

ارائه مدل مدولار و دقیق نیروگاه بادی

محمد منفرد - حسن رستگار
دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی امیرکبیر
جمهوری اسلامی ایران

واژه‌های کلیدی: توربین بادی، مدلسازی مدولار، دینامیک و آیرودینامیک، MATLAB/Simulink

چکیده

در سالهای اخیر تولید برق با استفاده از انرژی باد به شدت مورد توجه قرار گرفته است. به منظور مطالعه اثر متقابل بین شبکه و توربین‌های بادی، مدل‌های مختلفی برای این منابع نوظهور انرژی الکتریکی توسعه یافته‌اند. مدل‌هایی که تاکنون ارائه شده‌اند [۱، ۱۵، ۱۳، ۵، ۲]، عموماً هرکدام به سبب تمرکز بر پاره‌ای از جزئیات از دیگر پارامترهای سیستم غفلت دارند. روشی مناسب برای حل این مشکل، مدلسازی مدولار توربین بادی است. مدل‌های دینامیکی بسیار دقیق برای مزارع بادی نقش مهمی در اعتبار نتایج شبیه‌سازی اثرات متقابل آنها با شبکه و در نتیجه قابلیت اطمینان شبکه دارد. در این مقاله مدل مدولار و دقیق از یک توربین بادی متصل به شبکه ارائه شده است. امکان استفاده از مدل پیشنهادی در هر ترکیب اختیاری شبکه خارجی و مطالعات مختلف فراهم می‌گردد. مدل مدولار و بصورت مجموعه‌ای از چندین بلوک است، که هرکدام مدل‌کننده یک جزء و یا پدیده فیزیکی، با دقت و سطح پیچیدگی موردنظر می‌باشد؛ لذا مدل بدست آمده کاملاً نزدیک به واقعیت و فیزیکی بوده و امکان اعمال هر تغییر دلخواه در هر کدام از اجزا وجود دارد. مدل در کلیه مطالعات شبکه قدرت، شامل مطالعات پایداری، کیفیت توان و کنترل قابل کاربرد می‌باشد و بسته به نوع مطالعات، امکان ساده‌سازی

مدل مدولار، با حذف بلوکهای مناسب، وجود دارد که این مزیت، سبب افزایش سرعت شبیه سازی ها و کاهش حجم محاسبات می‌گردد. مدل با دقت بالایی، فلیکر ولتاژ ناشی از توربین‌های بادی و رفتار گذرای پس از خطا را نشان می‌دهد.

۱- مقدمه:

استفاده از باد به عنوان منبع پاک و رایگان تولید انرژی الکتریکی در حال گسترش روزافزون است و بر طبق پیش‌بینی‌ها تا سال ۲۰۲۰ میلادی ۱۰٪ کل برق جهان از انرژی باد استحصال خواهد شد و رشد سالانه تا سال ۲۰۴۰ بین ۱۰-۴۰٪ خواهد بود [۴]. مراکز تحقیقاتی در سراسر دنیا با جدیت و با تمامی امکانات، در حال مطالعه و تحقیق بر روی جنبه‌های گوناگون بهره‌برداری بهینه از این منبع انرژی هستند. شبیه‌سازی توربین‌های بادی بوسیله نرم‌افزار، ابزار تحقیق در بررسی رفتار توربین‌های بادی است. محدودیت‌های نرم افزار و شرایط کاملاً مجازی بررسی پدیده‌ها، سبب ایجاد اختلاف در نتایج شبیه‌سازی با شرایط واقعی می‌گردد. افزایش پارامترهای شبیه سازی و در نظر گرفتن هر چه بیشتر جزئیات سیستم، سبب افزایش دقت شبیه سازی‌ها و در عین حال افزایش زمان شبیه‌سازی می‌گردد. بنابراین ارائه مدلی بسیار

نخواهند داشت. در حال حاضر دو انستیتوی معتبر تحقیقاتی در دنیا در حال کار بر روی مدل‌های دقیق توربین‌های بادی هستند. گروه اول به سرپرستی Nielsen, Knudsen و Akhmatov در موسسه تحقیقاتی NESA و دانشگاه تکنولوژی دانمارک از سال ۱۹۹۹ مشغول این فعالیت هستند [۲، ۵، ۶، ۷، ۱۹]. گروه دوم در آزمایشگاه‌های RISO و به سرپرستی Hansen و Sorensen در سال‌های اخیر مدل‌هایی از توربین بادی ارائه داده‌اند [۸، ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲، ۱۳].

معایبی که به کار گروه اول وارد است عبارتند از: ۱- هیچ کاری بر روی مدلسازی باد و تاثیر اغتشاشات باد بر عملکرد دینامیکی توربین بادی انجام نشده است.

۲- اثر بهره‌آیرو دینامیکی دینامیکی ($C_p^{dynamic}$) لحاظ نشده است. ۳- مدل مناسبی برای آیرودینامیک پره‌ها ارائه نشده است. ۴- مدل مناسبی برای محور و drive-train ارائه نشده است.

