نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۳، شماره ۱، بهار ۱۳۹۹، صفحه ۱۳۹ – ۱۱۳

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

[۱]امیرسهیل هنربری*، [۲] علیرضا درستی، [۳] پیمان مهرابی، [۴] محسن علیزاده بیدگلی

تاریخ دریافت:
۱۳۹۸ / ۹ / ۶

تاریخ پذیرش:
۱۳۹۹ / ۳ / ۲۶

کلمات کلیدی:
توربین‌های بادی،
ریز شبکه،
پایداری،
کنترل کننده بهینه

چکیده

توربین‌های بادی به عنوان یک انرژی تجدید پذیر به‌صورت 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 ریزشبکه متصل به توربین بادی، مستلزم بررسی دقیق پیکربندی سیستم تولید برق بادی با ریزشبکه 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.

۱. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری، تهران، ایران (نویسنده مسئول) S1honarbari@gmail.com
۲. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران alireza.dorosti@srbiau.ac.ir
۳. کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران peyman804m@gmail.com
۴. استادیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه آزاد اسلامی واحد یادگار امام خمینی (ره) شهرری، تهران، ایران m.alizadeh.b@iausr.ac.ir

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

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 به‌حرکت 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

قـرار داد، صنعت کشتی‌سازی و ساخت آسیاب‌های بادی در آن کشور بود. توربین‌های بادی بطنی، که شامل پـره‌هـای متعـدد هستند، بعدها متداول شدند. در آغاز قرن بیستم، اولین توربین‌های بادی سریع و مدرن ساخته شدند. امروزه فعـال‌تـرین کشورها در این زمینه آلمان، اسپانیا، دانمارک، هند و آمریکا می‌باشند.

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

در سال ۲۰۱۲، کل ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های بادی در دنیا برابر ۲۸۲,۵۸۷مگـاوات بـرآورد شـده اسـت. از ایـن میان، مهمترین ۱۰کشوری که از انرژی بادی برای تولید برق استفاده میکننـد بـه ترتیـب عبارتنـد از چـین (۷۵,۳۲۴ مگاوات معادل ۲۶/۷درصد)، آمریکـا (۶۰,۰۰۷ مگـاوات معـادل ۲۲/۱ درصـد)، آلمـان (۳۱,۳۰۸ مگـاوات معـادل ۱۱/۱ درصد)، اسپانیا (۲۲,۷۹۶ مگاوات معادل ۸/۱درصـد) ، هنـد ۱۸,۴۲۱مگـاوات معـادل ۶/۵درصـد)، انگلسـتان (۸,۴۴۵ مگاوات معادل۳درصد)، ایتالیا(۸,۱۴۴ مگاوات معادل۲/۹درصد)، فرانسه (۷,۵۶۴ مگاوات معـادل۲/۷درصـد)، کانـادا ۶،۲۰۰ مگاوات معادل ۲/۲درصـد) و پرتقـال (۴,۵۲۵ مگـاوات معـادل ۱/۶درصـد). ایـن ۱۰کشـور در مجمـوع دارای ۲۴۲،۷۳۴ مگاوات معادل ۸۵/۹ درصد از ظرفیت بادی نصب شده موجود در دنیا هستند. سـایر کشـورها نیـز در مجمـوع دارای ۳۹,۸۵۳ مگاوات معادل ۱۴/۱ درصد از ظرفیت بادی نصب شده موجود در دنیا هستند .در ایران، تا کنون نیروگاههای بادی توسعه چندانی نیافته‌اند. تا پایان سال ۱۳۹۰، کل ظرفیـت نصـب شـده نیروگـاه بادی در ایران برابر ۹۸/۲۱ مگاوات بوده است. این ظرفیت معادل ۰/۰۳۵ درصد ظرفیت بادی نصب شده جهـان در سـال ۲۰۱۲ محسوب میشود. در حال حاضر، نیروگاه‌های بادی منجیل و بینالود مهمترین نیروگاه‌های بـادی ایـران بـه شـمار می‌آیند که تا پایان سال ۱۳۹۰به ترتیب ۶۵/۲ مگاوات (معادل ٪ ۶۶/۴ ظرفیت بـادی نصـب شـده کـل کشـور و ۲۸/۳۸ مگاوات (معادل ٪ ۲۸/۹ از ظرفیت نصب شده بادی کشور) را تشکیل می‌دهند. سایر نیروگاههای بادی، که به طور پراکنـده در استانهای آذربایجان شرقی، سیستان و بلوچستان، فارس، خوزستان و اصفهان قرار دارنـد، در مجمـوع ۴/۶۳ مگـاوات (معادل ٪۴/۷ ظرفیت بادی نصب شده کل کشور) را تولید می‌کنند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

۲. مرور ادبیات

امروزه توربین‌های بادی[1] 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[2] 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[3] [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[4] می‌شود [۱۸].

