







دانشکده برق و رباتیک

گروه کنترل

پایان نامه کارشناسی ارشد

کنترل تطبیقی زاویه پره توربین بادی برای تنظیم توان استحصالی

روح اله موقر مقدم

استاد راهنما:

آقای دکتر حسین قلی زاده نرم

بهمن ماه ۱۳۹۳

## تعهد نامه

اینجانب روح اله موقرمقدم دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته برق گرایش کنترل دانشکده برق و رباتیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه کنترل تطبیقی زاویه پره توربین بادی برای تنظیم توان استحصالی تحت راهنمایی آقای دکتر حسین قلی زاده نرم متعهد می شوم .

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است .
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است .
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید .
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها ) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است .
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است .

### تاریخ

### امضای دانشجو

#### مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است ) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد

\* متن این صفحه نیز باید در ابتدای نسخه های تکثیر شده پایان نامه وجود داشته باشد.

## چکیده:

در این پایان نامه هدف تثبیت سرعت توربین باد در مقدار نامی خود در ناحیه سوم بهره برداری توربین (ناحیه محدود سازی توان) است که این کار با تغییر زاویه پره توربین انجام می شود. ابتدا روشهای تطبیقی به کار گرفته شده برای کنترل توربین باد در این ناحیه بررسی می شود. در میان این بررسی ها استفاده از رگولاتور خود تنظیم کمتر به چشم می خورد و در تمام آنها از شناسایی گسسته بهره گرفته شده است. با توجه به مزایای خوب رگولاتورهای خود تنظیم از طرفی و شناسایی پیوسته از طرف دیگر، در این پژوهش یک رگولاتور خود تنظیم به روش غیر مستقیم به صورت پیوسته طراحی و پیاده سازی می شود و نتایج آن با یک رگولاتور خود تنظیم دیگر که به صورت گسسته پیاده سازی شده است مقایسه می شود که پیاده سازی پیوسته نتایج بهتری را نشان می دهد.

کلمات کلیدی: توربین باد، زاویه پره، کنترل کننده تطبیقی، رگولاتور خود تنظیم

## فهرست مطالب:

فصل اول: مقدمه ای بر انرژی های نو، طرح مساله و پیشینه تحقیق.....	۱
۱-۱ مقدمه.....	۲
۲-۱ طرح مساله.....	۳
۳-۱ پیشینه تحقیق.....	۷
۱-۳-۱ روشهای مبتنی بر PID تطبیقی.....	۱۰
۲-۳-۱ روشهای تطبیقی غیر خطی.....	۱۲
۳-۳-۱ روشهای تطبیقی هوشمند.....	۱۳
۴-۳-۱ روشهای تطبیقی کلاسیک.....	۱۶
فصل دوم: ساختار توربین باد.....	۱۹
۱-۲ مقدمه ای بر انرژی باد.....	۲۰
۲-۲ اجزای توربین باد.....	۲۲
۳-۲ مبدل AC به DC.....	۲۵
۴-۲ تکنولوژی ساخت.....	۲۶
۵-۲ عملکرد کلی توربین باد.....	۳۰
فصل سوم: مدلسازی، روابط ریاضی و معرفی سیستم.....	۳۳
۱-۳ مقدمه.....	۳۴
۲-۳ مدل آیرودینامیک پره.....	۳۴
۳-۳ ردیابی حداکثر توان.....	۳۷
۴-۳ نواحی کاری توربین و اهداف کنترلی آن.....	۳۹

۴۰	.....	۵-۳ مدل ریاضی ژنراتور.....
۴۲	.....	۶-۳ کنترل توان در ژنراتورهای مغناطیس دائم
۴۴	.....	۷-۳ زاویه پره.....
۴۶	.....	۸-۳ مکانیزم عملگر زاویه پره.....
۴۹	.....	۹-۳ زاویه پره در راه اندازی.....
۵۰	.....	۱۰-۳ معرفی سیستم موجود.....
۵۵	.....	<b>فصل چهارم: طراحی کنترل کننده پیشنهادی.....</b>
۵۶	.....	۱-۴ مقدمه .....
۵۶	.....	۲-۴ شناسایی سیستم بصورت پیوسته.....
۶۶	.....	۱-۲-۴ تحریک پایا توسط سیگنال ورودی.....
۶۸	.....	۲-۲-۴ شناسایی در حلقه بسته.....
۷۰	.....	۳-۴ طراحی و پیاده سازی کنترل کننده به صورت پیوسته.....
۷۵	.....	۱-۳-۴ نتایج شبیه سازی به صورت پیوسته .....
۷۹	.....	۴-۴ طراحی شناساگر و کنترلگر به صورت گسسته.....
۸۱	.....	۱-۴-۴ نتایج شبیه سازی به صورت گسسته.....
۸۷	.....	<b>فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات.....</b>
۸۸	.....	۱-۵ نتیجه گیری .....
۹۰	.....	۲-۵ پیشنهادات.....
۹۳	.....	<b>منابع و مراجع .....</b>

## فهرست اشکال:

- شکل ۱-۱ نواحی کاری توربین باد ..... ۴
- شکل ۱-۲ کنترل زاویه بر اساس فیدبک سرعت باد ..... ۷
- شکل ۱-۳ زاویه گام بر حسب سرعت باد ..... ۸
- شکل ۱-۴ کنترل زاویه بر اساس فیدبک سرعت ژنراتور ..... ۸
- شکل ۱-۵ کنترل زاویه بر اساس فیدبک توان ژنراتور ..... ۹
- شکل ۱-۲ نمودار رشد تولید برق توسط توربین باد تا سال ۲۰۰۹ ..... ۲۲
- شکل ۲-۲ توربین بادی محور افقی و محور عمودی ..... ۲۳
- شکل ۲-۳ ساختار شماتیک یک توربین باد ..... ۲۵
- شکل ۲-۴ مدار معادل مبدل ..... ۲۶
- شکل ۲-۵ نقطه کار ژنراتور دور ثابت (۱) و دور متغیر (۲) ..... ۲۷
- شکل ۲-۶ ارتباط یک توربین بادی دور متغیر از طریق مبدلها با شبکه ..... ۲۹
- شکل ۳-۱ یک نمونه منحنی ضریب توان  $C_p$  بر حسب  $\lambda$  و  $\beta$  ..... ۳۵
- شکل ۳-۲ نمایش دیگری از منحنی ضریب توان برای یک نمونه توربین ..... ۳۶
- شکل ۳-۳ منحنی توان بر حسب سرعت باد در دو حالت ایده آل و عملی ..... ۳۷
- شکل ۳-۴ مشخصه توان مکانیکی توربین به صورت تابعی از سرعت دوران پره ها ..... ۳۸
- شکل ۳-۵ نواحی کاری توربین بادی ..... ۳۹
- شکل ۳-۶ ساختار کنترل FOC ..... ۴۳
- شکل ۳-۷ حلقه های کنترلی محور  $d$  و  $q$  ..... ۴۴
- شکل ۳-۸ تغییرات زاویه پره ..... ۴۵



- شکل ۳-۹ مکانیزم تنظیم پره ها با عملگر هیدرولیکی..... ۴۷
- شکل ۳-۱۰ مکانیزم تنظیم زاویه پره ها با عملگر الکتریکی..... ۴۷
- شکل ۳-۱۱ مدل دیاگرام بلوکی عملگر زاویه گام هیدرولیکی ..... ۴۸
- شکل ۳-۱۲ مدل کلی دیاگرام بلوکی عملگر پره از نوع الکتریکی ..... ۴۸
- شکل ۳-۱۳ مجموعه توربین بادی، ژنراتور و مبدل مرتبط با شبکه..... ۵۰
- شکل ۳-۱۴ منحنی توان توربین بر حسب VDC مختلف و منحنی MPPT ..... ۵۱
- شکل ۴-۱ انجام آزمون ورودی خروجی برای به دست آوردن ساختارهای شناسایی..... ۵۹
- شکل ۴-۲ تابع تبدیلهای تخمین زده شده برای سیستم..... ۶۰
- شکل ۴-۳ استفاده از فیلتر پایدار برای رگسورها در حالت شناسایی پیوسته..... ۶۳
- شکل ۴-۴ سیگنالهای سرعت توربین، زاویه پره و سرعت باد..... ۶۷
- شکل ۴-۵ پارامترهای شناسایی شده به ترتیب  $a$ ،  $b$ ،  $k_1$  و  $k_2$  ..... ۶۹
- شکل ۴-۶ شماتیک دیاگرام رگولاتور خود تنظیم..... ۷۴
- شکل ۴-۷ نتایج شبیه سازی افزایش سرعت باد از 10m/s تا 20 m/s ..... ۷۶
- شکل ۴-۸ نتایج شبیه سازی کاهش سرعت باد از 20m/s تا 10m/s ..... ۷۷
- شکل ۴-۹ عملکرد کنترل کننده در زمان تغییر مد ناحیه کاری توربین باد..... ۷۸
- شکل ۴-۱۰ پارامترهای شناسایی شده  $a_0$ ،  $a_1$ ،  $a_2$  و  $b_0$ ،  $b_1$ ،  $b_2$  در حالت گسسته..... ۸۱
- شکل ۴-۱۱ سیگنال خطای شناسایی (error) و تخمین خروجی  $(\widehat{WT})$  ..... ۸۲
- شکل ۴-۱۲ نتایج پیاده سازی گسسته با افزایش سرعت باد از 10m/s تا 20m/s ..... ۸۳
- شکل ۴-۱۳ نتایج پیاده سازی گسسته با افزایش سرعت باد از 10m/s تا 20m/s ..... ۸۴

## فهرست جداول:

جدول ۱-۳ متغیرهای مدل ژنراتور..... ۴۰

فصل اول:

مقدمه ای بر انرژی های نو،

طرح مساله و

پیشینه تحقیق

با توجه به پیشرفتهای سریع تکنولوژی در دهه های اخیر ، مهمترین چالش روبروی جوامع و دولتهای مختلف تامین انرژی است. قبل از بحران انرژی پیش آمده در دهه ۷۰ میلادی شاید انرژی های نو و تجدید پذیر فقط به عنوان پژوهش به آن نگریسته می شد اما پس از این واقعه، تمام کشورهای پیشرفته به فکر تامین جایگزین جدی یا تامین بخشی از انرژی خود توسط انرژیهای نو و تجدید پذیر افتادند.

انرژی های تجدید پذیر شامل بازه وسیعی از جمله استفاده از انرژی خورشید (سلولهای خورشیدی، پانلهای فتوولتاییک)، استفاده از انرژی امواج دریا، استفاده از انرژی باد (توربین های بادی، آسیاب های بادی)، استفاده از انرژیهای درونی زمین (مانند نیروگاههای زمین گرمایی) و ... می شود. انرژی تجدید پذیر همان طور که از نامش پیداست مانند دیگر منابع انرژی مثل سوختهای فسیلی نگرانی از بابت اتمام آن وجود ندارد یا بازه اتمام آن به قدری طولانی است که عملاً می توان آنرا قابل تجدید دانست. از طرف دیگر بر خلاف سوختهای فسیلی منبع انرژی معمولاً در دسترس و بدون هزینه اضافه است.

در میان این منابع انرژی، شاید یکی از پراهمیت ترین و مقرون به صرفه ترین ها، استفاده از انرژی باد باشد. با توجه به اینکه انرژی قابل استحصال با توان سوم سرعت باد نسبت دارد، بنابراین با نصب توربین باد در مناطق مناسب می توان از این منبع گسترده بهترین استفاده را نمود. در مقایسه با دیگر منابع تجدید پذیر ، انرژی باد می تواند حجم بیشتر و قابل قبول تری توان تامین کرده به نحوی که با استفاده از تعداد بیشتر این توربین ها یا اصطلاحاً مزارع باد بتوان به مقدار بیشتری از توان تولیدی رسید. در دهه های اخیر شرکتهای متعددی توربین باد به منظور تولید انرژی الکتریکی ساخته اند که تا امروز حداکثر توان نامی قابل استحصال آن به

8 MW رسیده است و با استفاده از مزارع بادی این نیروگاهها می تواند در تامین برق شبکه نقش مهمتری ایفا کند. مزیت دیگر این روش برای تولید برق این است که در صورت بی برقی کل شبکه<sup>۱</sup> با توجه به عدم نیازمندی این نوع نیروگاه به سوخت فسیلی و یا راه انداز اولیه مانند دیزلها، می تواند نقطه شروع مناسب برای راه اندازی مجدد شبکه باشد و زمان این بی برقی را کاهش دهد.

اخیراً نیز در کشور ایران کارهای پژوهشی در این زمینه انجام شده است و از طرفی استفاده از توربین بادی نیز کم کم در شبکه تولید برق در حال شروع شدن است. تا قبل از این تنها مزارع بادی موجود در کشور در بینالود نیشابور و منجیل بوده که همه آنها توربین های کمتر از 1MW و از نوع دور ثابت بوده است. اما اخیراً در تاکستان قزوین توربین های 2.5MW توسط شرکت مپنا نصب شده است که قرارداد انتقال تکنولوژی این توربین ها که ساخت شرکت Furlander آلمان است با شرکت مپنا منعقد شده و کار ساخت پره ها و دیگر ادوات آن نیز در این شرکت داخلی در حال انجام است. تمام اینها نشان از عزم جدی مدیریت انرژی کشور برای استفاده از توربین های بادی به منظور تامین بخشی از برق شبکه است.

## ۱-۲ طرح مساله

توربین های بادی را به طور کلی می توان به دو نوع دور ثابت و دور متغیر تقسیم کرد. در نوع دور ثابت ژنراتور مستقیماً به شبکه متصل می شود و دور ژنراتور - و طبیعتاً دور توربین - با فرکانس شبکه متناسب خواهد شد. در نوع دور متغیر خروجی ژنراتور ابتدا وارد یک طبقه مبدل به عنوان یکسوساز شده و بعد توسط یک رابط DC به طبقه مبدل بعدی که نقش مبدل DC به

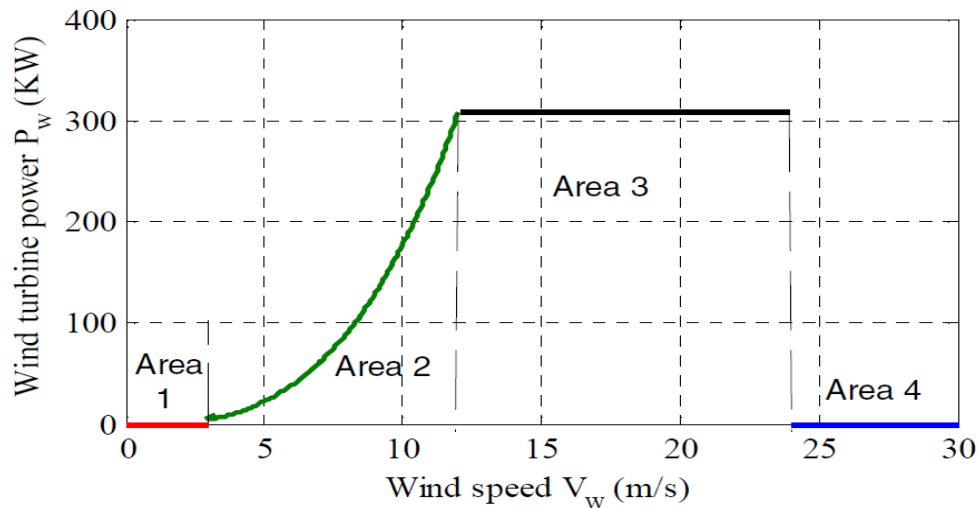
---

<sup>1</sup> Black Out

AC را بازی می کند وصل می شود. این نحوه ی اتصال این حسن را دارد که توربین می تواند در دوری غیر از فرکانس شبکه بچرخد که بیشتر توربین های امروزی از این نوع هستند.

### ۱-۲-۱ نواحی کاری توربین باد دور متغیر

برای توربین های بادی دور متغیر عملاً نواحی کاری مختلف تعریف می شود که در شکل زیر نشان داده شده است:



شکل ۱-۱ نواحی کاری توربین باد [۱]

۱- ناحیه ۱: قبل از سرعت قطع پایین ( $V_{cut-in}$ )، در این ناحیه سرعت باد کمتر از حداقل سرعت مورد نیاز طراحی است که توان الکتریکی تولید نمی شود.

۲- ناحیه ۲: در این ناحیه سرعت باد از سرعت قطع پایین تا سرعت نامی تغییر می کند، در این ناحیه برای هر سرعت باد معین، بایستی سرعت توربین مقدار مشخص شده ای باشد که حداکثر راندمان را داشته باشیم، بنابراین مساله کنترلی در اینجا رسیدن به حداکثر توان

است که این کار با تنظیم سرعت توربین در مقادیر مشخص شده به ازای سرعت باد صورت خواهد گرفت.

۳- ناحیه ۳: در این ناحیه سرعت باد از سرعت نامی تا سرعت قطع بالا ( $V_{cut-out}$ )، تغییر خواهد کرد. در این ناحیه برای این که توربین باد و اجزای آن آسیبی نبیند و از نقطه کار نامی فاصله نگیرد باید توان آیرودینامیکی ورودی به توربین محدود شود. با این کار تمام متغیرهای مشخصه توربین مانند سرعت، توان و گشتاور در محدوده مجاز باقی می ماند. در مقایسه با توربین دور ثابت که چنین قابلیتی ندارد با این کار ناحیه استحصال توان گسترش داده می شود، این درحالی است که در توربین های دور ثابت در صورت افزایش سرعت باد در محدوده ای بیشتر از حد نامی توربین شات دان می شد. در این قسمت همانطور که مشخص است مساله کنترلی ردیابی مقدار مرجع است که از حد مجاز فراتر نرود. این مقدار مرجع می تواند سرعت، گشتاور و یا توان باشد.

۴- ناحیه ۴: بعد از سرعت  $V_{cut-out}$ ، در این ناحیه سرعت از حد مجاز قابل تحمل مجموعه توربین باد بیشتر شده و به لحاظ طراحی امکان بهره برداری از سیستم در این شرایط وجود ندارد و در این حالت توربین خاموش شده، و پره ها در زاویه ای قرار می گیرد که نیروی آیرودینامیکی باد حداقل شده و ترمز مکانیکی نیز فعال می شود. در این وضعیت سرعت های شدید باد به توربین آسیبی نخواهد رساند و چرخش پره ها متوقف خواهد بود.

موضوع این پایان نامه متمرکز بر ناحیه ۳ یعنی محدود سازی توان خواهد بود. در این ناحیه همانطور که بیان شد سرعت باد از سرعت نامی تا سرعت قطع بالا تغییر خواهد کرد که در این توربین باد از  $10 \text{ m/s}$  تا

20 m/s خواهد بود. برای محدود کردن توان بایستی زاویه پره<sup>۲</sup> های توربین باد به نحوی تغییر کند که نیروی آیرودینامیکی جابجا کننده<sup>۳</sup> پره ها در محدوده نامی باقی بماند.

در ناحیه کاری ۲ یعنی بخش استحصال توان حداکثر بایستی نیروی آیرودینامیکی دریافتی از باد حداکثر باشد. به همین منظور زاویه پره در موقعیت صفر درجه و یا عددی نزدیک به آن خواهد بود. اما در ناحیه ۳ که هدف محدود کردن توان در حد مجاز است بایستی زاویه پره مقدار مثبتی داشته باشد، به همین منظور متناسب با تغییرات سرعت باد زاویه پره تغییرات مثبت خواهد داشت به عنوان مثال بین ۰ تا ۲۰ درجه.

در این قسمت بایستی سیستم کنترل به نحو مطلوب و در حداقل زمان ممکن بهترین عملکرد را از خود نشان دهد تا کیفیت توان تولیدی در حد مطلوب باقی بماند و همان طور که قبلاً هم به آن اشاره شد آسیبی به سیستم (ناشی از افزایش متغیرها از نقطه کارنامی) وارد نشود.

با توجه با ماهیت اتفاقی باد و پیچیدگی مدل های آیرودینامیکی مطرح شده برای توربین باد در ناحیه ۳ و بعضاً موارد ناشناخته که در مدل کردن توربین دشواری هایی پدید می آورد، یک دسته از کنترلگرهایی که برای این سیستم مطلوب تر به نظر می رسد استفاده از روشهای تطبیقی است. در روشهای تطبیقی معمولاً شناسایی صورت گرفته و بر اساس آن پارامترهای کنترلگر به روز می شود، استفاده از این دسته کنترل کننده ها این حسن را دارد که در صورت داشتن دینامیک مدل نشده و یا تغییر رفتار سیستم ناشی از تغییر نقطه کار و اغتشاشات وارده به سیستم، شناسایی سیستم صورت گرفته نیز تغییر کرده و کنترل کننده نیز در حداقل زمان خود را با شرایط جدید وفق می دهد، به همین علت انتظار داریم با این روش عملکرد بهتری نسبت به کنترل کننده های کلاسیک داشته باشیم.

---

<sup>2</sup> Pitch Angle

<sup>3</sup> Lift

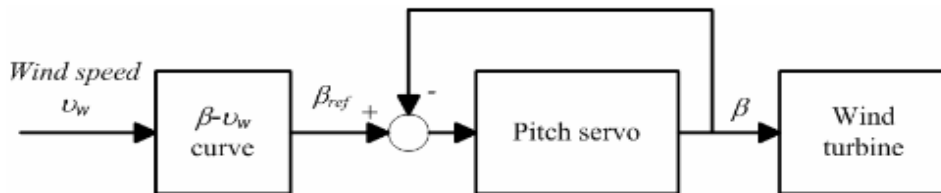


در این پایان نامه ابتدا شناسایی سیستم صورت می گیرد، زاویه پره به عنوان ورودی و سرعت توربین یا WT به عنوان خروجی لحاظ می شود. پس از آشکار شدن پارامترهای تابع تبدیل لحظه ای سیستم، پارامترهای کنترل کننده مشخص می شود و با اعمال این پارامترها به کنترل کننده حلقه کنترلی کامل می شود. برای کامل بودن این بحث، شناسایی و طراحی کنترل کننده در هر دو حالت پیوسته و گسسته انجام می شود.

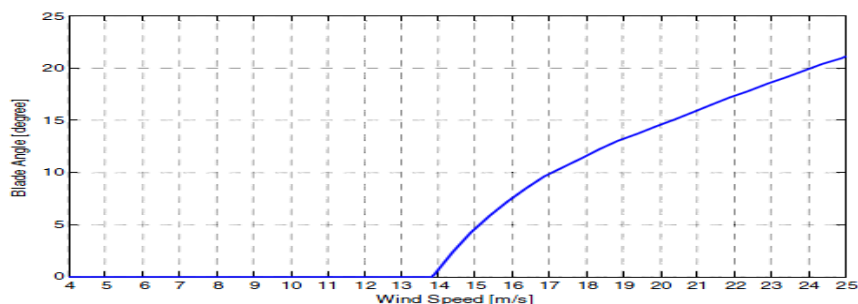
### ۳-۱ پیشینه تحقیق

قبل از شروع بررسی کارهای صورت گرفته در این زمینه ابتدا بایستی به دسته بندی ساختاری کنترل زاویه پرداخت. برای محدود سازی توان در ناحیه سوم کاری توربین باد، سیستم کنترل می تواند متغیرهای مختلفی از فرایند را مد نظر قرار داده و کنترل کند. این متغیرها می تواند شامل توان، سرعت، گشتاور، سرعت باد و ترکیب سرعت و توان است. در واقع هر کدام از اینها به عنوان متغیر اصلی خواهد بود و سیستم کنترل تلاش در ردیابی مقدار مرجع این پارامتر خواهد نمود که در زیر به اختصار به آن اشاره می شود:

الف) استفاده از سرعت باد: در شکل ۲-۱ مقدار مناسب زاویه پره ( $\beta$ ) براساس سرعت باد و از طریق منحنی مشخص کننده زاویه گام برحسب سرعت باد تنظیم می شود. این روش کنترلی در صورتی که سرعت باد مستقیماً قابل اندازه گیری باشد کاربردی است [۲]

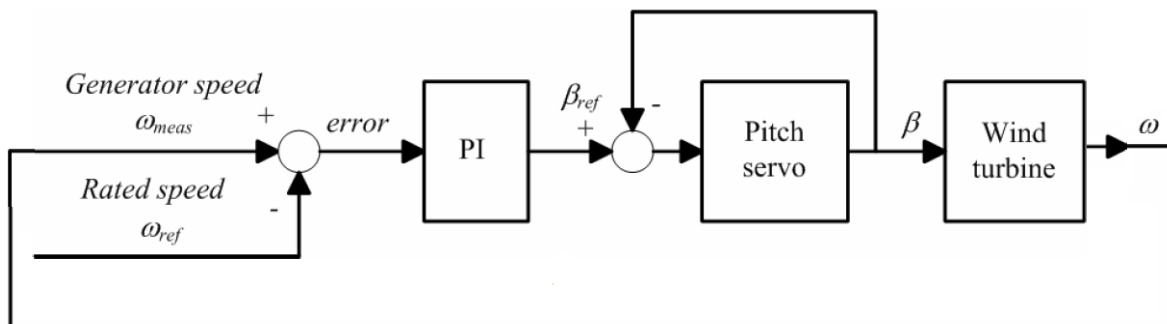


شکل ۲-۱ کنترل زاویه بر اساس فیدبک سرعت باد [۲]



شکل ۳-۱ زاویه گام بر حسب سرعت باد [۲]

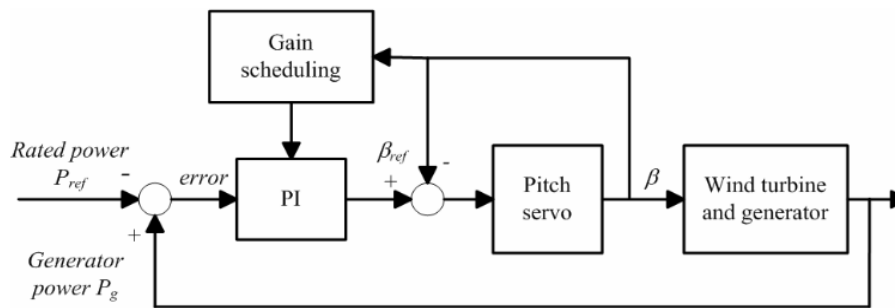
ب) استفاده از سرعت روتور ژنراتور: در این روش سرعت روتور با مقدار مرجع آن مقایسه شده و براساس سیگنال خطای ارسالی به کنترلر PI، مقدار مرجع زاویه گام تعیین می شود. بلوک دیاگرام کنترلی این روش در شکل ۴-۱ آمده است [۲].



شکل ۴-۱ کنترل زاویه بر اساس فیدبک سرعت ژنراتور [۲]

پ) استفاده از فیدبک توان ژنراتور: سیگنال خطای حاصل از مقایسه توان ژنراتور با مقدار مرجع آن به کنترلر PI فرستاده و مقدار مرجع زاویه پره تعیین می شود. تغییرات غیرخطی زاویه پره در مقایسه با سرعت باد به خصوص برای سرعت‌های بالای باد، لزوم استفاده از کنترلگرهای غیرخطی را برای تنظیم زاویه گام ایجاد می کند. حساسیت گشتاور آیرودینامیکی به زاویه پره با نزدیک شدن سرعت باد به مقدار نامی خود، کاهش می یابد، بنابراین لازم است بهره کنترلر بالا باشد تا اثر تغییرات زاویه گام بر گشتاور افزایش یابد. غالباً تغییرات حساسیت گشتاور با تغییر زاویه گام رابطه خطی دارد و با تغییر بهره کنترلر خطی قابل جبران است.

لذا از جدول‌بندی بهره برای تغییر بهره کنترلگر استفاده می‌شود. بهره کنترلگر برخلاف تغییر زاویه گام، تغییر می‌یابد. به عبارت دیگر با افزایش زاویه گام بهره کاهش یافته و با کاهش آن بهره کنترلگر افزایش می‌یابد. بلوک دیاگرام کنترلی این روش در شکل ۵-۱ آمده است. عملکرد سیستم ارائه شده در شکل ۵-۱ در صورتی که دینامیک سیستم به مرور زمان و به علل مختلف تغییر نکند، قابل قبول است اما به دلیل تغییر دینامیک سیستم لازم است جدول بهره پس از گذشت مدتی اصلاح شود [۲]



شکل ۵-۱ کنترل زاویه بر اساس فیدبک توان ژنراتور [۲]

برخی از محدود سازندگان توربین باد نیز از ترکیب هر دو سیگنال توان و سرعت استفاده کرده اند. استفاده از سرعت باد به عنوان مبنا برای عملکرد کنترل زاویه این ایراد را دارد که اندازه گیری باد به صورت دقیق امکان پذیر نیست و اگر هم بخواهیم چنین کاری انجام دهیم هزینه بسیار زیادی خواهد داشت، استفاده از فیدبک توان هم معیار خوبی برای کنترل زاویه نمی‌تواند باشد زیرا دینامیکهای موثر در سیگنال توان بسیار سریع تغییر می‌کند در حالی که دینامیکهای سیستم کنترل زاویه به علت لختی‌های موجود در سیستم و اینرسی پره‌ها و هاب، کند هستند. به لحاظ تجربی هم استفاده از پارامتر توان به تنهایی برای کنترل زاویه نتایج خوبی در بر نداشته است. گزینه بهتر استفاده از فیدبک سرعت برای کنترل زاویه پره هاست، در این حالت با توجه به اینکه کنترل سرعت نهایتاً منجر به کنترل کیفیت توان هم می‌شود، در واقع تغییرات زیاد سرعت روتور در ناحیه ۳ کاری توربین (که انتظار سرعت ثابت و توان ثابت داریم) منجر به افت کیفیت توان می‌شود، بنابراین با کنترل دقیقتر سرعت و مرجع قرار دادن این سیگنال به

خوبی می توان تمام پارامترهای مرتبط دیگر مانند توان و گشتاور را نیز کنترل کرد. به همین دلیل خیلی از سازندگان توربین باد از این روش برای کنترل زاویه استفاده نموده اند. در این پایان نامه نیز متغیر سرعت توربین به عنوان متغیر خروجی که تحت کنترل قرار می گیرد نیز مد نظر قرار داده شده است. همان طور که قبلاً هم اشاره شد با توجه به دشواری های مربوط به مدل کردن توربین باد بصورت دقیق و شرایط پراگتشناسی که توربین در آن کار می کند کنترلگرهای مبتنی بر پایه تطبیقی می تواند گزینه خوبی برای کنترل این سیستمها باشد، زیرا این نوع کنترل کننده ها برای سیستمهایی که مدل سیستم بصورت کامل شناخته شده نیست و شرایط بهره برداری از سیستم در حال تغییر است (با توجه به اینکه سرعت باد به عنوان محرک سیستم ماهیتاً یک اغتشاش محسوب می شود) می تواند پاسخگوی مناسبی باشد [۳]. به منظور کنترل توان در ناحیه سوم استفاده از کنترل PI ساده برای کنترل زاویه پره به تنهایی نمی تواند عملکرد مناسبی داشته باشد زیرا در توربین های بادی هم عوامل غیر خطی و هم پارامترهای ناشناخته سیستم منجر به تغییر نقطه کار سیستم شده و در نهایت نیاز به تنظیم مجدد پارامترهای کنترل کننده خواهیم داشت [۴]، اما در روشهای تطبیقی با توجه به اینکه تنظیم پارامترهای کنترل کننده به صورت خودکار (در روش آنالین) صورت میگیرد این نگرانی مرتفع خواهد شد.

