

## Intelligent Controller Design for Doubly Fed Induction Generator in Wind Turbine System under Uncertainty Conditions using Fuzzy-PSO based on Deep Learning

Pouya Derakhshan-Barjoei<sup>\*1</sup>, Mehrdad Tavasoli Koupaei<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, Artificial Intelligence and Data Analysis Research Center, SR.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, Yazd University, Yazd, Iran

### ABSTRACT

#### RESEARCH PAPER

**Received:**

04 March 2025

**Accepted:**

01 June 2025

**Keywords:**

Wind Turbine,  
Deep learning,  
Phase Controller,  
Uncertainty,  
Particle Swarm Algorithm,  
Random Speed

<sup>1</sup> **Corresponding author:**

✉ [derakhshan@iau.ac.ir](mailto:derakhshan@iau.ac.ir)

**Background and Objectives:** Wind turbines as one of the means of producing electrical energy from renewable and clean energies have been the focus of many researchers. The discussion of turbine control in order to produce more power and its economical use against fossil fuels has challenged different control methods.

**Methods:** In the current research, the purpose of using intelligent fuzzy controllers is to improve the output power and stabilize it when necessary due to its robustness. For this purpose, the induction generator with two-way feeding and variable wind was modeled first, then phase controllers will be designed to separately control active and reactive powers, reduce interference and uncertainty effects. that we used the particle swarm algorithm and the best rules and fuzzy parameters of the intelligent fuzzy system based on deep learning to create the rule and interference system to better performance.

**Findings:** The comparison of the simulation results of intelligent fuzzy and PI controllers shows the better performance and efficiency of the fuzzy controller in terms of more stability, steady state error and less settling time than the PI controller used in the system. The performance accuracy of the fuzzy controller based on deep learning due to rule extraction and optimal PSO design using random forest algorithm for this system is suitable according to the obtained outputs and the system is controlled in less than 0.4 seconds.

**Conclusion:** Our integrated and hybrid algorithm shows the good performance due to accuracy and precision parameters, applying the deep learning in order to select the effective parameters on system design for rule extraction in fuzzy and create the decision making in PSO leads the novel way to approach the results.

Copyright © Author(s).



نشریه تخصصی آرمان پردازش، دوره ۶، شماره ۲، سال ۱۴۰۴



فصلنامه تخصصی آرمان پردازش  
(APJ)

Homepage: [www.armanprocessjournal.ir](http://www.armanprocessjournal.ir)

شاپای الکترونیکی: ۲۷۸۳-۴۵۴۹



## طراحی کنترل کننده هوشمند برای ژنراتور القایی دوسو تغذیه در سیستم توربین بادی تحت شرایط عدم قطعیت با استفاده از الگوریتم هیبرید تجمعی ذرات فازی مبتنی بر یادگیری عمیق

پویا درخشان برجوئی<sup>\*</sup>، مهرداد توسلی کوپایی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> گروه مهندسی برق، مرکز تحقیقات هوش مصنوعی و تحلیل داده، واحد علوم و تحقیقات تهران، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

<sup>۲</sup> گروه مهندسی برق، دانشگاه یزد، یزد، ایران

چکیده

### مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله:

۱۴۰۳/۱۲/۱۴

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۴/۳/۱۱

واژگان کلیدی:

توربین بادی، یادگیری عمیق، کنترل کننده فازی، عدم قطعیت، الگوریتم تجمعی ذرات، سرعت تصادفی،

پیشینه و اهداف: توربین های بادی به عنوان یکی از ابزار تولید انرژی الکتریکی از انرژی های تجدیدپذیر و پاک مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته است. بحث کنترل توربین به منظور تولید توان بیشتر و مقرون به صرفه بودن استفاده از آن در برابر سوخت های فسیلی، روش های مختلف کنترلی را به چالش کشیده است. با توسعه هوش مصنوعی و کاربرد آن در طراحی های سیستم ها الگوریتم های هیبرید و ترکیبی در صنعت بسیار مورد استفاده و توجه محققین هستند. روش ها: در پژوهش حاضر هدف استفاده از کنترل کننده های فازی هوشمند به علت مقاوم بودن آن برای بهبود توان خروجی و تثبیت آن در مواقع لزوم می باشد. برای این منظور ابتدا ژنراتور القایی تغذیه دو سویه و باد متغیر مدل سازی گردید، پس از آن نیز کنترل کننده های فازی به منظور کنترل مجزا توان های اکتیو و راکتیو، کاهش تداخلات و اثرات عدم قطعیت با استفاده از انتخاب بهترین پارامترهای طراحی با الگوریتم یادگیری عمیق طراحی شد. الگوریتم هوش مصنوعی و جنگل تصادفی در تعیین نوع، پارامترها و بازه های عملکردی و نوع توابع و قوانین تصمیم گیر در منطق فازی و الگوریتم تجمعی ذرات بسیار موثر بود. طراحی بهترین قوانین و پارامتر فازی سیستم را با کمک الگوریتم یادگیری عمیق و روش جنگل تصادفی استخراج نمودیم که با تصمیم گیری هوشمند در الگوریتم تجمعی ذرات آن را به عملکرد بهتر هدایت کردیم. یافته ها: مقایسه نتایج حاصل از شبیه سازی کنترل کننده های فازی و PI نشان دهنده عملکرد و کارایی بهتر کنترل کننده فازی از لحاظ پایداری بیشتر، خطای حالت ماندگار و زمان نشست کمتر نسبت به کنترل کننده PI به کار رفته در سیستم می باشد. دقت عملکرد کنترل کننده هوشمند و ترکیبی فازی در این سیستم با توجه به خروجی های بدست آمده مناسب می باشد و سیستم در کمتر از ۰.۴ ثانیه کنترل می شود. نتیجه گیری: الگوریتم یکپارچه و ترکیبی ما عملکرد خوبی را با توجه به پارامترهای صحت و دقت نشان می دهد، استفاده از یادگیری عمیق برای استخراج قوانین در سیستم فازی و ایجاد تصمیم گیری درست و هوشمند منطبق با الگوریتم یادگیر با توجه به پارامترهای سیستم در PSO، ترکیب تصمیم گیری خوبی را که همزمان و برخط و هوشمند می باشد در طراحی پارامترهای فازی و قوانین آن و تصمیم گیری الگوریتم تجمعی ذرات به همراه داشت.

Copyright © Author(s).



## ۱- مقدمه

امروزه تولید انرژی بادی در درون سیستم‌های قدرت به طور قابل توجهی در حال افزایش است. با افزایش سهم تولید انرژی باد، انرژی باد مشارکت بیشتری در کنترل سیستم قدرت و پایداری آن پیدا کرده است. خصوصاً توانایی تولید انرژی باد برای میرایی نوسانات سیستم قدرت موضوعی قابل بحث است. در میان توربین‌های بادی، سیستم انرژی بادی به ژنراتور القایی دو سو تغذیه (DFIG) توجه زیادی در تولید توان به دلیل انعطاف‌پذیری در کنترل جداگانه توان اکتیو و راکتیو بدست آورده است. از اینرو این مقاله با هدف طراحی کنترل‌کننده فازی فازی به منظور مجزاسازی توان اکتیو و راکتیو و کاهش تداخلات آنها ارایه خواهد شد. استفاده از انرژی باد به عنوان یکی از مهم‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر دارای توجیه اقتصادی، در بسیاری از کشورهای جهان رو به فزونی گذاشته است [۱]. ژنراتور مورد استفاده در توربین بادی می‌تواند ژنراتور سنکرون یا ژنراتور القایی باشد. استفاده از ژنراتورهای القایی به دلیل ارزانی، استحکام، ساختمان مکانیکی ساده و هزینه کم برای نگهداری در حال افزایش است [۲]. در سال‌های اخیر، توربین‌های بادی با ژنراتور القایی دو سو تغذیه بسیار مورد توجه سازندگان قرار گرفته‌اند [۳، ۴]. ماشین‌های الکتریکی تغذیه دوسویه موتورهای یا ژنراتورهای هستند، که در آنها سیم پیچ استاتور و سیم پیچ روتور هر دو به صورت جداگانه به تجهیزاتی خارج از ماشین الکتریکی متصل شده‌اند. در این ماشین‌ها تغذیه جریان متناوب ۲ (AC) با فرکانس قابل تنظیم، به موتور یا ژنراتور اجازه چرخش با سرعت متغیر را می‌دهد. ژنراتورهای تغذیه دوسویه مشابه ژنراتورهای AC هستند، با این تفاوت که نسبت به تغییرات ناگهانی در سرعت چرخش انعطاف‌پذیر هستند و تغییرات سرعت تأثیری روی فرکانس برق تولیدی توسط ژنراتور ندارد. این ژنراتورها برای توربین‌های بادی که بسته به سرعت باد سرعتشان متغیر است، مناسب هستند. وقتی توربین در معرض یک تندباد قرار می‌گیرد، پرها می‌بایست با سرعت بیشتری بچرخند. در حالی که سرعت ژنراتور روی فرکانس شبکه قدرت قفل شده و در مقابل افزایش سرعت مقاومت می‌کند، در نتیجه فشار زیادی به محور، جعبه دنده و ژنراتور وارد می‌شود، اما اگر توربین امکان افزایش سرعت داشته باشد، علاوه بر کاهش استهلاک از نیروی تندبادها نیز برای تولید برق استفاده می‌شود. یک راهکار این است، که برق AC تولیدی توسط ژنراتور را به برق DC تبدیل کنیم و سپس با استفاده از یک اینورتر<sup>۳</sup> دوباره آن را به برق AC با فرکانس دلخواه تبدیل نمود، که این روش معمولاً در توربین‌های خانگی مورد استفاده قرار می‌گیرد، اما اینورترهای مناسب برای توربین‌های با توان بالا، حجیم و گران قیمت هستند.

