

## شبیه‌سازی سخت افزاری توربین بادی با استفاده از موتور DC مناسب برای مطالعات استاتیکی و دینامیکی

محمد منفرد<sup>(۱)</sup> سید محسن صدر<sup>(۲و۱)</sup> حسن رستگار<sup>(۳)</sup> حسین مددی کجا آبادی<sup>(۴)</sup>

(۱) گروه برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

(۲) شرکت برق منطقه ای خراسان

(۳) دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران، ایران

(۴) دانشکده مهندسی برق، دانشگاه صنعتی سهند، ایران

واژه‌های کلیدی: توربین بادی، امولاتور، گشتاور نوسانی، جبران‌سازی اینرسی، پهنای باند شبیه سازی، تخمین گشتاور دینامیکی

### چکیده

این مقاله چگونگی ساخت یک امولاتور پیشرفته به منظور شبیه‌سازی مشخصه‌های استاتیکی و دینامیکی یک سیستم تبدیل انرژی بادی را تشریح می‌نماید. این سیستم شامل یک موتور dc سه کیلوواتی می‌باشد که توربین بادی را شبیه‌سازی می‌نماید و یک ژنراتور سنکرون را به حرکت در می‌آورد. مدل پیاده‌سازی شده در محیط MATLAB/Simulink، پروفایل باد را تامین و گشتاور خروجی یک توربین بادی را با استفاده از مشخصه‌های دینامیکی یک توربین بادی واقعی محاسبه می‌نماید. این مشخصه‌ها به منظور دستیابی به نتایج دقیق تر جبران‌سازی شده اند. گشتاور محاسبه شده با کنترل حلقه بسته جریان آرمیچر و از طریق یک مبدل یکسوساز تکفاز نیمه کنترل شده بر روی محور موتور dc پیاده‌سازی می‌گردد. همچنین، کارایی سیستم ارائه شده به کمک برخی ایده‌های جدید پیشنهادی افزایش یافته است. این مقاله گزارشی از اصول عملکرد، تحلیل تئوری، نحوه ساخت و نتایج حاصل از آزمایش‌های مختلف بر روی امولاتور ساخته شده می‌باشد.

### ۱- مقدمه

در سالهای اخیر در زمینه تکنولوژی باد ایده نوین بکارگیری امولاتورهای توربین بادی (WTE)<sup>۱</sup> کانون توجه بوده است. این امولاتورها برای مطالعه پدیده‌های حالت ماندگار و دینامیکی مرتبط با سیستم تبدیل انرژی بادی در یک محیط کنترل شده بدون وابستگی به منابع طبیعی باد و توربین‌های بادی واقعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. همچنین این امولاتورها می‌توانند به عنوان یک ابزار آموزشی برای یادگیری رفتار، عملکرد و کنترل توربین بادی بکارگرفته شوند. در چند سال گذشته مطالعات گوناگونی بر روی امولاتورهای توربین بادی صورت گرفته است. در کار مراجع [۱-۳] موتورهای dc با تحریک جداگانه، کنترل شده با جریان آرمیچر مورد استفاده قرار گرفته اند. مرجع [۱] یک امولاتور توربین بادی با استفاده از معادله گشتاور الکترومغناطیسی ماشین dc ارائه نموده است. در این روش جریان‌های میدان و آرمیچر به گونه ای کنترل می‌شوند که ماشین dc مشخصه‌های

## بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

می‌نماید که گشتاور نوسانی ناشی از تاثیرات گرادیان باد و سایه برج و اینرسی سیستم مکانیکی توربین بادی را لحاظ می‌نماید. مدل مکانیکی محور یک توربین بادی واقعی بطور مشخصی نسبت به سیستم امولاتور که در آن محور توربین بادی واقعی با محور توربین dc جایگزین شده است متفاوت می‌باشد. بدیهی است که این دو سیستم در ضرائب اصطکاک و الاستیسیته با یکدیگر اختلاف دارند. لذا معادلات دینامیکی ارائه شده در [۱۰] برای محور گردان نه تنها دقت دینامیکی امولاتور را بهبود نمی‌بخشد بلکه ممکن است به نتایج بسیار بدتری نسبت به حالت صرفه نظر کردن از اصطکاک و الاستیسیته منجر گردد. از طرف دیگر مدلسازی الاستیسیته محور توربین با فرض وجود یک کوپلینگ صلب میان ژنراتور و موتور فاقد هرگونه مزیت می‌باشد. همچنین اثر اینرسی بزرگ توربین بطور شفاف در معادلات دینامیکی امولاتور ارائه نشده است. مقالات اخیر نیز، که از موتور dc [۱۱] و یا ac [۱۲] بهره می‌برند، بدون توجه به مسائل دینامیکی ذکر شده، تنها به دنبال ایده‌های جدیدی برای کنترل نیروی محور موتور برای تحقق مشخصات حالت دایم توربین بادی هستند. امولاتور توربین بادی توصیف شده در این مقاله در نظر دارد تا رفتار دینامیکی روتور توربین بادی، محور مکانیکی و جعبه دنده را در شرایط دینامیکی باز تولید نماید. تنظیم مرجع گشتاور تولیدی شامل تاثیرات گرادیان باد و سایه برج بوده که نتیجه آن گشتاور نوسانی است. بعلاوه اثر اینرسی بزرگ محور توربین بگونه موثری مدلسازی شده است. رفتار حالت ماندگار یک توربین بادی واقعی نظیر مشخصه‌های  $C_p-\lambda$  و  $P_m-n$  بصورت قابل ملاحظه ای با توربین‌های بادی واقعی مطابقت دارند. امولاتور معرفی شده در این مقاله شامل چندین بخش مهم می‌باشد. این بخشها عبارتند از: مدل سرعت متغیر باد، مدل اینرسی توربین، مدل گرادیان باد، مدل سایه برج و مشخصه‌های حالت ماندگار. یکی از مهمترین اهداف این مقاله ارائه راهی ساده برای توصیف رفتارهای یک توربین بادی واقعی شامل نوسانات گشتاور ناشی از گرادیان باد و سایه برج، نوسانات ناشی از سرعت متغیر باد و آثار