کار گروه دوم نیز دارای کاستی‌هایی می‌باشد:

۱- پدیده‌های فیزیکی مربوط به مکانیک و آیرودینامیک پره‌ها و drive-train در مدل باد اعمالی به توربین آورده شده است که مسلماً فیزیکی و در انطباق با واقعیت نیست. در واقع به جای یک مدل فیزیکی، مدلی بلوکی از کل توربین بادی بدست آمده است که درک مفاهیم فیزیکی و واقعی را غیرممکن می‌کند. بعلاوه تنها دو هارمونیک ناشی از این اغتشاشات بوسیله مدل شبیه‌سازی می‌شوند که منجر به نتایج خوش‌بینانه‌ای در مطالعات کیفیت توان می‌شود.

۲- امکان اعمال مدل دینامیکی دلخواه برای باد به عنوان یک ورودی کاملاً تصادفی امکان پذیر نیست.

۳- از برهم‌کنش آیرودینامیکی باد و پره‌ها صرف‌نظر شده است. ۴- مدل شفت به کار رفته خیلی دقیق نیست و تقریب دو جرم متمرکز دوار که بوسیله یک محور صلب ایده‌آل بهم متصل‌اند، سبب حصول نتایج خوش‌بینانه‌ای در مطالعات پایداری می‌شود.

در بدست آوردن مدل ارائه شده در این مقاله، تمام سعی بر این بوده است تا برآیندی کارآمد از کلیه فعالیت‌هایی که در

دقیق، که به سادگی بتوان برای مطالعات مختلف آنرا تغییر داد تا با کمترین زمان و بیشترین دقت موردنیاز، به شبیه‌سازی رفتار توربین بادی پردازد، ضروری است. از مهمترین مسائلی که امروزه در ارتباط با توربین‌ها و مزارع بادی در شبکه‌های موجود مورد توجه می‌باشد، قابلیت اطمینان توان بدست آمده (از لحاظ پایداری سیستم) و تاثیر مزارع بادی بر کیفیت توان می‌باشد. هرچند تعیین موقعیت مزارع بادی با توجه به ویژگی‌های بادی محل می‌باشد، اما قدرت شبکه در محل اتصال، مزارع بادی نیز از اهمیت زیادی برخوردار است. ضعف شبکه قدرت در محل اتصال، سبب دو مشکل اساسی می‌شود: [۲]

۱- کاهش قابلیت اطمینان و امنیت تحویل توان از توربین بادی به مصرف‌کننده‌ها به هنگام بروز خطا در شبکه ۲- کاهش کیفیت توان تحویلی به مصرف‌کننده‌ها

لذا شبیه‌سازی متصل به شبکه توربین‌های بادی ضروری است.

امروزه با بروز خطا در شبکه، توربین‌های بادی جدا شده و تحویل کل توان به منابع معمول واگذار می‌شود که به سبب نقش کم مزارع بادی در کل تولید، مشکل ساز نیست. اما با افزایش سهم توربین‌های بادی در تولید، این کار به سادگی میسر نخواهد بود. از سوی دیگر فلیکر ولتاژ در محل مصرف‌کننده‌هایی که نزدیک به مزارع تولید انرژی الکتریکی از باد هستند، مشاهده می‌شود که این مشکل نیز با افزایش سهم مزارع بادی افزایش می‌یابد [۲].

در این مقاله، مدل الکترومکانیکی دقیقی از توربین بادی ارائه شده است. مدل‌های متداولی که به‌طور گسترده برای توربین‌های بادی استفاده می‌گردند، به سبب صرف‌نظر از برهم‌کنش‌های مکانیکی و مکانیکی آیرودینامیکی و نوسانات توان ناشی از آنها منجر به پاسخهای ناصحیح در مطالعات کیفیت توان می‌شوند. از سوی دیگر این مدل‌ها کل عناصر drive-train* توربین بادی را کاملاً صلب در نظر گرفته و بصورت جرم واحد دواری مدل می‌کنند. مدل ژنراتور نیز یک مدل ساده دینامیکی است [۳] و مسلماً نتایج دقیقی در پی

* سیستم مکانیکی شامل پره‌ها، محورها، جعبه‌دنده و روتور ژنراتور

بیستمین کنفرانس بین‌المللی برق

$$\rho_{air} = \rho_0 \left(\frac{288B}{760T} \right) \approx 1.225 \left(\frac{kg}{m^3} \right), \rho_0 = 1.226$$

R : شعاع پره‌های روتور بر حسب متر

ρ_{air} : چگالی هوا بر حسب کیلوگرم بر مترمکعب

B : فشار بارومتريک بر حسب میلی‌متر جیوه

T : دمای هوا بر حسب کلونین

در این مدل، امکان اعمال هر مدل دینامیکی دلخواه برای باد وجود دارد که مدلی که در عین سادگی تطابق خوبی با واقعیت نیز دارد، بصورت معادله زیر بیان می‌گردد: [۱۴]

$$V_{Wind} = V_{Base} + V_{Gust} + V_{Ramp} + V_{Noise}$$

که هرکدام از اجزاء با مدل‌های استاندارد موجود در ابزار شبیه‌سازی قابل پیاده‌سازی هستند.

V_{Base} : سرعت میانگین (پایه) باد است.

V_{Gust} : تندبادهاست که بصورت جمله‌ای سینوسی و یا کسینوسی و یا مجموعی از آنها قابل بیان است.

