

Intelligent Load-Frequency Control of Power System in the Precence of Wing Uncertainty Based on Latin Hyper Square and Particle Swarm Optimization Algorithms

Soheil Ranjbar

Electrical Engineering Department, Velayat University, Iranshahr, Iran
s.ranjbar@velayat.ac.ir

Keywords:

swarm optimization algorithm
latin hyper square sampling algorithm
power system stability
wind turbines
frequency control

Abstract: This paper presents a method of load-frequency control in power systems in the presence of wind turbines in the presence of wind uncertainty. To do this, using power system modelled on power factory[®] software and considering classic stabilizers, the speed of the wind turbines is controlled. In the case of increasing the system damping performance, using intelligent particle swarm optimization algorithm, stabilizer parameters are optimized. Also, in order to evaluate wind units stability through different natural situations, considering the wind and load uncertainties evaluated through LHS sampling algorithm, the wind turbines frequency control are investigated. Results indicate the proper performance of the controller in the presence of wind and load uncertainties.

Original Research Article

Paper History:

Received: 27/04/2023
Accepted: 18/09/2023

How to cite this article: Ranjbar, S., "Intelligent Load-Frequency Control of Power System in the Precence of Wing Uncertainty Based on Latin Hyper Square and Particle Swarm Optimization Algorithms", Energy Engineering and Management, Vol. 13, No. 2, PP. 84-97, 2023. <https://doi.org/10.22052/EEM.2023.252877.1015>

© 2023 University of Kashan Press. All rights reserved

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Introduction

Power system dynamic processes are highly random, nonlinear, and intrinsically nonstationary even over short time intervals. Prediction of temporal dynamics with the ultimate application to a real-time system monitoring, protection, and control remains a major research challenge for power engineers. An understanding of system dynamics is critical for reliable inference of the underlying

mechanisms in the observed oscillations and is needed for the development of an effective wide-area measurement and control systems as well as for improved operational reliability. Accounting for nonlinear and time-varying features can not only provide a better description of the data but can also reveal crucial information on system's oscillatory behavior such as modal properties and moving patterns. Advances in signal processing algorithms, along with continuously growing

controlling resources and monitoring systems, being to make feasible the analysis and characterization of transient processes using real-time information.

Materials and methods

In this paper, a method of load-frequency control in power systems to damp both transient and low frequency oscillations in the presence of wind turbines, with regard to wind uncertainty, is proposed. The proposed scheme includes three parts: (1) effects of wind turbine on steady state conditions; (2) effects of wind units through fault occurrence, and (3) optimal combinations of wind turbines against sever fault events. The swarm optimization algorithm is considered as the main logic for tuning the parameters in this paper. The control signals are selected based on WAMS structure, while parameters with higher observabilities in facing oscillations are selected. Besides, system dynamic performance is evaluated.

Result

In order to evaluate the proposed scheme through power system operating conditions, the wind turbine dynamic signals were evaluated, in which proper decisions, based on network dynamics behaviors, with an aim of controlling system

frequency were estimated. The effectiveness of the proposed scheme was carried out on a test system consisting of wind resources. The results showed the proper performance of the proposed approach for improving power system resiliency in the presence of extreme wind storms in real time operating conditions.

Discussion and Conclusion

In this paper, an effective load-frequency control of power system to control both transient and low frequency stability in the presence of wind turbines and wind uncertainties has been proposed. Simulation illustrate that the proposed controllers are able to damp the oscillations, where the type and amount of the controller active power present important influence on damping oscillations. Also, different combinations of controllers were investigated to reach the best damping performance. In this case, a combination based on online evaluation of the system dynamic response presented the highest damping results for controlling wind turbines. As it was adopted, increasing controller output power caused different influences on damping ratio, where an inappropriate damping power resulted in unsuitable damping performances.

