

## کنترل توربین بادی محور افقی دارای ژنراتور سنکرون به منظور جذب بیشینه انرژی باد

آرش حاتمی<sup>۱</sup> و بهنام معتکف ایمانی<sup>۲\*</sup>

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۳/۰۳/۱۸ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۲۱	در توربین های بادی محور افقی دور متغیر به طور معمول، ژنراتورهای سنکرون روتور سیم بندی شده (WRSG)، سنکرون مغناطیس دایم (PMSG) و آسنکرون تغذیه دوگانه (DFIG) مورد استفاده قرار می گیرد. ژنراتور سنکرون با تحریک کنترل شونده، قابلیت تولید توان در سرعت های دورانی کمتر از نامی را دارد. در این مقاله، کنترلر ولتاژ تحریک ژنراتور سنکرون برای توربین بادی محور افقی با هدف جذب بیشینه انرژی باد طراحی شده و کنترلر زاویه گام برای تنظیم سرعت دورانی روتور در مقدار نامی در سرعت های باد بیشتر از نامی طراحی شده اند. صحنه گذاری بر نتایج حاصل از شبیه سازی نرم افزاری توسط آزمایش به صورت سخت افزار در حلقه (Hardware In the Loop) پیاده سازی شده و نتایج به دست آمده در شرایط باد مغشوش مورد تحلیل قرار گرفته است. در نهایت نتیجه می شود که ردیابی توان بیشینه آیرودینامیکی (Maximum Power Point Tracking) با کنترل ولتاژ تحریک ژنراتور سنکرون امکان پذیر می باشد و توربین بادی دارای ژنراتور سنکرون قابلیت تولید توان بهینه را دارد.
<b>واژگان کلیدی:</b> توربین بادی، جذب بیشینه توان، شبیه ساز توربین بادی، کنترلر ولتاژ تحریک، کنترلر زاویه گام.	

### ۱- مقدمه

با توجه به روند افزایشی انرژی مصرفی در جهان و با در نظر گرفتن محدودیت در منابع سوخت های فسیلی، در سال های اخیر تولیدکنندگان انرژی الکتریکی در جستجوی منابع انرژی جایگزین بوده اند [۱]. یکی از منابع انرژی که مورد توجه بسیاری از کشورها و مراکز تحقیقاتی قرار گرفته است، انرژی های تجدیدپذیر از جمله بادی، خورشیدی، آبی و زمین گرمایی می باشد. با استناد بر گزارش ارایه شده در سال ۲۰۰۹ میلادی [۲]، انرژی بادی در میان منابع انرژی تجدیدپذیر بیشترین رشد را داشته است و رشد به کارگیری انرژی باد همچنان ادامه دارد. البته رشد تکنولوژی همراه با ارائه پژوهش های نوآورانه در زمینه های مختلف از جمله

مدل سازی توربین های بادی [۳] و کنترل آن ها [۴ و ۵] میسر شده است.

روند افزایشی بهره گیری از انرژی باد به دو عامل مهم افزایش توان تولیدی و کاهش هزینه های ساخت و بهره برداری توربین های بادی وابسته می باشد. در ادامه معیارهای میزان انرژی تولیدی و هزینه ساخت، برای دو ساختار دور ثابت و دور متغیر در توربین های بادی محور افقی مورد بررسی قرار می گیرد. میانگین توان تولیدی توربین های بادی در سرعت های باد بیشتر از نامی برابر ظرفیت نامی توربین می باشد. اما در محدوده سرعت های باد کمتر از نامی، توان تولیدی متغیر است و توان تولیدی توربین های بادی دور متغیر در سرعت های باد کمتر از نامی

\* پست الکترونیک نویسنده مسئول: imani@ferdowsi.um.ac.ir

۱. دکتری مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد  
۲. استاد گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

و مدلسازی توربین بادی ارایه گردیده است. در ادامه الگوریتم جذب بیشترین انرژی باد در سرعت‌های باد کمتر از نامی، با کنترل ولتاژ تحریک ژنراتور سنکرون طراحی و پیاده‌سازی شده است. همچنین در سرعت‌های باد زیاد، الگوریتم کنترل زاویه گام به گونه‌ای طراحی شده است که سرعت دورانی روتور در محدوده نامی کنترل شود. در نهایت کنترلر ولتاژ تحریک ژنراتور و زاویه گام در بستر آزمایش پیاده‌سازی شده و نتایج حاصل مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

## ۲- معرفی بستر آزمایش

بستر آزمایش، سیمولاتور توربین محور افقی با اجزاء اصلی شاسی، سروو موتور، تورکمر، کوپلینگ‌ها، ژنراتور سنکرون، منبع تغذیه برنامه‌پذیر و باراهمی می‌باشد. در شکل (۱) تصویر مجموعه شاسی، سروو موتور (سمت راست)، تورکمر و ژنراتور سنکرون (سمت چپ) ارائه شده است. اجزای این سیمولاتور و نحوه ارتباط آن‌ها با یکدیگر به طور شماتیکی در شکل (۲) نشان داده شده است. همچنین مشخصات اجزاء این سیمولاتور در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات تجهیزات سیمولاتور

نام تجهیزات	مشخصات
سروو موتور	توان نامی: $5.5^{kW}$
	دورنامی: $1500^{rpm}$
	گشتاور نامی: $35^{N.m}$
تورکمر	ظرفیت: $100^{kgfm}$
	توان نامی: $3^{kW}$
	دورنامی: $1500^{rpm}$
ژنراتور سنکرون	تعداد قطب: ۴
	ولتاژ نامی خط: $400^V$
	جریان نامی خط: $5.7^A$
منبع تغذیه ولتاژ DC کنترل‌شونده	توان نامی: $300^W$
	ولتاژ نامی: $60.4^V$
باراهمی	$380$ ولت با اتصال $381$ ستاره‌ای

## ۳- مدل‌سازی

زنجیره تولید توان در توربین‌های بادی محور افقی از پره‌ها، روتور، سیستم انتقال قدرت و ژنراتور تشکیل می‌شود. پره‌ها و روتور، انرژی جنبشی باد را به انرژی دورانی تبدیل کرده و سیستم انتقال قدرت انرژی دورانی را به محور ژنراتور

