاده شده کانورتر سمت روتور و سمت شبکه را کنترل می‌کند که پارامترهای کنترلی در سمت روتور، توان راکتیو و گشتاور الکترومغناطیسی بوده و در سمت شبکه، ولتاژ لینک DC و توان راکتیو می‌باشد [۱۴]. کنترل‌کننده مقاوم عملکرد بهتری نسبت به کنترل‌کننده‌های کلاسیک مثل کنترل‌کننده PI در کاهش اثر اغتشاشات و خرابی تجهیزات در خروجی توربین بادی دارد با این حال الگوریتم پیشنهادی این مقاله قادر است که اغتشاشات ناشی از عوامل مختلف را شناسایی کند. به منظور بررسی و فهم بهتر تأثیر اغتشاشات باد و همچنین خطای گیربکس مربوط به شکسته‌شدن چرخ‌دنده روی پارامترهای خروجی ژنراتور توربین بادی، در ابتدا نتایج حاصل از شبیه‌سازی شبکه، بدون حضور هیچ یک از اغتشاشات نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۱۵ مشاهده

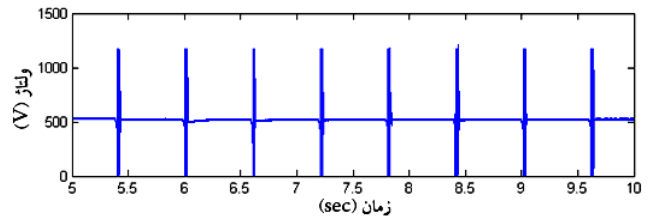


شکل ۲۱: تجزیه سیگنال ولتاژ با استفاده از تبدیل موجک db۴ به ۱۲ سطح.

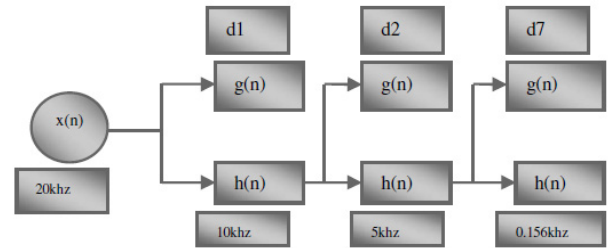
بر اساس رنج نمونه، ولتاژ ورودی به باس متصل به DFIG می‌تواند به طور کامل به ۱۲ سطح تجزیه شود. شکل ۲۰ سیگنال ورودی به تابع موجک را نشان می‌دهد. همچنین شکل ۲۱ تجزیه‌شده سیگنال ورودی به موجک را تا ۱۲ سطح نشان می‌دهد.

انتظار می‌رفت که انرژی سیگنال تا سطح‌های ۴ و ۵ گرفته شود اما همان طور که مشاهده می‌شود سطح ۱۲ نیز دارای انرژی است و هنوز تغییرات سیگنال ولتاژ را دنبال می‌کند.

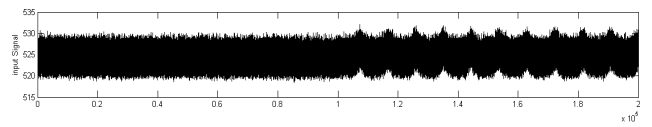
همان طور که از شکل ۲۲ مشخص است، تجزیه سیگنال با استفاده از موجک در سطح ۱۲، وجود یک خطا در سیستم را از یک زمان مشخص به بعد نشان می‌دهد. خطای مشخص شده ناشی از اغتشاشات آیرودینامیکی باد شامل سایه دکل و انحراف باد می‌باشد که از یک زمان



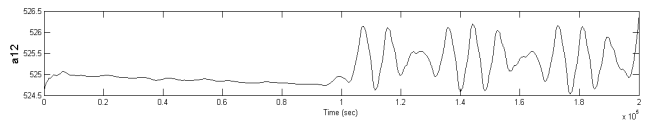
شکل ۱۸: ولتاژ خروجی ژنراتور در حضور خطای مکانیکی گیربکس.



شکل ۱۹: تجزیه چندسطحی سیگنال.



شکل ۲۰: ولتاژ خروجی DFIG با حضور اغتشاش باد به عنوان سیگنال ورودی تابع موجک.