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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

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[1]، 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 بنچ 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[2] و دیگران (۲۰۱۹) تخمین زمان محدود خطاهای فعال‌ساز و بار آیرودینامیک واقعی توربین بادی انجام شده است. در واقع بار آیرودینامیک به‌صورت 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[3] 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

در یک رویکرد جدید دیگر که در (آیخوله[1] 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 بنچ 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 [2] برای رفع کمبود عدم اطمینان که عمدتا 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 مدل‌سازی 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 ریزشبکه 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

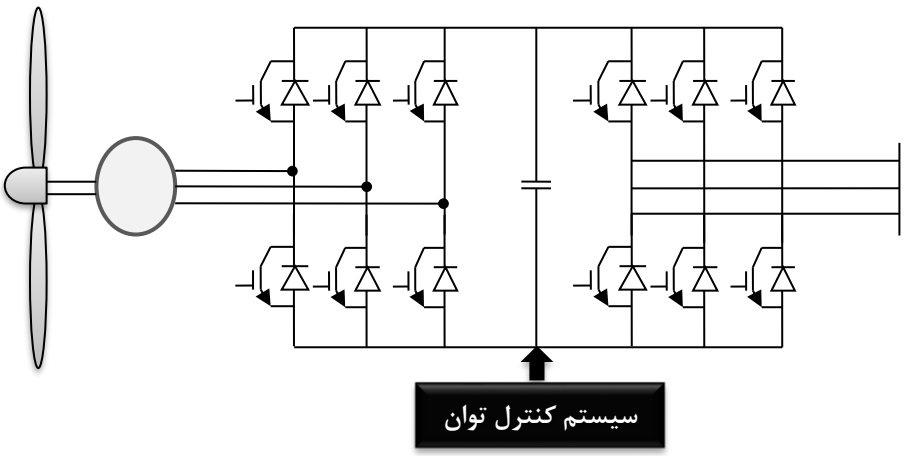
سیستم تولید توان بادی سرعت متغیر در چند دهه گذشته بسیار متداول بوده است. در مقایسه با ماشین بادی سرعت ثابت، ماشین بادی سرعت متغیر می‌تواند در محدوده وسیع تری از سرعت باد کار کند. منبع باد هر لحظه تغییر می‌کند، بنابراین برای دنبال نمودن تغییر و کسب حداکثر انرژی از باد به یک سیستم کنترل توان تعقیب کننده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

1. Aikhuele
2. Genetic Algorithm (GA)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

۳-۲. 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. الکتریسیته تولید شده دارای فرکانس و ولتاژ متغیری است که نمی‌تواند به طور مستقیم وارد شبکه شود. برای تبدیل الکتریسیته به برقی با ولتاژ و فرکانس ثابت با زاویه فاز سنکرون[1] 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

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[1] 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 دایمی[2] به طور گسترده در ماشین بادی کوچک و متوسط، به خصوص در ماشین بادی با محرک مستقیم، استفاده شده است. روند کنونی به‌صورت استفاده از PMSG چند قطبی در توربین‌های بادی با ابعاد بزرگ همانند ۱/۵مگاوات است که در سرعت نسبتا کم باد کار می‌کنند. ژنراتور القایی با تغذیه مضاعف[3] نیز به طور گسترده مورد استفاده قرار گرفته است، زیرا همیشه توان باید در محدوده بزرگی از سرعت باد تأمین شود.

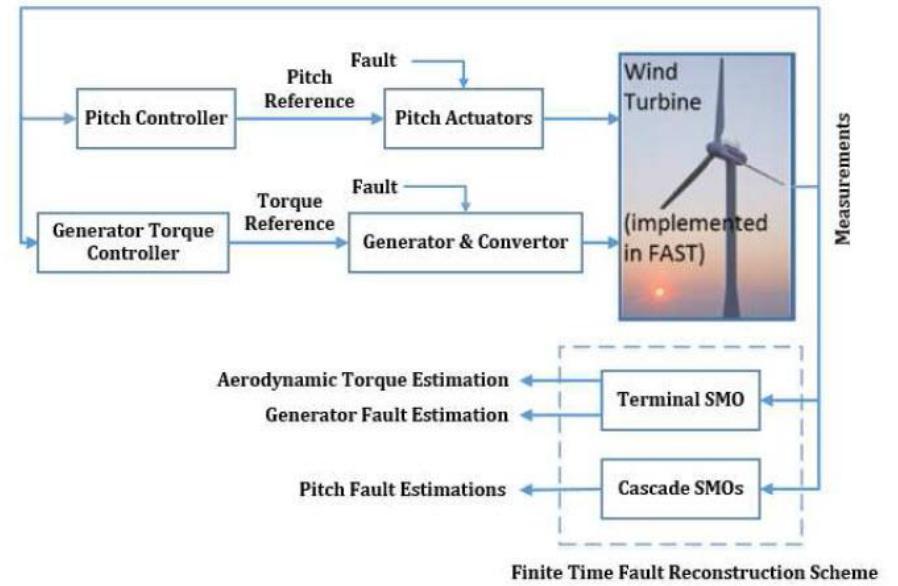
۳-۳ تخمین خطا برای تحلیل پایداری ریزشبکه متصل به توربین بادی در توربین‌های بادی

