



## بررسی عملکرد توربین بادی دارای کنترل زاویه Pitch پره در مقابل تغییرات سرعت باد

سید محمد صادق غیاثی، محسن کلانتر

عنوان یکی از مهمترین منابع تولید برق شناخته می شود [1]. توربین های بادی را می توان به دو گروه عمده سرعت ثابت و سرعت متغیر تقسیم کرد. نوع اول تنها از ماشین القایی و نوع دوم از ماشین القایی تغذیه دوگانه یا ماشین سنکرون مغناطیس دائم به عنوان ژنراتور استفاده می کند. طی سال های اخیر، توربین های بادی سرعت متغیر به علت دارا بودن راندمان آئرو دینامیکی حداکثری در محدوده بالایی از سرعت باد [2] و نیز ارائه کیفیت توان بالاتری نسبت به توربین های سرعت ثابت [3]، اکثریت غالب را در میان توربین های نصب شده به خود اختصاص داده اند. چنین رشدی باعث لزوم توسعه مدل های مناسب برای مطالعه و شبیه سازی عملکرد آن ها در سیستم قدرت گشته است.

مطالعات دینامیکی انجام شده در زمینه توربین های بادی به چهار قسمت عمده دسته بندی می شود که عبارتند از ارائه مدل برای توربین های بادی، ساده سازی مدل ها، مقایسه مدل ها و ارائه مدل های معادل برای مزارع بادی.

مرجع [4] مدل و تحلیل دینامیکی یک توربین بادی متصل به یک شبکه بینهایت، مرجع [5] مدلی دینامیکی برای توربین DFIG با فرض عدم تأثیر پایداری گذرا از سیستم کنترل و مرجع [6] نیز یک مدل DFIG به صورت ترکیبی از ماشین سنکرون و آسنکرون را مورد بررسی قرار داده اند.

ساده سازی مدل ها نیز به علت لزوم ایجاد توازن میان دقت در شبیه سازی و زمان محاسبات، همواره به عنوان موضوعی مهم مطرح بوده است. در مرجع [7] عملکرد گذرا و بررسی مدل های درجه 3 و درجه 5 DFIG، در مرجع [8] مدلی ساده شده از DFIG با در نظرگیری مبدل قدرت به عنوان منبع ولتاژ کنترل شده، در مرجع [9] بررسی رفتار دینامیکی توربین بادی سرعت متغیر با ژنراتور سنکرون در مدلی کاهش درجه یافته، در مرجع

چکیده - استفاده از انرژی باد در دهه های اخیر دارای رشدی چشمگیر بوده و تمامی پیش بینی ها نیز حاکی از ادامه این روند در آینده است. به همین دلیل امروزه انرژی باد در میان سایر انواع انرژی های نو نقشی حیاتی را در تولید برق مورد نیاز شبکه های قدرت ایفا می کند. این رشد فزاینده عامل افزایش مطالعات و شبیه سازی های عملکرد توربین های بادی به منظور شناخت دقیق تر عملکرد آن ها در سیستم قدرت بوده است. در این مقاله مدل دینامیکی یک توربین بادی سرعت متغیر که رایج ترین نوع توربین بادی است، ارائه شده و سپس عملکرد آن در مقابل تغییرات سرعت باد و با تأکید بر کنترل زاویه Pitch پره، مورد مطالعه قرار گرفته است. صحت این مدل از طریق مشاهده توان خروجی، فرآیند راه اندازی ژنراتور القایی و رسیدن به سرعت نامی و پاسخ سیستم به تغییرات سرعت مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. در ادامه به منظور دستیابی به جواب واقعی تر و غیرایده آل، با در نظر گرفتن جرم پره ها و توربین به عنوان یک فیلتر پایین گذر، تحلیل ها بار دیگر با استفاده از شکل موج فیلتر شده سرعت باد انجام شده و نتایج ارائه گشته است.

واژه های کلیدی - توربین بادی سرعت متغیر، زاویه پره، مدل دینامیک، نسبت سرعت نوک پره.

### ۱ - مقدمه

اولین توربین بادی برای استحصال انرژی الکتریکی در انتهای قرن 19 ساخته شد و در دهه 50 میلادی، دو پیشرفت مهم فنی در توربین بادی یعنی دستیابی به ساختار سه پره ای و نیز جایگزینی ژنراتور AC به جای DC به وقوع پیوست. انرژی باد در سال های بعد از آن تاکنون همواره مورد توجه بیشتری قرار گرفته و انتظار می رود در سال های آتی نقش مهم تری را نیز ایفا کند. در حال حاضر انرژی باد با ظرفیت نصب شده بیش از 40000 مگاوات در سراسر دنیا و نرخ رشد پیش بینی شده 30% طی دهه آینده، به

جریان باد پایین توربین می باشد:

$$P = \frac{1}{2} k_m (v^2 - v_0^2) \quad (5)$$

که  $v$  سرعت باد جریان بالای توربین در ورودی و  $v_0$  سرعت باد جریان پایین در خروجی پره توربین می باشد.  $k_m$  نیز نرخ جرمی جریان باد بوده و از (6) به دست می آید که در این رابطه  $A$  سطح مقطعی است که توسط پره های توربین جارو می شود و آن را سطح مقطع موثر پره های توربین می نامند:

$$k_m = rA \frac{v + v_0}{2} \quad (6)$$

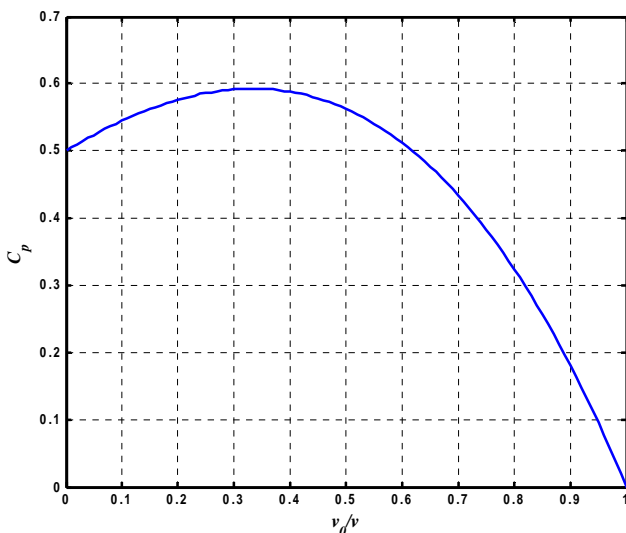
با توجه به (5) و (6)، توان مکانیکی استخراج شده به وسیله روتور با این رابطه بیان می شود:

$$P = \frac{1}{2} \left[ rA \frac{v + v_0}{2} \right] (v^2 - v_0^2) \quad (7)$$

که با داشتن  $C_p = \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{v_0}{v} \right) \left[ 1 - \left( \frac{v_0}{v} \right)^2 \right]$  می توان (7) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$P = \frac{1}{2} rA v^3 C_p \quad (8)$$

$C_p$  ضریب توان روتور یا راندمان توربین نامیده می شود که تابعی از شرایط جریان باد در روتور است. این ضریب نمایانگر بخشی از توانی است که پره های روتور می توانند از باد استخراج کنند که در تئوری از 0/59 تجاوز نکرده و نمودار آن در شکل (1) مشاهده می شود. در شرایط عملی، حداکثر مقدار  $C_p$  برای یک توربین سرعت بالای دو پره ای بین 0/4 تا 0/5 و برای توربین سرعت پایین با پره های بیشتر، بین 0/2 تا 0/4 می باشد [20].