راه حل دیگر استفاده از ژنراتورهای تغذیه دوسویه است که در آنها بجای حالت معمول که در آن سیم‌پیچ روتور به منبع تغذیه DC متصل و سیم‌پیچ استاتور که برق تولید شده از خروجی آن گرفته می‌شود، دو

سیم‌پیچ سه فاز داریم که یکی ثابت و دیگری دورانی است، سیم پیچ ثابت مستقیماً به خروجی و سیم پیچ دیگر به یک منبع AC سه فاز با فرکانس متغیر متصل می‌شود و این منبع روی فرکانسی قرار می‌گیرد که تغییرات در سرعت ژنراتور و طبعاً فرکانس برق تولیدی رو جبران می‌کند. برای تنظیم فرکانس این منبع به یک مبدل AC به DC نیاز است که برای ساخت آن از نیمه هادی‌های IGBT استفاده می‌شود. این مبدل‌ها دو طرفه بوده و می‌توانند برق را از هر دو جهت عبور دهند. با توجه به مطالب فوق می‌توان دریافت که سیستم تبدیل انرژی باد براساس ژنراتور القایی دو سو تغذیه مزایایی متعددی دارد [۵]. از جمله این مزایا، کاهش استهلاک مکانیکی و نویز صوتی و قابلیت کنترل همزمان توان اکتیو و راکتیو است [۶]. همچنین اندازه مبدل‌های PWM پشت به پشت ۴ که واسط بین شبکه و مدار روتور هستند، یک سوم اندازه ژنراتورهای معمولی در توان یکسان هستند [۷]. متغیر بودن سرعت ژنراتور القایی دو سو تغذیه، این قابلیت را ایجاد می‌کند که توربین بتواند در محدوده وسیع‌تری از وزش باد در راندمان ماکزیمم خود کار کند [۸]. همچنین مزیت دیگر DFIG جذب نوسانات باد با تغییر سرعت چرخش روتور و عدم انتقال آنها به شبکه است. بخش کنترلی یک سیستم بادی وظیفه دارد علاوه بر تامین شرایط لازم برای شبکه الکتریکی، امکان انتقال حداکثر انرژی باد را با بهترین راندمان فراهم آورد؛ بدین منظور از سوی محققان روش‌های مختلف کنترلی معرفی شده است.

## ۲- کارهای پیشین

کنترل برداری DFIG عملکرد بسیاری خوبی را در پی دارد، زیرا قابلیت مجزاسازی<sup>۵</sup> کنترل توان اکتیو و راکتیو را داراست. در سال‌های اخیر، بسیاری از تحقیقات در زمینه کنترل برداری به روش زیر به منظور ردیابی حداکثر انرژی باد با فرض سرعت مجاز باد انجام گرفته است. با این وجود، هنگامی که سرعت باد بیشتر از سرعت مجاز می‌شود، توان خروجی تنها توسط تنظیم زاویه اوج<sup>۶</sup> می‌تواند پایدار بماند. در مقایسه با زاویه اوج ثابت، زاویه اوج متغیر دارای ویژگی‌های بسیاری از قبیل توان خروجی یکنواخت بدون نقطه توان مجاز، حفظ توان مجاز در بخش سرعت بالا و عملکرد قوی‌تر از ترمز چرخ دنده است. در یک سرعت پایین باد، گشتاور الکترومغناطیسی به منظور دستیابی به کنترل سرعت توربین بادی کنترل شده است [۹، ۱۰].

<sup>۱</sup> Doubly Fed Induction Generator

<sup>۲</sup> Alternating Current

<sup>۳</sup> Inverter

<sup>۴</sup> Back-To-Back PWM Converters

<sup>۵</sup> Decoupling

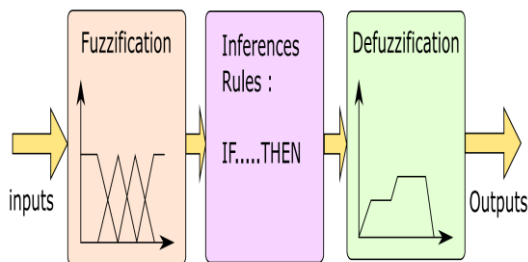
<sup>۶</sup> Pitch Angle

کنترل کننده عصبی به منظور کنترل جریان روتور DFIG بکار رفته است. برای ارزیابی عملکرد مقاوم بودن کنترل کننده پیشنهادی در محیط متلب شبیه سازی شده است، نتایج شبیه سازی حاکی از عملکرد مقاوم آن است. در [۱۹] کنترل توان اکتیو و راکتیو DFIG براساس رویکرد بازخورد با استفاده از بردارهای ولتاژ مناسب در سمت روتور به منظور کاهش نوسان ژنراتور ارائه شده است. رویکرد پیشنهادی در شرایط پایدار منجر به بهبود عملکرد کنترلی شده است.

در [۲۰] مساله کنترل رگولار توان اکتیو و راکتیو در نقطه اتصال مشترک بین ژنراتور القایی دو سو و شبکه مطرح گردیده است. کنترل کننده پیشنهادی در این مطالعه با بکارگیری خواص انفعالی ۲ مدل مورد نظر برای سیستم کنترلی توسعه یافته است. از دیدگاه نظری، نقطه تعادل سیستم حلقه بسته که به توان مطلوب بستگی دارد، دارای خواص پایداری مجانبی فراگیر است. این ویژگی توسط نظریه سیستم های دینامیکی غیر خطی تحریک شده استنباط شده است.

### ۳- روش تحقیق

رویکرد کنترل کننده فازی نسبت به استدلال های بشری انعطاف پذیری بیشتری دارد، عملکرد موفق کنترل کننده ها را براساس تجربیات بشری، بدون نیاز به مدل ریاضی سیستم ممکن می سازد. در شکل ۱ یک سیستم فازی براساس مدل ممدانی نشان داده شده است. این مکانیزم از سه جزء اصلی تشکیل یافته است. ابتدا با بکارگیری توابع عضویت ورودی، ورودی ها فازی سازی می شوند، سپس براساس قوانین پایه و سیستم استنتاج خروجی ها تولید می گردد و در نهایت خروجی های فازی توسط غیرفازی سازی به سیستم اعمال می شود. خطا و تغییرات به عنوان ورودی های کنترل کننده فازی انتخاب می شوند.



شکل ۱: سیستم استنتاج فازی براساس مدل ممدانی

### ۳-۱ کنترل کننده فازی DFIG

با این وجود، در ارزیابی عددی کنترل کننده پیشنهادی، در این تحقیق نشان داده شده که این خواص مستحکم تر از آن هستند که از پایداری مجانبی استنباط شوند.