استاتیکی یک توربین بادی با زاویه پره‌های ثابت را ایجاد نماید. در مرجع [۴] از یک موتور dc کنترل شده توسط میکروپروسسور برای تامین گشتاور محور استفاده گردیده است. این امولاتور تنها رفتار حالت ماندگار یک توربین بادی واقعی را پوشش می‌دهد. در این مطالعات، تاثیر سایه برج<sup>۱</sup> و اینرسی بسیار بزرگتر توربین نسبت به اینرسی محور موتور dc منظور نگردیده اند [۵]. در مرجع [۶] برای نخستین بار موتور القایی کنترل شده با اینورتر IGBT به عنوان امولاتور توربین بادی مورد استفاده واقع شده است. مقادیر جریان آرمیچر و فرکانس به گونه ای کنترل می‌گردند که محور ماشین القایی مشخصه‌های حالت ماندگار یک توربین بادی با زاویه پره‌های ثابت را ایجاد نماید. به منظور انجام یک مطالعه دقیق بر روی رفتار توربین بادی در نظر گرفتن اثر سایه برج و اینرسی بسیار بزرگ توربین الزامی است. برای نخستین بار اثر سایه برج توربین بادی به مدلسازی ارائه شده در [۷] اضافه گردید. امولاتور، گشتاور متوسط و گشتاور نوسانی توربین ناشی از اثر سایه برج را بدون در نظر گرفتن اثر اینرسی بزرگ توربین تولید می‌نماید. مرجع [۸] نوسانات گشتاور ناشی از سایه برج و نوسانات ناشی از تغییرات سرعت باد را مدلسازی نموده است اما در لحاظ کردن تاثیرات دینامیکی اینرسی بزرگ توربین که در سیستم‌های واقعی ملاحظه می‌گردد ناموفق بوده است. همچنین مدل ارائه شده آنها نیازمند اندازه گیری گشتاور برای تعیین میزان جبران‌سازی مورد نیاز برای شبیه‌سازی گشتاور محور توربین بادی می‌باشد. بعلاوه مشخصه‌های حالت ماندگار توربین واقعی آنگونه که در چکیده ادعا شده بود حاصل نشده است. در [۹] اگر چه تاثیرات دینامیکی سایه برج و اینرسی بزرگ توربین مدلسازی شده است، لیکن اثر نسبت تبدیل جعبه دنده بر روی اینرسی و گشتاور مورد غفلت قرار گرفته است؛ به عبارت دیگر نسبت تبدیل جعبه دنده واحد فرض شده که در عمل رخ نمی‌دهد. موتور dc مغناطیس دائم در مرجع [۱۰] مورد استفاده قرار گرفته است. مقاله مذکور یک مدل بهبود یافته ارائه

## بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

گشتاور از روی جریان موتور dc محاسبه می‌گردد، جهت افزایش دقت محاسبات گشتاور، تلفات موتور dc نظیر تلفات مسی و چرخشی به قدرت محاسبه شده پروفیل باد، مطابق با شکل (۳) افزوده می‌شود. نوسانات گشتاور و متعاقباً نوسانات توان، از تغییرات متناوب (دوره ای) سرعت باد در ارتفاع‌های مختلف ناشی می‌شود. نوسان گشتاور و توان به دلیل مواجهه هر پره در یک چرخش کامل با سرعت‌های متفاوت باد بوجود می‌آید. به عنوان نمونه یک پره که به سمت بالا حرکت می‌کند، نسبت به یک پره که به سمت پائین حرکت می‌نماید، با بادهای سریعتری برخورد می‌نماید. در هر دوران به علت عبور سه پره از مینیمم و ماکزیمم باد، گشتاور سه مرتبه دچار نوسان می‌گردد. برای تعیین ساختارهای کنترلی و مسائل کیفیت توان، گشتاور دینامیکی پره‌های یک توربین بادی می‌بایست تعیین گردد. لذا مدل‌سازی گرادیان باد و سایه برج که نوسانات 1P و 3P را سبب می‌گردند برای یک امولاتور توربین باد مناسب بسیار دارای اهمیت بوده و بصورت رابطه (۱) بیان می‌گردد [۱۰]:

$$T_{mech} = T_{mill} \left[ \frac{1}{n} + A_1 \sin(\omega_{mill}t) + A_3 \sin(3\omega_{mill}t) \right] \quad (1)$$