از انواع دور ثابت بالاتر می‌باشد. در [۶] توضیح داده شده است که راندمان آیرودینامیکی توربین‌های بادی در سرعت‌های باد کمتر از نامی به سرعت دورانی روتور بستگی دارد و با تنظیم سرعت دورانی روتور در مقدار بهینه، توان تولیدی توربین افزایش پیدا می‌کند. اگر چه در گذشته، توربین‌های بادی دور ثابت به دلیل سادگی در اتصال به شبکه بیشتر از توربین‌های دور متغیر تولید شده‌اند [۷]. یکی از عوامل تاثیرگذار بر هزینه ساخت توربین‌های بادی، وزن اجزاء مکانیکی می‌باشد. در صورت کاهش بارهای وارده، امکان کمتر شدن وزن اجزاء وجود دارد. در ساختار دور ثابت، بارهای مکانیکی ضربه‌ای زیادی به اجزاء مکانیکی وارد می‌شود و اجزاء بایستی ساختار قوی داشته باشند. در این ساختار، افزایش شدید سرعت باد (Gust) منجر به افزایش لحظه‌ای گشتاور وارد بر سیستم انتقال قدرت می‌شود و تنش‌های وارد بر تمامی اجزاء توربین به صورت لحظه‌ای افزایش می‌یابد. حال آنکه در ساختار دور متغیر، روتور مقدار زیادی از انرژی ناشی از افزایش سرعت باد را با افزایش سرعت دورانی به انرژی جنبشی تبدیل می‌کند و از وارد شدن ضربه‌های مکانیکی جلوگیری می‌نماید [۸]. در نتیجه تنش‌های مکانیکی وارده در توربین‌های دور متغیر کاهش پیدا می‌کند و اجزاء مکانیکی سبکتر و ارزانتری مورد استفاده قرار می‌گیرد که توضیحات بیشتر را می‌توان در [۹] مطالعه نمود. بنابر موارد مطرح شده، توربین‌های بادی دور متغیر قابلیت افزایش توان تولیدی و کاهش هزینه‌های ساخت را دارا می‌باشند. در این توربین‌ها معمولاً ژنراتورهای سنکرون، سنکرون مغناطیس دایم و آسنکرون تغذیه دوگانه که قابلیت تولید توان در سرعت‌های دورانی مختلف را دارند به کارگیری می‌شود [۱۰]. امروزه ژنراتورهای سنکرون در توربین‌های بادی بزرگ به کارگیری شده‌اند. این ژنراتورها با ولتاژ تحریک کنترل‌پذیر، قابلیت‌های مناسب در کنترل سرعت دورانی و توان اکتیو و راکتیو دارا می‌باشند [۱۱].

در [۱۱] مدلسازی ریاضی و شبیه‌سازی نرم‌افزاری توربین بادی با ژنراتور سنکرون خود تحریک (کنترل ناپذیر) متصل به شبکه انجام شده است. در همین مقاله، با کنترل کانورتر در نقطه اتصال به شبکه، توان اکتیو و راکتیو کنترل شده است اما به مبحث کنترل ولتاژ تحریک ژنراتور سنکرون پرداخته نشده است.

در این مقاله، ابتدا بستر آزمایش مورد استفاده تشریح شده



شکل ۱- تصویر شاسی، سروو موتور، تورک متر و ژنراتور

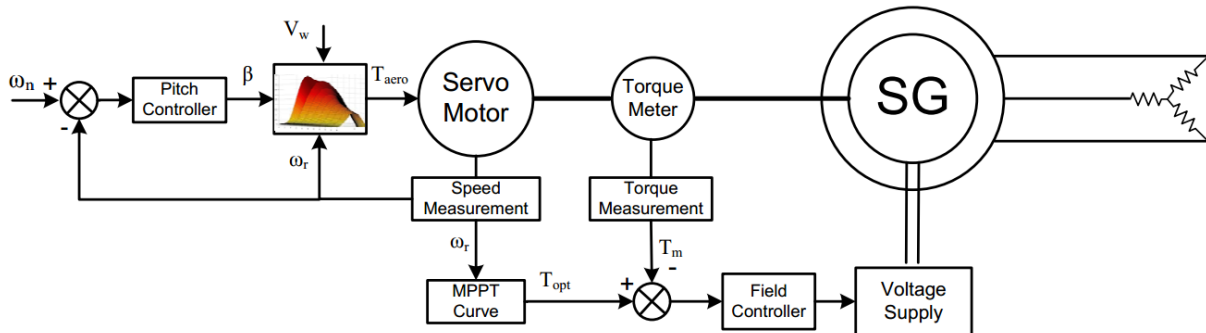
منتقل می‌کند. در ژنراتور، انرژی دورانی محور به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. در این بخش، مدل آیرودینامیکی روتور و مدل ریاضی ژنراتور سنکرون با تحریک مجزا ارائه می‌گردد.

### ۳-۱- مدل آیرودینامیکی روتور

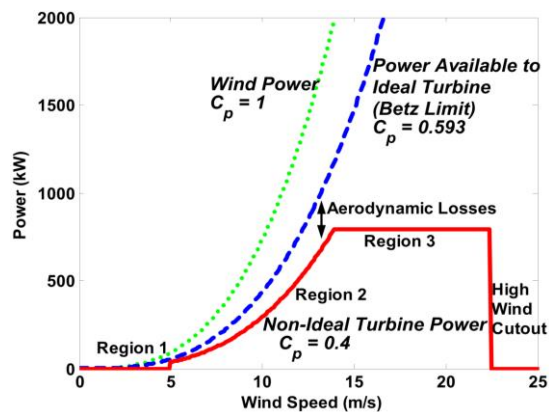
توان و گشتاور آیرودینامیکی توربین‌های بادی محور افقی گام متغیر بر اساس تئوری مومنتوم، از رابطه‌های (۱) و (۲) محاسبه می‌شود [۱۲].

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

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



شکل ۲- اجزاء اصلی سیمولاتور و نحوه ارتباط آن‌ها



شکل ۳- مفاهیم منحنی توان [۱۳]

در ناحیه ۲ منحنی توان، سرعت باد از مقدار نامی کمتر و زاویه گام برابر صفر است. در این ناحیه، گشتاور ژنراتور به نحوی کنترل می‌شود که توربین در نقطه‌های کار بهینه از نقطه نظر آیرودینامیکی تولید توان داشته باشد. در ناحیه ۳ منحنی توان، سرعت باد بیشتر از مقدار نامی و سرعت دورانی روتور و توان تولیدی برابر مقادیر نامی می‌باشد. با توجه به رابطه (۱) در سرعت‌های باد بیشتر از نامی،

مقادیر  $P_a$ ،  $C_p$ ،  $\lambda$ ،  $\beta$ ،  $\rho$ ،  $V_w$ ،  $T_a$  و  $C_q$  به ترتیب بیانگر توان آیرودینامیکی، ضریب توان، نسبت سرعت نوک، زاویه گام پره، چگالی هوا، شعاع روتور، سرعت باد محیط، گشتاور آیرودینامیکی و ضریب گشتاور در واحد SI می‌باشند. توان الکتریکی تولید شده در توربین‌های بادی در سرعت‌های باد مختلف در قالب نمودار با عنوان منحنی توان نمایش داده می‌شود. (شکل ۳)