با توجه به اینکه تمرکز این پایان نامه بر استفاده از روش تطبیقی برای کنترل زاویه پره توربین است، در این قسمت سعی خواهیم کرد مقالات تطبیقی مرتبط را دسته بندی و مرور کلی نماییم.

### ۱-۳-۱ روشهای PID تطبیقی

یکی از قدیمی ترین کنترل کننده هایی که در صنایع همواره استفاده شده و در حال حاضر هم استفاده می شود کنترل کننده PID است، به همین علت بررسی و فعالیتهایی برای تطبیقی کردن این کنترل کننده ها نیز (هر چند به صورت محدود) صورت گرفته است که عملکرد این کنترل کننده ها را توسعه

داده و از امکانات آن حداکثر استفاده را بنماید. یک راهکار استفاده از PID این است که با روشهای تطبیقی که برای شناسایی سیستم داریم اقدام به شناسایی کرده و پس از آن با توجه به پارامترهای به دست آمده، بهترین ضرایب PID را برای داشتن عملکرد بهینه انتخاب نماییم. به عنوان مثال در [۵] ابتدا سه مدل مختلف برای محرک زاویه پره بررسی شده و سپس یک کنترل کننده PID تطبیقی زمان گسسته برای آن در نظر گرفته است به نحوی که بهره کنترلگر با توجه به پاسخ زمانی سیکل قبلی به روز می شود.

در مقاله دیگری که در [۶] صورت گرفته است در یک توربین باد بزرگ<sup>۴</sup> با ظرفیت 1.5MW برای به روز کردن پارامتر انترگرال گیر کنترلگر PID از روش یادگیری تقویتی<sup>۵</sup> استفاده کرده است و نتایج ارائه شده عملکرد بهتری را نشان می دهد.

یکی از روشهایی که در برخی مراجع آن را هم جزء کنترل تطبیقی لحاظ می کنند حالت جدول بندی بهره است. در [۷] از این روش استفاده شده است به این شکل که کنترل کننده اصلی یک PI در نظر گرفته شده است و برای بدست آوردن جدول بندی بهره ابتدا به روش تحلیلی میزان ضریب توان برای زوایای مختلف پره به دست آمده است. سپس با شبیه سازی در ناحیه سوم کاری توربین، رابطه توان بر حسب سرعت روتور به صورت تجربی نیز به دست آورده شده است. نهایتاً از ترکیب این دو میزان بهره مورد نیاز برای هر سرعت به دست آمده است که در جدول بندی بهره لحاظ شده است.

در برخی کارهای پژوهشی برای به روز کردن پارامترهای PID از روشهای هوشمند مانند فازی بهره برده است [۸]، در این مقاله یک کنترل کننده PID استفاده شده است که هر سه پارامتر آن با الگوریتم فازی به روز می شود. در این الگوریتم ورودیهای سیستم فازی مقدار خطای زاویه و مشتق آن خواهد بود که با

---

<sup>4</sup> Larg Wind Turbine Generator (LWTG)

<sup>5</sup> Reinforcement Learning

توجه به مقدمه و موخره لازم برای هر کدام که مبتنی بر تجربه کارشناسان است این قواعد تنظیم شده است و توابع تعلق ارائه شده برای هر دو ورودی به صورت گاوسی است.

### ۱-۳-۲ روشهای تطبیقی غیرخطی:

استفاده از مد لغزشی در کنترل غیر خطی هنگامی که با عدم قطعیت‌هایی از سیستم سر و کار داریم گزینه خوبی است. در [۹] از این کنترلگر مد لغزشی بصورت تطبیقی استفاده شده است و نتیجه کار کاهش استرس مکانیکی، بهبود کیفیت توان و غلبه بر ارتعاش برج و گیربکس بوده است. ابتدا روابط غیر خطی بصورت مدل تک جرمی برای توربین بیان شده است، این رابطه با فرض کوچک بودن دمپینگ شفت سرعت پایین ساده سازی شده و بسط تیلور آن نوشته شده و سپس پارامترهای اصلی آن به شکل اغتشاش یافته بیان شده است. میزان اغتشاش بیان کننده عدم قطعیتهاست که با تعریف میزان خطا و سیگنال فرمان به شکل سویچ(تابع علامت) مطرح می شود. با تعریف تابع لیاپانوف با توجه به خطای حاصل شده تعریف شده است، سپس قانون به روز کردن پارامترها را به گونه ای تعریف کرده است که تابع لیاپانوف تعریف شده را پایدار نماید.

یکی از مسائلی که در طراحی کنترل کننده زاویه پره برای توربین های بادی بایستی مد نظر قرار گیرد مدهای ارتعاشی مجموعه توربین و برج است، به ویژه هنگامی که ابعاد توربین بزرگ می شود. به همین منظور در [۱۰] ابتدا کنترل سرعت ژنراتور توربین باد در ناحیه ۳ توسط رابطه آن در فضای حالت بیان شده است و برای آن قوانین به روز کردن پارامترهای کنترلگر تطبیقی به دست آمده است که خطا را صفر می کند، اما معتبر بودن این قوانین منوط به مطلقاً مثبت معین بودن<sup>۷</sup> سیستم است که در مدل ارائه شده این فرض در برخی حالات نقض می شود و سیستم از حالت حداقل فاز خارج می شود. برای غلبه بر آن از

<sup>6</sup> Sign

<sup>7</sup> Absolutely Strictly Positive Real (ASPR)

یک فیلتر استفاده شده است و با استفاده از آن نتایج خوبی در مقایسه با یک کنترل کننده PI معمولی دیده می شود.

در [۱۱] نیز ابتدا روابط غیر خطی مربوط به مدلسازی توربین بادی ارائه شده است، سپس با توجه به روش مد لغزشی یک سطح لغزش و سیگنال فرمان مناسب نیز تعریف شده است، سپس تابع لیاپانوف با سطح لغزش معین بیان شده است. با استفاده از شرط پایداری سیستم قانون به روز کردن پارامترها به صورت تطبیقی به دست آمده است، این کنترل کننده برای هر دو ناحیه حداکثرسازی توان و محدود سازی توان اعمال شده است.

### ۱-۳-۳ روشهای تطبیقی هوشمند:

در این بخش در مقایسه با بخشهای قبلی نسبتاً کارهای بیشتری صورت گرفته است، در این روش اسلس کار این است که یا در قسمت شناسایی و یا در قسمت به روز کردن پارامترهای کنترل کننده تطبیقی از روشهای هوشمند بهره گرفته شده است.

در [۱۲] با استفاده از روش تطبیقی مبتنی بر شبکه عصبی توابع شعاعی<sup>۸</sup> برای هر دو ناحیه کاری توربین بادی سیستم کنترل طراحی شده است، در ناحیه دو کنترل گشتاور و در ناحیه سه کنترل زاویه پره. شبکه عصبی تطبیقی پیشنهادی، مبتنی بر ورودی خروجیها، دینامیکهای غیر خطی توربین باد را تخمین می زند و در نهایت کنترل کننده ای خواهیم داشت که در ناحیه حداکثر توان هم عملکرد خوبی دارد و در زمان تغییر کنترلگر از ناحیه ۲ به ناحیه ۳ نیز به آرامی اتفاق می افتد، نتایج حاصل روی سیمولاتور توربین باد 5MW آزمایش شده و نتایج ادعا شده در این قسمت نیز در مقایسه با کنترل کننده کلاسیک بهبود عملکرد را نشان می دهد.

---

<sup>8</sup> radial basis function

در [۱۳] از روش مد لغزشی تطبیقی که قبلاً هم اشاره شده بود استفاده شده است با این تفاوت که برای به روز کردن پارامترهای مربوط به کنترلگر مد لغزشی از روش فازی استفاده کرده است. با این کار در واقع مشکل نوسان<sup>۹</sup> مربوط به کنترلگر مد لغزشی را به حداقل رسانده است و نتایج شبیه سازی آن نیز مدعی مقاله را اثبات می کند.

در [۱۴] یک روش فازی برای شناسایی سیستم و طراحی کنترلگر پیشنهاد شده است و در کنار آن روش تطبیقی نیز ارائه شده است. در روش تطبیقی ابتدا شناسایی سیستم با روش بازگشتی مطرح شده و سپس پارامترهای به دست آمده از سیستم را برای به دست آوردن کنترلگر تطبیقی که از نوع رگولاتور خود تنظیم غیر مستقیم است به کار برده است. همچنین قابل ذکر است که در این روش شناسایی به صورت کلی انجام شده است، به این معنا که شناسایی در هر دو ناحیه ۲ و ۳ کاری توربین انجام می شود و نتایج این شناسایی در هر ناحیه کنترل کننده خود را فعال می کند. در ناحیه ۲ کنترل گشتاور به منظور جذب حداکثر توان و در ناحیه ۳ کنترل زاویه پره به منظور محدود کردن توان فعال می شود که هر دوی آن بصورت تطبیقی پیاده شده است.

در [۱۵] از یک روش هوشمند برای کنترل پره بر اساس مدل یادگیری عاطفی مغز انسان نموده است که عملکرد آن از ساختار یک PID الهام گرفته شده است و به صورت خود تنظیم کار می کند. به همین منظور سیگنال تحریک آن در قالب PID بیان شده است.

در [۱۶] ساختاری که برای عملگر زاویه پره معرفی شده است از نوع هیدرولیک است. برای کنترل زاویه بایستی سرعت پمپ هیدرولیک تغییر کرده تا پیستونهای مربوط به پره را تغییر وضعیت دهد. به این منظور از یک کنترلگر فازی تطبیقی استفاده شده است. در این کنترلگر برای جبران سازی از مد لغزشی

---

<sup>9</sup> chattering



بهره گرفته شده است که بصورت فازی پارامترهای مربوطه تنظیم می شود. در این روش ابتدا معادلات مربوطه و سطح لغزش نیز تعریف شده است، سپس کنترلگر فازی با توجه به توابع تعلق تعریف شده و قواعد مربوط به فازی سازی و عکس فازی سازی پیاده شده است. سپس در قسمت تطبیقی، کنترلگر فازی با قانون تطبیقی به دست آمده به روز شده و در مسیر پیش خور قرار می گیرد. از طرفی قسمت عکس فازی سازی هم با توجه به قانون تطبیقی به دست آمده نیز اصلاح می شود تا بهترین عملکرد کنترل زاویه به دست آید.

در [۱۷] یک رگولاتور خود تنظیم تطبیقی دو متغیره معرفی می شود. این رگولاتور وظیفه تنظیم گشتاور را در حد بهینه برای جذب حداکثر توان در ناحیه دوم و وظیفه تنظیم سرعت توربین در حد نامی در ناحیه سوم کاری به وسیله کنترل زاویه پره ها بر عهده دارد. ابتدا شناسایی سیستم صورت می گیرد (با روش حداقل مربعات بازگشتی)، سپس پارامترهای به دست آمده از مدل به کنترلگر مربوطه داده شده خروجی کنترلگر در مسیر پیش خور اضافه می شود، علاوه بر این از یک کنترل کننده  $LQG^{10}$  نیز به منظور حداقل کردن استرس و خستگی اعمالی به پره ها استفاده نموده است. در کنار آن از یک شبکه عصبی نیز استفاده شده که ورودی آن خطای مربوط به متغیرهای سیستم است که کنترلگر تطبیقی و  $LQG$  بایستی آنها را به صفر برساند. این بخش ابتدا بایستی به صورت خارج خط<sup>۱۱</sup> آموزش ببیند و با ادامه کار سیستم منجر به تولید خروجی های بهتر و در مجموع عملکرد بهتر کنترل کننده می شود.

در [۱۸] از کنترل کننده خود تنظیم تطبیقی مبتنی بر شبکه عصبی استفاده شده است. این کنترل کننده شامل بلوک شناسایی عصبی مستقیم و معکوس است که به منظور مدل کردن دینامیکهای مستقیم و معکوس توربین به کار رفته است. کنترل کننده مبتنی بر شبکه عصبی است. در این مقاله

---

<sup>10</sup> Linear Quadratic gaussian

<sup>11</sup> Offline

اساساً روش تطبیقی ارائه شده روش مدل مرجع است و خطای خروجی با آن سنجیده می شود. شناسایی عصبی معکوس به عنوان کنترل کننده معکوس به کار می رود شناسایی عصبی مستقیم وظیفه محاسبه جاکوبین سیستم را دارد. در نهایت با انتخاب مدل مرجع مناسب و با اصلاح آنلاین پارامترهای کنترل کننده به پاسخ بسیار بهتری در مقایسه با دیگر روشها رسیده است.

### ۱-۳-۴ روشهای تطبیقی کلاسیک:

در برخی مقالات، پایه کار صورت گرفته همان روشهای ارائه شده در مراجع اصلی است که با استفاده از رگولاتورهای خود تنظیم قطعی یا اتفاقی و یا روش مدل مرجع صورت گرفته است که در زیر به برخی از آنها اشاره می شود.

در برخی مقالات که به پیاده سازی کنترلگرهای تطبیقی زاویه پره پرداخته اند مانند [۱۹] از روش مدل مرجع استفاده شده است. روش مدل مرجع مستقیم این حسن را دارد که نیازی نیست تا مدل مرجع با مدل سیستم دقیقاً هم مرتبه باشد، علاوه بر این با اصلاحی که در آن صورت داده است به صورت موثری اغتشاش را حذف می کند.

در [۲۰] از یک کنترلگر تطبیقی در مسیر پیش خور استفاده کرده است و این کنترلگر را با یک کنترل کننده PI در حالات مختلف مقایسه کرده است. به منظور اندازه گیری سرعت باد از سنسور<sup>۱۲</sup> LIDAR استفاده نموده است. با توجه به ساختار این سنسور امکان اندازه گیری سرعت باد قبل از رسیدن به توربین وجود دارد. شناسایی از سیستم بر مبنای روش حداقل مربعات صورت می گیرد پارامترهای بلوک پیشخور به روز می شود. ساختاری که برای شناسایی در نظر گرفته می شود به صورت یک فیلتر FIR بوده که

---

<sup>12</sup> Light Detection and Ranging

نتایج مقایسه این روش با روشهای کلاسیک در مقاله بهبود عملکرد سیستم را به ویژه در محدود کردن مودهای ارتعاشی برج و پره ها نشان می دهد.

در [۲۱] به یک روش تطبیقی اشاره شده است که نیاز به مدل توربین باد ندارد (MFAC<sup>۱۳</sup>). ایده اصلی این روش مبتنی بر بردار شبه گرادیان<sup>۱۴</sup> است. ابتدا رابطه ورودی خروجی به صورت غیر خطی در حوزه زمان مطرح شده و با فرضهای لازم در بازه کوچک به صورت یک رابطه خطی بازنویسی شده است. در این حالت بردار شبه گرادیان ورودی خروجی را به هم مرتبط می کند. با روش اشاره شده ابتدا قانون کنترل به دست آمده ، سپس بردار شبه گرادیان با توجه به ورودی خروجی های لحظه ای به صورت بازگشتی به دست آمده است، با به روز شدن آن قانون کنترل نیز به صورت لحظه ای به روز می شود.

با توجه به ماهیت اتفاقی سرعت باد منطقی به نظر می رسد که از روشهای کنترل تصادفی تطبیقی نیز استفاده نماییم، به این منظور استفاده از روش تطبیقی حداقل واریانس مناسب به نظر می رسد. به عنوان نمونه می توان به [۲۲] اشاره نمود که در این مقاله از روش حداقل واریانس تطبیقی به منظور کنترل زاویه پره در ناحیه سوم استفاده شده است. جنبه نوآورانه این مقاله در این است که افق پیش بینی توسعه داده شده و قانون کنترل نیز انعطاف پذیر است. در این روش شناسایی سیستم آیرودینامیک بر اساس خطای توان به عنوان ورودی و مقدار فرمان برای زاویه پره به عنوان خروجی استفاده شده است. به این منظور برای به روز کردن قانون کنترل از  $d+N$  مرحله قبلی استفاده می شود، علاوه بر آن برای انعطاف پذیری بیشتر ضربی به همین نام برای قانون کنترل تعریف می شود که با انتخاب مناسب این ضریب سرعت عملکرد سیستم بیشتر می شود.

---

<sup>13</sup> Model Free Adaptive Control

<sup>14</sup> Pseud Gradient Vector

در [۲۳] از یک رگولاتور خود تنظیم استفاده کرده است که ورودی آن توسط کنترل کننده حداقل واریانس تامین می شود. در این روش نیز برای شناسایی ورودی خطای توان استفاده شده است و خروجی نیز فرمان زاویه پره خواهد بود که کنترل کننده حداقل واریانس به آن فرمان می دهد. تابع هزینه ای که بایستی حداقل شود شامل خطای سیستم و میزان فرمان زاویه پره است.

در [۲۵] نیز از کنترل کننده حداقل واریانس تطبیقی به صورت تعمیم یافته استفاده شده است. در این مقاله هدف اصلی کنترل سطح توان مزرعه بادی در شرایطی است که سرعت باد از حد نامی بالاتر است و با تغییرات سرعت باد، سطح توان دریافتی توربین هم شروع به نوسان می کند به این منظور این کنترل کننده بایستی با تغییر زاویه پره بهترین عملکرد را داشته تا نوسانات توان حداقل شود. با معرفی کنترلگر حداقل واریانس در این مقاله و مقایسه آن با روشهای کلاسیک دیگر بهبود قابل توجهی در عملکرد سیستم به ویژه در زمان تغییر پارامترها نشان داده می شود.

## فصل دوم:

### ساختار توربین باد

## ۲-۱ مقدمه ای بر انرژی باد

با توسعه صنعتی کشورها، میزان به کارگیری انرژی های تجدید پذیر نیز رو به افزایش بوده بطوری که یکی از شاخص های توسعه یافتگی مصرف انرژی محسوب می شود. انرژی های تجدید پذیر روز به روز سهم بیشتری در تأمین انرژی به دست آورده است. تا انتهای سال ۲۰۱۰، ظرفیت های موجود در انرژی های تجدیدپذیر ۳/۸٪ در تولید الکتریسیته جهان سهم داشته اند (این ارقام بدون در نظر گرفتن انرژی آبی می باشد)، هم اکنون انرژی های تجدید پذیر بیش از ۱۹٪ از انرژی اولیه جهان را تأمین می نمایند.

در کشور ما صنعت برق طی سال های اخیر به شدت مشغول افزایش ظرفیت (نیروگاه، شبکه انتقال و توزیع) بوده است. این دیدگاه توسعه، منجر به عدم امکان تمرکز کافی بر موضوعاتی نظیر کاهش مصرف برق، توسعه انرژی های نو و کاهش آلاینده ها شده است. این در حالی است که از جمله چالشهای پیش روی صنعت برق جهان تا سال ۲۰۵۰، هوشمند سازی شبکه و توسعه بهره گیری از انرژی های پاک، با هدف کاهش سهم ۴۰ درصدی صنعت برق جهان در انتشار دی اکسیدکربن ناشی از سوخت های فسیلی است. مهمترین عوامل انگیزشی در زمینه ی توسعه انرژی های نوین می تواند موارد زیر باشد:

- محدود بودن منابع فسیلی: به عنوان مثال برخی گزارشها حکایت از این دارد که منابع نفت که از اصلی ترین منابع تولید انرژی در جهان هستند تنها تا حدود ۴۰ سال دیگر وجود خواهند داشت.
- افزایش دمای زمین: در این زمینه باید بدانیم که افزایش اندکی در دمای زمین اثرات بسیار مخربی بر طبیعت خواهد گذاشت، بطوری که افزایش ۵ درجه ای در دمای زمین می تواند ویرانگر باشد.

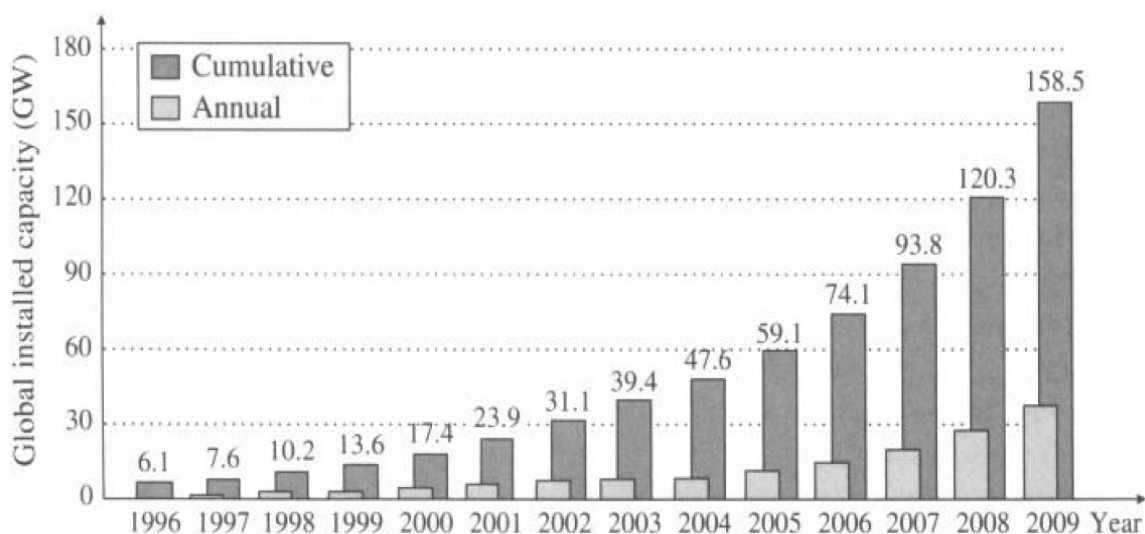
- از بین رفتن یخچال‌های طبیعی: این یخچال‌های عظیم در واقع خود انبارهای رایگان آب هستند و ذخایر سدها و آبگیرها در مقایسه با یخچال‌های طبیعی قابل مقایسه نیستند.
- بالا آمدن سطح آب دریاها: که خود از اثرات گرم شدن زمین است، پیامدهای مختلفی خواهد داشت که در نهایت منجر به تهدیدی جدی برای میلیاردها نفر از مردم جهان خواهد شد.

علاوه بر این موارد، توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در کشورمان منجر به صرفه جویی در مصرف سوخت‌های فسیلی می‌شود. همچنین در سالیان اخیر ضمن رشد صنعتی کشور، با انتقال ساعت پیک مصرف به سمت ساعات میانی روز، امکان جذب انرژی‌های خورشیدی و یا حرارتی، به منظور کاهش نیاز به انرژی فسیلی در این ساعات فراهم شده است. علاوه بر این در بسیاری از نقاط کشور به علت شرایط جوی مناسب امکان بهره برداری و راه اندازی چنین نیروگاههایی وجود دارد.

به این ترتیب در سالهای اخیر با آگاهی جهانی از وضعیت آلاینده‌گی سوخت‌های فسیلی مانند انتشار گازهای گلخانه‌ای و گرم شدن زمین، مطالبات عمومی برای روی آوردن به منابع انرژی‌های تجدیدپذیر پاک مانند دریا، خورشید و باد بیشتر از پیش شده است. در این میان انرژی باد به علت پاک بودن، پتانسیل پایان ناپذیر و به ویژه هزینه‌های قابل رقابت آن با دیگر منابع انرژی نوین مورد توجه قرار گرفته است.

بر اساس اظهارات موسسه جهانی انرژی باد، میزان ظرفیت توربین بادی نصب شده تا سال ۲۰۰۹ میلادی به ۱۵۸ گیگاوات رسیده (شکل ۲-۱)، این در حالی است که در سال ۲۰۱۲ میلادی به مرز ۲۸۳ گیگاوات رسیده است. [۲۷]

ظرفیت توربین‌های بادی هم اکنون به 8MW رسیده است، در حالی که ۲۰ سال پیش این مقدار حداکثر ۳۰۰ کیلووات بوده است.



شکل ۲-۱ نمودار رشد تولید برق توسط توربین باد تا سال ۲۰۰۹ [۲۷]

در این فصل ساختار، عملکرد و اجزای یک توربین بادی به اختصار بیان می شود.

## ۲-۲ اجزای توربین باد

علاوه بر توربین های بادی رایج محور افقی، توربین های با محور عمودی، (شکل ۲-۲) ساخته شده است. مزایای توربین های محور عمودی نويز و هزینه نگهداری کمتر آن است. استحکام آن بیشتر بوده و به علت ایمنی بیشتر امکان قرار گرفتن در نزدیک مناطق مسکونی هم وجود دارد. البته مزیت عمده ساختار سه پره ای محور افقی این است که به لحاظ نصب، تعمیرات و نگهداری کلی مقرون به صرفه تر است و در فضای باز راحتتر نصب خواهد شد. در این پایان نامه توربین به کار رفته از نوع سه پره با محور افقی خواهد بود.





شکل ۲-۲ توربین بادی محور افقی و محور عمودی

اجزای اصلی توربین بادی محور افقی به اختصار به شرح زیر است که در شکل ۲-۳ هم به صورت شماتیک نشان داده شده است. البته لازم به ذکر است بسته به نوع سازنده بعضی از این قسمت‌ها امکان دارد وجود نداشته و یا ساختاری کمی متفاوتتر داشته باشد [۲۷]:

۱- پره‌ها<sup>۱۵</sup>: اندازه آن بستگی به ظرفیت توربین و ساختار آن دارد، وظیفه آنها جذب حداکثر انرژی آیرودینامیکی و تبدیل آن به نیروی رانش<sup>۱۶</sup> است. در این نوع توربین، پره‌ای مناسب تر است که نیروی رانش آن در مقایسه با دیگر نیروها حداکثر باشد.

<sup>15</sup> Blades

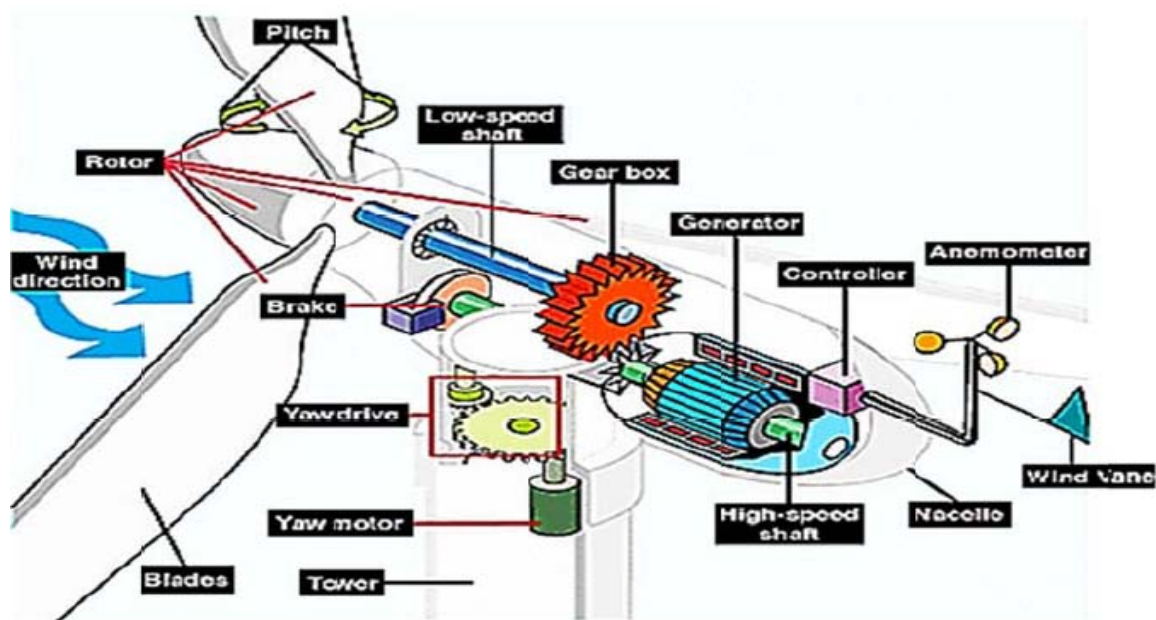
<sup>16</sup> Lift

۲- زاویه پره<sup>۱۷</sup>: این قسمت به پره ها این امکان را می دهد تا حول محور خود چرخش داشته باشد و در شرایط بالاتر از نقطه کار نامی سیستم نیروی آیرودینامیکی وارده به پره را کم کند تا توان دریافتی از باد را کم کند.

۳- ترمز مکانیکی<sup>۱۸</sup>: برای جلوگیری از افزایش بیش از اندازه سرعت در شرایط اضطراری که سیستم حفاظت دستور دهد عمل کرده و بصورت دیسکی شتاب روتور را می گیرد.

۴- کنترل کننده: شامل کنترل کننده مبدل، سیستم کنترل زاویه پره و سیستم کنترل جهت<sup>۱۹</sup> خواهد بود.

۵- باد سنچ<sup>۲۰</sup>: اندازه گیر سرعت باد که در برخی ساختارهای کنترلی و یا حفاظت از سیگنال آن استفاده می شود.