که در رابطه فوق  $A_1=0.2$ ،  $A_3=0.4$  بوده و  $T_{mech}$  و  $T_{mill}$  به ترتیب گشتاور متوسط و ایرودینامیک توربین بادی می‌باشند. توان و گشتاور متوسط حاصل از یک توربین بادی تابعی از سرعت باد ( $u$ )، سرعت چرخشی محور ( $\omega_{mill}$ )، نسبت سرعت نوک پره ( $\lambda$ )، ضرائب توان و گشتاور ( $C_p$  &  $C_q$ ) بصورت روابط (۲) و (۳) می‌باشند:

$$P_{mill} = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 C_p(\lambda) u^3 \quad (2)$$

$$T_{mill} = \frac{1}{2} \rho \pi r^3 C_q(\lambda) u^2 \quad (3)$$

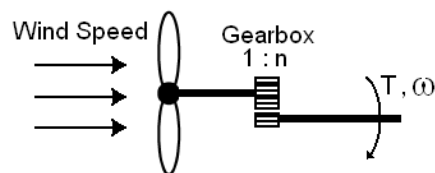
$$\lambda = \frac{r \omega_{mill}}{u} \quad (4)$$

که  $r$  شعاع توربین و  $\rho$  چگالی هوا است.

دینامیکی اینرسی بزرگ توربین برای مهندسین برق و محققین علاقمند می‌باشد. برای این منظور از نرم افزار MATLAB/Simulink که شامل تمامی بلوک‌های مورد نیاز با جزئیات ضروری جهت مدلسازی دینامیکی یک توربین بادی واقعی می‌باشد، به همراه جعبه ابزار Real Time Windows Target که ابزارهای کافی جهت تبادل داده‌ها با واسطه سخت افزاری را فراهم می‌نماید، بهره گیری شده است.

## ۲- تصویر کلی امولاتور

امولاتور توربین بادی نماینده یک سیستم مبدل انرژی بادی (توربین بادی) نظیر شکل (۱) می‌باشد. سیستم آزمایشگاهی با جایگزین نمودن باد، پره‌ها، جعبه دنده و روتور توربین با کامپیوتر، مبدل ac به dc (درایو dc) و موتور dc، بصورت نشان داده شده در شکل (۲) پیاده‌سازی گردیده است. برنامه کامپیوتری پیاده‌سازی شده در محیط Matlab/Simulink با استفاده از مدل گرادیان باد، مدل سایه برج، مدل اینرسی بزرگ توربین، مشخصه‌های حالت ماندگار توربین تحت مطالعه و مدل باد متغیر، سیستم مبدل توان dc را به منظور شبیه‌سازی گشتاور واقعی توربین بادی کنترل می‌نماید. در چند زیر بخش آتی مدل‌های مذکور به همراه اجزا سخت افزار کامپیوتری و اجزای محرکه dc و روش کنترلی مورد استفاده بطور خلاصه تشریح می‌گردد.

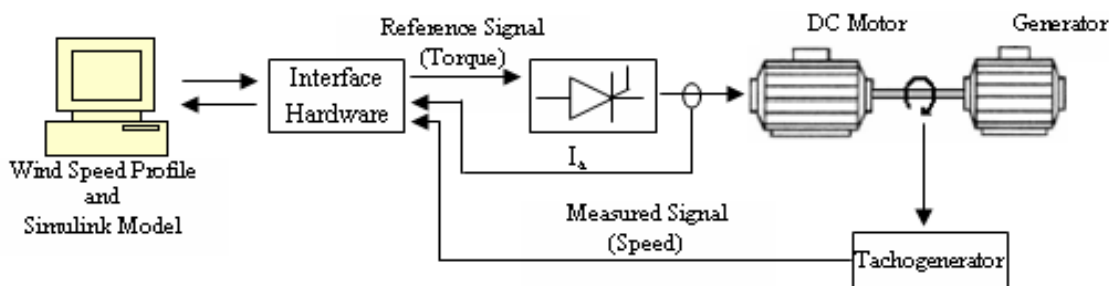


شکل (۱) سیستم توربین بادی

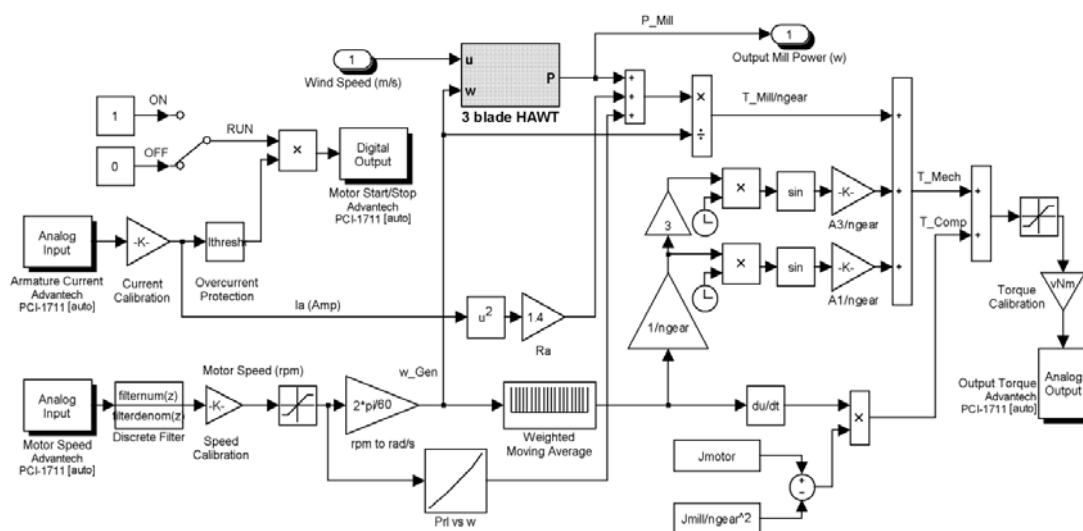
## ۲-۱- گشتاور نوسانی

به منظور افزایش قابلیت اطمینان و پرهیز از تاخیر زمانی تجهیزات اندازه گیری گشتاور و همچنین کاهش هزینه، گشتاور موتور dc تخمین زده می‌شود. با توجه به اینکه این

بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل (۲) سیستم امولاتور توربین بادی



شکل (۳) پیاده‌سازی مدل امولاتور توربین بادی در نرم‌افزار Matlab/Simulink

مرجع گشتاور مورد نیاز موتور dc بصورت رابطه (۷) بدست می‌آید:

$$\frac{T_{mech}}{n} = \left( \frac{J_{mill}}{n^2} + J_g \right) \frac{d\omega_{gen}}{dt} + T_{gen} \quad (5)$$

$$T_{motor} = \left( J_{motor} + J_g \right) \frac{d\omega_{gen}}{dt} + T_{gen} \quad (6)$$

$$T_{motor} = \frac{T_{mech}}{n} + \left( J_{motor} - \frac{J_{mill}}{n^2} \right) \frac{d\omega_{gen}}{dt} \quad (7)$$

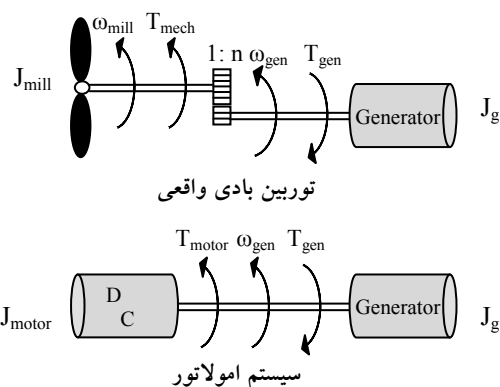
در این روابط  $n$  نسبت تبدیل جعبه دنده بوده و عبارت دوم سمت راست معادله (۷) بیانگر گشتاور جبران کننده امولاتور توربین بادی می‌باشد. بنابراین اگر امولاتور توربین بادی گشتاور محور موتور را مطابق رابطه (۷) کنترل کند، بطور دقیق یک سیستم توربین بادی واقعی با اینرسی بزرگ را نمایندگی خواهد کرد.

۲-۲- مدل اینرسی توربین:

مدل اینرسی با معادل قرار دادن روابط شتاب ژنراتور در شرایط واقعی و سیستم آزمایشگاهی تعیین می‌گردد. به منظور شبیه‌سازی اثر اینرسی بزرگ سیستم مکانیکی توربین، گشتاور موتور dc به گونه ای تغییر می‌یابد که نظیر گشتاور توربین، ناشی از یک باد معین گردد. دیاگرام مدل مکانیکی برای توربین بادی واقعی و سیستم معادل آزمایشگاهی در شکل (۴) نمایش داده شده است که در آن:  $T_{motor}$  گشتاور موتور dc،  $T_{mech}$  گشتاور ایرودینامیک روتور توربین واقعی،  $T_{gen}$  گشتاور ژنراتور،  $J_{motor}$  اینرسی موتور dc،  $J_g$  اینرسی ژنراتور و  $J_{mill}$  اینرسی روتور توربین واقعی می‌باشند. معادلات حرکت برای هر دو سیستم توربین بادی واقعی و امولاتور به ترتیب بوسیله روابط (۵) و (۶) بیان می‌شود. با حل این دو رابطه، مقدار

### بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

MATLAB/Simulink نظیر دسترسی ساده، قابلیت برنامه‌ریزی، توسعه و ارتقا مدلها در این نرم افزار پیاده‌سازی شده است. همانگونه که در شکل (۶) ملاحظه می‌گردد، ارتباط میان مدل Simulink و سخت افزارهای اندازه‌گیری و کنترل از طریق Real Time Windows Target به همراه یک کارت واسطه ورودی/خروجی DAQ<sup>۱</sup> برقرار گردیده است. این سیستم ورودی/خروجی به میزان کافی کانالهای A/D و D/A برای اهداف کنترل و جمع‌آوری داده فراهم می‌نماید. نقطه تنظیم جریان مبدل نیمه کنترل شده تکفاز بوسیله مدل Simulink فراهم می‌گردد. شکل (۷)، سخت افزار سیستم امولاتور را که در آزمایشگاه پیاده‌سازی شده است را نشان می‌دهد.



شکل (۴) مدل مکانیکی توربین بادی واقعی و امولاتور توربین بادی

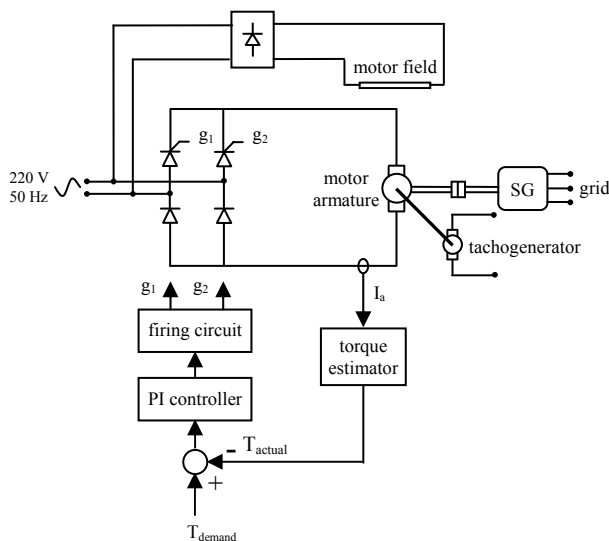
شکل (۳) بلوک دیاگرام بخش نرم‌افزاری امولاتور توربین بادی را نشان می‌دهد که شامل بلوک محاسبه گشتاور، نوسانات گشتاور ناشی از گرادیان سرعت باد و سایه برج و گشتاور جبران‌کننده اثر اینرسی بزرگ توربین می‌باشد.

