

## بهره‌گیری از کنترل فعال پدیده قطع به عنوان استراتژی کنترل دینامیکی توربین بادی متصل به شبکه

محمد منفرد - حسن رستگار

دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی امیرکبیر (قطب علمی قدرت ایران)  
جمهوری اسلامی ایران

واژه‌های کلیدی: توربین بادی، کنترل دینامیکی، پدیده قطع، جدول جستجو، کنترلر PI

### چکیده

در این مقاله، روش کنترل فعال پدیده قطع، به عنوان یک روش موثر کنترل دینامیکی توربین‌های بادی ارائه شده است که از قابلیت‌های دو روش کنترل غیرفعال پدیده قطع و کنترل فعال زاویه پره‌ها، بطور همزمان بهره برده و هزینه‌های پیاده‌سازی را نیز به طرز موثری کاهش می‌دهد. تغییرات زاویه پره‌ها در این روش، بسیار کمتر از روش کنترل فعال زاویه پره‌هاست؛ همین مزیت بعلاوه عدم نیاز به ژنراتورهای دوتحریکه و مدارات الکترونیکی پیچیده، سبب کاهش پیچیدگی و هزینه‌های طراحی و ساخت و افزایش عمر مفید سیستم ژنراتور بادی می‌گردد. هدف کنترل ارائه شده در این مقاله، کنترل موثر توان خروجی در طول عملکرد توربین بادی با ژنراتور القایی سرعت ثابت، از ناحیه سرعت باد start-up تا سرعت باد shut-down است. در روش ارائه شده، عملکرد توربین بادی به دو ناحیه تقسیم می‌گردد: (i) بهینه‌سازی توان؛ در حالتی که سرعت باد در محدوده سرعت باد start-up و سرعت باد نامی است، زاویه پره‌ها به منظور بهینه کردن  $C_p$

و متعاقباً توان خروجی تنظیم می‌گردد. (ii) محدودسازی توان؛ در حالتی که سرعت باد، بیش از مقدار نامی است، توان خروجی با بهره‌گیری از پدیده قطع محدود می‌شود. روش موثری برای بهینه‌سازی توان و دو روش مختلف برای عملکرد در ناحیه محدودسازی توان ارائه گشته و صحت عملکرد بوسیله شبیه‌سازی تحقیق شده و نشان داده می‌شود که استفاده از روش‌های ارائه شده کنترل توان، سبب کاهش قابل ملاحظه تغییرات توان خروجی توربین بادی در مقابل تغییرات وسیع سرعت باد و هموار شدن توان الکتریکی خروجی در باند کوچکی حول و حوش مقدار نامی خود می‌گردد.

### 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-

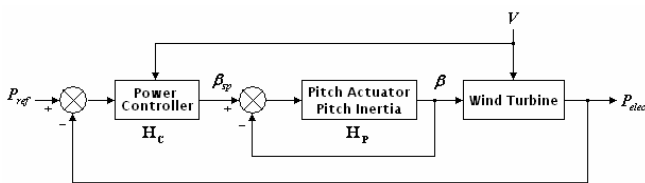
$$P_{elec} = H_{\beta}\beta + H_v v \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $H_{\beta}$  و  $H_v$ ، به ترتیب، توابع تبدیل توان خروجی به زاویه پره‌ها و سرعت باد هستند. زاویه پره‌ها نیز با فرمول‌های (۲) و (۳)، به مقادیر اندازه‌گیری شده و مرجع توان مربوط شده و طراحی کنترلر،  $H_C$ ، به منظور تبعیت از  $P_{ref}$  انجام می‌گیرد [۳].

$$\beta = \frac{H_P}{1 + H_P} \beta_{sp} \quad (2)$$

$$\beta_{sp} = H_C (P_{ref} - P_{elec}) \quad (3)$$

هرچه سرعت پاسخ سیستم تنظیم پره‌ها بیشتر باشد، توان هموارتری به ازای تغییرات سرعت باد داریم. در عمل، توان در مقدار متوسط، کنترل گشته و هنوز مقداری نوسانات توان داریم [۱].



شکل ۱: سیستم کنترل دینامیکی توان توربین بادی

### ۱-۱-۱- کنترل غیر فعال پدیده قطع :

کنترل غیر فعال پدیده قطع، ساده‌ترین روش کنترل توان است. در این روش، به سبب طراحی خاص شکل پره‌ها، افزایش سرعت باد، کاهش ضریب lift و افزایش ضریب drag را به دنبال داشته و بدون نیاز به هیچ تغییری در وضعیت پره‌ها، سقفی برای توان خروجی توربین ایجاد می‌شود. معمولاً زاویه ثابت پره‌ها، برای دستیابی به حداکثر توان نامی در سرعت باد دلخواه، انتخاب می‌گردد. این توربین‌ها، عموماً سرعت ثابت بوده و از ژنراتورهای القایی ساده استفاده می‌کنند. عیب اصلی این توربین‌ها، راندمان پایین، تغییرات زیاد سطح توان خروجی با باد و عدم قطعیت در عمل کنترل پدیده قطع می‌باشد که همگی سبب عدم توانایی در پیش‌بینی دقیق توان خروجی و همچنین نیروهای شدید بر پره‌ها، خصوصاً در سرعت‌های باد بالاست.