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. گزارش هایی از برخی زیان‌های 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 هسته ای، مهندسی هوافضا، مهندسی برق و کنترل است. در زمینه روش‌های تخمین، شناسایی، تشخیص و پیش بینی 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 قبلا 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

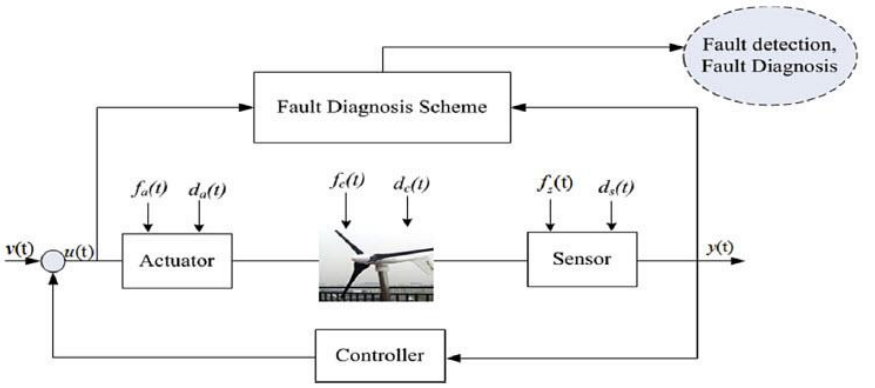
روش‌های مقاوم و تخمین وفقی نیز در مقالات پیشین و اصلی این تحقیق ارائه شده‌اند. در (حایری[1] و دیگران، ۲۰۱۹) نمایی از بلاک دیاگرام برای شماتیک سیستم تخمین و تشخیص خطا در توربین‌های بادی نشان داده شده است که به‌صورت شکل (۲) است. همین طور سیستم کنترلی برای تخمین و تشخیص خطا در توربین‌های بادی نیز در (آیخوله[2] و دیگران، ۲۰۱۸) نشان داده شده است که به‌صورت شکل (۳) است.



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

1. Hairi
2. Aikhuele

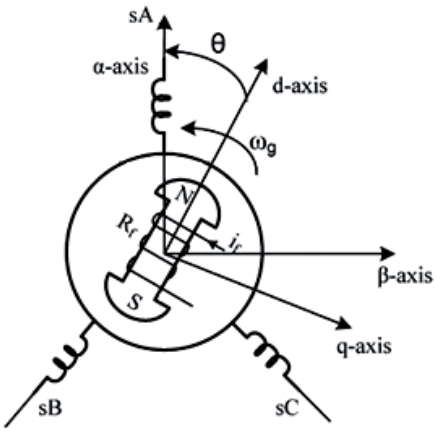
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]



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

۳-٤. مدل سازی رویکرد پیشنهادی

در مدل‌سازی 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

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

در سیستم مختصات ایستا abc، بردار ولتاژ استاتور و شار پیوندی[1] 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، ψ_s شار پیوندی استاتور، ψ_f شار پیوندی مغناطیس دائم رتور و L_s اندوکتانس[2] 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 روتور ۹۰درجه پیش می‌رود (محور q). سیستم مختصات d-q با سرعت سنکرون ω_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 ψ_{sd} مؤلفه محور d شار پیوندی استاتور، ψ_{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_{sq} مؤلفه محور q جریان استاتور ژنراتور است. شار پیوندی سیستم مختصات d-q برابر است با روابط (۵) و (۶).

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

$$\psi_{sq} = L_q i_{sq} \quad (۶)$$

1. Flux linkage
2. Inductance

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

برای ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم با قابلیت استقرار سطحی[1]، فاصله هوایی[2] را می‌توان حتی برابر هم تقریب زد. پس رابطه (۷) ایجاد می‌شود.

$$L_d = L_q = L_s \tag{۷}$$

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

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

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

معادله (۸) و (۹) نشان می‌دهد که جریان استاتور محور q و محور d نه تنها متاثر از ولتاژ u_{sd} و u_{sq} است بلکه با ولتاژهای $-\omega_r L_s i_{sq}$ ،$\omega_r L_s i_{sd}$ ،$\omega_s \psi_f$ ارتباط دارد. این ولتاژها، تابعی از سرعت چرخش، ω_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 به‌صورت 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.

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

که در آن، ρ 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.