در این شکل منحنی که بالاترین سطح توان را دارد، توان موجود در باد را نمایش می‌دهد و منحنی که با عنوان توان موجود در توربین ایده‌آل براساس تئوری بتز مشخص شده است، سطح توان حدود ۵۹٫۳٪ از توان باد را دارا می‌باشد. در نهایت منحنی که توان تولیدی توربین‌های بادی محور افقی را نشان می‌دهد از سه ناحیه اصلی تشکیل شده است:

ناحیه ۱: بدون تولید توان (سرعت‌های باد کم)

ناحیه ۲: تولید توان کمتر از نامی (سرعت‌های باد کمتر از نامی)

ناحیه ۳: تولید توان نامی (سرعت‌های باد بیشتر از نامی)

ژنراتور اندازه‌گیری گردید. آزمایش‌ها برای سرعت‌های دورانی ژنراتور از ۱۰۰۰ تا ۱۵۰۰ دور بر دقیقه به طور مجزا صورت پذیرفته و داده‌های به دست آمده با بهره‌گیری از روش شناسایی سیستم مورد تحلیل قرار گرفت. داده‌های حاصل از آزمایش‌ها با بهره‌گیری از ابزار System Identification Tool در نرم‌افزار MATLAB نسخه R2011b تحلیل شده و توابع تبدیل با کمترین میزان خطا برای هر مرحله از آزمایش‌ها شناسایی شده‌اند. نتیجه تحلیل‌های صورت گرفته، تابع تبدیل گشتاور مکانیکی به ولتاژ تحریک را مطابق رابطه (۴) به دست می‌دهد.

$$G(s) = \left( \frac{K}{1 + Ts} \right) \left( \frac{1}{1 + T_d s} \right) \quad (4)$$

ضرایب این رابطه در سرعت‌های دورانی مختلف تغییر می‌کند. بازه تغییرات این ضرایب در رابطه (۵) ارایه شده است.

$$\begin{aligned} 0.3 < K < 0.37 \\ 0.8 < T < 1.0 \\ 0.3 < T_d < 0.5 \end{aligned} \quad (5)$$

مدل ریاضی به دست آمده در این بخش برای طراحی کنترلر تحریک ژنراتور مورد استفاده قرار می‌گیرد.

#### ۴- کنترل توربین بادی

با توجه به مدل مشخص شده برای زیرسیستم‌های آیرودینامیکی و الکتریکی و با در نظر گرفتن اینرسی و اصطکاک در مدل مکانیکی، مدل خطی توربین بادی به صورت بلوک دیاگرام ترسیم می‌گردد. بلوک دیاگرام کنترلی توربین بادی گام متغیر-دور متغیر با ژنراتور سنکرون و ولتاژ تحریک مجزا در شکل (۴) نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود، سیستم کنترل توربین بادی به دو زیرسیستم کنترلی ولتاژ تحریک ژنراتور و زاویه گام قابل تقسیم می‌باشد. در زیرسیستم کنترل زاویه گام، ورودی سرعت باد و گشتاور ژنراتور به صورت اغتشاش (disturbance) ظاهر می‌شود.

در صورتی توان مکانیکی برابر مقدار نامی می‌باشد که ضریب توان کاهش پیدا کند. با توجه به اینکه ضریب توان تابع نسبت سرعت نوک و زاویه گام است، در توربین‌های گام متغیر زاویه گام طوری کنترل می‌شود که توان تولیدی در محدوده مقدار نامی باشد. گشتاور آیرودینامیکی در رابطه (۲) عبارت غیرخطی است. با خطی‌سازی این عبارت، مدل خطی آیرودینامیکی مطابق رابطه (۳) به دست می‌آید [۱۴] و این مدل در بخش طراحی کنترلر زاویه گام مورد استفاده قرار می‌گیرد.

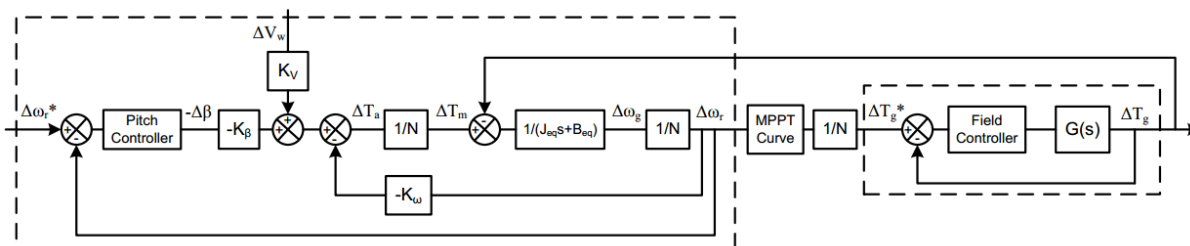
$$T_a = T_a^* + K_V \Delta V_w + K_\beta \Delta \beta + K_\omega \Delta \omega_r \quad (3)$$

عبارت‌های  $T_a^*$ ،  $K_V$ ،  $K_\beta$  و  $K_\omega$  به ترتیب معادل گشتاور آیرودینامیکی در شرایط پایدار خطی‌سازی شده، ضریب خطی سرعت باد، ضریب خطی زاویه گام و ضریب خطی سرعت دورانی روتور در واحد SI می‌باشند.

#### ۳-۲- مدل ژنراتور سنکرون

معادلات دیفرانسیلی شارهای الکترومغناطیسی حاکم بر ژنراتور سنکرون به طور کامل در [۱۵] توضیح داده شده است. این معادلات به صورت مدل دینامیکی ماشین با ورودی‌های ولتاژ سیم‌پیچ‌های استاتور و ولتاژ سیم‌پیچ تحریک و با خروجی گشتاور مکانیکی، قابل ارایه می‌باشد. در این مدل، تغییرات سرعت دورانی محور ژنراتور به صورت عدم قطعیت در نظر گرفته می‌شود. و در شرایطی که خروجی ژنراتور به بار اهمی متصل شود، ولتاژ سیم‌پیچ تحریک تنها ورودی مدل می‌باشد. بنابراین مدل دینامیکی ژنراتور سنکرون به صورت یک سیستم یک ورودی-یک خروجی دارای عدم قطعیت مدل‌سازی می‌گردد.

برای تعیین مدل ریاضی ژنراتور سنکرون با ورودی ولتاژ تحریک و خروجی گشتاور مکانیکی آزمایش‌های متعددی بر روی شبیه‌ساز انجام گردید. در هر مرحله آزمایش، سرعت دورانی ژنراتور ثابت بود و ولتاژ تحریک به صورت پله‌ای در سطوح مختلف تغییر داده شد و گشتاور مکانیکی



شکل ۴- بلوک دیاگرام کنترل توربین بادی محور افقی با تنظیم زاویه گام و ولتاژ تحریک ژنراتور

جدول ۲ ارائه شده است.