۴۰٪ خواهد بود. 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. امروزه، یکی از زمینه‌های مهم مطالعات توربین‌های بادی، مسائل مربوط به بهره‌برداری، کنترل و استراتژی‌های مربوطه است. در مفهوم کلی، سیستم کنترل توربین بادی، مشتمل بر چندین حسگر، فعال‌کننده و سیستمی شامل سخت‌افزار و نرم‌افزارهایی است که سیگنال‌های ورودی از حسگرها را پردازش کرده و سیگنال‌های خروجی را برای فعال‌کننده‌ها ایجاد می‌کند [۱ و ۲].

### ۱-۱- استراتژی‌های کنترل توان در انواع گوناگون توربین‌های بادی:

دو سطح اصلی برای عملکرد سیستم‌های کنترل توربین‌های بادی، کنترل نظارتی و کنترل دینامیکی می‌باشند. کنترل نظارتی به مدیریت و کنترل پروسه‌های عملکردی توربین، مانند راه‌سازی ترمزها، اتصال به شبکه و... می‌پردازد. کنترل دینامیکی، همچون تغییر زاویه پره‌ها در مقابل تغییرات سرعت باد، شامل جنبه‌هایی از عملکرد ماشین است که رفتار دینامیکی خروجی را تصحیح می‌کند. هدف این نوع سیستم کنترل توربین بادی، ایجاد عملکردی مطمئن و خودکار است، بطوریکه کاهش هزینه‌ها، افزایش بهره‌وری از توان باد در دسترس و ویژگی‌های ماشین، پاسخ دینامیکی مناسب، افزایش کیفیت تولید و بالا بردن سطح ایمنی تجهیزات را به دنبال داشته باشد. در این مقاله نیز تنها کنترل زاویه پره‌ها را مورد بررسی قرار می‌دهیم و هیچ کنترل دیگری همچون کنترل گشتاور آیرودینامیکی، کنترل گشتاور ژنراتور، کنترل گشتاور ترمزی و کنترل جهت سیستم yaw نداریم. عملکرد این سیستم کنترل توان، عموماً بصورتی که انرژی دریافتی سالانه از باد را بیشینه و نیروهای وارده به توربین (بخصوص پره‌ها) را کمینه کند، طراحی می‌گردد. شکل (۱)، نمونه کاملی از سیستم کنترل دینامیکی را نشان می‌دهد. توان الکتریکی خروجی توربین بادی، از روی سرعت باد و زاویه پره‌ها بدست می‌آید:

<sup>1</sup> Passive Stall Control

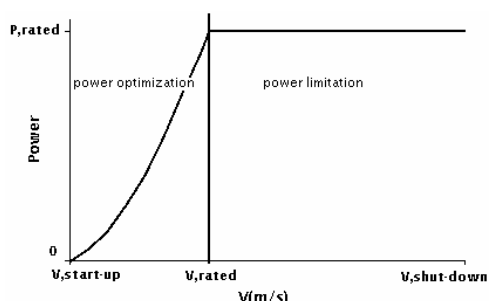
### ۱-۱-۲- کنترل فعال زاویه پره‌ها :

این کنترل، در سرعت‌های باد بالاتر از مقدار نامی، با چرخاندن پره‌ها حول محور، توان خروجی را محدود می‌کند. چرخش پره‌ها، در جهتی است که زاویه برخورد و در نتیجه ضریب lift را کاهش دهد. در کاربردهای عملی، عموماً این نوع از توربین‌ها سرعت متغیرند و از ژنراتور القایی دو تحریکه و یا از ژنراتور القایی به همراه مبدل‌های الکترونیک قدرت، استفاده می‌کنند. برای کنترل موثر توان خروجی، تغییرات زاویه پره‌ها باید تا حدود  $35^\circ$  باشد و حتی برای ترمز آیرودینامیکی، نیاز به زاویه  $90^\circ$  است. این تغییرات قابل توجه، سبب پیچیدگی ساخت و پیاده‌سازی این کنترل می‌گردد و میزان خرابی را افزایش و طول عمر سیستم را کاهش می‌دهد [۱۰ و ۲].

