

## تحلیل پایداری، کنترل و مدل سازی ریز شبکه متصل به توربین بادی با تبدیل کننده تقویت شده بهینه

امیرسپهیل هنربری<sup>\*</sup>،<sup>۲</sup> علیرضا درستی،<sup>۳</sup> پیمان مهرابی،<sup>۴</sup> محسن عزیزاده بیدگلی

### چکیده

توربین‌های بادی به عنوان یک انرژی تجدید پذیر به صورت مزارع بادی در نقاط مختلف که دارای اقلیم آب و هوایی بادخیز هستند، نصب و اجرا می‌شوند. اما در این مناطق جدا از این که ممکن است در نزدیکی دریاها، بیابان‌ها، جنگل‌ها و سایر مناطق زیست محیطی باشد، در نظر گرفتن بهبود شرایط اقلیمی و عدم آسیب رسانی ناشی از این توربین‌های بادی، مسئله‌ای مهم است. اتصال ریز شبکه‌ها به توربین‌های بادی می‌تواند منجر به بهبود تولید برق و ارسال آن به شبکه‌های توزیع باشد. لذا فرموله‌سازی و پیکربندی ریز شبکه متصل به توربین بادی، مستلزم بررسی دقیق پیکربندی سیستم تولید برق بادی با ریز شبکه به همراه تعیین انرژی باد با سرعت متغیر و تخمین خطا برای تحلیل و کنترل پایداری به کمک شناسایی خطاها می‌باشد. استفاده از سیستم‌های کنترلی منطق فازی و سپس شناسایی دقیق نواحی دارای خطا برای تحلیل پایداری با فیلتر کالمن توسعه یافته، مدنظر این تحقیق می‌باشد. نتایج شبیه سازی حاکی از بهبود تخمین خطا و تحلیل پایداری و سایر معیارهای ارزیابی است.

### تاریخ دریافت:

۱۳۹۸ / ۹ / ۶

### تاریخ پذیرش:

۱۳۹۹ / ۳ / ۲۶

### کلمات کلیدی:

توربین‌های بادی،  
ریز شبکه،  
پایداری،  
کنترل کننده بهینه

۱. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری، تهران، ایران  
S1honarbari@gmail.com (نویسنده مسئول)

۲. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران  
alireza.dorosti@srbiau.ac.ir  
peyman804m@gmail.com

۳. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران  
۴. استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری، تهران، ایران  
m.alizadeh.b@iausr.ac.ir

## ۱. مقدمه

### ۱-۱. تاریخچه انرژی بادی

بشر از زمان‌های بسیار دور به نیروی لایزال باد پی برده و سال‌ها بود که از این انرژی برای به حرکت درآوردن کشتی‌ها و آسیاب‌های بادی بهره می‌گرفت [۱]. طی سالیان دراز، انرژی باد به انرژی مکانیکی و در دوران اخیر به انرژی الکتریکی تبدیل و مورد استفاده واقع شده است. منابع تاریخی نشان می‌دهند که ساخت آسیاب‌ها در ایران، عراق، مصر و چین قدمت باستانی داشته و در این تمدن‌ها، از آسیاب‌های بادی برای خرد کردن دانه‌ها و پمپاژ آب استفاده می‌شده است. چنان که از شواهد تاریخی برمی‌آید، در قرن ۱۷ قبل از میلاد، حمورابی پادشاه بابل طرحی ارائه داده بود تا بتوان به کمک آن دشت حاصل‌خیز بین‌النهرین را توسط انرژی حاصل از باد آبیاری نمود. آسیاب‌هایی که در آن زمان ساخته می‌شدند از نوع ماشین‌های محور قائم و شبیه به آنهایی هستند که امروزه آثار آنها در نواحی خواف و تایباد ایران به چشم می‌خورد. ایرانیان اولین کسانی بودند که در حدود ۲۰۰ سال قبل از میلاد مسیح برای آرد کردن غلات از آسیاب‌های بادی با محور قائم استفاده کردند. سایر کاربردهای این انرژی در ایران قدیم عبارتند از کشیدن آب از چاه و خنک کردن منازل از کانال‌های مخصوص جهت هدایت باد. بعد از ایران، کشورهای عربی و اروپایی پی به قدرت باد در تبدیل انرژی بردند. با توجه به شواهد موجود، میتوان ادعا کرد که زادگاه ماشین‌های بادی از نوع محور قائم، حوزه شرقی مدیترانه و چین بوده است. در قرون وسطی، آسیاب‌های بادی در ایتالیا، فرانسه، اسپانیا و پرتغال متداول گردیده و کمی بعد در بریتانیا، هلند و آلمان نیز به کار گرفته شد. آسیاب‌های بادی که در اروپا ساخته می‌شدند، از نوع آسیاب‌های محور افقی چهار پره بودند که برای آرد کردن حبوبات و گندم به کار می‌رفتند. مردم هلند آسیاب‌های بادی را از سال ۱۳۵۰ میلادی به منظور خشک کردن زمین‌های پست ساحلی و همچنین گرفتن روغن از دانه‌ها و بریدن چوب و تهیه پودر رنگ برای رنگرزی به کار گرفتند. آن چه که هلند را در قرن هفدهم میلادی در زمره غنی‌ترین و صنعتی‌ترین کشورهای اروپا

قرار داد، صنعت کشتی سازی و ساخت آسیاب های بادی در آن کشور بود. توربین های بادی بطنی، که شامل پره های متعدد هستند، بعدها متداول شدند. در آغاز قرن بیستم، اولین توربین های بادی سریع و مدرن ساخته شدند. امروزه فعال ترین کشورها در این زمینه آلمان، اسپانیا، دانمارک، هند و آمریکا می باشند.

## ۱-۲. تولید برق از انرژی بادی در ایران و جهان

در سال ۲۰۱۲، کل ظرفیت نصب شده نیروگاه های بادی در دنیا برابر ۲۸۲،۵۸۷ مگاوات برآورد شده است. از این میان، مهمترین ۱۰ کشوری که از انرژی بادی برای تولید برق استفاده میکنند به ترتیب عبارتند از چین (۷۵،۳۲۴ مگاوات معادل ۲۶/۷ درصد)، آمریکا (۶۰،۰۰۷ مگاوات معادل ۲۲/۱ درصد)، آلمان (۳۱،۳۰۸ مگاوات معادل ۱۱/۱ درصد)، اسپانیا (۲۲،۷۹۶ مگاوات معادل ۸/۱ درصد)، هند (۱۸،۴۲۱ مگاوات معادل ۶/۵ درصد)، انگلستان (۸،۴۴۵ مگاوات معادل ۳ درصد)، ایتالیا (۸،۱۴۴ مگاوات معادل ۲/۹ درصد)، فرانسه (۷،۵۶۴ مگاوات معادل ۲/۷ درصد)، کانادا (۶،۲۰۰ مگاوات معادل ۲/۲ درصد) و پرتغال (۴،۵۲۵ مگاوات معادل ۱/۶ درصد). این ۱۰ کشور در مجموع دارای ۲۴۲،۷۳۴ مگاوات معادل ۸۵/۹ درصد از ظرفیت بادی نصب شده موجود در دنیا هستند. سایر کشورها نیز در مجموع دارای ۳۹،۸۵۳ مگاوات معادل ۱۴/۱ درصد از ظرفیت بادی نصب شده موجود در دنیا هستند. در ایران، تا کنون نیروگاه های بادی توسعه چندانی نیافته اند. تا پایان سال ۱۳۹۰، کل ظرفیت نصب شده نیروگاه بادی در ایران برابر ۹۸/۲۱ مگاوات بوده است. این ظرفیت معادل ۰/۳۵ درصد ظرفیت بادی نصب شده جهان در سال ۲۰۱۲ محسوب میشود. در حال حاضر، نیروگاه های بادی منجیل و بینالود مهمترین نیروگاه های بادی ایران به شمار می آیند که تا پایان سال ۱۳۹۰ به ترتیب ۶۵/۲ مگاوات (معادل ۶۶/۴٪ ظرفیت بادی نصب شده کل کشور و ۲۸/۳۸ مگاوات (معادل ۲۸/۹٪ از ظرفیت نصب شده بادی کشور) را تشکیل می دهند. سایر نیروگاه های بادی، که به طور پراکنده در استانهای آذربایجان شرقی، سیستان و بلوچستان، فارس، خوزستان و اصفهان قرار دارند، در مجموع ۴/۶۳ مگاوات (معادل ۴/۷٪ ظرفیت بادی نصب شده کل کشور) را تولید می کنند.

## ۲. مرور ادبیات

امروزه توربین‌های بادی<sup>۱</sup> به عنوان یکی از بخش‌های مهم تولید برق در دنیا وارد صنعت شده‌اند. با این حال، تقاضای بالایی برای قابلیت اطمینان بیشتر به سیستم کنترلی توربین‌های بادی برای تضمین تولید برق و کاهش عملیات و هزینه‌های نگهداری وجود دارد [۱۲، ۶، ۴]. زیر سیستم‌های کنترل پیچ هیدرولیک<sup>۲</sup> در سیستم‌های توربین بادی، نقش مهمی را ایفا می‌کنند. دلیل این نقش مهم، به دلیل فعال ساز پیچ است که برای محدود کردن ضبط توان تحت شرایط باد شدید (بین ۱۲.۵ میلی ثانیه تا ۲۵ میلی ثانیه)، کاهش بار عملیاتی و ترمز آیرودینامیکی، دارای اولویت بالایی است [۹، ۵]. در سرعت بادهای پایین تر (بین ۳ میلی ثانیه و ۱۲.۵ میلی ثانیه)، سیستم فعال کننده پیچ، شامل کار نمی‌شود و راندمان تبدیل توربین توسط کنترل سرعت روتور تنظیم می‌شود. حفظ شرایط اقلیمی، یکی از مهمترین مسائل در توربین‌های بادی است که نیاز به شناخت اولیه این توربین‌ها و انرژی بادی را لازمه کار می‌نماید.