شکل ۲-۳ ساختار شماتیک یک توربین باد

<sup>17</sup> Pitch

<sup>18</sup> Brake

<sup>19</sup> Yaw

<sup>20</sup> Anemometer

- ۶- باد نما<sup>۲۱</sup>: اندازه گیری جهت باد معمولاً برای فرمان دادن به مکانیزم تغییر جهت (YAW) برای قرار گرفتن صفحه پره ها در مسیر مستقیم باد و دریافت حداکثر انرژی معمولاً صورت می گیرد.
- ۷- مجموعه گیربکس و موتور جهت (Yaw): برای تغییر جهت مجموعه توربین باد.
- ۸- روتور<sup>۲۲</sup>: چرخش پره ها توسط آن به بقیه قسمتها منتقل می شود.
- ۹- محور سرعت پایین: گشتاور ناشی از چرخش پره ها را به مجموعه گیربکس منتقل می کند.
- ۱۰- گیربکس و محور سرعت بالا: با توجه به پایین بودن سرعت چرخش روتور و مناسب نبودن آن برای اتصال مستقیم به ژنراتور، این مبدل سرعت را در بازه مطلوب برای ژنراتور افزایش می دهد.
- ۱۱- ژنراتور: با دریافت انرژی مکانیکی، تبدیل آن به انرژی الکتریکی را صورت می دهد.
- ۱۲- بدنه<sup>۲۳</sup>: محفظه بالای توربین که تمام ادوات لازم برای تبدیل انرژی در آن قرار می گیرد.
- ۱۳- برج<sup>۲۴</sup>: محور عمودی توربین که بدنه و پره ها روی آن نصب می شود. [۲۷][۲۸]

## ۳-۲ مبدل AC به DC

جایگاه مبدل در برقراری ارتباط بین ژنراتور و شبکه است. مبدل در توربین بادی وظیفه دارد توان الکتریکی با فرکانس مناسب در اختیار شبکه قرار دهد. معمولاً مدار معادل مبدل به صورت نمایش داده شده در شکل ۴-۲ است. همانطور که مشخص است مبدل سه فاز، دارای ۶ عدد IGBT است. همگی سویچها ایده آل فرض می شوند که در هر لحظه تنها یک سویچ امکان هدایت دارد. از طریق زمان بندی مناسب جهت هدایت سویچها، D، ولتاژ خروجی حاصل می شود. به عنوان مثال ولتاژ فاز  $U_{a0}$  به صورت معادله ۱-۲ به

<sup>21</sup> Wind vane

<sup>22</sup> Rotor

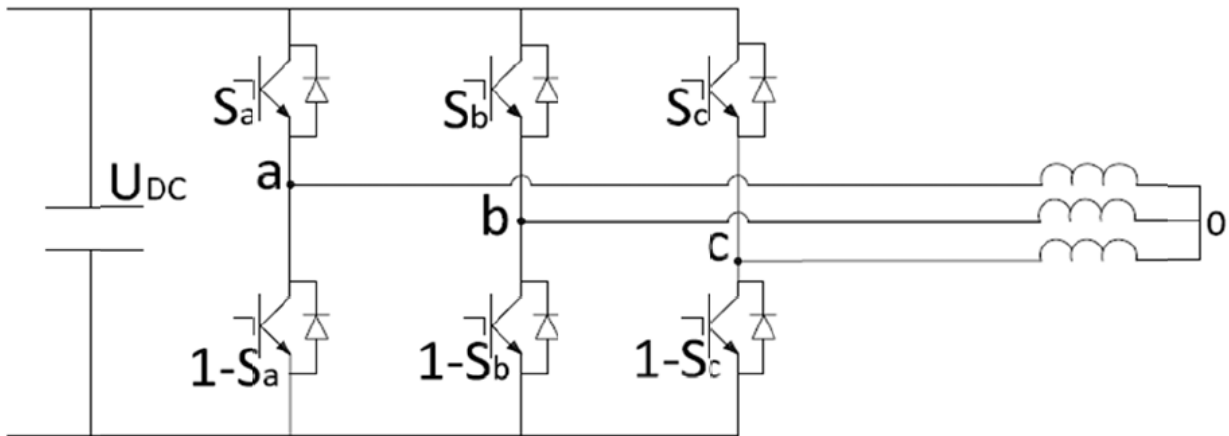
<sup>23</sup> Nacelle

<sup>24</sup> Tower

دست می آید. جریان لینک DC نیز از رابطه ۲-۲ به دست می آید که D زمان هدایت سویچها و i جریان فاز مربوطه می باشد [۱].

$$U_{a0} = \frac{U_{DC}}{3} (2D_a - D_b - D_c) \quad (1-2)$$

$$i_{DC} = [D_a \ D_b \ D_c] \cdot \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} \quad (2-2)$$



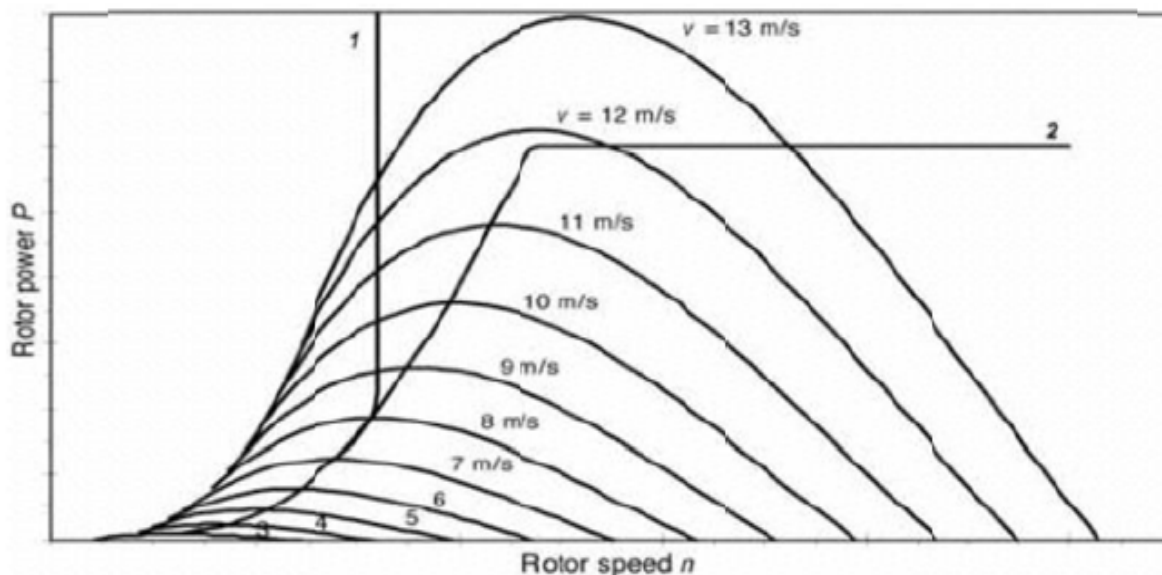
شکل ۴-۲ مدار معادل مبدل

## ۴-۲ تکنولوژی ساخت

توربین بادی به دو دسته اصلی بر اساس سرعت ژنراتور آن تقسیم بندی می شود: سرعت ثابت و سرعت متغیر. توربین های سرعت ثابت اغلب در ابتدای توسعه انرژی باد ساخته شده است. معایب اصلی این نوع توربین ها راندمان پایین، تنش مکانیکی زیاد در حین بهره برداری و کیفیت نامناسب توان بوده و مزیت آن در سادگی سیستم کنترل است.

در سالهای اخیر با توجه به نیاز روز افزون به این انرژی از طرفی و توسعه در الکترونیک قدرت و پردازنده‌ها استفاده از توربین‌های دور متغیر بیشتر شده به نحوی که در حال حاضر اغلب تولیدات توربین باد در دنیا از این نوع است.

همانطور که در شکل ۲-۵ نیز نشان داده شده است، نقطه جذب حداکثر توان یا بیشترین راندمان با تغییر سرعت باد تغییر می‌کند به این منظور بایستی ژنراتور بتواند در دورهای متغیری کار کند، در نوع سرعت ثابت ژنراتور مستقیماً به شبکه متصل است و طبیعتاً سرعت چرخش ژنراتور با فرکانس شبکه یکسان خواهد بود ولی در نوع دور متغیر خروجی ژنراتور ابتدا به مبدل یکسوساز متصل می‌شود و سپس این مبدل از طریق لینک DC به مبدل DC به AC مرتبط شده است، نهایتاً اینک فرکانس چرخش روتور ژنراتور با این آرایش از فرکانس شبکه جدا خواهد شد و کنترل کننده جذب حداکثر توان با کنترل گشتاور یا سرعت ژنراتور در بهترین نقطه سعی در استحصال حداکثر توان ممکن را دارد.



شکل ۲-۵ نقطه کار ژنراتور دور ثابت (۱) و دور متغیر (۲) [۲۷]

همانطور که در این شکل دیده می شود، در توربین دور ثابت، با توجه به توضیحات صفحه قبل سرعت روتور در مقدار معینی ثابت شده و بنابراین حداکثر راندمان فقط در یک سرعت باد اتفاق می افتد و بازه بهره برداری از توربین در این حالت محدود است، این درحالی است که در نوع سرعت متغیر امکان تغییر سرعت روتور با تغییرات سرعت باد وجود دارد و با افزایش سرعت باد از حد نامی توسط کنترل زاویه پره می توان توان را محدود کرد. با این کار عملاً بازه بهره برداری از توربین باد بیشتر شده است.

در میان توربین های بادی سرعت متغیر، ژنراتورهای مختلفی توسط سازندگان مختلف به کار گرفته شده است که معروفترین آنها ژنراتور دو سو تغذیه<sup>۲۵</sup> (DFIG) همراه با مبدل جزئی توان است. هرچند که استفاده از تکنولوژی یا ژنراتور مغناطیس دائم<sup>۲۶</sup> (PMSG) همراه با مبدل کامل نیز به سرعت در حال رشد است که علت این امر کارایی بیشتر، سادگی و کوچک بودن این نوع ژنراتورهاست.

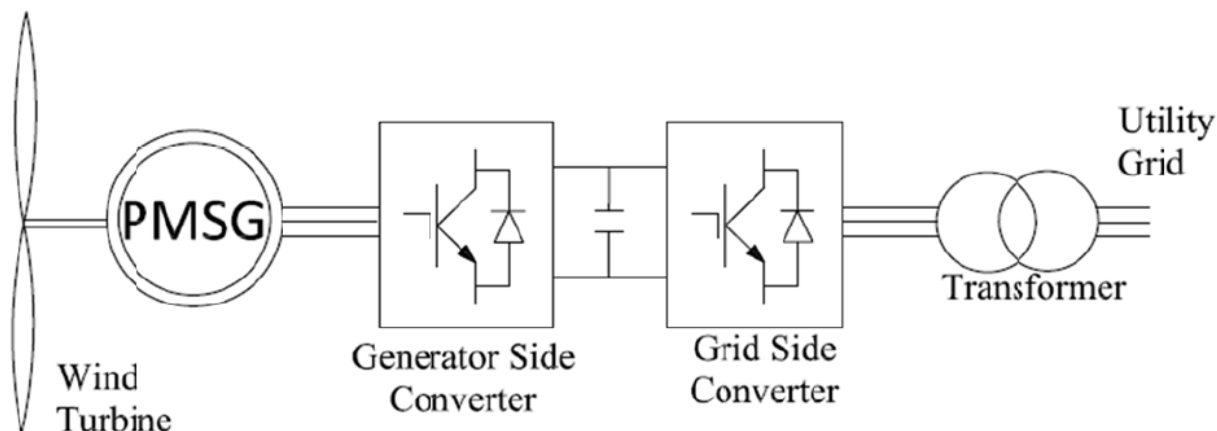
ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم، ژنراتور سنکرون معمولی است که مدار تحریک DC با یک آهنربای دائم جایگزین شده است و جاروبک و اسلیپ رینگ<sup>۲۷</sup> نیز طبیعتاً حذف شده است. این تغییرات منجر به سبکتر شدن و طبیعتاً کاهش اینرسی آن می شود، قابلیت اطمینان را بیشتر کرده و تولید توان نیز بیشتر می شود و از طرفی تلفات الکتریکی در روتور نداریم. عیب این گروه ژنراتور هزینه بالاتر آن نسبت به تحریک DC می باشد با توجه به اینکه در توربین بادی نیاز داریم تا حد امکان وزن اعمال شده به سازه برج کمتر و راندمان بیشتر باشد و همچنین با گشتاورهای کمتری بتوان توربین را راه اندازی کرد، بنابراین استفاده از این نوع ژنراتور منطقی به نظر می رسد.

---

<sup>25</sup> Doubly Fed Induction Generator

<sup>26</sup> Permanent Magnet Synchronous Generator

<sup>27</sup> Slip ring



شکل ۶-۲ ارتباط یک توربین بادی دور متغیر از طریق مبدلها با شبکه [۲۸]

همانطور که در شکل ۶-۲ دیده می شود خروجی ژنراتور وارد مبدل مربوطه می شود که از نوع مبدل منبع ولتاژ (VSC<sup>۲۸</sup>) است. خروجی DC شده آن به لینک DC که در شکل با یک خازن نشان داده شده است و نوسان ولتاژ را می گیرد، نهایتاً مبدل سمت شبکه ولتاژ DC را به ولتاژ AC تبدیل می کند و به شبکه تحویل می دهد.

جدا کردن دو مبدل از طریق لینک DC این امکان را می دهد که هر قسمت را بتوان به طور جداگانه و مستقل از دیگری کنترل کرد، سناریوهای مختلفی برای این قسمت بررسی و پیاده سازی شده است که یک نمونه از آن ، کنترل توان با مبدل سمت شبکه از طریق ثابت نگه داشتن ولتاژ لینک DC و کنترل گشتاور و سرعت ژنراتور توسط مبدل ژنراتور است. [۲۸]

کلاس بندی PMSG ها بر اساس ترکیب روتور آنهاست: نوع قطب داخلی (روتور ژنراتور صاف است)، نوع قطب برجسته (روتور در این حالت برجسته است)

<sup>28</sup> Voltage Source Converter

## ۲-۵ عملکرد کلی توربین باد

در یک توربین بادی انرژی باد توسط پره‌ها دریافت شده و منجر به چرخاندن روتور ژنراتور می‌شود. ژنراتور از نوع سنکرون با مغناطیس دایم است و استاتور آن از طریق دو مبدل و لینک DC به شبکه متصل است، همانطور که گفته شد این ساختار امکان بهره‌برداری از توربین در دور متغیر را می‌دهد. در یک شبکه قدرت لازم است که فرکانس ثابت داشته باشیم، به این منظور باید تولید برق معادل مصرف باشد، بنابراین در شرایط عادی که بار ثابت است لازمه داشتن فرکانس ثابت، تزریق توان ثابت است. در شرایطی که مصرف افزایش می‌یابد اگر تولیدی اضافه نشود فرکانس از حد مرجع خود (۵۰ یا ۶۰ هرتز) کمتر می‌شود و بالعکس در صورتی که بار مصرفی کم شود و توان تولیدی کاهش نیابد این تفاوت انرژی به شکل افزایش فرکانس خود را نشان می‌دهد. در صورتی که توان تولیدی بلافاصله با شرایط مصرف منطبق نشود امکان عملکرد حفاظت‌های شبکه قدرت و بی‌برقی وجود دارد.

در حال حاضر یک مزرعه بادی در دو سطح کنترل می‌شود که این دو سطح شامل کنترل کننده مرکزی مزرعه بادی و کنترل محلی توربین باد است. کنترل کننده مرکزی توربین باد توسط اپراتور از شبکه قدرت فرمان می‌گیرد و سطح توان تولیدی کل مزرعه توسط آن بصورت دستی و یا شبکه به صورت ریموت تعیین می‌شود. در این حالت با توجه به توان مورد نیاز کلی، به هر کدام از توربین‌ها یک مرجع و یا نقطه تنظیم توان بصورت آنلاین داده می‌شود و انتظار می‌رود که کنترل محلی توربین بتواند این مرجع را تبعیت کند، به عنوان مثال امکان دارد مرجع توان برای یک توربین کمتر از مقدار نامی باشد ولی با توجه به سرعت باد که کمتر از مقدار نامی است توربین بایستی بتواند حداکثر توان خود را استخراج کند، گاهی اوقات نیاز می‌شود که کنترل جهت توربین به منظور جذب حداکثری توان نیز فعال شود. این کنترل کننده معمولاً دینامیک‌های خیلی کندی دارد و کمتر مورد مطالعه قرار می‌گیرد. معمولاً فعال شدن



آن توسط یک باند مرده<sup>29</sup> صورت می گیرد، در صورتی که اختلاف بین زاویه ای که جهت سنج باد نشان می دهد با موقعیت ناسل از حد معینی بیشتر شود موتور آن فرمان گرفته و ناسل و پره ها را در وضعیت مناسب قرار می دهد.

از طرف دیگر در صورت رسیدن سرعت روتور به حد نامی و به تبع آن توان و گشتاور، بایستی نیروی آیرودینامیکی دریافتی از باد محدود شود که این کار با تغییر زاویه پره صورت می گیرد، بنابراین نقشی حیاتی در کنترل توربین باد خواهد داشت. البته به علت نامعینی ها، اغتشاشات و پیچیدگی و غیر خطی بودن توان آیرودینامیکی، کنترل در این قسمت نیز دشواریهای خاص خود را دارد.

---

<sup>29</sup> Dead Band



فصل سوم:

مدلسازی، روابط ریاضی

و معرفی سیستم

### ۳-۱ مقدمه

در مورد هر سیستمی آگاهی به مدل آن، در حل مسائل مرتبط با آن بسیار موثر است. آگاهی به خواص غیرخطی یک توربین بادی و نامعینی های مربوط به مشخصات ساختار آن و یا سیگنالها و ورودی های مختلف اعمالی به آن، می تواند باعث افزایش قدرت تحلیل طراحان برای دستیابی به عملکرد بهتر باشد. در این فصل پیکربندی و مدل یک توربین باد ارائه می شود. سپس نواحی کار یک توربین باد معرفی می شود. در ادامه راهکارهای کنترلی جهت دستیابی به حداکثر توان به اختصار بیان می شود و در پایان زاویه پره و ضرورت آن در حفظ پایداری سیستم مورد بررسی قرار می گیرد.

### ۳-۲ مدل آیرودینامیک پره

به طور کلی توان موجود در باد که ناشی از انرژی جنبشی است با رابطه ی زیر به دست می آید:

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

در این رابطه  $\rho$  چگالی هوا،  $A$  سطح جاروب شده توسط پره های توربین و  $V_{wind}$  سرعت باد است. توان آیرودینامیکی توربین باد از طریق ضریب  $C_p$  به فرمول بالا مرتبط می شود:

$$P = C_p P_{wind} \quad (2-3)$$

در این فرمول  $C_p$  ضریب توان دریافتی از باد است که به دو عامل زاویه پره ( $\beta$ ) و سرعت نسبی ( $\lambda$ ) وابسته است.  $\lambda$  سرعت نسبی یا نسبت سرعت توسط رابطه ۳-۳ بیان می شود:

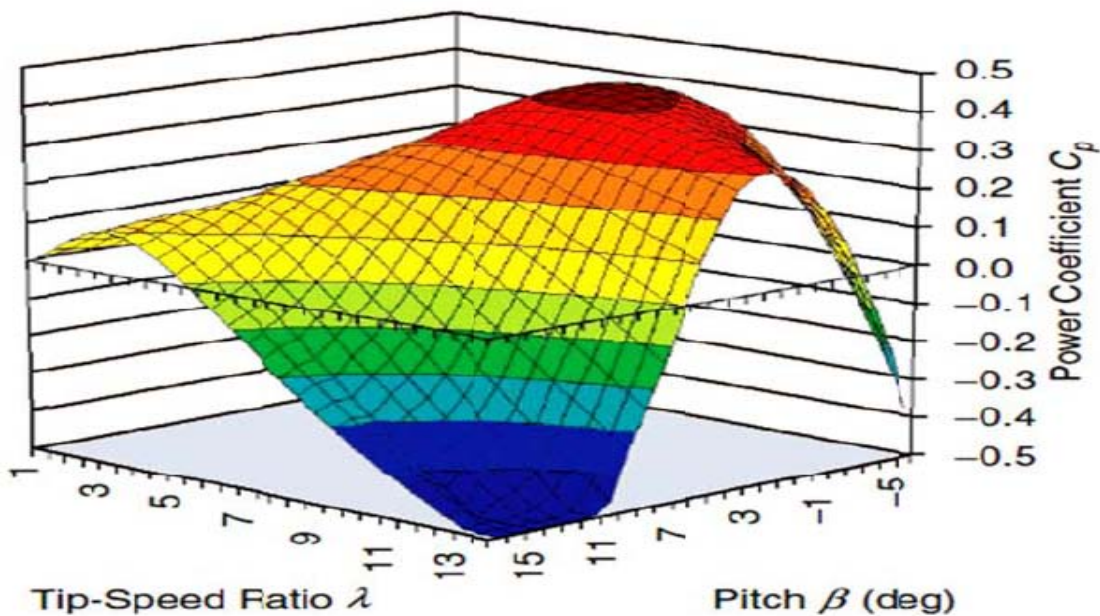
$$\lambda = \frac{\omega R}{v} \quad (3-3)$$

در این رابطه  $R$  شعاع پره های توربین بر حسب متر،  $\omega$  سرعت زاویه ای روتور بر حسب رادیان بر ثانیه است.  $v$  نیز سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه است. بنابراین مشخصه رابطه نهایی توان آیرودینامیکی

مطابق فرمول ۳-۴ خواهد بود. چنانچه مشخص است این توان به ابعاد پره ها، شرایط جوی مانند سرعت باد و چگالی هوا و ضریب توان بستگی دارد:

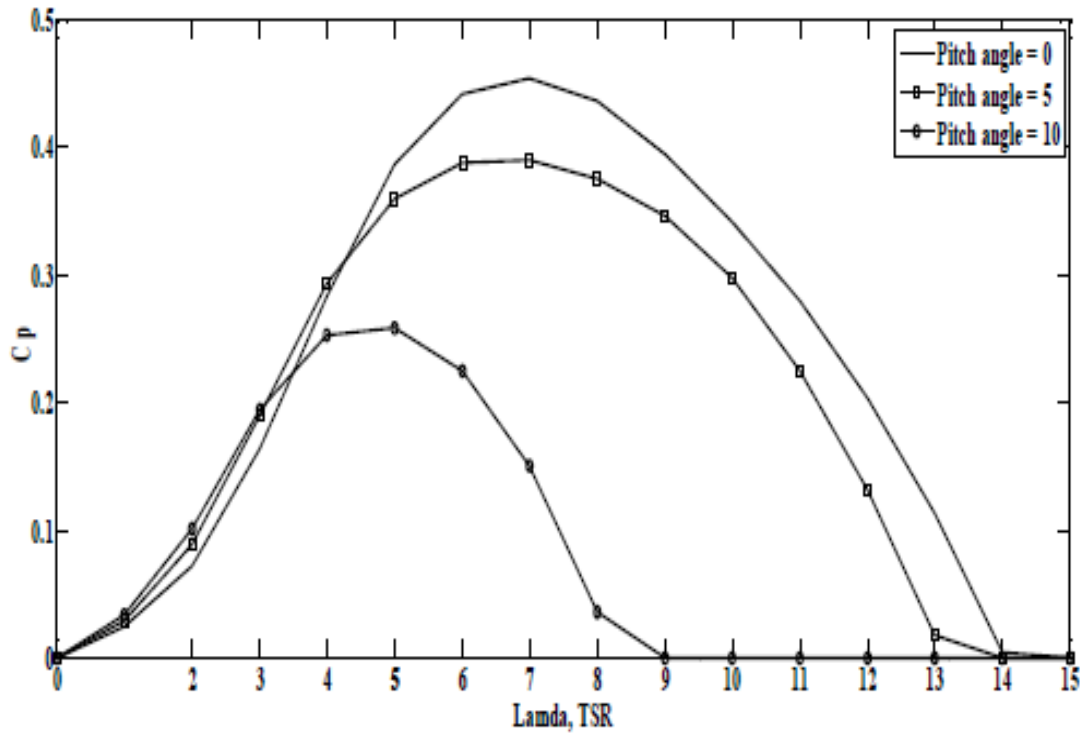
$$P = \frac{1}{2} C_p(\beta, \lambda) \rho A V_{wind}^3 \quad (۴-۳)$$

منحنی ضریب توان در هر توربین بادی مطابق آزمونهای آیرودینامیکی آن به صورت تابعی دو ورودی و یک خروجی به دست می آید که نمونه ای از ترسیمهای منحنی ضریب توان در شکل ۳-۱ آورده شده است. این اطلاعات معمولاً در مورد هر توربین بادی به طور دقیق در جدولهایی موجود است و یا بصورت منحنی هایی نظیر شکل ۳-۲ نمایش داده می شود. از آنجا که توان توربین متناسب با ضریب توان یا  $C_p$  است به صورت ایده آل توربین بایستی در حداکثر مشخص شده خود کار کند که بیشترین راندمان را داشته باشد. زاویه پره ها یک متغیر قابل کنترل است، به همین ترتیب سرعت نسبی نیز به صورت غیر مستقیم توسط کنترل گشتاور کنترل می شود.



شکل ۳-۱ یک نمونه منحنی ضریب توان  $C_p$  بر حسب  $\lambda$  و  $\beta$  [28]

منحنی  $C_p$  ممکن است در اثر مرور زمان و فرسودگی سیستم و یا شرایط جوی تغییر کند. مقدار منفی  $C_p$  مربوط به عملیات راه اندازی است که طی آن توربین می تواند از شبکه انرژی بگیرد.



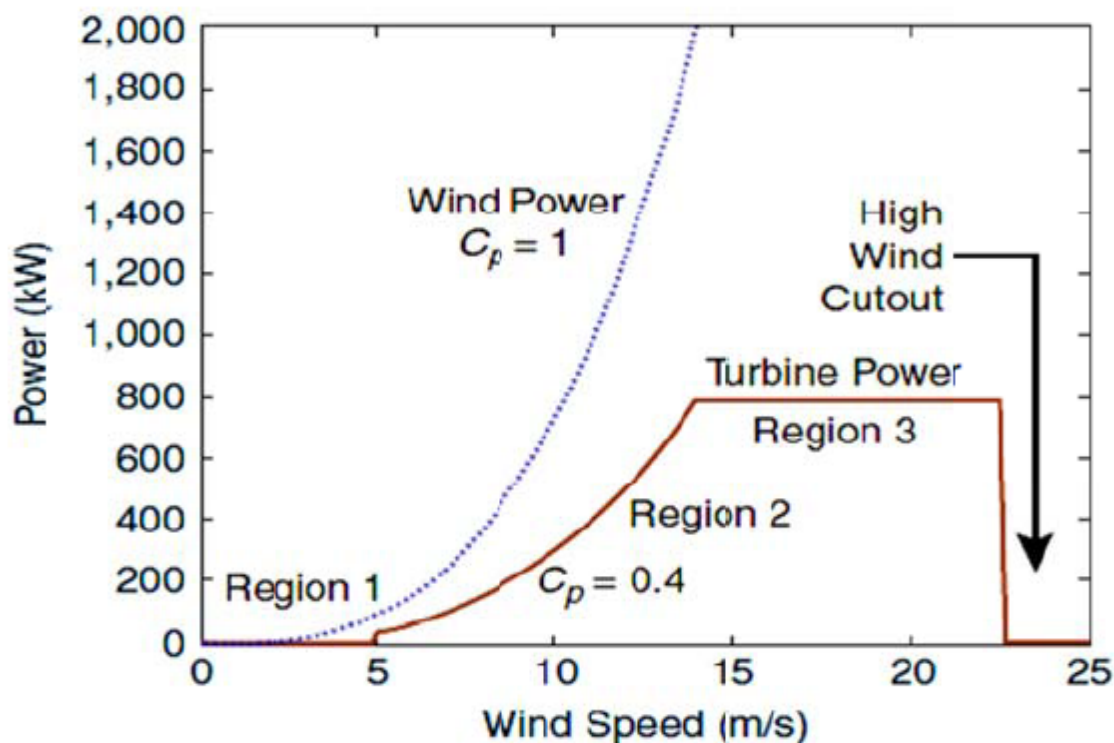
شکل ۳-۲ نمایش دیگری از منحنی ضریب توان برای یک نمونه توربین

از طرفی توان آیرودینامیکی را می توان طبق رابطه زیر بر حسب گشتاور آیرودینامیکی  $T_{aero}$  و سرعت زاویه ای روتور  $\omega$  به دست آورد:

$$P = T_{aero}\omega \quad (۵-۳)$$

در شکل ۳-۳ منحنی توان بر حسب سرعت باد، در صورتیکه ضریب دریافت توان برابر ۱ باشد بصورت نقطه چین نشان داده شده است. اما در شرایط واقعی این حداکثر تئوری میزان  $0.591$  می تواند باشد که

به آن حد بتز<sup>۳۰</sup> گفته می شود. در همین نمودار منحنی توان بر حسب سرعت باد در حالت ایده آل و عملی برای توربین با ضریب توان ۰/۴ با خط ممتد نشان داده شده است.



شکل ۳-۳ منحنی توان بر حسب سرعت باد در دو حالت ایده آل و عملی [۲۸]

در بخشهای بعدی در مورد نامگذاری نواحی مختلف کاری بیشتر توضیح داده خواهد شد.