V_{Ramp} : شیب افزایش و یا کاهش سرعت باد را نشان می‌دهد.

V_{Noise} : مولفه کاملاً تصادفی باد است.

۲-۲- بهره مکانیکی-آیرودینامیکی توربین بادی:

قابلیت توربین بادی در استحصال توان مکانیکی از توان باد وزشی را نشان می‌دهد: [۱۳]

$$P_{Mill} = P_{Wind} \times C_p(\lambda, \beta)$$

C_p ضریب توان توربین بادی دوار نامیده شده و از روی

$$\lambda = \frac{\omega_{Mill} R}{v}$$

منحنی‌های $C_p(\lambda, \beta)$ بدست می‌آید که:

λ : نسبت سرعت نوک (tip speed ratio)

β : زاویه گام (pitch angle) نامیده شده و در توربین‌های

با کنترل pitch و active-stall یکی از راههای افزایش راندمان آیرودینامیکی، کنترل موثر زاویه گام است.

زمینه شبیه سازی دقیق توربین‌های بادی انجام گرفته‌است، بدست آید. کار براساس مدل‌سازی و نمایش مدولار استوار است. این خاصیت به این معناست که مجموعه‌ای از بلوک‌ها که هرکدام نماینده یک پدیده فیزیکی و یا خاصیت الکترومکانیکی است، مدل کامل و دقیق را تشکیل می‌دهند؛ این نوع مدل‌سازی، دست را در انجام تغییرات موردنظر و اعمال اصلاحات در بخش‌های دلخواه و افزودن و یا کاستن جزئیات، باز می‌گذارد. همچنین برای شبیه سازی هر مورد خاص، تنها بلوک‌هایی که موثر در پدیده مورد مطالعه هستند، در مدل قرار می‌گیرند. امکان ترکیب بلوک‌های فیزیکی مدل توربین بادی و مدل‌های داخلی ابزار شبیه‌سازی وجود دارد و باتوجه به مطالعات موردنظر، مدل به سادگی و با حذف بلوک‌های مناسب مورد استفاده قرار می‌گیرد. در انتخاب و اصلاح احتمالی مدل برای هر بخش و پدیده فیزیکی، صحت کار انجام شده بوسیله ارائه دهندگان و تطابق آن با نتایج تست‌های واقعی و یا واقعیات فیزیکی مدنظر بوده است.

۲- بدست آوردن مدل دقیق توربین بادی بصورت مدولار:

تصویر (۱) مدل دینامیکی توربین بادی را نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که هر بلوک متناظر با یک پدیده و یا جزء فیزیکی است. بنابراین برای ارائه مدل پیشنهادی بصورت مدولار، به بیان عملکرد هر جزء و مدل‌سازی آن می‌پردازیم.

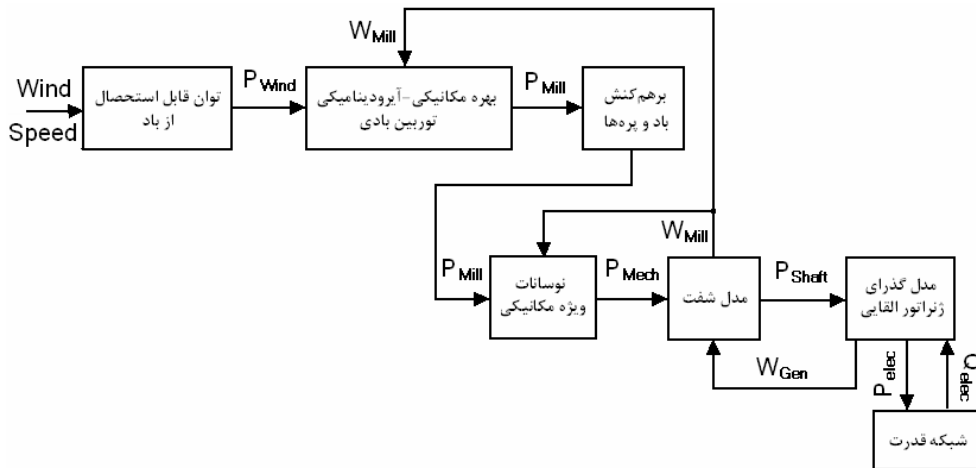
۲-۱- توان قابل استحصال از باد:

در این بلوک کل توان مکانیکی که بصورت بالقوه از بادی که با سرعت v در ناحیه جاروب پره‌هایی به مساحت A می‌وزد، قابل استحصال است، مدل می‌گردد [۳].

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho_{air} A v^3$$

$$A = \pi R^2$$

بیستمین کنفرانس بین‌المللی برق



تصویر (۱) مدل فیزیکی توربین بادی

۳- رسیدن به لحظه شروع چرخش، هنگامی که پره‌ها در جهت مناسب خم شده‌اند.