شکل 1- راندمان تئوری روتور نسبت به  $v_0/v$ .

از (8) می توان دریافت توان خروجی یک توربین می تواند به وسیله تغییر سطح مقطع موثر یا با تغییر شرایط باد در روتور توربین تغییر کند. کنترل این مقادیر اساس کنترل سیستم های

[10] مقایسه عملکرد یک مدل کامل و یک مدل کاهش درجه یافته از توربین بادی سرعت ثابت، در مرجع [11] تاثیر ساده سازی مدل مکانیکی بر زمان تسویه بحرانی (CCT) و در مرجع [12] مدل هایی کاهش درجه یافته از توربین بادی DFIG جهت مطالعات دینامیکی و بر مبنای یک روتور قفس سنجایی ارائه گشته است.

در مرجع [13] سه مدل مختلف توربین بادی سرعت ثابت و خصوصیات دینامیک آن ها مورد مقایسه بوده و در مرجع [14] مدلی برای همه انواع توربین های بادی سرعت متغیر ارائه شده؛ مرجع [15] نیز با در نظر گرفتن مدل توربین های سرعت ثابت و سرعت متغیر به تحلیل کاربرد آن ها در پایداری دائم و مطالعات پخش بار پرداخته است.

ارائه مدل معادل برای مزارع بادی نیز به عنوان یکی دیگر از موضوعات مهم در زمینه انرژی باد مطرح است؛ چرا که به علت بار محاسباتی بالا، نمی توان مزارع بادی را به صورت مجموعه ای از چندین توربین در نظر گرفت. از جمله کارهای انجام شده در این زمینه می توان به بررسی پایداری گذرا و مدل معادل یک مزرعه بادی بزرگ [16]، ارائه دو روش متفاوت برای مدل سازی مزرعه بادی بر اساس مدل جریان های جهت دار استاتور DFIG [17]، ارائه روشی برای ترکیب مدل چندین توربین بادی به صورت یک مدل کاهش مرتبه یافته و بر اساس مدل دینامیکی کاهش درجه یافته توربین بادی سرعت ثابت [18] و معادل سازی مزرعه بادی با مدلی ترکیبی از توربین های بادی سرعت ثابت اشاره کرد [19].

## ۲- فرمولاسیون و تشریح مسأله

توربین های بادی انرژی جنبشی باد را مهار و آن را به انرژی الکتریکی تبدیل می کنند. انرژی جنبشی توده هوایی به جرم  $m$  و با سرعت  $v$  را می توان به صورت زیر نشان داد [20]:

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2 \quad (1)$$

در زمان  $t$ ، جرم هوای عبوری از سطح مقطع  $A (m^2)$  در سرعت  $v (m/s)$  برابر است با:

$$m = rA v t \quad (2)$$

که در این معادله،  $r$  برابر چگالی هوا ( $kg/m^3$ ) می باشد. بر پایه (1) و (2) توان باد را می توان به صورت زیر نوشت:

$$P = \frac{1}{2} rA v^3 \quad (3)$$

توان ویژه یا چگالی توان باد را با رابطه زیر نشان می دهند:

$$P_{den} = \frac{P}{A} = \frac{1}{2} r v^3 \quad (4)$$

تأکید می شود که چگالی توان باد با سرعت باد رابطه مستقیم دارد. توان واقعی استخراج شده توسط پره های روتور توربین از انرژی باد برابر اختلاف میان توان باد جریان بالای توربین با توان

متربرثانیه) [21]، سیستم در جهت حفاظت بخش‌های مختلف آن باید از مدار خارج و خاموش گردد.

چندین راه برای کنترل توان خروجی از توربین بادی وجود دارد؛ اما دو روش متداول‌تر برای رسیدن به این هدف عبارتند از کنترل stall و کنترل pitch. برای توربین بادی با کنترل stall، در واقع کنترل فعالی به توربین اعمال نمی‌شود و توان خروجی از طریق طراحی ویژه پره‌های توربین تنظیم می‌شود. طراحی این‌چنینی تضمین می‌دهد که هنگام افزایش شدید باد، پره‌ها به نحوی بر روی خود توربولانس ایجاد کنند که راندمان آئروپنایمیکی توربین کاهش یابد. اما بر خلاف کنترل stall، کنترل زاویه pitch پره روشی فعال است که با تغییر زاویه pitch پره‌های توربین بادی، راندمان آئروپنایمیکی را کاهش می‌دهد. باید تأکید کرد که زاویه pitch با نرخ محدودی تغییر می‌کند که با توجه به اندازه پره‌های توربین بادی معمولاً اندک بوده و حداکثر نرخ تغییر آن نیز در حدود 3 تا 10 درجه در ثانیه می‌باشد [22].

با توجه به شکل (2) می‌توان دریافت که سیستم سرعت متغیر به طور نرمال سرعت قطع پایین کمتری دارد و سرعت نامی نیز در سیستم‌های سرعت متغیر معمولاً کمتر از سیستم سرعت ثابت می‌باشد. برای سرعت‌های باد میان سرعت قطع پایین و سرعت نامی، میزان انرژی استحصال شده توسط سیستم‌های سرعت متغیر در حدود 20 تا 30 درصد بیش از سیستم‌های سرعت ثابت است [23]. سیستم‌های با کنترل زاویه pitch پره، می‌توانند توان را در سرعت‌های باد بیشتر از سرعت نامی در یک مقدار ثابت به صورت کاملاً دقیق حفظ کنند. اما خروجی توان در سرعت‌های باد بیشتر از سرعت نامی برای سیستم سرعت ثابت با کنترل stall، به ماکزیمم مقدار خود خواهد رسید که تا حدی بیشتر از مقدار نامی آن است و سپس با افزایش سرعت باد کاهش خواهد یافت.