کنترل پیچ توربین بادی در پژوهش‌های مختلفی مورد توجه بوده است و استراتژی‌های متنوعی تحت شماتیک کنترلی، توسعه داده شده اند که با استفاده از کنترل کننده PID [۷، ۱۶، ۱۹]، کنترل کننده LQG [۳، ۶]، کنترل مقاوم [۲۰]، برنامه ریزی بهره<sup>۳</sup> [۱۵]، اختلال در تنظیم کنترل [۲۱]، کنترل منطق فازی [۲۲] و کنترل LPV [۱۷] ارائه شده است. با این حال در سیستم‌های پیچ عملیاتی ممکن است خطاهای فعال کننده وجود داشته باشد. خطاهای فعال کننده پیچ ممکن است ناشی از افت فشار در سیستم تأمین هیدرولیک یا وجود هوا در روغن و یا کارایی پایین پیچ رخ بدهد که این کار، کنترل پیچ را برای نگهداری رتور در سرعت مشخص و در نتیجه موج نوسانات سرعت و قدرت ژنراتور را کاهش می‌دهد [۱۴]. در این تحقیق به فشار پایین خطای فعال کننده پیچ پرداخته می‌شود که سریع تر و شدیدتر از خطای وجود هوا می‌باشد. در حضور خطاهای فعال کننده فشار پایین، کنترل موجود پایه نمی‌تواند عملیات پیچ مورد نظر را حفظ نماید که این عمل منجر به ایجاد کنترل تحمل خطا<sup>۴</sup> می‌شود [۱۸].

- 
1. Wind Turbines
  2. Hydraulic Pitch Control Subsystem
  3. Gain Scheduling
  4. Fault Tolerance

در سیستم‌های توربین بادی، تحلیل پایداری به عنوان یک مؤلفه مهم شناخته می‌شود تا بتواند حداکثر مقدار انرژی موجود در باد را تضمین نماید. با توجه به نیاز به بررسی صحیح و دقیق توربین‌های بادی در زمان وقوع خطا و ایجاد یک سیستم کنترلی برای تحمل خطا، مدلی که شامل قسمت‌های مکانیکی و الکتریکی باشد، به شدت احساس می‌شود. همچنین سیستم کنترلی که بتواند خطاها را جداسازی نماید تا بتوان خطاهای در زمان مشخص رخ داده را شناسایی نمود و دارای عملکرد صحیح تضمین شده با حداقل هزینه نگهداری و خسارات ناشی باشد، الزامی است [۱۳].

در زمینه خطایابی در توربین‌های بادی، مطالعات فراوانی در حوزه‌های گوناگون و شرایط مختلف آب و هوایی، انجام گرفته است. در [۱۱] کنترل پیچ توربین بادی برای تحمل خطا با استفاده از کنترل کننده حالت لغزشی<sup>۱</sup>، تخمین زده شده است. برای این کار، از یک کنترل کننده پایه یعنی PI برای کارایی پیچ استفاده کرده است. همین طور از یک جبران کننده خطا برای از بین بردن اثرات هرگونه خطای ناشی از توربین بادی، انجام گرفته است. سپس از کنترل حالت لغزشی برای تخمین خطا و ایجاد سیستم تحمل خطا در توربین بادی استفاده و نتایج آن ارزیابی شده است. اثر بخشی استراتژی طراحی شده با استفاده از سیستم توربین بادی پنج مارک ۴/۸ MW اندازه گیری و اعمال شده است. زاویه پیچ و توان تولید به عنوان دو مؤلفه اصلی برای شناسایی خطا در توربین بادی در این تحقیق بوده است.

در حایری<sup>۲</sup> و دیگران (۲۰۱۹) تخمین زمان محدود خطاهای فعال ساز و بار آیرودینامیک واقعی توربین بادی انجام شده است. در واقع بار آیرودینامیک به صورت ناشناخته می‌باشد و ممکن است از آن خطاهایی ناشی شود. استفاده از کنترل حالت لغزشی برای تخمین حالت زمان محدود تولید و تبدیل انرژی توربین بادی و شناسایی خطا و بارهای ناشناخته آیرودینامیکی به کار گرفته شده است. افت فشار هیدرولیکی فعال ساز پیچ، به عنوان یک خطای اضافه مدل سازی شده است و در ادامه از کنترل حالت لغزشی آبشاری<sup>۳</sup> برای بهره‌وری از هر کدام از زیر سیستم پیچ برای فراهم کردن حالت زمان محدود و بازسازی خطا استفاده شده است. دقت و زمان همگرایی به عنوان مؤلفه‌های مهم اندازه گیری می‌باشند.

---

1. Sliding Mode

2. Hairi

3. Cascaded Sliding Mode

در یک رویکرد جدید دیگر که در (آیخوله<sup>۱</sup> و دیگران، ۲۰۱۸) ارائه شده است، تخمین تحمل خطا برای انرژی توربین بادی با استفاده از سیستم‌های ترکیبی انجام گرفته است. این تحقیق با مطالعه در پنج مارک سیستم توربین بادی پویای ۵ MW برای نظارت بر شرایط نگهداری و تشخیص خطا با هدف توسعه عملیات پایداری سیستم‌های کنترل ارائه شده است. یک تکنیک تصادفی ترکیبی<sup>۲</sup> برای رفع کمبود عدم اطمینان که عمدتاً ناشی از اختلالات است، اعمال شده است. نتایج شبیه سازی حاکی از کارایی بالا و پایداری در زمان تحمل خطا در توربین بادی را نشان می‌دهد.

در ادامه، به بررسی مطالب زیر می‌پردازیم:

- در بخش‌های مرور ادبیات، درباره تاریخچه انرژی بادی مطالبی ذکر می‌شود.
- در بخش روش تحقیق، به مدل سازی و روابط ریاضی بین داده‌ها می‌پردازیم.
- در بخش توصیف داده‌ها، شبیه سازی در محیط نرم‌افزار شبیه‌ساز متلب انجام داده می‌شود.
- در بخش نتیجه‌گیری، پیشنهادی برای بهره‌برداری مطلوب از انرژی باد داده می‌شود.

### ۳. روش تحقیق

جهت مدل سازی رویکرد پیشنهادی که بتوان یک ریز شبکه را به توربین‌های بادی اتصال داد، نیاز است تا مسائلی از جمله پیکربندی سیستم تولید برق بادی با ریز شبکه به همراه تعیین انرژی باد با سرعت متغیر و تخمین خطا برای تحلیل و کنترل پایداری به کمک شناسایی خطاها انجام شود و سپس یک مدل ریاضیاتی را ایجاد نمود.

#### ۳-۱. پیکربندی سیستم تولید برق بادی

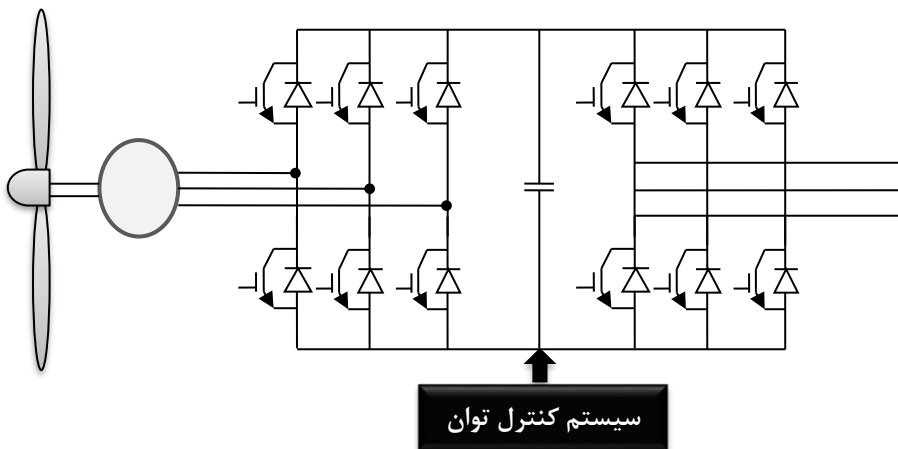
سیستم تولید توان بادی سرعت متغیر در چند دهه گذشته بسیار متداول بوده است. در مقایسه با ماشین بادی سرعت ثابت، ماشین بادی سرعت متغیر می‌تواند در محدوده وسیع تری از سرعت باد کار کند. منبع باد هر لحظه تغییر می‌کند، بنابراین برای دنبال نمودن تغییر و کسب حداکثر انرژی از باد به یک سیستم کنترل توان تعقیب کننده نقطه حداکثر توان نیاز است.