### ۳- پیاده‌سازی سیستم

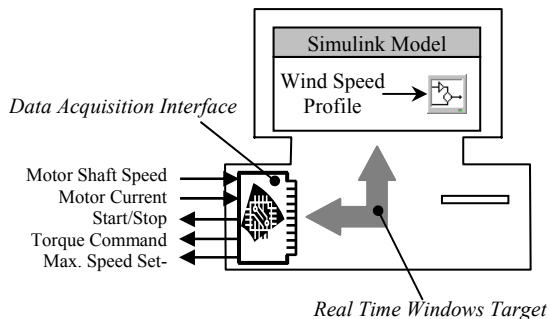
در امولاتور توربین بادی پیشنهادی از یک موتور dc استفاده شده است. پارامترهای این موتور و توربین بادی واقعی مورد مطالعه در ضمیمه ارائه شده اند. حداکثر سرعت دوران توربین بادی برابر 1 rps می‌باشد. بنابراین پهنای باند مورد نیاز حلقه کنترل جریان با این هدف که امولاتور توانایی تولید گشتاور مطابق با تاثیرات گرادیان باد و سایه برج را داشته باشد برابر ۳ هرتز خواهد بود. درایو تکفاز نیمه کنترل شده مورد استفاده در این امولاتور برای کنترل موتور dc به صورت نشان داده شده در شکل (۵) هارمونیک‌هایی با فرکانس ۱۰۰ هرتز تولید می‌نماید که خارج از پهنای باند ۳ هرتز مورد نیاز برای لحاظ نمودن آثار گرادیان باد و سایه برج می‌باشد. فرکانس نمونه برداری امولاتور برابر ۱۰۰ هرتز انتخاب شده است که برابر با فرکانس ریپل‌های تولیدی درایو می‌باشد، لذا با این فرکانس نمونه برداری هارمونیک‌های تولیدی کانورتر حذف می‌گردند.

### ۳-۱- مشخصه‌های حالت ماندگار توربین بادی

مدل توربین بادی جهت بهره‌گیری از مزایای نرم‌افزار



شکل (۵) درایو dc تکفاز نیمه کنترل شده



شکل (۶) نحوه ارتباط میان مدل Simulink و

سخت‌افزار کنترل و اندازه‌گیری

### بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

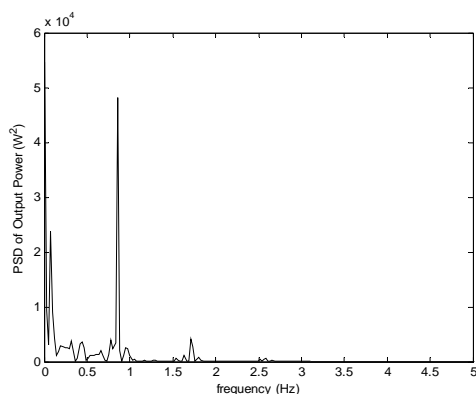
#### ۳-۲- آثار گردایان سرعت باد و سایه برج

نوسانات گشتاور ناشی از سایه برج و گردایان سرعت باد بر اساس مشخصه‌های توربین محاسبه می‌گردند. این نوسانات برای ایجاد یک جریان خروجی نوسانی کافی می‌باشد بگونه‌ای که آثار ناشی از آن در شکل موجهای حوزه زمان قابل تشخیص هستند. برای این منظور سرعت باد ثابتی به امولاتور اعمال می‌گردد به گونه‌ای که سرعت محور ژنراتور به 1319 rpm افزایش یابد، با نسبت جعبه دنده 1:25 فرکانس 1P و 3P نوسانات ناشی از اثرات سایه برج و گردایان سرعت باد بصورت زیر قابل محاسبه می‌باشند:

$$1P = 1310 / (60 \times 25) \approx 0.87 \text{ Hz}, \quad (8)$$

$$3P = 3 \times 1P \approx 2.6 \text{ Hz}$$

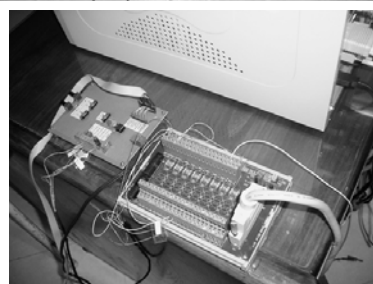
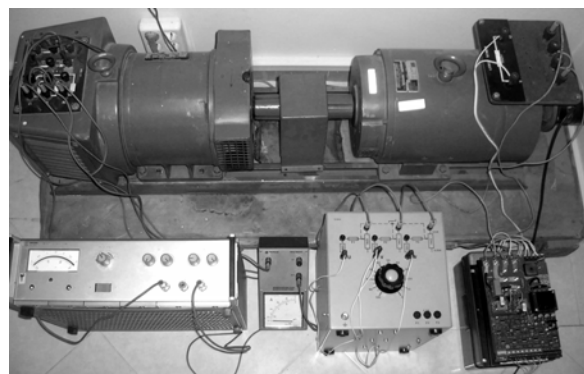
شکل (۹) طیف فرکانسی توان خروجی امولاتور با در نظر گرفتن نوسانات گشتاور ایجاد شده به ازای  $J=0.25 \text{ kgm}^2$  را نشان می‌دهد. شکل‌های (۱۰) و (۱۱) تاثیر این گشتاورهای نوسانی را بر روی جریان موتور و در نتیجه بر روی گشتاور خروجی امولاتور روشن می‌سازد.



شکل (۹) طیف فرکانسی توان خروجی امولاتور با در نظر گرفتن نوسانات گشتاور ( $J=0.25 \text{ kgm}^2$ )

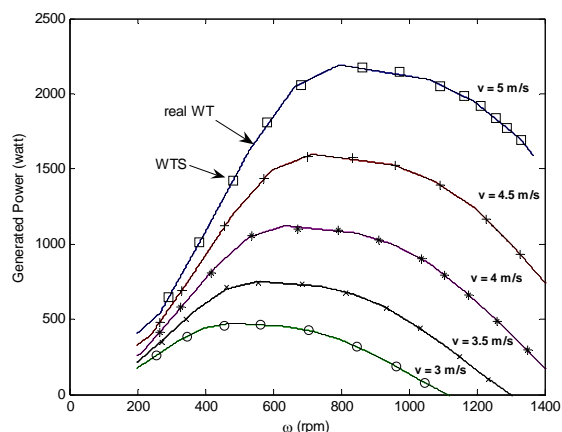
#### ۳-۳- مدل اینرسی بزرگ توربین

در زیر بخش ۲-۲ رابطه (۷) نشان می‌دهد که چگونه مدل اینرسی بزرگ توربین با معادل‌سازی شتاب ژنراتور در سیستم واقعی و سیستم آزمایشگاهی تعیین گردید. طیف فرکانسی توان خروجی امولاتور با لحاظ نمودن گشتاور نوسانی و اینرسی بزرگ ( $J=7 \text{ kgm}^2$ ) در شکل (۱۲) آورده شده است.



شکل (۷) سخت‌افزار سیستم امولاتور

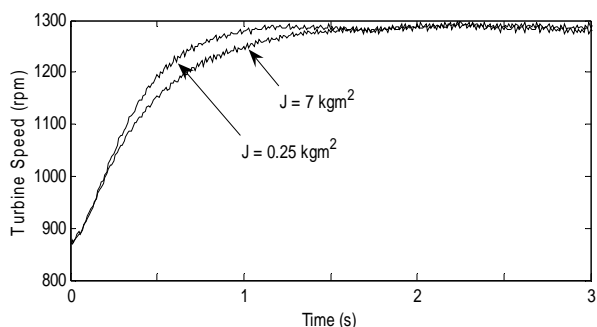
در این تحقیق، یک توربین بادی با محور افقی و مشخصه‌های شکل (۸) مورد استفاده قرار گرفته است. مشخصه‌های سرعت-توان امولاتور توربین بادی نیز که در سرعت‌های مختلف باد، در حین آزمایش‌ها ثبت شده به شکل (۸) اضافه گردیده است. مقایسه این مشخصه‌ها با مشخصه‌های توربین بادی واقعی در شکل مذکور نشان می‌دهد که امولاتور توربین بادی ارائه شده توانایی تولید مشخصه‌های حالت ماندگار یک توربین بادی معین در شرایط مختلف باد بصورت دقیق را دارا می‌باشد.



شکل (۸) مشخصه‌های سرعت-توان توربین بادی واقعی و امولاتور توربین بادی

### بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

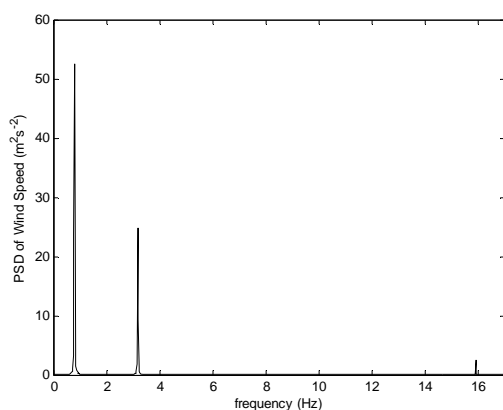
از امولاتور توربین بادی برای اینرسی‌های مختلف ( $J=0.25$  و  $J=7 \text{ kgm}^2$ ) را نشان می‌دهد. همانگونه که در این شکل ملاحظه می‌گردد اینرسی بیشتر روتور سبب کاهش نوسانات محور و دینامیک آرام‌تری می‌گردد.