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

1. Surface-mounted
2. Air gap

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

که در آن، $C_p(\theta, \lambda)$ ضریب عملکرد خوانده می‌شود و تابعی از زاویه قرارگیری تیغه θ و نسبت سرعت نوک λ است. در معادله (۱۱)، نسبت سرعت نوک به‌صورت رابطه (۱۲) تعریف می‌شود.

$$\lambda = \frac{r\omega}{V_w} \tag{۱۲}$$

که در آن، r طول تیغه توربین بادی و ω سرعت چرخش توربین بادی است. نمونه‌ای از $C_p(\theta, \lambda)$ یک توربین بادی به‌صورت رابطه (۱۳) مشخص می‌شود که در آن رابطه (۱۴) وجود دارد.

$$C_p = 0.22\left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\theta - 5\right)e^{\frac{-12.5}{\lambda_i}} \tag{۱۳}$$

$$\lambda_i = 1/(\frac{1}{\lambda + 0.08\theta} - \frac{0.035}{\theta^3 + 1}) \tag{۱۴}$$

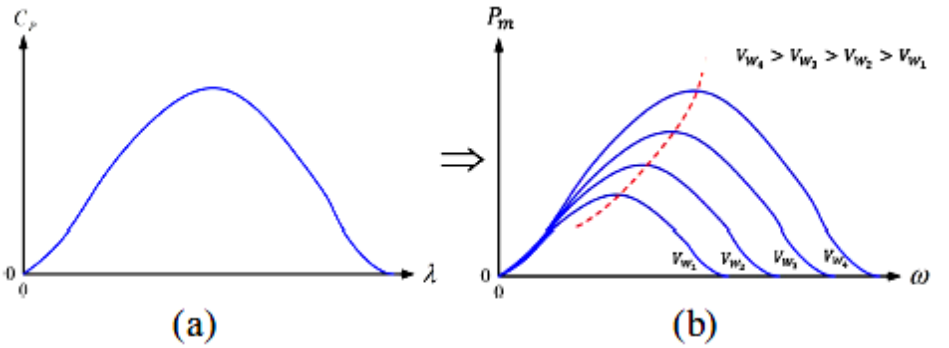
با جایگزین کردن معادله (۱۴) در (۱۳)، رابطه (۱۵) ایجاد می‌شود.

$$C_p = 0.22\left(\frac{116}{\lambda + 0.08\theta} - \frac{4.06}{\theta^3 + 1} - 0.4\theta - 5\right)e^{-\left(\frac{12.5}{\lambda+0.08\theta} - \frac{0.4375}{\theta^3+1}\right)} \tag{۱۵}$$

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

$$\frac{dp_m}{d\omega} = 0 \tag{۱۶}$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]



شکل ۵. (a) منحنی C_p - λ، (b) منحنی‌های P_m - ω 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.

$$T = \frac{p_m}{\omega} \tag{۱۷}$$

$$\frac{dP_m}{d\omega} = \frac{d(\omega \times T)}{d\omega} = T + \omega \frac{dT}{d\omega} \tag{۱۸}$$

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

$$T = (0.11)\rho A V_w^3 \left(\frac{116}{\frac{R}{V_w}\omega^2 + 0.08\theta\omega} - \frac{4.06}{\omega(\theta^3+1)} - \frac{0.4\theta + 5}{\omega} \right) e^{-\left(\frac{12.5}{\frac{R\omega}{V_w}+0.08\theta} - \frac{0.4375}{\theta^3+1}\right)} \tag{۱۹}$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

$$\frac{dT}{d\omega}=(0.11)\rho A V_w^3 e^{-\left(\frac{12.5}{\frac{R\omega}{V_w}+0.08\theta}-\frac{0.4375}{\theta^3+1}\right)}\times\left\{\left[\frac{-116\times\left(\frac{2R\omega}{V_w}+0.08\theta\right)}{\left(\frac{R}{V_w}\omega^2+0.08\theta\omega\right)^2}+\frac{4.06}{\omega^2(\theta^3+1)}+\frac{0.4\theta+5}{\omega^2}\right]\right.$$
$$\left.+\left[\left(\frac{116}{\frac{R}{V_w}\omega^2+0.08\theta\omega}-\frac{4.06}{\omega(\theta^3+1)}-\frac{0.4\theta+5}{\theta}\right)\frac{12.5}{\left(\frac{R\omega}{V_w}+0.08\theta\right)^2}\left(\frac{R}{V_w}\right)\right]\right\} \quad (۲۰)$$

