

## طراحی سیستم زاویه گام در یک توربین بادی

- مصطفی سیدموسوی: دانشجوی کارشناسی ارشد رشته مهندسی برق-کنترل دانشگاه فردوسی مشهد
- سید کمال حسینی ثانی: استادیار گروه برق دانشگاه فردوسی مشهد

همراه با رشد و پیشرفت‌های صنعتی در جوامع، نیاز به انرژی افزایش یافته است. روش‌های مختلفی جهت تولید الکتریسیته از منابع تجدیدپذیر که به محیط زیست نیز آسیب نمی‌رسانند وجود دارد که یکی از آنها توربین بادی است. بخصوص در کشورمان که در بسیاری از مناطق به طور بالقوه امکان استفاده از این انرژی وجود دارد، مطالعات زیادی پیرامون این موضوع انجام گشته است. در تحقیقات مختلف نشان داده شده که میزان انرژی دریافتی از یک سیستم بادی و کیفیت آن، علاوه بر مشخصات اقلیمی منطقه، به استراتژی کنترل نیز مربوط می‌شود. کنترلر زاویه گام برای تنظیم توان خروجی در سرعت فراتر از سرعت نامی طراحی می‌شود. در این مقاله به منظور کاهش بالازدگی در سیگنال سرعت چرخش روتور و حفظ پایداری سیستم، بر اساس سیگنال سرعت چرخش روتور و تغییرات آن و همچنین یک جدول تنظیم ضرایب، اقدام به یک طراحی جدید جهت کنترل زاویه گام شده است. سپس پایداری و عملکرد چنین روشی طی شبیه‌سازی در نرم افزار MATLAB بررسی گشته است.

**واژگان کلیدی:** توربین بادی، زاویه گام، پایداری، جدول تنظیم بهره

## ۱. مقدمه

انرژی‌های تجدیدپذیر روز به روز سهم بیشتری در سیستم تأمین انرژی داشته‌اند بطوریکه تا انتهای سال ۲۰۱۰ انرژی‌های تجدیدپذیر ۳٫۸ درصد در تولید الکتریسیته جهان سهم داشته‌اند و هم‌اکنون انرژی‌های تجدیدپذیر بیش از ۱۹ درصد از انرژی اولیه جهان تأمین می‌نمایند و این ظرفیت سالانه چیزی حدود ۳۰ درصد افزایش نشان می‌دهد [۱]. در این میان انرژی بادی سهم عمده‌ای میان منابع تجدیدپذیر تولید انرژی دارد. نقطه ضعف اصلی این منبع انرژی نامنظم بودن وقوع باد است. توربین بادی در سرعت ثابت یا متغیر ژنراتور عمل می‌کند. توربین‌های سرعت ثابت ژنراتور اغلب در مراحل ابتدایی توسعه انرژی بادی به کار رفته‌اند. اساساً توربین‌های سرعت متغیر برای تعقیب تغییرات سرعت باد، جهت حداکثر کردن کارایی طراحی می‌شوند. در سالهای اخیر به خاطر رشد الکترونیک قدرت و کاهش هزینه‌های آن اکثر تولیدکنندگان عمده توربین بادی، در حال ساخت توربین‌های مگاواتی با ژنراتور سرعت متغیر، همراه با کنترل زاویه گام با یکی از تکنولوژی‌های PMSG یا DFIG هستند. گروه PMSG یا ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم، به دلیل اندازه کوچکتر، توان تولیدی بیشتر و اتلاف کمتر نسبت به گروه DFIG، و نیز همراه با پیشرفت تکنولوژی الکترونیک قدرت در حال افزایش سهم خود در بازار هستند. دیگر مزایای این دسته از توربین‌های بادی شامل ساختار بدون چرخ دنده، حذف سیستم تحریک DC، کنترل پذیری کامل سیستم در استخراج حداکثر توان و ارتباط با شبکه است [۲]. کنترل زاویه گام بیشتر با هدف حفظ پایداری سیستم و پرهیز از تکرر خاموش شدن‌های ضروری به کار می‌رود. روش‌های مختلفی برای کنترل زاویه گام توربین ارائه شده است که از ساده‌ترین و قدیمی‌ترین روش‌ها می‌توان به روش پس‌گام<sup>۱</sup> و روش پیشخور اشاره نمود. این روش‌ها که در دهه ۱۹۹۰ ارائه شده‌اند، اثر تغییر پارامترها را در طراحی در نظر نمی‌گیرند. سپس روش‌های کلاسیک کنترل PI مطرح گشتند که معمولاً به مدل دقیق ریاضی نیازمند بودند [۳]. سپس کنترلر پیش‌بین معمولاً مستقل از نوع ژنراتور توانستند توان خروجی را هم‌سطح‌سازی<sup>۲</sup> کنند [۴]. روش‌های فازی و هوشمند نیز معمولاً بدون داشتن مدل دقیقی از سیستم و با نظر کارشناس، توانسته‌اند که کنترل زاویه گام را انجام دهند، اما در این روش‌ها تغییرات زاویه گام کند است و مقداری اتلاف توان داریم [۵]. کنترلر مقاوم یا ریاست نیز در مقابله با عدم قطعیت‌ها پاسخ خوبی می‌دهد اما نیاز به اندازه‌گیری دقیق سرعت باد وجود دارد که پرهزینه است [۶]. روش‌های تطبیقی نیز با دریافت بیشتر اطلاعات آیرودینامیکی پره، توانسته‌اند پاسخ‌دهی مناسبی به عدم قطعیت‌ها از خود نشان دهند [۷]. در این مقاله برای یک توربین بادی ۲٫۵ کیلوواتی، روشی نوین جهت کنترل زاویه گام ارائه شده است، بر این اساس که علاوه بر استفاده از یک کنترلر PI در حلقه سرعت ژنراتور، از سیگنال تغییرات سرعت و یک جدول تنظیم بهره که به صورت تجربی و طی شبیه‌سازی‌های متعدد تنظیم گشته، استفاده می‌شود تا بدین ترتیب از عملکرد مطلوب توربین در سرعت‌های باد بالا و یا تغییرات سریع سرعت باد اطمینان حاصل شود.