### ۳-۳ ردیابی حداکثر توان<sup>۳۱</sup>

همانطور که قبلاً هم اشاره شد در مورد نواحی کاری توربین باد، در صورتی که سرعت توربین از سرعت قطع پایین بیشتر و از سرعت نامی کمتر باشد در این شرایط تلاش بر این است که از حداکثر انرژی

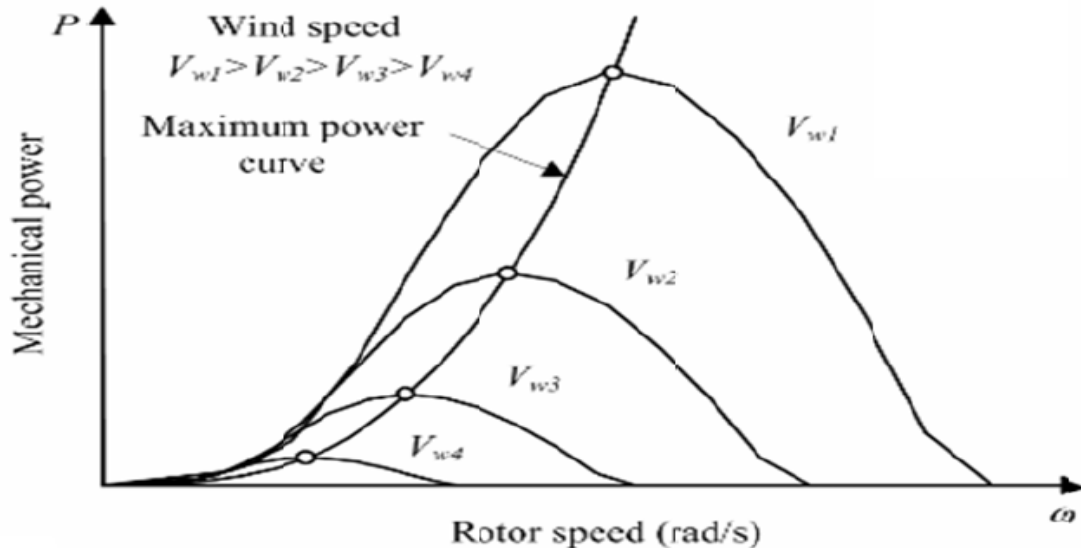
<sup>30</sup> Betz Limit

<sup>31</sup> Maximum Power Point Tracking(MPPT)

موجود در باد استفاده شود. در این ناحیه مطلوب این است که سرعت روتور و زاویه پره ها به گونه ای باشد که  $C_p$  در مقدار حداکثر خود قرار گیرد و حداکثر توان ممکن تولید شود. بدین منظور با توجه به رابطه های ۳-۳ و ۴-۳ و همچنین منحنی  $C_p$  سعی می شود با کنترل سرعت روتور مقدار سرعت نسبی ( $\lambda$ ) در یک مقدار زاویه پره معین ، مقدار بهینه داشته باشد تا حداکثر  $C_p$  به دست آید، بنابراین داریم:

$$\omega_{opt} = K_{opt} v_{wind} \quad (۶-۳)$$

هنگامی که در رابطه ۶-۳ ،  $K_{opt}$  متناسب با  $\lambda$  بهینه انتخاب شود و سرعت ژنراتور توسط این رابطه تنظیم گردد MPPT میسر شده و حداکثر توان از باد دریافت می گردد. مطابق این روش می توان سرعت باد را در هر لحظه در مقدار  $K_{opt}$  ضرب کرد و سرعت بهینه روتور را محاسبه نمود. تغییر سرعت روتور و یا سرعت باد باعث تغییر بیشینه سرعت نسبی و تغییر ضریب توان سیستم می شود. شکل ۴-۳ مشخصه توان مکانیکی توربین را به صورت تابعی از سرعت دوران پره های آن در سرعت های مختلف باد نشان می دهد. [۲۸]

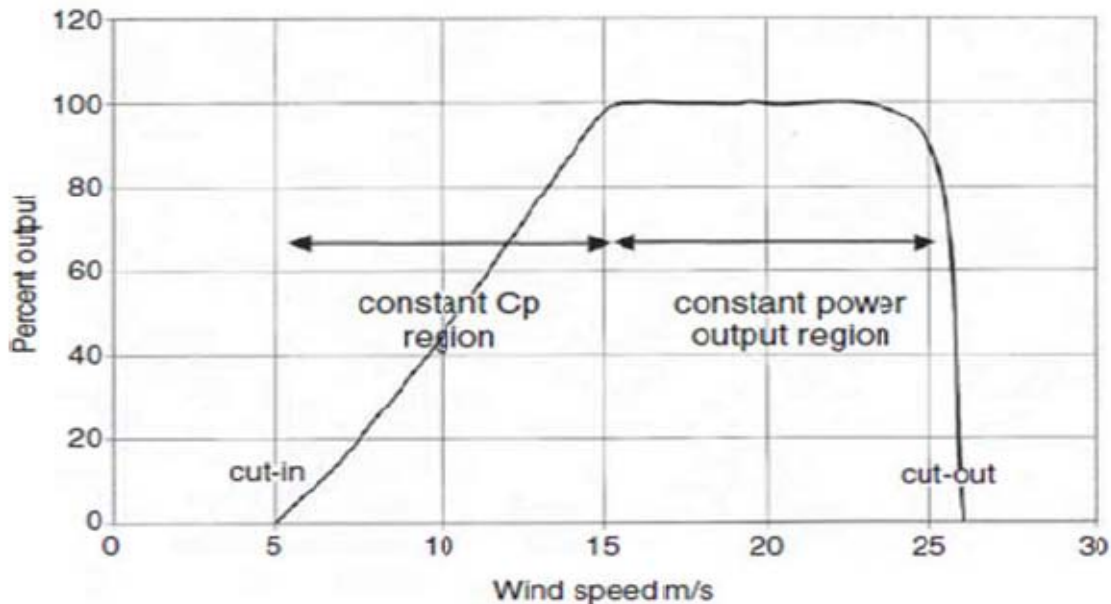


شکل ۴-۳ مشخصه توان مکانیکی توربین به صورت تابعی از سرعت دوران پره ها [۲۸]



### ۳-۴ نواحی کاری توربین و اهداف کنترلی آن

هر توربین سه ناحیه کاری دارد که مطابق نیازهای این نواحی، استراتژی و مساله کنترلی تغییر خواهد کرد. این سه ناحیه در شکل ۳-۵ نشان داده شده است. ناحیه یک زمانی است که هنوز سرعت باد به اندازه کافی برای راه اندازی توربین نرسیده است که به آن سرعت قطع پایین گفته می شود. هنگامی که سرعت باد از این مقدار بالاتر رود به ناحیه دو وارد می شویم و سرعت نامی باد آخرین نقطه این ناحیه خواهد بود. همانطور که در قسمت ۳-۳ نیز اشاره شد هدف کنترلی در این ناحیه حداکثر کردن توان است یا دنبال کردن MPPT است. پس از عبور از نقطه نامی تا زمان رسیدن به سرعت قطع بالا ناحیه سه کاری توربین خواهد بود که بایستی با تغییر زاویه پره توان، سرعت و گشتاور توربین در حد نامی باقی بماند. در صورتی که سرعت باد از حد قطع بالا عبور کند بایستی توربین خاموش<sup>۳۲</sup> شود تا شرایط ایمن داشته باشیم



شکل ۳-۵ نواحی کاری توربین بادی [۲۹]

<sup>32</sup> Shut Down

به این ترتیب در ناحیه ۲ و ۳ عملکردهای متفاوتی از سیستم کنترل انتظار داریم و دو کنترل کننده مختلف فعال می شود. در ناحیه ۲ باید حداکثر توان را داشته باشیم، در حالی که در ناحیه ۳ تلاش بر تثبیت توان و سرعت است. در ناحیه دو عملگرهای سیستم IGBT و یا تایرستورهای مبدل‌های سمت شبکه و ژنراتور است، درحالی که عملگر کنترل کننده در ناحیه ۳ محرکهای زاویه پره است که یا به صورت موتور الکتریکی و یا به صورت هیدرولیکی خواهد بود.

سازندگان مختلف توربین باد استراتژیهای مختلفی برای سوچ کردن بین کنترل کننده ها در نظر می گیرند، که عمدتاً به صورت دو سیستم مجزا در نظر گرفته می شود اما برخی دیگر، کنترل کننده محدود کننده توان (زاویه پره) را قبل از رسیدن به نقطه ۱۰۰٪ نامی فعال نگه داشته تا بتوانند در زمان تغییر کنترلگر، پارامترهای سیستم از جمله سرعت و گشتاور را بتوانند به شکل بهتری کنترل نمایند.

### ۳-۵ مدل ریاضی ژنراتور

در جدول ۳-۱ متغیرهای این بخش آورده شده است [۲۹]:

نماد	پارامتر
$p_b$	تعداد زوج قطب ها
$f$	فرکانس
$R_s$	مقاومت استاتور
$L_d$	اندوکتانس محور $d$ استاتور
$L_q$	اندوکتانس محور $q$ استاتور
$K_e$	ولتاژ ثابت
$J$	اینرسی
$B$	اصطکاک
$\Psi_m$	شار پیوندی مغناطیس دائم
$T_e$	گشتاور الکترومغناطیسی
$T_i$	گشتاور بار
$\omega_r$	سرعت چرخش روتور به rpm

جدول ۳-۱ متغیرهای مدل ژنراتور

معادله ولتاژ استاتور مطابق رابطه ۷-۳ است:

$$\vec{U}_s = R_s \vec{i}_s + \frac{d}{dt} \vec{\Psi}_s \quad (7-3)$$

پس از تبدیل سیستم از مختصات abc به مختصات dq معادلات ولتاژ به صورت زیر خواهد بود:

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\Psi_d}{dt} - \omega_e \Psi_q \quad (8-3)$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\Psi_q}{dt} - \omega_e \Psi_d$$

$$\Psi_d = L_d i_{sd} + \Psi_m \quad (9-3)$$

$$\Psi_q = L_q i_{sq}$$

در ادامه برای معادلات گشتاور خواهیم داشت:

$$T_e = \frac{3p_b}{4} (\Psi_d i_{sq} - \Psi_q i_{sd}) \quad (10-3)$$

$$T_e = \frac{3p_b}{4} (\Psi_m i_{sq} - (L_d - L_q) i_{sd} i_{sq})$$

در ژنراتورهای نوع قطب برجسته ، اندوکتانس محور d و q برابرند:

$$T_e = \frac{3p_b}{4} \Psi_m i_{sq} \quad (11-3)$$

و معادلات توان اکتیو و راکتیو به صورت زیر است:

$$P = u_{sd} i_{sd} + u_{sq} i_{sq} \quad (12-3)$$

$$Q = u_{sd} i_{sq} - u_{sq} i_{sd}$$

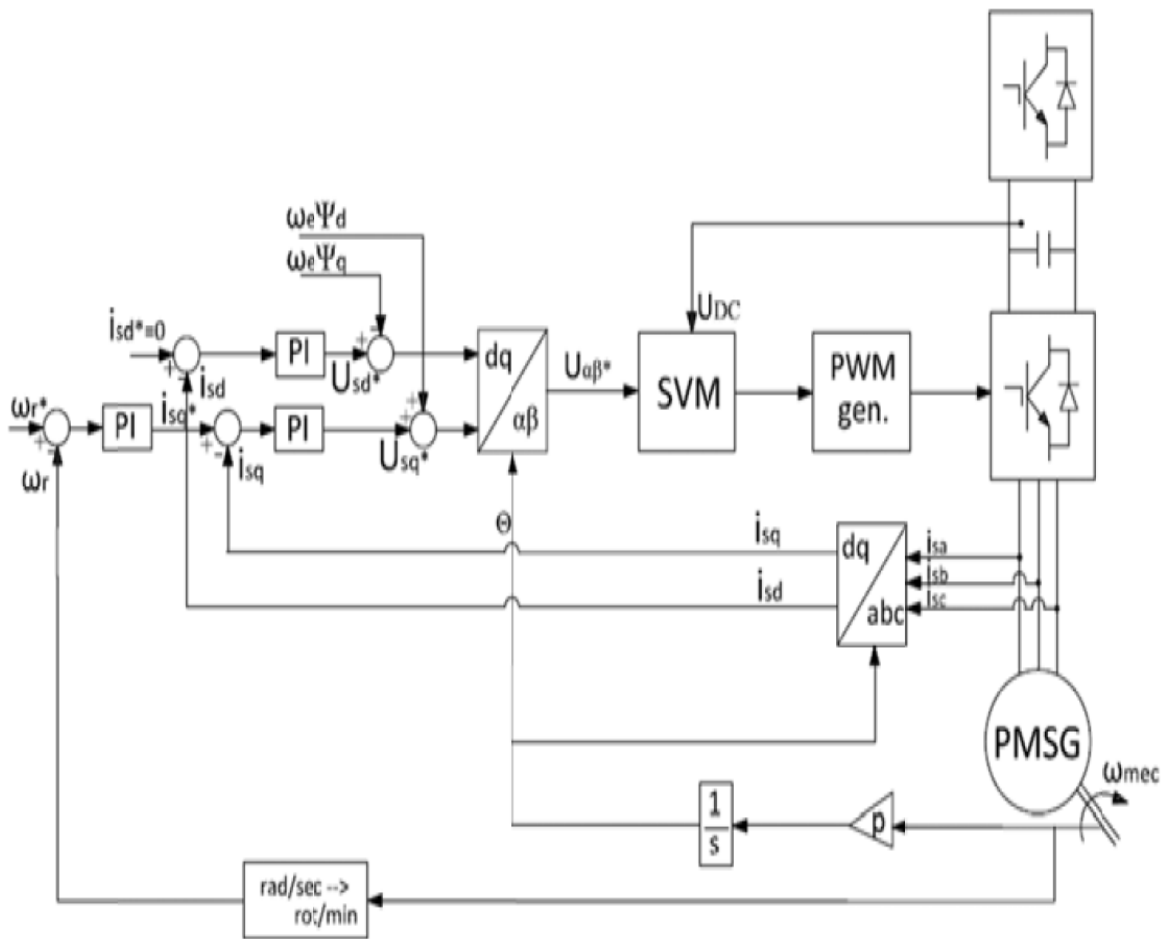
### ۳-۶ کنترل توان در ژنراتورهای مغناطیس دائم

توربین های سرعت متغیر قابلیت استحصال حداکثر توان در سرعت های کمتر از سرعت نامی را دارند. اما مقدار انرژی استخراجی علاوه بر وضعیت باد در منطقه به استراتژی کنترلی اعمالی نیز بستگی دارد. به عنوان مثال روش کنترل گشتاور مستقیم معمولاً در توان بالا مورد استفاده قرار می گیرد و سرعت پاسخ دهی خوبی دارد. روش دیگر کنترل مبتنی بر جریان میدان استاتور<sup>۳۳</sup>(FOC) است. در این روش گشتاور به صورت غیر مستقیم و از طریق جریان استاتور کنترل می شود. در ادامه این روش توضیح داده می شود. استراتژی کنترل در قالب dq بیان می شود. برای سادگی در صورت اختلاف اندکی در اندوکتانسهای محورهای d و q باز هم روابط مربوط به ژنراتور قطب برجسته قابل اعمال خواهد بود.

طبق رابطه ۳-۱۱ با کنترل جریان محور q استاتور، گشتاور قابل کنترل است. در صورتی که در تبدیل abc به dq جریان محور d را صفر کنیم، آنگاه جریان استاتور تنها شامل جریان محور q خواهد بود، از آنجا که شار مغناطیس دائم ثابت است، گشتاور تنها به جریان محور q وابسته است. شماتیک ساختار کنترل در شکل ۳-۶ آورده شده است. [۲۹]

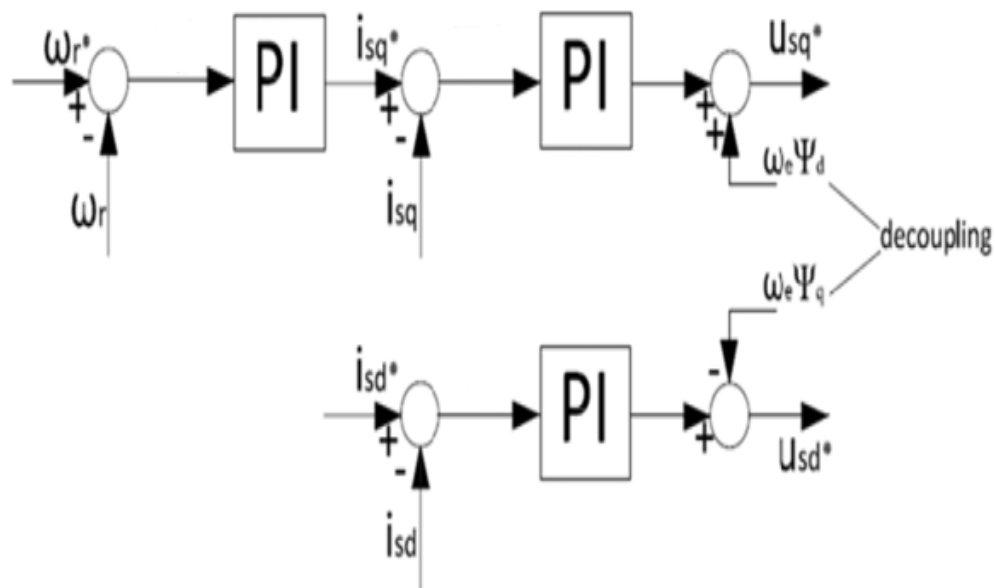
---

<sup>33</sup> Field Oriented Control



شکل ۳-۶ ساختار کنترل FOC

پارامترهای اندازه گیری شده برای کنترل ولتاژ DC، جریان استاتور و مکان روتور می باشد. جریان  $i_{sd}$  برابر با صفر و جریان  $i_{sq}$  به عنوان مرجع برای استخراج حداکثر توان به کنترل کننده PI داده می شود. از روابط ریاضی مطابق شمایک، ولتاژ dq از کنترل کننده های PI حاصل شده است. در ادامه یک روش طراحی کنترلر PI را در این ساختار بررسی می کنیم. در شکل ۳-۷ شکل کلی حلقه کنترلی محور d و q نمایش داده شده است. [۲۹]



شکل ۳-۷ حلقه های کنترلی محورهای q,d

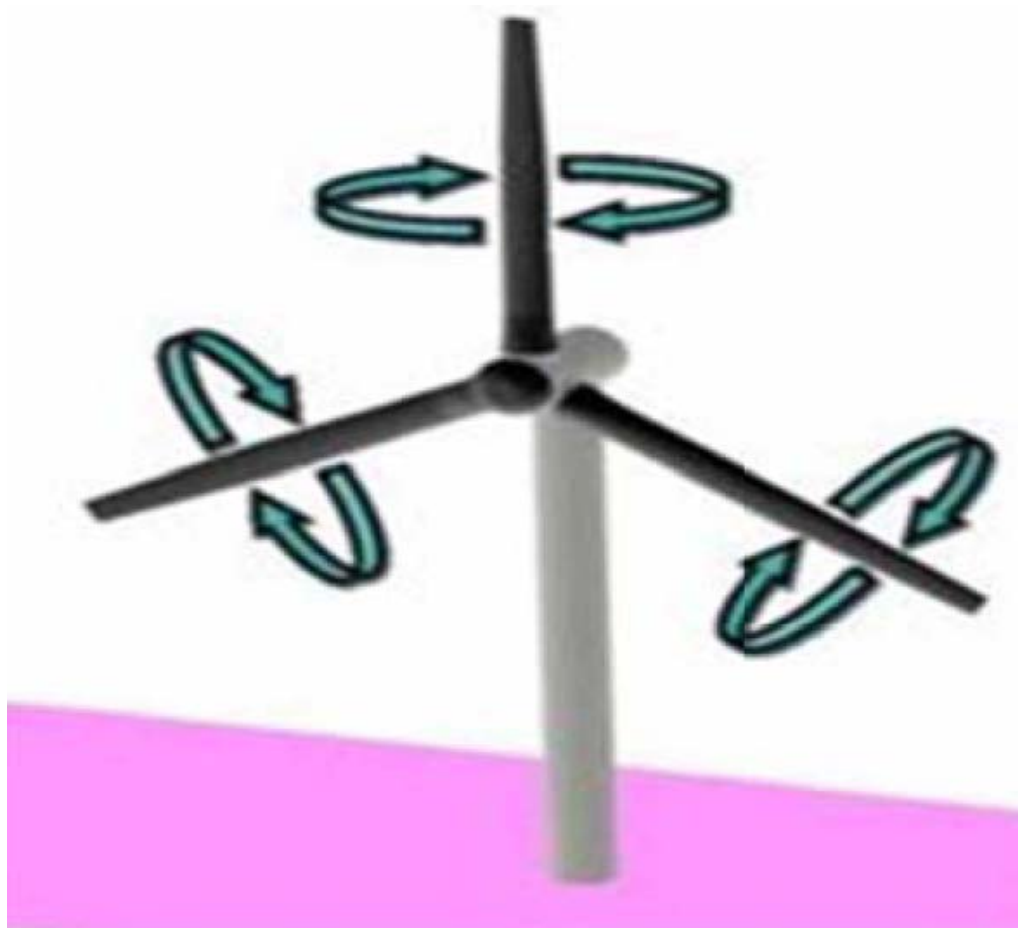
در شکل بالا برای محور q، حلقه ی بیرونی برای کنترل سرعت به کار برده می شود. که به این منظور از مولفه q جریان استفاده می شود. همانطور که اشاره شد در این نوع ژنراتور نقطه تنظیم مولفه d جریان صفر است و درنهایت برای حذف اثر تداخل مولفه های q و d عبارت نهایی در خروجی یعنی  $\omega_e \Psi_d$  و  $\omega_e \Psi_q$  نیز اضافه و کم شده است که این تداخل را حذف کند.

### ۳-۷ زاویه پره

زاویه پره برابر با میزان چرخش پره های توربین حول محور خودشان است (شکل ۳-۱۲). در ناحیه دو بهره برداری توربین زمانی که سرعت باد کمتر از مقدار نامی باشد زاویه پره باید در نقطه صفر درجه و یا نزدیک آن قرار گیرد تا در این شرایط محدودیتی از ناحیه زاویه پره ها نداشته باشیم و شرایط لازم برای استحصال حداکثر توان مهیا باشد، مگر اینکه کنترل کننده توان مجموعه مزرعه بادی (کنترلگر سطح

بالتر) درخواست باری کمتر از مقدار حداکثر داشته باشد که در این حالت با افزایش زاویه پره توان کاهش داده می شود تا به مقدار مرجع خواسته شده برسد.

همانطور که در بخش ۳-۳ هم به آن اشاره شد، با افزایش سرعت باد و عبور پارامترهای اصلی توربین (سرعت، توان و گشتاور) از نقطه نامی، کنترل کننده محدود کننده سرعت فعال می شود.



شکل ۳-۸ تغییرات زاویه پره

استفاده از کنترل زاویه پره مزایای زیر را دارد:

- تثبیت پارامترهای سیستم مانند سرعت، توان و گشتاور در محدوده ی نامی

- افزایش کیفیت توان

- حداقل کردن اثرات ناشی از تنشهای مکانیکی و بارهای اعمالی به پره، برج و ناسل

کنترل زاویه پره توربین از دیدگاه تنظیم یا محدود نمودن توان توربین و سرعت روتور به ویژه در سرعتهای بالای باد حائز اهمیت است. روشهای کلاسیک و متداول کنترل زاویه پره اغلب به صورت استفاده از کنترل کننده PI است. برای تغییر وضعیت پره های توربین از سرووهای هیدرولیکی و یا الکتریکی استفاده می شود. حداکثر نرخ تغییرات زاویه با توجه به ابعاد پره و توانایی محرک آن بین ۵ تا ۱۲ درجه بر ثانیه است.

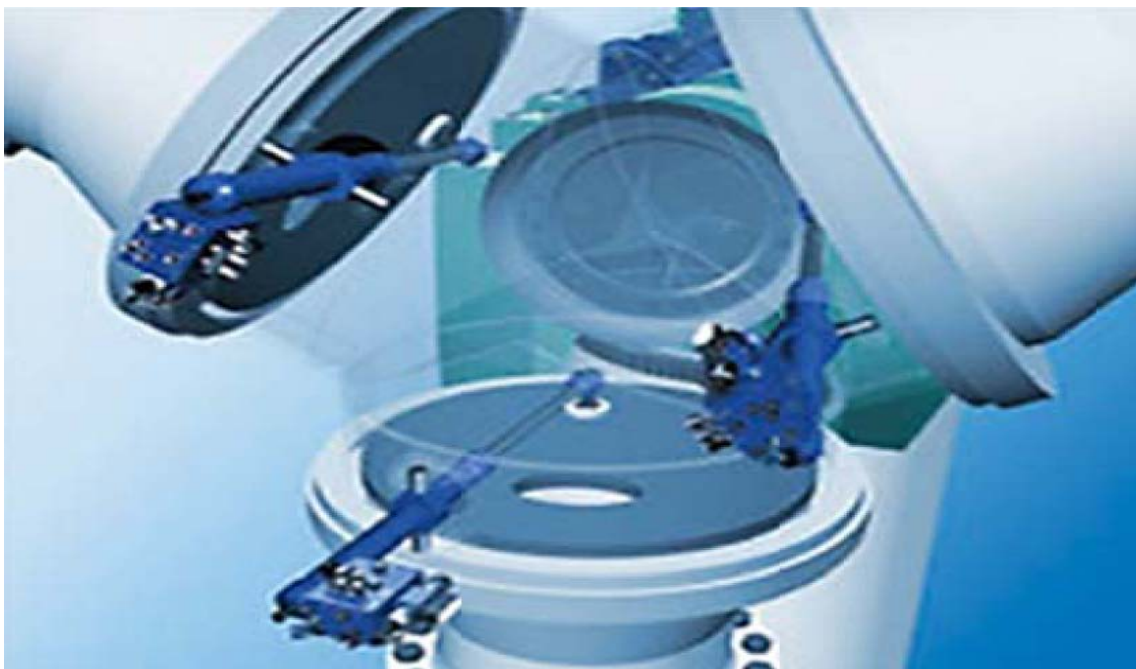
### ۳-۸ مکانیزم عملگر زاویه پره

یکی از قسمتهای مهم سیستم برای کنترل توربین باد در ناحیه ۳، سیستم عملکرد زاویه پره است. به طور عمومی از هر دو نوع عملگر هیدرولیکی و الکتریکی در توربین های امروزی استفاده می شود که هر کدام معایب و مزایای خاص خود را دارد.

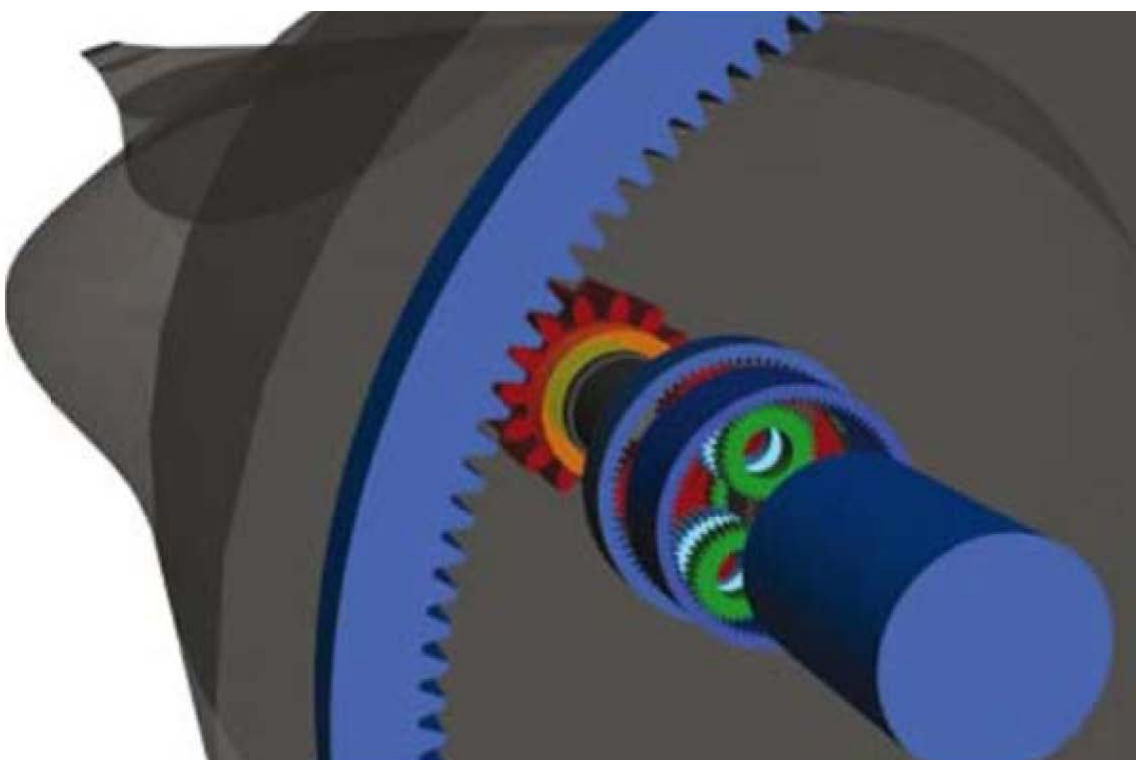
شکل ۳-۹ عملگر هیدرولیکی را نشان می دهد که هر کدام زاویه پره مربوط به خود را تغییر می دهد،

شکل ۳-۱۰ نیز شکل یک عملگر از نوع موتور الکتریکی بر روی یک پره را نشان می دهد. [۲۹]



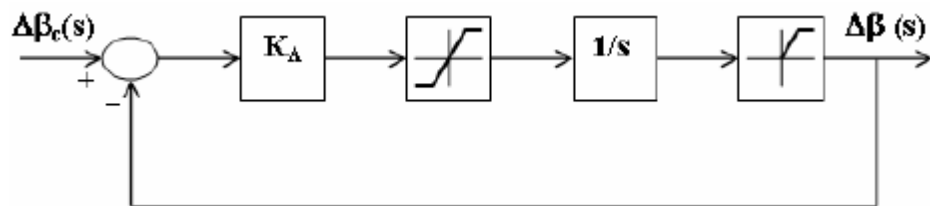


شکل ۳-۹ مکانیزم تنظیم پره ها با عملگر هیدرولیکی

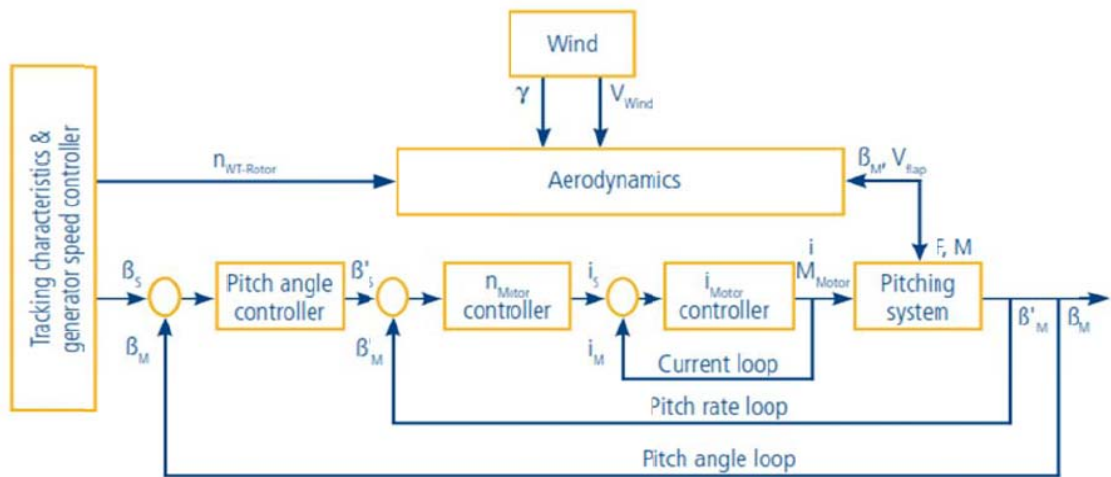


شکل ۳-۱۰ مکانیزم تنظیم زاویه پره ها با عملگر الکتریکی

برای عملگر زاویه پره، دو روش وجود دارد یکی اینکه هر سه پره با یک ساختار اهم بندی عمل کند، در این حالت هر سه پره یک زاویه را خواهد داشت. حالت دیگر این است که هر کدام از پره ها به صورت جداگانه فرمان بگیرد. روش اول متداولتر است اما استفاده از عملگرهای جداگانه این حسن را دارد که می توان بارهای پیچشی و خمشی وارده به پره ها را بصورت تکی کنترل کرد و در مجموع عملکرد بهتری برای کنترل پارامترها داشت، ولی کنترل سیستم در این روش پیچیده تر و پرهزینه خواهد بود. شکل‌های ۱۱-۳ و ۱۲-۳ نیز به صورت نمونه دیاگرام بلوکی عملگر هیدرولیکی و الکتریکی را نشان داده است. [۲۹]



شکل ۱۱-۳ مدل دیاگرام بلوکی عملگر زاویه گام هیدرولیکی



شکل ۱۲-۳ مدل کلی دیاگرام بلوکی عملگر پره از نوع الکتریکی

لازم به ذکر است نرخ تغییرات زاویه گام در عملکرد کنترلگر زاویه پره دارای نقش حیاتی است. به عبارت دیگر در صورتی که نرخ عملگر زاویه پره کم باشد، مکانیزم کنترلی نمی تواند منحنی موقعیت مرجع را دنبال کند، و اگر زیاد باشد، گشتاور زیادی را برای عملکرد نیاز دارد و باعث استرس زیاد بر روی پره ها و قسمتهای مکانیکی هاب می شود. در نتیجه به دست آوردن نرخ زاویه پره مناسب، حداکثر و حداقل ممکن، اهمیت بالایی در کنترل مناسب زاویه گام از نظر عملکرد تعریف شده و مسئله خستگی<sup>۳۴</sup> دارد. برای داشتن شبیه سازی مطمئن و نزدیک به واقعیت، مدل سازی عملگر زاویه پره و استفاده از آن در شبیه سازی ها اهمیت ویژه دارد. در این شبیه سازی برای عملگر زاویه از یک محدود کننده در بازه (۰-۳۰) به همراه یک بلوک محدود کننده نرخ تغییرات که عدد آن 10 deg/s استفاده شده است.