### ۱-۱-۳- کنترل فعال پدیده قطع :

کنترل فعال پدیده قطع، روش بسیار جذابی است که از قابلیت‌های دو روش قبل بطور همزمان بهره برده و هزینه‌های پیاده‌سازی را نیز به طرز موثری کاهش می‌دهد. این نوع توربین بادی، در مفهوم توربینی با کنترل پدیده قطع و با زاویه پره‌های متغیر است. اگر ژنراتور این نوع توربین‌ها، ژنراتور القایی قفس سنجابی ساده‌ای باشد که مستقیماً به شبکه متصلند، آنگاه در دور ثابتی کار می‌کنند و این ایده شکل می‌گیرد تا روش‌های کنترلی بسیار موثری، مبتنی بر جداول جستجو را پیاده‌سازی کنیم. اختلاف اصلی بین توربین‌های با کنترل غیرفعال پدیده قطع و توربین‌های با کنترل فعال پدیده قطع، وجود یک سیستم کنترل زاویه پره‌هاست که پدیده قطع را تحت کنترل درمی‌آورد. علاوه بر این، ضریب توان،  $C_p$ ، نیز تا حد قابل توجهی بهبود می‌یابد. تغییرات زاویه پره‌ها در این روش، بسیار کمتر از روش کنترل فعال زاویه پره‌هاست، بنحویکه حداکثر برای ترمز کردن،  $20^\circ$  خواهد بود و همین مزیت بعلاوه عدم نیاز به ژنراتورهای دو تحریکه و مدارات

الکترونیکی پیچیده، سبب کاهش پیچیدگی و هزینه‌های طراحی و ساخت و افزایش عمر مفید سیستم ژنراتور بادی می‌گردد [۲، ۴ و ۵].



شکل ۲: منحنی توان و نواحی عملکرد توربین بادی

### ۲- استراتژی پیشنهادی برای کنترل فعال پدیده قطع:

هدف کنترل ارائه شده در این مقاله، کنترل موثر توان خروجی در طول عملکرد توربین بادی با ژنراتور القایی سرعت ثابت، از ناحیه سرعت باد start-up تا سرعت باد shut-down است. در حالتی که سرعت باد در محدوده سرعت باد start-up و سرعت باد نامی است، زاویه پره‌ها به منظور بهینه کردن  $C_p$  و متعاقباً توان خروجی تنظیم می‌گردد. در حالتی که سرعت باد، بیش از مقدار نامی است، توان خروجی با بهره‌گیری از پدیده قطع محدود می‌شود. برای انجام این محدودسازی، دو روش مختلف ارائه شده است. برای حصول به منحنی توان نسبتاً مسطحی که توان نامی ثابت در محدوده سرعت باد نامی تا سرعت shut-down داشته باشد، تدوین استراتژی هوشمندانه‌ای در این ناحیه از عملکرد برای کنترل زاویه پره‌ها ضروری است. در روش ارائه شده، عملکرد توربین بادی به دو ناحیه تقسیم می‌گردد: (i) بهینه سازی توان (ii) محدودسازی توان

### ۲-۱- بهینه‌سازی توان:

هرگاه سرعت باد، کمتر از سرعت باد نامی و توان خروجی، کمتر از توان نامی گردد، بهینه سازی توان توربین بادی انجام می‌گیرد. برای بهینه سازی توان، یعنی استحصال حداکثر توان ممکن از باد، مقدار زاویه پره‌ای،  $\beta$ ، که در سرعت باد معین،

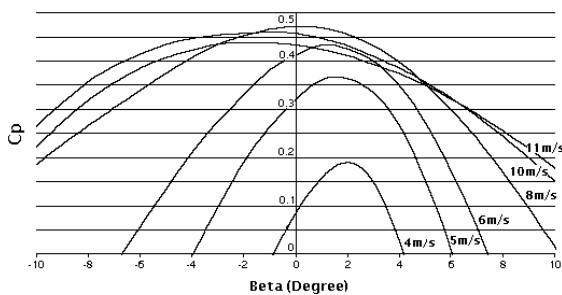
<sup>1</sup> Active Pitch Control

<sup>2</sup> Active Stall Control

اما درباره کنترل فعال پدیده قطع، این تغییرات کوچکتر هستند [۶۰].

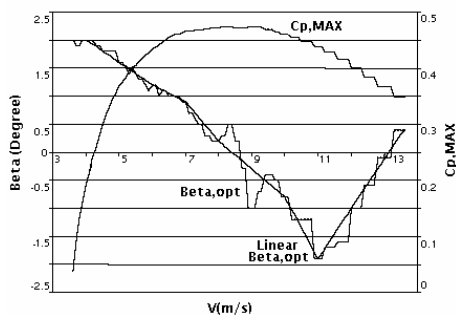
## ۲-۲- محدودسازی توان:

هرگاه توان خروجی ژنراتور، بیش از مقدار نامی خود یا سرعت باد، بیش از مقدار نامی گردد، کنترل محدودسازی توان توربین فعال می‌گردد. در این ناحیه از عملکرد، بمنظور بهره‌برداری از اثر پدیده قطع برای محدودسازی توان خروجی، باید زاویه پرها در جهت منفی تغییر یابند. تصویر (۵)، توان خروجی توربین نمونه را به ازای مقادیر مختلف  $\beta$  نشان می‌دهد. برای انجام کنترل محدودسازی، دو روش مختلف ارائه می‌شود: (i) روش کنترل حلقه بسته PI (ii) روش کنترل حلقه باز جدول جستجو



شکل ۳: منحنی‌های بهره، بصورت تابعی از زاویه پرها برای

مقادیر مختلف سرعت باد



شکل ۴: ضریب بهره بیشینه، زاویه پره بهینه و درونیایی خطی آن

بصورت تابعی از سرعت باد

ضریب توان،  $C_p(\lambda, \beta)$ ، را بیشینه کند، بدست می‌آید. از آنجا که سرعت ژنراتور و لذا سرعت چرخش روتور، ثابت هستند، پس مقدار نسبت سرعت نوک،  $\lambda$ ، متناسب با عکس سرعت باد است:

$$\lambda = \frac{R\omega}{V} \quad (4)$$

که  $R, \omega, V$  به ترتیب سرعت باد، سرعت چرخش محور دورپایین و شعاع پرها می‌باشند. با توجه به این رابطه، می‌توان به سادگی از روی منحنی‌های  $C_p(\lambda, \beta)$ ، منحنی‌های متناظر  $C_p(V, \beta)$  را بدست آورد. در این ناحیه از عملکرد، سرعت باد در بازه زمانی کوتاه، میانگین‌گیری شده و از روی جدول جستجو،  $\beta$  متناظر که  $C_p(V, \beta)$  را بیشینه کند، بدست می‌آید. بهینه‌سازی توان، کنترلی حلقه باز است، زیرا هیچگونه فیدبکی از  $\beta$  و توان در سرعت باد وجود ندارد. این کنترل، جدول جستجویی است که به ازای هر مقدار سرعت باد، مقدار مناسبی برای  $\beta$  می‌دهد بطوریکه  $C_p(V, \beta)$  بیشینه می‌گردد. این بیشینه کردن ضریب توان، منجر به بیشینه شدن توان خروجی می‌شود:

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p(\lambda, V) \quad (5)$$

این جداول جستجو، با بررسی منحنی‌های ضریب توان توربین‌های بادی که بوسیله تولیدکنندگان آنها ارائه می‌گردد، بدست می‌آیند. شکل (۳)، منحنی‌های  $C_p$  برای مقادیر مختلف سرعت باد را بصورت تابعی از  $\beta$  نشان می‌دهد. ملاحظه می‌گردد که در سرعت‌های پایین (محدوده بهینه سازی توان)، منحنی‌ها اوج تیزتری دارند که به معنای حساسیت بیشتر  $C_p$  نسبت به انحراف از  $\beta$  بهینه است. شکل (۴)، مقادیر بیشینه  $C_p$ ،  $\beta$ ی بهینه و درونیایی خطی آنرا نشان می‌دهد. ممکن است که به سبب افزایش طول عمر سیستم تنظیم پرها، در سرعت‌های باد زیر سرعت باد نامی، زاویه پرها را ثابت حفظ کرد که مسلماً این به قیمت کاهش توان دریافتی خواهد بود. ایده اخیر درمورد کنترل فعال زاویه پرها به سبب محدوده بزرگ تغییرات زاویه پرها، رایج است

<sup>1</sup> Tip speed ratio

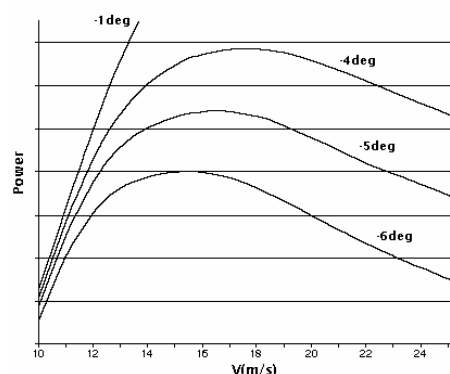
• انتقال از حالت بهینه‌سازی به حالت محدودسازی توان: توان خروجی باید بیش از توان نامی بوده یا سرعت باد، بیش از سرعت باد نامی باشد.

• انتقال از حالت محدودسازی به حالت بهینه‌سازی توان: توان خروجی باید کمتر از توان نامی بوده و سرعت باد، کمتر از سرعت باد نامی باشد.

