

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه بیرجند  
دانشکده مهندسی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق - قدرت

**کنترل هوشمند توربین بادی**

**مجهز به ژنراتور القایی دو تغذیه روتور سیم‌پیچی شده (DFIG)**

نگارش

**مهدی حیات داودی**

استاد راهنما

**دکتر محسن فرشاد**

استاد مشاور

**دکتر حمیدرضا نجفی**

تابستان ۱۳۹۰

## تأییدیه هیات داوران

(برای پایان نامه)

یک نسخه اصل فرم مربوطه

## **تقدیم:**

به پاس ایثار و از خودگذشتگی و محبت‌های بی‌دریغ پدر و مادرم این تحقیق را به آن‌ها تقدیم می‌کنم.

## **تشر و قدردانی:**

از اساتید ارجمند جناب آقای دکتر محسن فرشاد و جناب آقای دکتر حمیدرضا نجفی برای راهنمایی و مشاوره مؤثر و ارزشمندشان در این تحقیق کمال تشر و قدردانی را دارم و توفیق روزافزون را برای این عزیزان آرزومندم. همچنین از آقای دکتر محمود عبادیان و دکتر محمدعلی شمسی‌نژاد به خاطر داوری این تحقیق سپاسگذاری می‌کنم.

## چکیده

در سال‌های اخیر تولید برق بادی رشد چشمگیری داشته است. با توجه به اهمیت زیاد کیفیت توان تولیدی توسط توربین و از آنجا که عملکرد بهتر سیستم کنترلی، کیفیت بهتر توان تولیدی توربین را بدنبال دارد، لذا بهینه‌سازی عملکرد سیستم کنترل امری حیاتی است. در میان توربین‌های بادی، توربین بادی مجهز به DFIG با توجه به مزایای فراوان آن بسیار مورد توجه قرار گرفته و سهم زیادی در تولید برق بادی را به خود اختصاص داده است. توربین بادی مجهز به DFIG یک توربین سرعت متغیر-زاویه گام متغیر است که عملیات کنترل در آن با دو هدف انجام می‌گیرد: حفظ توان نامی توربین در سرعت-های باد بالاتر از سرعت باد نامی (توسط سیستم کنترل زاویه گام) و نیز کسب حداکثر انرژی از باد در سرعت‌های باد پایین‌تر از سرعت باد نامی (توسط مبدل‌ها).

روش‌های هوشمند برخوردار از قابلیت‌های ارزشمند متعددی (شامل: قدرت تطبیق و تعمیم بالا، سیستم-رها بودن و همچنین امکان اجرای روی-خط) هستند و لذا استفاده از آنها در حوزه کنترل توربین‌های بادی قطعاً راهگشای مشکلات عدیده‌ی پیش رو خواهد بود. در این تحقیق، برای تحقق همزمان دو هدف کنترلی فوق‌الذکر، دو کنترل‌کننده هوشمند، یکی مرکب از دو شبکه عصبی آدالاین و دیگری مبتنی بر یادگیری عاطفی طراحی شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی مؤید عملکرد مطلوب‌تر کنترل‌کننده‌های طراحی شده نسبت به کارهای قبلی است. از جمله ویژگی‌های برجسته کنترل‌کننده‌های هوشمند پیشنهادی آن است که تحقق آن‌ها بصورت روی-خط بوده و لذا، در عین سادگی ساختار، از قوام قابل ملاحظه‌ای در برابر تغییرات نقطه کار و پارامترهای سیستم برخوردارند. از دیگر ویژگی‌های کنترل‌کننده‌های پیشنهادی، راحتی تعبیه اهداف ثانویه در متن آنها است.