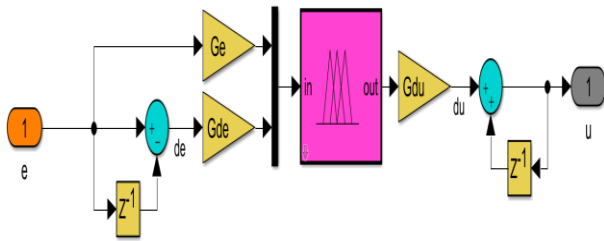
در [۲۱] کنترل برداری مبتنی بر منطق فازی توان اکتیو و راکتیو ژنراتور القایی دو سو تغذیه در سیستم توربین بادی بررسی شده است. انتقال توان بین استاتور و شبکه با ایفای نقش سیگنال های روتور از طریق مبدل دو طرفه بدست می آید. در نهایت کنترل کننده پیشنهادی با

کنترل کننده ممکن است افت پیدا کند. در [۱۳] از کنترل کننده براساس شبکه عصبی برای این امر بهره گرفته شده است، البته پیچیدگی پیاده سازی از معایب اصلی آن محسوب می گردد.

در سال های اخیر، کنترل فازی به طور گسترده ای در سیستم های الکترونیک قدرت شامل کنترل سرعت درایورهای AC، کنترل بازخوردی مبدل ها، تشخیص برخط و خارج از خط ۱، تخمین پارامتر و غیره مورد استفاده قرار گرفته است. کنترل کننده فازی اثر عدم قطعیت پارامترهای سیستم را کاهش داده و مقاومت سیستم را بهبود می بخشد. زیرا مهمترین مزیت کنترل کننده فازی مقاوم بودن آن در برابر عدم قطعیت است که باعث شده است، از این کنترل کننده به عنوان یک کنترل کننده با خاصیت مقاومت ذاتی یاد شود [۱۴]. در این تحقیق، کنترل کننده فازی برای کنترل DFIG، در کنترل کننده برداری مستقیم برای سرعت، توان و حلقه های کنترل جریان بکار گرفته خواهد شد. همچنین عملکرد کنترل کننده فازی پیشنهادی در مقایسه با عملکرد کنترل کننده PI معمولی مورد ارزیابی قرار خواهد گرفت. در [۱۵] یک کنترل کننده با قابلیت مجزاسازی توان اکتیو و راکتیو ژنراتور القایی دو سو تغذیه توسط کنترل برداری ارائه شده است. به این منظور از روش کنترل غیر مستقیم با حلقه کنترل کننده PI کلاسیک استفاده شده است. رویکرد ارائه شده در این تحقیق منجر به بهبود رفتار حالت گذرا در مقایسه با کنترل غیر مستقیم بدون حلقه توان شده است.

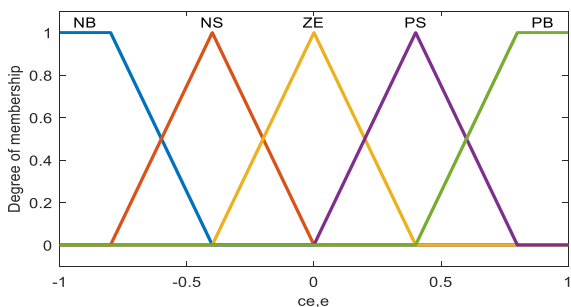
در [۱۶] عملکرد کنترل کننده سرعت متغیر در سیستم ژنراتور القایی دو سو تغذیه فرکانس ثابت با استفاده از کنترل کننده های فازی بهبود یافته است. در این تحقیق کنترل مبدل سمت روتور توسط کنترل برداری شار استاتور محقق گردیده است، در حالی که کنترل مبدل سمت شبکه توسط استراتژی کنترل برداری ولتاژ شبکه به منظور حفظ پایداری ولتاژ DC صورت گرفته است. یک سیستم استنتاج فازی هوشمند بعنوان جایگزین کنترل کننده انتگرالی تناسبی (PI) متداول برای غلبه بر هرگونه اغتشاش مانند تغییر سرعت باد، عیب ولتاژ شبکه کوتاه، تغییر پارامترها و غیره نیز پیشنهاد داده شده است. در نهایت عملکرد کنترل کننده مذکور بر روی ژنراتور القایی دو سو تغذیه پیاده سازی شده است. در [۱۷] مدل سازی، طراحی کنترل کننده و تست سخت افزاری به منظور شبیه سازی و کنترل زمان واقعی یک ژنراتور القایی دو سو تغذیه متصل به شبکه برای سیستم مبدل انرژی باد صورت گرفته است. ژنراتور با استفاده از چارچوب دورانی ربعی مستقیم با در نظر گرفتن شار استاتور مدل سازی شده و روش کنترل میدان برداری برای کنترل مستقل توان اکتیو و راکتیو و ولتاژ خط DC در سمت شبکه بکار گرفته شده است. ارزیابی عملکرد کنترل کننده پیشنهادی در این مقاله موید کارایی خوب آن است.

در [۱۸] مدل سازی و کنترل مقاوم ژنراتور القایی دو سو تغذیه برای سیستم مبدل باد در چارچوب مرجع سنکرون d-q ارائه شده است. تنظیم گشتاور الکترومغناطیسی، کنترل توان راکتیو استاتور و

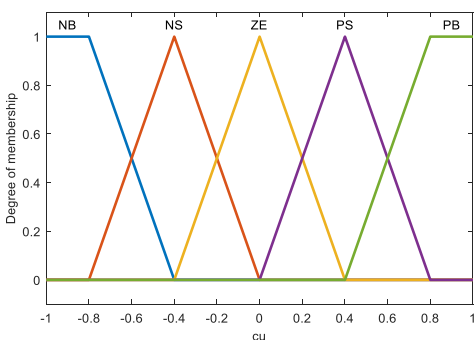


شکل ۳: طراحی کنترل کننده فازی

بطور کلی، طراحی یک کنترل کننده فازی برای کنترل درایورهای الکتریکی نیاز به انتخاب پارامترهای زیر دارد: متغیرهای زبانی ۱، توابع عضویت، روش استنتاج، استراتژی غیرفازی ساز [۲۲]. ورودی‌های کنترل کننده فازی خطا و مشتق خطاست، در حالی که خروجی آن سیگنال کنترلی است. توابع عضویت مثلثی و دوزنقه‌ای در بازه  $[-1, 1]$  برای هر کدام از متغیرهای فوق نرمالیزه شده است. شکل‌های ۴ و ۵ به ترتیب توابع عضویت ورودی‌ها (خطا و مشتق خطا) و خروجی (ورودی فرآیند) را نشان می‌دهد [۴۱-۴۳].



شکل ۴: توابع عضویت خطا و تغییرات خطا



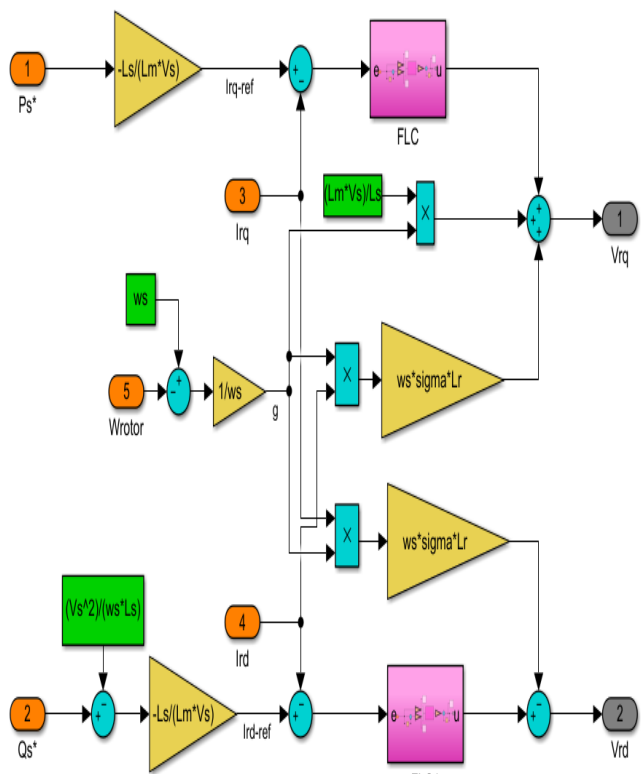
شکل ۵: توابع عضویت خروجی

قوانین فازی برای تعیین متغیر خروجی کنترل کننده بعنوان تابعی از متغیرهای ورودی در جدول ۱ ارایه شده است. همچنین سطح تولید شده توسط قوانین سیستم فازی در شکل ۶ نشان داده شده است. این قوانین و پارامترها به همراه بهترین قوانین منتخب فازی توسط الگوریتم تکاملی ذرات تعیین شد که در این الگوریتم هیبرید از روش یادگیری عمیق جهت انطباق قوانین طراحی و استخراج شده با پارامترهای ورودی