1. Aikhuele

2. Genetic Algorithm (GA)

### ۲-۳. سیستم انرژی باد با سرعت متغیر

ماشین بادی با سرعت متغیر این روزها برای اندازه‌های کیلووات و مگاوات بسیار متداول است. در مقایسه با ماشین‌های بادی سرعت ثابت نصب شده، توربین‌های بادی سرعت متغیر ۱۰ تا ۱۵ درصد انرژی بیشتری تولید می‌کنند، تنش‌های کمتری بر روی قطعات مکانیکی به خصوص پره‌ها و شفت‌ها دارند که باعث نوسان کمتر انرژی و تأثیر کمتر بر روی شبکه می‌شود. شکل (۱) سیستم انرژی باد با سرعت متغیر را نشان می‌دهد.



شکل ۱. سیستم انرژی باد با سرعت متغیر

شکل (۱) ساختار یک سیستم انرژی بادی با سرعت متغیر را نشان می‌دهد. یک سیستم انرژی بادی نمونه عمدتاً شامل پره‌ها، ژنراتور، سیستم کنترل توان، و یک مبدل PWM اتکایی است. پره‌ها انرژی باد را به انرژی مکانیکی چرخشی برای حرکت ژنراتور تبدیل می‌کنند. الکتريسيته تولید شده دارای فرکانس و ولتاژ متغیری است که نمی‌تواند به طور مستقیم وارد شبکه شود. برای تبدیل الکتريسيته به برقی با ولتاژ و فرکانس ثابت با زاویه فاز سنکرون<sup>۱</sup> که اتصال به شبکه را ممکن سازد به یک مبدل AC/DC و DC/AC نیاز می‌باشد. مبدل تحت کنترل سیستم تعقیب توان است. این سیستم کنترل

1. synchronous phase angle

دارای دو عملکرد اصلی تعقیب حداکثر توان و حد حداکثر توان است. مدار AC/DC مبدل سمت ژنراتور نامیده می‌شود که کنترل توان را انجام داده و ولتاژ لینک DC را حفظ می‌کند. مدار DC/AC مبدل سمت شبکه نامیده می‌شود که یک اینورتر ولتاژ PWM معمولی است.

امروزه گیربکس<sup>۱</sup> یک موضوع اختیاری است، برای توربین‌های بادی با محرک مستقیم، برای چگالی بالاتر توان و بازدهی انتقال گیربکس می‌تواند حذف شود. در سیستم انرژی بادی از هر دو نوع ژنراتور سنکرون و آسنکرون استفاده می‌شود. در حال حاضر، ماشین سنکرون با مغناطیس دائمی<sup>۲</sup> به طور گسترده در ماشین بادی کوچک و متوسط، به خصوص در ماشین بادی با محرک مستقیم، استفاده شده است. روند کنونی به صورت استفاده از PMSG چند قطبی در توربین‌های بادی با ابعاد بزرگ همانند ۱/۵ مگاوات است که در سرعت نسبتاً کم باد کار می‌کنند. ژنراتور القایی با تغذیه مضاعف<sup>۳</sup> نیز به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است، زیرا همیشه توان باید در محدوده بزرگی از سرعت باد تأمین شود.

### ۳-۳ تخمین خطا برای تحلیل پایداری ریزشبکه متصل به توربین بادی در توربین‌های بادی

در سال‌های اخیر، طرح‌های آشکارسازی و شناسایی خطا در فرایندهای صنعتی به علت رشد تقاضا در جهت افزایش کیفیت تولیدات، امنیت و قابلیت اطمینان به همراه پایداری، به طور قابل توجهی اهمیت پیدا کرده است. گزارش‌هایی از برخی زبان‌های اقتصادی و زیست محیطی به وجود آمده در صنایع به علت عدم وجود سیستم‌های آشکارسازی و ایزولاسیون خطا ارائه شده است. آشکارسازی و تشخیص خطا از مهمترین مسائل در علوم مختلف هم چون مهندسی شیمی، مهندسی هسته‌ای، مهندسی هوافضا، مهندسی برق و کنترل است. در زمینه روش‌های تخمین، شناسایی، تشخیص و پیش‌بینی خطا، روش‌های کمی و کیفی فراوانی ارائه شده است. بعضی روش‌های کمی آشکارسازی خطا با در نظر گرفتن یک تحقق خطی از یک سیستم غیرخطی گسترش یافته‌اند. همچنین روش‌های توان باز نیز وجود دارند که قبلاً ارائه شده‌اند. همچنین روش‌های آزمون ژئومتریک، مبتنی بر مشاهده گر، مبتنی بر حالات لغزشی،

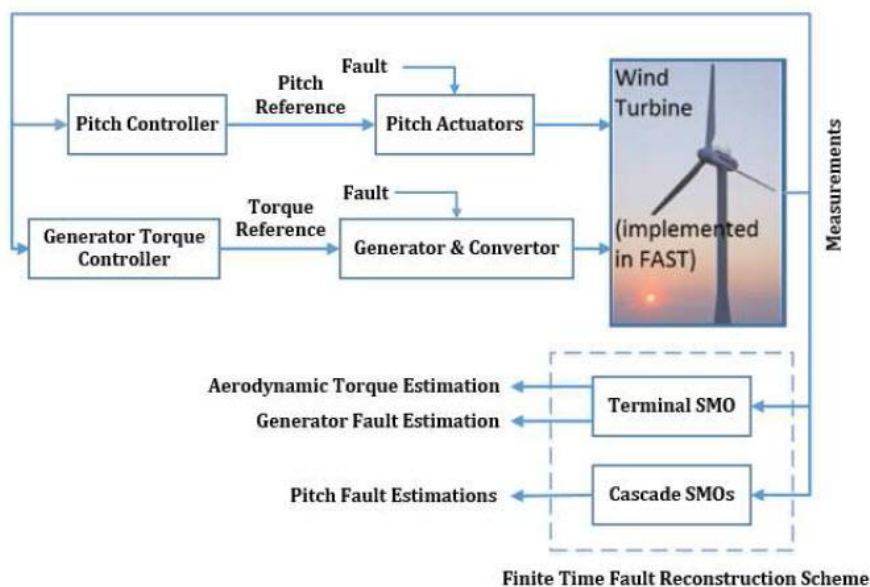
---

1. Gearbox

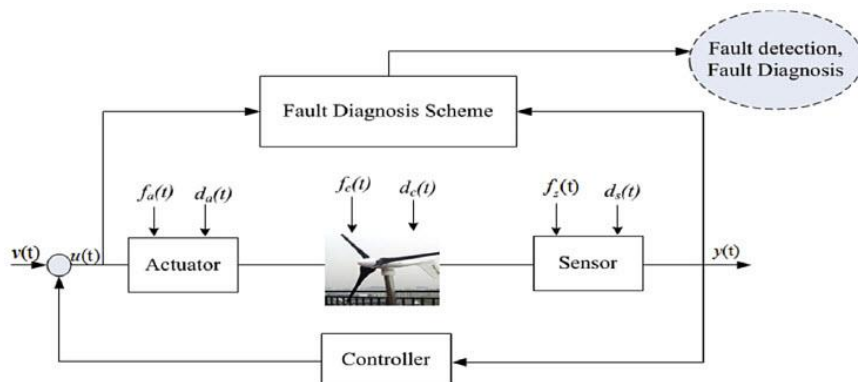
2. Permanent Magnet Synchronous Machine

3. Doubly Fed Inductance Generator

روش‌های مقاوم و تخمین وفقی نیز در مقالات پیشین و اصلی این تحقیق ارائه شده‌اند. در (حاجری<sup>۱</sup> و دیگران، ۲۰۱۹) نمایی از بلاک دیاگرام برای شماتیک سیستم تخمین و تشخیص خطا در توربین‌های بادی نشان داده شده است که به صورت شکل (۲) است. همین طور سیستم کنترلی برای تخمین و تشخیص خطا در توربین‌های بادی نیز در (آیخوله<sup>۲</sup> و دیگران، ۲۰۱۸) نشان داده شده است که به صورت شکل (۳) است.



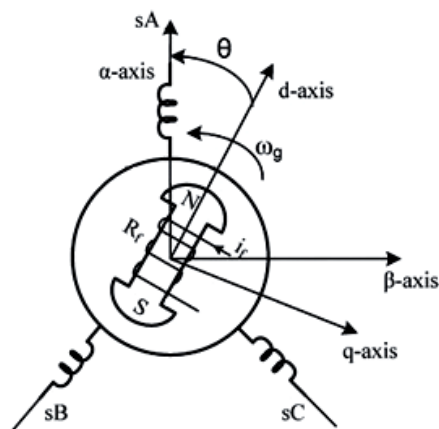
شکل ۲. بلاک دیاگرام شماتیک تخمین و تشخیص خطا در توربین‌های بادی



شکل ۳. سیستم کنترلی برای تخمین و تشخیص خطا در توربین‌های بادی

### ۳-۴. مدل سازی رویکرد پیشنهادی

در مدل سازی سیستم تخمین خطا در توربین‌های بادی، مسائل مختلفی درگیر هستند. کنترل برداری رتور برای ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم کوچک، ساده و مؤثرند. در این روش، با سرعت سنکرونی که محور  $q$  محور  $d$  را هدایت می‌کند، سیستم مختصات  $d-q$  می‌چرخد. هنگامی که محور  $d$  با جهت شار مغناطیسی دائم رتور تنظیم می‌شود، معادله ولتاژ استاتور قابل استخراج است. سیستم مختصاتی PMSG را می‌توان در شکل (۴) مشاهده نمود.