**کلید واژه‌ها:** توربین بادی مجهز به DFIG، زاویه گام، شبکه‌ی عصبی آدالاین، کنترل‌کننده هوشمند عاطفی.

## فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست علایم و نشانه‌ها.....	ج
فهرست جدول‌ها.....	د
فهرست شکل‌ها.....	ه
<b>فصل ۱- پیشگفتار</b> .....	<b>۲</b>
<b>فصل ۲- برق بادی</b> .....	<b>۶</b>
۱-۲- مقدمه.....	۶
۲-۲- برق بادی در ایران.....	۶
۳-۲- انرژی باد.....	۷
۴-۲- مدل سرعت باد.....	۷
۵-۲- اجزای توربین بادی.....	۸
۶-۲- توان مکانیکی و بازده توان توربین بادی.....	۱۰
۷-۲- کنترل توان مکانیکی توربین.....	۱۱
۸-۲- انواع توربین‌های بادی از نقطه نظر محور چرخش.....	۱۱
۹-۲- انواع توربین‌های بادی از نظر سرعت.....	۱۳
۱-۹-۲- توربین‌های بادی سرعت ثابت.....	۱۳
۲-۹-۲- توربین‌های بادی سرعت متغیر.....	۱۴
۱-۲-۹-۲- توربین‌های بادی سرعت متغیر محدود.....	۱۴
۲-۲-۹-۲- توربین‌های بادی سرعت متغیر مجهز به DFIG.....	۱۵
۳-۲-۹-۲- توربین‌های بادی سرعت متغیر با مبدل‌های توان کامل.....	۱۵
<b>فصل ۳- کنترل توربین‌های بادی</b> .....	<b>۱۸</b>
۱-۳- مقدمه.....	۱۸
۲-۳- اهداف کنترل در توربین‌های بادی.....	۱۸
۳-۳- استراتژی کنترل در توربین‌های بادی.....	۱۹
۱-۳-۳- استراتژی کنترل برای توربین‌های بادی سرعت ثابت - زاویه گام ثابت $(FS - FP)$ .....	۲۰
۲-۳-۳- استراتژی کنترل برای توربین‌های بادی سرعت ثابت - زاویه گام متغیر $(FS - VP)$ .....	۲۲
۳-۳-۳- استراتژی کنترل برای توربین‌های بادی سرعت متغیر - زاویه گام ثابت $(VS - FP)$ .....	۲۴
۱-۳-۳-۳- روش استال غیرفعال.....	۲۴
۲-۳-۳-۳- روش استال.....	۲۵
۴-۳-۳- استراتژی کنترل برای توربین‌های بادی سرعت متغیر - زاویه گام متغیر $(VS - VP)$ .....	۲۷

۲۷.....	۴-۳	چگونگی تحقق استراتژی کنترل در توربین‌های بادی.....
۳۰.....	فصل ۴	ژنراتور القایی دو تغذیه روتور سیم‌پیچی شده (DFIG).....
۳۰.....	۱-۴	مقدمه.....
۳۰.....	۲-۴	ژنراتورهای مورد استفاده در توربین‌های بادی.....
۳۱.....	۳-۴	ساختار توربین بادی مجهز به DFIG و نحوه‌ی عملکرد آن.....
۳۳.....	۴-۴	توزیع توان اکتیو و راکتیو در DFIG.....
۳۴.....	۵-۴	مدل دینامیکی DFIG.....
۳۶.....	۶-۴	کنترل برداری توربین بادی مجهز به DFIG.....
۳۷.....	۷-۴	ایراد اصلی توربین‌های بادی سرعت متغیر مجهز به DFIG و راه حل آن.....
۳۸.....	۸-۴	نتیجه‌گیری.....
۴۰.....	فصل ۵	کنترل هوشمند توربین بادی مجهز به DFIG.....
۴۰.....	۱-۵	مقدمه.....
۴۰.....	۲-۵	کنترل هوشمند زاویه گام.....
۴۱.....	۱-۲-۵	سیستم کنترل زاویه گام.....
۴۲.....	۲-۲-۵	کنترل هوشمند زاویه گام با استفاده از دو شبکه عصبی آدالاین متوالی.....
۴۲.....	۱-۲-۲-۵	شبکه عصبی آدالاین.....
۴۳.....	۲-۲-۲-۵	طراحی کنترل‌کننده هوشمند.....
۴۴.....	۳-۲-۵	کنترل هوشمند زاویه گام مبتنی بر یادگیری عاطفی.....
۴۵.....	۱-۳-۲-۵	ارائه یک مدل محاسباتی از مکانیسم یادگیری عاطفی مغز.....
۴۹.....	۲-۳-۲-۵	پیشنهاد یک ساختار هوشمند جدید برای بلوک کنترل‌کننده زاویه گام.....
۴۹.....	۴-۲-۵	نتایج شبیه‌سازی.....
	۳-۵	کنترل هوشمند توان اکتیو و راکتیو توربین‌های بادی مجهز به DFIG مبتنی بر مکانیسم یادگیری عاطفی مغز.....
۵۸.....		نتیجه‌گیری و پیشنهادات.....
۶۷.....		فهرست مراجع.....
۷۲.....		واژه نامه فارسی به انگلیسی.....
۷۳.....		واژه نامه انگلیسی به فارسی.....



## فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
بازده توان	$C_p$
متوسط سرعت باد	$v_{av}$
سرعت شیب	$v_r$
سرعت تندباد	$v_g$
اغتشاش	$v_t$
دامنه سرعت شیب	$A_r$
زمان شروع وزش باد شیب	$T_{sr}$
زمان اتمام وزش باد شیب	$T_{er}$
دامنه سرعت تندباد	$A_g$
زمان شروع تندباد	$T_{sg}$
زمان اتمام تندباد	$T_{eg}$
متوسط سرعت در ارتفاع بالا	$\mu$

## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۶۶	جدول ۵-۱: مشخصات فنی DFIG.....