(۳) سیستم تغییر زاویه پره‌ها: این بخش، نمایشگر سیستم تنظیم زاویه پره مورد نظر است. محرک این بخش، عموماً موتوری dc است. ویژگی‌های این سیستم با محدودیتی در نرخ تغییرات زاویه پره‌ها، مدل شده است. زاویه تنظیم،  $\beta_{sp}$ ، با مقدار واقعی زاویه،  $\beta$ ، مقایسه شده و اختلاف آنها در ضریب P که دارای واحد  $\frac{\text{deg/s}}{\text{deg}}$  است، ضرب می‌گردد. این ضریب، حداکثر نرخ تغییرات ممکن در زاویه پره‌ها را تعیین می‌کند. انتگرالگیر نیز از تغییرات نسبت به نقطه تنظیم زاویه پره‌ها، انتگرالگیری می‌کند و حاصل مقدار واقعی زاویه پره‌هاست. مقدار کوچک P، دینامیک کند تغییر زاویه پره‌ها را به دنبال دارد و مقدار خیلی بزرگ آن نیز سبب جهش زاویه پره‌ها بین دو حد بالا و پایین می‌گردد.

### ۲-۲-۲- کنترل محدودسازی توان حلقه باز با استفاده از جدول جستجو:

اساس روش، همان چیزی است که در مورد بهینه‌سازی توان انجام شد، یعنی استفاده از جدول جستجو و یافتن یک زاویه مناسب برای هر سرعت باد ورودی برای رسیدن به  $C_p$  مطلوب که در این حالت منجر به توانی در حدود توان نامی توربین بادی گردد. این امر به سبب اینکه سرعت چرخش روتور ثابت بوده و همچنین منحنی‌های ضریب توان هر توربین، بوسیله تولیدکنندگان آنها در اختیار قرار می‌گیرد، امکان تحقق یافته است. با توجه به رابطه (۶)، برای رسیدن به توان خروجی نامی توربین بادی، برای هر سرعت باد، یک مقدار  $C_p$  بدست می‌آید.



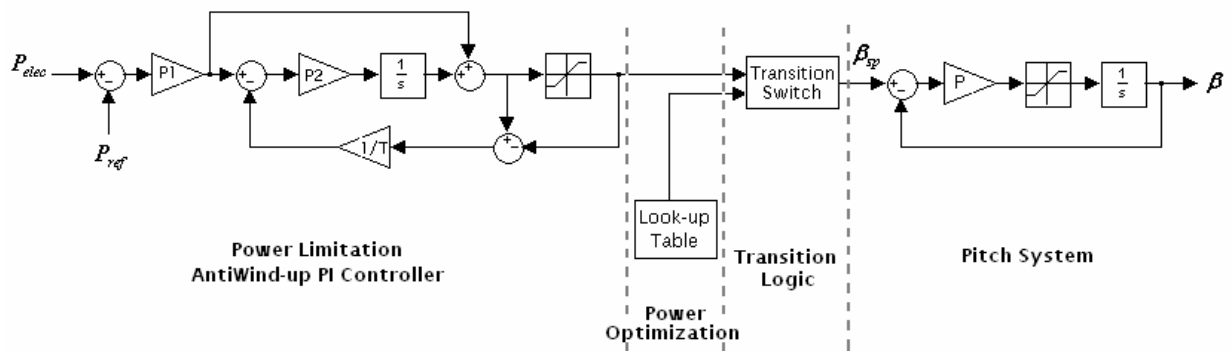
شکل ۵: منحنی‌های توان-سرعت باد به ازای مقادیر مختلف زاویه پره‌ها

### ۲-۲-۱- کنترل محدودسازی توان حلقه بسته PI:

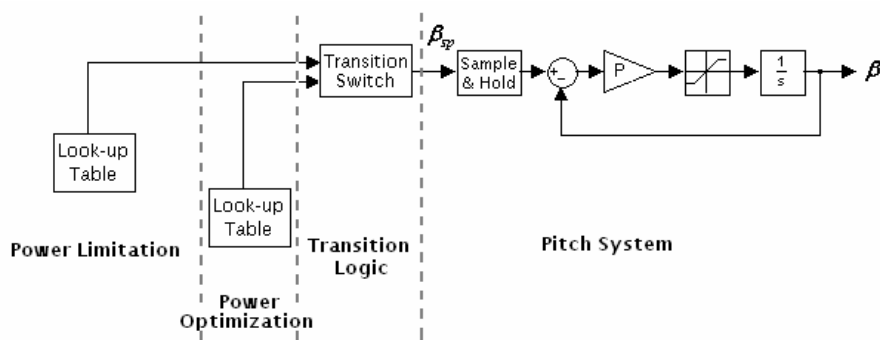
شکل (۶)، نمایش کاملی از سیستم کنترل حلقه بسته PI را نشان می‌دهد. این دیاگرام، به سه بخش تقسیم می‌گردد: (۱) محدودسازی توان: کنترلر PI، برای کنترل زاویه پره‌ها به منظور محدودسازی توان خروجی، زاویه پره‌ها را با توجه به اندازه اختلاف بین مقدار توان نامی و توان اندازه‌گیری شده تعیین می‌کند. مهمترین مسأله‌ای که در طراحی کنترلر PI باید مورد توجه قرار گیرد، جلوگیری از اشباع انتگرالگیر است. زیرا زمانی که سرعت کمتر از سرعت نامی است و یا به حد زاویه پره‌ها می‌رسیم، اختلاف بین توان اندازه‌گیری شده و نقطه تنظیم صفر نخواهد بود و انتگرال آن، به سمت عدد بزرگی پیش می‌رود. بمنظور مقابله با این اثر، کنترلر PI که دارای خاصیت antiwind-up است، طراحی می‌شود. حداکثر تغییرات زاویه پره‌ها،  $\beta$ ، نیز در حد قابل قبولی محدود می‌گردد. طراحی کنترلر PI با توجه به شکل (۱) و روابط (۱) تا (۳) با استفاده از روش‌های موثری همچون زیگلر-نیکولز انجام می‌گیرد.