کنترل کننده مستقل از توان اکتیو و راکتیو مقایسه شده است. نتایج شبیه‌سازی سازی حاکی از عملکرد مقاوم کنترل کننده فازی پیشنهادی بوده است. در مراجع مطالعه شده زیادی این سیستم طراحی و شبیه سازی شد [۲۹-۳۹] که با توجه به تغییر سرعت و انتخاب تصادفی آن و پیشنهاد تعیین و تخصیص قوانین فازی توسط الگوریتم تکاملی ذرات، به استفاده از الگوریتم تجمعی ذرات روی آوردیم که تاثیر مناسبی در کمک به طراحی از خود نشان داد. در مراجع جای خالی استفاده از الگوریتم های هوش مصنوعی در تعیین و استخراج قوانین فازی با توجه به رویکرد انتخاب بهترین قوانین و انتخاب پارامترهای تاثیر گذار خالی می باشد. در الگوریتم انتخابی پیشنهادی ما این موضوع را قبل از پیاده سازی الگوریتم اصلی انجام داده و در تعیین قوانین و نوع سیستم ترکیبی فازی و الگوریتم تجمعی ذرات با کمک هوش مصنوعی وزن های تاثیر گذاری را در پارامترها در قوانین فازی تعیین نمودیم.

### ۲-۳ سیستم مدل و تعیین پارامترها

شکل ۲ شماتیک کلی کنترل کننده‌های فازی ادغام شده در بلوک کنترل برداری DFIG را نشان می‌دهد. توان‌های اکتیو و راکتیو هر کدام با یک کنترل کننده فازی مرتبط به خود و مستقل از هم کنترل می‌شوند.



شکل ۲: کنترل DFIG مبتنی بر کنترل فازی

شماتیک کنترل کننده فازی بکارگرفته شده در کنترل کننده DFIG در شکل ۳ نشان داده شده است.

بهره  $G_e$ ،  $G_{\Delta u}$  و  $G_{\Delta e}$  نرمالیزه شده‌اند. این بهره‌ها بر روی عملکرد کنترل کننده فازی تاثیرگذار هستند، از اینرو به منظور دستیابی به عملکرد مطلوب توسط طراح بصورت تجربی تنظیم می‌گردد.

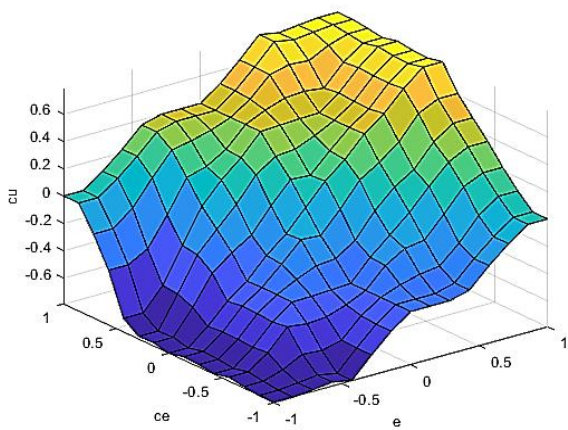
$C_1, C_2$ : ضرایب ثابت

### ۳-۳ مقاردهی پارامترهای اولیه جهت شبیه‌سازی سیستم DFIG به‌مراه کنترل کننده توان

در این بخش به ارزیابی عملکرد و کارایی کنترل کننده اعمالی به DFIG در محیط متلب پرداخته خواهد شد. از اینرو مقادیر ذکر شده در جداول ۴-۱ و ۴-۲ به ترتیب به منظور شبیه‌سازی سیستم DFIG و کنترل کننده بکارگرفته شده‌اند. همچنین، شبیه‌سازی کنترل کننده DFIG به‌مراه سیستم بادی مدل‌سازی شده در محیط نرم‌افزار متلب در شکل ۷ ارائه شده است.

جدول ۱: قوانین کنترل کننده فازی

$\Delta u$		e				
		BN	SN	AZ	SP	BP
$\Delta e$	BN	BN	BN	SN	SN	AZ
	SN	BN	SN	SN	AZ	SP
	AZ	BN	SN	AZ	SP	BP
	SP	BN	AZ	SP	SP	BP
	BP	AZ	SP	SP	BP	BP



شکل ۶: سطح تولید شده توسط قوانین سیستم فازی

جدول ۲: پارامترهای مربوط به توربین و DFIG

پارامترها	مقادیر
$V_s$	230V
$f_{re}$	50Hz
$p$	2
$R_s$	0.455 $\Omega$
$R_r$	0.19 $\Omega$
$L_s$	0.07 H

و خروجی برخط و همزمان استفاده گردید و به ورودی سیستم فازی داده شد. در تنظیم پارامترها از کمک الگوریتم تجمعی ذرات استفاده شد، آغاز کار PSO به این شکل است که گروهی از راه حل‌ها به صورت تصادفی به وجود می‌آیند و با به روز کردن نسل‌ها سعی در یافتن راه حل بهینه می‌نمایند. در هر گام، هر ذره با استفاده از مکان فعلی خود و دو مقدار بهترین به روز می‌شود. اولین مورد بهترین موقعیتی است که تا کنون ذره موفق به رسیدن به آن شده است. موقعیت مذکور با نام pbest شناخته و نگهداری می‌شود. بهترین مقدار دیگری که توسط الگوریتم مورد استفاده قرار می‌گیرد، بهترین موقعیتی است که تاکنون توسط جمعیت ذرات بدست آمده است. این موقعیت با gbest نمایش داده می‌شود. در این مراحل الگوریتم یادگیری عمیق و جنگل تصادفی تمام پارامترهای مورد نیاز را در دسته های مناسب برای تصمیم گیری مرتب نمود و الگوریتم تصمیم گیر سرعت و دقت بالایی را در انتخاب قوانین و بازه انتخابی بدست آورد.

کلیه ذرات بهترین مکان خود، بهترین مکان ذرات گروه و همچنین مقدار تابع هدف متناظر با هر مکان را می‌دانند. در هر مرحله از الگوریتم رفتار ذره بصورت ترکیب تصادفی از این سه امکان انتخاب می‌شود:

۱. پیروی از مسیر خود ذره
۲. برگشتن به بهترین مکان قبلی خودش
۳. رفتن به بهترین مکان قبلی یا فعلی ذرات گروه

رفتار ذره در این الگوریتم به صورت زیر فرمول بندی می‌شود:

$$v_{id} = wv_{id} + c_1 \cdot \text{rand} \cdot (p_{id} - x_{id}) + c_2 \cdot \text{rand} \cdot (p_{gd} - x_{id}) \quad (1)$$

$$X_{i,t+1} = X_{i,t} + V_{i,t} \quad (2)$$

$$w(t) = \frac{(t_{\max} - t) \cdot (w_{\text{start}} - w_{\text{end}})}{t_{\max}} + w_{\text{end}} \quad (3)$$

تعداد کل جمعیت نیز ۵۰ در نظر گرفته شد و همچنین:

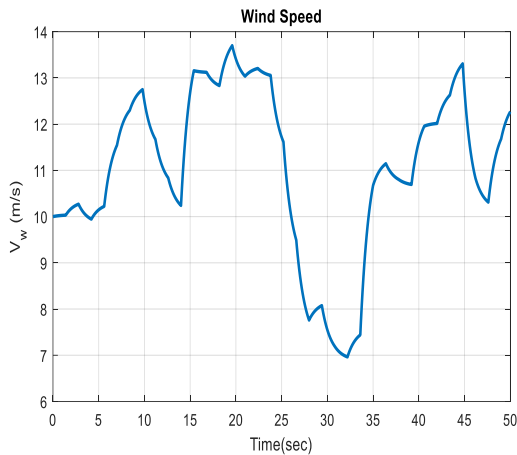
$X_{i,d}$ : مکان ذره  $i$  ام در مرحله تکرار  $t$