### ۳- مدل‌سازی دینامیکی توربین بادی سرعت متغیر

در این بخش مدل‌سازی توربین بادی سرعت متغیر با کنترلر زاویه pitch پره بررسی خواهد شد. توان  $P_{wind}$  استخراج شده از باد بر حسب وات از (10) محاسبه می‌شود:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_p(I, q) \quad (10)$$

در این رابطه  $C_p$  تابع نسبت سرعت نوک پره<sup>1</sup> (یا TSR) و  $q$  زاویه pitch می‌باشد. حداکثر  $C_p$  به ازای یک زاویه pitch ثابت در یک TSR خاص به دست می‌آید که از خصوصیات طراحی

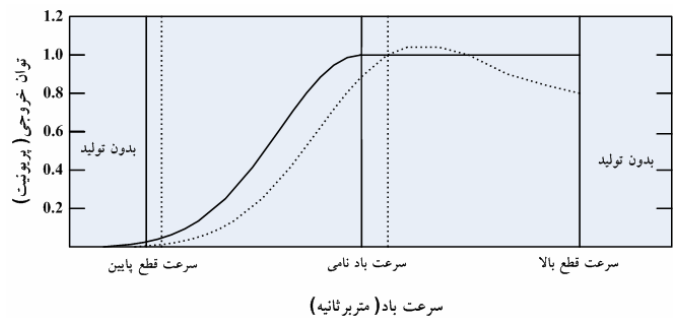
توربین بادی را شکل می‌دهند. نسبت سرعت خطی نوک پره به سرعت باد را  $I$  نامیده و با رابطه زیر نشان می‌دهند:

$$I = \frac{wR}{v} \quad (9)$$

در این رابطه  $R$  شعاع پره و  $w$  سرعت زاویه‌ای روتور است. سرعت نوک پره متناسب با نقطه کار توربین بادی برای حداکثر توان استخراج شده می‌باشد. برای توربین‌های با نسبت سرعت نوک پره متغیر، سرعت روتور با تغییر سرعت باد تغییر می‌کند تا نسبت سرعت در سطح بهینه ثابت بماند و در نتیجه توربین‌های با نسبت سرعت متغیر می‌توانند توان بالاتری تولید کنند [21].

عموماً دو نوع توربین بادی سرعت متغیر وجود دارد. در نوع اول استاتور ژنراتور القایی تغذیه دوگانه (با روتور سیم‌پیچی شده) که روتور آن توسط یک مبدل منبع ولتاژ یا جریان back-to-back تغذیه شده است، به طور مستقیم به بار یا شبکه متصل است و سرعت مکانیکی روتور می‌تواند از طریق یک سیستم کنترل مناسب روی مبدل مذکور، در حالی که فرکانس خروجی AC از استاتور ثابت باقی می‌ماند، تغییر کند. در نوع دوم، ژنراتور کاملاً توسط مدار واسط الکترونیک قدرت از شبکه یا بار جدا بوده و می‌تواند ژنراتور سنکرون (یا سیم پیچی تحریک یا مغناطیس دائم) یا ژنراتور القایی باشد. سیستم مورد استفاده در این مطالعه، مشابه مورد اخیر و از نوع القایی قفس سنجابی است.

در شکل (2) یک نمونه منحنی توان خروجی توربین بادی بر حسب سرعت باد نشان داده شده است [21] و [22].



شکل 2- منحنی‌های نمونه برای سیستم سرعت ثابت با کنترل استال (نقطه چین) و سرعت متغیر با کنترل زاویه Pitch پره (خط توپر) [21] و [22].

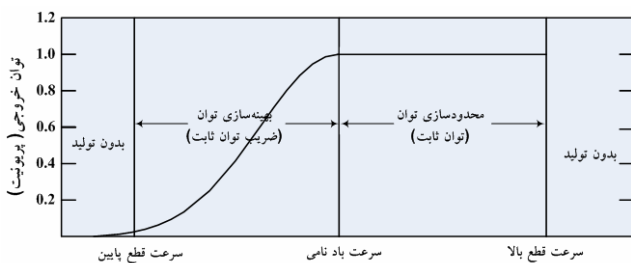
هنگامی که سرعت باد کمتر از سرعت قطع پایین توربین باشد (3~5 متربرثانیه)، توان خروجی صفر است. مابین سرعت قطع پایین و سرعت باد نامی (11~16 متربرثانیه) [21]، توان خروجی توربین بادی به طور مستقیم با توان سوم سرعت باد ارتباط دارد که در (8) ارائه شده است. هنگامی که سرعت باد از مقدار نامی بیشتر شود، توان خروجی باید محدود به مقدار نامی گردد تا ژنراتور و ابزارهای الکترونیک قدرت مرتبط با آن آسیبی نبینند. هنگامی که سرعت باد بیشتر از سرعت قطع بالا شود (17~30

<sup>1</sup> Tip Speed Ratio.

$kq$  در جدول (1) برای محاسبه  $C_2$  و  $C_5$  به کار می رود که خود بر حسب  $l$  و  $q$  به صورت زیر بیان می شود [24]:

$$Kq = \left[ \frac{1}{l + 0.08q} - \frac{0.035}{q^3 + 1} \right]^{-1} \quad (12)$$

دو متغیر بر عملکرد توربین های بادی سرعت متغیر با کنترلر زاویه pitch پره اثر مستقیم دارند که شامل سرعت نامی روتور و زاویه pitch پره می شود. استراتژی بهینه سازی توان هنگامی به کار گرفته می شود که سرعت باد زیر سرعت نامی روتور باشد تا انرژی استحصالی را با ثابت نگه داشتن TSR در مقدار بهینه حداکثر کند. در این مطالعه، مقدار زاویه pitch پره برابر صفر است و با کنترل برداری جریان ژنراتور، نسبت سرعت نوک پره در مقدار 7/97 ثابت نگه داشته می شود تا راندمان ماکزیمم حاصل شود. همچنین استراتژی محدودیت توان برای سرعت های باد بالاتر از سرعت نامی توربین به کار گرفته می شود تا توان خروجی را در مقدار نامی محدود کند. این امر توسط کنترلر زاویه pitch پره و با تغییر زاویه به منظور کاهش راندمان آیرودینامیکی انجام می گیرد. بدین وسیله، توان تولیدی توربین در محدوده مجاز قرار می گیرد. نواحی مختلف برای استراتژی های کنترلی گفته شده در شکل (4) نشان داده شده است.



شکل 4- نواحی کار توربین بادی سرعت متغیر با کنترلر زاویه pitch پره [24].

عملکرد کنترلر زاویه pitch پره به نحوی است که اگر سرعت باد کمتر از مقدار نامی باشد، زاویه pitch پره در مقدار بهینه خود ثابت نگه داشته می شود؛ و اگر سرعت باد از مقدار نامی توربین بیشتر شود، کنترلر مقدار خطای توان و زاویه pitch مناسب را محاسبه می کند. شایان ذکر است تغییرات زاویه ای pitch پره دارای مقداری لختی است که به مقدار ثابت زمانی تغییرات پره برمی گردد و برای توربینی در اندازه 50 کیلووات در حدود 0/02 ثانیه می باشد [24].