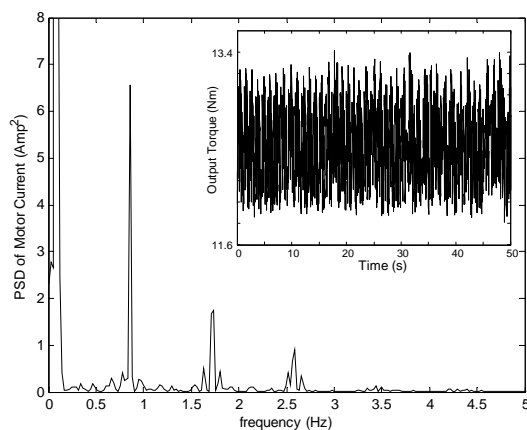
شکل (۱۳) تاثیر اینرسی بر روی پاسخ گذرای سرعت توربین ناشی از تغییر پله‌ای سرعت توربین

#### ۴-۳- سرعت باد نوسانی

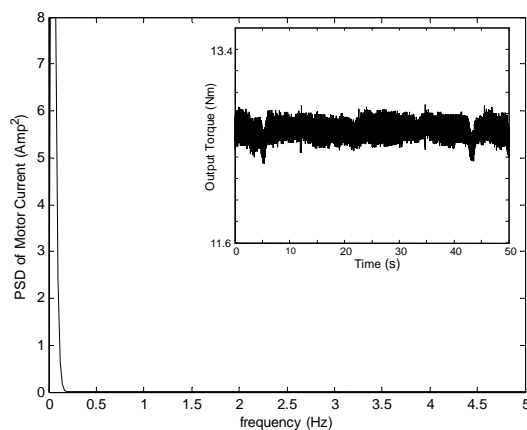
طیف فرکانسی سرعت باد اعمالی در شکل (۱۴) آورده شده است. با فرض سرعت متوسط  $4 \text{ m/s}$  ملاحظه می‌گردد که سرعت باد دارای هارمونیک‌های با فرکانس  $0.8$  هرتز،  $3/2$  هرتز و  $15/9$  هرتز می‌باشد. از شکل (۱۵) آشکار می‌گردد به دلیل اینکه رفتار توربین بادی نظیر یک فیلتر پائین‌گذر با فرکانس قطع در حدود  $2/5$  هرتز می‌باشد، لذا هارمونیک  $15/9$  هرتز در طیف فرکانسی جریان موتور dc حذف شده است. همچنین فرکانس  $3/2$  هرتز نیز به طور قابل ملاحظه‌ای تضعیف گردیده است. شکل (۱۶) تاثیر تغییرات سرعت باد برای توربین با اینرسی‌های مختلف را نشان می‌دهد. افزایش اینرسی توربین سبب کاهش دامنه نوسان در سرعت توربین می‌گردد.



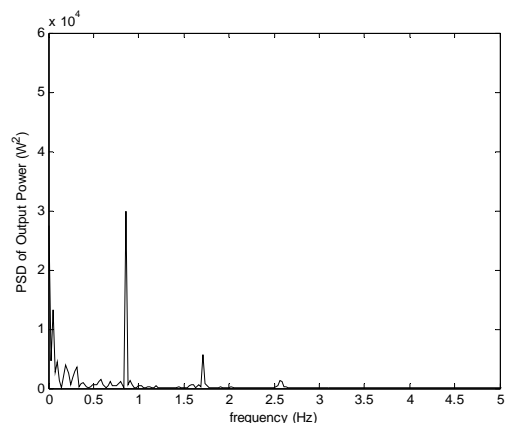
شکل (۱۴) طیف فرکانسی سرعت باد



شکل (۱۰) طیف فرکانسی جریان موتور با در نظر گرفتن نوسانات گشتاور ( $J=0.25 \text{ kgm}^2$ )



شکل (۱۱) طیف فرکانسی جریان موتور بدون در نظر گرفتن نوسانات گشتاور ( $J=0.25 \text{ kgm}^2$ )



شکل (۱۲) طیف فرکانسی توان خروجی امولاتور با در نظر گرفتن نوسانات گشتاور و اینرسی بزرگ ( $J=7 \text{ kgm}^2$ )

با مقایسه شکل‌های (۹) و (۱۲) ملاحظه می‌گردد که در توربین با اینرسی بزرگ، دامنه هارمونیک‌های 1P و 3P کاهش یافته است. شکل (۱۳) نحوه تغییرات سرعت توربین حاصل



## بیست و پنجمین کنفرانس بین‌المللی برق

گوناگونی بر روی امولاتور توربین بادی ارائه شده انجام پذیرفته و نتایج حاصل عملکرد مطلوب توربین بادی را تایید می‌نماید.

### ۵- ضمیمه

پارامترهای موتور DC :

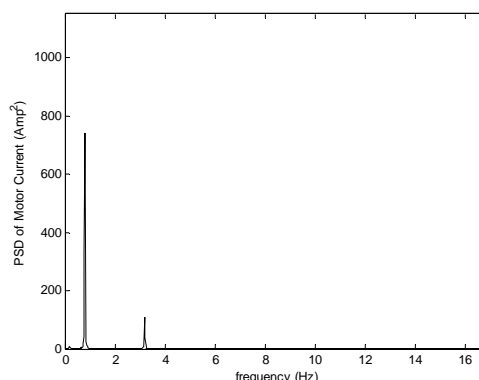
Field: 220 V/0.7 A, nominal power: 3 kW,  
nominal speed: 1500 rpm,  $J$ : 0.25 kgm<sup>2</sup>,  $R_a$ : 1.4  $\Omega$ ,  
 $L_a$ : 27 mH.