کنترل هوشمند بار- فرکانس در سیستم قدرت در حضور عدم قطعیت انرژی باد مبتنی بر الگوریتم نمونه برداری ابرمکعب لاتین و بهینه سازی ازدحام ذرات

سهیل رنجبر

استادیار دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولایت، ایرانشهر، ایران

s.ranjbar@velayat.ac.ir

چکیده: در این مقاله، روشی به منظور کنترل بار-فرکانس در سیستم‌های قدرت در حضور عدم قطعیت باد ارائه می‌شود؛ بدین منظور، با اندازه‌گیری لحظه‌ای توان توربین بادی مبتنی بر سیگنال فازوری برخط، مدل دقیق فضای حالت شبکه در حضور منابع بادی پیاده‌سازی می‌شود. به منظور عملکرد بهینه پارامترهای کنترلی، با شناسایی متغیرهای تأثیرگذار فضای حالت تحت شرایط بهره‌برداری و نوسان توان، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات و همچنین الگوریتم نمونه برداری ابرمکعب لاتین به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت واحدهای بادی مورد استفاده قرار گرفته است. طرح پیشنهادی، روشی برخط مبتنی بر سیگنال‌های اندازه‌گیری فازوری بوده به نحوی که در پنجره‌های زمانی مختلف، با ارزیابی دینامیک شبکه مبتنی بر طرح پیشنهادی ابرمکعب لاتین، پارامترهای کنترلی به‌روزرسانی می‌شوند. در نتایج شبیه‌سازی، حداکثر خطای کنترل‌کننده کلاسیک به‌ازای عدم قطعیت انرژی باد به میزان 7×10^{-3} بوده که به‌ازای کنترل‌کننده پیشنهادی این میزان به مقدار $1/5 \times 10^{-3}$ به‌ازای تغییر بارهای ۰/۰۲ و ۰/۱ پریونیت کاهش یافته است. نتایج نشان‌دهنده عملکرد مطلوب کنترل‌کننده پیشنهادی به منظور میراسازی نوسان‌های توان در شبکه در حضور عدم قطعیت منابع اینورتری با اینرسی پایین بوده و می‌تواند از بروز خاموشی‌های بزرگ در سیستم قدرت جلوگیری کند.	واژه‌های کلیدی: الگوریتم ازدحام ذرات الگوریتم نمونه برداری ابرمکعب لاتین پایدارسازی سیستم قدرت توربین باد کنترل فرکانس
مقاله علمی پژوهشی	
تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۰۷	
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۲۷	

۱. مقدمه

شاخص‌های خروج اضطراری خطوط، معیاری برای نشان تأثیر خطوط بر روی سیستم هستند. شاخص‌های احتمالاتی خروج خط برای یک سیستم قدرت براساس عملکرد خطوط تحت شرایط مختلف نشان‌دهنده احتمال نسبی خروج خط است. این امر به اپراتور کمک می‌کند، برخی اقدامات اصلاحی/پیشگیرانه را به منظور جلوگیری از وقوع فروپاشی‌های بزرگ از قبیل اختلالات سیستم (بارگذاری بیش از حد خطوط) و خروج پی‌درپی سیستم انجام دهد.

در مرجع [۱] روشی برای رتبه‌بندی خطوط براساس شاخص‌های عملکرد سیستم تابعی از ولتاژ شین‌ها و جریان‌های خط و محدودیت‌های مربوط ارائه شد. این روش همچنین از قضیه تلگن برای محاسبه حساسیت خطوط استفاده کرده است. در مرجع [۲]، از روش پخش بار مستقیم برای رتبه‌بندی خطوط استفاده شده که از نظر محاسباتی پیچیده‌تر است. در مرجع [۳] یک نسخه بهبودیافته از مرجع [۲] را با ارائه بسط سری تیلور برای تمام متغیرها در شاخص عملکرد خروج خطوط پیشنهاد داده است. در مرجع [۴]، از روش جایگزینی رو به عقب برای محاسبه شاخص عملکرد خروج خط بهره گرفته شده است. در مرجع [۵]، یک رویکرد واحد را برای یافتن حساسیت شاخص عملکرد خروج خطوط با اعمال ترکیبی بار-تولید ارائه شده است. در بیشتر تکنیک‌های رتبه‌بندی ارائه‌شده، روش‌های تحلیلی نشان می‌دهد که رتبه‌بندی با روش‌های تحلیل حساسیت خطوط به‌طور گسترده‌ای مورد پذیرش قرار گرفته است [۶]. شاخص عملکرد توانی به‌عنوان شاخصی برای کمی کردن میزان اضافه‌بار خط برحسب محدودیت‌های توانی استفاده می‌شود. با این حال، شاخص عملکردی ولت آمپر خط بیش از شاخص توان، حساسیت پخش بار خطوط را نشان می‌دهد [۷].