### ۳-۹ زاویه پره در راه اندازی

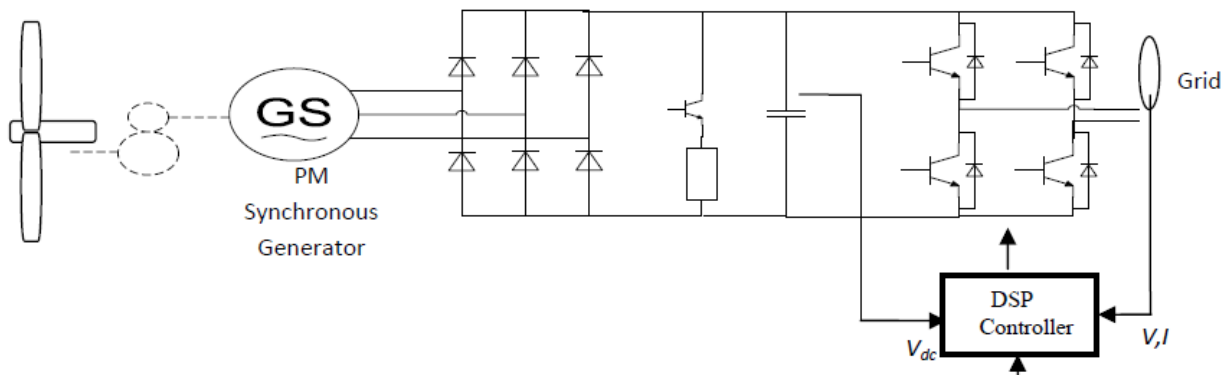
معمولا در زمان شروع به کار توربین باد از شرایط توقف، ابتدا توسط مکانیزم کنترل زاویه پره افزایش پیدا می کند تا گشتاور راه اندازی بیشتر شود و آغاز دوران روتور راحت تر صورت گیرد، در این شرایط با گرفتن انرژی از شبکه اقدام به دور دادن توربین می کنیم به همین خاطر برای اینکه نیروی باد کمترین اثر آیرودینامیکی را روی توربین بگذارد زاویه پره بایستی مقدار مثبت داشته باشد. در این شرایط با دور گرفتن توربین و رسیدن ژنراتور به حد معینی از سرعت، مقدار زاویه پره به صفر درجه بر میگردد تا شرایط برای دریافت حداکثر توان در ناحیه دو فراهم شود. با این شرایط به محض رسیدن سرعت توربین به حداقل لازم، توربین وارد ناحیه ۲ بهره برداری شده و کنترل کننده حداکثر توان فعال می شود. به عنوان مثال در یک نمونه توربین آموزشی ۲/۵ کیلو وات، زاویه گام تا ۱۷ درجه افزایش می یابد سپس به تدریج کاهش می یابد.

---

<sup>34</sup> Fatigue

### ۳-۱۰ معرفی سیستم موجود

سیستم مورد مطالعه در این پایان نامه یک توربین باد ۱۰۰ کیلوواتی از نوع سرعت متغیر با ژنراتور از نوع مغناطیس دائم (PMSG) بوده و مطابق شکل ۳-۱۳ از سه مجموعه اصلی توربین، ژنراتور و مبدل تشکیل شده است. انرژی دریافتی از سرعت باد توسط این توربین باد به وسیله ژنراتور به انرژی الکتریکی تبدیل می شود. با توجه به سرعت متغیر بودن توربین و امکان دریافت حداکثر توان از باد (MPPT)، کنترل این عملکرد و تزریق توان با کیفیت مطلوب به شبکه از طریق مبدل انجام می گیرد. مبدل مورد نظر توان



شکل ۳-۱۳ مجموعه توربین بادی، ژنراتور و مبدل مرتبط با شبکه

مورد نیاز را به شکل AC به شبکه تزریق می کند. همانطور که در شکل ۳-۱۳ پیداست، فرایند کنترلی بر روی مبدل انجام می گیرد. در واقع مبدل وظیفه کنترل دریافت حداکثر توان و انتقال آن در سطح ولتاژ شبکه و همچنین تامین توان راکتیو مورد نیاز شبکه را به عهده دارد.

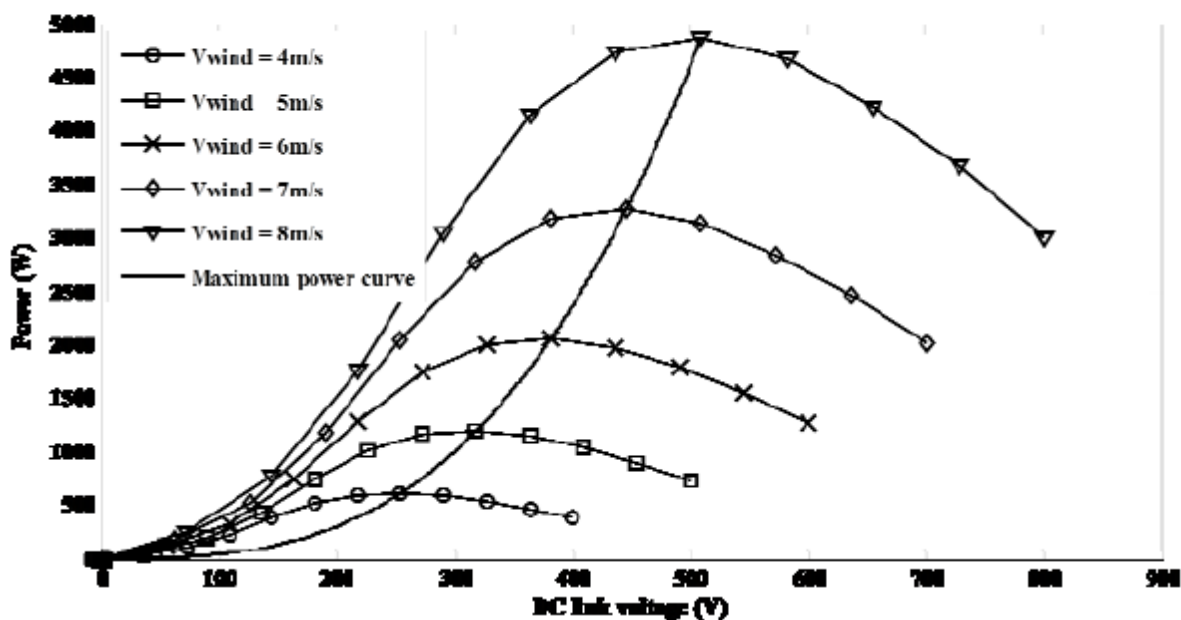
سرعت روتور متناسب با ولتاژ ترمینال ژنراتور می باشد و در این ساختار به دلیل اینکه ولتاژ از طریق یک مبدل تمام پل یکسو می گردد، ولتاژ ترمینال نیز نسبتی از ولتاژ یکسو شده آن می باشد:

$$V_{LL} = f(\omega_e) \quad (۳-۱۳)$$

که در آن  $V_{LL}$  ولتاژ موثر ترمینال و  $\omega_e$  سرعت روتور ژنراتور می باشد.  $f$  تابعی است با توجه به آزمایش بارداري ژنراتور تا قبل از ورود به ناحیه اشباع تعیین می گردد.  $V_{dc}$  ولتاژ لینک DC پس از یکسوسازی تمام پل سه فاز می باشد.

$$V_{dc} = \frac{1}{\pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} V d\theta = \frac{1}{\pi} \int_{\pi/3}^{2\pi/3} V_m \sin \theta d\theta = \frac{3}{\pi} V_m = \frac{3}{\pi} \sqrt{2} V = 1.35V \quad (14-3)$$

با توجه به روابط ۱۳-۳ و ۱۴-۳ در این توربین، منحنی جدیدی برای احراز حداکثر توان در نظر گرفته می شود. مطابق این منحنی حداکثر توان آیرودینامیک دریافتی از توربین بر اساس ولتاژ لینک DC تعیین می گردد. شکل ۱۴-۳ منحنی دریافت حداکثر توان در سرعتهای مختلف باد بر اساس ولتاژ لینک DC را نمایش می دهد.



شکل ۱۴-۳ منحنی توان توربین بر حسب VDC مختلف و منحنی MPPT

از آنجا که اندازه گیری توان آیرودینامیکی بسیار دشوار می باشد، می توان منحنی MPPT را بصورت توان خروجی سیستم - ولتاژ لینک DC رسم کرد. بر این اساس با توجه به مشخصه آیرودینامیک توربین حداکثر توان خروجی سیستم در ازای حداکثر توان دریافتی در هر ولتاژ لینک DC محاسبه می گردد. منحنی خروجی سیستم بر اساس منحنی ولتاژ به صورت معادله ۳-۱۵ می باشد:

$$P_{out-max} = a_3 V_{dc}^3 + a_2 V_{dc}^2 + a_1 V_{dc} + a_0 \quad (۱۵-۳)$$

با توجه به مشخصه شکل ۳-۱۴ منحنی دریافت حداکثر توان بر اساس ولتاژ لینک DC برای سیستم کنترل MPPT مورد استفاده قرار می گیرد. به این ترتیب برای این توربین منحنی نهایی MPPT از طریق آزمونهای متعدد به صورت زیر به دست آمده است:

$$P(V_{dc}) = -10.14831 * 10^{-10} V_{dc}^3 + 8.5641 * 10^{-3} V_{dc}^2 + 6.856 V_{dc} - 2807.46 \quad (۱۶-۳)$$

هنگامی که با افزایش سرعت باد ، مشخصه های توربین به مقادیر نامی شان نزدیک می شود، توان توربین به ۱۰۰ کیلو وات و سرعت زاویه ای روتور ژنراتور به 325 rpm می رسد. در پیاده سازی اولیه از روش کلاسیک برای کنترل سرعت روتور استفاده شده است که مبتنی بر یک کنترل کننده PI است. در این طراحی همانطور که در بخشهای قبل نیز اشاره شد در ناحیه ۲ زاویه پره در وضعیت صفر درجه است تا اینکه به سرعت نامی برسد، و پس از آن است که در صورت عبور از سرعت نامی ، سیگنال خطای کنترل کننده PI مقدار غیر صفر پیدا می کند (مقدار مثبت در این حالت) و خروجی کنترل کننده منجر به افزایش زاویه پره و نهایتاً تثبیت سرعت خواهد شد. به این ترتیب با این عملگر جلوی افزایش بیش از حد سرعت روتور گرفت خواهد شد و توان آیرودینامیکی نیز تثبیت می شود. یکی از محدودیتهایی که در عمل با آن مواجه هستیم اندازه گیری مقدار دقیق سرعت باد است. به علت ماهیت اتفاقی بودن تغییرات سرعت باد ، اندازه گیری دقیق آن همراه با دشواری های زیاد و از طرفی هزینه های زیاد خواهد بود.

بنابراین راه حلهای کنترلی که مبتنی بر اندازه گیری دقیق باد نباشد و یا نیاز به اندازه گیری سرعت باد نداشته باشد یک مزیت محسوب می شود.

در روش کلاسیک موجود با تنظیم ضرایب PI فعلی ، سیگنال فرمان برای عملگر زاویه پره پس از رسیدن به نقطه نامی و عبور از آن صورت می گیرد. یکی از مشکلاتی که این روش کنترلی به همراه دارد این است که از زمان اعمال کنترل زاویه، با وجود اینکه توان در محدوده مجاز باقی مانده است اما سرعت روتور، فراجهدش زیاد و زمان استقرار طولانی دارد. این موضوع باعث می شود که توربین در ناحیه سرعت خیلی بالا قرار گیرد و احتمال عملکرد سیستم حفاظت و شات دان توربین وجود دارد. راه اندازی مجدد توربین استهلاک داشته و زمان مورد نیاز خود را می برد، بنابراین عبور از این مشکل ضروری است.

در مورد علت این خطا می توان به این نکته اشاره کرد که در زمانی که فرمان برای عملگر زاویه پره ارسال می شود مقدار خطای ورودی عدد کوچکی است. از طرفی به علت غیر خطی بودن سیستم میزان زاویه پره مورد نیاز برای تثبیت سرعت در ابتدای ناحیه ۳ بسیار بیشتر از قسمتهای بعدی ناحیه ۳ است ، علاوه بر این کنترل کننده PI در بهترین شرایط نیز عملکرد محدودی دارد و سرعت آن از حد معینی نمی تواند بیشتر شود، به همین علت است که میزان درصد بالازدگی و زمان استقرار هنگام تغییر ناحیه کاری توربین باد از ناحیه ۲ به ناحیه ۳ مشخصاً عدد قابل توجهی خواهد بود که این موضوع استفاده از کنترل کننده های جایگزین را گوشزد میکند.





## فصل چهارم:

طراحی کنترل کننده پیشنهادی

(رگولاتور خود تنظیم غیر مستقیم)

#### ۴-۱ مقدمه

همانطور که قبلاً هم اشاره شد با توجه به ماهیت اتفاقی سرعت باد و همچنین پیچیدگی‌ها و عدم امکان شناخت تمام دینامیکهای این بخش به صورت دقیق، استفاده از کنترل تطبیقی می‌تواند گزینه خوبی باشد.

در این قسمت سعی بر استفاده از یک رگولاتور خود تنظیم غیر مستقیم است که به صورت پیوسته پیاده سازی شده است، در انتها برای کامل بودن مبحث پیاده سازی گسسته آن نیز صورت گرفته و نتایج آن نیز ارائه شده است. این بخش شامل دو قسمت شناسایی و طراحی کنترل کننده است که به تفصیل به آن پرداخته می‌شود.

#### ۴-۲ شناسایی سیستم بصورت پیوسته

شناسایی به صورت گسسته به لحاظ پیاده سازی شاید ساده تر از شناسایی پیوسته باشد، اما شناسایی پیوسته دارای مزایای متعددی است که به آن اشاره می‌شود [۳۰]:

- به طبیعت و فیزیک سیستم تحت کنترل نزدیکتر است و بنابراین درک بهتری به ما می‌دهد.
- اطلاعات جزئی سیستم حفظ می‌شود و در صورت بروز مشکل برای قسمتی از شناسایی پارامترهای دیگر هنوز قابل اعتبار خواهند بود.
- با گسسته کردن یک تابع تبدیل حداقل فاز احتمال دارد که معادل گسسته آن از حالت حداقل فاز خارج شود. این اتفاق به پارامترهای تابع تبدیل و زمان نمونه برداری بستگی دارد، به عنوان مثال در تابع تبدیل  $\frac{a}{s(s+1)}$  در صورتی که زمان نمونه بردای از  $0.5$  ثانیه کمتر باشد و مقدار  $a$  را بزرگتر از ۲ در نظر بگیریم این سیستم در عین اینکه در حالت پیوسته حداقل فاز است اما در حالت گسسته به راحتی از حالت حداقل فاز خارج می‌شود.

- گسسته سازی احتمال بروز برخی حساسیتهای ناخواسته در سیگنالها به ویژه در نرخهای نمونه برداری بالا می شود، با توجه به اینکه  $z = e^{sT_s}$  ، در صورتی که  $T_s$  یا همان زمان نمونه برداری به صفر میل کند مقدار  $z$  به ۱ میل می کند، این یعنی که در شرایط عادی با تبدیل از حالت پیوسته به گسسته قطبها به مرز ناپایداری میل می کند. برای جلوگیری از این مشکل بایستی از روشهای اصلاح شده تبدیل استفاده کرد.

در مقالات بررسی شده توربین باد تاکنون استفاده از شناسایی پیوسته صورت نگرفته است، با توجه به مزایای ذکر شده بالا منطقی به نظر می رسد این قابلیت را برای سیستم مورد نظر پیاده کرد که به لحاظ نوآوری می تواند فعالیت جدیدی محسوب شود.

با توجه به ماهیت توربین باد که همواره در شرایط مختلف سرعت باد کار می کند اغتشاشهای دائمی به سیستم وارد می شود. در شرایط واقعی مقدار  $C_p$  بسیار متغیر بوده و با تغییر شرایط جوی تغییر می کند. برخی اغتشاشها نیز از سمت شبکه قدرت به سیستم تحمیل می شود (مانند کاهش ناگهانی توان یا افزایش آن) علاوه بر این به مرور زمان دینامیکهای سیستم تغییر می کند و عملکرد شناسایی در زمانهای مختلف متفاوت خواهد بود. به این علت استفاده از شناسایی آنلاین مناسبتر است و با این روش شناسایی بهتر می توان اغتشاش و اثر تغییر دینامیکها را در کنترلگر لحاظ کرد. حال آنکه در شناسایی آفلاین چون فرآیند شناسایی یک بار صورت می گیرد امکان به روز شدن شناسایی و تغییر پارامترهای کنترلگر در صورت تغییرات سیستم با گذشت زمان وجود ندارد. به این علت در این پژوهش مبنا شناسایی آنلاین خواهد بود.

برای شروع فرآیند شناسایی باید ابتدا ورودی و خروجیها را دقیقاً شناخته و عوامل موثر بر آن را مدنظر قرار دهیم. در این بخش ورودی سیستم زاویه پره و خروجی آن سرعت توربین (WT) خواهد بود. سرعت

باد در اینجا به صورت اغتشاش خواهد بود که بر شرایط سیستم تاثیر میگذارد و پارامتر تحت کنترل (WT) را تغییر می دهد. هدف کنترل زاویه پره تثبیت این سرعت در مقدار 325rpm خواهد بود. در واقع مساله کنترلی در اینجا ردیابی خواهد بود.

سرعت باد در این شبیه سازی باید در ناحیه ۳ توربین تغییر کند تا عملکرد کنترل زاویه پره را بررسی کنیم. به این منظور سرعت باد از مقدار 10 m/s تا 20 m/s به صورت پله ای تغییر می کند و با این تغییرات سرعت توربین هم تغییر می کند ولی عملکرد زاویه پره این تغییرات را حداقل کرده و سرعت را به مقدار نامی برمی گرداند.

با توجه به اینکه شبیه سازی ارائه شده مربوط به توربین باد ۱۰۰ کیلو وات کامل بوده، بنابراین شناسایی و کنترل کننده نیز بایستی در دل این شبیه سازی قرار گیرد. اولین قدم برای شناسایی این است که بتوانیم مرتبه سیستم و بهترین ساختاری که به آن شبیه است بدست بیاوریم یا رابطه بین این ورودی و خروجی که تعریف کرده ایم را به دست بیاوریم.

به این منظور ابتدا باید شرایط آزمون را برای این سیستم فراهم کنیم تا بتوانیم با تحریک مناسب ورودی و ثبت دیتای ورودی و خروجی اطلاعات لازم را ثبت کنیم، برای به دست آوردن ساختار اولیه سیستم ورودی به جای سیگنال زاویه یک پالس مربعی با دامنه ۴ و با فرکانس مناسب اعمال کرده و خروجی را به فضای کاری متلب منتقل میکنیم.

برای تحلیل اطلاعات ثبت شده از واسط کاربری<sup>۳۵</sup> مربوط به شناسایی<sup>۳۶</sup> سیستم در متلب بهره می گیریم. این واسط کاربری تقریباً تمام امکاناتی که برای شناسایی سیستم به صورت دستورات مجزا لازم است را

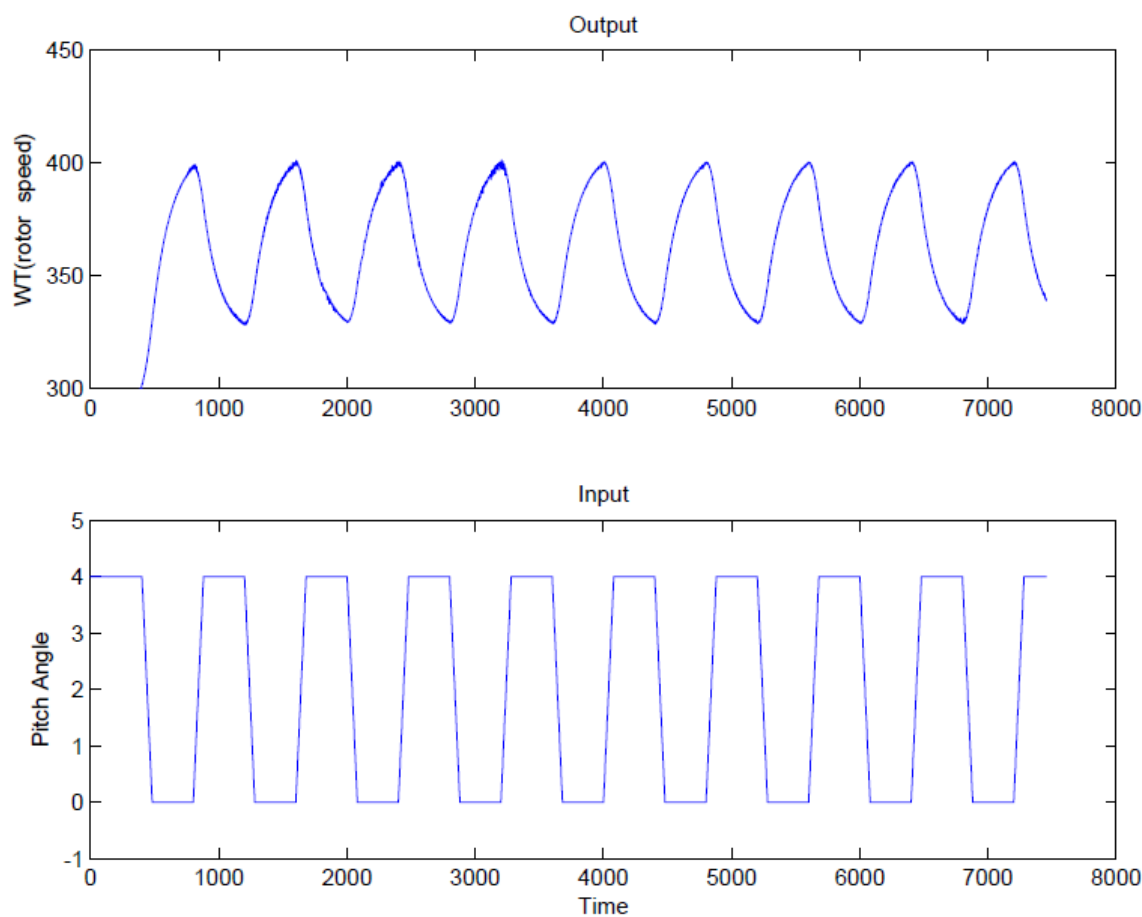
---

<sup>35</sup> Graphic User Interface

<sup>36</sup> ident

فراهم آورده است. در این واسط کاربری امکان ویرایش، حذف مقدار ثابت آن، به دست آوردن مدل تابع تبدیل، مدل فضای حالت و میزان انطباق و ... وجود دارد.

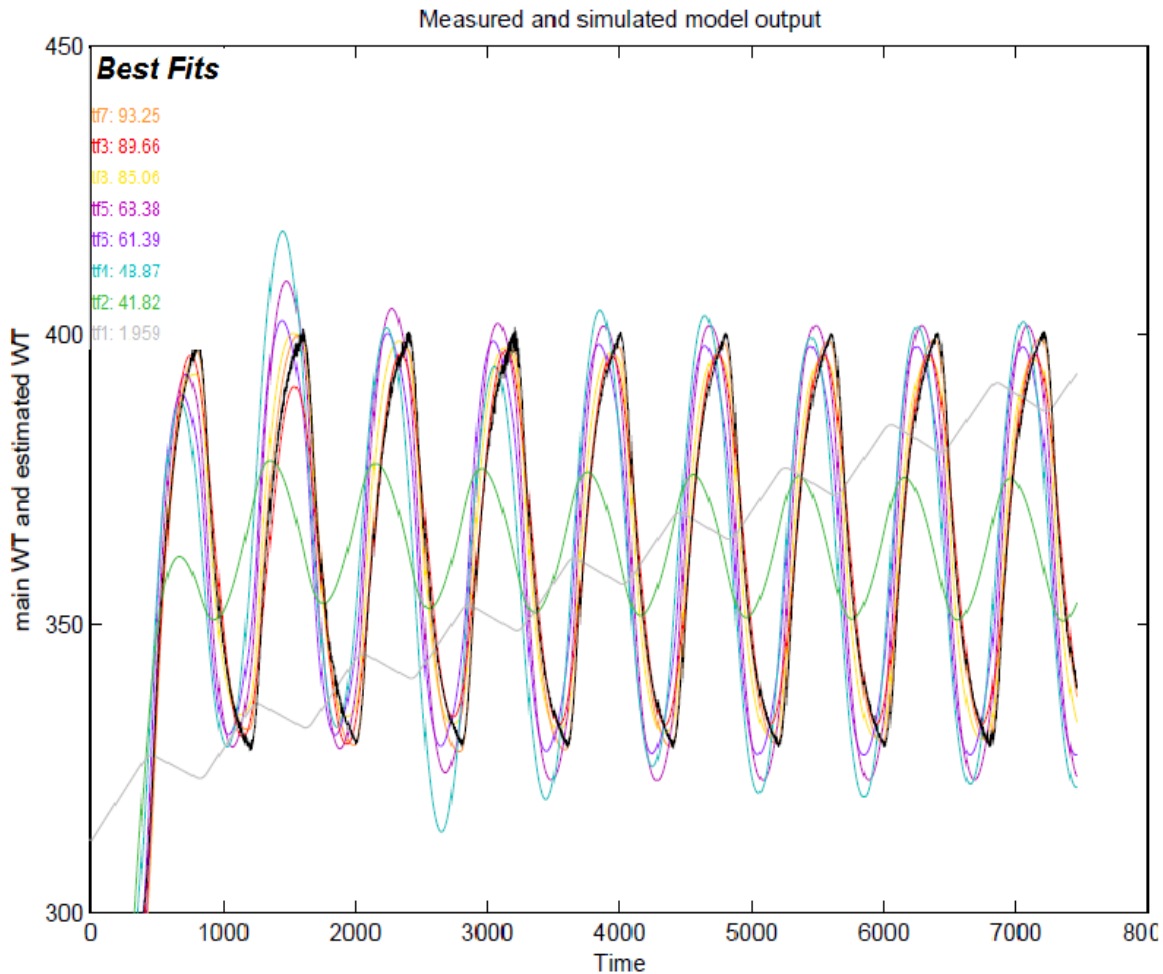
با انتقال این اطلاعات به داخل این قسمت تخمینهایی از سیستم در قالب تابع تبدیل به دست می آوریم. در شکل ۴-۱ نمایش ورودی خروجی اصلی در زمان آزمون نشان داده شده است.