شکل ۴. سیستم مختصات PMSG

در سیستم مختصات ایستا abc، بردار ولتاژ استاتور و شار پیوندی<sup>۱</sup> برابر با دو رابطه (۱) و (۲) است.

$$u_s = R_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt} + \frac{d\psi_f}{dt} \quad (۱)$$

$$\psi_s = L_s i_s + \psi_f \quad (۲)$$

که در آنها  $u_s$  بردار ولتاژ استاتور ژنراتور،  $R_s$  مقاومت فازی استاتور ژنراتور،  $i_s$  بردار جریان استاتور ژنراتور،  $\psi_s$  شار پیوندی استاتور،  $\psi_f$  شار پیوندی مغناطیس دائم رتور و  $L_s$  اندوکتانس<sup>۲</sup> سنکرون استاتور ژنراتور هستند. در کنترل برداری رتور، موتور سنکرون مغناطیس دائم ac، ولتاژ استاتور، جریان و شار پیوندی به مغناطیس دائم بر پایه تحریک موج در جهت محور تجزیه می‌شوند (محور d) و جهت چرخش رتور ۹۰ درجه پیش می‌رود (محور q). سیستم مختصات d-q با سرعت سنکرون  $\omega_r$  مانند رتور می‌چرخد. پس معادله ولتاژ استاتور برابر است با روابط (۳) و (۴).

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\psi_{sd}}{dt} - \omega_r \psi_{sq} \quad (۳)$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\psi_{sq}}{dt} + \omega_r \psi_{sd} \quad (۴)$$

که در آنها  $\psi_{sd}$  مؤلفه محور d شار پیوندی استاتور،  $\psi_{sq}$  مؤلفه محور q شار پیوندی استاتور،  $u_{sd}$  مؤلفه محور d ولتاژ استاتور ژنراتور،  $u_{sq}$  مؤلفه محور q ولتاژ استاتور ژنراتور،  $i_{sq}$  مؤلفه محور d جریان استاتور ژنراتور،  $i_{sd}$  مؤلفه محور q جریان استاتور ژنراتور است. شار پیوندی سیستم مختصات d-q برابر است با روابط (۵) و (۶).

$$\psi_{sd} = L_d i_{sd} + \psi_f \quad (۵)$$

$$\psi_{sq} = L_q i_{sq} \quad (۶)$$

برای ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم با قابلیت استقرار سطحی<sup>۱</sup>، فاصله هوایی<sup>۲</sup> را می‌توان حتی برابر هم تقریب زد. پس رابطه (۷) ایجاد می‌شود.

$$L_d = L_q = L_s \quad (۷)$$

با ترکیب معادله‌های (۱) الی (۱)، رابطه (۸) و (۹) به دست می‌آید.

$$u_{sd} = R_s i_{sd} + L_s \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_r L_s i_{sq} \quad (۸)$$

$$u_{sq} = R_s i_{sq} + L_s \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_r L_s i_{sd} + \omega_s \psi_f \quad (۹)$$

معادله (۸) و (۹) نشان می‌دهد که جریان استاتور محور  $q$  و محور  $d$  نه تنها متأثر از ولتاژ  $u_{sd}$  و  $u_{sq}$  است بلکه با ولتاژهای  $\omega_r L_s i_{sq}$  و  $\omega_s \psi_f$  ارتباط دارد. این ولتاژها، تابعی از سرعت چرخش،  $\omega_r$  هستند و وقتی که ژنراتور در سرعت بالا کار می‌کند، به طور قابل ملاحظه‌ای افزایش خواهند یافت. تحت این شرایط، مؤلفه ولتاژها بر روی خروجی گشتاور جریان اثر خواهد گذاشت به طوری که گشتاور خروجی غیردقیق خواهد بود. در نتیجه، برای  $u_{sd}$  و  $u_{sq}$ ، تجزیه نیاز خواهد بود. این مسئله، حالت فیلتر کالمن را مشخص می‌نماید. در ادامه ساختار کنترل فازی به صورت تبدیل کننده به سمت ژنراتور توربین بادی برای تخمین و ردیابی خطا، ایجاد می‌گردد. برای یک توربین بادی، توان باد را می‌توان از طریق رابطه (۱۰) بیان کرد.

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho A V_w^3 \quad (۱۰)$$

که در آن،  $\rho$  چگالی هوا،  $A$  مساحت تیغه توربین بادی و  $V_w$  سرعت باد است. توان مکانیکی توربین بادی استخراج شده از توان باد از رابطه (۱۱) حاصل می‌شود.

$$P_m = P_{wind} C_p(\theta, \lambda) = \frac{1}{2} \rho A C_p(\theta, \lambda) V_w^3 \quad (۱۱)$$

که در آن،  $C_p(\theta, \lambda)$  ضریب عملکرد خوانده می شود و تابعی از زاویه قرارگیری تیغه  $\theta$  و نسبت سرعت نوک  $\lambda$  است. در معادله (۱۱)، نسبت سرعت نوک به صورت رابطه (۱۲) تعریف می شود.

$$\lambda = \frac{r\omega}{V_w} \quad (12)$$

که در آن،  $r$  طول تیغه توربین بادی و  $\omega$  سرعت چرخش توربین بادی است. نمونه ای از  $C_p(\theta, \lambda)$  یک توربین بادی به صورت رابطه (۱۳) مشخص می شود که در آن رابطه (۱۴) وجود دارد.

$$C_p = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\theta - 5 \right) e^{\frac{-12.5}{\lambda_i}} \quad (13)$$

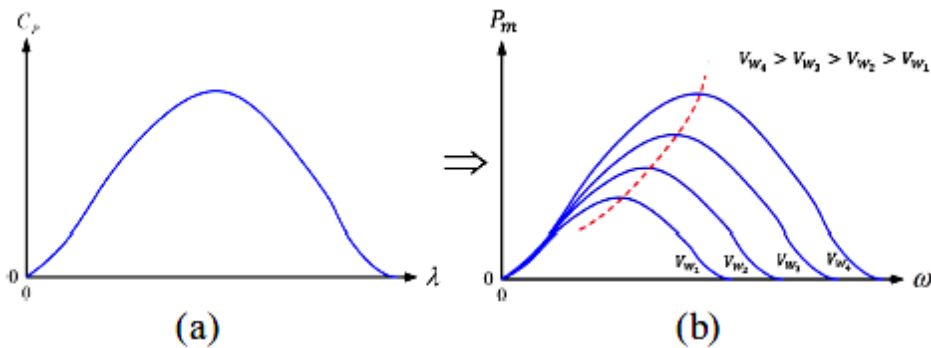
$$\lambda_i = 1 / \left( \frac{1}{\lambda + 0.08\theta} - \frac{0.035}{\theta^3 + 1} \right) \quad (14)$$

با جایگزین کردن معادله (۱۴) در (۱۳)، رابطه (۱۵) ایجاد می شود.

$$C_p = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda + 0.08\theta} - \frac{4.06}{\theta^3 + 1} - 0.4\theta - 5 \right) e^{-\left( \frac{12.5}{\lambda + 0.08\theta} \frac{0.4375}{\theta^3 + 1} \right)} \quad (15)$$

به طور کلی، برای یک ریز شبکه متصل به توربین بادی کوچک با توان خروجی کمتر از ۱۰ کیلووات، زاویه قرارگیری  $\theta$  آن ثابت است. لذا، ترسیم منحنی  $\lambda - C_p$  در شکل (۵) (a) نشان داده شده است که بیانگر منحنی های  $P_m - \omega$  در سرعت باد مختلف همانند شکل (۶) (b) مطابق با روابط (۱۱) و (۱۲) است. همان گونه که از شکل (۵) (b) می توان مشاهده کرد، در نقاط حداکثر توان در سرعت مختلف باد، رابطه (۱۶) وجود دارد.

$$\frac{dp_m}{d\omega} = 0 \quad (16)$$



شکل ۵. (a) منحنی  $C_p - \lambda$ ، (b) منحنی‌های  $P_m - \omega$  برای سرعت باد مختلف

هدف این تحقیق توسعه یک سیستم کنترل و تخمین خطا برای توربین بادی است. لذا محاسبه گشتاور برای تخمین خطا نیز مسئله مهمی است. گشتاور توربین بادی و سرعت چرخش به توان خروجی همانند معادله (۱۷) مرتبط هستند که لذاای مانند (۱۸) از (۱۷) ناشی می‌شود.

$$T = \frac{P_m}{\omega} \quad (17)$$

$$\frac{dP_m}{d\omega} = \frac{d(\omega \times T)}{d\omega} = T + \omega \frac{dT}{d\omega} \quad (18)$$

با جایگزین کردن معادله (۱۱) و معادله (۱۵) در معادله (۱۷)، گشتاور توربین بادی  $T$  را می‌توان به صورت رابطه (۱۹) بیان کرد و مشتق گشتاور با توجه به سرعت چرخش به صورت رابطه (۲۰) است.