<sup>1</sup> Back Stepping

<sup>2</sup> Output Power Leveling

## ۲. شرح سیستم

در یک سیستم بادی توان موجود ناشی از انرژی باد به صورت رابطه ی زیر به دست می آید:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1)$$

در این رابطه  $\rho$  چگالی هوا،  $A$  سطح جاروب پره های توربین و  $v$  سرعت باد می باشد. اما توان آیرودینامیکی روتور از طریق یک ضریب توان،  $C_p$ ، بصورت رابطه ی زیر با توان باد مرتبط می شود:

$$P = C_p P_{wind} \quad (2)$$

$C_p$  ضریبتوان در یافتیتوربین است که به زاویه گام ( $\beta$ ) و نسبت سرعت  $\lambda$  ( $\lambda$ )، وابسته است.  $\lambda$  یا نسبت سرعت توسط رابطه ی ۳-۳ محاسبه می شود.

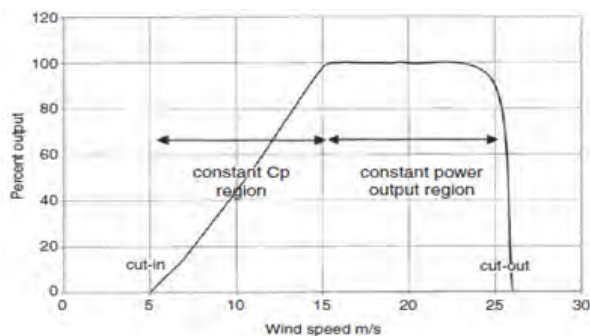
$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (3)$$

$R$ ، شعاع پره های توربین بر حسب متر ( $m$ ) و  $\omega$ ، سرعت دورانی روتور بر حسب  $Rad/s$  است. سرعت باد نیز بر حسب  $m/s$  می باشد. بر این اساس رابطه ی نهایی توان آیرودینامیکی مطابق رابطه (۴) خواهد بود که چنانچه مشخص است به شرایط جوی نظیر سرعت باد و چگالی هوا، مشخصه های ساخت پره ها و ضریب توان بستگی دارد.

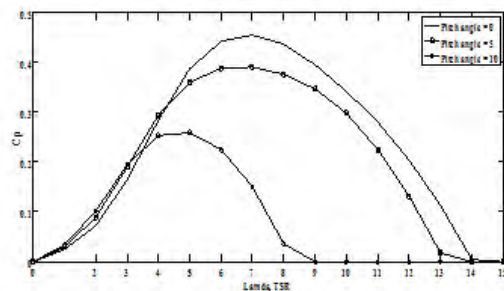
$$P = \frac{1}{2} \rho A C_p(\beta, \lambda) v^3 \quad (4)$$

منحنی ضریب توان در هر توربین بادی مطابق تست های آیرودینامیکی آن به صورت تابعی با  $\lambda$  ورودی و یک خروجی بدست می آید که نمونه ای از ترسیم های منحنی ضریب توان در شکل (۱) آورده شده است. این اطلاعات معمولاً در مورد هر توربین بادی به طور دقیق در جدول هایی موجود است و یا بصورت منحنی هایی نظیر شکل ۱ نمایش داده می شود. از آنجا که توان توربین متناسب با ضریب توان یا  $C_p(\beta, \lambda)$  است، به صورت ایده آل، توربین بایستی در پیک سطح مشخص شده کار کند. زاویه گام پره ها یک متغیر قابل کنترل است، به همین ترتیب نسبت سرعت نیز به صورت غیرمستقیم و توسط کنترل گشتاور ژنراتور کنترل می شود. منحنی  $C_p$  ممکن است در اثر یخ زدگی یا فرسودگی پره ها دستخوش تغییر بشود.

<sup>3</sup>TSR, tip-speed ratio, نسبت سرعت خطی تیغه ها در نوک آنها به سرعت حقیقی باد



شکل (۲): نواحی کنترلی توان سیستم



شکل (۱): نمونه‌ای از منحنی ضریب توان برای یک نمونه توربین بادی

هر توربین سه ناحیه کار عمده دارد و مطابق این ناحیه های کار، نواحی کنترلی توان سیستم استراتژی های کنترلی مربوط به آن ها تعریف می شوند. این سه ناحیه در شکل (۲) نشان داده شده اند. ناحیه یک زمانی است که سرعت باد هنوز به حد کافی بزرگ نیست که امکان راه اندازی توربین وجود داشته باشد. هنگامیکه سرعت باد از مقدار Cut in افزایش می یابد وارد ناحیه دو خواهیم شد و توربین شروع به کار می کند. با افزایش سرعت باد، توان تراتور افزایش می یابد تا به مقدار نامی خود برسد و پس از آن در ناحیه سه با افزایش سرعت باد توان تراتور ثابت باقی می ماند. چنانچه سرعت از مقدار Cut out تجاوز کند بر ایحفظ ایمنی توربین متوقف می - شود. بهای نتر تبیدر ناحیه دو (بین سرعت راه اندازی یا Cut in و سرعت نامی) - جهت کنترل توربین های باد یسعی می شود سرعت تور و تور و او بهیچشپره ها به گونه - اینتنظیم گردد تا Cp در مقدار ماکزیمم ثابت شود و حداکثر توان از توربین دریافت گردد.

۳ در ناحیه با افزایش سرعت تور، دستیابی به توانهای بالاتر، تا حد توان نامی، میسر می شود. کهرسرتعباد به اندازه کافی بزرگ است، تلاشی شود با اعمال زاویه گام مناسب، ضمن حفظ توان خروجی، از افزایش سرعت تور و از حد نامی آن، جلوگیری بعمل آید. امروزه برخی سازندگان برای هدف حفظ پایداری در سرعت های بیش از مقدار نامی، اعمال زاویه گام را کمی تسریع کرده اند. در این صورت زمانی که توربین در ۸۰ تا ۱۰۰ درصد مقدار دور روتور نامی اش باشد، ناحیه دو و نیم نامیده می شود. در حقیقت ناحیه دو و نیم قسمتی از ناحیه ۲ است که به ناحیه ۳ منتهی می شود.