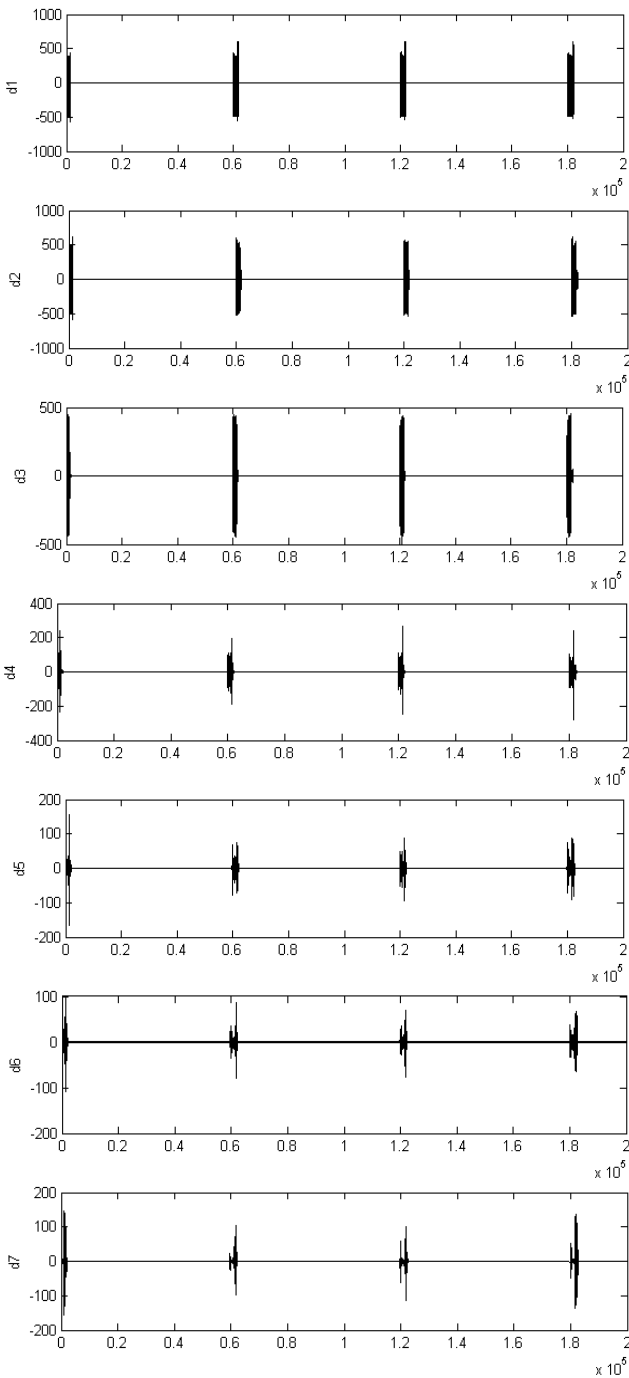


شکل ۲۲: تقریب سیگنال ولتاژ با تبدیل موجک db۴.

۷- آنالیز اغتشاشات آیرودینامیکی باد با استفاده از تبدیل موجک

تابع تبدیل موجک برای تشخیص برخی اغتشاشات مربوط به کیفیت توان مانند افت و بیشبود ولتاژ، سوسوزدن ولتاژ، هارمونیک‌ها و غیره در شبکه متصل به توربین بادی استفاده می‌شود. در این مقاله می‌خواهیم از آنالیز موجک برای تشخیص اغتشاشات آیرودینامیکی باد و همچنین خطای مکانیکی مربوط به گیربکس استفاده کنیم. ولتاژ خروجی DFIG به عنوان سیگنال ورودی تابع موجک مورد استفاده قرار می‌گیرد. همان طور که گفته شد، اغتشاشات مربوط به باد در بخش‌های قبل بررسی و شبیه‌سازی شد. اغتشاشات به وجود آمده در کیفیت توان شبکه و الگوریتم پیشنهادی تشخیص اغتشاشات مربوط به کیفیت توان در اینجا مورد بررسی قرار می‌گیرد. سیستم در نرم‌افزار Matlab شبیه‌سازی شده است و نتایج شبیه‌سازی مؤثر بودن این روش برای تشخیص این اغتشاشات را نشان می‌دهد.