با توجه به پاسخ توربین به تغییر پله‌ای در سرعت باد، مرجع [۲]، معادله دیفرانسیل مرتبه اول را پیشنهاد می‌دهد. لیکن تابع تبدیل زیر برای این بلوک، بوسیله مولفین پیشنهاد می‌گردد که پاسخ پله تصویر (۳) را کاملاً مدل می‌کند:

$$H(s) = \frac{20.S.^2}{T^2} \left[\frac{1 - e^{-Ts}}{s^2} - \frac{T}{s} + \frac{T^2}{s} \right] + 1$$

در رابطه پیشنهادی، اندازه اضافه جهش و ثابت زمانی نشست توان توربین به سرعت باد و اندازه و شکل پره‌ها وابسته‌اند. برای توربینی که مورد مطالعه قرار گرفته است $T=1 \text{ sec}$ و $200\% \text{ o.s.} = 200\%$ اختیار گردیده‌اند. استفاده از ژنراتور القایی سبب می‌گردد تا این گذراها، در صورت بروز اغتشاش الکتریکی در ترمینالهای ژنراتور، ایجاد شده و منجر به تغییر در سرعت محور توربین بادی گردند.

۲-۴- نوسانات ویژه مکانیکی:

مدل ارائه شده برای نوسانات ویژه مکانیکی در ساختار مکانیکی توربین بادی، توصیفی تجربی است که بر اساس آنالیز طیف اندازه‌گیری شده توان الکتریکی در مزارع بادی استوار است [۲].

همانگونه که از تصویر (۲) برمی‌آید، این بلوک بصورت یک مجموعه منحنی و یا جداول look-up قابل پیاده‌سازی است. اما با توجه به کاری که توسط مراجع [۱۵] و [۱۶] انجام گرفته است، معادلات زیر دارای عمومیت و دقت کافی بوده و در عین حال سبب سادگی پیاده‌سازی می‌شوند:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{\frac{-12.5}{\lambda_i}} \quad [15]$$

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

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.44 - 0.0167\beta) \sin\left(\frac{\pi(\lambda - 2)}{13 - 0.3\beta}\right) - 0.00184(\lambda - 2)\beta \quad [16]$$

۲-۳- برهم‌کنش باد و پره‌ها:

این برهم‌کنش، حالات گذرا در سیستم مکانیکی توربین بادی با کنترل $stall^*$ ناشی از رفتار آیرودینامیکی هوا در سطح پره‌هاست. این رفتارهای گذرا ناشی از این عوامل هستند: [۲]
 ۱- مسدود کردن لایه مرزی اطراف پره‌ها با تغییر سرعت باد
 ۲- تاخیر سرعت دورانی توربین بادی در برابر تغییرات سرعت باد

* کاهش توان با افزایش سرعت باد، ناشی از نیروهای درگ و دریافت

بیستین کنفرانس بین‌المللی برق

نوسانات ویژه است (تصویر (۴)). تاثیر این نوسانات ویژه در

توان مکانیکی توربین بادی بصورت زیر فرموله شده‌اند: [۲]

$$P_{Mech}(t) = P_{Mill} \left(1 + \sum_{n=1}^3 A_n \left(\sum_{m=1}^2 a_{nm} g_{nm}(t) \right) h_n(t) \right)$$

$$g_{nm}(t) = \sin \left(\int_0^t m \omega_n(t') dt' + \varphi_{nm} \right)$$

n : نوع نوسان مکانیکی تحریک شده در محور دوار

m : شماره هارمونیک یک نوسان مکانیکی خاص

بازه فرکانسی این نوسانات بین 0.1Hz تا 10Hz می‌باشد.

کلیه ضرایب در جدول (۱) آمده‌اند. با توجه به تصویر طیف توان آنالیز شده و فرمول ارائه شده و مقادیر جدول (۱)، به سبب ساختار مکانیکی هر توربین بادی، نوسانات ویژه‌ای در توان توربین ایجاد می‌گردند، که به صورت زیر قابل دسته‌بندی هستند:

۱- نوسانات نوع 1 یا اصطلاحاً فرکانس 1P که ناشی از عدم تقارن در روتور یک توربین بادی سه پره هستند. فرکانس هارمونی اول این نوسانات ویژه برابر با فرکانس چرخش محور دورپایین توربین است.

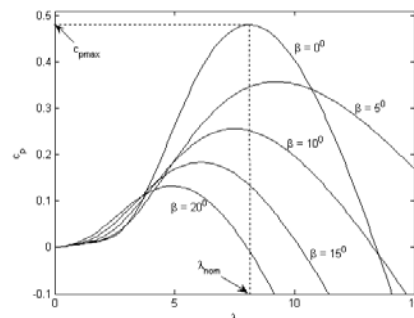
۲- نوسانات نوع 3 یا فرکانس 3P که ناشی از اثر سایه (پوشاندن) پرها هنگام عبور از مقابل برج و اغتشاشات دورانی در محور توربین بادی است. فرکانس این نوسانات ویژه در حدود سه برابر فرکانس چرخش محور دور پایین توربین است.

۳- نوسانات ویژه ناشی از پرها که در فرکانسی در حدود 4.5Hz اتفاق می‌افتد.