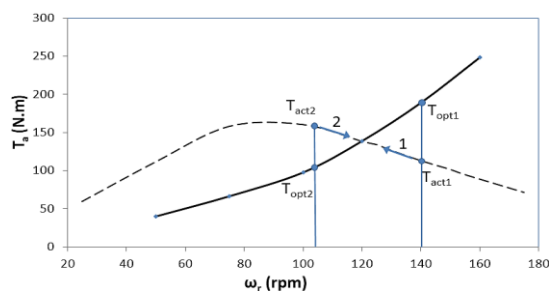
جدول ۲- نقاط کاری بهینه از دیدگاه آیرودینامیکی

سرعت باد (متر بر ثانیه)	سرعت دورانی روتور (رادیان بر ثانیه)	توان آیرودینامیکی (وات)	گشتاور آیرودینامیکی (نیوتن متر)
۳	۵,۲۴	۲۱۰	۴۰
۴	۷,۸۵	۵۲۳	۶۷
۵	۱۰,۴۷	۱۰۲۲	۹۸
۶	۱۲,۵۷	۱۷۴۲	۱۳۹
۷	۱۴,۶۶	۲۷۶۶	۱۸۹
۸	۱۶,۷۵	۴۱۵۴	۲۴۸

ضابطه گشتاور بهینه و سرعت دورانی روتور در سرعت‌های باد ثابت، یک چندجمله‌ای درجه ۲ است [۱۳]. با برازش منحنی درجه ۲ بر نقاط بهینه تعیین شده، ضابطه الگوریتم MPPT مطابق رابطه (۶) تعیین می‌شود.

$$T_{MPPT} = 1.22\omega_r^2 - 8.55\omega_r + 54.06 \quad (6)$$

در ادامه، چگونگی عملکرد الگوریتم MPPT با توجه به منحنی‌های گشتاور آیرودینامیکی-دور روتور بررسی می‌شود. بدین منظور، منحنی گشتاور-دور در سرعت باد ۶ متر بر ثانیه به همراه منحنی MPPT در شکل (۶) رسم شده است. اگر توربین در نقطه کاری بهینه قرار نداشته باشد، دو حالت قابل تصور است که سرعت روتور بیشتر یا کمتر از بهینه باشد. در حالت یکم، گشتاور ایده‌آل ( $T_{opt1}$ ) بنابر منحنی MPPT از گشتاور آیرودینامیکی ( $T_{act1}$ ) بیشتر است و با کنترل ولتاژ تحریک ژنراتور، گشتاور ژنراتور بیشتر می‌شود و سرعت دورانی روتور در جهت کاهش (جهت ۱) حرکت می‌کند تا به نقطه کار بهینه برسد. در حالت دوم، عکس حالت اول انجام می‌شود. چگونگی تغییر سرعت دورانی روتور به صورت پیکان در شکل (۶) و برای هر دو حالت نمایش داده شده است.

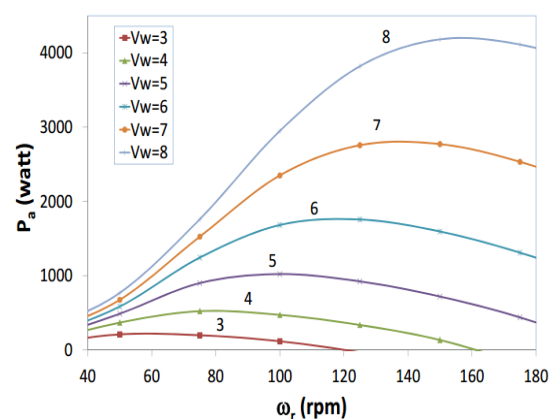


شکل ۶- چگونگی عملکرد الگوریتم MPPT

از آنجایی که سیستم کنترل گام در ناحیه ۳ منحنی توان فعال می‌شود و در این ناحیه گشتاور ژنراتور حدود مقدار نامی می‌باشد، می‌توان از تغییرات گشتاور ژنراتور صرف نظر کرد. با این فرض، دو زیرسیستم کنترل از یکدیگر مستقل می‌شود و طراحی کنترلرهای ولتاژ تحریک ژنراتور و زاویه گام به صورت سیستم یک ورودی-یک خروجی (SISO) انجام می‌گیرد. پیش از طراحی کنترلر تحریک ژنراتور، الگوریتم MPPT که توسط آن گشتاور مطلوب از دیدگاه آیرودینامیکی تعیین می‌گردد، توضیح داده می‌شود.

#### ۴-۱- الگوریتم MPPT

سه روش تغییر و مشاهده (Perturbation & Observation)، اندازه‌گیری سرعت باد (Wind Speed Measuring) و پیشخورد سیگنال توان (Power Signal Feedback) برای پیاده‌سازی الگوریتم MPPT در [۱۶] به تفصیل ارائه شده است. در این مقاله از روش پیشخورد سیگنال توان الگوبرداری شده و پیشخورد سیگنال گشتاور مورد استفاده قرار گرفته است. در بلوک دیاگرام کنترل توربین بادی، بلوک MPPT خروجی حلقه کنترل سرعت دورانی روتور را به ورودی حلقه کنترل گشتاور ارتباط می‌دهد. در نتیجه ورودی بلوک MPPT، سرعت دورانی روتور و خروجی آن، گشتاور مطلوب روی محور روتور است. به منظور تعیین گشتاور بهینه از دیدگاه آیرودینامیکی، منحنی‌های توان آیرودینامیکی-دور روتور برای پره‌های توربین بادی ۳ کیلووات نمونه در شکل (۵) ترسیم شده‌اند. هر منحنی متناظر با سرعت باد مشخص و زاویه گام صفر می‌باشد.

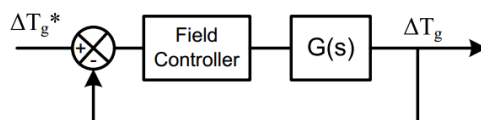


شکل ۵- منحنی‌های توان آیرودینامیکی-دور روتور در سرعت‌های باد مختلف

نقاط قله هر منحنی، نشانگر یک نقطه کار بهینه است و در

### ۴-۲- کنترلر ولتاژ ولتاژ تحریک ژنراتور

در زیرسیستم کنترل ولتاژ تحریک ژنراتور، گشتاور بهینه ژنراتور محاسبه شده از بلوک MPPT، ردیابی (track) می-شود. بلوک دیاگرام کنترل گشتاور ژنراتور سنکرون با استفاده از ولتاژ تحریک در شکل (۷) نمایش داده شده است.