زاویه گام برابر میزان چرخش پره های توربین حول محور خودشان است. در ناحیه دو توربین بادی زمانی که سرعت باد کمتر از سرعت نامی باشد زاویه گام باید در مقدار صفر تنظیم شود تا دچار افت توان نشویم، مگر اینکه طبق فرمان کنترل کننده مرکزی نیروگاه، نیاز به حصول حداکثر توان نباشد که در این صورت با اعمال زاویه گام باعث افت توان شده و رسیدن آن به میزان مطلوب امکان پذیر است. ضمن افزایش سرعت باد بیش از سرعت نامی، سرعت چرخش روتور نیز افزایش یافته و از مقدار نامی اش فراتر می رود. در این صورت در ناحیه سه قرار داریم و چنانچه گفته شد بایستی کنترلر زاویه گام وارد عمل شود تا مانع از افزایش سرعت دوران روتور از حد مجاز آن شود. تغییرات زاویه گام اثر زیادی بر توان خروجی توربین و سرعت چرخش روتور دارد. به طور خلاصه اصلی ترین دلایل استفاده از کنترل زاویه گام عبارتست از:

- جلوگیری از تجاوز متغیرهای سیستم از حدود تعیین شده

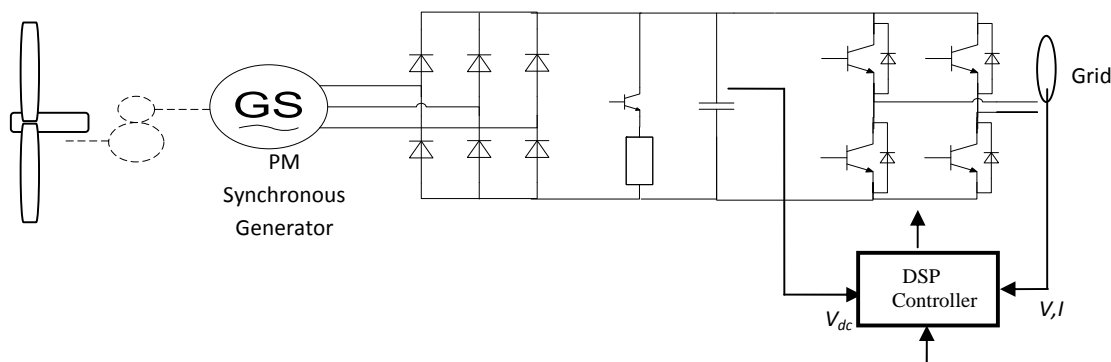
- بهینه نمودن توان خروجی توربین
- کمینه نمودن اثر بار بر اجزاء مکانیکی توربین

کنترل زاویه گام پره‌های توربین از دیدگاه تنظیم یا محدود نمودن توان توربین و سرعت روتور به خصوص در سرعت‌های بالای باد حائز اهمیت است. نرخ تغییرات زاویه گام پره براساس سرعت دوران، بسته به اندازه ی پره ها، در حدود ۵ تا ۱۰ درجه برثانیه و یا بیشتر است.

در این مقاله سیستم مورد مطالعه یک توربین ۲,۵ کیلووات از نوع سرعت متغیر PMSG بوده و مطابق شکل (۳) از سه مجموعه اصلی توربین، ژنراتور و کانورتر AC/AC تشکیل شده‌است. انرژی دریافتی از سرعت باد توسط توربین بادی بوسیله ژنراتور به انرژی الکتریکی تبدیل، و توسط اینورتر با شکل مناسبی به شبکه تزریق می‌گردد.

### ۳. استراتژی کنترل زاویه گام و شبیه‌سازی

ابتدا یکی از روش‌های کلاسیک کنترل زاویه گام را برای سیستم موجود شرح و بسط می‌دهیم. تنها سیگنال معتبری که می‌توان بر اساس آن طراحی را انجام داد، سرعت چرخش روتور است، زیرا اندازه‌گیری سرعت باد به صورت دقیق بسیار هزینه‌بر است. همچنین استفاده از سیگنال توان نیز همواره در کنار سیگنال سرعت روتور و به منظور بهبود عملکرد در



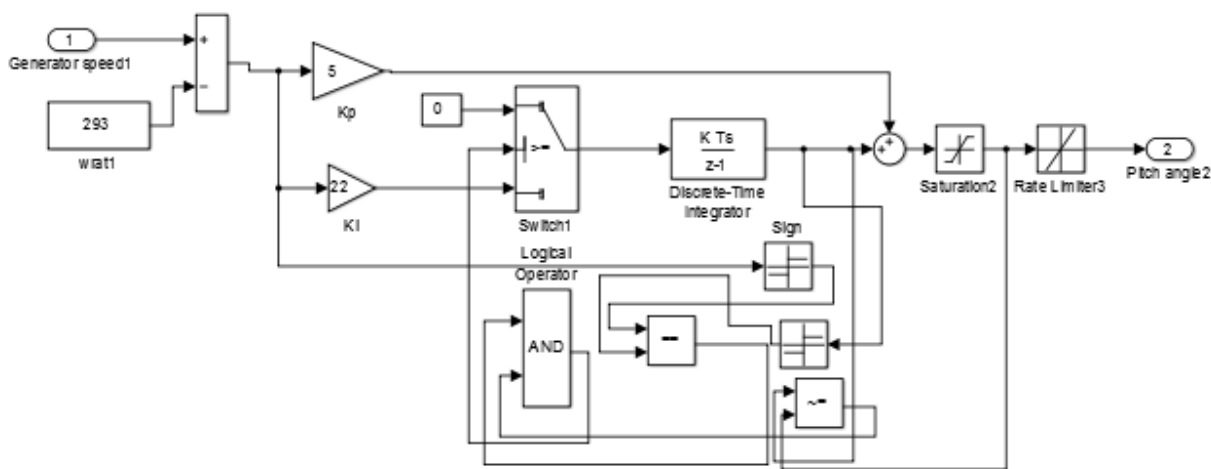
شکل (۳): مجموعه‌ی توربین، ژنراتور و کانورتر در ارتباط با شبکه