(۲) منطق انتقال: در این بخش، با استفاده از مقادیر سرعت باد و توان، انتخاب بین دو حالت محدودسازی یا بهینه‌سازی توان انجام می‌گیرد:

بیست و یکمین کنفرانس بین‌المللی برق



شکل ۶: سیستم کنترل زاویه پره‌ها با کنترل محدودساز PI



شکل ۷: سیستم کنترل زاویه پره‌ها با کنترل محدودساز جدول جستجو

محدودسازی است، مقادیر  $\beta$  مرزی به هم نزدیک شوند تا پرش ناگهانی و بزرگ در مقدار زاویه پره بوجود نیاید.

۳- شبیه‌سازی:

برای انجام شبیه‌سازی‌ها از مدل دقیق توربین بادی که توسط مولفین در [۷] ارائه گردیده، استفاده شده است. مقادیر نامی سرعت باد و توان الکتریکی توربین به ترتیب 8.5 m/s و 540 kW هستند. مدل ارائه شده از نوع کنترل غیر فعال پدیده قطع و متصل به شبکه 20 kV که با معادل تونن آن مدل شده، می‌باشد. با توجه به روشهای ارائه شده در این مقاله، کنترل فعال پدیده قطع با محدوده تغییرات زاویه پره‌های کمتر از  $\pm 3^\circ$  را پیاده‌سازی کرده و در ادامه با چندین شبیه‌سازی، عملکرد روش ارائه شده را بررسی می‌کنیم.

$$C_p = \frac{P_{rated}}{\frac{1}{2} \rho A R^2 V^3} \quad (6)$$

حال با جستجو در منحنی‌های ضرایب توان توربین بادی که همگی بوسیله تولیدکنندگان در دسترس هستند، زاویه پره‌ای را که در سرعت باد موردنظر، نزدیکترین مقدار به  $C_p$  مورد نظر را ایجاد کند، در جدول جستجو ثبت می‌کنیم. با در اختیار داشتن تعداد کافی نقطه و درونیابی مناسب، برای کلیه مقادیر سرعت باد، مقدار مناسب زاویه پره،  $\beta$ ، بدست می‌آید. شکل (۷) نیز تحقق روش ارائه شده را نشان می‌دهد. S&H، مانع از تغییرات ناخواسته  $\beta$  می‌گردد. در هر دو روش، کلیه مقادیر اندازه‌گیری شده، در بازه‌های زمانی کوتاه و مناسب، میانگین‌گیری می‌شوند تا از پاسخ ناخواسته به تغییرات سریع و گذرا جلوگیری شود و پایداری و دقت بیشتر عمل کنترل، تضمین گردد. همچنین در هر دو روش، باید در محدوده سرعت باد نامی که منطقه سوئیچ بین دو حالت بهینه‌سازی و

### ۳-۱- عملکرد در ناحیه بهینه‌سازی توان:

سرعت باد ورودی مطابق شکل (۸)، دارای میانگین  $5.5 \text{ m/s}$  می‌باشد که بیش از مقدار start-up و کمتر از مقدار نامی است. توان الکتریکی خروجی توربین بادی در دو حالت کنترل غیر فعال پدیده قطع و کنترل فعال با کمک جدول جستجوی زاویه پره بهینه در شکل (۹)، مشاهده می‌گردد. افزایش قابل ملاحظه توان الکتریکی خروجی در محدوده بهینه‌سازی توان در این تصویر به خوبی مشخص است.