شکل ۴-۱ انجام آزمون ورودی خروجی برای به دست آوردن ساختارهای شناسایی

برای این سیستم از ساختار تابع تبدیل برای شناسایی استفاده شد تا با توجه به آن بتوانیم مدل مناسبی برای سیستم در نظر بگیریم. به این منظور توابع تبدیل مختلف تست شد که نتیجه آن در نمودار ۴-۲

دیده می شود. در این شکل نمودار مشکی رنگ خروجی اصلی و دیگر نمودارها حاصل تخمین تابع تبدیلیهای مختلف می باشد.



شکل ۴-۲ تابع تبدیلیهای تخمین زده شده برای سیستم

همانطور که در شکل ۴-۲ هم دیده می شود ۸ ساختار مختلف تابع تبدیل برای این سیستم بررسی شده است که از درجه یک بدون صفر تا درجه ۴ با ۳ صفر پیشنهاد شده است. بهترین انطباقها به شرح زیر است:

$$TF7(s) = \frac{-0.1054s^3 - 0.0005899s^2 + 2.268 \times 10^{-6}s - 3.506 \times 10^{-9}}{s^4 + 0.01186s^3 + 3.988 \times 10^{-5}s^2 + 4.95 \times 10^{-8}s + 1.923 \times 10^{-11}} \quad (1-4)$$

$$TF3(s) = \frac{6.393 \times 10^{-6}}{s^3 + 0.006412s^2 + 1.81 \times 10^{-5}s + 3.507 \times 10^{-8}} \quad (۲-۴)$$

$$TF8(s) = \frac{-0.1192s + 0.0003867}{s^2 + 0.004998s + 2.134 \times 10^{-6}} \quad (۳-۴)$$

همانطور که در تابع تبدیلیهای بالا هم مشخص شده است بهترین انطباق ابتدا مربوط به تابع تبدیل  $TF7(s)$  است با چهار قطب و سه صفر مقدار  $۰.۹۳$ ، تابع تبدیل بعدی با سه قطب و بدون صفر  $TF3(s)$  است با میزان  $۰.۸۹$  انطباق، تابع تبدیل بعدی  $TF8(s)$  است که انطباق  $۰.۸۵$  نتیجه داده است دارای دو قطب و یک صفر است.

برای استفاده از ساختار مشابه  $TF7(s)$ ، نیاز به شناسایی هشت پارامتر داریم. طبیعتاً شناسایی این تعداد پارامتر ابعاد ماتریس رگر سورها و کوواریانس را به شدت بزرگ کرده و محاسبات نیز حجم زیادی خواهند داشت. در مرحله بعد برای طراحی کنترلگر نیز بایستی مرتبه سیستم را بالا ببریم که این نیز پیچیدگی و حجم محاسبات را بیشتر می کند. با توجه به اینکه شناسایی بصورت آنلاین صورت می گیرد این ساختار به شدت زمان عملکرد سیستم را افزایش می دهد بنابراین نمی تواند قابل قبول باشد.

تابع تبدیلیهای بعدی یعنی  $TF3(s)$  و  $TF8(s)$  نیز تقریباً انطباقهای نزدیک به هم را نتیجه می دهند، با این تفاوت که برای  $TF3(s)$  با توجه به درجه سه بودن سیستم بایستی مرتبه کنترلگر و رویتگر حداقل از مرتبه دو باشد. اما در صورت در نظر گرفتن ساختار مشابه  $TF8(s)$  برای شناسایی، رویتگر و کنترلگر می تواند از مرتبه یک باشد.

طبیعتاً مطلوبترین حالت برای طراحی این است که در عین داشتن انطباق قابل قبول، حداقل درجه را نیز داشته باشیم. از طرف دیگر همانطور که می دانیم در روش تطبیقی در صورت طراحی صحیح در بخش کنترل کننده نیاز به شناسایی تمام پارامترهای سیستم به صورت صد در صد دقیق نداشته و حتی در

شرایطی که شناسایی هنوز به مقادیر نهایی خود همگرا نشده است کنترل کننده کار خود را به درستی انجام می دهد.

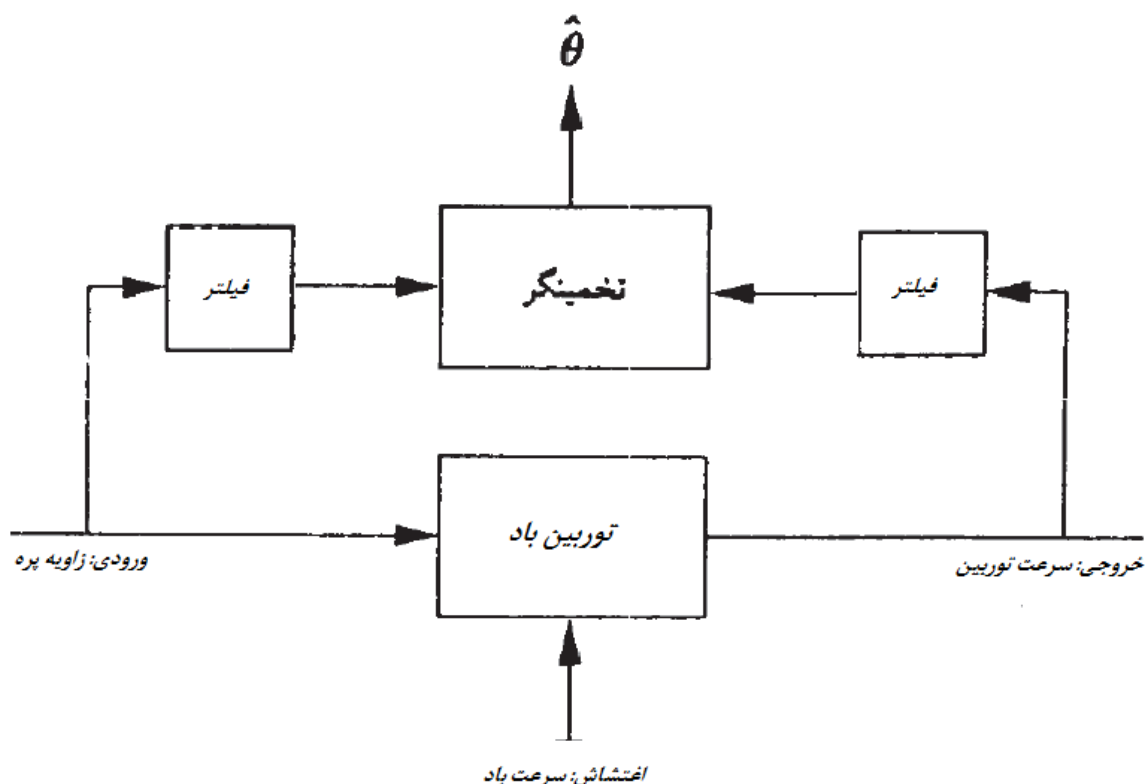
به همین دلیل ساختار مشابه تابع تبدیل رابطه ۳-۴ یعنی دو قطب در مخرج و یک صفر در صورت را به عنوان ساختار اصلی شناسایی پیوسته در نظر میگیریم:

$$H(s) = \frac{k_1 s + k_2}{s^2 + as + b} \quad (4-4)$$

با توجه به این ساختار بایستی دو رگرسور برای خروجی داشته باشیم (متناظر با پارامترهای  $a, b$  در مخرج تابع تبدیل) و دو رگرسور برای ورودی داشته باشیم (متناظر با  $k_1$  و  $k_2$  در صورت تابع تبدیل)

در حالت شناسایی پیوسته چون به جای معادلات تفاضل با معادلات دیفرانسیل سر و کار داریم در حالت عادی نیاز به مشتق گیری از رگرسورها داریم. همانطور که میدانیم لزوم مشتق گیری در رگرسورها علاوه بر اینکه مشکل نویز را افزایش می دهد در شرایطی که سیگنالهای ورودی و یا خروجی تغییرات نسبتاً زیاد داشته باشد منجر به بینهایت شدن آنها و بروز خطا در فرآیند شبیه سازی می شود. بنابراین ضروری است که از این مشتق گیری اجتناب شود که به این منظور روشهای مختلفی پیشنهاد شده است. [۳۰] در میان این روشهای پیشنهادی یکی از راهکارها استفاده از یک فیلتر پایدار مناسب است که مرتبه آن باید حداقل به اندازه مرتبه سیستم تحت شناسایی باشد [۳۱]، [۳۲] با توجه به این لزوم، از این فیلتر پایدار هم در ورودیها و خروجی برای رگرسورها و هم در قسمت شناسایی استفاده خواهد شد. با این راهکار نیاز به مشتق گیری عملاً حذف شده است در حالی که پارامترهای شناسایی شده مانند قبل خواهد بود. شکل ۳-۴ این ساختار را نشان می دهد که فرمولهای مربوط به آن نیز در ادامه آمده است:





شکل ۴-۳ استفاده از فیلتر پایدار برای رگرورها در حالت شناسایی پیوسته

با استفاده از این فیلتر روابط مربوط به شناسایی به شکل زیر تغییر می کند:

$$\theta = [a_1 \dots a_n \quad k_1 \dots k_m] \quad (4-5)$$

$$\begin{aligned} \varphi^T(t) &= [-p^{n-1}y_f \dots -y_f \quad p^{m-1}u_f \dots u_f] = \\ &[-p^{n-1}H_f(p)y \dots -H_f(p)y \quad p^{m-1}H_f(p)u \dots H_f(p)u] \end{aligned} \quad (4-6)$$

$$P^n y_f(t) = P^n H_f(p) y(t) = \varphi^T(t) \theta \quad (4-7)$$

نکته بعدی انتخاب مناسب این فیلتر است. در صورتی که دینامیکهای فیلتر خیلی کند باشد باعث می شود که عملاً دینامیکهای سیستم تحت تاثیر قرار گیرد. در واقع با انتخاب دینامیکهای کند عملاً زمان

زیادی لازم است تا رگرورها به وضعیت مانا برسد. این موضوع باعث افزایش خطا در بخش شناساگر شده و زمان لازم برای شناسایی را افزایش می دهد. در صورت استفاده از دینامیکهای خیلی سریع برای این فیلتر، بایستی مقدار بهره DC آن را هم به مقدار مناسبی افزایش دهیم تا بهره این فیلتر در شرایط مانا عدد قابل قبولی باشد و مشکل ایجاد نکند و نمی توان این دینامیکها را خیلی افزایش داد.

نکته بعدی در مورد بهره DC این فیلتر است. در صورتی که اعداد بزرگی برای این بهره انتخاب کنیم باعث می شود که کوچکترین خطای ممکن در شناسایی به شدت تقویت شود و دقت شناسایی را کم کند. این مشکل در زمان انتخاب دینامیکهای سریع برای فیلتر هم اتفاق می افتد. عملاً هم در زمان انتخاب اعداد بزرگ برای بهره مذکور دیده می شد که دامنه این خطا رشد می کند، به ویژه در زمان تغییرات سرعت باد این افزایش دامنه کاملاً مشهود است.

در صورتی که بالعکس اعداد خیلی کوچکی برای این بهره انتخاب کنیم این کار باعث می شود که قبل از اینکه شناسایی بتواند به اعداد صحیح خود همگرا شود مقدار خطا به صفر میل کند و پارامترهای شناسایی شده را تحت تاثیر قرار می دهد.

بنابراین با استفاده از روش سعی و خطا و آزمایش کردن فیلترهای مختلف نهایتاً فیلتر

عملکرد مناسبی هم به لحاظ دینامیک و هم به لحاظ بهره DC از خود نشان می دهد..

$$H_f(s) = \frac{2.5}{s^2 + 10s + 25}$$

بعد از انتخاب مناسب رگرورها شناسایی به صورت زیر انجام می شود [۳۱]:

$$\frac{d\theta}{dt} = P(t)\varphi(t)e(t) \quad (۸-۴)$$

$$e(t) = y(t) - \varphi^T(t)\theta(t) \quad (۹-۴)$$

$$\frac{dP(t)}{dt} = \alpha P(t) - P(t)\varphi(t)\varphi^T(t)\theta(t) \quad (10-4)$$

فرمولهای فوق در واقع تعمیم فرمولهای گسسته به حالت پیوسته است. در این حالت همانطور که مشخص است معادلات تفاضل به معادله دیفرانسیل تبدیل می شود. این فرم نمایش به صورت بازگشتی است و پارامترها، خطا و ماتریس کوواریانس به صورت لحظه ای به روز می شود که تابع آخرین مقدار به دست آمده آن خواهد بود. برای تحقق این معادلات از روابط ۴-۸ و ۴-۱۰ انتگرال گرفته تا از مشتق گیری جلوگیری به عمل آید و قابل پیاده سازی باشد. در این معادلات  $\alpha$  نقش ضریب فراموشی نمایی در حالت گسسته را دارد و در صورت صفر کردن آن، اثر فراموشی نمایی حذف می شود.

همانطور که در بخش قبل هم به آن اشاره شد لزوم استفاده از فیلتر پایدار و نوع آن نیز توضیح داده شد. مطابق رابطه ۴-۷ در قسمت شناسایی بایستی خروجی مد نظر را نیز فیلتر کرد تا با اصلاحیه ای که در رگسورها اعمال شده است مطابقت داشته باشد.

در بخش فراموشی نمایی این نکته قابل ذکر است که در صورت صفر کردن آن همگرایی پارامترها به کندی صورت می گیرد. به ویژه در زمان تغییر سرعت باد چون مشخصه و نقطه کار سیستم تغییر می کند نیاز به این داریم که در حداقل زمان ممکن پارامترهای شناسایی شده به مقادیر اصلی خود همگرا شود. به این منظور استفاده از فاکتور فراموشی غیر صفر لازم است. اما همانطور که در مراجع هم به آن اشاره شده است [۳۱][۳۲] استفاده از این پارامتر مشکل بزرگ شدن زیاد ماتریس کوواریانس یا همان انفجار نمایی را به همراه خواهد داشت در شرایطی که پارامترها همگرا شده است. برای غلبه بر این مشکل ساختارهای شناسایی اصلاح شده و یا روشهای دیگری پیشنهاد شده است که در مراجع مربوطه به آن اشاره شده است.

در این شناسایی نیز در شرایطی که از فاکتور فراموشی نمایی غیر صفر استفاده می شود دیده می شود که پس از همگرا شدن پارامترها و تثبیت آنها شروع به نوسان می کند که به محض صفر کردن  $\alpha$  نوسان صفر می شود. به همین علت از فاکتور فراموشی با توجه به خطای شناسایی استفاده شده است، تا زمانی که این خطا از مقدار ۲ rpm بیشتر است مقدار ۰/۸۵ به عنوان فاکتور فراموشی نمایی اعمال می شود بعد از کاهش خطا به حد مذکور، مقدار این فاکتور فراموشی توسط سویچ تعبیه شده صفر می شود. این کار در عین اینکه منجر به سرعت در همگرایی پارامترها می شود مشکل انفجار نمایی ماتریس کوواریانس را نیز برطرف می کند.

#### ۴-۲-۱ تحریک پایا<sup>۳۷</sup> توسط سیگنال ورودی

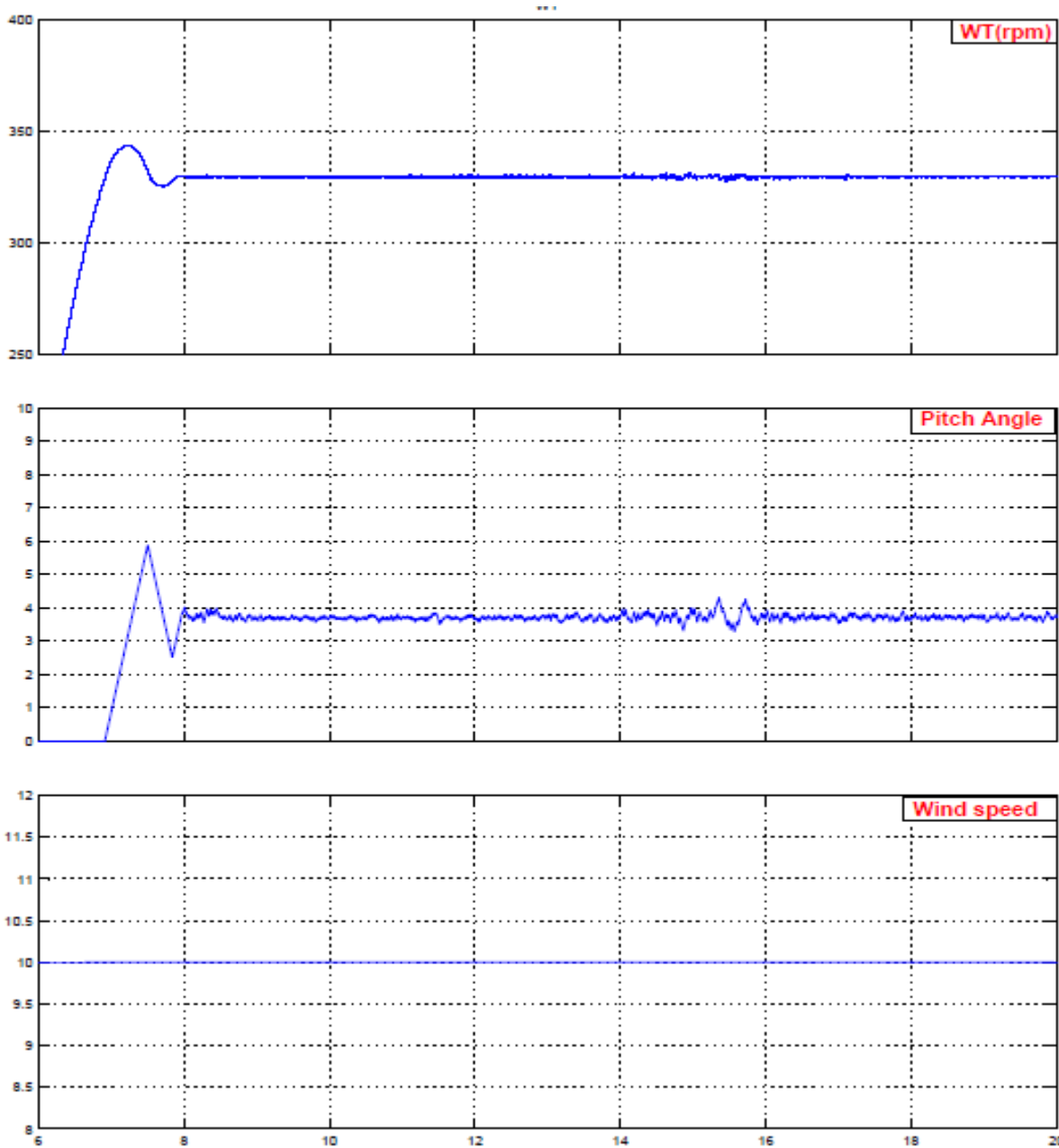
یکی از نیازهای بخش شناسایی این است که سیگنال ورودی به سیستم به اندازه کافی تحریک کننده پایا باشد تا تمام پارامترهای سیستم قابل شناسایی باشد. به عبارت دیگر در صورتی که تعداد پارامترهای سیستم  $n$  باشد بایستی سیگنال ورودی تحریک کننده پایا حداقل از مرتبه  $n$  باشد تا تمام پارامترهای تابع تبدیل در نظر گرفته شده شناسایی آشکار شود. [۳۱]

در سیستم پیشنهادی نیز سیگنال ورودی به سیستم باید PE از مرتبه حداقل ۴ باشد تا شناسایی پارامترها بدون مشکل باشد و همگرایی در آن رخ دهد. با بررسی سیگنال ورودی به سیستم در شرایط شبیه سازی دیده می شود که همواره نوساناتی نامنظم ولی با دامنه بسیار کوچک روی سیگنال ورودی وجود دارد. در عمل این سیگنال را می توان جمع یک مقدار DC و یک سیگنال تصادفی با دامنه کوچک دانست. همانطور که می دانیم طیف سیگنال تصادفی در حوزه فرکانس بصورت پیوسته بوده و PE از همه مرتبه هاست. همانطور که قبلاً هم اشاره شد این موضوع به علت زمان بسیار کوتاه نمونه برداری شبیه

---

<sup>37</sup> Persistent Exciting (PE)

سازی (۱۰ میکروثانیه) است که منجر به عملکرد خیلی سریع و تغییرات زیاد سیگنالها با دامنه خیلی کوچک می شود و وقتی در بازه های زمانی خیلی کوچک به سیگنال ورودی نگاه می کنیم نوساناتی حداقل در حدود ۰/۱ درجه به خوبی دیده می شود. شکل ۴-۴ این موضوع را نشان می دهد.



شکل ۴-۴ سیگنالهای سرعت توربین، زاویه پره و سرعت باد

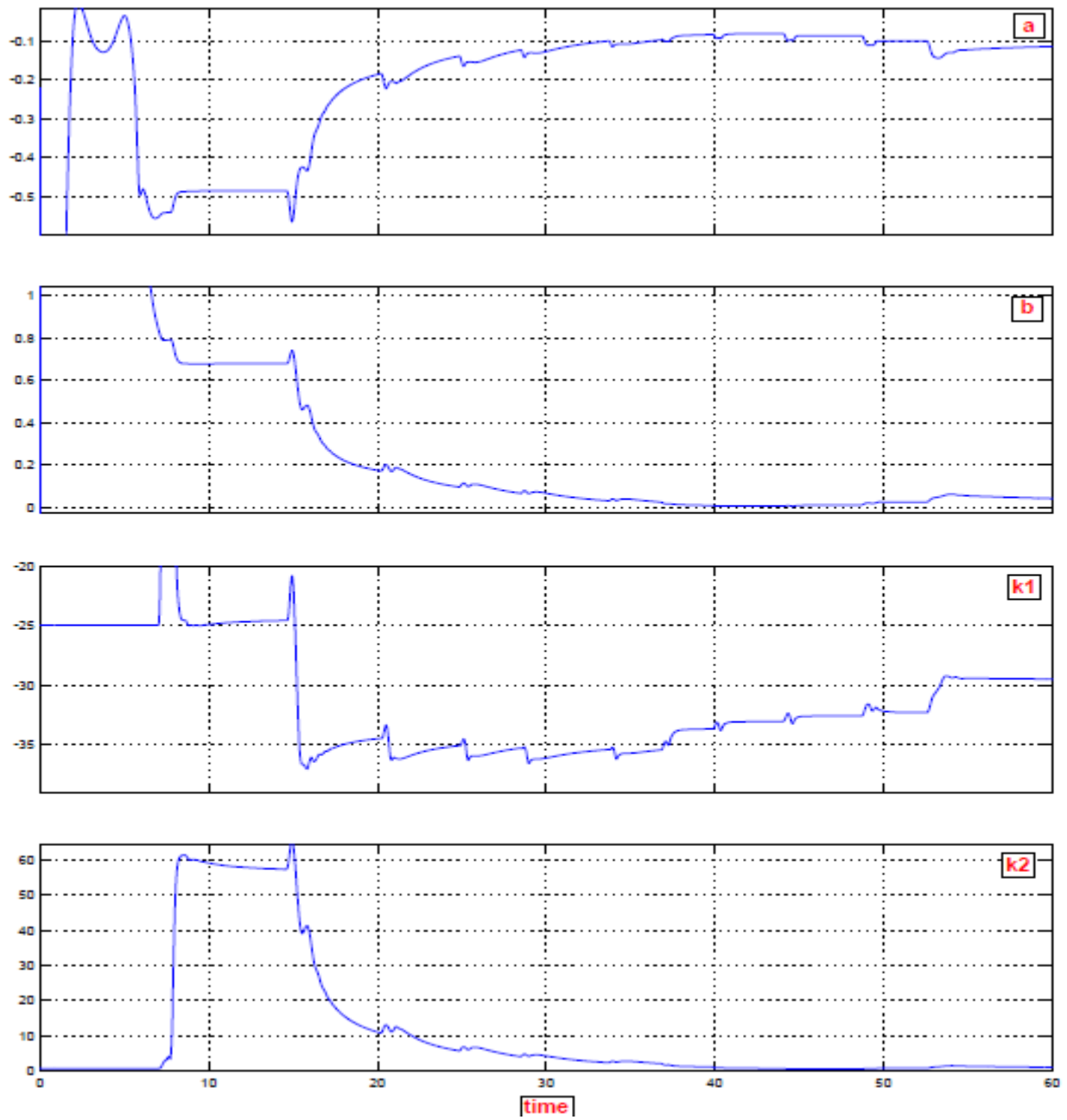
## ۴-۲-۲ شناسایی در حلقه بسته

نکته دیگری هم که باید به آن اشاره کرد این است که در شرایط واقعی چون شناسایی در حلقه بسته انجام می شود این امکان وجود دارد شناسایی به درستی انجام نشود و دچار مشکل شود. در شرایطی که از یک سیستم کنترل معمولی مانند PI استفاده می کردیم، در بخش شناسایی پس از تشکیل ماتریس رگرسورها ( $\varphi$ ) با توجه به اینکه خروجی و ورودیها با رابطه ای جبری به یکدیگر مرتبط می شوند در برخی لحظات امکان دارد که این ماتریس منفرد<sup>۳۸</sup> شده و شناسایی دچار مشکل شود. اما با استفاده از این کنترلگر چون در مسیر فیدبک تابع تبدیل  $\frac{R(s)}{S(s)}$  وجود دارد، این باعث می شود که در عمل مقدار فیدبک متغیر با زمان باشد به همین علت همواره ماتریس رگرسورها دارای ابعاد کاملی خواهد بود و شناسایی بدون مشکل انجام خواهد شد. در عمل هم عدم بروز خطا از بابت معکوس پذیری ماتریس رگرسورها در زمان اجرا نیز موید این موضوع است.

با توجه به این معادلات و توابع پیاده سازی شده پارامترهای زیر در شرایط تغییر سرعت باد از 10m/s تا 20m/s حاصل شده است، این پارامترها در شرایط تغییر سرعت باد تغییر می کند و همگرا می شود. همانطور که در شکل ۴-۵ هم دیده می شود با تغییرات سرعت باد از 10m/s تا 20m/s پارامترهای شناسایی شده تابع تبدیل هم تغییر می کند و این تغییرات پارامتر در برخی شرایط سرعت باد زیاد است.

---

<sup>38</sup> Singular



شکل ۴-۵ پارامترهای شناسایی شده در شرایط تغییرات تغییرات سرعت باد از 10m/s تا 20m/s و بالعکس باد

#### ۴-۳ طراحی و پیاده سازی کنترلگر به صورت پیوسته

در مرحله قبل پارامترهای سیستم شناسایی شدند. در این بخش باید کنترل کننده بر اساس این پارامترها طراحی شوند. طبق اصل هم ارزی قطعیت با پارامترهای شناسایی شده دقیقاً مشابه پارامترهای حقیقی رفتار می شود و عدم قطعیتی در آن لحاظ نمی شود.

با بررسی تابع تبدیل اولیه ای که از واسط گرافیکی شناسایی و همچنین پارامترهای شناسایی شده، ملاحظه می شود که این سیستم در برخی سرعتهای باد از شرایط حداقل فاز بودن خارج می شود، بنابراین امکان حذف صفر مقدور نیست. علاوه بر این، استفاده از روش حذف صفر حتی در سیستمهای با صفر پایدار منجر به نوسانات حلقه ای در سیگنال کنترل می شود که خیلی مطلوب نیست. به همین دلیل روش رگولاتور خود تنظیم به روش غیر مستقیم بدون حذف صفر برای طراحی کنترل کننده در نظر گرفته می شود.

برای داشتن شروط سازگاری ، با توجه به ساختاری که برای تابع تبدیل شناسایی شده در نظر گرفتیم، ساختار سیستم مطلوب بایستی از همان درجه بوده و همان صفرهای سیستم اصلی را داشته باشد. بنابراین  $A_m$  از درجه ۲ و  $B_m$  از درجه ۱ در نظر گرفته می شود. برای چند جمله ای رویتگر  $A_0$  داریم:

$$\text{درجه } A_0 = \text{درجه } A - \text{درجه } B^+ - 1 \quad (4-11)$$

همانطور که قبلاً هم اشاره شد تابع تبدیل شناسایی شده به فرم  $H(s) = \frac{B(s)}{A(s)} = \frac{k_1s+k_2}{s^2+as+b}$  است ، با توجه به اینکه حذف صفر نخواهیم داشت پس  $B^+ = 1$  و  $B^- = B$  و چند جمله ای رویتگر  $A_0$  از مرتبه یک خواهد بود. دینامیک رویتگر بایستی از سیستم سریعتر باشد تا تاثیری بر روی دینامیکهای سیستم و کنترلگر نگذارد به این منظور این قطب در  $-10$  در نظر گرفته می شود:



$$A_0 = S + 10$$

(۱۲-۴)

با توجه به توضیحات بالا تابع تبدیل مطلوب بایستی به ساختار زیر باشد:

$$\frac{B_m(s)}{A_m(s)} = \frac{\beta(k_1s + k_2)}{s^2 + a_{m1}s + a_{m0}} = \frac{\beta(k_1s + k_2)}{s^2 + 1.4s + 1} \quad (۱۳-۴)$$

برای این سیستم قطبهای مطلوب به صورت  $-0.7 \pm j0.7$  در نظر گرفته شد. انتخاب این قطبها از اختیارات طراح می باشد اما به این معنا نیست که هر قطبی را میتوان انتخاب کرد. انتخاب این قطبها بایستی به گونه ای باشد که با واقعیت و فیزیک سیستم همخوانی داشته باشد. این سیستم با توجه به لختی های خاص آن دینامیکهایی در حد ثانیه دارد. بنابراین تابع تبدیل مطلوب را باید به گونه ای در نظر گرفت که با این فیزیک همخوانی داشته باشد. با بزرگ کردن این قطبها در واقع هزینه لازم برای عملکرد این سیستم را افزایش داده ایم، این در حالی است که با توجه به ماهیت این سیستم و محدودیت عملگر زاویه که در فصل ۳ نیز به آن اشاره شد هیچوقت به این مطلوب نمی رسیم. آزمایشهای صورت گرفته نیز موید این موضوع بوده است. علاوه بر این با افزایش موقعیت قطبها نوسانات سیگنال کنترل هم زیاد می شد که مطلوب نیست.