$V_{i,d}$ : نرخ تغییر مکان ذره  $i$  ام در مرحله تکرار  $t$

$P_{i,d}$ : بهترین مکان قبلی ذره  $i$  ام در مرحله تکرار  $t$

$P_{g,d}$ : بهترین مکان بین تمام ذرات در مرحله تکرار  $t$

$r_{1,t}, r_{2,t}$ : مقدار تصادفی بین (۰, ۱)



شکل ۸: سرعت باد مدل شده

همانگونه که در شکل ۸ ملاحظه می‌گردد سرعت باد انتخابی به صورت کاملا تصادفی بوده و رنج سرعتی در محدوده سرعت‌های پایین و بالای باد را اختیار می‌کند. بنابراین سیستم در هر دو ناحیه عملکردی توربین در واقعیت عمل خواهد کرد. سرعت باد ارائه مقداری بین ۷ تا ۱۴ متر بر ثانیه را داراست البته می‌توان بیان داشت که سرعت ارائه شده بدترین حالت ممکن برای وزش سرعت باد می‌باشد که در حالت واقعی احتمال رخ دادن آن وجود ندارد. به عبارت دیگر تغییرات شدید سرعت باد در مدت زمان کم در حالت واقعی رخ نمی‌دهد و تنها در این مقاله به منظور به چالش کشیدن کنترل‌کننده‌ها استفاده شده است. باد وزیده شده بر سیستم ضریب جذبی را در حالت کنترل شده ارائه می‌نماید.

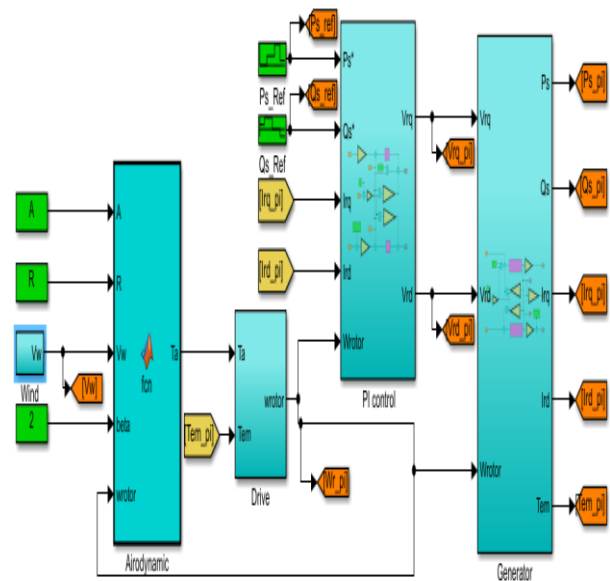
#### ۴- مقایسه نتایج شبیه‌سازی کنترل‌کننده PI و فازی

در این بخش به منظور ارزیابی دقیق عملکرد و کارایی کنترل‌کننده‌های PI و فازی چهار سناریوی مختلف در نظر گرفته خواهد شد. در سناریوی اول تا سوم به ترتیب ورودی مرجع توان اکتیو و راکتیو بصورت پله خواهد بود. در سناریوی دوم به منظور بررسی مقاوم بودن کنترل‌کننده‌های مورد بحث در مقابل خطای مدل‌سازی و استهلاک توربین، شبیه‌سازی با افزودن عدم قطعیت به پارامترهای سیستم صورت می‌گیرد. هدف از این سناریو ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده‌های PI و فازی در حضور ورودی مرجع پله است. شکل‌های ۹ و ۱۰ ردیابی و خطاهای ردیابی توان‌های اکتیو و راکتیو با بکارگیری کنترل‌کننده‌های فازی و PI در حضور سیگنال‌های مرجع پله را نشان می‌دهد. در این دو شکل دیده می‌شود که پاسخ پله ناشی از کنترل‌کننده فازی دارای فراجهش با دامنه تقریبی ۵ درصد و همچنین زمان نشست ۰,۴ ثانیه است، اما پاسخ پله متأثر از کنترل‌کننده PI بدون فراجهش، با زمان نشست ۲ ثانیه می‌باشد. خطای ردیابی حالت ماندگار ورودی مرجع پله ناشی از هر دو کنترل‌کننده فوق صفر است. همچنین، هر دو کنترل‌کننده به خوبی توانسته‌اند، اثر تزویج بین محورهای  $d$  و  $q$  را حذف نمایند و توان‌های اکتیو و راکتیو را بصورت مجزا و مستقل از هم کنترل کنند. با

$L_r$	0.0213 H
$L_m$	0.034 H
$J$	32 Kg. m <sup>2</sup>
$f$	0.046 N. md/rad
$R$	37.5 m
$\beta$	2 <sup>0</sup>

جدول ۳: ضرایب مربوط به کنترل‌کننده‌ها

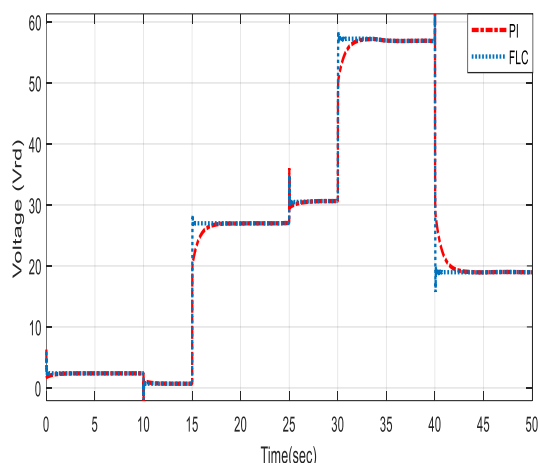
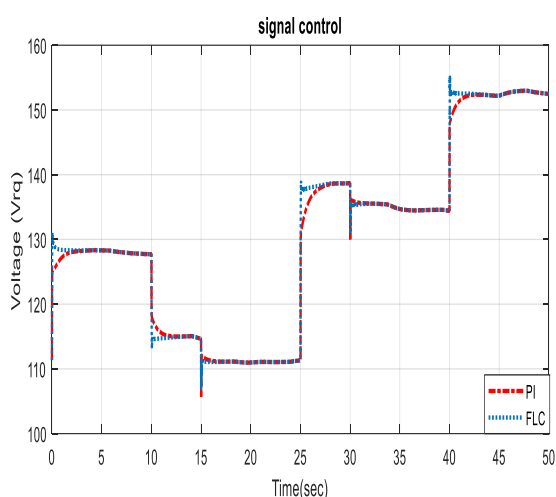
پارامترها	مقادیر
$K_p$	0.5
$K_I$	1
$G_e$	0.05
$G_{\Delta e}$	0.05
$G_{\Delta u}$	10



شکل ۷: کنترل‌کننده DFIG به‌مراه سیستم بادی مدل‌سازی شده در محیط نرم‌افزار متلب

برای شبیه‌سازی عملکرد کنترل‌کننده مورد استفاده بر روی توربین نیاز به وارد کردن یک سیگنال تصادفی به عنوان سرعت باد بر مدل مورد استفاده توربین می‌باشد. در پژوهش حاضر این کار با استفاده از یک سری معادلات بازگشتی انجام می‌پذیرد. سیگنال مورد استفاده به جای سرعت باد در شکل ۸ نمایش داده شده است.