$$T = (0.11)\rho A V_w^3 \left( \frac{116}{\frac{R}{V_w} \omega^2 + 0.08\theta\omega} - \frac{4.06}{\omega(\theta^3 + 1)} - \frac{0.4\theta + 5}{\omega} \right) e^{-\left( \frac{12.5}{\frac{R\omega}{V_w} + 0.08\theta} - \frac{0.4375}{\theta^3 + 1} \right)} \quad (19)$$

$$\frac{dT}{d\omega} = (0.11)\rho AV_w^3 e^{-\left(\frac{12.5}{\frac{R\omega}{V_w} + 0.08\theta} \frac{0.4375}{\theta^3 + 1}\right)} \times \left\{ \frac{-116 \times \left(\frac{2R\omega}{V_w} + 0.08\theta\right)}{\left(\frac{R}{V_w}\omega^2 + 0.08\theta\omega\right)^2} + \frac{4.06}{\omega^2(\theta^3 + 1)} + \frac{0.4\theta + 5}{\omega^2} \right\} \quad (20)$$

$$+ \left\{ \left( \frac{116}{\frac{R}{V_w}\omega^2 + 0.08\theta\omega} - \frac{4.06}{\omega(\theta^3 + 1)} - \frac{0.4\theta + 5}{\theta} \right) \frac{12.5}{\left(\frac{R\omega}{V_w} + 0.08\theta\right)^2} \left(\frac{R}{V_w}\right) \right\}$$

چون که گشتاور توربین بادی و جریان خروجی ژنراتور دارای رابطه‌ای همانند معادله (۲۱) هستند.

$$T = K_t i \quad (21)$$

که در آن  $K_t$  مقدار ثابت گشتاور متناظر است. با جایگزین کردن معادلات (۲۰) و (۲۱) در (۱۸)، رابطه (۲۲) وجود دارد.

$$K_t i - (0.11)\rho AV_w^3 e^{-\left(\frac{12.5}{\frac{R\omega}{V_w} + 0.08\theta} \frac{0.4375}{\theta^3 + 1}\right)} \left\{ \frac{116 \times \left(\frac{2R\omega}{V_w} + 0.08\theta\right)}{\omega \left(\frac{R\omega}{V_w} + 0.08\theta\right)^2} - \frac{4.06}{\omega(\theta^3 + 1)} - \frac{0.4\theta + 5}{\omega} \right\} \quad (22)$$

$$- \left\{ \left( \frac{116}{\frac{R\omega}{V_w}} - \frac{4.06}{\theta^3 + 1} - 0.4\theta - 5 \right) \frac{12.5}{\left(\frac{R\omega}{V_w} + 0.08\theta\right)^2} \left(\frac{R}{V_w}\right) \right\} = 0$$

سپس، با تقسیم  $K_t i$  بر هر دو طرف معادله (۲۲)، در تخمین خطا و تحلیل پایداری، رابطه (۲۳) وجود دارد.

$$1 - \frac{(0.11)}{K_t i} \rho AV_w^3 e^{-\left(\frac{12.5}{\frac{R\omega}{V_w} + 0.08\theta} \frac{0.4375}{\theta^3 + 1}\right)} \left\{ \frac{116 \times \left(\frac{2R\omega}{V_w} + 0.08\theta\right)}{\omega \left(\frac{R\omega}{V_w} + 0.08\theta\right)^2} - \frac{4.06}{\omega(\theta^3 + 1)} - \frac{0.4\theta + 5}{\omega} \right\} \quad (23)$$

$$- \left\{ \left( \frac{116}{\frac{R\omega}{V_w}} - \frac{4.06}{\theta^3 + 1} - 0.4\theta - 5 \right) \frac{12.5}{\left(\frac{R\omega}{V_w} + 0.08\theta\right)^2} \left(\frac{R}{V_w}\right) \right\} = 0$$

با مشاهده معادله (۲۳)، پارامترهای  $V_w$  (سرعت باد)،  $\rho$  (چگالی هوا) و  $K_t$  (ثابت گشتاور متناظر) آیت‌های نامشخص هستند. فرض می‌شود  $K_t = K_{t0} + \Delta K_t$ ،  $\rho = \rho_0 + \Delta \rho$ ،  $V_w = V_{w0} + \Delta V_w$  هستند. جایی که  $K_{t0}$ ،  $\rho_0$  و  $V_{w0}$  بیانگر عبارات نامی هستند و  $\Delta K_t$ ،  $\Delta \rho$  و  $\Delta V_w$  بیانگر عبارات مختل برای  $K_t$ ،  $\rho$  و  $V_w$  هستند. بنابراین، معادله (۲۳) را می‌توان به صورت رابطه (۲۴) بازنویسی کرد.

$$1 - (x_0 + \Delta x) = 0 \quad (24)$$

که در آن دو رابطه (۲۵) و (۲۶) به صورت ذیل وجود دارد.

$$x_0 = \frac{(0.11)}{K_{t0} i} \rho_0 A V_{w0}^3 e^{-\left(\frac{12.5}{V_{w0} + 0.08\theta} - \frac{0.4375}{\theta^3 + 1}\right)} \left\{ \left[ \frac{116 \times \left(\frac{2R\omega}{V_{w0}} + 0.08\theta\right)}{\omega \left(\frac{R\omega}{V_{w0}} + 0.08\theta\right)^2} - \frac{4.06}{\omega(\theta^3 + 1)} - \frac{0.4\theta + 5}{\omega} \right] \right. \\ \left. - \left[ \left( \frac{116}{\frac{R\omega}{V_{w0}} - \frac{4.06}{\theta^3 + 1} - 0.4\theta - 5 \right) \frac{12.5}{\left(\frac{R\omega}{V_{w0}} + 0.08\theta\right)^2} \left(\frac{R}{V_{w0}}\right) \right] \right\} \quad (25)$$

$$\Delta x = \frac{(0.11)}{K_{ti}} \rho A V_w^3 e^{-\left(\frac{12.5}{V_w + 0.08\theta} - \frac{0.4375}{\theta^3 + 1}\right)} \left\{ \left[ \frac{116 \times \left(\frac{2R\omega}{V_w} + 0.08\theta\right)}{\omega \left(\frac{R\omega}{V_w} + 0.08\theta\right)^2} - \frac{4.06}{\omega(\theta^3 + 1)} - \frac{0.4\theta + 5}{\omega} \right] \right. \\ \left. - \left[ \left( \frac{116}{\frac{R\omega}{V_w} - \frac{4.06}{\theta^3 + 1} - 0.4\theta - 5 \right) \frac{12.5}{\left(\frac{R\omega}{V_w} + 0.08\theta\right)^2} \left(\frac{R}{V_w}\right) \right] \right\} - x_0 \quad (26)$$

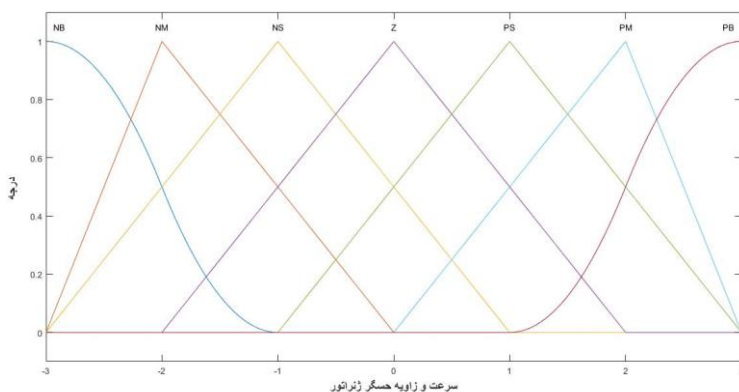
از تحلیل بالا،  $x_0$  توسط مقدار نامی پارامترها در سیستم توربین بادی تعیین می‌شود و  $\Delta x$  تابع پارامترهای غیرقطعی  $V_w$ ،  $\rho$  و  $K_t$  است. این پژوهش یک کنترل کننده را برای مسئله تخمین خطا به منظور جبران عدم قطعیت  $\Delta x$  با استفاده از فیلتر کالمن به شرح زیر پیشنهاد می‌دهد. یک خطای ردیابی را همانند معادله (۲۷) می‌بایست تعریف نمود.

$$e = 1 - (x_0 + \Delta \hat{x}) \quad (27)$$

که در آن،  $\Delta\hat{x}$  خروجی فیلتر کالمن و تخمینی از عدم قطعیت  $\Delta x$  است. ورودی‌های فیلتر کالمن، جریان خروجی ژنراتور  $i$  و سرعت چرخش  $\omega$  هستند و وزن بندی‌ها در فیلتر کالمن به واسطه خطای ردیابی  $e$  تنظیم می‌شوند. در عین حال، دوره کاری مبدل تقویت dc/dc به وسیله‌ی یک کنترل کننده PI تنظیم می‌شود، که پارامترهای آن بایستی توسط یک الگوریتم فازی شده تعیین شوند. هدف کنترل کننده پیشنهادی این است که  $1 - (x_0 - \Delta\hat{x})$  را به صفر نزدیک کند که متناظر است با دستیابی به کنترل کننده فازی برای سیستم توربین بادی باشد.