## فهرست شکل‌ها

عنوان	صفحه
شکل ۱-۱: روند تولید برق بادی در جهان.....	۲
شکل ۱-۲: اجزای توربین بادی.....	۸
شکل ۲-۲: مشخصه بازده توان بر حسب نسبت سرعت لبه.....	۱۱
شکل ۳-۲: توربین بادی محور افقی.....	۱۲
شکل ۴-۲: توربین بادی محور عمودی.....	۱۲
شکل ۵-۲: توربین بادی سرعت ثابت و نحوه اتصال آن به شبکه.....	۱۴
شکل ۶-۲: توربین بادی با تغییر سرعت محدود با استفاده از تغییر مقاومت روتور.....	۱۵
شکل ۷-۲: توربین بادی سرعت متغیر با ژنراتور القایی تغذیه دابل.....	۱۵
شکل ۸-۲: توربین های بادی سرعت متغیر با مبدل فرکانسی با توان کامل.....	۱۶
شکل ۱-۳: منحنی توان ایده‌ال.....	۱۹
شکل ۲-۳: استراتژی کنترل در حالت سرعت ثابت - زاویه گام ثابت.....	۲۱
شکل ۳-۳: مبنای استراتژی کنترل در حالت سرعت ثابت - زاویه گام ثابت الف- بازده توان ( $c_p$ ) ب- توان خروجی بر حسب سرعت باد.....	۲۲
شکل ۴-۳: استراتژی کنترل در حالت سرعت ثابت - زاویه گام متغیر.....	۲۳
شکل ۵-۳: مبنای استراتژی کنترل در حالت سرعت ثابت - زاویه گام متغیر الف- توان خروجی ب- بازده توان ( $c_p$ ) بر حسب سرعت باد.....	۲۴
شکل ۶-۳: استراتژی کنترل در حالت سرعت متغیر - زاویه گام ثابت با تنظیم استال غیر فعال ( $AEDG$ ) و تنظیم استال ( $ABCDG'$ ).....	۲۵
شکل ۷-۳: مبنای استراتژی کنترل در حالت سرعت ثابت - زاویه گام ثابت الف- توان خروجی ب- بازده توان ( $c_p$ ) بر حسب سرعت باد.....	۲۶
شکل ۸-۳: استراتژی کنترل در حالت سرعت متغیر - زاویه گام متغیر.....	۲۷
شکل ۱-۴: نحوه‌ی اتصال DFIG به شبکه.....	۳۱
شکل ۲-۴: ساختار کلی اتصال سیستم توربین بادی مجهز به ژنراتور القایی دو تغذیه به شبکه الکتریکی.....	۳۲
شکل ۳-۴: مبادله توان روتور DFIG در مد زیر سنکرون و بالای سنکرون.....	۳۲
شکل ۴-۴: مدار معادل حوزه فازور DFIG.....	۳۳
شکل ۱-۵: نمایش بلوکی سیستم کنترل زاویه گام.....	۴۱
شکل ۲-۵: فلوچارت نحوه محاسبه زاویه گام مرجع.....	۴۱
شکل ۳-۵: نمایش بلوکی شبکه عصبی آدالاین.....	۴۲
شکل ۴-۵: الف) نمایش بلوکی کنترل کننده هوشمند زاویه گام.....	۴۴
شکل ۵-۵: تشریح گرافیکی جزئیات مدل محاسباتی پیشنهادی از سیستم یادگیری عاطفی مغز.....	۴۷