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

$$T=K_t i \quad (۲۱)$$

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

$$K_t i-(0.11)\rho A V_w^3 e^{-\left(\frac{12.5}{\frac{R\omega}{V_w}+0.08\theta}-\frac{0.4375}{\theta^3+1}\right)}\left\{\left[\frac{116\times\left(\frac{2R\omega}{V_w}+0.08\theta\right)}{\omega\left(\frac{R\omega}{V_w}+0.08\theta\right)^2}-\frac{4.06}{\omega(\theta^3+1)}-\frac{0.4\theta+5}{\omega}\right]\right.$$
$$\left.-\left[\left(\frac{116}{\frac{R\omega}{V_w}}-\frac{4.06}{\theta^3+1}-0.4\theta-5\right)\frac{12.5}{\left(\frac{R\omega}{V_w}+0.08\theta\right)^2}\left(\frac{R}{V_w}\right)\right]\right\}=0 \quad (۲۲)$$

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

$$1-\frac{(0.11)}{K_t i}\rho A V_w^3 e^{-\left(\frac{12.5}{\frac{R\omega}{V_w}+0.08\theta}-\frac{0.4375}{\theta^3+1}\right)}\left\{\left[\frac{116\times\left(\frac{2R\omega}{V_w}+0.08\theta\right)}{\omega\left(\frac{R\omega}{V_w}+0.08\theta\right)^2}-\frac{4.06}{\omega(\theta^3+1)}-\frac{0.4\theta+5}{\omega}\right]\right.$$
$$\left.-\left[\left(\frac{116}{\frac{R\omega}{V_w}}-\frac{4.06}{\theta^3+1}-0.4\theta-5\right)\frac{12.5}{\left(\frac{R\omega}{V_w}+0.08\theta\right)^2}\left(\frac{R}{V_w}\right)\right]\right\}=0 \quad (۲۳)$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

با مشاهده معادله (۲۳)، پارامترهای V_w (سرعت باد)، ρ (چگالی هوا) و K_t (ثابت گشتاور متناظر) آیتم‌های 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 V_{W0}، ρ_0 و K_{t0} بیانگر عبارات نامی هستند و ΔV_W، $\Delta\rho$ و ΔK_t بیانگر عبارات مختل برای V_W، ρ و K_t هستند. بنابراین، معادله (۲۳) را می‌توان به‌صورت رابطه (۲۴) بازنویسی کرد.

$$1 - (x_0 + \Delta x) = 0 \tag{۲۴}$$

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

$$x_0 = \frac{(0.11)}{K_{t0} i} \rho_0 A V_{w_0}^3 e^{-\left(\frac{12.5}{\frac{R\omega}{V_{w_0}}+0.08\theta} - \frac{0.4375}{\theta^3+1}\right)} \left\{ \left[\frac{116 \times \left(\frac{2R\omega}{V_{w_0}} + 0.08\theta\right)}{\omega \left(\frac{R\omega}{V_{w_0}} + 0.08\theta\right)^2} - \frac{4.06}{\omega(\theta^3+1)} - \frac{0.4\theta + 5}{\omega} \right] - \left[\left(\frac{116}{\frac{R\omega}{V_{w_0}}} - \frac{4.06}{\theta^3+1} - 0.4\theta - 5 \right) \frac{12.5}{\left(\frac{R\omega}{V_{w_0}} + 0.08\theta\right)^2} \left(\frac{R}{V_{w_0}}\right) \right] \right\} \tag{۲۵}$$

$$\Delta x = \frac{(0.11)}{K_t i} \rho A V_w^3 e^{-\left(\frac{12.5}{\frac{R\omega}{V_w}+0.08\theta} - \frac{0.4375}{\theta^3+1}\right)} \left\{ \left[\frac{116 \times \left(\frac{2R\omega}{V_w} + 0.08\theta\right)}{\omega \left(\frac{R\omega}{V_w} + 0.08\theta\right)^2} - \frac{4.06}{\omega(\theta^3+1)} - \frac{0.4\theta + 5}{\omega} \right] - \left[\left(\frac{116}{\frac{R\omega}{V_w}} - \frac{4.06}{\theta^3+1} - 0.4\theta - 5 \right) \frac{12.5}{\left(\frac{R\omega}{V_w} + 0.08\theta\right)^2} \left(\frac{R}{V_w}\right) \right] \right\} - x_0 \tag{۲۶}$$

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

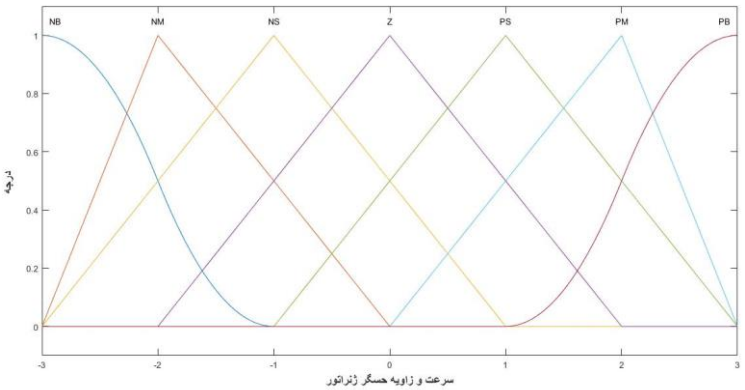
$$e = 1 - (x_0 + \Delta\hat{x}) \tag{۲۷}$$

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

که در آن، $\Delta\hat{x}$ خروجی فیلتر کالمن و تخمینی از عدم قطعیت Δx است. ورودی‌های فیلتر کالمن، جریان خروجی ژنراتور i و سرعت چرخش ω 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 کنترل‌کننده PI تنظیم می‌شود، که پارامترهای آن بایستی توسط یک الگوریتم فازی شده تعیین شوند. هدف کنترل‌کننده 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.