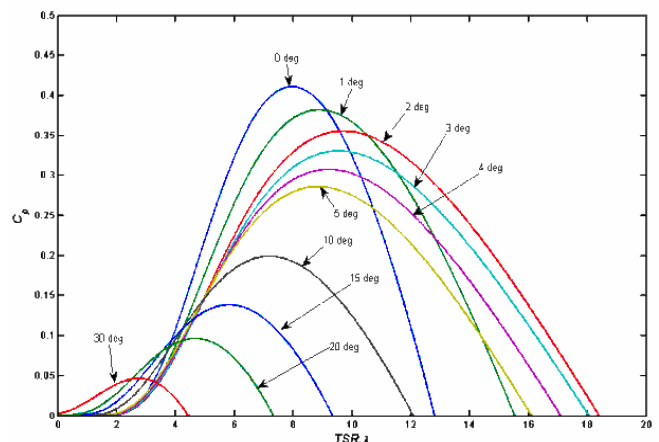
#### 4- مدل توربین بادی سرعت متغیر

شکل (5) بلوک دیاگرام مدل توربین بادی سرعت متغیر را نشان می دهد. این مدل در محیط نرم افزار MATLAB/Simulink پیاده شده است. ورودی های مدل توربین شامل سرعت باد، چگالی هوا، شعاع توربین بادی، سرعت مکانیکی روتور و توان مرجع برای کنترلر زاویه pitch بوده و خروجی، گشتاور محرک یا  $T_{drive}$  است

آیرودینامیکی توربین است. روتور باید در بادهای تند، با سرعت بالا و در بادهای سرعت پایین، با سرعت کم بچرخد تا مقدار TSR در سطح بهینه باقی بماند. برای کار توربین در محدوده وسیعی از سرعت باد، توربین بادی با TSR بزرگ ترجیح داده می شود [24]. در مورد توربین های بادی سرعت متغیر با کنترلر زاویه pitch پره، کنترلر زاویه پره نقشی حیاتی و بسیار مهم ایفا می کند. دسته منحنی های  $C_p - l$  با زاویه pitch به عنوان متغیر، به صورت یک تابع غیرخطی نمایش داده می شوند که معادله مورد استفاده در آن ها به صورت زیر است [24] و [25]:

$$C_p = C_1(C_2 - C_3 q - C_4) \exp(-C_5) \quad (11)$$

تنظیم بهینه ضرایب  $C_1 - C_5$  باعث می شود نتایج شبیه سازی توربین بادی به واقعیت نزدیک تر باشد. مقادیر ضرایب  $C_1 - C_5$  در مطالعه حاضر در جدول (1) ارائه شده اند. شکل (3) این دسته منحنی ها را نشان می دهد.



شکل 3- دسته منحنی های  $C_p - l$  در زوایای pitch پره مختلف ( $q$ ).

در شکل مشاهده می شود هنگامی که زاویه pitch پره برابر 2 درجه است، نسبت سرعت نوک پره (TSR) دارای بازه نسبتاً وسیعی است؛ در این حالت حداکثر مقدار  $C_p$  برابر 0/35 بوده که برای کار یک توربین در بازه وسیعی از سرعت باد بسیار مناسب است. در زاویه pitch پره صفر درجه، حداکثر ضریب توان توربین برابر 0/411 می باشد. در این شرایط، مقدار نسبت سرعت نوک پره (TSR) برابر 7/97 است. با افزایش زاویه pitch پره، بازه تغییرات نسبت سرعت نوک پره و مقدار حداکثر ضریب توان به طور قابل ملاحظه ای کاهش می یابد.

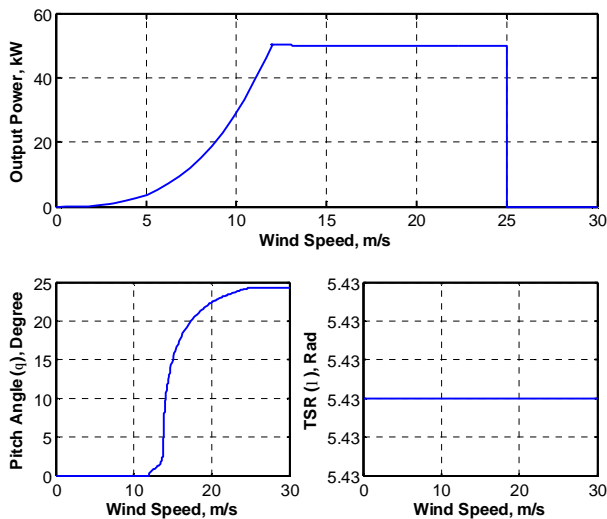
جدول 1- مقادیر ضرایب  $C_1 - C_5$  [24]

ضریب $C_1$	0, 5
ضریب $C_2$	$116/k_\theta$
ضریب $C_3$	0, 4
ضریب $C_4$	0
ضریب $C_5$	$21/k_\theta$

مختلف جهت بررسی صحت و سقم مدل آورده شده است.

#### 4-1 منحنی توان خروجی توربین بادی

شکل (6-الف) توان خروجی توربین مدل شده را در سرعت‌های مختلف باد نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود در سرعت‌های بالاتر از سرعت نامی توان خروجی با کنترل زاویه pitch پره، با وجود پتانسیل بالاتری برای تولید توان، جهت حفاظت از سیستم‌های الکتریکی و جلوگیری از افزایش غیرمجاز سرعت روتور، در مقدار نامی خود ثابت مانده و در واقع ضریب توان  $C_p$  کاهش یافته است. تغییرات زاویه pitch پره و نسبت سرعت نوک پره نیز به ترتیب در شکل‌های (6-ب) و (6-ج) دیده می‌شود که نسبت اخیر حین شبیه‌سازی ثابت در نظر گرفته شده تا بتوان به ازای تغییرات سرعت باد، مقدار توان خروجی توربین را محاسبه کرد.



شکل 6- توان خروجی توربین بادی، تغییرات زاویه pitch پره و نسبت سرعت نوک پره در سرعت‌های مختلف باد.