یک روش در تحلیل سیگنال‌ها با استفاده از تابع موجک، روش تجزیه چندسطحی (MRA) می‌باشد. روش MRA به سیگنال اجازه می‌دهد تا به بخش‌های مختلفی تقسیم شود. تفکیک‌پذیری به سطح‌های کوچک‌تر، سیگنال را با اطلاعات فرکانس پایین‌تر تقریب می‌زند در حالی که ویژگی‌های سیگنال اصلی را حفظ می‌کند و دقت کار را افزایش می‌دهد. فرکانس نمونه‌برداری ۲۰ kHz در این مطالعه انتخاب شده تا در رنج‌های پایین، ویژگی‌های سیگنال اصلی را حفظ کرده و نشان دهد (شکل ۱۹). تابع موجک مادر از خانواده db۴ انتخاب شده است چرا که عملکرد بهتری را برای آنالیز سیگنال‌های گذرا در سیستم قدرت دارا می‌باشد [۱۵].



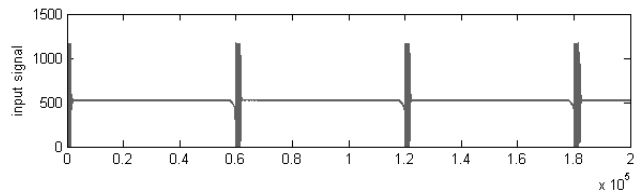
شکل ۲۴: تجزیه سیگنال ولتاژ با استفاده از تبدیل موجک db۵ به ۷ سطح.

۳) مقایسه ارزش درجه اوج.

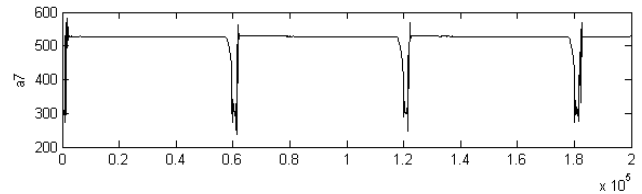
تابع موجکی که دارای بیشترین درجه اوج است بهینه‌ترین پارامترهای α و β را دارا می‌باشد. در اینجا پارامتر β از ۰٫۱ تا مقدار ۴ با گام‌های ۰٫۱ و پارامتر α از مقدار ۱ تا ۳۰ با گام‌های ۱ تغییر می‌کند. مقدار بهینه $\beta = ۰٫۳$ و مقدار بهینه $\alpha = ۱۹$ به دست می‌آید.

برای مشخص کردن خطای گیربکس سیگنال‌های نمونه‌ای از خروجی ژنراتور دریافت می‌کنیم. سیگنال خروجی که ما در اینجا استفاده کرده‌ایم، ولتاژ خروجی ژنراتور می‌باشد که به عنوان سیگنال ورودی تابع موجک جهت آنالیز مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۲۳). نتایج فیلتر بهینه سیگنال ورودی در شکل‌های ۲۴ و ۲۵ نشان داده شده است.

با توجه به شکل‌های خروجی تابع موجک، می‌توان مشاهده کرد در حالی که سرعت باد به صورت یکنواخت و بدون خطا می‌باشد، خروجی تابع موجک وجود یک نوسان پریودیک در ولتاژ تولیدی ژنراتور را نشان



شکل ۲۳: سیگنال ولتاژ ورودی به تبدیل موجک.



شکل ۲۵: تقریب سیگنال ولتاژ با تبدیل موجک db۵.

مشخص به مجموعه توربین بادی اعمال شده و تأثیرات آن بر روی سیگنال خروجی ولتاژ با استفاده از تابع موجک آشکار شده است.

۸- آنالیز خطای گیربکس با چرخ‌دنده شکسته با استفاده از تبدیل موجک

تشخیص خطای گیربکس توربین بادی برای افزایش قابلیت اطمینان توربین بادی و عمر آن بسیار مفید است. سیگنال‌های نوسانی خروجی از گیربکس معمولاً دارای نویز هستند. به همین دلیل پیدا کردن علائم شکست اولیه در گیربکس مشکل است. یک روش جدید بر اساس تطبیق تابع موجک برای فیلترکردن و تشخیص شکسته‌شدن چرخ‌دنده گیربکس در اینجا ارائه شده است. در روش پیشنهادشده، گام اول بهینه‌کردن پارامترهای تابع موجک بر اساس قانون ماکسیمم‌کردن درجه اول می‌باشد و سپس از آن برای فیلترکردن خطای گیربکس استفاده می‌شود تا ویژگی‌های خطا استخراج شود. تابع موجک مادر استفاده‌شده از خانواده db می‌باشد که ما در اینجا db۵ را در نظر می‌گیریم. تابع موجک دختر با تغییر بازه زمان و اندازه آن از تابع موجک مادر به دست می‌آید که در فرمول زیر آورده شده است

$$\Psi_{(a,b)(t)} = \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right) = \exp\left(-\frac{(\beta^r(t-b)^r)}{2a^r}\right) \cos\left(\frac{\pi(t-b)}{a}\right) \quad (26)$$