به‌علت متغیر بودن سرعت باد، سرعت توربین‌های بادی مدام در حال تغییر است و از آنجاکه توان خروجی توربین‌های بادی با مکعب سرعت باد متناسب است، تغییرات لحظه‌ای سرعت باد باعث ایجاد نوسانات در توان خروجی توربین بادی می‌شود و این نوسانات به‌شکل تغییر فرکانس در سرتاسر سیستم منعکس می‌شود. به‌صورت سستی سیستم‌های تبدیل‌کننده انرژی بادی در کنترل فرکانس شرکت نمی‌کنند؛ به این معنی که وقتی فرکانس در شبکه زیاد یا کم می‌شود، واحدهای بادی تولید خود را زیاد یا کم نمی‌کنند بلکه با افزایش یا کاهش تولید واحدهای سستی افت یا افزایش فرکانس برای نگه داشتن فرکانس شبکه در محدوده مجاز خود جبران می‌شود. اما با افزایش مشارکت واحدهای تولید بادی در تولید انرژی برای بهبود عملکرد

سیستم، آن‌ها نیز باید در کنترل فرکانس شرکت کنند. کنترل اولیه فرکانس توسط گاورنرهای نصب‌شده بر روی ژنراتورها صورت می‌پذیرد. در مراجع [۸] و [۹] به بررسی کنترل اولیه فرکانس پرداخته و مدل‌هایی برای ساختار کنترل بار فرکانس ارائه داده‌اند. در مرجع [۱۰] سه روش متفاوت کنترل اولیه فرکانس معرفی شده است که توربین بادی را قادر می‌سازد که فرکانس شبکه را در حضور اغتشاش پشتیبانی کند. به این منظور، از روش کنترل گام و روش کنترل انرژی جنبشی استفاده شده که با معرفی ساختارهایی برای کنترل اولیه فرکانس باعث بهبود پاسخ فرکانسی در حضور اغتشاش شده است. در مرجع [۱۱] به‌منظور کنترل اولیه فرکانس، از روش‌های طراحی مبتنی بر منطق فازی برای ژنراتورهای بادی سرعت متغیر بهره گرفته شده و به معرفی یک ناظر مبتنی بر منطق فازی برای کنترل همزمان گشتاور ژنراتور و زاویه گام پرداخته است. در مرجع [۱۲] یک روش برای کنترل توان خروجی توربین‌های بادی و کاهش انحرافات فرکانس با استفاده از تخمین بار پیشنهاد شده به‌نحوی که توان بار توسط یک مشاهده‌گر اغتشاش مرتبه مینی مال تخمین زده می‌شود و فرمان توان توربین بادی متناظر با این تخمین بار با حل یک مسئله بهینه‌سازی تعیین می‌شود. در مرجع [۱۳] نیز کنترل بار فرکانس با استفاده از مشاهده‌گر اغتشاش صورت گرفته است، به این صورت که برای حذف تغییرات آنی تولید توان باد مشاهده‌گر اغتشاش، اغتشاش را از روی حالت‌ها تخمین می‌زند و اثر اغتشاش را حذف می‌کند. انگیزه استفاده از منطق فازی برای تعیین پارامترهای کنترل‌کننده پیشنهادی، بزرگ لحاظ کردن بازه تغییرات پارامترهای سیستم و در نظر گرفتن عوامل غیرخطی است؛ در ضمن این کنترل‌کننده انعطاف‌پذیر بوده و عملکرد مقاومی در برابر تغییر پارامترهای سیستم و عوامل غیرخطی تحت شرایط مختلف تغییر بار از خود نشان می‌دهد و این اجازه را به ما می‌دهد که در کنترل فرکانس و توان بتوانیم از قواعد مبتنی بر دانش انسانی استفاده کنیم. اما مشکل اجتناب‌ناپذیر در طراحی کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی مبتنی بر منطق فازی تنظیم فاکتورها، توابع عضویت و قوانین کنترل براساس آزمون و خطاست. برای حل این مشکل، در مرجع [۱۴] طراحی یک کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی مبتنی بر منطق فازی بهینه را با استفاده از روش بهینه‌سازی جامعه زنبورها برای کنترل بار فرکانس در یک سیستم بادی-دیزلی پیشنهاد می‌دهد. در زمینه بررسی تأثیر مشارکت ژنراتورهای بادی در تنظیم فرکانس سیستم‌های قدرت مقالات زیادی ارائه شده است. در مراجع [۱۵]، [۱۶] و [۱۷] مروری بر کنترل ژنراتورهای القایی تغذیه دوگانه و معرفی ساختار کنترلی داشته و

مد نظر محققان قرار داشته است.