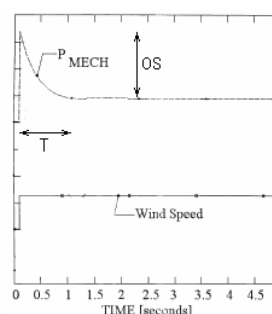
سایر نوسانات مکانیکی اندازه‌گیری شده در طیف به تحریک ناشی از شفت و دنده‌ها نسبت داده می‌شوند. مرجع [۱۹] ثابت می‌کند که توربین بادی متصل به شبکه مانند فیلتری پایین گذر عمل می‌کند که فرکانس قطع آن از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$f_T = \sqrt{\frac{\omega_0 K}{8\pi^2} \frac{H_M + H_E}{H_M H_E}}$$

K سختی و H ها ثابت لختی هستند. این فرکانس قطع، بسیار نزدیک به 1P و 3P است و لذا آنها را تقویت کرده و



تصویر (۲) منحنی‌های بهره مکانیکی آیرودینامیکی توربین بادی



تصویر (۳) تغییر P_{Mech} توربین بادی در پاسخ به تغییر پله‌ای

در سرعت باد

با توجه به آنالیزی که در [۲] بر روی این طیف انجام گرفته، نتایج زیر حاصل گشته است:

۱- تاثیر نوسانات ویژه مکانیکی در نوسانات توان الکتریکی، سیستماتیک بوده و می‌توان آنها را از تاثیرات غیرقطعی و تصادفی ناشی از تغییرات سرعت وزش باد مجزا نموده و فرموله کرد.

۲- به سبب کوپلینگ قوی بین پارامترهای الکتریکی و مکانیکی در ژنراتورهای القایی (بوسیله لغزش)، این نوسانات ویژه در توان مکانیکی محور دوار، از طریق روتور به ژنراتور منتقل شده و سبب ایجاد اغتشاشاتی بصورت فلیکر در توان الکتریکی خروجی توربین بادی می‌شوند.

نتایج فوق بوسیله مرجع [۸] نیز تأیید شده‌اند، هرچند این مرجع در نهایت مدل مناسبی برای بیان آنها ارائه نمی‌دهد.

بررسی طیف توان الکتریکی خروجی یک مزرعه بادی که در معرض وزش باد ملایم با حداقل تغییرات قرار گرفته است، راهنمای خوبی برای بدست آوردن رابطه مناسبی برای این

بیستیمین کنفرانس بین‌المللی برق

توربین های بادی بسیار ناچیز و قابل صرفنظر است. مرجع [۱۸] بجای استفاده از معادله نوسان محور، با استفاده از ایده بقای انرژی های جنبشی موجود در جرم ها و پتانسیل موجود در محورهای غیر صلب، به روابطی دست پیدا کرده است.

به هر حال بلوک دیاگرام تصویر (۶)، مدل کاملی از سیستم **drive-train** را که بصورت سه جرم که بوسیله دو شفت غیرصلب به هم متصل شده اند را نشان می دهد [۱۷].

این بلوک دیاگرام شامل کلیه اجزای تصویر (۵) می باشد. فرض های زیر در بدست آوردن این مدل لحاظ شده اند:

۱- سیستم با توجه به سرعت دورانی نامی خود خطی شده است.

۲- اینرسی شفت دورپایین در محور توربین متمرکز فرض شده است.

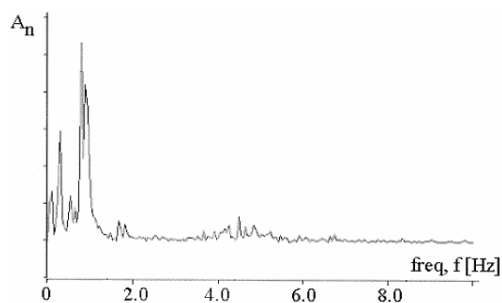
۳- جعبه دنده ایده آل و بدون اینرسی و یا تلفات انتقال در نظر گرفته شده است.

۴- اینرسی شفت دوربالا در محور ژنراتور متمرکز فرض شده است و به عنوان جزئی از مدل ژنراتور القایی در بلوک مربوط به خود ژنراتور مدل شده است.

از کلیه میرایی ها صرفنظر گردیده است. این میرایی ها عبارتند از:

(i) میرایی ناشی از اصطکاک یا طاقانها. از آنجا که بلبرینگها در **drive-train** توربین بادی روغنکاری می شوند، لذا اصطکاک، ناچیز و قابل صرفنظر کردن است.

(ii) میرایی ناشی از دمپرها (ترمزها) که ناشی از اعمال دمپینگ خارجی است و هیچگاه به عنوان جزئی از سیستم **drive-train** توربین بادی در نظر گرفته نمی شود [۱۸].



تصویر (۴) طیف اندازه گیری شده توان الکتریکی توربین بادی با سرعت باد نسبتاً ثابت

درعین حال مضارب بالای آنها را در خروجی الکتریکی توربین بادی تضعیف می کند.