برابر تغییرات شدید سرعت باد توصیه شده است. با توجه به اینکه مقدار زاویه گام تنها مقادیر مثبت دارد، یک کنترلر PI برای سرعت روتور فراتر از مقدار نامی‌اش لحاظ می‌شود. همچنین در این طراحی میزان اشباع برای سیگنال کنترل (زاویه گام) ۲۵ درجه، و حداکثر نرخ تغییرات برای چرخش پره ها ۱۰ درجه بر ثانیه لحاظ شده است. مقدار اشباع با توجه به میزان امکان چرخش پره ها و حداکثر نرخ تغییرات چرخش پره ها با توجه به مشخصات فیزیکی آن‌ها نظیر اندازه و وزنشان تعیین می‌شود. برای مثال در توربین‌های بزرگتر، حداکثر نرخ تغییرات چرخش روتور، مقدار کوچکتري

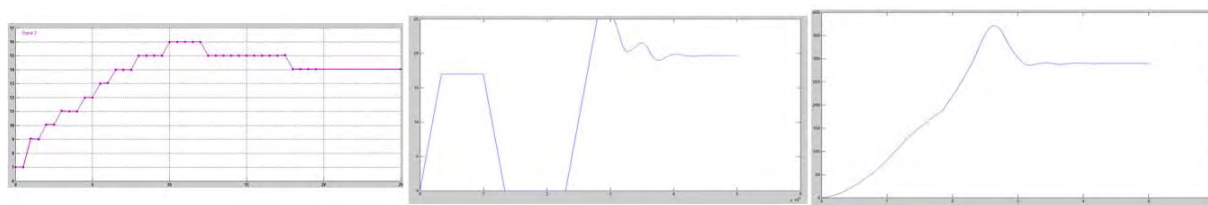
است. روند تنظیم گین‌های PI به ترتیب زیر است. لازم به ذکر است که این روند برای چند نمونه سیگنال باد اجرا شده است، حدود گین‌ها مشخص شده و در نهایت میانگین این مقادیر برای گین‌های PI لحاظ گشته است.

ابتدا گین انتگرال‌گیر را برابر صفر قرار داده و سپس گین تناسبی را طی چند مرحله افزایش داده‌ایم و ضمن شبیه‌سازی هر مرحله، مقداری از  $k_p$  را که برای آن، سیگنال زاویه گام نوسانی می‌گشت را بدست آوردیم. سپس نصف این مقدار را برای  $k_p$  در نظر می‌گیریم. در ادامه شروع به افزایش مقدار  $k_i$  کرده و در هر مرحله ضمن اجرای شبیه‌سازی مقدار  $k_i$  که بازای آن خروجی نوسانی خواهد شد را یادداشت کرده و  $1/3$  آن را برای گین  $k_i$  در نظر می‌گیریم. همچنین بر

انتگرال‌گیر، یک بلوک ضد اشباع نیز وضع شده است، شکل (۴). چنین کنترلی می‌تواند سرعت را روی مقدار نامی‌اش تنظیم کند ولی پاسخ گذرای نامناسب، یعنی بالازدگی شدید، باعث می‌شود سیستم فراتر از قید سرعت روتور خود یعنی ۲۵۰ دور بر دقیقه برسد، شکل (۵). چنین وضعیتی در سیستم کنترلرهای محافظتی را تحریک می‌کند و سیستم بادی خاموش می‌شود. این شرایط باعث می‌شود اغلب در کارکرد منظم سیستم اخلاص پیش آید و راه‌اندازی‌های مداوم نیز عملاً امکان‌پذیر نمی‌باشد. لازم به ذکر است، افزایش زاویه گام در لحظات اول برای کمک به راه‌اندازی سیستم بادی است.