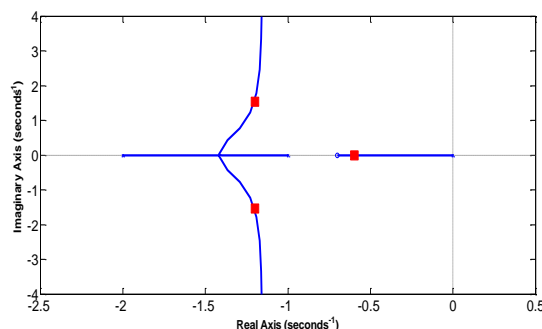
شکل ۷- بلوک دیاگرام سیستم حلقه بسته کنترل گشتاور ژنراتور سنکرون

ورودی این سیستم، گشتاور بهینه است که توسط الگوریتم MPPT تعیین می‌شود. خروجی کنترلر، ولتاژ تحریک ژنراتور و مدل (G)، تابع تبدیل گشتاور مکانیکی به ولتاژ تحریک ژنراتور می‌باشد. با توجه به اینکه تابع تبدیل ژنراتور دارای عدم قطعیت است، کنترلر برای بدترین شرایط کاری ژنراتور از دیدگاه کنترلی طراحی می‌شود و در سایر شرایط مورد بررسی قرار می‌گیرد.

با توجه به رابطه (۴)، تابع تبدیل ژنراتور فاقد انتگرالگیر می‌باشد و به منظور ردیابی گشتاور بدون خطای ماندگار، کنترلر تناسبی-انتگرالی (PI) مورد استفاده قرار می‌گیرد. تابع تبدیل حلقه باز (L) کنترل گشتاور با کنترلر PI در رابطه (۷) ارزیابی شده است.

$$L(s) = 3.76 \left(1 + \frac{0.7}{s}\right) \left(\frac{0.3}{1+s}\right) \left(\frac{1}{1+0.5s}\right) \quad (7)$$

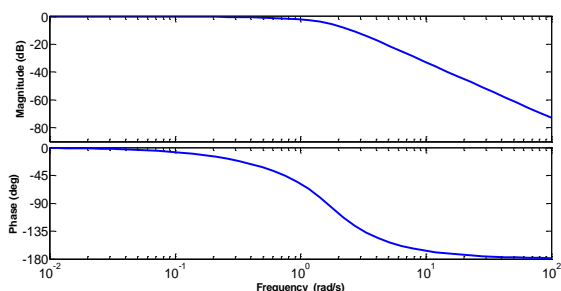
در شکل (۸)، مکان هندسی ریشه‌های سیستم حلقه بسته نشان داده شده است. در این شکل، موقعیت ریشه‌های سیستم حلقه بسته با مربع‌های توپر نمایش داده شده است.



شکل ۸- نمودار مکان هندسی ریشه‌های کنترل گشتاور

در شکل (۹)، نمودار بود سیستم حلقه بسته نمایش داده

شده است. فرکانس شکست در این شکل حدود ۱٫۱ رادیان بر ثانیه می‌باشد.

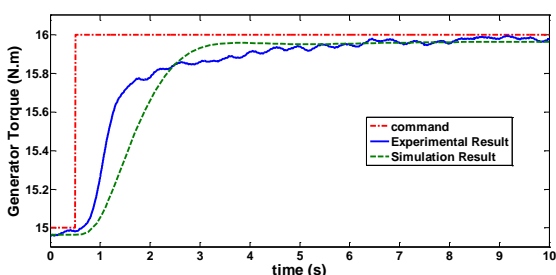


شکل ۹- نمودار بود حلقه بسته کنترل گشتاور

خروجی کنترلر به سیگنال فرمان منبع تغذیه ولتاژ DC تحریک ژنراتور که در جدول (۱) معرفی شد، تبدیل می‌شود. برای حفاظت این منبع تغذیه ولتاژ، در خروجی کنترلر PI محدود کننده نرخ تغییرات ولتاژ با اندازه ۱۱ ولت بر ثانیه قرار داده می‌شود.

به منظور بررسی عملکرد کنترلر ولتاژ تحریک ژنراتور، پاسخ گشتاور خروجی به ورودی پله و شیب در شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری بررسی می‌شود. و در راستای صحت‌گذاری بر نتایج شبیه‌سازی، عملکرد کنترلر بر روی شبیه‌ساز مورد آزمایش قرار گرفته و با نتایج شبیه‌سازی‌ها مقایسه می‌گردد.

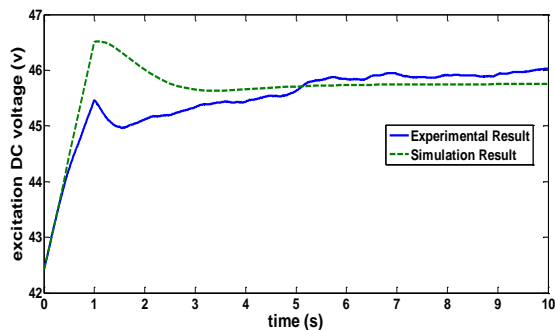
خروجی گشتاور ژنراتور در پاسخ به ورودی پله واحد گشتاور در شکل (۱۰) ترسیم گردیده است. در این شکل، ورودی به صورت خط نقطه، نتایج آزمایش با خط پر و نتایج شبیه‌سازی با خط چین نمایش داده شده است.



شکل ۱۰- گشتاور ژنراتور حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی در پاسخ به ورودی پله واحد

گشتاور ژنراتور در شبیه‌سازی و آزمایش به ترتیب در زمان‌های ۱٫۵ و ۱ ثانیه به ۷۰٪ مقدار نهایی و در زمان‌های ۳ و ۵٫۵ ثانیه به ۹۵٪ مقدار نهایی رسیده‌اند. با در نظر گرفتن عواملی همچون ثابت زمانی مدل دینامیکی ژنراتور و محدودیت در نظر گرفته شده برای منبع تغذیه ولتاژ تحریک، عملکرد کنترلر از نقطه‌نظرهای زمان پاسخ و

اندازه‌گیری شده در آزمایش نسبت به گشتاور محاسبه شده در شبیه‌سازی، دارای زمان صعود (raise time) کمتر و زمان نشست (settling time) بیشتر می‌باشد.

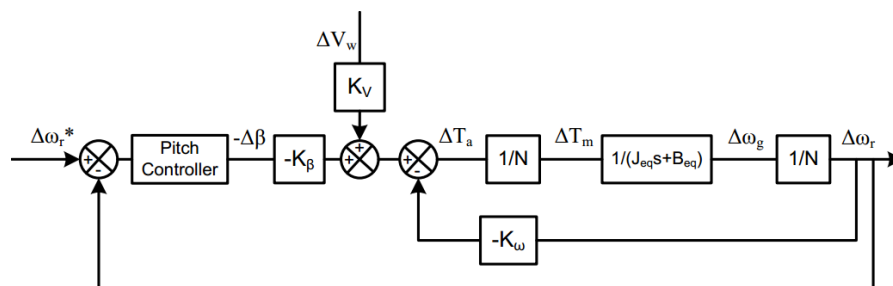


شکل ۱۳- ولتاژ تحریک حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی در پاسخ به ورودی شیب گشتاور

عدم انطباق کامل نتایج شبیه‌سازی و آزمایش می‌تواند به دلیل خطا در مدلسازی ژنراتور و/یا اندازه‌گیری‌ها و همچنین ساده‌سازی مدل دینامیکی ژنراتور باشد. در مجموع، کنترلر طراحی شده در شرایط کاری مختلف به لحاظ پایداری و ردیابی گشتاور مطلوب، عملکرد مناسبی دارد. اما با توجه به وجود عدم قطعیت در مدل ژنراتور، کارایی (performance) کنترلر همچون زمان صعود و زمان نشست به شرایط کاری وابسته است.