#### ۴. توصیف داده‌ها

شبیه سازی برای داده‌ها در محیط MATLAB انجام شده است که همزمان در خط فرمان و سیمولینک می‌باشد. در ابتدا نیاز است تا پارامترهای اصلی توربین بادی مقداری شود. زمان کل شبیه سازی ۲۰ ثانیه فرض شده است که توربین از زمان شروع به کار، عملیات کنترل با منطق فازی و سپس تعیین خطا با فیلتر کالمن توسعه یافته را انجام بدهد. در ابتدا نیاز است تا ساختار کنترل کننده فازی ارائه گردد. برای این منظور، ورودی سیستم فازی، حسگر سرعت و زاویه‌ای ژنراتور، حسگر و محرک فراز در توربین بادی به عنوان مؤلفه‌های مهم برای تشخیص خطا، استفاده می‌شوند خواهد بود که هر کدام دارای یک سری توابع عضویت و بازه اعداد فازی همراه با متغیرهای زبانی خواهند بود. لذا شکل (۶) برای ورودی حسگر سرعت و زاویه‌ای ژنراتور، شکل (۷) برای ورودی حسگر و محرک توربین بادی در کنترل کننده فازی تعریف می‌شوند.



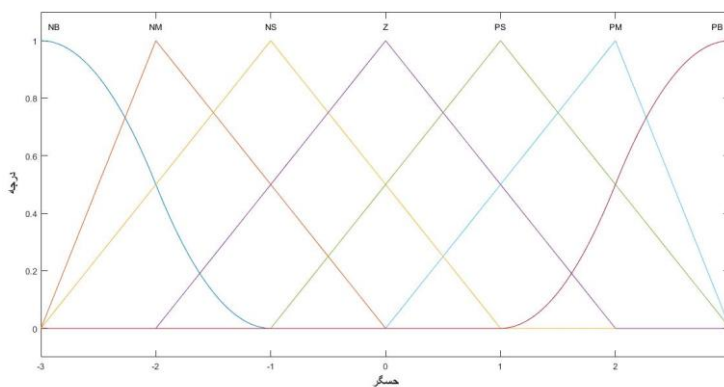
شکل ۶. ورودی حسگر سرعت و زاویه‌ی ژنراتور توربین بادی در کنترل کننده فازی

ورودی حسگر سرعت و زاویه‌ای ژنراتور توربین بادی در کنترل کننده فازی است، جدول (۱)، توابع عضویت و لغات زبانی و مجموعه اعداد فازی هر متغیر را نشان می‌دهد.

جدول ۱. نمایش توابع عضویت و لغات زبانی و مجموعه اعداد فازی برای شکل (۷)

| نوع تابع عضویت | لغات زبانی | اعداد فازی             |
|----------------|------------|------------------------|
| زیگموئید (zmf) | NB         | $[-3*k1, -1*k1]$       |
| مثلثی (trimf)  | NM         | $[-3*k1, -2*k1, 0]$    |
| مثلثی (trimf)  | NS         | $[-3*k1, -1*k1, 1*k1]$ |
| مثلثی (trimf)  | Z          | $[-2*k1, 0, 2*k1]$     |
| مثلثی (trimf)  | PS         | $[-1*k1, 1*k1, 3*k1]$  |
| مثلثی (trimf)  | PM         | $[0, 2*k1, 3*k1]$      |
| زیگموئید (zmf) | PB         | $[1*k1, 3*k1]$         |

مأخذ: یافته‌های پژوهش



شکل ۷. ورودی حسگر و محرک فراز توربین بادی در کنترل کننده فازی

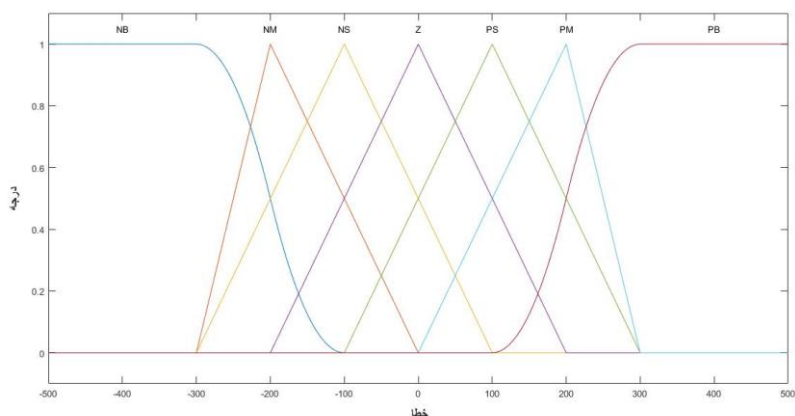
بر اساس شکل (۶) که ورودی حسگر و محرک فراز توربین بادی در کنترل کننده فازی است، جدول (۲)، توابع عضویت و لغات زبانی و مجموعه اعداد فازی هر متغیر را نشان می‌دهد.

جدول ۲. نمایش توابع عضویت و لغات زبانی و مجموعه اعداد فازی برای شکل (۷)

| نوع تابع عضویت | لغات زبانی | اعداد فازی             |
|----------------|------------|------------------------|
| زیگموئید (zmf) | NB         | $[-3*k1, -1*k1]$       |
| مثلثی (trimf)  | NM         | $[-3*k1, -2*k1, 0]$    |
| مثلثی (trimf)  | NS         | $[-3*k1, -1*k1, 1*k1]$ |
| مثلثی (trimf)  | Z          | $[-2*k1, 0, 2*k1]$     |
| مثلثی (trimf)  | PS         | $[-1*k1, 1*k1, 3*k1]$  |
| مثلثی (trimf)  | PM         | $[0, 2*k1, 3*k1]$      |
| زیگموئید (zmf) | PB         | $[1*k1, 3*k1]$         |

مأخذ: یافته‌های پژوهش

همین طور خروجی فازی، قرار است یک بخش خطا را در توربین بادی مشخص نماید که در ادامه با فیلتر کالمن، دقیقاً مشخص خواهد شد که خروجی فازی، به صورت شکل (۸) است.



شکل ۸. خروجی فازی

بر اساس شکل (۸) که خروجی خطای توربین بادی در کنترل کننده فازی است، جدول (۳)، توابع عضویت و لغات زبانی و مجموعه اعداد فازی هر متغیر را نشان می‌دهد.

جدول ۳. نمایش توابع عضویت و لغات زبانی و مجموعه اعداد فازی برای شکل (۹)

| اعداد فازی             | لغات زبانی | نوع تابع عضویت |
|------------------------|------------|----------------|
| $[-3*k3, -1*k3]$       | NB         | زیگموئید (zmf) |
| $[-3*k3, -2*k3, 0]$    | NM         | مثلثی (trimf)  |
| $[-3*k3, -1*k3, 1*k3]$ | NS         | مثلثی (trimf)  |
| $[-2*k3, 0, 2*k3]$     | Z          | مثلثی (trimf)  |
| $[-1*k3, 1*k3, 3*k3]$  | PS         | مثلثی (trimf)  |
| $[0, 2*k3, 3*k3]$      | PM         | مثلثی (trimf)  |
| $[1*k3, 3*k3]$         | PB         | زیگموئید (zmf) |

مأخذ: یافته‌های پژوهش

قوانینی که بین این ورودی‌ها برای رسیدن به خروجی در سیستم کنترل فازی انجام می‌شود،

به صورت شکل (۹) است که مجموعاً ۴۹ قانون می‌باشد.

17. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is NS) and (hesgar is NS) then (error is NS) (1)
18. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is NS) and (hesgar is Z) then (error is NS) (1)
19. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is NS) and (hesgar is PS) then (error is Z) (1)
20. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is NS) and (hesgar is PM) then (error is PS) (1)
21. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is NS) and (hesgar is PB) then (error is PS) (1)
22. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is Z) and (hesgar is NB) then (error is NM) (1)
23. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is Z) and (hesgar is NM) then (error is NS) (1)
24. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is Z) and (hesgar is NS) then (error is NS) (1)
25. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is Z) and (hesgar is Z) then (error is Z) (1)
26. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is Z) and (hesgar is PS) then (error is PS) (1)
27. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is Z) and (hesgar is PM) then (error is PS) (1)
28. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is Z) and (hesgar is PB) then (error is PM) (1)
29. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is PS) and (hesgar is NB) then (error is NS) (1)
30. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is PS) and (hesgar is NM) then (error is NS) (1)
31. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is PS) and (hesgar is NS) then (error is Z) (1)
32. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is PS) and (hesgar is Z) then (error is PS) (1)
1. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is NB) and (hesgar is NB) then (error is NB) (1)
2. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is NB) and (hesgar is NM) then (error is NB) (1)
3. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is NB) and (hesgar is NS) then (error is NM) (1)
4. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is NB) and (hesgar is Z) then (error is NM) (1)
5. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is NB) and (hesgar is PS) then (error is NS) (1)
6. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is NB) and (hesgar is PM) then (error is NS) (1)
7. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is NB) and (hesgar is PB) then (error is Z) (1)
8. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is NM) and (hesgar is NB) then (error is NB) (1)
9. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is NM) and (hesgar is NM) then (error is NM) (1)
10. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is NM) and (hesgar is NS) then (error is NM) (1)
11. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is NM) and (hesgar is Z) then (error is NS) (1)
12. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is NM) and (hesgar is PS) then (error is NS) (1)
13. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is NM) and (hesgar is PM) then (error is Z) (1)
14. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is NM) and (hesgar is PB) then (error is PS) (1)
15. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is NS) and (hesgar is NB) then (error is NM) (1)
16. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is NS) and (hesgar is NM) then (error is NM) (1)