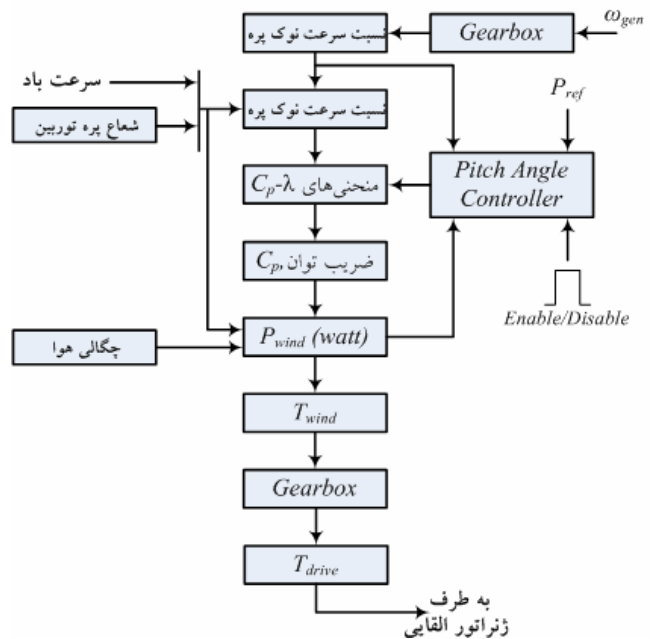
#### 4-2 فرآیند راه‌اندازی ژنراتور القایی و رسیدن به سرعت نامی

اگر توربین بادی مورد مطالعه به شبکه متصل باشد، می‌توان ژنراتور را با دریافت توان اکتیو از شبکه راه‌اندازی کرده و پس از پایان فرآیند راه‌اندازی، از آن به عنوان منبع توان اکتیو استفاده کرد. همچنین توان راکتیو مورد نیاز در تمام شرایط کاری نیز توسط شبکه تأمین می‌گردد.

همانطور که در شکل (7) دیده می‌شود، جریان‌های فازی در استاتور و روتور در لحظات اولیه راه‌اندازی بسیار زیاد است. همچنین فرکانس جریان روتور در لحظات اولیه تقریباً برابر فرکانس جریان استاتور است، چرا که در لحظه راه‌اندازی لغزش برابر 1 است؛ اما در ادامه با رسیدن به سرعت و لغزش نامی (حدود 4/37 درصد)، فرکانس جریان روتور کاهش می‌یابد.

که ژنراتور را می‌چرخاند. مقدار ضریب توان توربین از روی منحنی راندمان تخمین زده می‌شود. کنترلر زاویه pitch پره تا هنگامی مقدار آن را در اندازه بهینه نگه می‌دارد که توان خروجی توربین بادی از مقدار مرجع توان ورودی بیشتر شود.

توربین بادی مورد استفاده در این مطالعه، دارای توان نامی 50 کیلووات، سرعت قطع پایین و بالای 3 و 25 متر بر ثانیه و سرعت نامی 12 متر بر ثانیه و ژنراتور القایی جهت اتصال به توربین بادی، از نوع قفس سنجابی، 50 کیلووات، 380 ولت و 50 هرتز بوده است.



شکل 5- بلوک دیاگرام توربین بادی سرعت متغیر با کنترلر زاویه pitch [24].

کوپل مکانیکی توربین و ژنراتور از طریق یک جعبه‌دنده با نسبت تبدیل 1 به 7/5 صورت می‌گیرد تا سرعت در سمت ژنراتور بالاتر برود.

از آنجا که مدل‌سازی‌ها در بسته نرم‌افزاری Simulink انجام شده است، جهت استفاده از ژنراتور القایی در اتصال به توربین بادی، از مدل ارائه شده در جعبه ابزار SimPowerSystems استفاده شده است.

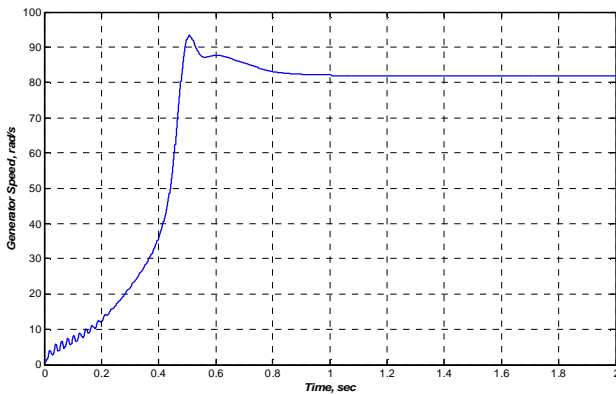
از میان مدل‌های اساسی ژنراتور القایی یعنی مدار معادل فازی که شامل روش امپدانس حلقه است و در [26] و [27] بهینه‌سازی شده است، ادیمیتانس گره که در [28] و [29] پیشنهاد شده و مدل محور dq بر پایه تئوری جامع ماشین که در [30] و [31] آمده است، مدل اخیر یعنی مدل محور dq انتخاب شده و مدل‌سازی‌ها بر اساس مراجع [32] و [33] انجام شده است؛ چرا که این مدل بر خلاف مدل‌های قبلی، در حالت گذرا نیز معتبر است.

مدل توربین-ژنراتور با استفاده از جعبه‌ابزار SimPowerSystems پیاده‌سازی شده و در ادامه پاسخ‌های مدل تحت سناریوهای

استاتور است. لذا طبق این رابطه سرعت سنکرون برای ژنراتور تحت مطالعه برابر 78/54 رادیان بر ثانیه خواهد بود. همانطور که دیده می‌شود، سرعت ماشین القایی از سرعت سنکرون بیشتر بوده که این مطلب مؤید ژنراتوری بودن ماشین است. همچنین، می‌توان از (14) برای محاسبه لغزش ژنراتوری استفاده کرد:

$$s = \frac{W_{syn} - W}{W_{syn}} \times 100 \quad (14)$$

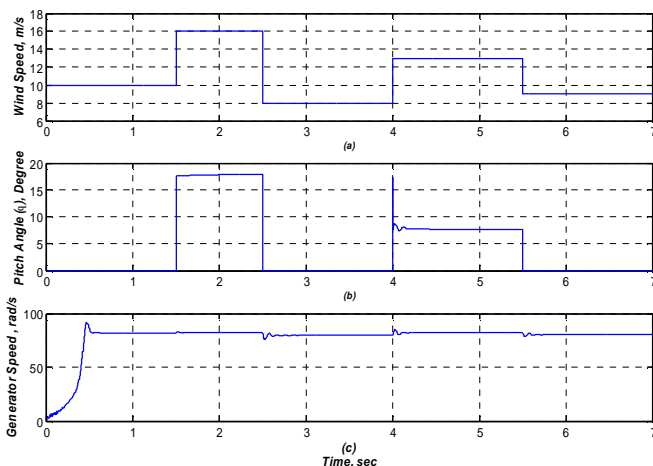
که برای حالت ژنراتوری ماشین القایی مورد مطالعه، مقدار لغزش برابر 4/3675- درصد محاسبه می‌شود.



شکل 10- سرعت ژنراتور از لحظه راه‌اندازی تا راه‌اندازی کامل و رسیدن به سرعت نامی.