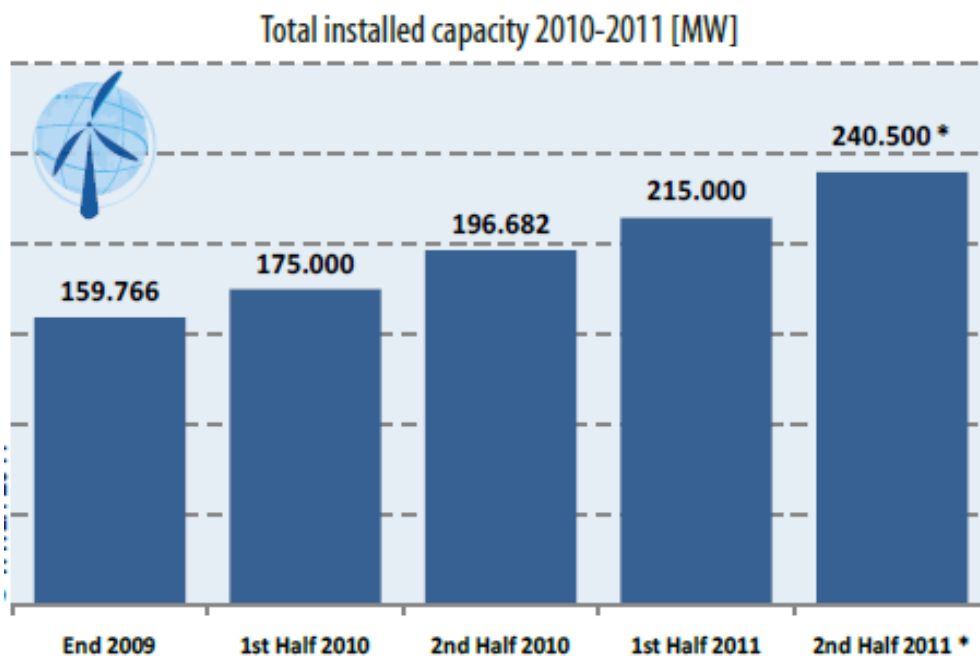
- شکل ۵-۶: نمایش بلوکی مدل محاسباتی ارائه شده از مکانیسم یادگیری عاطفی مغز..... ۴۸
- شکل ۵-۷: نمایش بلوکی کنترل کننده هوشمند زاویه گام پیشنهادی..... ۴۸
- شکل ۵-۸: پروفایل سرعت باد..... ۵۱
- شکل ۵-۹: زاویه گام مرجع..... ۵۱
- شکل ۵-۱۰: پاسخ سیستم کنترل کلاسیک زاویه گام..... ۵۲
- شکل ۵-۱۱: پاسخ سیستم کنترل هوشمند عصبی زاویه گام..... ۵۲
- شکل ۵-۱۲: پاسخ سیستم کنترل هوشمند عاطفی زاویه گام..... ۵۳
- شکل ۵-۱۳: باز شده شکل ۵-۱۰..... ۵۳
- شکل ۵-۱۴: باز شده شکل ۵-۱۱..... ۵۴
- شکل ۵-۱۵: باز شده شکل ۵-۱۲..... ۵۴
- شکل ۵-۱۶: پروفایل سرعت باد..... ۵۵
- شکل ۵-۱۷: زاویه گام مرجع..... ۵۵
- شکل ۵-۱۸: پاسخ سیستم کنترل کلاسیک زاویه گام..... ۵۶
- شکل ۵-۱۹: پاسخ سیستم کنترل هوشمند زاویه گام عصبی..... ۵۶
- شکل ۵-۲۰: پاسخ سیستم کنترل هوشمند زاویه گام عاطفی..... ۵۷
- شکل ۵-۲۱: پاسخ سیستم کنترل هوشمند زاویه گام عاطفی (به ازای دو برابر شدن مقادیر اولیه  $k_p$  و  $k_I$ )..... ۵۷
- شکل ۵-۲۲: بلوک دیاگرام کنترل برداری توان اکتیو و راکتیو توربین بادی مجهز به DFIG..... ۵۸
- شکل ۵-۲۳: زیر سیستم کنترلی شکل ۵-۲۲..... ۵۹
- شکل ۵-۲۴: پروفایل سرعت باد..... ۶۰
- شکل ۵-۲۵: سرعت روتور..... ۶۰
- شکل ۵-۲۶: گشتاور مکانیکی و الکتریکی..... ۶۱
- شکل ۵-۲۷: مؤلفه‌های  $d$  و  $q$  ولتاژ روتور..... ۶۱
- شکل ۵-۲۸: ولتاژ سه فاز روتور..... ۶۲
- شکل ۵-۲۹: توان اکتیو DFIG..... ۶۲
- شکل ۵-۳۰: توان راکتیو DFIG..... ۶۳
- شکل ۵-۳۱: سرعت روتور..... ۶۴
- شکل ۵-۳۲: گشتاور مکانیکی و الکتریکی..... ۶۴
- شکل ۵-۳۳: توان اکتیو DFIG..... ۶۵
- شکل ۵-۳۴: توان راکتیو DFIG..... ۶۵



## فصل ۱- پیشگفتار

دو استراتژی<sup>۱</sup> اصلی کشورها در مواجهه با بحران انرژی در سال‌های آتی، بهینه‌سازی مصرف انرژی و تولید انرژی از منابع تجدیدپذیر انرژی مانند انرژی خورشید، باد، آب، زمین گرمایی، جزر و مد و... می‌باشد.

در سال‌های اخیر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله انرژی باد رشد چشمگیری داشته است. یک توربین بادی<sup>۲</sup> انرژی جنبشی موجود در باد را گرفته و آن را تبدیل به انرژی مکانیکی و نهایتاً انرژی الکتریکی می‌کند. در شکل ۱-۱ روند رو به رشد تولید برق با استفاده از انرژی باد از اواخر سال ۲۰۰۹ تا نیمه دوم سال ۲۰۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱-۱: روند تولید برق بادی در جهان [۱]

بدلیل گسترش روزافزون تولید برق بادی، بهبود روند کنترل توربین‌های بادی با روش‌های کلاسیک یا هوشمند ضروری می‌باشد. یکی از کنترل‌کننده‌های متداول در سیستم‌های صنعتی، کنترل‌کننده کلاسیک PI است که علی‌رغم سادگی ساختار از عملکرد قابل قبولی (بویژه در حوزه سیستم‌های خطی) برخوردار است. در [۲ و ۳] دو نمونه از کاربرد این کنترل‌کننده برای کنترل توربین‌های بادی آورده شده است. در هر حال، در سیستم‌هایی همچون توربین بادی که برخوردار از عوامل غیرخطی و نامعینی هستند قاعداً استفاده از کنترل‌کننده ساده PI پاسخ مطلوبی را بدنبال نخواهد داشت. این موضوع از این

<sup>1</sup> Strategy

<sup>2</sup> Wind Turbine

واقعیت ناشی می‌شود که پارامترهای سیستم کنترل با تغییر سرعت باد (و لذا تغییر نقطه کار سیستم) و یا پارامترهای سیستم، نیاز به تنظیم دوباره دارند.