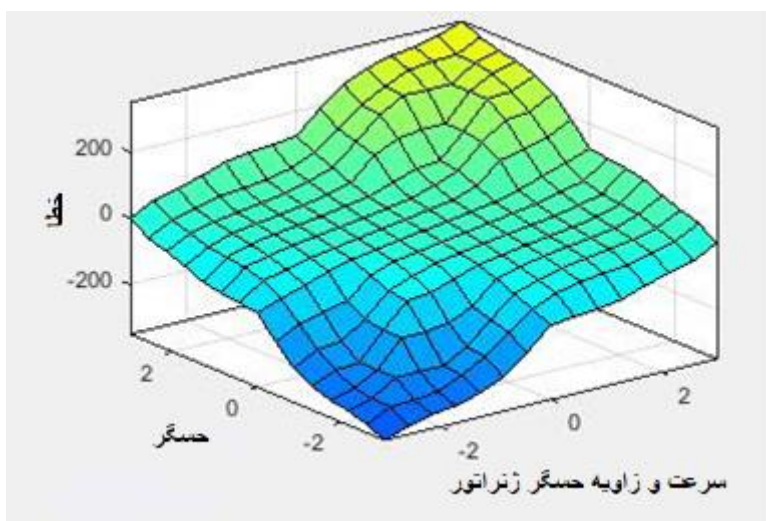
```

33. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is PS) and (hesgar is PS) then (error is PS) (1)
34. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is PS) and (hesgar is PM) then (error is PM) (1)
35. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is PS) and (hesgar is PB) then (error is PM) (1)
36. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is PM) and (hesgar is NB) then (error is NS) (1)
37. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is PM) and (hesgar is NM) then (error is Z) (1)
38. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is PM) and (hesgar is NS) then (error is PS) (1)
39. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is PM) and (hesgar is Z) then (error is PS) (1)
40. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is PM) and (hesgar is PS) then (error is PM) (1)
41. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is PM) and (hesgar is PM) then (error is PM) (1)
42. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is PM) and (hesgar is PB) then (error is PB) (1)
43. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is PB) and (hesgar is NB) then (error is Z) (1)
44. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is PB) and (hesgar is NM) then (error is PS) (1)
45. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is PB) and (hesgar is NS) then (error is PS) (1)
46. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is PB) and (hesgar is Z) then (error is PM) (1)
47. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is PB) and (hesgar is PS) then (error is PM) (1)
48. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is PB) and (hesgar is PM) then (error is PB) (1)
49. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is PB) and (hesgar is PB) then (error is PB) (1)

```

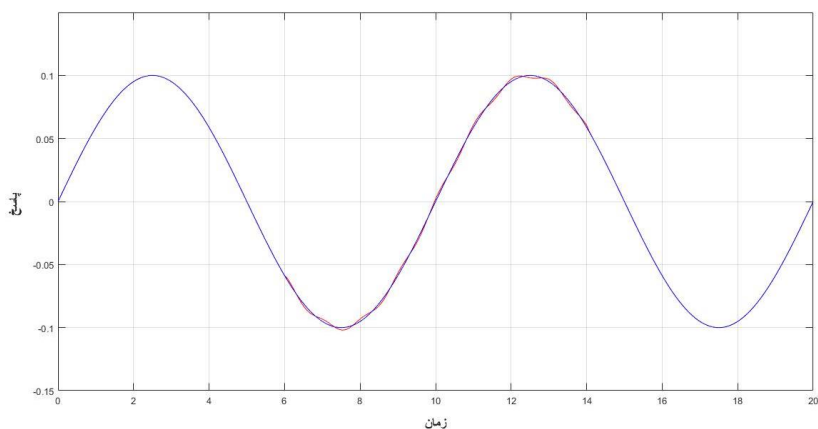
شکل ۹. نمایش قوانین سیستم کنترل فازی

همین طور سطح فازی برای دو ورودی شامل ورودی اول حسگر سرعت و زاویه‌ای ژنراتور و ورودی دوم حسگر و محرک فراز توربین بادی، به صورت گرافیکی برای رسیدن به خطا در خروجی به صورت شکل (۱۰) است.

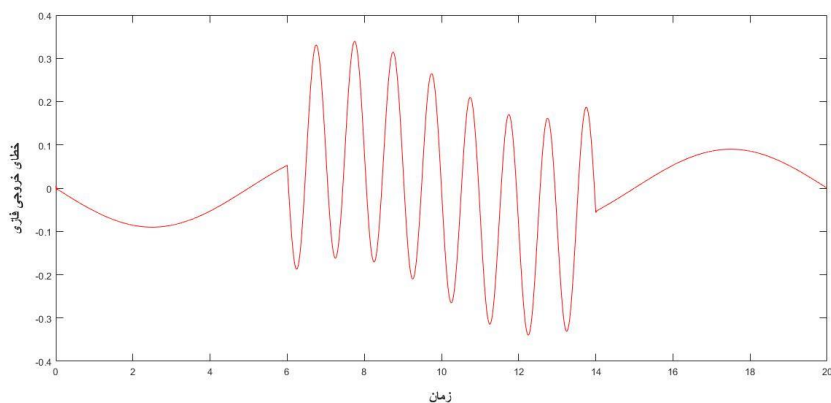


شکل ۱۰. نمایش گرافیکی سطح فازی

پاسخ سیستم برای نمایش پاسخ به صورت شکل (۱۱) و نمایش خطای خروجی فازی به صورت شکل (۱۲) می باشد که در ادامه این کنترل کننده در یک محیط سیمولینک با سیستم خطایابی کالمن توسعه یافته، ترکیب می شود.

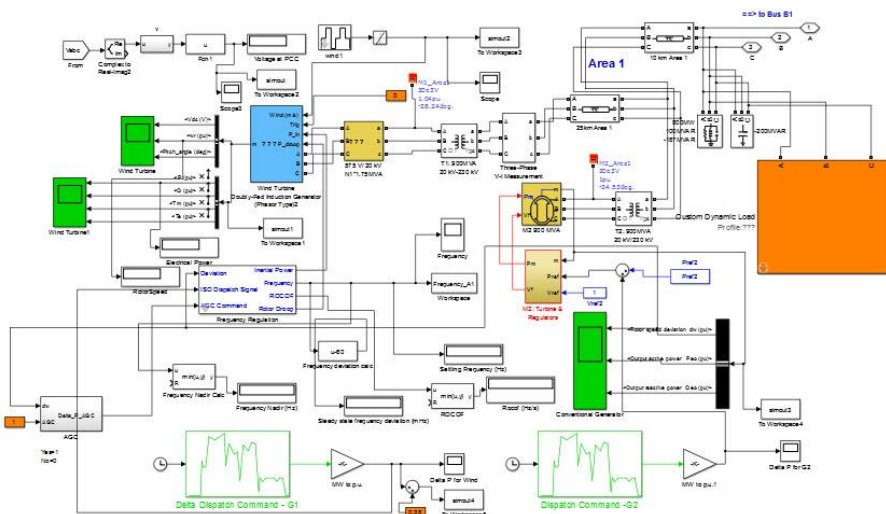
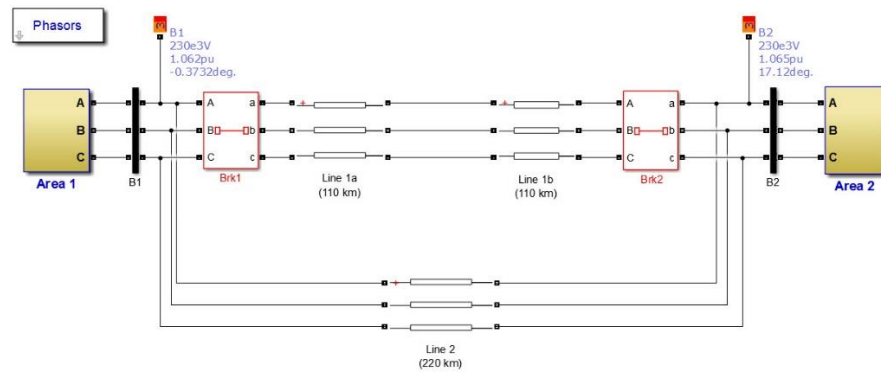