۲-۵- مدل شفت:

بزرگترین نقطه ضعف مدل هایی که برای توربین های بادی استفاده می شوند، استفاده از مدل جرم متمرکز برای کل سیستم دوار، شامل جرم های توربین، جعبه دنده، روتور ژنراتور و محورهاست که کاملاً صلب فرض می شوند. جعبه دنده به سبب اختلاف زیاد بین سرعت توربین و ژنراتور، جزئی اساسی از **drive-train** می باشد. وجود جعبه دنده سبب می گردد تا شفت ها در دو سمت با دو سرعت متفاوت بچرخند؛ به عبارت دیگر وجود جعبه دنده سبب کاهش قابل ملاحظه سختی (صلبی) شفت بین ژنراتور و توربین، وقتی از سمت ژنراتور (محور دوربالا) دیده می شود، می گردد [۱۸]. روابط زیر بین سختی و اینرسی سمت محور دوربالا و دورپایین برقرار است:

$$K_H = \frac{K_L}{n^2} \quad J_H = \frac{J_L}{n^2} \quad n = \frac{n_H}{n_L}$$

J_L : اینرسی محور دورپایین

K_L : سختی محور دورپایین

J_H : اینرسی محور دورپایین مدل شده در سمت دوربالا

K_H : سختی محور دورپایین مدل شده در سمت دور بالا

n_L : تعداد دندانه های دورپایین

n_H : تعداد دندانه های دوربالا

آقایان Hansen و Sorensen در مرجع [۸]، معادلات فضای حالت را برای سیستم **drive-train** بدست آورده اند.

در مدل ارائه شده، دو جرم متمرکز دوار که بوسیله یک محور غیر صلب دورپایین به هم متصل اند، فرض شده اند. محور با ضرایب سختی و میرایی مدل شده است و جرم پرها و محور دورپایین متمرکز فرض گردیده و محور دور بالا نیز کاملاً صلب فرض شده است. این درحالی است که داده های موجود برای غالب توربین های بادی نشان می دهند که سختی محور دور بالا عموماً در حدود سختی منتقل شده از سمت دورپایین و گاهی کمتر نیز هست [۱۸]. از سوی دیگر تاثیر میرایی در

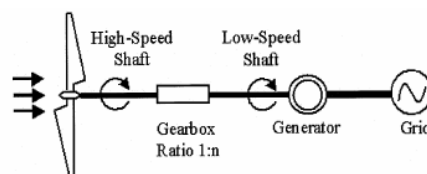
بیستین کنفرانس بین‌المللی برق

Kind, n	Classification	Magnitude A_n	Eigenfrequency, ω_n	Modulation, $h_n(t)$	Harmonics, m	Distribution, a_{nm}	Phase, φ_{nm}
1	Asymmetry	0.01	ω_{MILL} (1P)	1	1 2	4/5 1/5	0 $\pi/2$
2	Vortex tower interaction	0.08	$3\omega_{MILL}$ (3P)	1	1 2	1/2 1/2	0 $\pi/2$
3	Blades	0.15	$2\pi \cdot 4.5$ (Hz)	$1/2g_{11}(t) + 1/2g_{21}(t)$	1	1	0

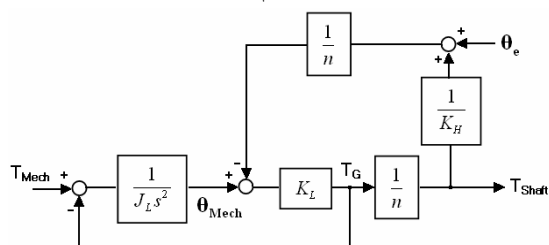
جدول (۱) ضرایب معادله نوسانات ویژه

استفاده کرد. در انجام مطالعات پایداری به هنگام بروز خطا در سیستم قدرت نیز می‌توان از بلوک نوسانات ویژه مکانیکی صرف‌نظر کرد. شبیه‌سازی‌های انجام شده، عدم تغییر پاسخ‌ها را با وجود انجام ساده‌سازی‌های اشاره شده در مطالعات خاص، نشان می‌دهند.

شبیه‌سازی‌ها بر روی یکی از توربین‌های 550kw نیروگاه والفجر منجیل (متعلق به شرکت نورد تانک دانمارک) که بوسیله ترانس بالارونده به شبکه 20kV (که بوسیله معادل تونن آن جایگزین شده است) متصل است، انجام گرفته است [۱]. ایجاد مدل مدولار توربین بادی بوسیله نرم‌افزار MATLAB/Simulink انجام گرفته است که امکان استفاده از مدل را در هر ترکیب دلخواه از شبکه قدرت به کمک جعبه ابزار SimPowerSystems می‌دهد. تصویر (۷) فلیکر موجود در توان الکتریکی خروجی توربین بادی، ناشی از ساختار مکانیکی-آیرودینامیکی را نشان می‌دهد، این نوسانات بوسیله بلوک نوسانات ویژه مکانیکی، مدل شده‌اند و لذا استفاده از این بلوک در مطالعات کیفیت توان و فلیکر الزامی است. باصرفنظر از بلوک برهم‌کنش باد و پره‌ها، دقیقاً همین شکل موج بدست می‌آید. تصویر (۸) نیز اثر حذف فرکانسهای بالا در خروجی الکتریکی توربین بادی را نشان می‌دهد. تصویر (۹) نیز گذراهای ناشی از بروز خطا در سرعت توربین بادی را نشان می‌دهد. خطا یک اتصال کوتاه سه فاز به مدت 100ms در فیدر متصل به یک بار 5MW در سیستم 20kV و بدون جداسازی توربین بادی پس از رفع خطا است. صرف‌نظر از بلوک نوسانات ویژه مکانیکی هیچ تغییری در رفتار گذرای توربین ایجاد نکرده و در هر دو حالت صرف‌نظر و یا عدم صرف‌نظر به جواب کاملاً برابر می‌رسیم. اما