### ۳-۲- عملکرد در ناحیه محدودسازی توان:

در این حالت، سرعت باد ورودی مطابق شکل (۱۰)، دارای میانگین  $10 \text{ m/s}$  می‌باشد که بیش از مقدار نامی است. توان الکتریکی خروجی توربین بادی در حالات کنترل غیر فعال پدیده قطع و کنترل فعال با استفاده از جدول جستجو و یا کنترلر محدودساز PI در شکل (۱۱)، مشاهده می‌گردد. کاهش قابل ملاحظه توان الکتریکی خروجی در ناحیه محدودسازی توان در این تصویر به خوبی مشخص است. علاوه بر این، کنترل محدودسازی توان، تا حد بسیار موثری، کاهش تغییرات و اعوجاج و هموارتر شدن شکل موج توان خروجی را نیز در پی دارد. تغییرات متناظر زاویه پره‌ها در روش محدودسازی جدول جستجو نیز در شکل (۱۲) مشاهده می‌گردد.

### ۳-۳- سوئیچ بین دو ناحیه عملکرد (تغییرات زیاد سرعت باد):

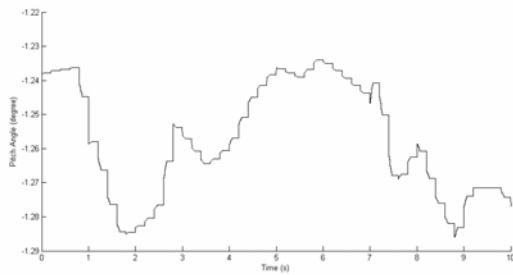
سرعت باد شکل (۱۳)، مجموعی از دو تابع سینوسی است که سرعت باد با تغییرات شدید بین دو حد  $5 \text{ m/s}$  و  $12 \text{ m/s}$  را نشان می‌دهد. اعمال این سرعت باد که دارای محدوده تغییرات گسترده‌ای است، سبب می‌گردد تا توان الکتریکی خروجی ژنراتور توربین بادی نیز در محدوده وسیعی تغییر کند که این تغییرات در شکل (۱۴) نمایش داده شده است. همانطور که در همین شکل مشاهده می‌شود، استفاده از کنترل توان، سبب کاهش قابل ملاحظه محدوده تغییرات توان

خروجی توربین بادی و هموار شدن آن در باند کوچکی حول و حوش مقدار نامی خود می‌گردد. نتایج نشان می‌دهند که در صورت طراحی صحیح کنترلر با محدودساز PI، عملکرد بهتری در مقایسه با کنترلر با محدودساز جدول جستجو بدست می‌آید.

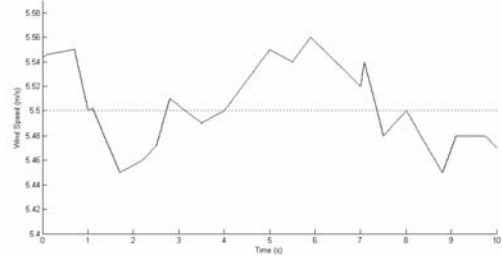
### ۴- نتیجه‌گیری:

استفاده موثر و کنترل شده از پدیده قطع، بعلاوه استفاده از ژنراتور القایی متصل به شبکه که دارای عملکرد سرعت ثابت است، این قابلیت را در اختیار قرار می‌دهد تا روش‌های کنترلی بسیار موثری مبتنی بر جداول جستجو، حلقه باز و یا حلقه بسته، را برای کنترل موثر توان خروجی در ناحیه عملکرد توربین بادی از محدوده سرعت باد start-up تا سرعت باد shut-down پیاده‌سازی کنیم. در حالتی که سرعت باد در محدوده سرعت باد start-up و سرعت باد نامی است، مقدار  $C_p$  و متعاقباً توان خروجی توربین بادی، با استفاده از جدول جستجوی مقدار بهینه  $\beta$  که  $C_p$  را ماکزیمم می‌کند، تا حد بسیار مطلوبی بهبود می‌یابد. در حالتی که سرعت باد بیش از سرعت باد نامی است، محدود کردن توان خروجی بوسیله جدول جستجوی  $\beta$  مناسب که  $C_p$  متناظر با توان نامی را می‌دهد، موثرتر بوده و عملکرد بهتری در مقایسه با کنترلر محدودساز PI دارد؛ حال آنکه در شرایطی که تغییرات وسیع اندازه سرعت باد ورودی داریم، استفاده ترکیبی از جدول جستجو در ناحیه بهینه‌سازی و کنترلر PI در ناحیه محدودسازی توان، عملکرد بهتری را نشان می‌دهد؛ دلیل این امر کنترلر حلقه بسته PI و وجود فیدبک از توان خروجی در ورودی کنترلر است. بدست آوردن مقادیر مناسب برای کنترلر محدودساز PI که دارای خاصیت antiwind-up نیز هست و استفاده از ترکیبی هوشمندانه از روش‌های محدودسازی حلقه باز جدول جستجو و یا محدودسازی حلقه بسته PI بعلاوه بهینه‌سازی جدول جستجو، منجر به محدود و هموار شدن توان الکتریکی خروجی توربین بادی در باند کوچکی حول و حوش مقدار نامی توان می‌گردد.