#### ۴-۳- کنترلر زاویه گام

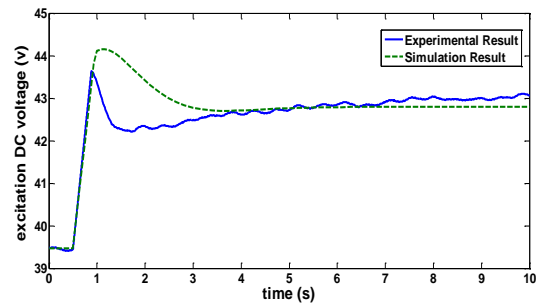
در این بخش از مقاله، کنترلر زاویه گام با هدف ثابت نگه داشتن سرعت دورانی روتور حدود مقدار نامی با وجود نوسانات سرعت باد طراحی می‌شود و در ادامه همین بخش، نتایج آزمایش کنترلر زاویه گام ارائه می‌گردد. بلوک دیاگرام حلقه بسته سیستم ثابت نگه داشتن سرعت دورانی روتور (regulation) با کنترلر زاویه گام در شکل (۱۴) نمایش داده شده است.



شکل ۱۴- بلوک دیاگرام سیستم حلقه بسته کنترلر سرعت دورانی روتور

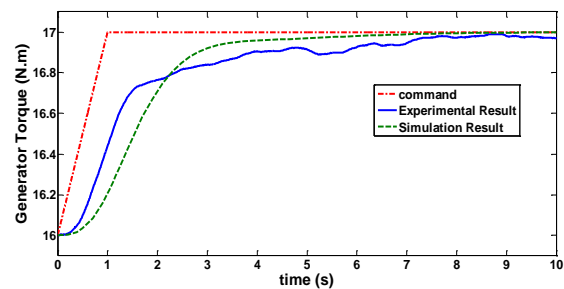
دورانی روتور بر حسب رادیان بر ثانیه به تغییر زاویه گام بر حسب درجه در سرعت باد ثابت، مطابق رابطه (۸) به دست

ردیابی بدون خطا مطلوب می‌باشد. در شکل (۱۱) نتایج ولتاژ تحریک در آزمایش و شبیه‌سازی در پاسخ به ورودی پله واحد گشتاور نشان شده‌اند. هر دو منحنی در زمان تغییر ورودی با حداکثر شیب ممکن (۱۱ ولت بر ثانیه) افزایش پیدا می‌کند و در انتها، به مقدار ثابت همگرا می‌شود.



شکل ۱۱- ولتاژ تحریک حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی در پاسخ به ورودی پله واحد گشتاور

به منظور مقایسه کامل تر نتایج شبیه‌سازی و آزمایش و بررسی عملکرد کنترلر، پاسخ گشتاور خروجی و ولتاژ تحریک ژنراتور به ورودی شیب به ترتیب در شکل‌های (۱۲) و (۱۳) نمایش داده شده است.



شکل ۱۲- گشتاور ژنراتور حاصل از آزمایش و شبیه‌سازی در پاسخ به ورودی شیب

در هر دو حالت شبیه‌سازی و آزمایش، ردیابی ورودی بدون خطای ماندگار انجام شده است. به لحاظ زمانی، گشتاور

در سرعت باد ۹ متربرثانیه، ضرایب  $K_V$ ،  $K_\beta$  و  $K_\omega$  به ترتیب برابر ۹۵، ۲۵- و ۲۱- است و تابع تبدیل تغییر سرعت

می‌آید.

$$\frac{\Delta\omega_r(s)}{\Delta\beta(s)} = \frac{1.19}{1 + 0.024s} \quad (8)$$

به منظور حذف خطای ماندگار و ثابت نگه داشتن سرعت دورانی روتور در شرایط باد توربولانس، کنترلر PI برای زاویه گام مورد استفاده قرار می‌گیرد. تابع تبدیل کنترلر PI در رابطه (۹) ارزیابی گردیده است.

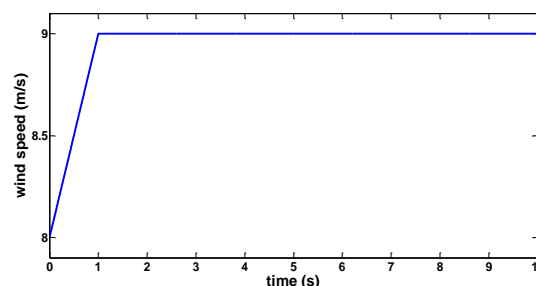
$$C(s) = 9 \left( 1 + \frac{0.2}{s} \right) \quad (9)$$

با این کنترلر، تابع تبدیل سرعت دورانی روتور به سرعت باد به صورت رابطه (۱۰) می‌باشد.

$$\frac{\Delta\omega_r(s)}{\Delta V_w(s)} = \frac{2.11s}{0.011s^2 + 5.47s + 1} \quad (10)$$

به منظور نزدیک شدن نتایج مدل‌سازی به شرایط واقعی توربین بادی، محدودیت سرعت دورانی عملگر محور گام به اندازه ۱۰ درجه بر ثانیه در نظر گرفته شده و در خروجی کنترلر PI اعمال می‌گردد.

جهت بررسی عملکرد کنترلر زاویه گام، نتایج شبیه‌سازی نرم‌افزاری و نتایج آزمایشگاهی در شرایط تغییر سرعت باد از مقدار ۸ به ۹ متربر ثانیه در مدت یک ثانیه مطابق شکل (۱۵)، بررسی می‌شود.