با توجه به (۲۶) تنها پارامترهای α و β احتیاج به تغییر دارند. پارامترهای α و β محل و شکل تابع موجک دختر را مشخص می‌کنند. در نتیجه فیلتر تابع موجک می‌تواند با بهینه‌کردن دو پارامتر برای موجک دختر بهینه‌سازی شود. برای بهینه‌کردن این دو پارامتر از تعریف درجه اوج در نمودار آماری استفاده شده است. درجه اوج در یک نمودار آماری^۱ در مهندسی برای تشخیص علائم خطا استفاده می‌شود که به صورت (۲۷) تعریف می‌شود

$$kurt(y) = E(y^4) - 3[E(y^2)]^2 \quad (27)$$

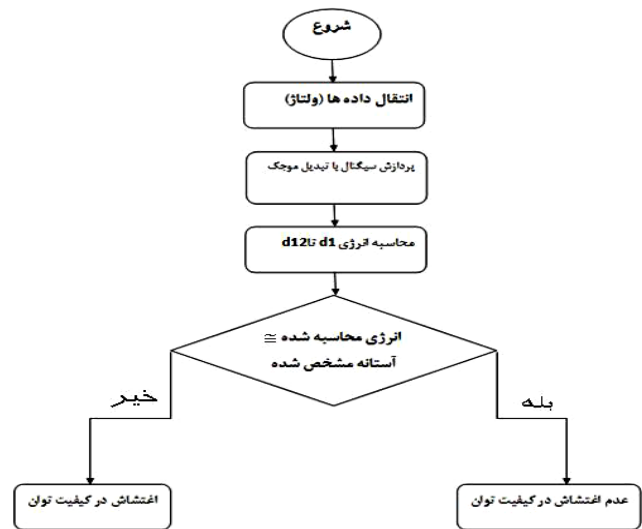
که در آن y سری زمانی نمونه‌برداری و E نشان‌دهنده انتظار ریاضی از سری می‌باشد. از این روش برای تولید تابع موجک مناسب به صورت زیر استفاده می‌شود:

- ۱) پارامترهای α و β را بین یک بازه مشخص تغییر می‌دهیم.
- ۲) تابع موجک دختر را تشکیل می‌دهیم و درجه اوج را برای هر تابع موجک محاسبه می‌کنیم.

1. Kurtosis

جدول ۴: انرژی سیگنال‌های تجزیه شده.

انرژی سیگنال ($\times 10^{-11}$)	بدون خطا	با حضور خطاهای آیرودینامیکی باد	با حضور خطای گیربکس
Ed1	۷,۲۸۱۵	۷,۲۹۱۵	۷,۲۵۶۳
Ed2	۷,۶۶۳۷	۷,۶۷۴۳	۷,۵۸۲۳
Ed3	۸,۰۴۶۶	۸,۰۵۷۶	۷,۹۱۴۹
Ed4	۸,۴۳۰۵	۸,۴۴۲۰	۸,۲۸۹۴
Ed5	۸,۸۱۶۷	۸,۸۲۸۶	۸,۶۶۶۳
Ed6	۹,۲۰۷۷	۹,۲۲۰۱	۹,۰۴۵۴
Ed7	۹,۶۱۱۵	۹,۶۲۴۵	۹,۴۳۰۱
Ed8	۱۰,۰۳۹	۱۰,۰۵۳	
Ed9	۱۰,۵۰۴	۱۰,۵۱۸	
Ed10	۱۱,۰۸۳	۱۱,۰۹۸	
Ed11	۱۱,۸۱۸	۱۱,۸۳۳	
Ed12	۱۲,۹۲۷	۱۲,۹۴۴	



شکل ۲۶: روندنمای تحلیل سیگنال با استفاده از تبدیل موجک.

گرفت که این اغتشاشات سرعت باد را چیزی در حدود ۵ تا ۱۰ درصد دچار نوسان می‌کند. با تأثیر این نوسانات روی گشتاور مکانیکی خروجی، میزان تغییرات ولتاژ خروجی ژنراتور القایی متصل به توربین باد نیز ۵ تا ۱۰ درصد مقدار آن در حالت بدون اغتشاش می‌باشد.