نکته دیگر اینکه با توجه به ساختار استاندارد درجه ۲ که به فرم  $\frac{\omega_n}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}$  بیان می شود بهترین عملکرد از نظر زمان صعود و حداکثر بالازدگی و دیگر پارامترها مربوط به زمانی است که مقدار  $\xi$  را  $0.7$  و مقدار  $\omega_n$  را  $1$  در نظر بگیریم. با این الگو قطبهای سیستم در نقاط ذکر شده بالا قرار داده شد.

با توجه به اینکه در حالت پیوسته می خواهیم کنترل کننده را طراحی کنیم شرط ذکر شده در حالت گسسته برای  $z=1$  به صورت معادل برای  $s=0$  به دست خواهد آمد، با این توضیح  $\beta$  از رابطه زیر به دست می آید:

$$\beta = \frac{A_m(0)}{B(0)} = \frac{1}{k_2} \quad (14-4)$$

با داده های مساله در بالا و تابع تبدیلی که شناسایی شده است بایستی معادله دیوفانتین مربوطه را حل کرد:

$$AR + BS = A_0A_m \quad (15-4)$$

با توجه به روابط ذکر شده و درجات سیستم، درجات چند جمله  $R$ ،  $S$  و  $T$  از مرتبه یک خواهد بود و با قرار دادن آنها در معادله دیوفانتین ۴-۱۵ معادلات زیر برای پارامترهای کنترل کننده به دست می آید:

$$(s^2 + as + b)(s + r_0) + (k_1s + k_2)(s_1s + s_0) = (s + A_0)(s^2 + a_{m1}s + a_{m0})$$

$$(s^2 + as + b)(s + r_0) + (k_1s + k_2)(s_1s + s_0) = (s + 10)(s^2 + 1.4s + 1) \quad (16-4)$$

با ساده سازی رابطه ۴-۱۶ و معادل قرار دادن درجات مشابه  $s$  پارامترهای مجهول مربوط به کنترل کننده را به دست می آوریم:

$$r_0 = 11.4 - a$$

$$s_0 = \frac{10 - br_0}{k_2} \quad (17-4)$$

$$s_1 = \frac{15 - ar_0}{k_2}$$

برای به دست آوردن پارامتر  $s_1$  نیاز به پارامترهای مجهول  $r_0$  و  $s_0$  است، از طرفی برای به دست آمدن پارامتر  $s_0$  نیز به  $r_0$  نیاز داریم که این مشکل در ابتدای اجرای شبیه سازی سیستم خطا ایجاد می کند. به همین علت حداقل یکی از پارامترهای  $s_0$  و  $s_1$  را باید برحسب پارامترهای معلوم (شناسایی شده) به دست آوریم:

$$s_1 = \frac{k_2(15-b-11.4a+a^2)-k_1(10-11.4b+ab)}{(k_2^2-k_1k_2a+k_1^2b)} \quad (18-4)$$

با اعمال این پارامتر به صورت مستقیم و پیاده سازی فرمول ۱۸-۴ مشکل خطای قبلی برطرف می شود. با استفاده از روابط لازم برای تعقیب مدل کامل، برای به دست آوردن چند جمله ای  $T(s)$  با توجه به اینکه حذف صفر نداشتیم به رابطه ۱۹-۴ خواهیم رسید:

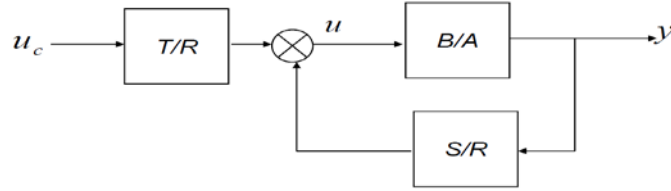
$$T(s) = \beta A_0(s) = \frac{s+10}{k_2} \quad (19-4)$$

با توجه به پارامترهای مشخص شده سیستم باید کنترل کننده را با توابع تبدیل زیر پیاده سازی کنیم:

$$\frac{T(s)}{R(s)} = \frac{s+10}{k_2(s+r_0)} \quad (20-4)$$

$$\frac{S(s)}{R(s)} = \frac{s_1s+s_0}{(s+r_0)} \quad (21-4)$$

با توجه به اینکه تمام پارامترهای لازم برای کنترل کننده به دست آمد حال بایستی این روابط را در قالب دو تابع تبدیل یعنی  $T/R$  در مسیر پسخور و  $S/R$  در مسیر پیشخور قرار دهیم که در شکل ۴-۶ هم به وضوح اشاره شده است:



شکل ۴-۶ شماتیک دیاگرام رگولاتور خود تنظیم

همانطور که در شکل ۴-۶ هم به وضوح دیده می شود برای تحقق این کنترل کننده در سیمولینک به صورت پیوسته بایستی دو تابع تبدیل یکی در مسیر پسخور و دیگری در مسیر پیشخور را پیاده سازی کنیم. برای این کار از بلوک تابع تبدیل نمی توان استفاده کرد زیرا این بلوک امکان گرفتن پارامترهای متغیر از بیرون نداشته و فقط ورودی - خروجی آن در دسترس است. امکان استفاده از مشتق گیر و یا انتگرال گیر برای تحقق چند جمله ای های  $T(s)$ ،  $S(s)$ ،  $R(s)$  نیز وجود ندارد زیرا هر کدام از این بلوکها محدودیتهای خاص خود را دارد و در زمان آزمایش با خطاهای متعدد همراه می شود. تنها راه پیاده سازی این توابع استفاده از متلب فانکشن<sup>۳۹</sup> در سیمولینک است. در این توابع خاص امکان کدنویسی به صورت mfile وجود دارد اما با محدودیتهایی همراه است. به عنوان مثال تمام دستورات قابل استفاده در محیط متلب و mfile در متلب فانکشن پشتیبانی نمی شود، از طرفی امکان استفاده از دستوراتی که با تابع تبدیل در حوزه فرکانس کار می کند در این بخش وجود ندارد، زیرا فرمت خروجی آن با فرمت استاندارد در این بلوک همخوانی ندارد. نهایتاً برای رفع این مشکل توابع تبدیل  $T/R$  و  $S/R$  را در حوزه زمان یعنی به شکل توابع نمایی پیاده سازی می شود.

برای نوشتن متلب فانکشن مربوط به توابع  $T/R$  و  $S/R$  خروجی این بلوکها در شرایط کمتر از ثانیه ششم صفر شده است. این شرط به این علت قرار داده شده است که در شرایط اولیه که سیستم اجرا می شود

<sup>39</sup> Mathlab Function

حالت‌های گذرای سیستم است و کنترل کننده حداکثر توان در حال کار است. در این شرایط با توجه به اینکه سرعت از مقدار نامی هنوز خیلی فاصله دارد نیاز به عملکرد سیستم کنترل زاویه نداریم، به همین علت خروجی در این شرایط صفر است. این کار شبیه به عملکرد ضد اشباع در لحظات اولیه عمل کرده و از اینکه مقدار منفی بزرگی در خروجی کنترل کننده زاویه پره قرار گرفته و نهایتاً عملکرد سیستم را در زمان لازم کند شود جلوگیری به عمل می‌آید.

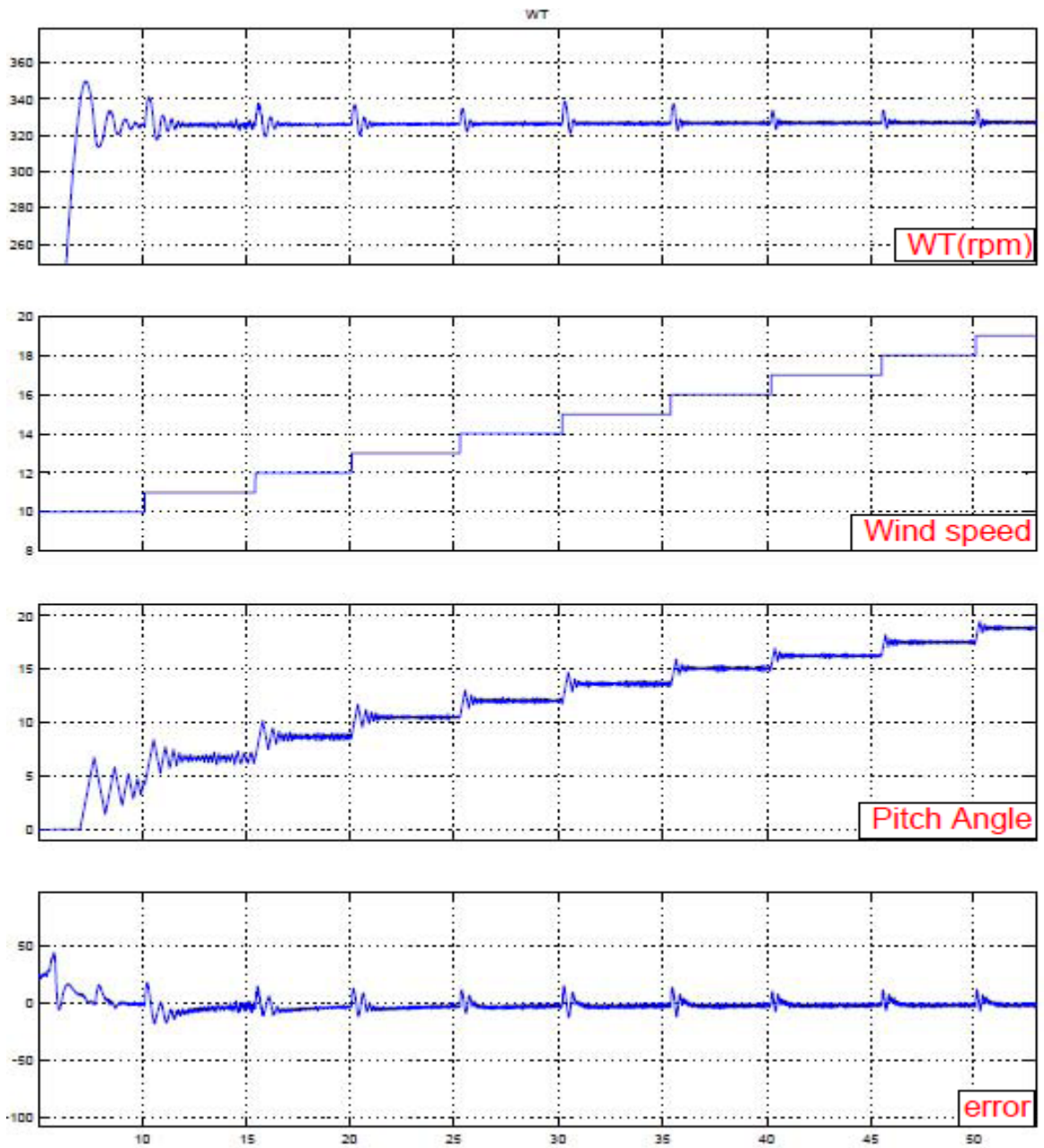
#### ۴-۳-۱ نتایج شبیه سازی به صورت پیوسته

در شکل ۴-۷ نتایج شبیه سازی ها در حالت پیوسته نمایش داده شده است. در این آزمون سرعت باد از مقدار 10m/s تا 20m/s به صورت پله ای تغییر داده می شود، همانطور که دیده می شود اولین نمودار نشان دهنده سرعت توربین است که روی عدد 325rpm تثبیت شده است، نمودار بعدی سرعت باد، نمودار بعد آن مقدار سیگنال کنترل (فرمان برای عملگر زاویه) و در انتها نیز خطای شناسایی هم لحاظ شده است.

در آخرین نمودار این شکل دیده می شود که خطای شناسایی به جز در لحظات تغییر سرعت باد، به صفر می‌رسد. این خطا در زمان تغییر سرعت باد نیز به خاطر تغییر ساختار سیستم شناسایی شده و پارامترهای آن می‌باشد که پس از همگرا شدن پارامترها نیز این خطا به صفر میل می‌کند.

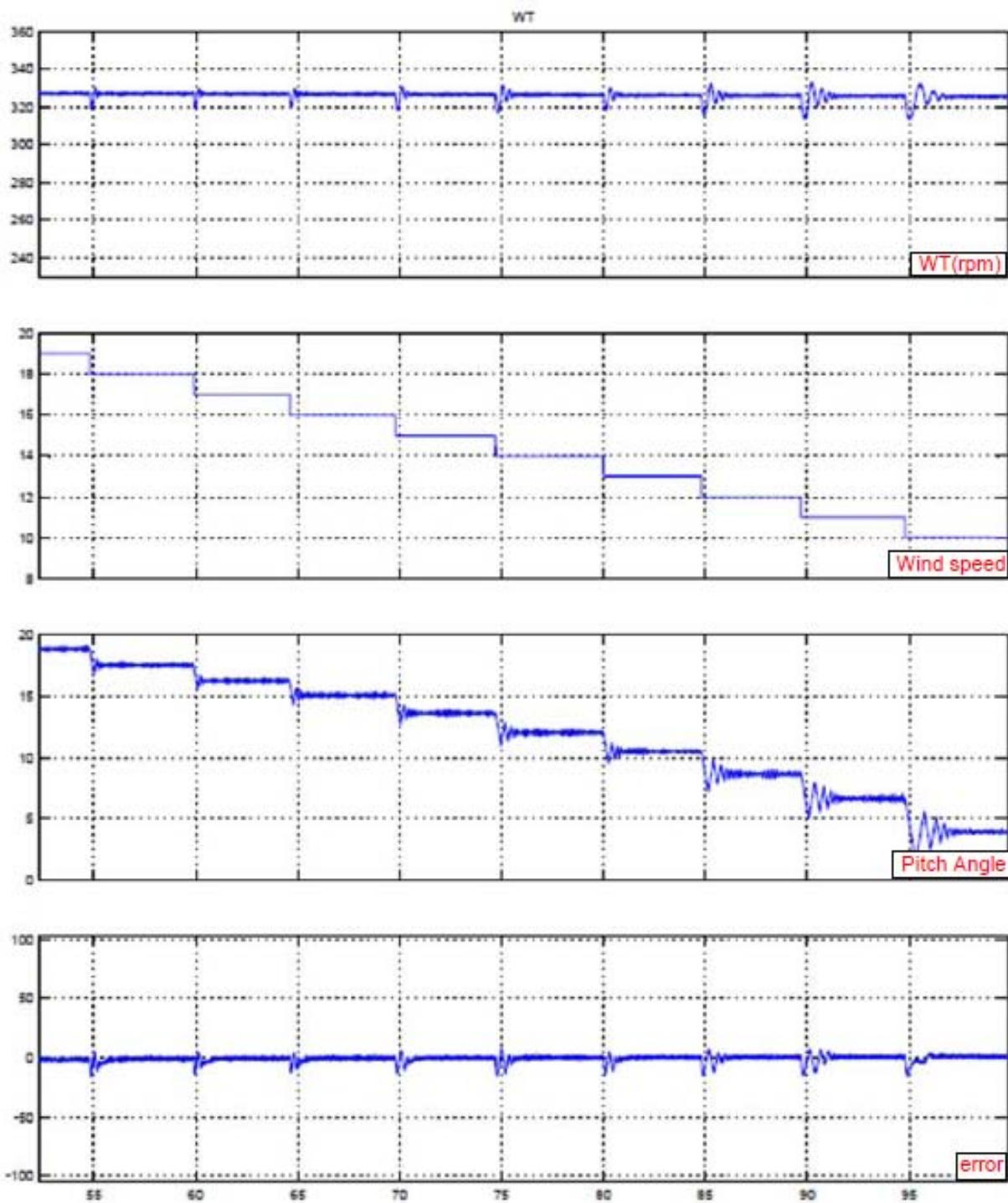
در شکل ۴-۸ نیز به طور مشابه سرعت باد به صورت پله ای از 20m/s تا 10 m/s کاهش داده می شود. این شکل نیز شامل ۴ نمودار سرعت توربین، سرعت باد، سیگنال کنترل و خطای شناسایی است. همانطور که دیده می شود رفتار کنترل کننده در شرایط کاهش سرعت باد نیز مشابه قبل است.

عملکرد سیستم کنترل سرعت بیشتری نسبت به کنترل کننده کلاسیک PI دارد که این سرعت عملکرد به تفاوت ساختار این کنترل کننده با کنترل کننده تطبیقی برمی‌گردد.



شکل ۴-۷ نتایج شبیه سازی به ترتیب سرعت توربین، سرعت باد، زاویه پره و خطای شناسایی (افزایش سرعت باد از

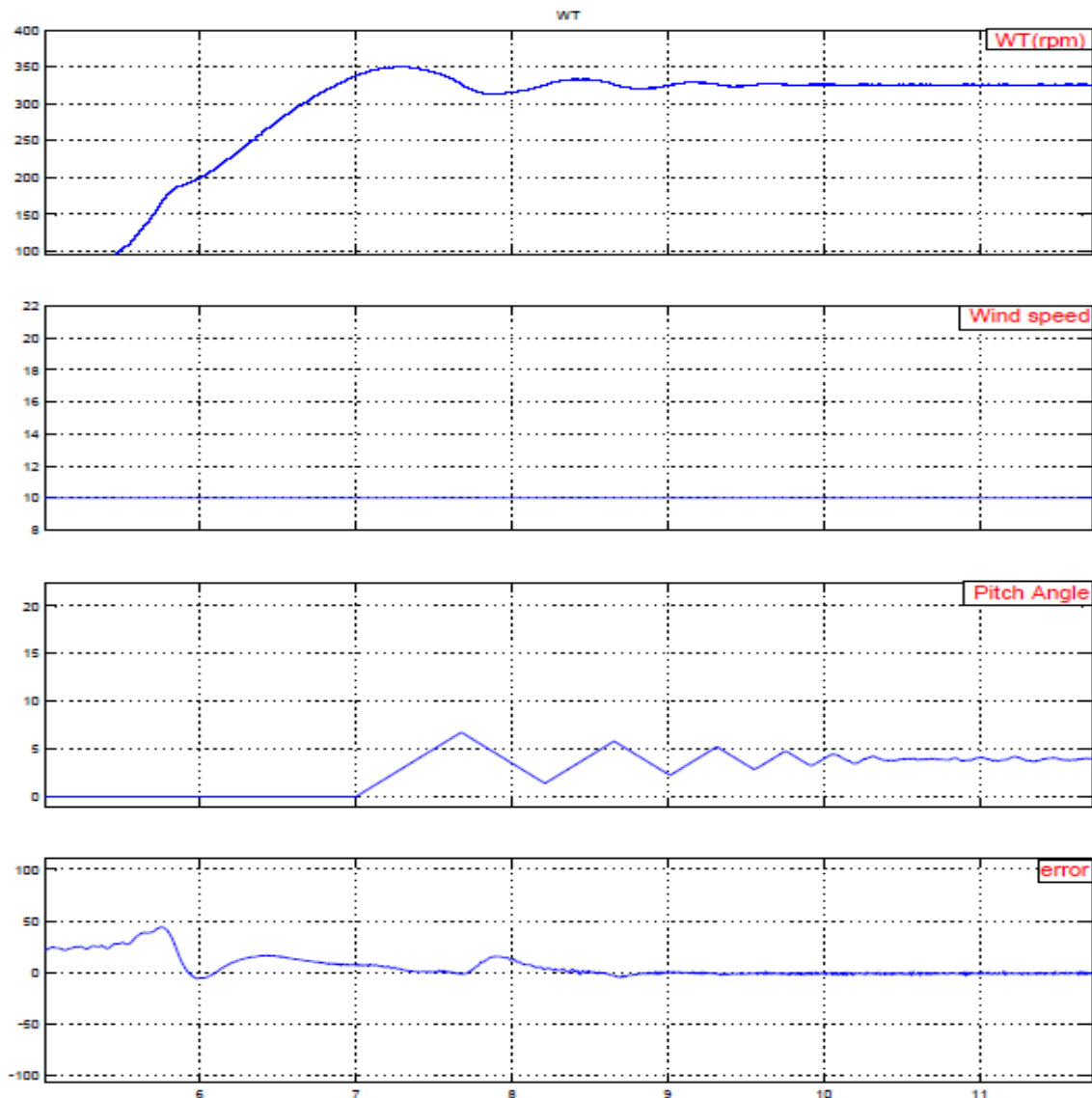
10m/s تا 20m/s)



شکل ۴-۸ نتایج شبیه سازی به ترتیب سرعت توربین، سرعت باد، زاویه پره و خطای شناسایی (کاهش سرعت باد

از 20m/s تا 10m/s)

سرعت این کنترلر به ویژه در ابتدای تغییر مد ناحیه کاری توربین از ناحیه ۲ به ناحیه ۳ به خوبی دیده می شود. همانطور که در شکل ۴-۹ دیده می شود سرعت توربین حداکثر به 350rpm می رسد، این در حالی است که با استفاده از کنترل کننده PI این مقدار تا حدود 370rpm افزایش می یابد.



شکل ۴-۹ عملکرد کنترل کننده در زمان تغییر مد ناحیه کاری توربین باد



#### ۴-۴ طراحی شناساگر و کنترلگر به صورت گسسته

یکی از مشکلاتی که در بخش پیاده سازی به صورت پیوسته وجود داشت این است که با افزایش درجه شناسایی پیاده سازی کنترل کننده در سیمولینک بسیار دشوار می شود. علاوه بر این افزایش درجه منجر به افزایش نسبتاً قابل توجه زمان اجرای شبیه سازی می شود.

در پیاده سازی گسسته افزایش درجه کنترلگر راحتتر بوده و علاوه بر آن زمان اجرا نیز کمتر از حالت پیوسته خواهد بود. بنابراین به جهت تکمیل بحثهای قسمت های قبل و مقایسه در این بخش پیاده سازی شناسایی و کنترلگر را به صورت گسسته نیز بررسی میکنیم.

در این حالت با توجه به محدودیتهای کمتر پیاده سازی، می توانیم ساختار تابع تبدیل را از مرتبه بالاتری در نظر گرفت، به همین منظور برای شناسایی تابع تبدیل را از مرتبه ۳ در نظر می گیریم:

$$\frac{B(z)}{A(z)} = \frac{b_2 z^2 + b_1 z + b_0}{z^3 + a_2 z^2 + a_1 z + a_0} \quad (۲۲-۴)$$

با توجه به مباحثی که در بخش پیاده سازی به صورت پیوسته مطرح شد در اینجا از تکرار مجدد آن خودداری و فقط به ذکر نتایج آن بسنده می کنیم. روش طراحی کنترل کننده روشی جبری است، بنابراین تمام شرایط مطرح شده در حالت پیوسته در این حالت نیز صادق است. با توجه به اینکه سیستم در برخی حالات از شرایط حداقل فاز بودن خارج می شود امکان حذف صفر را نداریم، به طور مشابه برای داشتن شرایط سازگاری تابع تبدیل مطلوب هم باید حداقل از درجه برابر تابع تبدیل شناسایی شده باشد بنابراین داریم:

$$\frac{B_m(z)}{A_m(z)} = \frac{\beta(b_2 z^2 + b_1 z + b_0)}{z^3 + a_{m2} z^2 + a_{m1} z + a_{m0}} \quad (۲۳-۴)$$

$$\beta = \frac{A_m(1)}{B(1)} = \frac{1 + a_{m2} + a_{m1} + a_{m0}}{b_2 + b_1 + b_0} \quad (۲۴-۴)$$

با تشکیل معادله دیوفانتین چند جمله ای رویترگر از مرتبه ۲ بوده و توابع چند جمله ای  $R$ ،  $S$  و  $T$  نیز از مرتبه ۲ خواهند بود. چند جمله ای رویترگر و تابع تبدیل مطلوب را به شکل زیر در نظر میگیریم:

$$\frac{B_m(z)}{A_m(z)} = \frac{\beta(b_2 z^2 + b_1 z + b_0)}{z^3 + 0.19z^2 + 0.011z + 0.0002} \quad (25-4)$$

$$A_0(z) = z^2 - 0.9025 \quad (26-4)$$

مشابه توضیحاتی که در بخش پیاده سازی گسسته برای انتخاب قطب رویترگر و قطبهای سیستم مطلوب داده شد، انتخاب این قطبها نیز با توجه به ماهیت فیزیک سیستم و محدودیتها از طریق آزمایشهای متعدد صورت گرفت.

در این قسمت در بخش شناسایی، برای تشکیل رگرسورها از المان تاخیر  $z^{-1}$  برای ورودی و خروجیها استفاده میکنیم. برای پیاده سازی شناسایی از روش حداقل مربعات بازگشتی از ساختار توابع متلب در سیمولینک استفاده می کنیم که خروجی آن پارامترهای تابع تبدیل را شناسایی می کند. با توجه به زمان نمونه برداری خیلی سریع شبیه سازی مربوطه (۱۰ میکروثانیه) شناسایی نیز در حداقل زمان ممکن صورت می گیرد و پارامترهای لازم به قسمت کنترل کننده اعمال می شود که به فرم زیر خواهد بود:

$$R(z) = z^2 + r_1 z + r_0 \quad (27-4)$$

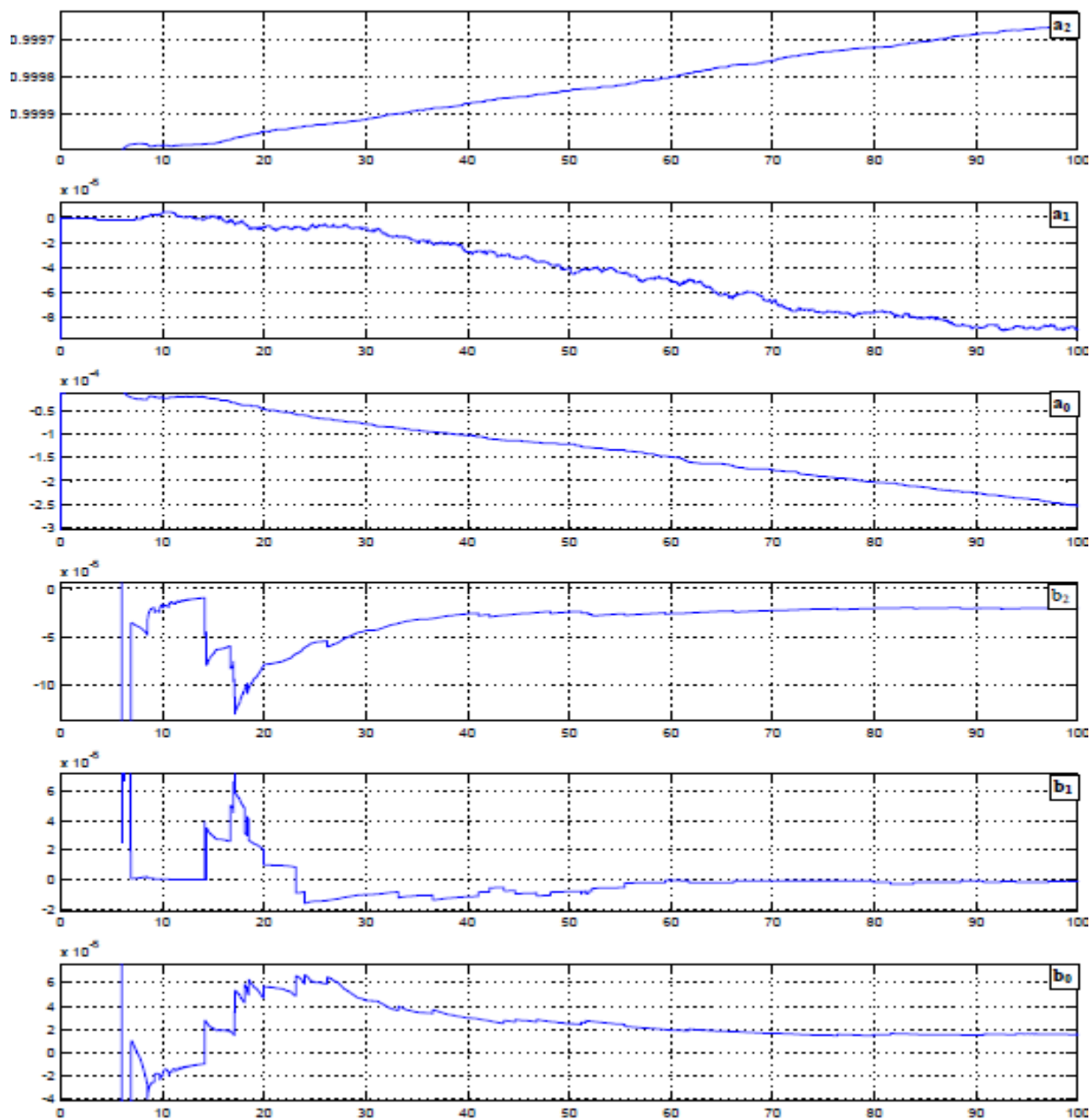
$$S(z) = s_2 z^2 + s_1 z + s_0 \quad (28-4)$$

$$T(z) = \beta A_0(z) \quad (29-4)$$

#### ۴-۱ نتایج شبیه سازی به صورت گسسته

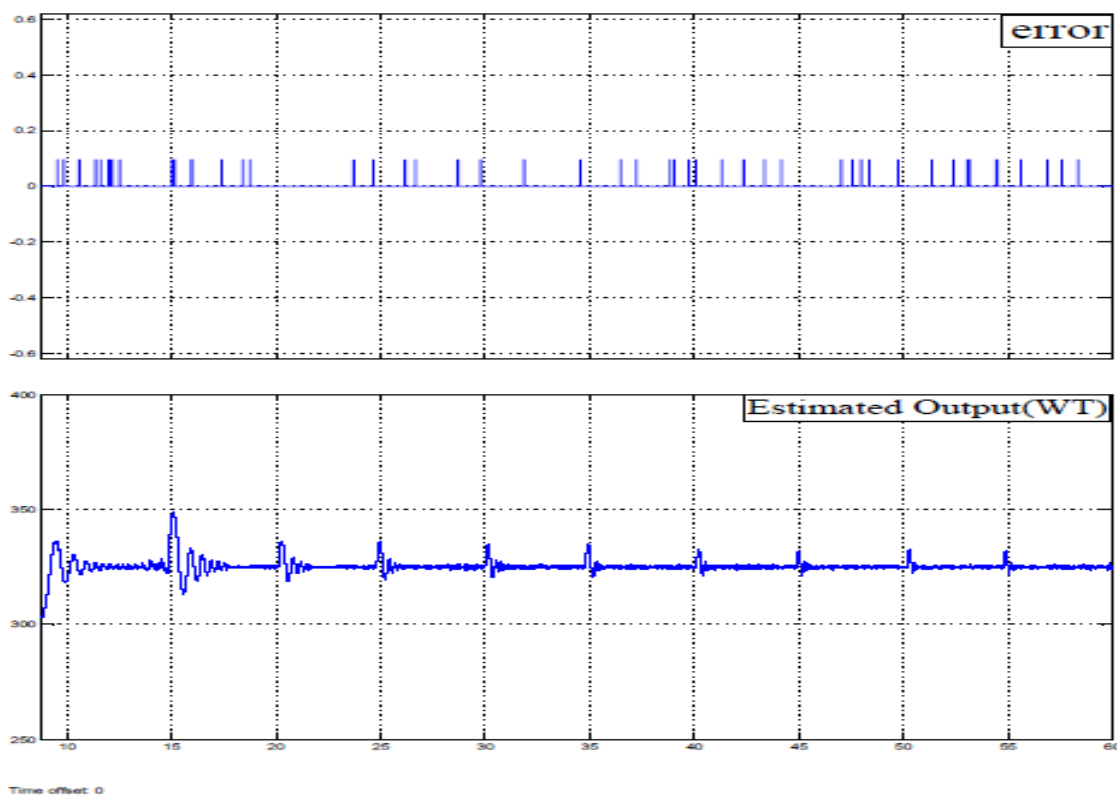
پس از پیاده سازی این کنترل کننده به صورت گسسته پارامترهای شناسایی شده تابع تبدیل با تغییرات