٤. 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 مقداردهی 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

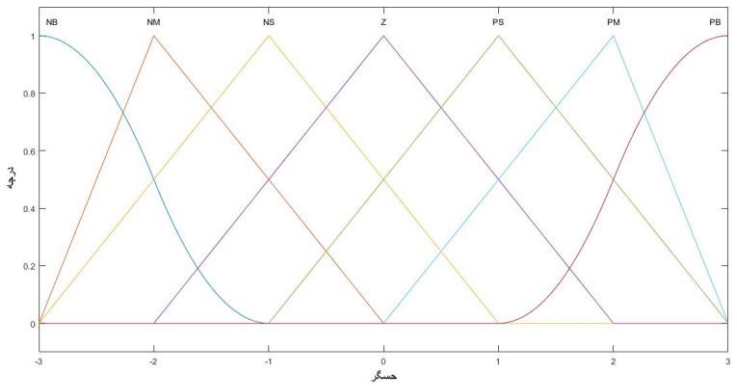
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

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
زیگموئیید (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]
زیگموئیید (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.

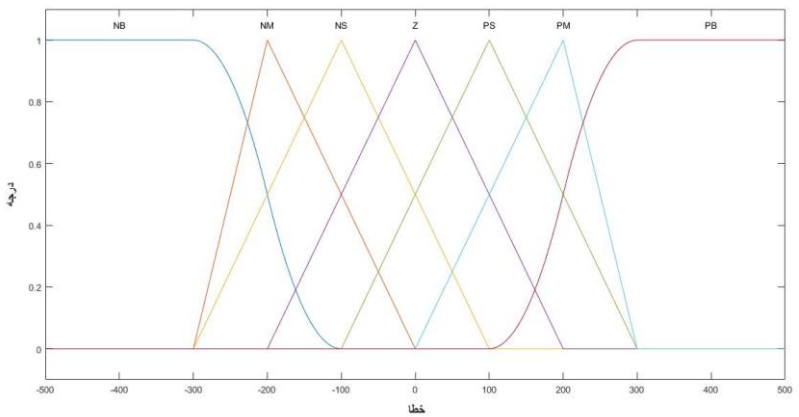
[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

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

نوع تابع عضویت	لغات زبانی	اعداد فازی
زیگموئیید (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]
زیگموئیید (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، دقیقا مشخص خواهد شد که خروجی فازی، به‌صورت 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

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

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

مأخذ: یافته‌های پژوهش

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

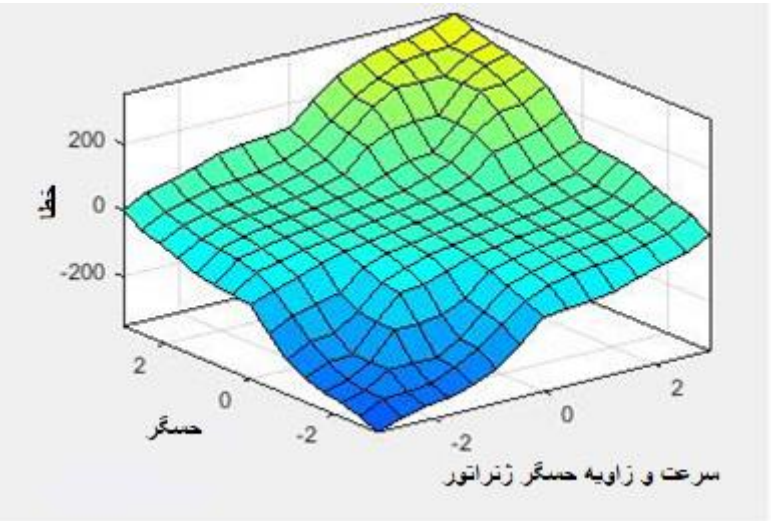
1. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is NB) and (hesgar is NB) then (error is NB) (1)
2. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is NB) and (hesgar is NM) then (error is NB) (1)
3. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is NB) and (hesgar is NS) then (error is NM) (1)
4. If (hesgarsoratwazavieyigenerator is NB) 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)