همچنین با استفاده از معادلات مکانیکی سرعت زاویه‌ای خروجی گیربکس توربین بادی با چرخ‌دنده شکسته، به طور مطلوب و دقیقی در نرم‌افزار Matlab شبیه‌سازی شد. معادلات به کار برده شده منحصرأ مربوط به گیربکس استفاده شده در این توربین بادی نمی‌باشد و با تغییر پارامترهای مربوط به گیربکس می‌توان این معادلات را برای گیربکس‌های دیگر نیز به کار برد.

این مقاله یک روش پیشنهادی برای تفکیک خطای آیرودینامیکی و مکانیکی با استفاده از تابع موجک ارائه کرده است. روش ارائه شده به طور مطلوب تأثیر خطاهای توربین بادی بر روی ولتاژ خروجی را در حالت‌های مختلف مشخص و با استفاده از الگوریتم پیشنهادی از یکدیگر تفکیک کرده است. قطعاً روش ارائه شده در این مقاله با انتخاب دقیق و درست یک تابع موجک مناسب می‌تواند برای تمامی توربین‌های بادی به عنوان ابزاری برای تشخیص اغتشاشات آیرودینامیکی و مکانیکی به کار گرفته شود و جهت بهبود کیفیت توان شبکه قدرت به کار آید.

مراجع

- [1] T. Ackermann, *Wind Power in Powers*, Wiley, 2005.
- [2] R. Fadaeinedjad, G. Moschopoulos, and M. Moallem, "The impact of tower shadow, yaw error, and wind shears on power quality in a wind-diesel system," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 24, no. 1, pp. 3-5, Mar. 2009.
- [3] ر. ا. فدایی‌نژاد، G. Moschopoulos و م. معلم، "اثر اتصال توربین‌های بادی سرعت ثابت بر کیفیت توان شبکه و به کارگیری STATCOM جهت بهبود آن"، چهاردهمین کنفرانس شبکه‌های توزیع نیروی برق ایران، ۱۰ صص، کرمان، ۱۶-۱۷ اردیبهشت ۱۳۸۸.
- [4] D. S. L. Dolan and P. W. Lehn, "Simulation model of wind turbine 3p torque oscillations due to wind shear and tower shadow," *IEEE*, vol. 21, no. 3, pp. 4-6, Sep. 2006.
- [5] D. Lu, X. Gong, and W. Qiao, "Current-based diagnosis for gear tooth breaks in wind turbine gearboxes," in *Proc. IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, pp. 3780-3786, Sep. 2012.
- [6] X. Yao, et al., "Wind turbine gearbox fault diagnosis using adaptive morlet wavelet spectrum," in *Proc. 2nd Int. Conf. on Intelligent Computation Technology and Automation*, vol. 2, pp. 580-583, 10-11 Oct. 2009.

می‌دهد. وجود یک چنین خطای نوسانی می‌تواند ناشی از یک خطای مکانیکی در مجموعه توربین بادی باشد.

۹- تفکیک خطا بر اساس انرژی سیگنال

برای تشخیص اغتشاشات آیرودینامیکی باد و تفکیک آن از دیگر اغتشاشات مکانیکی مانند شکسته شدن چرخ‌دنده، از تابع تبدیل موجک برای تحلیل سیگنال‌های خروجی شبکه استفاده شد. در روندنمای شکل ۲۶ از انرژی سیگنال برای تفکیک خطاها از یکدیگر استفاده می‌شود و (۲۸) نحوه محاسبه انرژی سیگنال را نشان می‌دهد

$$D = \sqrt{\sum_{i=1}^N [d(i)]^2} \quad (28)$$

در جدول ۴ انرژی هر سطح با استفاده از این معادله محاسبه شده و در ستون اول انرژی سیگنال اصلی بدون اغتشاش در سطوح مختلف درج شده است. این اعداد چون در حالت نرمال سیستم و بدون اغتشاش می‌باشند به عنوان اعداد مرجع و یا همان اعداد آستانه در نظر گرفته می‌شوند. در ستون دوم انرژی سیگنال با حضور اغتشاشات آیرودینامیکی باد در سطوح مختلف محاسبه شده و با ستون اول مقایسه می‌شود. همان طور که مشخص است در تمامی سطوح، انرژی سیگنال در حضور اغتشاش آیرودینامیکی باد از انرژی سیگنال در حالت نرمال بیشتر است که نشان‌دهنده افزایش سرعت زاویه توربین بادی به صورت غیر معمول می‌باشد و مشخص کننده وجود خطا در سیستم توربین بادی است.