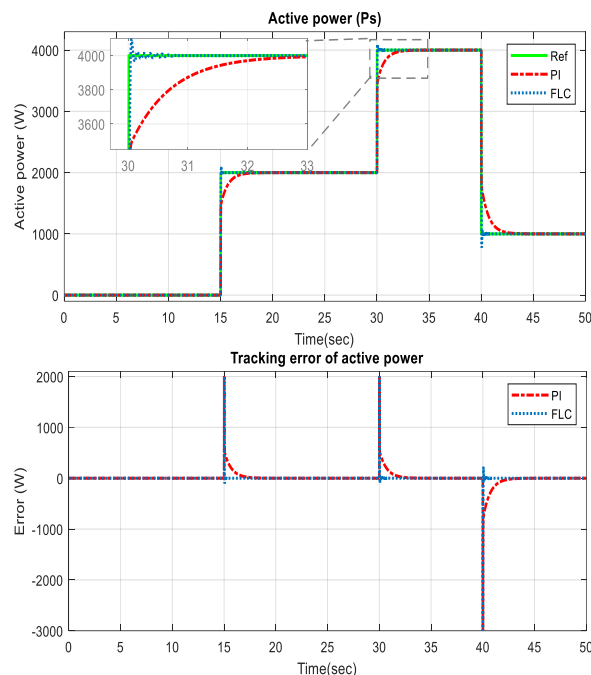
سیگنال‌های کنترلی، ولتاژها در راستای محورهای  $d, q$ ، اعمالی به سیستم ناشی از کنترل‌کننده‌های فازی و PI در شکل ۱۱ ارایه شده است. همانگونه که در این شکل ملاحظه می‌گردد، دامنه سیگنال ولتاژ اعمالی ناشی از هر دو کنترل‌کننده از دامنه در محدوده دامنه سیگنال منع باقی مانده است. همچنین سرعت تغییرات سیگنال ولتاژ بگونه‌ای است که در عمل با استفاده از محرکه‌ها معمول قابل پیاده‌سازی است.



شکل ۱۱: سیگنال‌های کنترلی (ولتاژها در راستای محورهای  $d, q$ ) اعمالی به سیستم ناشی از کنترل‌کننده‌های فازی و PI

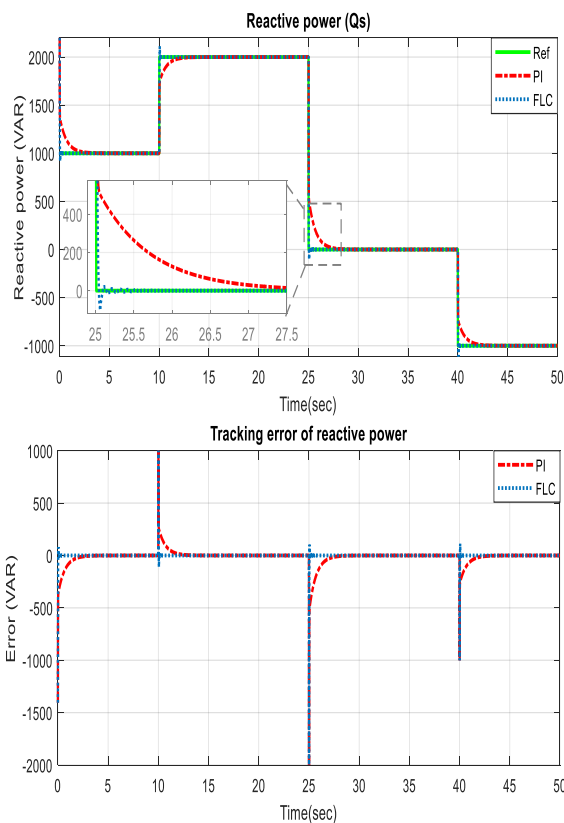
شکل ۱۲ جریان در راستای محورهای  $d, q$  استاتور ناشی از کنترل‌کننده‌های فازی و PI را نشان می‌دهد. همانگونه که در شکل فوق نیز مشخص است کنترل‌کننده در مدت زمان محدود جریان مطلوبی را که برایش تعریف شده است، را با دقت بالا دنبال می‌نماید که نشان دهنده این مسئله است که توربین بیشترین توان را در این حالت از باد وزیده شده دریافت می‌نماید. سرعت روتور با توجه به سرعت باد و همچنین گشتاور الکترومغناطیسی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مشاهده می‌گردد که روتور به منظور دریافت حداکثر توان مورد نیاز از انرژی باد، سرعت خود را با شرایط وفق داده است.

توجه به دو شکل مذکور می‌توان دریافت که کنترل‌کننده فازی دارای سرعت همگرایی بیشتر نسبت به کنترل‌کننده PI با کمی فراجهدش است.



شکل ۹: پاسخ پله توان اکتیو استاتور سیستم به‌مراه خطای ردیابی با اعمال

#### کنترل‌کننده‌های فازی و PI

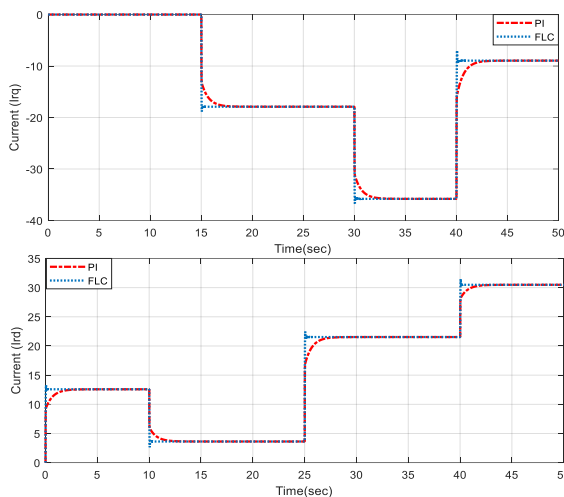
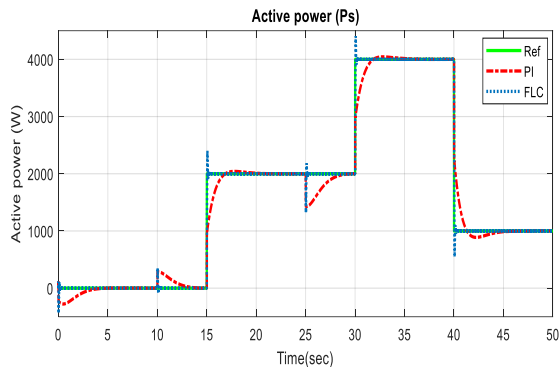


شکل ۱۰: پاسخ پله توان راکتیو استاتور سیستم با اعمال کنترل‌کننده‌های

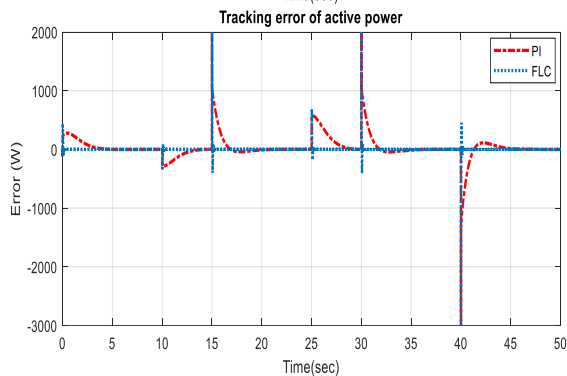
#### فازی و PI

نشست کمتر و همچنین توانسته تداخلات را با سرعت بیشتری حذف نماید.

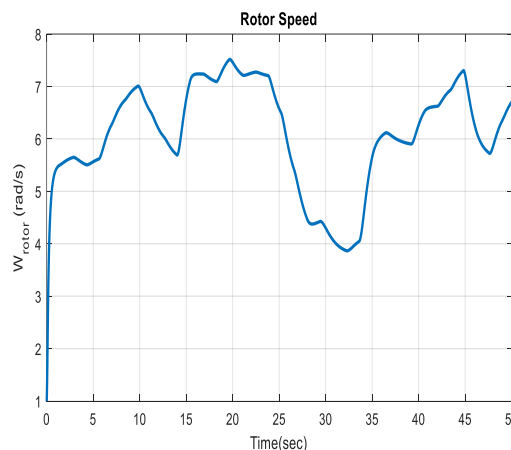
شکل ۱۶ سیگنال‌های کنترلی، ولتاژها در راستای محورهای  $d, q$ ، اعمالی به سیستم ناشی از کنترل‌کننده‌های فازی و PI در حضور ورودی مرجع پله و عدم قطعیت‌های پارامتری نشان می‌دهد.