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

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

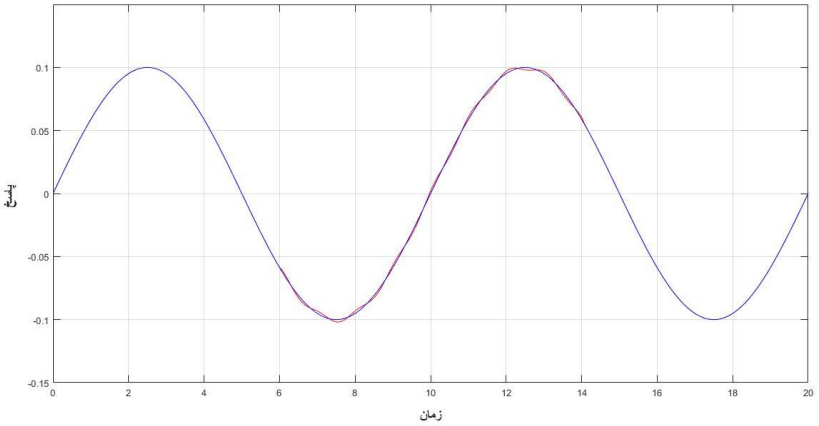
همین طور سطح فازی برای دو ورودی شامل ورودی اول حسگر سرعت و زاویه‌ای ژنراتور و ورودی دوم حسگر و محرک فراز توربین بادی، به‌صورت گرافیکی برای رسیدن به خطا در خروجی به‌صورت شکل (۱۰) است.



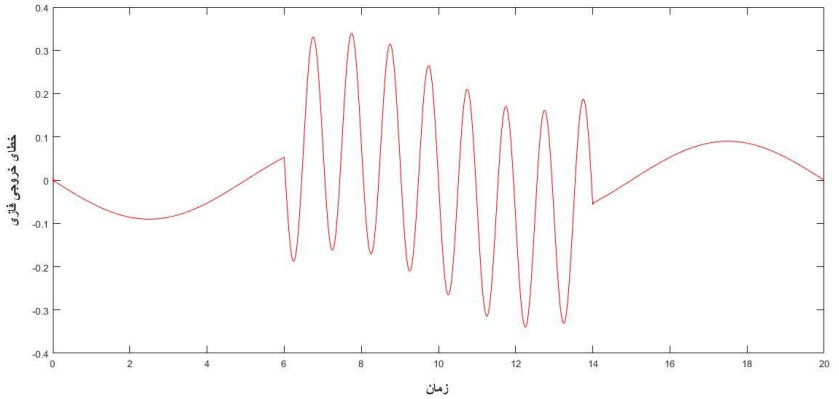
شکل ۱۰. نمایش گرافیکی سطح فازی

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

پاسخ سیستم برای نمایش پاسخ به‌صورت شکل (۱۱) و نمایش خطای خروجی فازی به‌صورت شکل (۱۲) می‌باشد که در ادامه این کنترل کننده در یک محیط سیمولینک با سیستم خطایابی کالمن توسعه یافته، ترکیب می‌شود.