### 3-4 پاسخ سیستم به تغییرات سرعت

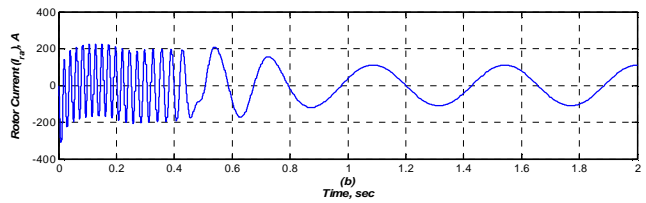
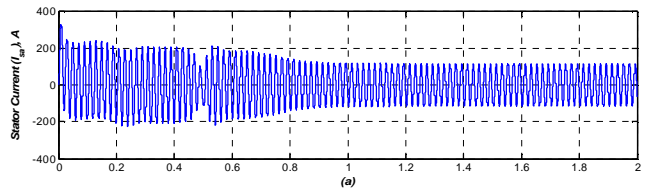
در این بخش، پاسخ‌های مدل برای سیستم توربین بادی سرعت متغیر در مواجهه با تغییرات سرعت باد ارائه شده است. شکل (11-الف) تغییرات سرعت باد و شکل (11-ب)، تغییرات زاویه pitch پره را نشان می‌دهد:



شکل 11- به ترتیب، تغییرات سرعت باد، تغییرات زاویه pitch و سرعت ژنراتور.

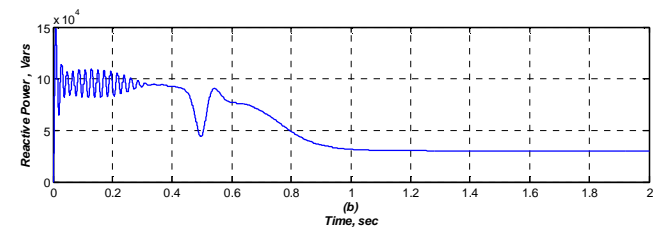
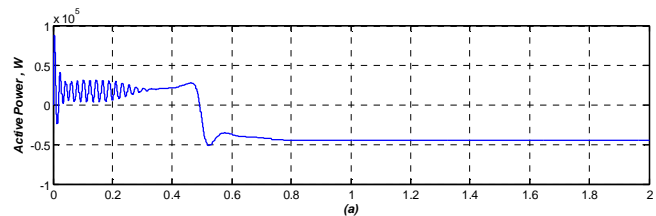
همان‌طور که انتظار می‌رود، در سرعت‌های بالاتر از مقدار نامی، کنترلر pitch پره عمل کرده و با افزایش زاویه pitch باعث کاهش توان تولیدی و تثبیت آن در مقدار نامی می‌شود. شکل (11-ج)، نیز سرعت ژنراتور را برحسب رادیان بر ثانیه نشان می‌دهد. از آنجا

## اولین کنفرانس انرژی‌های تجدیدپذیر و تولید پراکنده ایران



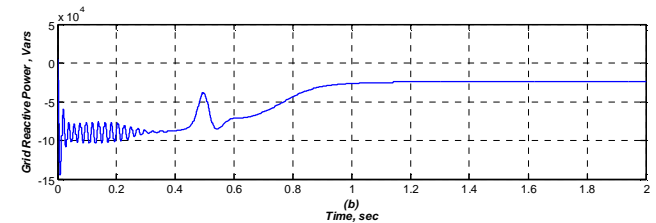
شکل 7- جریان‌های استاتور و روتور در زمان راه‌اندازی ژنراتور.

شکل (8) وضعیت توان‌های اکتیو و راکتیو ژنراتور را از لحظه ابتدای راه‌اندازی تا راه‌اندازی کامل (که حدود 0/8 ثانیه به طول می‌کشد) نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رود، ژنراتور القایی در لحظات اولیه، از شبکه توان اکتیو می‌گیرد تا راه‌اندازی شود. توان نامی ژنراتور بعد از راه‌اندازی کامل در حدود 50 کیلووات است. همچنین، ژنراتور القایی در تمام دوره کاری خود از شبکه توان راکتیو دریافت می‌کند.



شکل 8- توان اکتیو و راکتیو ژنراتور در لحظات راه‌اندازی

شکل (9) نیز نمایانگر توان راکتیو تزریقی توسط شبکه است:



شکل 9- توان راکتیو تزریقی توسط شبکه برای تامین نیاز ژنراتور القایی.

همانطور که در شکل (10) دیده می‌شود، سرعت ژنراتور در حالت پایدار به حدود 82 رادیان بر ثانیه می‌رسد؛ از طرفی می‌توان سرعت سنکرون را از (13) محاسبه کرد:

$$w_{syn} = \frac{4p}{P} f_{syn} \quad (13)$$

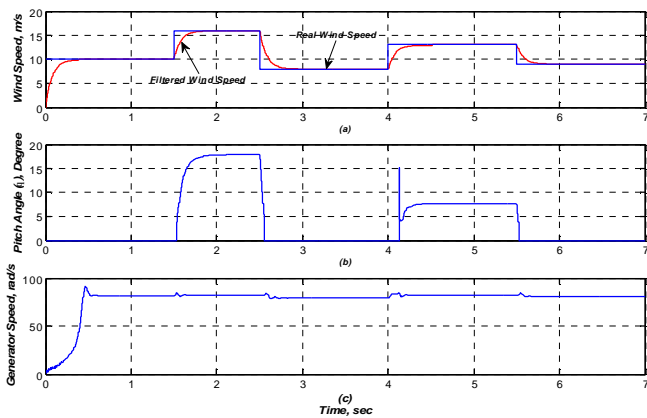
در این رابطه، P برابر تعداد قطب‌ها و  $f_{syn}$  برابر فرکانس جریان

مرتبه اول (با چشم‌پوشی اثر آن به روی خصوصیات توربین) به صورت زیر نوشت [35]:

$$H_{SF}(s) = \frac{1}{sb+1} = \frac{1}{\frac{s}{2pf_{cut}} + 1} \quad (16)$$

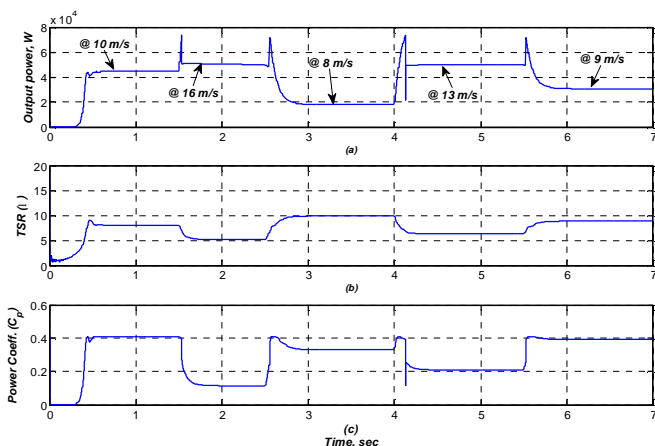
در این رابطه،  $f_{cut}$  برحسب هرتز برابر فرکانس قطع فیلتر است. سیگنال خروجی از فیلتر برابر سرعت باد معادلی است که نمایانگر اثرات متوسط باد روی کل سطح روتور می‌باشد. شکل (13-الف)، همان تغییرات باد قسمت قبل را که از یک فیلتر پایین گذر مرتبه اول عبور داده شده است و پاسخ‌های سیستم را برای تغییر زاویه pitch پره و سرعت ژنراتور نشان می‌دهد. این فیلتر فرکانس‌های بالاتر از 2 هرتز را حذف می‌کند.