تصویر (۵) مدل سه جرمی سیستم drive train توربین بادی



تصویر (۶) بلوک دیاگرام مدل drive train

۲-۶- مدل گذرای ژنراتور القایی:

امروزه اکثر توربین‌های بادی مستقر در مناطق مختلف دنیا از ژنراتورهای القایی استفاده می‌کنند. به سبب کوپلینگ قوی بین سرعت روتور و مشخصات الکتریکی ماشین‌های القایی، در نظر گرفتن مدل دقیقی که رفتار گذرا را دربرداشته باشد، الزامی است. مدلی استاندارد برای ژنراتور القایی در نظر گرفته شده است که بخش الکتریکی بوسیله معادلات فضای حالت درجه چهار و بخش مکانیکی با سیستم درجه دو مدل شده‌اند [۶،۷].

۳- استفاده از مدل پیشرفته توربین بادی در مطالعات سیستم قدرت:

با توجه به ساختار مدولار مدل ارائه شده، برای هر نوع پدیده تحت بررسی، تنها بلوک‌هایی که در آن پدیده موثرند، در شبیه‌سازی‌ها استفاده می‌شوند. در مطالعات مربوط به کیفیت توان و فلیکر می‌توان از رفتار آیرودینامیکی اطراف پره‌ها صرف‌نظر کرده و همچنین از مدلی دینامیکی برای ژنراتور

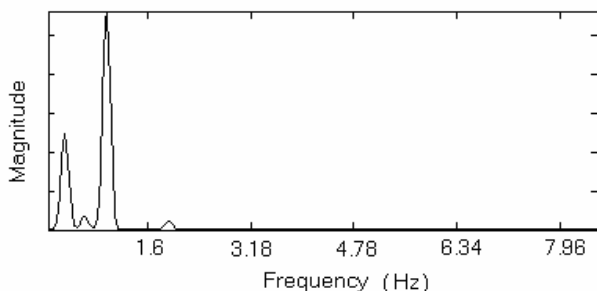
بیستین کنفرانس بین‌المللی برق

پیوست:

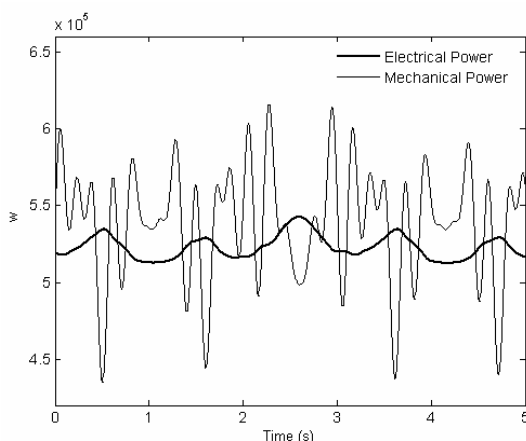
پارامترهای توربین شبیه‌سازی شده:

n	80	P_{rated}	550 kW
J_L	0.45 Mkgm^2	R_r	21 m
J_G	17.6 kgm^2	R_s	4.5 m
K_H	2.4 kNm/rad	L_r	0.318 mH
K_L	7.4 MNm/rad	L_s	0.19 mH

Power Spectral Density

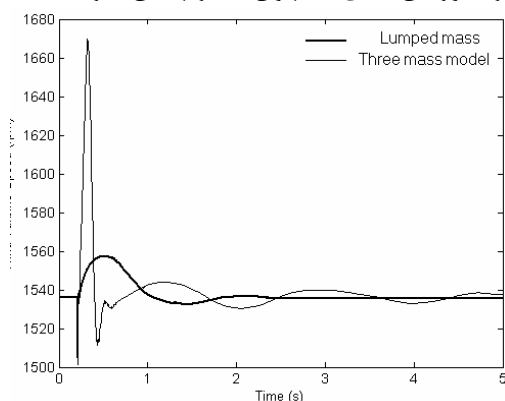


تصویر (۷) طیف توان الکتریکی توربین بادی با سرعت باد ثابت



تصویر (۸) توانهای مکانیکی و الکتریکی خروجی توربین بادی با سرعت باد ثابت

عملکرد توربین بادی همچون فیلتر پایین گذر



تصویر (۹) تغییرات سرعت ژنراتور توربین بادی پس از بروز خطا

همانگونه که از تصویر (۹) برمی‌آید، اهمیت مدل شفت در مطالعات پایداری چشمگیر بوده و استفاده از مدل ساده جرم متمرکز منجر به پاسخ‌های غیر معتبر و خوش‌بینانه می‌گردد. در مدل جرم متمرکز، افت اولیه سرعت و سپس شیب تند افزایش سرعت وجود نداشته و دامنه افزایش نیز بسیار کمتر است. نتایج این شبیه‌سازی بوسیله مراجع [۲،۵،۸،۱۱،۱۸] تایید می‌شوند.