رفع نقیصه فوق به دو طریقه ممکن است: استفاده از روش‌های کنترلی غیرخطی کلاسیک (تطبیقی/مقاوم) و یا کاربرد روش‌های کنترلی هوشمند. در [۶-۴] از روش کنترلی کلاسیک مد لغزشی (که از جمله قدیمی‌ترین و در عین حال معروف‌ترین روش‌های کنترل غیرخطی مقاوم است) جهت کنترل سیستم توربین بادی استفاده شده است. همچنین در [۹-۷] از روش‌های هوشمند عصبی- فازی برای رسیدن به جواب‌های مطلوبتر در طراحی سیستم‌های کنترل توربین‌های بادی استفاده شده است.

توربین‌های بادی مجهز به ژنراتور القایی دو سو تغذیه روتور سیم‌پیچی شده<sup>۱</sup> که از نوع توربین‌های سرعت متغیر-زاویه گام متغیر می‌باشند، به دلیل مزایایی که دارند (از جمله: تولید توان در محدوده‌ای از سرعت باد، بازده مناسب، عدم نیاز به بانک خازنی جهت تولید توان راکتیو مورد نیاز ژنراتور و هزینه کمتر مبدل الکترونیک قدرت) به طور گسترده‌ای به کار گرفته می‌شوند. لذا، تحلیل توربین‌های بادی مجهز به ژنراتور القایی دو سو تغذیه و روش‌های کنترل آن، یکی از مهمترین تحلیل‌ها در تولید برق بادی است.

لازم به ذکر است که در یک توربین بادی و در سرعت‌های باد بالاتر از سرعت باد نامی، عملیات کنترل با هدف حفظ توان نامی تولیدی توربین صورت می‌گیرد، که این کار از طریق کنترل زاویه گام قابل انجام است (لازم به ذکر است که اگر سرعت روتور توربین بالاتر از سرعت نامی‌اش شود مشکلات الکتریکی و مکانیکی برای توربین بوجود می‌آید). همچنین در سرعت‌های کمتر از سرعت نامی باد، عملیات کنترل با هدف بدست آوردن حداکثر توان از انرژی باد صورت می‌گیرد، که این کار از طریق مبدل‌های الکترونیک قدرت انجام می‌گیرد. با توجه به اینکه هر چه سیستم کنترلی عملکرد بهتری داشته باشد، کیفیت توان خروجی توربین مطلوبتر خواهد بود بنابراین، بهینه‌سازی عملکرد کنترل کننده بسیار مهم می‌باشد.

در [۲۰-۱۰]، برخی از کارهایی که در زمینه کنترل توربین بادی مجهز به DFIG انجام شده است، گزارش شده‌اند. مرجع [۲۱] رساله دکترا در زمینه آنالیز، مدل‌سازی و کنترل توربین بادی مجهز به DFIG می‌باشد. در [۲۲]، برای کنترل زاویه گام، یکبار از شبکه عصبی MLP و بار دیگر از شبکه عصبی RBF استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی مؤید عملکرد بهتر کنترل کننده RBF در تأمین توان نامی خروجی مطلوب است. در هر حال لازم به توضیح است که هیچکدام از دو کنترل کننده فوق‌الذکر، علیرغم ساختار نسبتاً بزرگ و تنوع ورودی‌ها، توانایی حذف کامل بالازدگی<sup>۳</sup> را ندارند. همچنین در [۲۳] از یک کنترل کننده غیرخطی پیشخور (طراحی شده بر مبنای مشخصه آیرودینامیکی روتور توربین) جهت جبران ضعف کنترل کننده کلاسیک PID استفاده شده است. خروجی کنترل کننده غیرخطی پیشخور با خروجی کنترل کننده PID جمع و ورودی مطلوب سیستم زاویه گام را تولید می‌نماید. در [۲۴]، بر پایه روش کنترل تطبیقی مدل مرجع، یک کنترل کننده خود- تنظیم زاویه گام پیشنهاد شده است. این کنترل کننده، مرکب از دو شبکه عصبی، یکی با هدف درک رفتار پلانت (سیستم زاویه گام) و دیگری

<sup>۱</sup> Doubly Fed Winding Rotor Induction Generator (DFWRIG or DFIG)