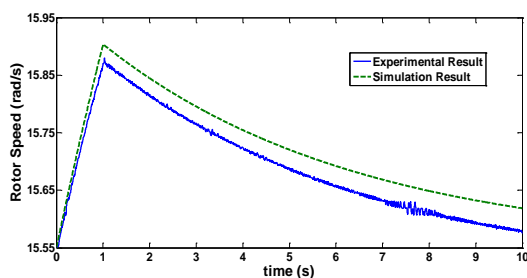


شکل ۱۵- سرعت باد ورودی به سیستم کنترل زاویه گام

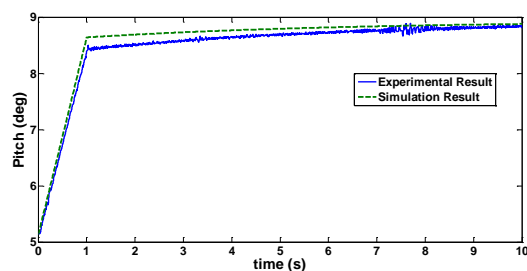
سرعت دورانی روتور حاصل از نتایج آزمایش و نتایج شبیه‌سازی به عنوان خروجی این سیستم کنترلی در شرایط تغییر سرعت باد ارایه شده، در شکل (۱۶) نمایش داده شده است. در شکل (۱۷) زاویه گام مورد نیاز جهت ثابت نگه داشتن سرعت دورانی روتور ترسیم گردیده است. در این شکل‌ها، متغیر اندازه‌گیری شده در آزمایش به صورت خط-پر و متغیر محاسبه شده به صورت خط‌چین نشان داده شده است.

در شکل‌های (۱۶) و (۱۷)، در ثانیه اول با توجه به افزایش سرعت باد، سرعت دورانی روتور از مقدار نامی بیشتر می‌شود در نتیجه زاویه گام افزایش پیدا می‌کند. میزان

فراجهش سرعت دورانی روتور در آزمایش و شبیه‌سازی به ترتیب برابر ۲.۱٪ و ۲.۲٪ می‌باشد. این میزان فراجهش سرعت دورانی روتور به طور لحظه‌ای و در محدوده مجاز می‌باشد ضمن اینکه در توربین‌های بادی بسته به مشخصات توربین میزان فراجهش تا ۱۰٪ قابل قبول می‌باشد. بعد از ثانیه ۱ و با ثابت شدن سرعت باد، زاویه گام با شیب کمتری به روند افزایش ادامه می‌دهد و سرعت دورانی روتور کاهش می‌یابد تا به صورت مجانبی به مقدار نامی برسد.



شکل ۱۶- پاسخ سرعت دورانی روتور به ورودی شیب سرعت باد در سیستم کنترل زاویه گام



شکل ۱۷- پاسخ کنترلر زاویه گام به ورودی شیب سرعت باد

در این شکل‌ها مطابقت نسبی میان منحنی‌های حاصل از آزمایش و حاصل از شبیه‌سازی مشاهده می‌شود و عدم انطباق جزئی به دلیل خطی‌سازی صورت گرفته در مدل آیرودینامیک مورد استفاده در شبیه‌سازی نرم‌افزاری می‌باشد.

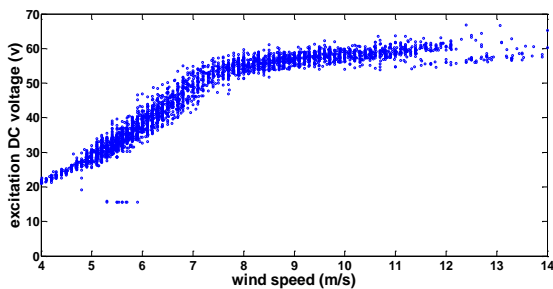
## ۵- نتایج و بحث

در این بخش از مقاله، کنترلرهای ولتاژ تحریک ژنراتور و زاویه گام به طور همزمان روی شبیه‌ساز پیاده‌سازی شده و عملکرد این کنترلرها در شرایط باد مغشوش (turbulence) مورد بررسی قرار گرفته است.

در شکل (۱۸) ورودی باد مورد استفاده در این آزمایش نشان داده شده است. و در شکل‌های (۱۹) تا (۲۱)، نتایج حاصل از آزمایش کنترل توربین بادی بر روی شبیه‌ساز به صورت داده‌برداری یک ثانیه‌ای ارایه شده است. در شکل (۱۹) رابطه بین زاویه گام و سرعت باد به صورت نقاط

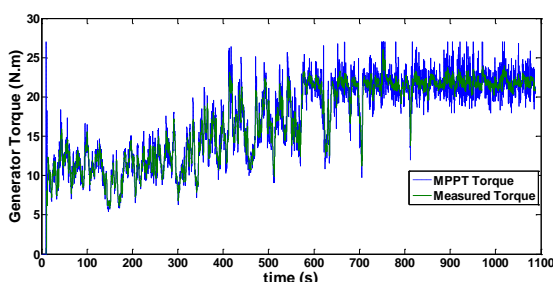


متناسب با سرعت باد با هدف دنبال کردن گشتاور بهینه کنترل شده است.



شکل ۲۱- ولتاژ تحریک و سرعت باد داده‌های آزمایش

به منظور بررسی عملکرد کنترل ولتاژ تحریک ژنراتور، گشتاور MPPT به عنوان ورودی و گشتاور اندازه‌گیری شده به عنوان خروجی سیستم کنترل گشتاور ژنراتور به صورت سری زمانی در شکل (۲۲) ترسیم شده‌اند. در این شکل، در اکثر زمان‌ها این دو مقدار با یکدیگر مطابقت دارند به عبارت دیگر الگوریتم ردیابی گشتاور نامی به درستی پیاده‌سازی شده است.

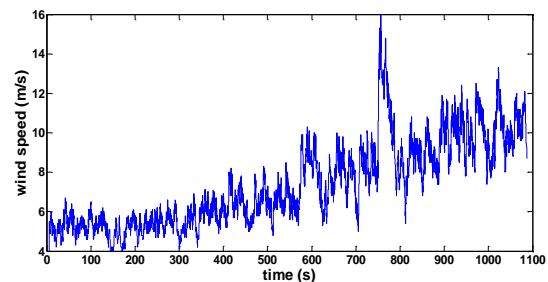


شکل ۲۲- گشتاور اندازه‌گیری شده و گشتاور مرجع MPPT در آزمایش

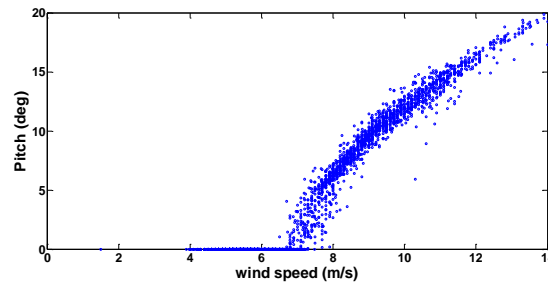
## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، کنترل توربین بادی محور افقی دور متغیر- گام متغیر با ژنراتور سنکرون مورد بررسی قرار گرفت و الگوریتم MPPT با کنترل ولتاژ تحریک ژنراتور سنکرون طراحی و پیاده‌سازی گردید. با استناد بر آزمایش‌های انجام شده، بهره‌گیری از ژنراتور سنکرون با تحریک کنترل شونده در توربین‌های بادی امکان ردیابی گشتاور بهینه و کنترل سرعت دورانی روتور را فراهم می‌آورد. به علاوه استفاده از ژنراتورهای سنکرون با تعداد قطب‌های زیاد و سرعت دورانی نامی برابر روتور در توربین‌های بادی، حذف گیربکس از زنجیره انتقال قدرت را امکان‌پذیر می‌کند. همچنین در این مقاله، عملکرد توربین بادی در سرعت‌های باد بیشتر از نامی با کنترل زاویه گام مورد بررسی قرار گرفت. در آزمایش‌های انجام شده بر روی شبیه‌ساز مشخص گردید با کنترل