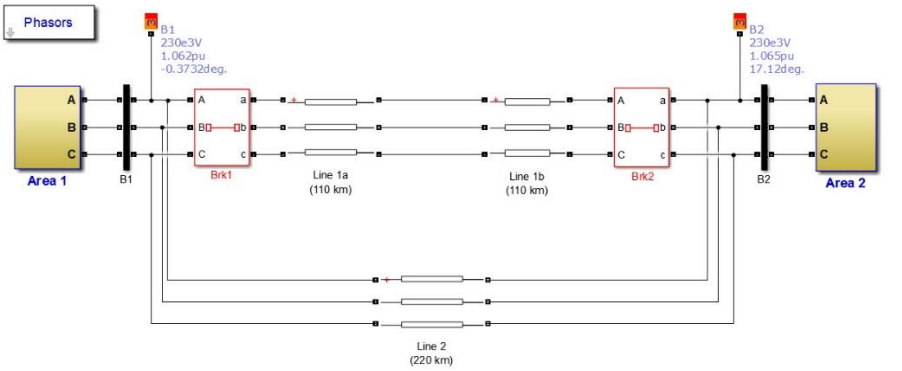
شکل ۱۱. نمایش پاسخ

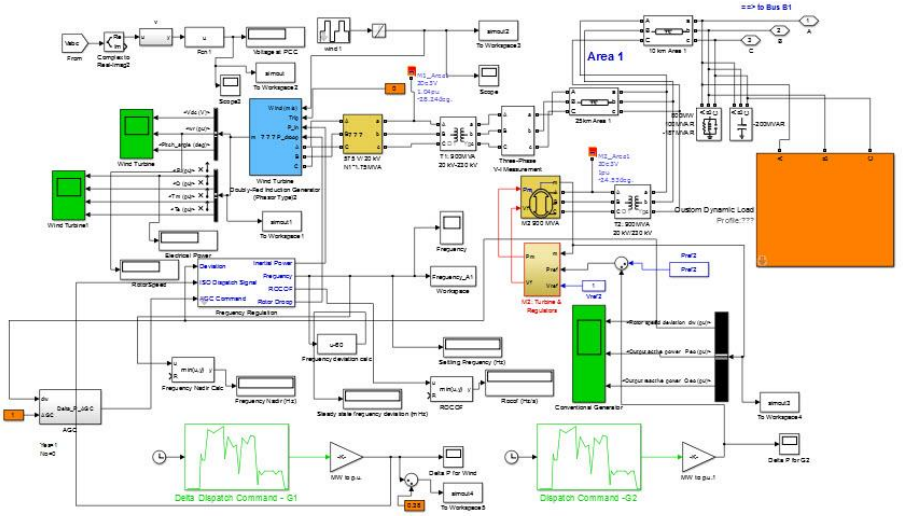


شکل ۱۲. نمایش خطای خروجی فازی

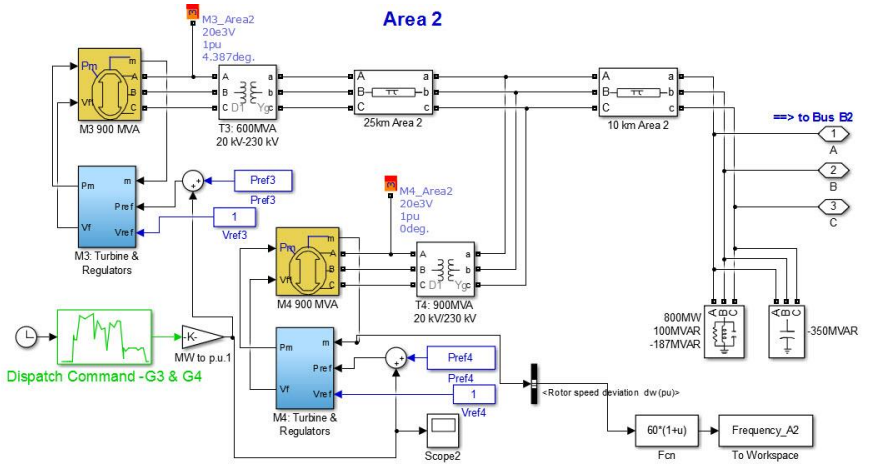
نمای کلی سیمولینک طراحی شده برای سیستم ریز شبکه متصل به توربین بادی به‌صورت شکل(۱۳) است که تمامی اجزا و کنترل کننده فازی در آن مشاهده می‌شود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]



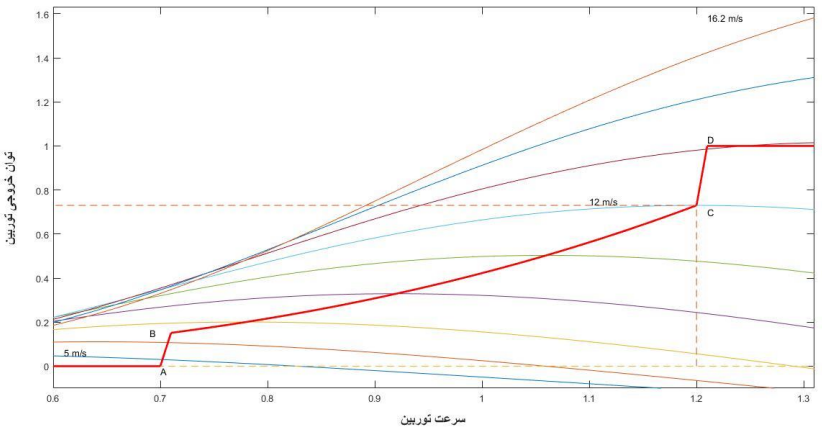


[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]



شکل ۱۳. نمای کلی سیمولینک طراحی شده برای سیستم ریزشبکه 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 ۲/۰۴۹ است که میانگین خطاها برابر ۰/۵۴ و خطایی که در سیستم بعد از اعمال رویکرد پیشنهادی باقی مانده است، برابر ۰/۷۰۸ است که نشان می‌دهد از تفریق

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

حداکثر خطای موجود بر خطای باقی مانده، ۱/۳۴۱واحد 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 ا، چالش‌های جدیدی را نیز در مناطق مختلف به وجود می‌اورد 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 به‌صورت کنترل بهینه و تحلیل پایداری آن پرداخته شد. رویکرد پیشنهادی بدین‌صورت 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، شماره۴، 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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

[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] Odofin, 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 DDPMSG and DFIG concepts for wind turbines". The 5th Annual International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC 2014). IEEE.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]

[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.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-05]