<sup>۲</sup> Converter

<sup>۳</sup> Overshoot

برای درک رفتار معکوس آن (در راستای تحقق استراتژی کنترلی معکوس پلانت) است. در [۲۵] کنترل زاویه گام با استفاده از یک کنترل کننده فازی انجام گرفته است. همچنین در [۲۶]، از جهت همراهی با نامعینی‌های سیستمی (تغییر دینامیک‌های توربین بادی متأثر از تغییر سرعت باد)، کنترل زاویه گام به کمک یک کنترل کننده مقاوم صورت پذیرفته است. از یک منظر، بزرگترین ضعف مشترک عمده کارهای مرور شده، عدم تحقق روی-خط آنها از جهت همراهی با تغییرات نقطه کار و پارامترهای سیستم زاویه گام است. با توجه به قابلیت‌های اثبات شده روش‌های هوشمند<sup>۱</sup> (شامل: قدرت تطبیق و تعمیم بالا، سیستم-رها بودن<sup>۲</sup> و همچنین امکان اجرای روی-خط)، می‌توان در طراحی سیستم کنترل توربین بادی از آن‌ها برای رسیدن به جواب‌های مطلوبتر و همچنین تسهیل در روند طراحی استفاده نمود. در این تحقیق، کنترل توربین بادی مجهز به DFIG با استفاده از روش‌های هوشمند مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در محدوده بالاتر از سرعت باد نامی از دو روش هوشمند زیر برای طراحی کنترل کننده زاویه گام (از جهت حفظ توان نامی)، استفاده شده است:

**روش اول:** استفاده از کنترل کننده عصبی (مرکب از دو شبکه عصبی آدالاین متوالی): علت انتخاب شبکه عصبی آدالاین، حفظ سادگی و لذا سرعت بالای اجرا و بویژه امکان تنظیم روی-خط کنترل-کننده توسعه یافته است. هرچند طراحی اولیه این کنترل کننده بر مبنای تقلید رفتار یک کنترل کننده کلاسیک PI زاویه گام می‌باشد، منتهی با تجهیز آن به امکان آموزش روی-خط، توان ساختاری کنترل کننده هوشمند زاویه گام در همراهی با تغییرات نقطه کار و پارامترهای سیستم به نحو چشمگیری، در قیاس با کنترل کننده PI بهبود می‌یابد.

**روش دوم:** استفاده از کنترل هوشمند مبتنی بر مکانیسم یادگیری عاطفی مغز: این کنترل کننده هوشمند عملکرد خوبی از لحاظ سرعت پاسخ‌دهی، ریپل پاسخ و بالاخره خطای ماندگار ردیابی داشته و در ضمن از قوام قابل ملاحظه‌ای در قبال تغییرات سرعت باد و پارامترهای سیستم زاویه گام در حین کار برخوردار می‌باشد.

همچنین در محدوده کمتر از سرعت باد نامی، از جهت تأمین حداکثر بازده توان، عملیات کنترل توربین در قالب کنترل برداری و به کمک کنترل کننده‌های هوشمند عاطفی انجام گرفته است. ساختار تحقیق بدین شکل است: در فصل دوم، پس از ارائه مختصری از انرژی باد، انواع توربین‌های بادی از نظر ساختار و کارکرد تشریح شده‌اند. در فصل سوم، اهداف، استراتژی‌ها و چگونگی تحقق آن‌ها در حوزه کنترل توربین‌های بادی به تفصیل بیان شده‌اند. در فصل چهارم، ساختار، اصول عملکرد، مدل دینامیکی و جزئیات روش کنترل برداری برای DFIG ارائه گردیده است. در فصل پنجم، کنترل توربین بادی مجهز به DFIG با استفاده از دو روش هوشمند انجام و موفقیت آن‌ها با استفاده از نتایج شبیه‌سازی نشان داده شده است.

<sup>1</sup> Intelligent

<sup>2</sup> Model-free





## فصل ۲- برق بادی

### ۲-۱- مقدمه

در ۱۹۷۰ در پی بحران جهانی نفت، علاقه به انرژی بادی افزایش یافت و ظرفیت تولید انرژی بادی توربین‌ها به چند صد کیلووات افزایش پیدا کرد. از ۱۹۸۰ توربین‌های چند مگاواتی در سیستم قدرت به کار رفتند و جهت‌گیری تکنولوژی توربین‌های بادی به سمت کاهش هزینه‌های تولید برق سوق پیدا کرد، بطوریکه در پایان سال ۱۹۹۰ انرژی بادی بعنوان یک منبع انرژی با اهمیت بالا و مناسب در میان سایر منابع تأمین‌کننده انرژی ظاهر شد [۲۷].