شکل (13-ب) و (13-ج)، به ترتیب تغییرات زاویه pitch پره و سرعت ژنراتور را در حالت باد فیلترشده نشان می‌دهد:



شکل 13-ب به ترتیب، تغییرات سرعت باد واقعی و فیلترشده، تغییرات زاویه pitch پره و سرعت ژنراتور.

شکل (14) نیز به ترتیب توان خروجی توربین، تغییرات سرعت نوک پره و ضریب توان توربین را در این حالت نشان می‌دهد.



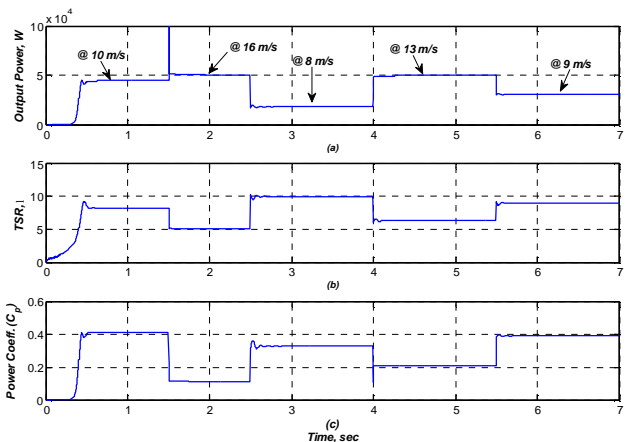
شکل 14-ب به ترتیب، توان تولیدی توربین، تغییرات سرعت نوک پره و ژنراتور مقادیر ضریب توان.

### ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا روابط حاکم بر توربین‌های بادی و اساس

که بار روی ژنراتور تغییر نکرده و کنترلی بر روی سرعت ژنراتور در زیر سرعت نامی صورت نگرفته است، لذا سرعت ژنراتور تغییرات زیادی نخواهد داشت؛ چرا که سیم‌پیچی استاتور ژنراتور به صورت مستقیم به شبکه متصل است و لذا سرعت سنکرون نمی‌تواند تغییر کند.

شکل (12)، دربردارنده سه منحنی دیگر مربوط به تغییرات سرعت باد گفته شده می‌باشد. شکل (12-الف) توان تولیدی توربین را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود، در سرعت‌های باد بالاتر از سرعت نامی (12 متربرثانیه) توان تولیدی در سطح 50 کیلووات ثابت مانده است. شکل (12-ب)، در بردارنده تغییرات سرعت نوک پره به تغییرات اعمال شده در سرعت باد است. این تغییرات را می‌توان هم‌ارز با تغییرات زاویه pitch پره جهت کاهش تولید توان در سطح توان نامی دانست. شکل (12-ج) نیز نشان‌دهنده تغییرات ضریب توان است. مشاهده می‌شود با تجاوز سرعت باد از مقدار نامی، ضریب توان کاهش یافته تا سطح توان تولیدی به مقدار نامی محدود شود.



شکل 12-ب به ترتیب، توان تولیدی توربین، تغییرات سرعت نوک پره به تغییرات باد و مقادیر ضریب توان.

از آنجا که جرم توربین و پره‌های آن در ابتدای ورود باد به صورت یک فیلتر پایین‌گذر عمل کرده و فرکانس‌های بالای تغییرات باد را حذف می‌کنند، لذا بهتر است تغییرات سرعت باد را با یک لختی مناسب نشان دهیم [34]. سطح روتور به خودی خود همانند یک فیلتر پایین‌گذر عمل می‌کند که تابع انتقال آن به صورت زیر است [35]:

$$H_{SF}(s) = \frac{\sqrt{2} + bs}{(\sqrt{2} + bs\sqrt{a}) \cdot (1 + b/\sqrt{2} \cdot s)} \quad (15)$$

در این رابطه،  $b = g.R/V$ ،  $a = 0.55$  و  $R$  برحسب متر برابر شعاع پره توربین،  $V$  برحسب متر بر ثانیه سرعت متوسط باد در ارتفاع مرکز توربین (HUB) و  $g$  ضریب کاهش در طول دیسک است ( $g = 1.3$ ). تابع انتقال (15) را می‌توان به فرم تابع انتقال