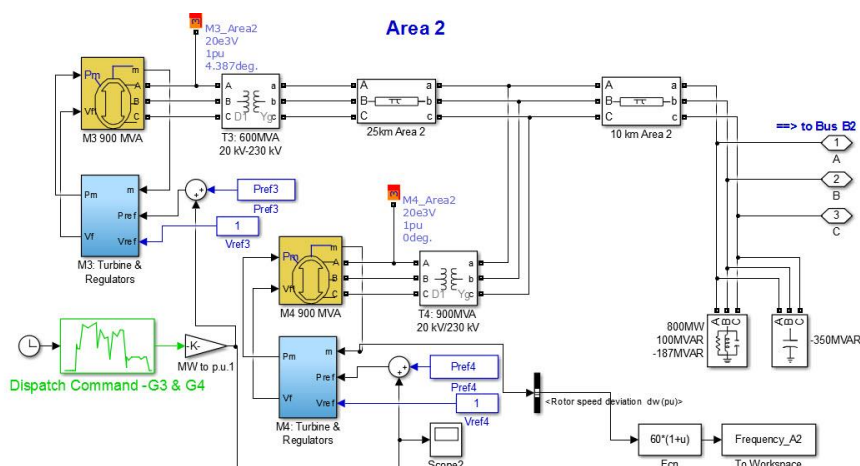
شکل ۱۱. نمایش پاسخ



شکل ۱۲. نمایش خطای خروجی فازی

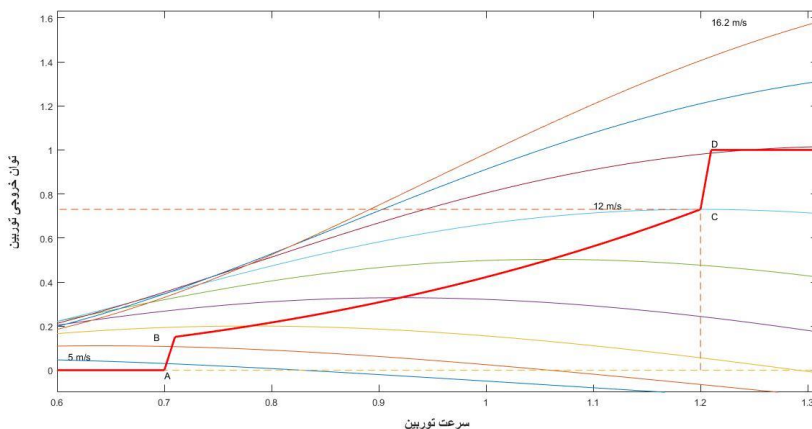
نمای کلی سیمولینک طراحی شده برای سیستم ریز شبکه متصل به توربین بادی به صورت شکل (۱۳) است که تمامی اجزا و کنترل کننده فازی در آن مشاهده می شود.





شکل ۱۳. نمای کلی سیمولینک طراحی شده برای سیستم ریزشکه متصل به توربین بادی

خروجی سیمولینک بعد از اجرا طبق شکل (۱۴) نشان می‌دهد که ویژگی‌های توان توربین برای کاهش خطا و سرعت توربین، تا چه اندازه بهینه سازی داشته است.



شکل ۱۴. نمایش کاهش خطا بر حسب انرژی و سرعت در توربین بادی بعد از اعمال رویکرد پیشنهادی

در انتها، حداکثر خطای موجود برابر  $2/0.49$  است که میانگین خطاها برابر  $0.54$  و خطایی که در سیستم بعد از اعمال رویکرد پیشنهادی باقی مانده است، برابر  $0.708$  است که نشان می‌دهد از تفریق

حداکثر خطای موجود بر خطای باقی مانده،  $1/341$  واحد خطا، کسر شده است که نشان از بهبود رویکرد پیشنهادی در تشخیص و سپس کاهش خطا در توربین بادی را نمایش می‌دهد.

## ۵. نتیجه گیری و پیشنهادات

آینده انرژی باد به معنای کاهش خطرات ناشی از به کارگیری سوخت های فسیلی، کاهش نیاز به واردات انرژی، هزینه سوخت و همچنین کاهش خطرات ناشی از تصاعد گازها می‌باشد. مسلماً رشد توربین‌های بادی در استفاده از آن، چالش‌های جدیدی را نیز در مناطق مختلف به وجود می‌آورد که می‌تواند ناشی از اختلالات داخلی و خارجی باشد. در این تحقیق به مدل سازی یک ریز شبکه متصل به توربین بادی با حداقل خطای موجود به صورت کنترل بهینه و تحلیل پایداری آن پرداخته شد. رویکرد پیشنهادی بدین صورت است که به استفاده از یک کنترل کننده مبتنی بر منطق فازی و سپس شناسایی دقیق نواحی خطا با فیلتر کالمن توسعه یافته با هدف تحلیل پایداری پرداخته خواهد شد. در واقع عملیات شناسایی خطا با فیلتر کالمن توسعه یافته و تحمل خطا به همراه تضمین حداکثر مقدار انرژی در زمان جداسازی خطاها و عملکرد صحیح تضمین شده با حداقل هزینه نگهداری و خسارات ناشی برای تحلیل پایداری، با استفاده از منطق فازی انجام می‌شود. شبیه سازی در محیط MATLAB نشان می‌دهد که رویکرد پیشنهادی دارای نتایج بسیار مناسبی نسبت به روش‌های مشابه پیشین است.

## منابع

[۱] فارسی، نظری (۱۳۹۶). "تعیین ارتفاع بهینه برای نصب یک توربین بادی بر روی ساختمانی در شهر یزد". نشریه انرژی ایران، دوره ۲۰، شماره ۴، صص ۱۱۲-۱۰۱.

- [2] Aikhuele B., Daniel E., Odofin and Sarah. (2018) "Robust Fault Estimation for Wind Turbine Energy via Hybrid Systems" *Renewable Energy*, No. 120, pp.289-299.
- [3] Bianchi, Fernando D., Ricardo J. Mantz and Carlos F. Christiansen (2005). "Gain Scheduling Control of Variable-speed Wind Energy Conversion Systems Using Quasi-LPV models". *Control engineering practice*, 13(2), pp. 247-255.
- [4] Bidgoli M. Alizadeh Weijia Yang and Ali Ahmadian (2020) "DFIM Versus Synchronous Machine for Variable Speed Pumped Storage Hydropower Plants: A Comparative Evaluation of Technical Performance". *Renewable Energy*.
- [5] Bidgoli M., Alizadeh S.M.T. Bathaee and A. Shabani (2014). "Design a Nonlinear Auxiliary Input for DFIG-based Application using Lyapunov Theory", *The 5th Annual International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC 2014)*. IEEE.

- [6] Cheng Ming and Ying Zhu. (2014). "The State of the art of Wind Energy Conversion Systems and Technologies: A Review", *Energy Conversion and Management*, No. 88, pp. 332-347.
- [7] Gao, Richie and Zhiwei Gao (2016). "Pitch Control for Wind Turbine Systems using Optimization, Estimation and Compensation". *Renewable Energy*, No.91, pp. 501-515.
- [8] Geng, Hua and Geng Yang (2010). "Output Power Control for Variable-speed Variable-pitch Wind Generation Systems". *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 25(2), pp. 494-503.
- [9] Golshani A., Bidgoli M.A. and S.M.T. Bathaee (2013). "Design of Optimized Sliding mode Control to Omprove the Dynamic Behavior of PMSG Wind Turbine with NPC back-to-back Converter", *International Review of Electrical Engineering*, No. 8, pp. 1170-1180.
- [10] Hairi, Mousavi M. and Rahnavard (2019) "Finite Time Estimation of Actuator Faults, States, and Aerodynamic Load of a Realistic wind Turbine". *Renewable Energy*, No. 130, pp. 256-267.
- [11] Jianglin, Lan, Patton, Ron, and Xiaoyuan (2016). "Fault-tolerant Wind Turbine Pitch Control using Adaptive Sliding mode Estimation". *Renewable Energy*, No.116, pp. 219-231.
- [12] Kaldellis, John K. and Dimitris Zafirakis (2011). "The Wind Energy Revolution: A Short Review of a Long History". *Renewable energy*, 36(7), pp.1887-1901.
- [13] Liu, Jing, Htet Lin, and Jun Zhang (2019). "Review on the Technical Perspectives and Commercial Viability of Vertical axis Wind Turbines". *Ocean Engineering*, No. 182, pp. 608-626.
- [14] Lan, Jianglin, Ron J. Patton and Xiaoyuan Zhu (2018). "Fault-tolerant Wind Turbine Pitch Control using Adaptive Sliding mode Estimation", *Renewable Energy*, No. 116, pp. 219-231.
- [15] Mohamed Amal Z., Mona N. Eskander and Fadia A. Ghali (2001). "Fuzzy Logic Control based Maximum Power Tracking of a Wind Energy System". *Renewable energy*, 23(2), pp. 235-245.
- [16] Novak, Peter et al. (1995). "Modeling and Control of Variable-speed Wind-Turbine Drive-system Dynamics". *IEEE Control Systems Magazine*, 15(4), pp. 28-38.
- [17] Odgaard, Peter Fogh, Jakob Stoustrup, and Michel Kinnaert (2013). "Fault-Tolerant Control of Wind Turbines: A Benchmark model". *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 21(4), pp. 1168-1182.
- [18] Odofoin, Sarah, Edward Bentley and Daniel Aikhuele (2018). "Robust Fault Estimation for Wind Turbine Energy via Hybrid Systems". *Renewable Energy*, No. 120, pp. 289-299.
- [19] Shabani A., Alizadeh Bidgoli M. and A. Deihimi (2014). "Comparison of DDMSG and DFIG concepts for wind turbines". *The 5th Annual International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC 2014)*. IEEE.

- [20] Stol, Karl A. and Mark J. Balas (2003). "Periodic Disturbance Accommodating Control for Blade Load Mitigation in Wind Turbines". J. Solar Energy Engineering, Vol. 125, No. 4, pp. 379-385.
- [21] Sloth, Christoffer, Thomas Esbensen and Jakob Stoustrup (2011). "Robust and Fault-tolerant Linear Parameter-varying Control of Wind Turbines". Mechatronics, 21(4), pp. 645-659.
- [22] Shi, Fengming and Ron Patton (2015). "An Active Fault Tolerant Control Approach to an Offshore Wind Turbine Model". Renewable Energy, No.75, pp.788-798.