از مزایای استفاده از انرژی باد می‌توان به موارد زیر اشاره نمود [۱]:

- ✓ پاک بودن: یک توربین ۷۵۰ کیلوواتی در طول یک سال با سرعت متوسط باد بین ۵ الی ۶ متر بر ثانیه می‌تواند از انتشار حدود ۱۱۷۹ تن دی‌اکسید کربن و ۶/۹ تن دی‌اکسید سولفور و ۴/۳ تن دی‌اکسید نیتروژن جلوگیری کند.
- ✓ اشتغالزایی: به ازای نصب و راه‌اندازی هر یک مگاوات توربین بادی در سال در حدود ۱۵ الی ۱۹ شغل مستقیم و غیر مستقیم ایجاد می‌شود.

✓ فراوانی

✓ در دسترس بودن

✓ پایان ناپذیری

✓ سازگاری با محیط زیست

✓ عدم نیاز به فضای زیاد

لازم به ذکر است که به دو طریق می‌توان از انرژی باد استفاده نمود، تزریق به شبکه سراسری (کاربرد توربین‌های بزرگ) و استفاده محلی و برق‌رسانی به نقاط دور افتاده (کاربرد توربین‌های کوچک ۱۰-۵۰ کیلووات)

### ۲-۲- برق بادی در ایران

پتانسیل بالای باد در کشور ایران وجود دارد. کشور ایران با توجه به گستردگی زیاد، وجود آب و هوای متنوع، کوه‌های مرتفع، دشت‌های پهناور و سواحل طولانی، مناطق بادخیز فراوانی دارد. مناطق بادخیزی مانند منجیل (گیلان)، دیزباد، بینالود (خراسان)، جرنندق (قزوین) و خواف از نمونه‌های شناخته شده این مناطق هستند. بر اساس مطالعات در حال انجام توسط شرکت‌های مشاور و لامایر میزان ظرفیت قابل نصب نیروگاه بادی در ایران بیش از ۱۰۰۰۰۰ مگاوات تخمین زده شده است، حتی در بعضی از مطالعات ظرفیت باد کشور بیش از ۴۰۰۰۰ مگاوات تخمین زده شده است.

## ۲-۳- انرژی باد

حرکت توده های هوا که بر اثر اختلاف دمای بین آنها اتفاق می افتد را باد می نامند. توربین های بادی در نزدیکی زمین که به لایه های مرزی معروف است انرژی را از باد می گیرند. انتقال انرژی از بادهای لایه های بالایی جو به لایه های پایینی که وابسته به حرکت چرخشی کره زمین می باشد و همچنین وضعیت منطقه ای، سبب می گردد که باد در لایه های نزدیک به زمین، دارای اغتشاش و متلاطم باشد. انرژی در باد از جرم هوایی که در حرکت است بدست می آید که انرژی جنبشی نامیده می شود. برای استفاده از انرژی باد باید آنرا به نوع دیگری، بعنوان مثال انرژی مکانیکی، تبدیل کرد این انرژی جنبشی با کاهش سرعت باد کاهش می یابد. از اینرو یکی از پارامترهای مهم در استحصال انرژی بادی سرعت باد می باشد. تغییرات سرعت باد به ارتفاع از سطح زمین بستگی دارد به طوری که در نزدیکی سطح زمین این تغییرات معادل با صفر و با افزایش ارتفاع از سطح زمین افزایش می یابد [۲۸].

## ۲-۴- مدل سرعت باد

سرعت باد را مجموع چهار مؤلفه زیر در نظر می گیرند [۲۹]:

(۱) متوسط سرعت باد ( $v_{av}$ )

(۲) سرعت شیب ( $v_r$ )

(۳) سرعت تند باد ( $v_g$ )

(۴) اغتشاش ( $v_t$ )

بنابراین می توان سرعت باد را به صورت زیر نوشت:

$$v = v_{av} + v_g + v_r + v_t \quad (1-2)$$

مؤلفه متوسط سرعت باد، بیانگر مقدار میانگین سرعت باد در فواصل زمانی مشخص است. مؤلفه سرعت شیب نیز در واقع معرف افزایش ثابت سرعت باد در حالت مانا<sup>۱</sup> است که به صورت تابع چند ضابطه ای زیر تعیین می شود:

$$v_r = \begin{cases} 0 & t < T_{sr} \\ A_r \frac{(t-T_{sr})}{(T_{er}-T_{sr})} & T_{sr} < t < T_{er} \\ A_r & t > T_{er} \end{cases} \quad (2-2)$$

که در آن،  $A_r$  دامنه سرعت شیب، و  $T_{sr}$  و  $T_{er}$  نیز به ترتیب زمان شروع و اتمام وزش باد شیب در نظر گرفته شده اند. در [۲۹]، مؤلفه سرعت تند باد به صورت زیر مدل شده است:

$$v_g = \begin{cases} 0 & t < T_{sg} \\ A_g \left\{ 1 - \cos \left[ 2\pi \frac{(t-T_{sg})}{(T_{eg}-T_{sg})} \right] \right\} & T_{sg} < t < T_{eg} \\ 0 & t > T_{eg} \end{cases} \quad (3-2)$$

<sup>1</sup> Steady State

که در آن،  $A_g$  دامنه تند باد، و  $T_{sg}$  و  $T_{eg}$  نیز به ترتیب زمان شروع و اتمام تند باد در نظر گرفته شده‌اند.