همان طور که در ستون سوم جدول مشاهده می‌شود، انرژی سیگنال دارای خطای شکسته شدن چرخ‌دنده گیربکس در سطوح مختلف نسبت به انرژی سیگنال در حالت نرمال به شدت کاهش یافته است و این نشان از وجود یک خطا در گیربکس می‌باشد چرا که باعث کاهش گشتاور خروجی و بالطبع آن کاهش ولتاژ و توان خروجی شده است در حالی که سرعت باد در حالت نرمال فرض شده و سرعت توربین مطلوب است.

۱۰- نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از معادلات ریاضی، کلیه جنبه‌های آیرودینامیکی، مکانیکی و الکتریکی توربین بادی در نرم‌افزار Matlab شبیه‌سازی شد. مدل شبیه‌سازی شده تأثیر سایه دکل و انحراف باد را روی سرعت باد به صورت جدا و هم‌زمان با هم نشان داد. می‌توان نتیجه

[16] A. Osman and O. P. Malik, "Transmission line distance protection based on wavelet transform," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 19, no. 2, pp. 515-523, Apr. 2004.

ابوالقاسم قابل در سال ۱۳۹۰ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه بوعلی سینا همدان و در سال ۱۳۹۴ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه سمنان دریافت نمود. از سال ۱۳۹۴ ایشان به عنوان کارشناس ارشد برق در مرکز مهندسی فشارقوی جهاد دانشگاهی علم و صنعت به کار مشغول بوده است. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام‌برده متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند انرژی‌های تجدیدپذیر، کیفیت توان شبکه و طراحی و شبیه‌سازی سیستم‌های تست و کنترل کیفی تجهیزات فشارقوی می‌باشد.

اصغر اکبری فرود در سال ۱۳۷۲ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را در گرایش قدرت از دانشگاه تهران و مدرک کارشناسی ارشد و دکتری را در مهندسی برق- قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۷۶ و ۱۳۸۵ از دانشگاه تربیت مدرس دریافت نمود. نام‌برده در حال حاضر به عنوان هیأت علمی در دانشکده برق و کامپیوتر دانشگاه سمنان مشغول به کار است. زمینه‌های علمی مورد علاقه وی متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند بهره‌برداری و کنترل سیستم‌های قدرت، بازار برق و کیفیت توان می‌باشد.

- [7] T. Knudsen, T. Bak, and M. Soltani, "Prediction models for wind speed at turbine locations in a wind farm," *Wind Energy*, vol. 14, no. 7, pp. 877-894, Oct. 2011.
- [8] C. L. Bottasso, *Short Course on Wind Turbine Modeling and Control - Part I: Aero-Servo-Elastic Modeling*, Korea Institute of Machinery and Materials, Kangwon National University, p. 5, Oct. 2007.
- [9] D. S. L. Dolan and P. W. Lehn, "Simulation model of wind turbine 3p torque oscillations due to wind shear and tower shadow," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 21, no. 3, pp. 717-724, Sep. 2006.
- [10] P. Rosas, *Dynamic Influences of Wind Power on the Power System*, Denmark, 2003.
- [11] S. Li, X. Zhang, Z. Xie, S. Yang, C. Zhang, and R. Cao, "A study on dynamic model and analyse of wind turbine generation system," in *Proc. 2010 Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conf.*, 4 pp., 28-31 Mar. 2010.
- [12] S. S. Rao, *Mechanical Vibration*, University of Miami, 5th Edition, 2004.
- [13] S. Mallat, *A Wavelet Tour of Signal Processing*, 3rd Edition, the Sparse Way, Academic Press, 2008.
- [14] M. Itsaso Martinez, G. Tapia, A. Susperregui, and H. Camblong, "Sliding-mode control for DFIG rotor-and grid-side converters under unbalanced and harmonically distorted grid voltage," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 27, no. 2, pp. 328-339, Jun. 2012.
- [15] S. Santoso, E. J. Powers, W. M. Grady, and P. Hofmann, "Power quality assessment via wavelet transform analysis," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 11, no. 2, pp. 924-930, Apr. 1996.