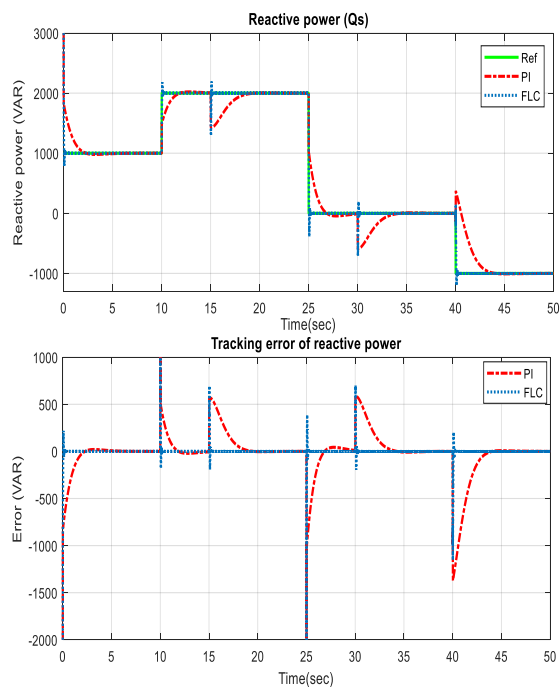
شکل ۱۲: جریان در راستای محورهای  $d, q$  استاتور ناشی از کنترل‌کننده‌های فازی و PI



شکل ۱۴: پاسخ پله توان اکتیو استاتور در حضور عدم قطعیت سیستم با اعمال کنترل‌کننده‌های فازی و PI



شکل ۱۳: سرعت روتور



شکل ۱۵: پاسخ پله توان راکتیو استاتور در حضور عدم قطعیت سیستم با اعمال کنترل‌کننده‌های فازی و PI

#### ۱-۴ ارزیابی مقاوم بودن کنترل‌کننده‌های PI و فازی

به منظور ارزیابی مقاومت کنترل‌کننده‌های PI و فازی، مقادیر برخی از پارامترهای سیستم تغییر یافته است، این متغیرها به شرح زیر می‌باشند:

- تغییر مثبت ۴۰ درصدی مقاومت روتور از مقدار نامی آن
- تغییر منفی ۲۰ درصدی اندوکتانس‌های استاتور  $L_s$ ، اندوکتانس روتور  $L_r$  و اندوکتانس تزویجی  $L_m$  از مقدارهای نامی‌شان.

شکل‌های ۱۴ و ۱۵ پاسخ پله توان اکتیو و راکتیو استاتور در حضور عدم قطعیت سیستم با اعمال کنترل‌کننده‌های فازی و PI نشان می‌دهد. در این شکل‌ها به وضوح مشاهده می‌گردد که عدم قطعیت در پارامترهای سیستم منجر به کاهش کارایی کنترل‌کننده‌های مذکور و بروز تداخل در کنترل توان‌ها شده است. اما با این وجود، در این شکل‌ها به وضوح دیده می‌شود که علیرغم کاهش کارایی کنترل‌کننده‌ها، پایداری آن‌ها حفظ شده و توانسته‌اند سیگنال پله را بدون داشتن خطای حالت ماندگار دنبال نمایند. همچنین در این بخش نیز کنترل‌کننده فازی نسبت به کنترل PI عملکرد بهتری داشته است، زیرا دارای زمان

## ۵- نتیجه گیری

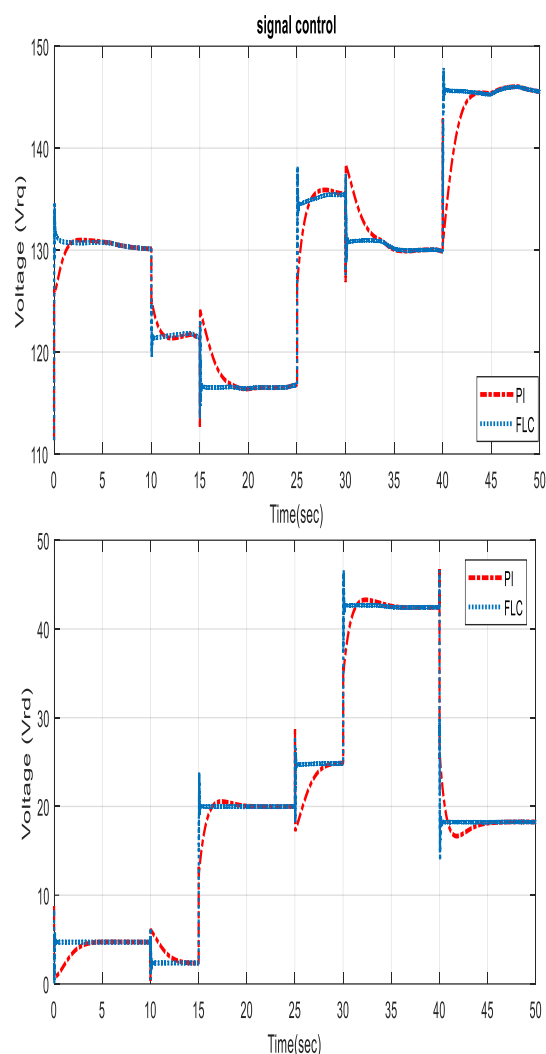
در این پژوهش با استفاده از کنترل کننده‌های PI و فازی اقدام به کنترل توان اکتیو و راکتیو سیستم DFIG در هر دو ناحیه عملکردی شد. در سرعت‌های متغیر باد، کنترل کننده‌های مذکور سعی در ردیابی ورودی مرجع توان داشتند. بدین صورت که در سرعت‌های پایین باد کنترل کننده‌های بیان شده توان خروجی را به منظور ردیابی ورودی مرجع بیشینه نموده و در سرعت‌های بالاتر توان خروجی به منظور جلوگیری از آسیب دیدن توربین تثبیت گردید. همچنین، از طریق ویژگی‌های پاسخ بدست آمده توسط نتایج شبیه‌سازی، عملکرد خوب کنترل کننده‌ها در حضور تغییر مرجع مشاهده گردید. بعلاوه، با مقایسه کنترل کننده PI و فازی به وضوح دیده شد که با کمک گرفتن از الگوریتم تجمعی ذرات، بخش فازی در تعیین پارامترها و بازه آنها و تخصیص قوانین منتخب شده مقاومت بیشتری در مقابل تغییر مقدار پارامترهای سیستم نسبت به کنترل کننده PI دارد، همچنین سرعت همگرایی و پاسخ گذرای بهتری نیز را به همراه داشت. با ارایه پارامترهای مطلوب سیستم در کسب دقت و سرعت بالا در پاسخ به تغییرات ورودی الگوریتم یادگیری عمیق تغییراتی را در قوانین منطق بر خروجی‌ها اعمال کرد و طراحی و دنبال کردن هوشمند و برخط تغییرات در سیستم با استفاده از این الگوریتم بدست آمد در شکل ۱۷ دقت و صحت برای الگوریتم یادگیر نشان داده شده است. این الگوریتم با انتخاب ویژگی‌های تاثیر گذار در مدل پاسخ مطلوب در شرایط نامتعادل و غیر ایستادن را از خود نشان داد.