پراکنده نمایش داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می‌شود در سرعت‌های باد کمتر از نامی، زاویه گام برابر صفر بوده و با افزایش سرعت باد، زاویه گام افزایش یافته است. در سرعت‌های باد نزدیک به مقدار نامی، شیب این منحنی بیشتر از سایر قسمت‌ها می‌باشد در نتیجه فراجاهش در سرعت دورانی روتور هنگام تغییر سرعت باد اطراف مقدار نامی بیشتر از سایر مواقع می‌باشد.

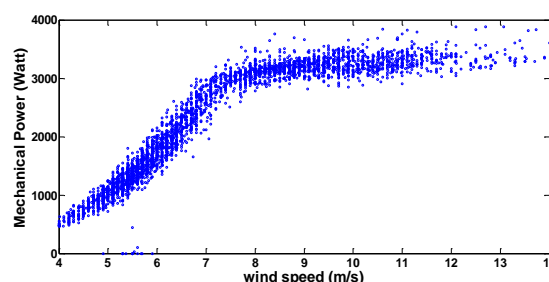


شکل ۱۸- سرعت باد توربولانس اعمال شده در آزمایش



شکل ۱۹- زاویه گام و سرعت باد داده‌های آزمایش

در شکل (۲۰) رابطه بین توان مکانیکی و سرعت باد داده‌های حاصل از آزمایش ترسیم شده است. در این شکل مشاهده می‌شود که توان در ناحیه ۳ این منحنی حدود مقدار نامی ثابت بوده است و این مهم با کنترل زاویه گام میسر گردیده است.



شکل ۲۰- توان مکانیکی و سرعت باد داده‌های آزمایش

در شکل (۲۱) ولتاژ تحریک ژنراتور در سرعت‌های باد مختلف به صورت نقاط پراکنده نمایش داده شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود در سرعت‌های باد بیشتر از نامی، ولتاژ تحریک تقریباً برابر مقدار نامی بوده است. و در سرعت‌های باد کمتر از نامی، ولتاژ تحریک

### تقدیر و تشکر

کلیه مراحل این پژوهش با حمایت مالی و تجهیزاتی پژوهشکده هواخورشید دانشگاه فردوسی مشهد در قالب پروژه توربین‌های بادی کوچک صورت پذیرفته است که بدینوسیله قدردانی می‌شود.

همزمان زاویه گام و ولتاژ تحریک، امکان تنظیم سرعت دورانی روتور و توان تولیدی در مقادیر نامی وجود دارد. چنانچه سیستم‌های کنترل ولتاژ تحریک ژنراتور و کنترل زاویه گام به صورت یک سیستم چند ورودی-چند خروجی (MIMO) تحلیل شود، امکان بهبود عملکرد کنترلرها وجود خواهد داشت.

### مراجع

- [1] J. F. Manwell, J. G. McGowan, A. L. Rogers, "Wind energy explained: theory, design and application". 2nd Edition, John Wiley & Sons Ltd., United Kingdom, 2009.
- [2] L.Y. Pao, K. E. Johnson, "A Tutorial on the Dynamics and Control of Wind Turbines and Wind Farms". American Control Conference, 2009, pp 2076-2089.
- [۳] م. بقائی، ح. شاهرودی، س. م. هاشمی نژاد، "مدل‌سازی آیرودینامیک توربین بادی با سکوی پایه کششی"، مجله مدل‌سازی در مهندسی، سال دهم، شماره ۳۰، ۱۳۹۱، صفحه ۱۷-۱.
- [۴] حاتمی، آ.، معتکف ایمانی، ب. (۱۳۹۵)، "ساختار نوین کنترل توربین بادی با ژنراتور سنکرون با هدف کاهش بارهای برج"، مجله مهندسی مکانیک مدرس، دوره ۱۶، شماره ۱۱، صفحه ۵۳-۴۵.
- [5] A. Hatami, B. M. Imani, "Innovative adaptive pitch control for small wind turbine fatigue load reduction". Mechatronics, Vol. 40, No. 6, 2016, pp. 137-145.
- [6] K. E. Johnson, L. Fingersh, M. Balas, L. Pao, "Methods for increasing region 2 power capture on a variable speed wind turbine". J. Solar Energy Eng., Vol. 126, No. 4, 2004, pp. 1092-1100.
- [7] N. Horiuchi, T. Kawahito, "Torque and Power Limitations of Variable Speed Wind Turbines Using Pitch Control and Generator Power Control". Power Engineering Society Summer Meeting, Vol. 1, 2001, pp 638-643.
- [8] K. E. Johnson, L.Y. Pao, M. J. Balas, L. J. Fingersh, "Control of variable-speed wind turbines: standard and adaptive techniques for maximizing energy capture". IEEE Control Systems Magazine, Vol. 26, No. 3, 2006, pp. 70-81.
- [9] M. Rasila, "Torque- and Speed Control of a Pitch Regulated Wind Turbine". M.Sc. Thesis, Chalmers University of Technology, 2003.
- [10] S. Heier, R. Waddington, "Grid integration of wind energy conversion systems". 2nd edition, John Wiley & Sons Ltd., United Kingdom, 2006.
- [11] R. Garcia-Hernandez, R. Garduno-Ramirez, "Modeling a Wind Turbine Synchronous Generator". International Journal of Energy and Power (IJEP), Vol. 2, No. 3, 2013, pp 64-71.
- [12] E. Hau, "Wind Turbines: fundamentals, technologies, application, economics". 2nd edition, Springer, 2006.
- [13] K. E. Johnson, "Adaptive Torque Control of Variable Speed Wind Turbines". NREL/TP-500-36265, Colorado, USA, 2004.
- [14] F. Abbas, M. Abdulsada, "Simulation of Wind-Turbine Speed Control by MATLAB". International Journal of Computer and Electrical Engineering, Vol. 2, No. 5, 2010, pp. 1793-8163.

- [15] P. Krause, O. Wasynczuk, S. Sudhoff, S. Pekarek, "Introduction to the Design of Electric Machinery, in Analysis of Electric Machinery and Drive Systems". Third Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA, 2013.
- [16] M. Barakati, "Modeling and Controller Design of a Wind Energy Conversion System Including a Matrix Converter". Ph.D. Thesis, University of Waterloo, 2008.