پارامترهای توربین بادی:

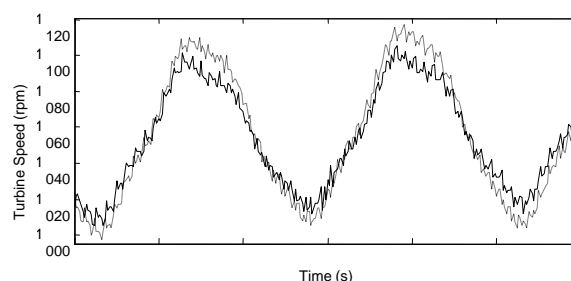
Rated power: 2.5 kW, gearbox ratio: 25,  $J$ : 7 kgm<sup>2</sup>,  
rotor radius: 4.5 m

### مراجع:

- [1] Nunes A. A. C., Seixá P. F., Cortizo P. C. and Silva S. R. "Wind Turbine Simulator Using a dc Machine and a Power Reversible Converter" Proceedings of International Conference Electrical Machines, Australia, 1993. vol. 3, p. 536-540.
- [2] Battaiotto P. E., Mantz R. J. and Puleston P. F. "A Wind Turbine Emulator Based on a Dual DSP Processor System" Control Engineering Practice, vol. 4, no. 9, p. 1261-1266, 1996.
- [3] Rodriguez J. L., Garcia F. R., Chincilla J. C. and Vezanones C. "Experimental Rig to Emulate Wind Turbines" Proceedings of International Conference Electrical Machines, Turkey, 1998. vol. 3, p. 2033-2038.
- [4] Jian L. and Xu W. C. "The Simulation System of Wind Turbine Performance Using a Microcomputer Controlled SCR-DC Motor" Proceedings of International Conference Electrical Machines, Beijing, 1987, p. 865-868.
- [5] Nichita C., Diop A. D., Elhache J., Dakyo B. and Protin L. "Control Structures Analysis for a Real Wind System Simulator" Wind Engineering, vol. 22, no. 6, p. 275-286, 1998.
- [6] Kojabadi H. M., Chang L. and Bouot T. "Development of a Novel Wind Turbine Simulator for Wind Energy Conversion Systems Using an Inverter-Controlled Induction Motor" IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 19, no. 3, p. 547-552, 2004.
- [7] Chinchilla M., Arnaltes S. and Rodriguez-Arnedo J. L. "Laboratory Set-up for Wind Turbine Emulation" Proceedings of IEEE International Conference Industrial Technologies, 2004. vol. 1, p. 553-557.
- [8] Dale S. L. D. and Lehn P. W. "Real-Time Wind Turbine Emulator Suitable for Power Quality and Dynamic Control Studies" Proceedings of International Conference Power Systems Transients, Montreal, 2005. p. 1-6.
- [9] Seung-Ho S., Chang J. B., In L. H., Jae K. J., Hun O. J. and Venkataraman G. "Emulation of Output Characteristics of Rotor Blades Using a Hardware-in-Loop Wind Turbine Simulator" Proceedings of 12th Annual IEEE conference and Exposition Applied Power Electronics 2005. vol. 3, p. 1791-1796.
- [10] Lopes L. A. C., Lhuillier J., Mukherjee A. and Khokar M. F. "A Wind Turbine Emulator That Represents the Dynamics of the Wind Turbine Rotor and Drive Train" Proceedings of 36th IEEE Conference Power Electronics Specialists, 2005. p. 2092-2097.
- [11] Martinez F., de Pablo S. and Herrero L.C. "Fixed Pitch Wind Turbine Emulator Using a DC Motor and a Series Resistor" Proceedings of 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009, p. 1-9.
- [12] Vongmanee V. "Emulator of Wind Turbine Generator Using Dual Inverter Controlled Squirrel Cage Induction Motor" Proceedings of International Conference on Power Electronics and Drive Systems, 2009, p. 1313-1316.



شکل (۱۵) طیف فرکانسی جریان موتور dc ناشی از تغییرات سرعت باد ( $J=7 \text{ kgm}^2$ )



شکل (۱۶) تاثیر تغییرات سرعت باد و اینرسی بزرگ توربین بر روی سرعت توربین ( $J = 0.25 \text{ kgm}^2$  (...),  $J = 7 \text{ kgm}^2$  (—))

### ۴- نتیجه گیری

به منظور بهبود کارایی و اثربخشی مطالعات سیستم‌های تبدیل انرژی بادی یک امولاتور توربین بادی بر پایه یک موتور dc با هدف ایجاد یک محیط آزمایشگاهی کنترل شده برای مطالعه توربین‌های بادی طراحی و ساخته شده است. مدل توربین بادی و کنترل کننده دیجیتال به دلیل سادگی، قابلیت برنامه ریزی و اصلاح و ارتقا در محیط نرم افزار MATLAB/Simulink پیاده‌سازی شده است. توربین‌های بادی به همراه پروفیل‌های باد مختلف در نرم افزار کنترل می‌توانند با یکدیگر ترکیب گردند. در این مقاله بصورت بسیار دقیق همراه با جزئیات دینامیکی رفتار یک توربین بادی واقعی معرفی گردیده است. امولاتور معرفی شده در این مقاله شامل چندین بخش اساسی توربین بادی واقعی شامل: اثرات گرادیان باد، سایه برج، اینرسی بزرگ توربین، سرعت باد متغیر و مشخصه‌های حالت ماندگار می‌باشد که تاکنون یک یا برخی از آنها در سایر امولاتورها صرف نظر شده بود. آزمایشهای