۴- نتیجه‌گیری:

در این مقاله، مدل فیزیکی پیشرفته‌ای از توربین بادی به صورت مدولار ارائه شده است. مزایای مدل اخیر بر سایر مدل‌های رایج عبارتند از:

- ۱- در نظر گرفتن رفتار آیرودینامیکی پره‌ها و گذراهای ناشی از برهم‌کنش باد و پره‌ها
- ۲- در نظر گرفتن کلیه نوسانات ویژه مکانیکی موثر در طیف توان الکتریکی خروجی توربین
- ۳- مدل دقیق محور، شامل سه جرم دوار که بوسیله دو شفت غیرایده‌آل به هم متصل‌اند.
- ۴- مدل گذاری ژنراتور القایی که به سبب کوپلینگ قوی بین مقادیر الکتریکی ژنراتور و سرعت مکانیکی روتور، حائز اهمیت است.

۵- مدولار بودن مدل که بدین معناست که مدل از مجموعه‌ای از بلوک‌ها تشکیل شده است که هرکدام نماینده یک جزء و یا پدیده فیزیکی در توربین بادی هستند و به سادگی امکان حذف و یا اضافه کردن آثار و پدیده‌های مختلف به توربین وجود دارد.

۶- مدل ایجاد شده به راحتی و با دقت بالا قابل استفاده در مزارع بادی در جهت مطالعات کیفیت توان، پایداری و کنترل می‌باشد و در چند مقاله مجزا از جمله [۲۰] مورد استفاده قرار گرفته و منجر به نتایج کاملاً معتبر شده است.

فهرست مراجع و مأخذ:

- [1] جمیل مجید و عباسپور ثانی کمال، "فاصله بهینه بین توربین‌های بادی در یک نیروگاه بادی"، نشریه انرژی ایران، شماره ۱۹، اردیبهشت ۱۳۸۳، صفحه ۶۲
- [2] Akhmatov V., Knudsen H., and Nielsen A.H., "Advanced simulation of windmills in- the electric power supply", J. Elect. Power & Energy Syst., vol.22, no.6, 2000, pp. 421-434.
- [3] Walker JF., and Jenkins N., "Wind energy technology", New York, Wiley, 1997
- [4] Greenpeace and wind industry unveil global energy blueprint. The European Wind Energy Association (EWEA).<http://www.ewe.org/src/press.htm>
- [5] Akhmatov V., Knudsen H., and Nielsen A.H., Pedersen J.K., and Poulsen N.K., "Modeling and transient stability of large wind farms", Electrical Power and Energy Systems, 25, pp. 123-144, 2003
- [6] Knudsen H., and Akhmatov V., "Induction generator models in dynamic simulation tools", IPST'99, Budapest, 1999, pp. 213-216
- [7] Akhmatov V., Knudsen H., "Modeling of windmill induction generators in dynamic simulations programs", IEEE Power Tech'99, Budapest, 1999, BPT99-243-12
- [8] Hansen A.D., Sorensen P., Blaabjerg F., and Becho J., "Dynamic modeling of wind farm grid interaction", J. Wind Engineering, vol.26, no.4, 2002, pp. 191-208
- [9] Hansen A.D., Sorensen P., Janosi L., and Becho J., "Wind farm modeling for power quality", Proc.IECON'01, Denver
- [10] Sorensen P., "Methods for calculation of the flicker contribution from wind turbines", Riso National Laboratory, Denmark, Riso-I-939
- [11] Sorensen P., Hansen A.D., Janosi L., Bech J., and BakJensen B., "Simulation of interaction between wind farm and power system", Riso National Laboratory, Riso-R-1281
- [12] Sorensen P., Hansen A.D., and Rosas P., "Wind models for prediction of power fluctuations from wind farms", APCWEV, Kyoto, J. Wind Engineering, no.89, 2001, pp. 9-18
- [13] Sorensen P., BakJensen B., Kristiasen J., Hansen A.D., Janosi L., and Bech J., "Power plant characteristics of wind farms", Wind power for 21st century, Kassel, Germany, 2000
- [14] Anderson P.M., and Bose A., "Stability simulation of wind turbine systems", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol.PAS102, no.12, pp. 3791-3795, 1983
- [15] Heier S., "Grid interaction of wind energy conversion system", John Willey & Sons, 1998
- [16] Murdoch A., Barton A.S., Winkelman J.R., and Javid S.H., "Control design and performance analysis of a 6 MW wind turbine generator", IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol.PAS-102, no.5, pp. 1340-1347, 1983
- [17] Anderson C.G., Richon J.B., and Campbell T.J., "An aerodynamic moment controlled surface for gust load alleviation on wind turbine rotors", IEEE Trans. Control Systems Technology, vol.6, no.5, pp. 577-595, 1998
- [18] Salman K., and Anita L.J., "Windmill modeling consideration and factors influencing the stability of a grid connected wind power based embedded generator", IEEE Trans. Power Systems, vol.18, no.2, pp. 793-802, 2003
- [19] Akhmatov V., Knudsen H., "An aggregate model of a grid connected, large scale, offshore wind farm for power stability investigations – importance of windmill mechanical system", Electric Power & Energy Systems, 24, pp. 709-717, 2002
- [۲۰] منفرد محمد و رستگار حسن، "بهره‌گیری از کنترل فعال پدیده قطع به عنوان استراتژی کنترل دینامیکی توربین بادی متصل به شبکه"، ارائه شده به ICEE2006، آبان ۱۳۸۴