در این مقاله، طرح کنترلی مبتنی بر توربین‌های بادی سرعت متغیر به منظور تنظیم و کنترل فرکانس شبکه قدرت در محدوده مجاز با حضور عدم قطعیت سرعت باد پیشنهاد می‌شود. برای این منظور، با استفاده از کنترل‌کننده کلاسیک تناسبی-انتگرالی نصب‌شده بر روی سیستم کنترل سرعت ژنراتور، عملکرد دینامیک توربین بادی در حضور پیشامدهای سیگنال کوچک ارزیابی می‌شود. در ادامه، با استفاده از تابع هدف پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم ابرمکعب لاتین، پارامترهای کنترلی کنترل‌کننده پیشنهادی با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی هوشمند ازدحام ذرات بهینه می‌شوند. از آنجاکه سیستم قدرت در حضور واحدهای بادی مدام در معرض عدم قطعیت و تغییر پارامتر قرار می‌گیرد، در این مقاله پیشنهاد می‌شود به منظور کنترل تغییرات سرعت توربین‌های بادی، به جای کنترل‌کننده متعارف تناسبی-انتگرالی از کنترل‌کننده پیشنهادی هوشمند استفاده شود که عملکرد مقاوم‌تری نسبت به تغییر پارامترهای سیستم از خود نشان می‌دهد. نتایج نشان‌دهنده بهبود عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی در حضور عدم قطعیت باد است.

۲. طرح کنترل توان در سیستم‌های بادی

توان تولیدشده به وسیله توربین بادی را می‌توان مطابق با رابطه (۱) تعریف نمود؛ به صورتی که رابطه (۲) معرف توان مکانیکی خروجی است.

$$P_{wind} = 0.5 \rho \pi R^2 u^3 \quad (1)$$

$$P_{mech} = C_p P_{wind} \quad (2)$$

$$P_m(u) = 0.5 \times C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 u^3 \quad (3)$$

در روابط فوق، ρ چگالی هوا، R شعاع رتور و u سرعت باد است. همچنین β زاویه گام می‌باشد که در اصل زاویه چرخش پرها حول محور طول پره است. با تغییر این زاویه در واقع زاویه برخورد باد با توربین عوض می‌شود و در نتیجه میزان گشتاور منتقل شده توسط باد به پرها تغییر می‌کند. λ نیز نسبت سرعت نوک یا لبه است که به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود:

$$\lambda = R \omega_{rot} / u \quad (4)$$

ω_{rot} : سرعت زاویه‌ای رتور است. در ضمن C_p ضریب تولید توان توربین است که در واقع نسبت توان خروجی به توان باد است و مشخصه مناسبی برای نشان دادن توانایی توربین بادی در ذخیره انرژی باد است. بیشترین مقدار قابل دسترسی این ضریب حد بتز دارد و برابر است با: $C_{pmax} = (16/27) = 0.593$. این حد بالا برای انواع توربین‌های بادی به کار گرفته می‌شود. ضریب توان

سپس با در نظر گرفتن پاسخ اینرسی، ساختار اصلاح‌شده‌ای ارائه شده است. اخیراً نیز استخراج انرژی جنبشی ذخیره‌شده در سیستم مکانیکی توربین‌های بادی با ژنراتورهای سرعت متغیر موضوع بحث بسیاری از تحقیقات در این زمینه است [۱۹] و [۲۰]. سیستم کنترلی که بر این مبنا عمل کند، این توانایی را به توربین بادی می‌دهد که با سرعت مکانیکی متغیر، توان تولید کند. همچنین استخراج انرژی جنبشی برای پشتیبانی تنظیم فرکانس اولیه نیز در ساختار مدل کنترل در نظر گرفته می‌شود. سرعت توربین‌های بادی مدام در حال تغییر می‌باشد که این تغییر ناشی از تغییر در سرعت باد است و این عدم ثبات سرعت توربین‌های بادی باعث ایجاد نوسانات در توان خروجی توربین بادی می‌شود که این نوسانات به شکل تغییر فرکانس در سرتاسر سیستم منعکس می‌شود.

خلاصه‌ای از مقایسه روش‌های پیشین در جدول (۱) آمده است.