سرعت باد از 10m/s تا 20m/s مطابق شکل ۴-۱۰ به دست آمد:



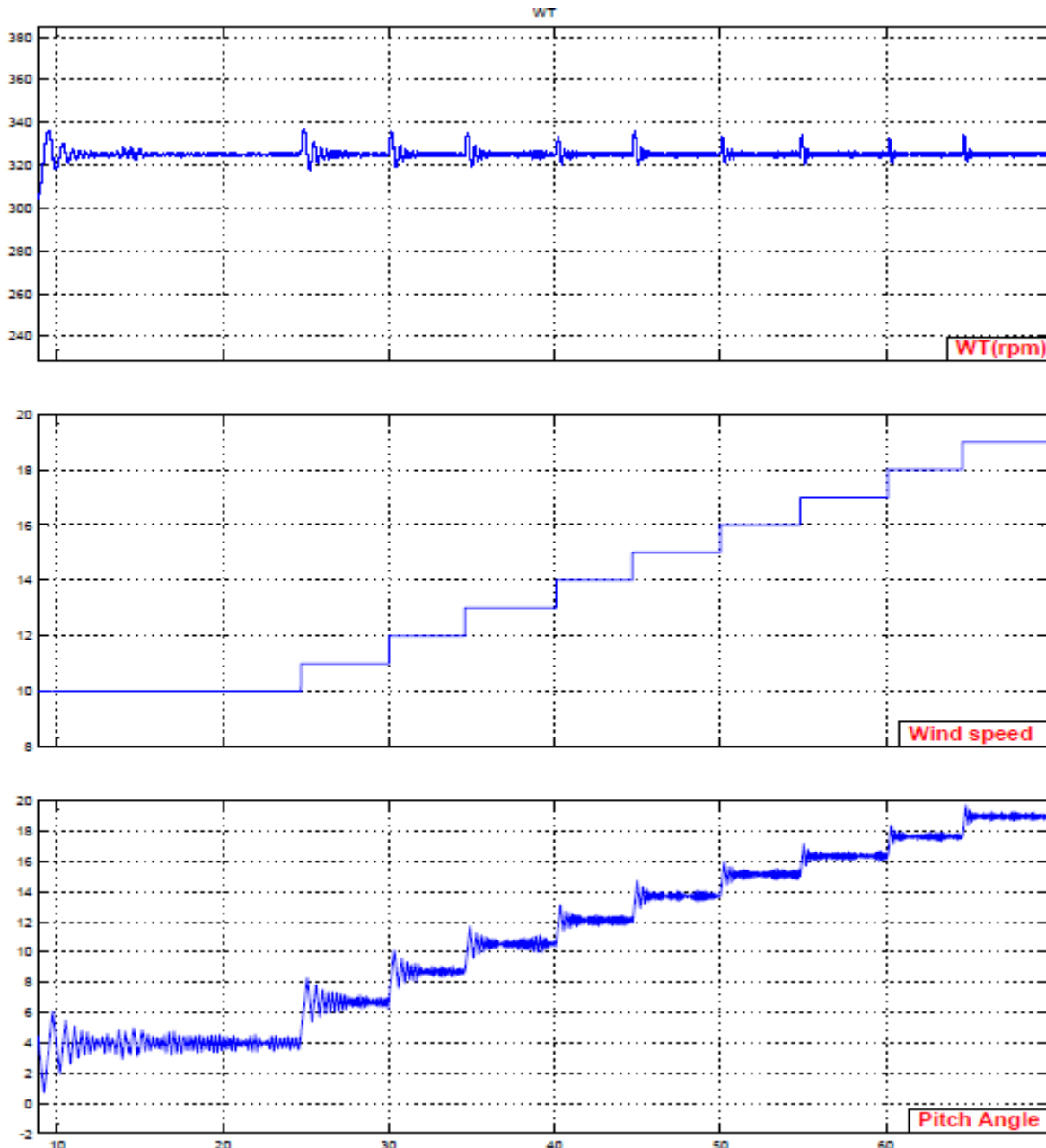
شکل ۴-۱۰ پارامترهای شناسایی شده  $a_2$ ,  $a_1$ ,  $a_0$  و  $b_2$ ,  $b_1$ ,  $b_0$  در حالت گسسته

در شکل ۴-۱۱ خطای شناسایی و مقدار تخمین سرعت توربین نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود خطا در این حالت بسیار کمتر و مقدار تخمین به خوبی سیگنال اصلی را نشان می دهد:



شکل ۴-۱۱ سیگنال خطای شناسایی (error) و تخمین خروجی  $(\widehat{WT})$

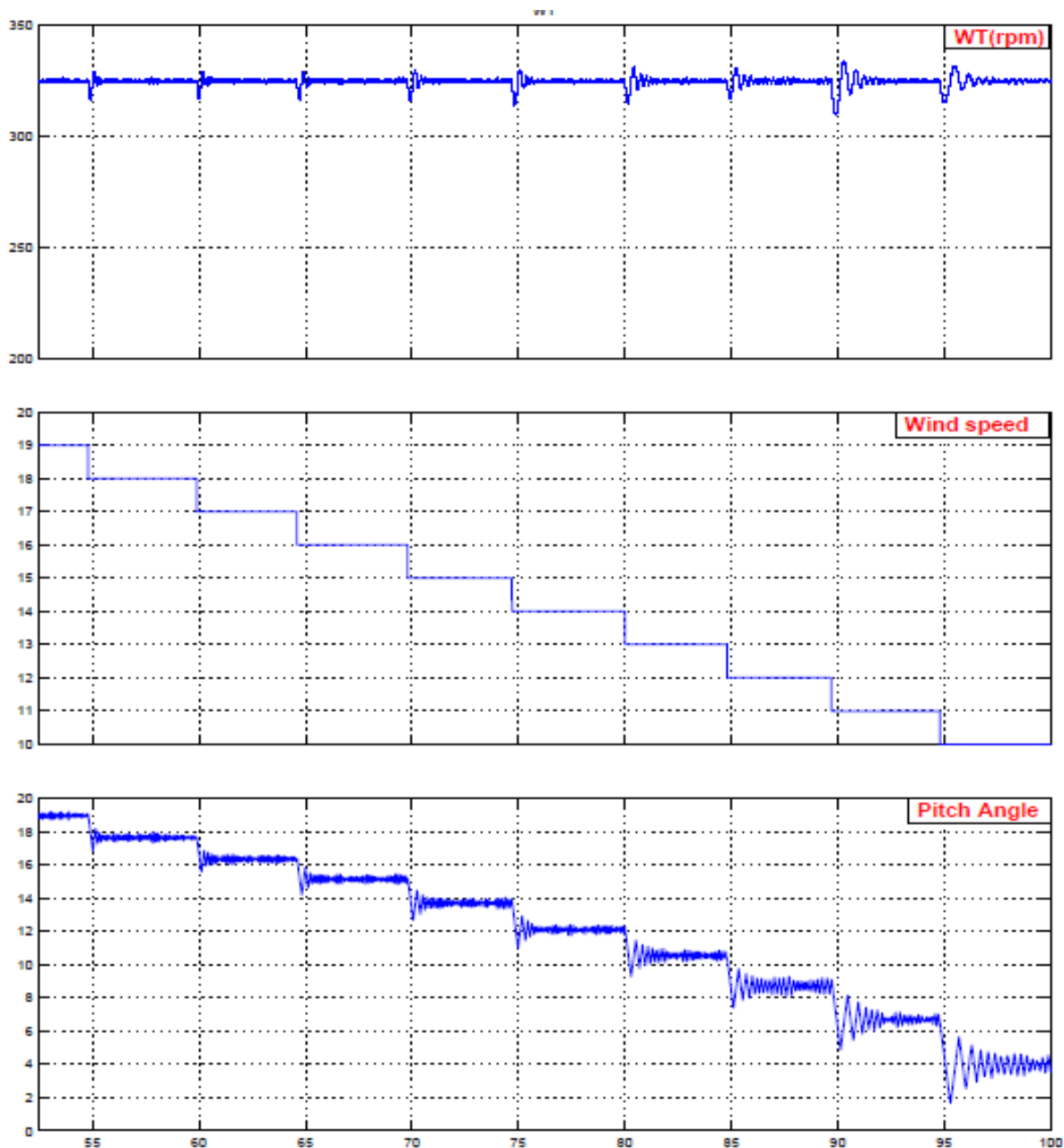
در شکل زیر (۴-۱۲) خروجی سیستم و سیگنال کنترل در شرایط افزایش سرعت باد به صورت پله ای از 10m/s تا 20m/s نشان داده شده است. اولین نمودار سرعت توربین، بعدی سرعت باد و آخرین نمودار سیگنال کنترل (زاویه پره) را نشان می دهد.



شکل ۴-۱۲ نتایج پیاده سازی کنترل کننده بصورت گسسته در شرایط افزایش پله ای سرعت باد: سرعت توربین، سرعت

باد و زاویه پره

در شکل ۴-۱۳ نیز سه پارامتر سرعت توربین، سرعت باد و سیگنال کنترل این بار در شرایط کاهش پله ای سرعت باد از 20m/s تا 10m/s نشان داده شده است:



شکل ۴-۱۳ نتایج پیاده سازی کنترل کننده بصورت گسسته در شرایط کاهش پله ای سرعت باد: سرعت توربین، سرعت باد و زاویه پره

همانطور که دیده می شود نتایج حاصل از پیاده سازی این کنترل کننده تقریباً مشابه حالت پیوسته است. در این حالت خطا کمتر از حالت گسسته است و طبیعتاً تخمین خروجی به خروجی اصلی نزدیکتر است. یکی از معایبی که در این روش دیده می شود این است که نوسانات سیگنال کنترل بیشتر شده است. با توجه به این که اساس عملکرد و طراحی کنترل کننده در هر دو حالت یکسان بوده است، تنها تفاوت به نحوه پیاده سازی شناسایی و کنترلگر بر می گردد.

در حالت پیوسته تغییرات شناسایی و کنترلگر زمان بیشتری نیاز دارد اما در حالت گسسته با توجه به زمان کوتاه نمونه برداری سیستم شناسایی و کنترلگر سرعت بیشتری دارد. اما در هر دو روش نوسانات سیگنال کنترل دیده میشود که به ساختار اصلی این نوع کنترلگر بر می گردد.

در این روش سیگنال خروجی از تابع تبدیل  $S/R$  عبور می کند، بنابراین دینامیکهای این بخش از کنترلگر تاثیر زیادی بر عملکرد سیستم خواهد گذاشت و بهره و دینامیکهای آن مستقیماً بر عملکرد سیستم تاثیر مستقیم خواهد گذاشت.





## فصل پنجم:

### نتیجه گیری و پیشنهادات

## ۵-۱ نتیجه گیری

در این پایان نامه استفاده از کنترل تطبیقی به روش رگولاتور خود تنظیم غیر مستقیم برای کنترل زاویه پره در ناحیه سوم کاری توربین باد به کار گرفته شد و هر دو روش پیوسته و گسسته پیاده سازی شدند. با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در این سیستم و تغییر نقطه کار با تغییرات سرعت باد و عوامل غیر خطی که بعضاً به طور کامل شناخته شده نیست، تمام این عوامل باعث می شود تا گشتاور آیرودینامیکی باد و رابطه آن با مقدار زاویه پره و سرعت باد پدیده غیر خطی پیچیده ای باشد که کنترل کننده‌های کلاسیک مانند PI در تمام شرایط جوابگو نباشد. به همین منظور استفاده از کنترل کننده تطبیقی در این سیستم خاص حایز اهمیت و حتی ضروری است.

در این تحقیق ابتدا از روش شناسایی پیوسته استفاده شد که در تحقیقات قبلی به چشم نمی خورد. برای مقایسه روش گسسته نیز پیاده سازی شد که نتایج پیاده سازی کنترلگر دیجیتال با حالت پیوسته مشابهت دارد. در حالت گسسته نوسانات سیگنال کنترل کمی بیشتر از حالت پیوسته است. در این حالت عملکرد کنترل کننده بسیار سریعتر از سیستم است که شاید با افزایش مرتبه کنترل کننده این مشکل کمتر شود، اما افزایش مرتبه مستلزم روابط پیچیده تر برای به دست آوردن پارامترهای کنترل کننده است که به راحتی امکان پذیر نیست و روش جایابی قطب وقتی مطلوبتر است که مرتبه سیستم پایین باشد.

با توجه به آزمونهای انجام شده ملاحظه گردید که ساختار سیستم می تواند درجه ۲ یا درجه ۳ باشد. به همین علت ابتدا در بخش پیوسته، سیستم را به صورت درجه ۲ و سپس در بخش گسسته سیستم را به صورت درجه ۳ در نظر گرفتیم که هر دوی آنها پاسخ های قابل قبولی ارائه داده اند.

پارامترهایی که در اختیار طراح است شامل ریشه های رویتگر  $A_0$  و ریشه های تابع تبدیل مطلوب یعنی  $A_m$  است. در صورتیکه دینامیک سریعی از سیستم کنترل انتظار داشته باشیم باید ریشه های این دو را تا حد امکان از محور موهومی دور در نظر گرفت تا سریعاً به حالت مانا برسیم، اما همانطور که در فصل ۴ توضیح داده شد این افزایش قطبها به هر اندازه دلخواه امکان پذیر نیست. علاوه بر آن افزایش موقعیت ریشه ها منجر به افزایش مقادیر  $S_0$ ،  $T_0$  و  $S_1$  (در حالت پیوسته) می شود. افزایش این پارامترها منجر به این می شود که مقادیر حاصل به ویژه در شاخه فیدبک دینامیکهای خیلی سریع داشته باشد و علاوه بر آن در شرایط مانا هم بهره بزرگی داشته باشد، یعنی کوچکترین تغییرات در سرعت توربین منجر به نوسانات سیگنال کنترل شده و دیرتر به حالت مانا می رسد. از طرفی، در صورتی که دینامیکهای رویتگر و تابع تبدیل مطلوب را هم بسیار نزدیک به محور موهومی در نظر بگیریم عملاً میزان عملکرد کنترل کننده مطلوب را کاهش داده ایم و آن را نزدیک به نقاط ناپایداری نگه داشته ایم. برای به دست آوردن بهترین نقطه برای رویتگر و تابع تبدیل مطلوب رابطه خاصی وجود ندارد و بهترین انتخاب بایستی با سعی و خطا و تجربه به دست آید که نتیجه حاصله در فصل ۴ ارائه شد.

یکی از مشکلاتی که در این کار وجود داشت در بخش شناسایی بود، همانطور که در نمودارهای نشان داده شده نیز واضح است تغییرات پارامترهای تابع تبدیل با تغییرات سرعت باد بعضاً خیلی زیاد است که این طبیعی است زیرا نقطه کار توربین تغییر می کند و عوامل غیر خطی تاثیر خود را نشان می دهد. از طرفی سیستم را به صورت SISO لحاظ کردیم و تاثیر تغییرات سرعت باد اثر خود را در شناسایی میگذارد. همانطور که در فصلهای قبل هم به آن اشاره شد ورودی به سیستم زاویه پره و خروجی سیستم سرعت توربین در نظر گرفته شده و سیگنال سرعت باد هم به صورت اغتشاش لحاظ شده است. تقریباً در اکثر مقالات و کتابهای جامع برای توربین باد پیکربندی به همین شکل لحاظ شده است. در برخی مقالات سرعت باد را هم اندازه گیری کرده و از آن استفاده می شود، در واقع نهایتاً به آن اغتشاش قابل

اندازه گیری اطلاق می شود. اما همانطور که میدانیم واقعیت این است که عامل محرک سیستم که خروجی ایجاد می کند سرعت باد است و نه زاویه پره به تنهایی، یعنی سرعت توربین تابع هر دو عامل است :

$$WT = f(\text{pitch}, WS) \quad (1-5)$$

به این سیستم می توان از منظر دیگری نگاه کرد، دیدگاه دیگری برای ورودی خروجی سیستم این است که سرعت باد اندازه گیری شود و در عین اینکه طبق تعریف این سیگنال یک اغتشاش به سیستم است (چون قابل کنترل از بیرون نیست) اما با آن به مثابه یک ورودی عادی برخورد شود. حسن کار در این خواهد بود که شناسایی بهتر و کارآمدتری خواهیم داشت چون این ساختار به فیزیک و ذات سیستم نزدیکتر است. بنابراین با این ساختار انتظار تغییرات ناگهانی و خیلی شدید در پارامترهای تابع تبدیل شناسایی شده در صورت تغییرات سرعت باد را نداریم که این می تواند شرایط بهتری برای کنترل کننده تطبیقی ایجاد کند. در برخی شرایط خاص که تغییرات ناگهانی پارامترها در حالت تغییر سرعت باد را داشتیم این موضوع به صورت لحظه ای منجر به نوساناتی می شد که مطلوب نیست.

علاوه بر این یکی از نکاتی که در ساختار شناسایی در نظر گرفته می شد وجود عامل تاخیر است. این سیستم ذاتاً دارای تاخیر است و شاید با لحاظ کردن یک عبارت تاخیر شناسایی بهتری صورت می گرفت.

## ۵-۲ پیشنهادات

همانطور که در فصلهای قبلی هم اشاره شد تاکنون چندان از رگولاتور خود تنظیم برای کنترل زاویه پره استفاده نشده است. بنابراین با توجه به مزایایی که این دسته از کنترل کننده ها دارند برای رسیدن به کنترل کننده ایده آل کار و پژوهش بسیار بیشتری می طلبد.

موردی که در این بخش از کنترل توربین بادی به آن بر می خوریم محدودیت عملگر زاویه پره است که اجتناب ناپذیر است. همانطور که در فصلهای ابتدایی این پایان نامه هم اشاره شد در حال حاضر بیشترین سرعت عملگر از 12 deg/s فراتر نمی رود و هر چه ابعاد توربین بزرگتر شود طبیعتاً به عملگرهای بزرگتری احتیاج داریم که بتواند نیاز ما را بر آورده کند. در واقع این محدودیت هم به عملگر زاویه پره برمیگردد که سرعت آن از حد معینی نمی تواند بیشتر شود و هم به ساختار سازه برج و ناسل و دیگر متعلقات توربین. اگر در شرایط تغییرات ناگهانی سرعت باد این عملگر تغییرات خیلی شدید داشته باشد عملاً نوسانات و ارتعاشات برج، پره ها و دیگر متعلقات آنقدر زیاد می شود که آسیبها و خطرات جدی ایجاد می کند. بنابراین یکی از قیدهایی مسئله سرعت عملگر زاویه پره است. بنابراین حتی در صورت طراحی بهترین کنترل کننده ها در این ناحیه از کار توربین باد، نهایتاً با رسیدن به عملگر زاویه پره کند شده و عملاً نمی توان عملکرد کنترل کننده را از حدی بیشتر ارتقا داد. بنابراین شاید یکی از راهکارهایی که بتوان در این زمینه بیشتر به آن پرداخت استفاده از کنترل کننده پیش بین است. در بخش مرور کارهای پژوهشی صورت گرفته به استفاده از سنسور اندازه گیری سرعت باد (LIDAR) اشاره شد که این سنسور روی ناسل نصب شده سرعت باد را تا لحظات بعد (بسته به برد سنسور و سرعت باد) می تواند پیش بینی کند، علاوه بر این در برخی مقالات دیگر از روشهای هوشمند برای تخمین سرعت باد بهره گرفته شده است. می توان محدودیت سرعت عملگر زاویه پیچ را با این دو قابلیت بر طرف کرد و با این روش قبل از افزایش سرعت ناگهانی باد با تغییر میزان زاویه پره میزان بالازدگی سرعت را کنترل کرد و در مجموع عملکرد سیستم کنترل و کیفیت توان را ارتقا داد.

در مجموع به عنوان پیشنهاد برای کارهای آینده می توان به موضوعات زیر اشاره کرد:

- اصلاح ساختار شناسایی با در نظر گرفتن سرعت باد و زاویه پره به عنوان ورودی و سرعت توربین

به عنوان خروجی

- اصلاح ساختار شناسایی با در نظر گرفتن عبارتی برای تاخیر
- استفاده از کنترلگرهای پیش بین به همراه سنسورهای اندازه گیری باد
- استفاده از کنترلگرهای پیش بین به همراه روشهای تخمین سرعت باد

- [1] Wu B. and Lang Y. and Zargari N. and Kouros S. (2011) "Power conversion and control of wind energy systems", Wiley-IEEE Press.
- [2] Jianzhong Z. and Ming C. and Zhe C. and Xiaofan F. (2008) "Pitch Angle Control for Variable Speed Wind Turbines", DRPT2008 Nanjing China.
- [3] Frost S. and Balas M. and Wright A. (2009) "Adaptive Control of a Utility-Scale Wind Turbine Operating in Region 3", Reston, Va.: American Institute of Aeronautics and Astronautics, Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, AIAA Paper -0480.
- [4] Hayatdavudi M. and Saeedimoghadam M. and Nabavi H.(2013) "Adaptive Control of Pitch Angle of Wind Turbine using a Novel Strategy for Management of Mechanical Energy Generated by Turbine in Different Wind Velocities" ,Journal of Electrical Engineering& Technology Vol. 8, No.4
- [5] Vijay R. and, Sethi A.K., M.S. thesis (2011) "Pitch Control of Horizontal Axis Wind Turbine" National Institute of Technology, Rourke la.
- [6] Jin-Sung K. and ,Jonghyun J. and Hoon H.(2011) "Design of adaptive PID for pitch control of a large wind turbine Generator" ,IEEE 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC) on Rome,Pages:1-4
- [7] Hwas A., Katebi R. (2012)"Wind Turbine Control Using PI Pitch Angle Controller", IFAC Conference on Advances in PID Control. Brescia (Italy)
- [8] Linjing H. and Dongmin X. ,and Tao L.(2012) "Research of Wind Generation Pitch System Based on Fuzzy Adaptive PID" , The 2nd International conference on Intelligent control and Information Processing.China
- [9] Shengahan L.(2013) "Adaptive Dynamic Sliding Mode Control Based on Offshore Variable speed Variable pitch wind turbine" , Applied Mechanics and Materials Vols. 373-375 pp 1449-1453
- [10] Frost S. and Mark J. and Balas B. and Wright A.(2011) "Generator speed regulation in the presence of structural modes through adaptive control using residual mode filters" , Elsevier Mechatronics Volume 21, Issue 4, Pages 660–667

[۱۱] مدیر شانه چی ج. ، منهاج ب. ، مدقق ه. (۱۳۷۶) "کنترل ساختار متغیر تطبیقی یک نیروگاه بادی" ، دوازدهمین کنفرانس بین المللی برق، تهران، شرکت توانیر، پژوهشگاه نیرو،

[http://www.civilica.com/Paper-PSC12-PSC12\\_095.html](http://www.civilica.com/Paper-PSC12-PSC12_095.html)

[12] Jafarnejadsani H. and Pieper J. and Ehlers J. (2012) "Adaptive Control of a Variable-Speed Variable-Pitch Wind Turbine Using RBF Neural Network", IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC), London, pages: 216–222

[13] Xingjia Y. and Yingming L. and Changchun G. (2007) "Adaptive Fuzzy Sliding-mode Control in Variable Speed adjustable pitch wind turbine", Automation and Logistics, IEEE International Conference on Jinan, Page(s): 313 - 318

[14] Simani S. and Castaldi P. (2013), "Data-driven and adaptive control applications to a wind turbine benchmark model", Elsevier, Control Engineering Practice Volume 21, Issue 12, December, Pages 1678–1693

[۱۵] حیات داودی م. ، فرشاد م. ، نجفی ح. ، صداقتی ر. ، جورابیان م. (۱۳۹۲) "کنترل تطبیقی زاویه پره با استفاده از مکانیزم یادگیری عاطفی مغز انسان" ، نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران - الف

مهندسی برق: دوره ۱۱، شماره ۱، صفحات ۱۱ تا ۱۸

[16] Mao-Hsiung C. (2011) "A novel pitch control system for a wind turbine driven by a variable-speed pump-controlled hydraulic servo system", Elsevier Mechatronics Volume 21, Issue 4, Pages 753–761

[17] Muhando E.B. and Senjyu T. and Yona A. and Kinjo H. and Funabashi T., (2007) "Disturbance rejection by dual pitch control and self-tuning regulator for wind turbine generator parametric uncertainty compensation", IEEE, IET Control Theory & Application, Volume: 1 Issue: 5 pp. 1431–1440

[18] Bati A.F. and Leabi S. (2006) "NN Self-Tuning Pitch Angle Controller of Wind Power Generation Unit", Power Systems Conference and Exposition, 2006. PSCE '06. 2006 IEEE PES Atlanta, GA, Page(s): 2019 – 2029



- [19] Abdullah M. and Yatim A and Tan C. and Saidur R.(2012) , “A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems” , Elsevier Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 16, Issue 5, Pages 3220–3227
- [20] Na W. and Johnson K. and Wright A.(2012) “FX-RLS-Based Feed forward Control for LIDAR-Enabled Wind Turbine Load Mitigation”, IEEE Transactions On Control Systems Technology, Vol. 20, No. 5
- [21] Yunqian Z. and Zhe C. and Ming C. and Jianzhong Z.(2011) “Pitch control of wind turbines using model free adaptive control based on wind turbine code”, IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems, ICEMS, Beijing, China , pp.3260-3266
- [22] Zhao L. and Chen B. and Lu J.(2012) ”Minimum Variance Control of Constant Power Output For Wind Energy Conversion System Above Rated Wind”, IEEE Transactions On Control Systems Technology, VOL. 20, NO. 5
- [23] Sakamoto R.(2004) “Output Power Leveling of Wind Turbine Generator by Pitch Angle Control Using Adaptive Control Method” IEEE International Conference on power system technology. (PowerCon 2004) Volume: 1 , Page(s): 834 - 839
- [24] Johnson K.(2008) “Adaptive Torque Control of Variable Speed Wind Turbines”, American Society of Mechanical Engineers, Journal of Solar Energy Engineering, Volume 130, Issue 3, Research Paper.
- [25] Senjyu T. and Sakamoto R. and Urasaki N. and Higa H. and Uezato K. and Funabashi T. (2006) “Output Power Control of Wind Turbine Generator by Pitch Angle Control Using Minimum Variance Control”, IEEE Electrical Engineering in Japan, Vol. 154, No. 2
- [26] Hand M. and Johnson K. And Fingersh L. and Wright A.(2004) “Advanced Control Design and Field Testing for Wind Turbine sat the National Renewable Energy Laboratory”, World Renewable Energy Congress VIII Denver, Colorado.
- [27] Olimpo A. and Nick J. and Janaka E. and Cartwright P. and Hughes M.(2009), “Wind Energy Generation Modelling and Control” , JOHN WILEY & SONS, LTD
- [28] Burton T., Sharpe D., Jenkins N., Bossanyi E.,(2001)”Wind Energy Handbook” JOHN WILEY & SONS, LTD
- [29] Steinbuch, M. , (1989)“Dynamic modelling and Robust Control of a wind energy conversion system” Technische Universiteit Delft.

- [30] Rao G.P., Unbehauen H. (2006) "Identification of continuous-time systems", IEE Proc.-Control Theory Appl., Vol. 153, No. 2
- [31] Astrom K.J. , Wittenmark B. (2008) "Adaptive Control "(2nd Edition) Dover publication , chapter2,3.
- [32] Sastry S. and Bodson M. (1989) "Adaptive control: Stability Convergence and Robustness", Englewood cliffs, N.J: Prentice-Hall
- [33] Young P.C. (1981) "Parameter Estimation for continuous time models: A survey". Elsevier, Automatica Volume 17, Issue 1, Pages 23–39

## **Abstract**

In this thesis the target is to regulate the speed of a wind turbine in region 3 of operation, this target will be done by changing the pitch angle of the wind turbine. At the first, the adaptive methods for controlling the wind turbine will be browsed. In these lectures self tuning regulator is not used too much. According to the benefits of self tuning regulators and continuous identification, in this thesis an indirect self tuning regulator is designed and implement continuously (continuous identification and controller design). The results will be compared by a discrete indirect self tuning regulator (discrete identification and controller) that show some better results for continuous design.

**Keywords: Wind Turbine, Adaptive Controller, Self Tuning Regulator**



**University of Shahrood**

**Faculty of Electrical and Robotic Engineering**

**Adaptive Pitch control of a wind turbine for output  
power control**

**Rouhollah Movaghar Moghadam**

**Supervisor:**

**Dr Hossein Gholizade Narm**

**Date: 2015**