شکل (۴): کنترلر PI بر روی سیگنال سرعت روتور

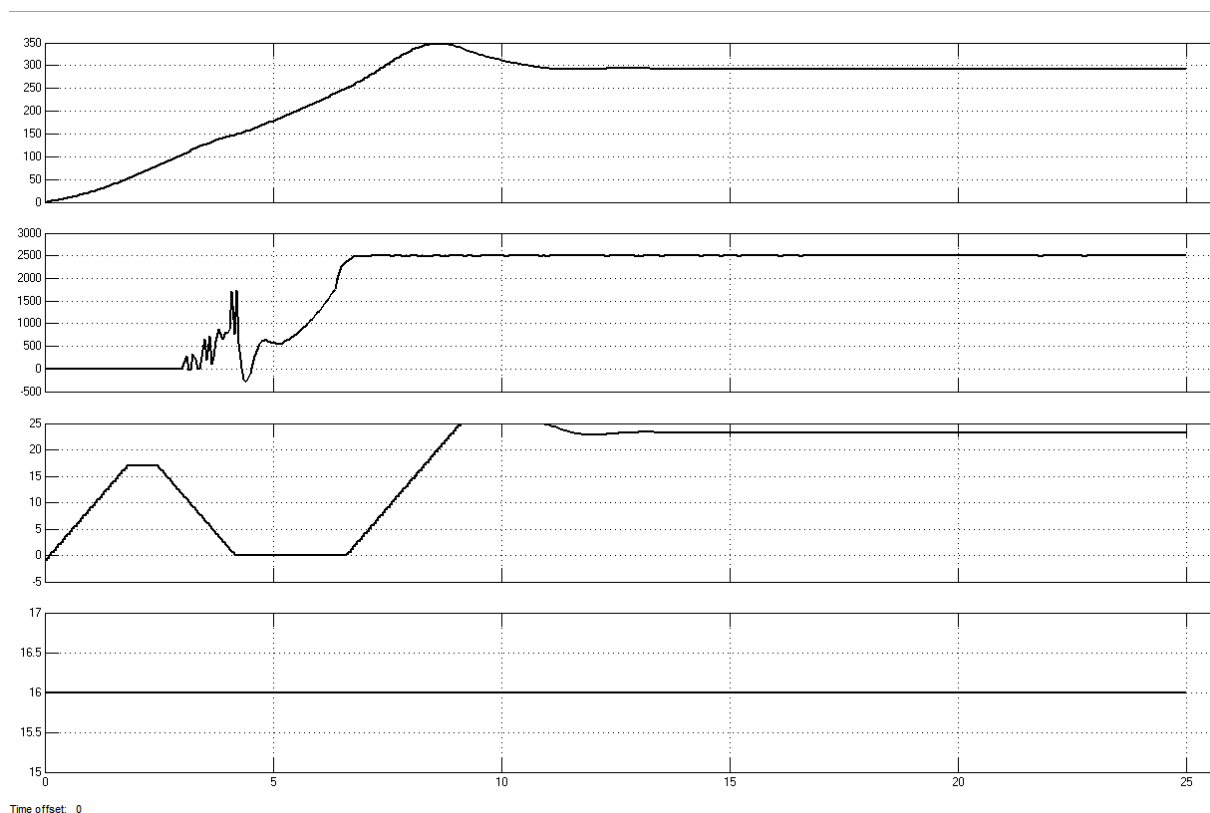


شکل (۵): طراحی کنترلر PI زاویه گام به ترتیب از چپ به راست، نمودارهای سرعت باد، زاویه گام و سرعت روتور

زاویه گام در این روش از زمانی که به رفرنس سرعت رسیده‌ایم، با حداکثر نرخ ممکن افزایش یافته، اما باز هم قیود سیستم رعایت نشده‌اند. بنابراین در این مسأله تسریع اعمال زاویه گام در ناحیه ۲,۵ به منظور حفظ پایداری سیستم، اجتناب‌ناپذیر است. چنین رویکردی چنانچه توضیح داده شد همواره با اتلاف توان همراه خواهد بود، زیرا با چرخش پره‌ها قبل از سرعت نامی، حداکثر انرژی موجود جذب نمی‌شود. بنابراین در این روش به دنبال این هستیم که آغاز کنترل در ناحیه ۲,۵ به نحوی باشد که تا حد ممکن توان از دست ندهیم.

در روش ارائه شده در این مقاله برای کنترل در ناحیه ۲,۵ از سیگنال تغییرات سرعت روتور، یا شتاب روتور و یک جدول تنظیم ضرایب استفاده شده است. به این ترتیب کنترل زاویه گام در دو ناحیه صورت می‌پذیرد. در ناحیه ۲,۵ تنها عامل کنترلی شتاب روتور است و در ناحیه سه خروجی این قسمت با خروجی کنترلر PI روش فعلی جمع می‌گردد. برای داشتن سیگنال کنترل در رنج دلخواه و همراه با تغییرات ملایم لازم است در هر دو مسیر و همچنین پس از جمع‌کننده، بلوک اشباع و بلوک محدودکننده نرخ تغییرات قرار دهیم. چنانچه سرعت روتور از ۲۵۰ دور بر ثانیه بیشتر شود وارد ناحیه ۲,۵ می‌شویم. در این ناحیه طبق جدول بهره، با توجه به میزان افزایش سرعت روتور، یک سیگنال کنترلی تولید می‌شود. این جدول بهره با شبیه‌سازی‌های متعدد، بازای سیگنال‌های متفاوت سرعت باد، تنظیم گشته است. استفاده از جدول ضرایب اطمینان می‌دهد در مواردی که نرخ تغییرات سرعت روتور زیاد است، قبل از ورود به ناحیه سه، مقداری زاویه گام ایجاد شده باشد، در نتیجه کنترلر می‌تواند واکنش سریعتری برای کنترل سرعت و یا پایداری داشته باشد. به علاوه، این جدول به نحوی تنظیم گشته است که زمانی که نرخ تغییرات سرعت روتور کم باشد، یعنی سرعت باد کم باشد، سیگنال کنترلی کوچکی تولید کند و یا اینکه اصلاً هیچ سیگنالی تولید نکند، زیرا در این موارد کنترلر PI مشکلی برای تنظیم سرعت روتور و حفظ پایداری ندارد. بنابراین در بسیاری از موارد در ناحیه ۲,۵ هیچ سیگنال کنترلی تولید نمی‌شود و بنابراین بیشترین توان خروجی قابل دریافت است. لازم به ذکر است که برای این سیستم، انتخاب سرعت ۲۵۰ دور در دقیقه برای آغاز ناحیه دو و نیم جهت عملکرد موفق کنترلر در بدترین حالت ممکن<sup>۴</sup>، صورت گرفته است، شکل (۶).