## تعارض منافع

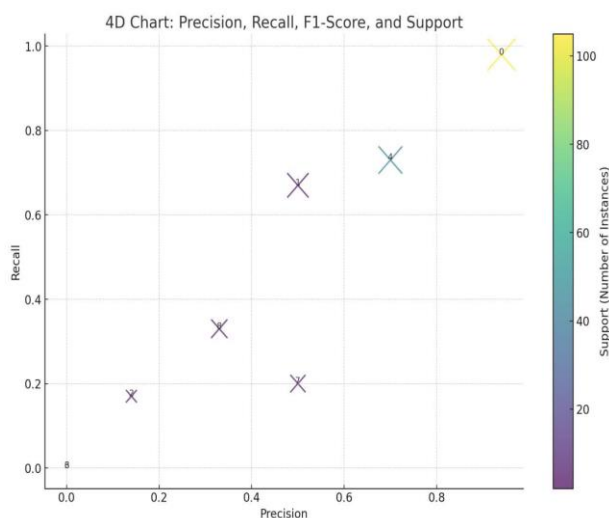
نویسندگان این مقاله اعلام می‌دارند که هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

## منابع:

- [1] Harini, C., N.K. Kumari, and G. Raju. Analysis of wind turbine driven doubly fed induction generator. in 2011 1st International Conference on Electrical Energy Systems. 2011. IEEE.
- [2] Kenne, G., C.T. Sanjong, and E.M. Nfah, Adaptive PI control strategy for a self-excited induction generator driven by a variable speed wind turbine. Journal of Circuits, Systems and Computers, 2017. 26(02): p. 1750024.
- [3] Sadeghi, R., S.M. Madani, and M. Ataei, A new smooth synchronization of brushless doubly-fed induction generator by applying a proposed machine model. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018. 9(1): p. 371-380.
- [4] Shahriari, S.A.A., M. Mohammadi, and M. Raoufat, A new method based on state-estimation technique to enhance low-voltage ride-through capability of doubly-fed induction generator wind turbines. International Journal of



شکل ۱۶: سیگنال‌های کنترلی (ولتاژها در راستای محورهای  $d, q$ ) اعمالی به سیستم ناشی از کنترل کننده‌های فازی و PI



شکل ۱۷: نمایش دقت و میزان صحت عملکرد الگوریتم یادگیری

- [18] Lin, C., et al., LMI approach to analysis and control of Takagi-Sugeno fuzzy systems with time delay. Vol. 351. 2007: Springer Science & Business Media.
- [19] Kruse, R., J.E. Gebhardt, and F. Klawon, Foundations of fuzzy systems. 1994: John Wiley & Sons, Inc.
- [20] Tanaka, K. and H.O. Wang, Fuzzy control systems design and analysis: a linear matrix inequality approach. 2004: John Wiley & Sons.
- [21] Chang, M.-K., Tracking control of a leg rehabilitation machine driven by pneumatic artificial muscles using composite fuzzy theory. The Scientific World Journal, 2014. **2014**.
- [22] Kerrouche, K., A. Mezouar, and K. Belgacem, Decoupled control of doubly fed induction generator by vector control for wind energy conversion system. Energy procedia, 2013. **42**: p. 239-248.
- [23] Dida, A. and D.B. Attous, Doubly-fed induction generator drive based WECS using fuzzy logic controller. Frontiers in Energy, 2015. **9**(3): p. 272-281.
- [24] Tanvir, A., A. Merabet, and R. Beguenane, Real-time control of active and reactive power for doubly fed induction generator (DFIG)-based wind energy conversion system. Energies, 2015. **8**(9): p. 10389-10408.
- [25] Bedoud, K., et al., Robust control of doubly fed induction generator for wind turbine under sub-synchronous operation mode. Energy Procedia, 2015. **74**: p. 886-899.
- [26] Kaloi, G.S., J. Wang, and M.H. Baloch, Active and reactive power control of the doubly fed induction generator based on wind energy conversion system. Energy Reports, 2016. **2**: p. 194-200.
- [27] Lopez-Garcia, I., G. Espinosa-Perez, and V. Cardenas, Power control of a doubly fed induction generator connected to the power grid. International Journal of Control, 2017: p. 1-10.
- [28] El Azzaoui, M. and H. Mahmoudi, Fuzzy-PI control of a doubly fed induction generator-based wind power system. Int. J. Autom. Control, 2017. **11**(1): p. 54.
- [29] Nichita, C., et al., Modelling non-stationary wind speed for renewable energy systems control. The annals of "Dunarea de Jos" University of Galati, 2000: p. 29-34.
- [30] Zbigniew, L., Wind turbine operation in electric power systems. Advanced modeling. 2003, Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [31] Ponce, P., Hiram Ponce, and Arturo Molina., Doubly fed induction generator (DFIG) wind Electrical Power & Energy Systems, 2018. **95**: p. 118-127.
- [5] Boldea, I., Variable speed generators. 2018: CRC press.
- [6] Hu, J.-b. and Y.-k. He, Dynamic modelling and robust current control of wind-turbine driven DFIG during external AC voltage dip. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A, 2006. **7**(10): p. 1757-1764.
- [7] Takahashi, I. and T. Noguchi, A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor. IEEE Transactions on Industry applications, 1986(5): p. 820-827.
- [8] Edrah, M., K.L. Lo, and O. Anaya-Lara, Impacts of high penetration of DFIG wind turbines on rotor angle stability of power systems. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015. **6**(3): p. 759-766.
- [9] Raj, M., T. Saravanan, and V. Srinivasan, A modified direct torque control of induction motor using space vector modulation technique. Middle-East Journal of Scientific Research, 2014. **20**(11): p. 1572-1574.
- [10] Korkmaz, F., İ. Topaloğlu, and H. Mamur, Fuzzy logic based direct torque control of induction motor with space vector modulation. arXiv preprint arXiv:1508.01345, 2015.
- [11] Tapia, G., A. Tapia, and J.X. Ostolaza, Two alternative modeling approaches for the evaluation of wind farm active and reactive power performances. IEEE transactions on energy conversion, 2006. **21**(4): p. 909-920.
- [12] Murari, A.L.L.F., et al., A Proposal of Project of PI controller gains used on the Control of Doubly-Fed Induction Generators. IEEE Latin America Transactions, 2017. **15**(2): p. 173-180.
- [13] Li, Y., et al., Adaptive fuzzy robust output feedback control of nonlinear systems with unknown dead zones based on a small-gain approach. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2014. **22**(1): p. 164-176.
- [14] Soares, O., et al., Nonlinear control of the doubly-fed induction generator in wind power systems. Renewable energy, 2010. **35**(8): p. 1662-1670.
- [15] Yedavalli, R.K., Robust control of uncertain dynamic systems. 2016: Springer.
- [16] Ying, H., Fuzzy control and modeling: analytical foundations and applications. 2000: Wiley-IEEE Press.
- [17] Mamdani, E.H. Application of fuzzy logic to approximate reasoning using linguistic synthesis. in Proceedings of the sixth international symposium on Multiple-valued logic. 1976. IEEE Computer Society Press.

- [38] Jamal, A., S. Suropto, and R. Syahputra, Performance evaluation of wind turbine with doubly-fed induction generator. 2016.
- [39] Moriarty, P.J. and S.B. Butterfield. Wind turbine modeling overview for control engineers. in 2009 American Control Conference. 2009. IEEE.
- [40] Simoes, M.G., B.K. Bose, and R.J. Spiegel, Fuzzy logic based intelligent control of a variable speed cage machine wind generation system. IEEE transactions on power electronics, 1997. **12**(1): p. 87-95.
- [41] Derakhshan B.P., Javaheri, Z. (2023). Optimal and Intelligent Control of Car Air conditioning System Using Type 2 Fuzzy Controller. *ACTA TECH. NAP. - Series: APPLIED MATHEMATICS, MECHANICS, And ENG. Journal*, 66(1)
- [42] P.Derakhshan B., M. Tavasoli K Optimal Design of Fuzzy Controller for Photovoltaic Maximum Power Tracking Using PSO. *J. Journal Elec. Eng.* 2023- ISI
- [43] M. J. Fattahi H. A. , S. M. Salari, Derakhshan P., "A Novel Fuzzy Rule Extraction Method Using Cellular Learning Automata Based On Evolutionary Computing Model", Praise Worthy Prize Journal, I.RE.AC.O Vol. 4. n. 6, pp. 923-932
- turbine controlled by artificial organic networks. *Soft Computing*, 2018. **22**(9): p. 2867-2879.
- [32] Eltamaly, A., A. Alolah, and M. Abdel-Rahman. Modified DFIG control strategy for wind energy applications SPEEDAM 2010. in International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 2010 IEEE. 2010.
- [33] Rekioua, D., Wind Power Electric Systems: Modeling, Simulation and Control. 2016: SPRINGER.
- [34] Bekka, H., et al., Power Control Of A Wind Generator Connected To The Grid In Front Of Strong Winds. *Journal of Electrical Systems*, 2013. **9**(3).
- [35] Tapia, A., et al., Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator. *IEEE Transactions on energy conversion*, 2003. **18**(2): p. 194-204.
- [36] Pena, R., J. Clare, and G. Asher, Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation. *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, 1996. **143**(3): p. 231-241.
- [37] Smith, G. and K. Nigim. Wind-energy recovery by a static Scherbius induction generator. in *IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution)*. 1981. IET.