- [12] A. Feijoo, J. Cidras, C. Carillo, "A third order model for the doubly-fed induction machine," *Elect. Power syst. Res.*, Vol. 56, pp. 121-127, 2000.
- [13] Z. Litifua, K. Nagasaka, and C.K. Chu, "Steady state and transient operation analysis of wind power systems," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 27, pp. 284-292, May. 2005.
- [14] J. G. Slootweg, S. W. H. de Haan, H. Polinder, and W. L. Kling, "General model for representing variable speed wind turbines in power system dynamics simulations," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 18, pp. 144-151, Feb. 2003.
- [15] K.C. Divya and P.S. Nagendra Rao, "Models for wind turbine generating systems and their application in load flow studies," *Electric Power Systems Research*, vol.76, pp.844-856, Jun. 2006.
- [16] V. Akhmatov, H. Knudsen, A. H. Nielsen, J. K. Pedersen, and N. K. Poulsen, "Modeling and transient stability of large wind farms," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 25, pp. 123-144, Feb. 2003.
- [17] G. Tapia, A. Tapia, and J. X. Ostolaza, "Two Alternative Modelling Approaches for the Evaluation of Wind Farm Active and Reactive Power Performances," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 21, pp. 909-920, Dec. 2006.
- [18] D. J. Trudnowski, A. Gentile, J. M. Khan, E. M. Petritz, "Fixed-speed wind-generator and wind-park modeling for transient stability studies," *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 19, pp. 1911-1917, Nov. 2004.
- [19] M. Chinchilla, S. Arnaltes, and J. C. Burgos, "Control of Permanent-Magnet Generators Applied to Variable-Speed Wind-Energy Systems Connected to the Grid," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 21, pp. 130-135, Mar. 2006
- [20] M. R. Patel, *Wind and Solar Power Systems*, CRC Press LLC, 1999.
- [21] J.G. Slootweg, "Wind power: modeling and impact on power system dynamics," PhD dissertation, Dept. Elect. Eng., Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 2003.
- [22] S.R. Guda, "Modeling and power management of a hybrid wind-microturbine power generation system," MS thesis, Montana State University, 2005.
- [23] *Fuel Cell Handbook (Sixth Edition)*, EG&G Services, Inc., Science Applications International Corporation, DOE, Office of Fossil Energy, National Energy Technology Lab, Nov. 2002.
- [24] Caisheng Wang, "Modeling and control of a hybrid Wind/Photovoltaic/Fuel cell distributed generation systems", Doctor of Philosophy Dissertation, Dept. Elect. Eng., Montana State University, Bozeman, Montana, USA, 2006.
- [25] Dawit Seyoum, Colin Grantham and M. F. Rahman, "The dynamic characteristics of an isolated self-excited induction generator driven by a wind turbine," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol.39, no. 4, pp.936-944, July/August 2003.
- [26] S. S. Murthy, O. P. Malik, A. K. Tandon, "Analysis of self excited induction generators," *Proc. Inst. Elect. Eng.*, pt. C, Vol. 129, No. 6, pp. 260-265, Nov. 1982.
- [27] N. H. Malik, A. H. Al-Bahrani, "Influence of the terminal capacitor on the performance characteristics of a self-excited induction generator," *Proc. Inst. Elect. Eng.*, pt. C, Vol. 137, No. 2, pp. 168-173, Mar. 1990
- [28] L. Ouazene, G. Mcpherson Jr, "Analysis of the isolated induction generator," *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-102, No. 8, pp. 2793-2798, Aug. 1983.
- [29] T. F. Chan, "Capacitance requirements of self-excited induction generators," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 8, no. 2, pp. 304-311, June 1993.
- [30] J. M. Elder, J. T. Boys and J. L. Woodward, "Self-excited induction machine as a small low-cost generator," in *Proc. Inst. Elect. Eng.*, pt. C, vol. 131, no. 2, pp. 33-41, Mar. 1984.
- [31] C. Grantham, D. Sutanto and B. Mismail, "Steady-state and transient analysis of self-excited induction generators," in *Proc. Inst. Elect. Eng.*, pt. B, vol. 136, no. 2, pp. 61-68, Mar. 1989.
- [32] Krause, P.C., O. Wasynczuk, and S.D. Sudhoff, *Analysis of Electric Machinery*, IEEE Press, 2002.
- [33] Mohan, N., T.M. Undeland, and W.P. Robbins, *Power Electronics: Converters, Applications, and Design*, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1995, Section 8.4.1.
- [34] G. H. Riahy, M. abedi, "Short term wind speed forecasting for wind turbine applications using linear prediction method", *Renewable Energy*, Vol. 33, Issue 1, pp. 35-41, 2008.
- [35] A. Kulka, "Pitch and torque control of variable speed wind turbines", Master of Science Thesis, Dept. of Electric Power Eng., Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden, 2004.

کنترل توان آن‌ها شرح داده شد. سپس مدل یک توربین بادی سرعت متغیر با کنترلر زاویه pitch پره و با ژنراتور القایی قفس سنجابی ارائه و با تشریح نواحی مختلف کاری توربین بادی، به استراتژی کنترل فعال توان از طریق کنترلر زاویه pitch پره پرداخته شد. در گام بعد با انتخاب ضرایب مناسب دسته منحنی‌های  $C_p - I$  تشکیل شد و برای یک زاویه نمونه با استفاده از منحنی‌های مذکور، ضریب توان مناسب با شرایط حاکم تعیین گشت. سپس فرآیند راه‌اندازی ژنراتور القایی و تبادل توان آن با شبکه از لحظه راه‌اندازی تا رسیدن به سرعت نامی مورد تحلیل واقع شد. گام بعدی، مطالعه عملکرد مدل از جمله تغییرات زاویه pitch پره، توان تولیدی، نسبت سرعت نوک پره و ضریب توان تحت سناریوهای مختلف و سرعت‌های متفاوت وزش باد بوده و در نهایت نیز به منظور دخیل کردن عوامل غیر ایده‌آل کننده، از جمله جرم پره‌ها و توربین و دستیابی به جواب واقعی‌تر، این تحلیل بار دیگر با در نظر گرفتن تابع انتقال سطح روتور به عنوان یک فیلتر پایین‌گذر برای ورودی سرعت باد انجام و نتایج آن ارائه گشت.

## ۶- مراجع

- [1] "A review of surface engineering issues critical to wind turbine performance", N. Dalili, A. Edrissy, R. Carriveau, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 428.
- [2] Management of power excess in wind turbine system", Orlando, N.A.; Liserre, M.; Dell'Aquila, A.; *Power Electronics and Applications*, 2009. EPE '09. 13th European Conference on 8-10 Sept. 2009 Page(s):1 - 10
- [3] Modeling of large wind farm systems for dynamic and harmonics analysis, Jun Li; Samaan, N.; Williams, S.; *Transmission and Distribution Conference and Exposition*, 2008. T&D. IEEE/PES 21-24 April 2008 Page(s):1 - 7
- [4] M. N. Mansouri, M. F. Mimouni, B. Benghanem, and M. Annabi, "Simulation model for wind turbine with asynchronous generator interconnected to the electric network," *Renewable Energy*, vol. 29, pp. 421-431, Mar. 2004.
- [5] P. Ledesma and J. Usaola, "Doubly fed induction generator model for transient stability analysis," *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol.20, pp. 388-397, Jun. 2005
- [6] Lianwei Jiao, Boon-Teck Ooi, Geza Joos, and Fengquan Zhou, "Doublyfed induction generator (DFIG) as a hybrid of asynchronous and synchronous machines," *Electric Power Systems Research*, vol. 76, pp. 33-37, Sep. 2005.
- [7] J.B. Ekanayake, L. Holdsworth, and N. Jenkins, "Comparison of 5th order and 3rd order machine models for doubly fed induction generator (DFIG) wind turbines," *Electric Power Systems Research*, vol. 67, pp. 207-215, Dec. 2003.
- [8] Y. Lei, A. Mullane, G. Lightbody, R. Yacamini, "Modeling of the wind turbine with a doubly fed induction generator for grid integration studies," *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 21, pp. 257-264, Mar. 2006.
- [9] M. R. Behnke1 and E. Muljadi, "Reduced order dynamic model for variable-speed wind turbine with synchronous generator and full power conversion topology," in *Proc. 2005 Future Power Systems International Conf.*, pp. 1-6.
- [10] M.Martinsa, A. Perdana, P. Ledesma, E. Agneholma, O. Carl, "Validation of fixed speed wind turbine dynamic models with measured data," *Renewable Energy*, Vol. 32, pp. 1301-1316, Jul. 2007.
- [11] S. K. Salman, A.L.J. Teo, "Windmill modeling consideration and factors influencing the stability of a grid-connecte wind power-based embedded generator," *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 18, pp. 793-802, May. 2003.