مؤلفه اغتشاش نیز که توصیف حالت تصادفی سرعت باد را بر عهده دارد به صورت زیر خواهد بود:

$$v_t = 2 \sum_{i=1}^N [S_v(\omega_i) \Delta \omega]^{1/2} \cos(\omega_i t + \phi_i) \quad (4-2)$$

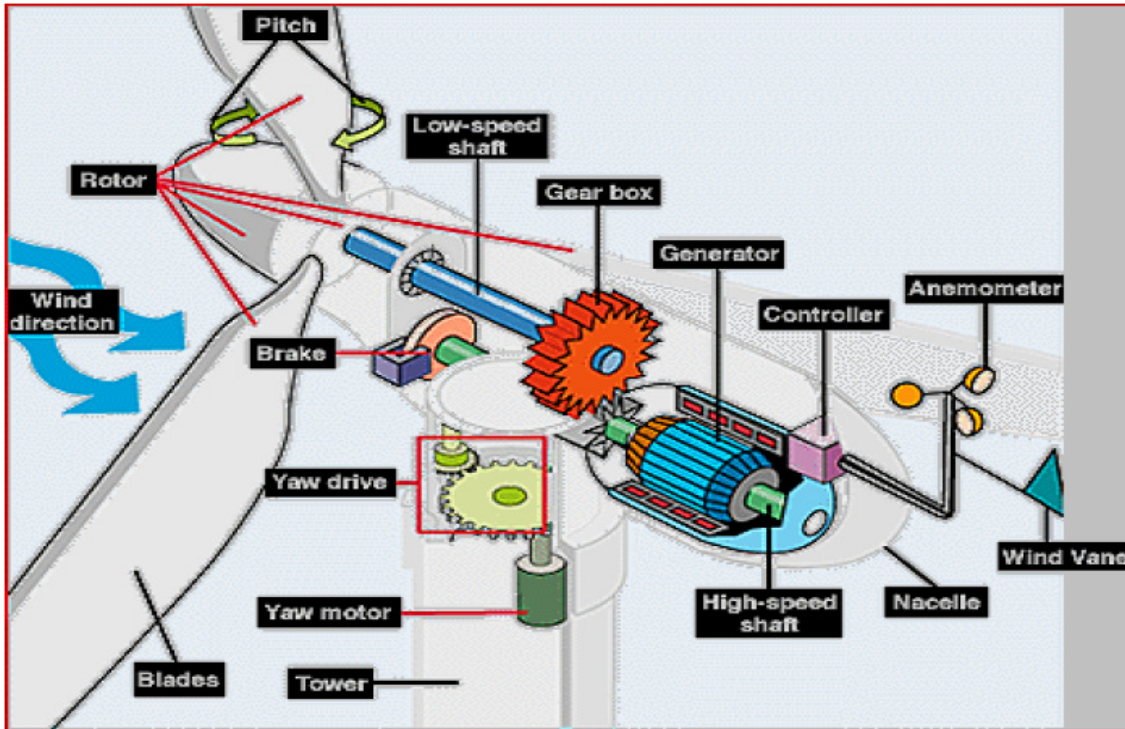
که در آن،  $\omega_i = (i - \frac{1}{2}) \Delta \omega$  و  $\phi_i$  نیز یک متغیر تصادفی با چگالی احتمال یکنواخت در محدوده صفر تا  $2\pi$  است. همچنین  $S_v(\omega_i)$  تابع چگالی طیف است که توسط ویکی‌تیس در [۳۰] به صورت زیر ارائه شده است:

$$S_v(\omega_i) = \frac{2K_N F^2 |\omega_i|}{\pi^2 [1 + (F\omega_i / \mu\pi)^2]^{4/3}} \quad (5-2)$$

که در آن  $F = 2000$ ،  $K_N = 0.004$ ، و  $\mu$  متوسط سرعت در ارتفاع بالا است. در [۳۱] نتیجه گرفته شده است که مقادیر پارامتر  $N = 50$  و  $\Delta \omega = 0.5 - 20$  مناسب برای شبیه‌سازی خواهند بود.

## ۲-۵- اجزای توربین بادی

در شکل ۱-۲ اجزای یک توربین بادی مشاهده می‌شود. در ادامه نقش هر کدام از اجزا در توربین بادی توضیح داده می‌شود.



شکل ۱-۲: اجزای توربین بادی

- بادسنج (*Anemometer*): این وسیله سرعت باد را اندازه گرفته و اطلاعات حاصل از آنرا به کنترل‌کننده‌ها انتقال می‌دهد.