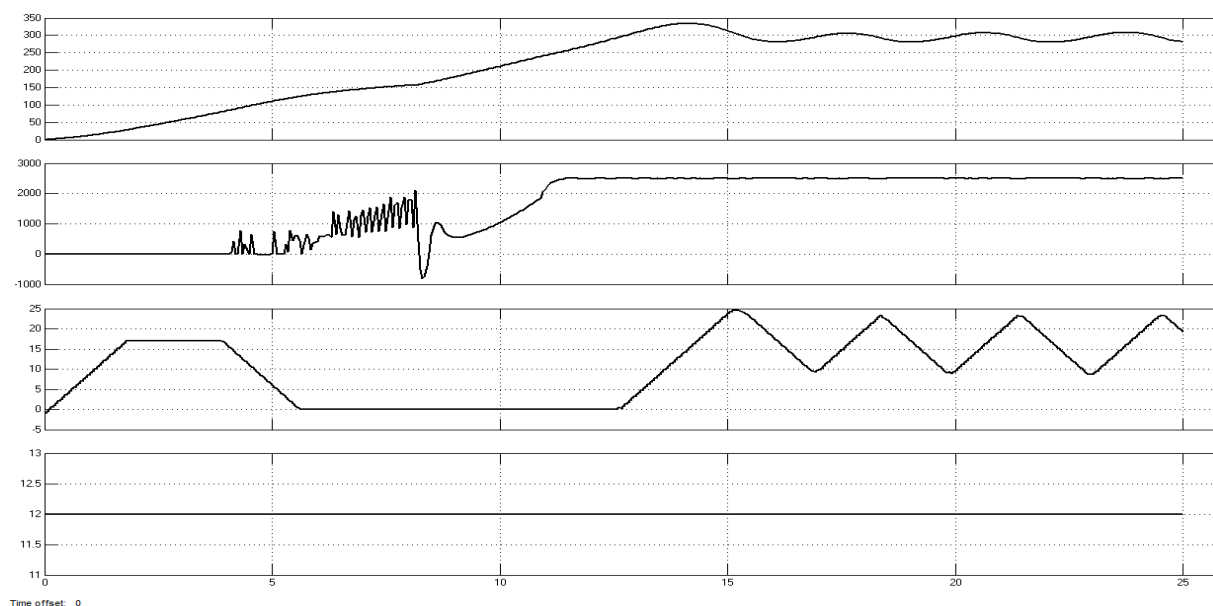
<sup>4</sup>Worst case scenario



شکل (۶): بررسی بدترین حالت ممکن برای حفظ پایداری، آغاز ناحیه ۲,۵ در سرعت ۲۵۰ دور بر ثانیه، نمودار ها از بالا به پایین به ترتیب سرعت روتور، توان خروجی، زاویه گام و سرعت باد می باشند.

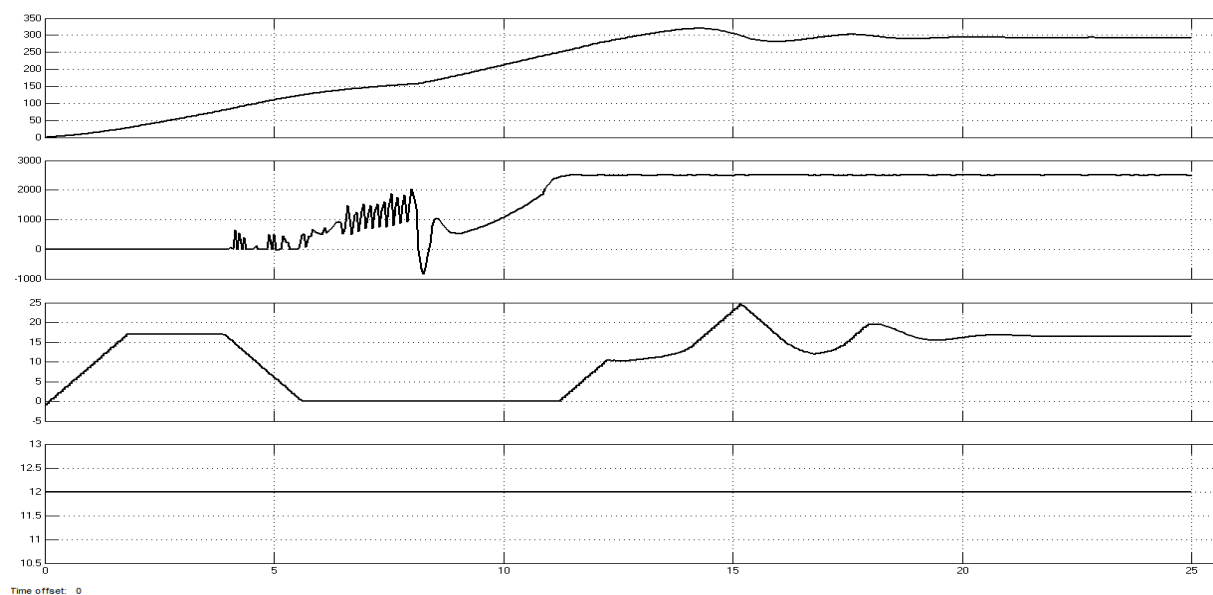
این توربین بادی بایستی هنگام وقوع باد با سرعت بیش از ۱۶ متر بر ثانیه متوقف شود. در شکل (۶) مشخص است که برای این باد شدید، سرعت روتور تا ۳۴۸ دور بر دقیقه رسیده است و که در محدوده مجاز و زیر ۳۵۰ دور بر دقیقه است. در رابطه با نحوه تکمیل جدول، به عنوان مثال برای باد ۱۲ متر بر ثانیه، در کنترلر PI زاویه گام، خروجی های مطابق شکل (۷) را داریم. در شکل مشخص است که زاویه گام تا ۲۵ درجه افزایش خواهد داشت و سرعت نیز تا ۳۳۴ دور بر دقیقه می رسد. اما از وقتی که سرعت از ۲۵۰ به سرعت نامی برسد، حدود ۱,۴ ثانیه طول خواهد کشید که با توجه به حداکثر نرخ تغییرات زاویه گام، در این زمان می توان حداقل ۱۴ درجه زاوی گام اعمال کرد. شیب سرعت روتور نیز ۳۰ rpm در ثانیه است. بنابراین در جدول ضرایب، برای ورودی ۳۰، یعنی شیب ۳۰ rpm بر ثانیه، خروجی ۱۴ قرار می-دهیم. این تست به طور منظم برای بادهایی با سرعت های بین ۸ و ۱۶ انجام داده ایم و جدول پر کرده ایم.