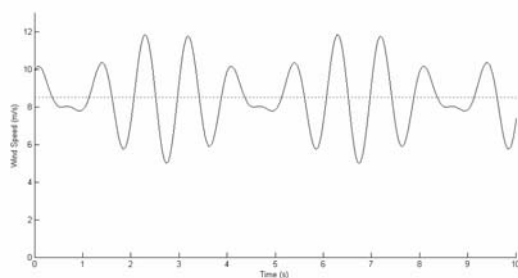
<sup>1</sup> Power Smoothing



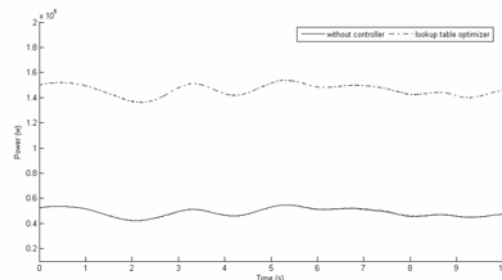
شکل ۱۲: تغییرات زاویه پره‌ها در محدوده عملکرد محدود سازی در روش محدودساز جدول جستجو



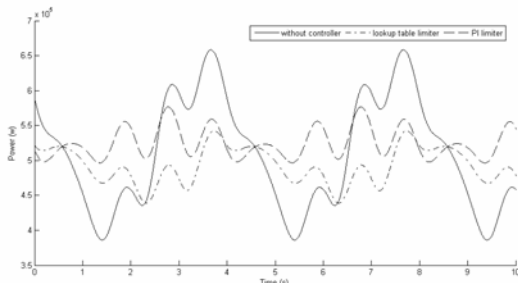
شکل ۸: سرعت باد ورودی به توربین در ناحیه بهینه سازی توان



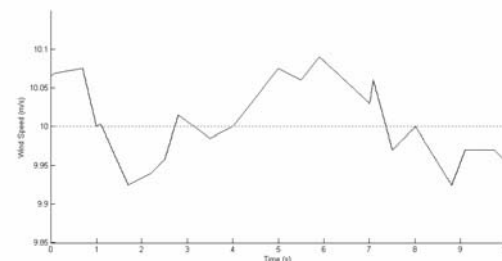
شکل ۱۳: تغییرات وسیع سرعت باد ورودی به توربین بادی با سرعت باد نامی 8.5m/s



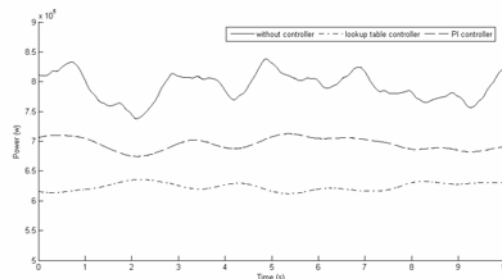
شکل ۹: توان الکتریکی خروجی توربین بادی در دو حالت بدون کنترلر و استفاده از بهینه ساز جدول جستجو



شکل ۱۴: توان الکتریکی خروجی توربین بادی در حالات بدون کنترلر و استفاده از کنترلر با محدود سازهای جدول جستجو یا PI



شکل ۱۰: سرعت باد ورودی به توربین در ناحیه محدودسازی توان



شکل ۱۱: توان الکتریکی خروجی توربین بادی در حالات بدون کنترلر و استفاده از محدود سازهای جدول جستجو یا PI

### مراجع و مأخذ:

- [1] J.F. Manwell, J.G. McGowan and A.L. Rogers, *Wind Energy Explained*, JohnWiley, 2002
- [2] T. Burton, D. Sharpe, D. Jenkins and E. Bossanyi, *Wind Energy Handbook*, JohnWiley, 2001
- [3] M.N. Mansouri, M.F. Mimouni, B. Beughanem and M. Aunabi, "Simulation model for wind turbine with asynchronous generator interconnected to the electric network", *Renewable energy*, vol 29, p.p. 421-431, 2004
- [4] A.D. Hansen, P. Sorensen, F. Blaabjerg and J. Bech, "Dynamic modelling of wind farm grid



**بیست و یکمین کنفرانس بین‌المللی برق**

interaction", *Wind Eng*, vol 26, No 4, p.p. 191-208, 2002

[5] A.D. Hansen, H. Bindner and A. Rebsdorf, "Improving transition between power optimization and power limitation of variable speed, variable pitch wind turbines", *EWEC*, p.p. 889-892, 1999

[6] P. Navak, T. Ekelund and I. Jovik, "Modelling and control of variable speed wind turbine drive system dynamics", *IEEE control system*, August, 1995

" . [7]

"