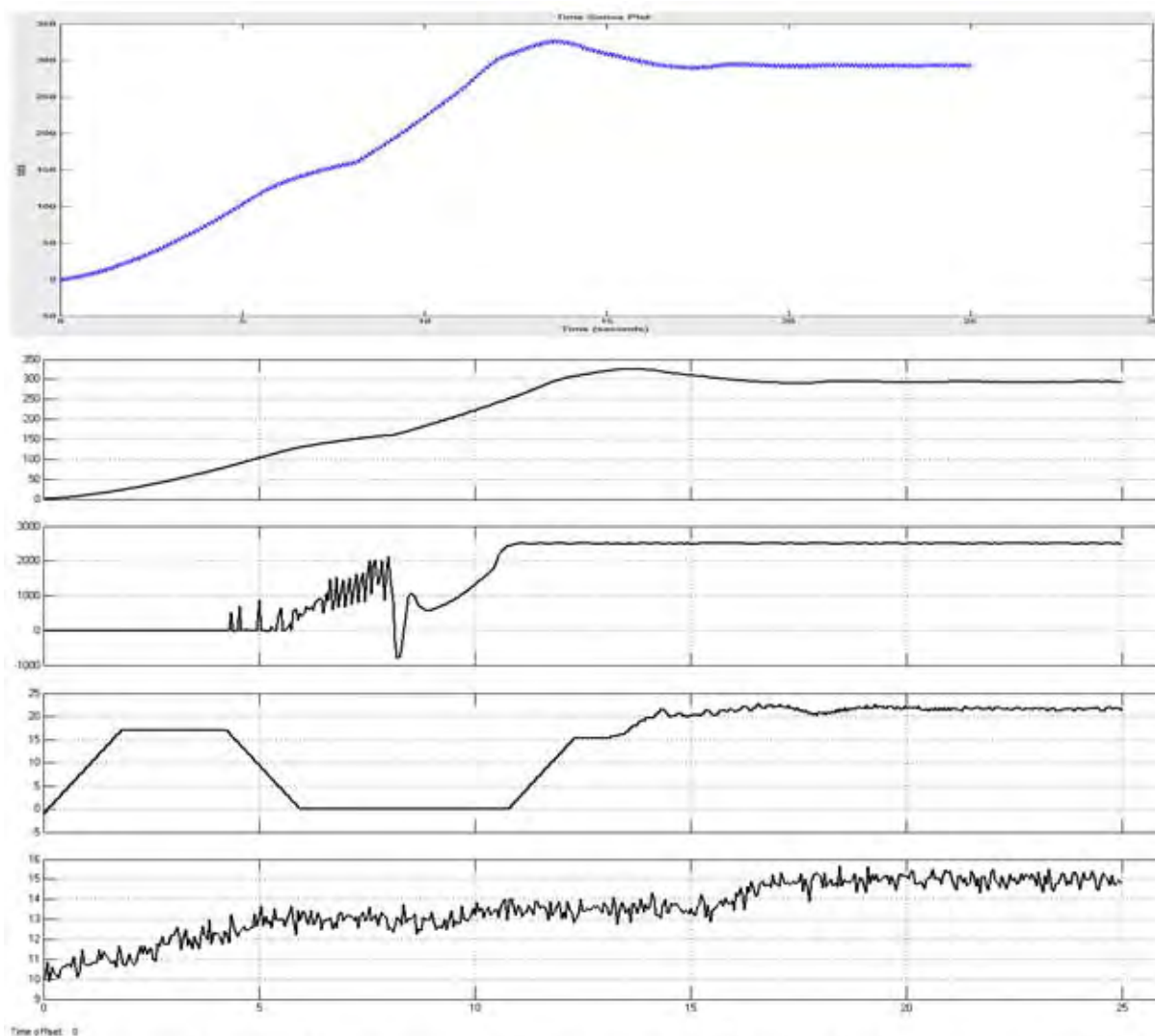
شکل (۷)، کنترلر PI زاویه گام برای باد ۱۲ متر بر ثانیه، نمودارها از بالا به پایین به ترتیب سرعت روتور، توان خروجی، زاویه گام و سرعت باد می باشند.

حال شبیه سازی را برای زاویه گام طراحی شده نهایی، با همین سرعت باد انجام می دهیم، شکل (۸). در این حالت مشاهده می کنیم توان خروجی تغییر چندانی نداشته است، در عین حال سرعت روتور بسیار سریع به مقدار ماندگارش می رسد. همچنین سیگنال کنترل، یعنی زاویه گام نیز نوسانات کمتر و نرم تری دارد. این موضوع باعث می شود تا فشار کمتری به موتور تنظیم زاویه گام بیاید و عمر آن افزایش یابد.



شکل (۸)، کنترلر نهایی زاویه گام برای باد ۱۲ متر بر ثانیه، نمودارها از بالا به پایین به ترتیب سرعت روتور، توان خروجی، زاویه گام و سرعت باد می باشند.

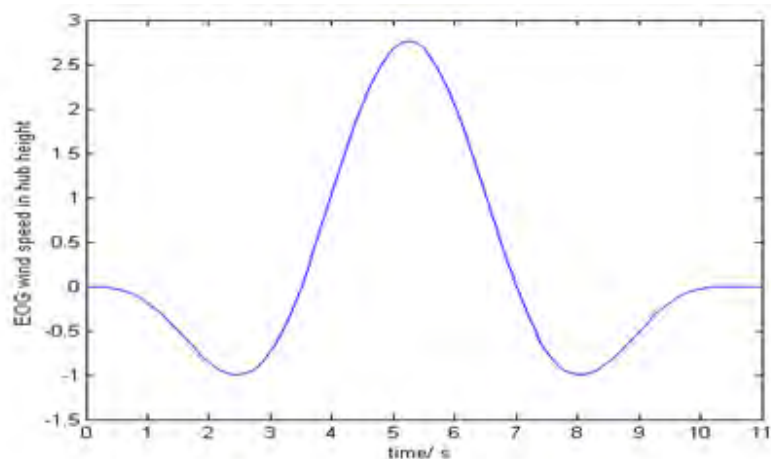
در ادامه یک موج سینوسی با سیگنال سرعت روتور جمع کرده و سپس آن را به کنترلر اعمال می کنیم، تا به نوعی نویز اندازه گیری را لحاظ کنیم. در این حالت نیز مطابق شکل (۹)، در عملکرد کنترلر اخلاقی بوجود نیامده است:



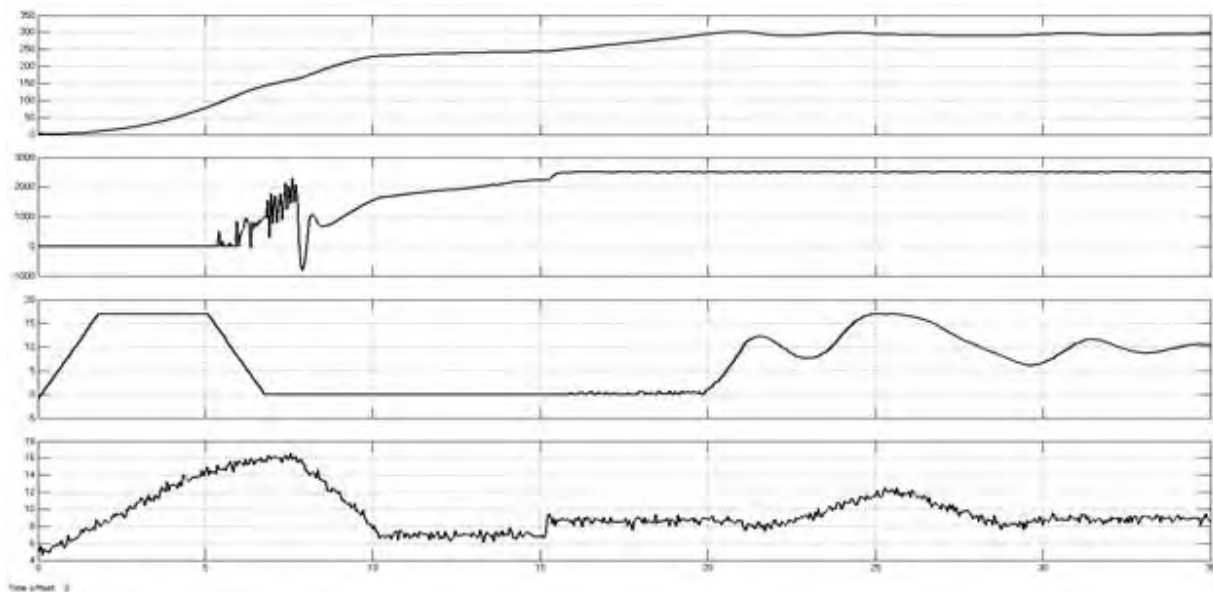
شکل (۹)، وضعیت سرعت روتور، توان و زاویه گام در باد نویزی ۱۳.۵ به ۱۵، نمودارها از بالا به پایین به ترتیب سرعت روتور اندازه گیری شده یا ورودی کنترلر زاویه گام، سرعت روتور واقعی، توان خروجی، زاویه گام و سرعت باد می باشند.

آخرین وضعیتی که در شبیه سازی بررسی می شود، مربوط به پروفایل باد بسیار شدید یا گاست است که به مشخصات منطقه بستگی دارد. مشخصه اصلی این باد این است که ابتدا مقداری از شدت باد کم می شود، سپس یک افزایش و کاهش پیاپی و سریع دارد و بعد مجدداً کمی افزایش می یابد. چنین مشخصه ای باعث می شود که معمولاً زاویه گام

نتواند عکس العمل مناسبی نشان دهد. این پروفایل باد در ارتفاع ۳۰ متری سایت بینالود به صورت شکل (۱۰) ثبت شده است. در شکل (۱۱) نیز واکنش سیستم کنترل به این باد بررسی شده است.



شکل (۱۰): باد کاری extreme در ارتفاع ۳۰ متری بینالود



شکل (۱۱): وضعیت سرعت روتور، توان و زاویه گام در باد نویزی همراه با گاست، در سرعت ۹ متر بر ثانیه، نمودارها از بالا به پایین به ترتیب سرعت روتور، توان خروجی، زاویه گام و سرعت باد می باشند.

۴. نتیجه گیری

در این مقاله با ارائه روشی با تسریع در ایجاد زاویه گام، ضمن حفظ پایداری سیستم بادی، از اتلاف توان نیز جلوگیری به عمل آمده است. چنین روشی در واکنش به پروفایل‌های مختلف باد و نویز اندازه‌گیری موفق به کنترل سیستم تحت قیود آن شده است.

#### منابع و مراجع

- [۱] حمید چیت‌چیان، روند توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، انتشارات آریانا قلم، ۱۳۹۲
- [2] Shuhui Li, Timothy A. Haskew, Richard P. Swatloski, and William Gathings, "Optimal and Direct-Current Vector Control of Direct-Driven PMSG Wind Turbines," *IEEE Trans. power electronics*, vol. 27, no. 5, May 2012.
- [3] Jianzhong Zhang, Ming Cheng, Zhe Chen, Xiaofan Fu, "Pitch Angle Control for Variable Speed Wind Turbines" 6-9 April 2008 Nanjing China
- [4] Tomonobu Senjyu, Ryosei Sakamoto, Naomitsu Urasaki, Toshihisa Funabashi, Hideki Fujita and Hideomi Sekine, "Output Power Leveling of Wind Turbine Generator for All Operating Regions by Pitch Angle Control", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 21, No. 2, June 2006, Pages 467-475.
- [5] C. Veeramani, G. Mohan, "A fuzzy based pitch angle control for variable speed wind turbines", *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*, Vol. 5 No. 2 Apr-May 2013.
- [6] Hua Geng and Geng Yang, "Output Power Control for Variable-Speed Variable-Pitch Wind Generation Systems", *IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION*, VOL. 25, NO. 2, JUNE 2010.
- [7] Morten H. Hansen, Anca Hansen, Torben J. Larsen, Stig Øye, Poul Sørensen and Peter Fuglsang, "Control design for a pitch-regulated, variable speed wind turbine", *Risø-R-1500(EN)*
- [8]: A. G. Abo-Khalil, D. Lee, J. Seok, Variable speed wind power generation system based on fuzzy logic control for maximum output power tracking, *35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Aachen, Germany, 2004
- [9] T. Senjyu, R. Sakamoto, N. Urasaki, T. Funabashi, H. Fujita, and H. Sekine, "Output power leveling of wind turbine generator for all operating regions by pitch angle control," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 21, no. 2, pp. 467-475, Jun. 2006.
- [10] Florin Iov, Uffe Jakobsen, "Sensorless vector control of PMSG for wind turbine applications" Master Thesis, Institute of Energy Technology, Aalborg University, 03rd June 2009

- [11] HuaGeng, Geng Yang, Dewei (David) Xu and Bin Wu, " Unified Power Control for PMSG-Based WECS Operating Under Different Grid Conditions," IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, VOL. 26, NO. 3, SEPTEMBER 2011
- [12] [Online]. Available: <http://www.thewindpower.net/>