جدول (۱): طبقه‌بندی مقالات مورد بررسی

ردیف	روش	برخط	برون‌خط	شبکه	مبتنی بر مدل	اندازه‌گیری	مبتنی بر	سیگنال محلی	سیگنال سراسری
[۱]	Decision Tree	✓	-	✓	-	-	-	✓	-
[۲]	Unified Residue	✓	-	✓	-	-	-	✓	-
[۳]	Nonsmooth WADC	✓	-	✓	-	-	-	-	✓
[۴]	Adaptive WADC	✓	-	✓	-	-	-	-	✓
[۵]	Fixed WADC	✓	-	✓	-	-	-	✓	-
[۶]	Scheduling WADC	-	✓	✓	-	-	-	✓	-
[۷]	Resilient WADC	✓	-	✓	-	-	-	✓	-
[۸]	H2 norm	-	✓	✓	-	-	-	✓	-
[۹]	Delay Compensation	-	✓	✓	-	-	-	✓	-
[۱۰]	Data-Driven WADC	-	✓	✓	-	-	-	✓	-
[۱۲]	State Feedback	✓	-	✓	-	-	-	✓	-
[۱۳]	Grid-Form Power Converter	-	✓	✓	-	-	-	✓	-
[۱۴]	H _∞ WADC	-	✓	✓	-	-	-	✓	-
[۱۵]	Zero Crossing Point	✓	-	✓	-	-	-	✓	-
[۱۶]	VSG Controller	✓	-	✓	-	-	-	✓	-
[۱۷]	Cross-Gramian Model	✓	-	✓	-	-	-	✓	-
[۱۸]	variable speed wind turbines	✓	-	✓	-	-	-	✓	-
[۱۹]	Dynamic frequency	✓	-	✓	-	-	-	✓	-
[۲۰]	wind energy conversion sys	-	✓	✓	-	-	-	✓	-

مطابق با جدول (۱)، سهم زیادی از مراجع مورد بررسی، از روش‌های مبتنی بر مدل شبکه استفاده کرده‌اند. همچنین استفاده از روش‌های برون‌خط و سیگنال محلی از دیگر مواردی بوده که

تک ناحیه‌ای با اختلال‌های کوچک را نشان می‌دهد که به منظور تولید انرژی از واحدهای سستی و بادی به صورت همزمان استفاده می‌کند. واحد سستی شامل پارامترهایی نظیر ضریب میرایی بار D ضریب ثابت R که به ضریب تنظیم سرعت یا دروپ موسوم است، ثابت اینرسی H و ثابت زمانی گاورنر و توربین T_t و T_h است. ضریب تنظیم سرعت نیز مربوط به عملکرد گاورنر است [۱۹]. واحد بادی نیز شامل یک DFIG است. رفتار سیستم به انتخاب پارامترهای شبکه و ضرایب کنترل کننده سرعت توربین بادی DFIG که مقادیر kW_p و kW_i هستند، بستگی دارد.

در شکل (۲)، به منظور استخراج بیشینه توان از باد، عملکرد کنترلی DFIG به قسمی است که سرعت زاویه‌ای رتور اندازه‌گیری شده و برای کنترل توربین بادی به منظور عملکرد در سرعت متناظر با استخراج بیشینه توان استفاده می‌شود. هر تغییری در سرعت رتور باعث تغییر در توان مرجع می‌شود. توان مرجع توسط منحنی مشخصه رتور برای استخراج بیشینه توان تعیین می‌شود [۷]. معادله حالت سیستم نشان داده شده در شکل (۲) به صورت (۸) ارائه می‌شود.

$$\dot{\underline{x}} = A \underline{x} + \Gamma \underline{P}$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_h} & \frac{-1}{RT_h} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_t} & \frac{-1}{T_t} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_p}{T_p} & \frac{-1}{T_p} & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{k_p}{T_p} \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_r} & \frac{-1}{T_r} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_r} & \frac{-1}{T_r} & \frac{-1}{T_w} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -k_{w_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2H_e} & \frac{-1}{2H_e} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{RT_a} & \frac{-1}{T_a} & \frac{k_{w_p}}{T_a} & \frac{-1}{T_a} \end{bmatrix}$$

$$\underline{P} = [0 \quad 0 \quad \Delta P_D \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$$

$$\Gamma = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-k_p}{T_p} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

معمولاً توسط سازنده‌ها در اختیار قرار می‌گیرد و تابعی از زاویه گام و نسبت سرعت نوک است. تاکنون ضریب توان بهینه توربین‌های پیشرفته سه تیغه‌ای تا حد $0.52-0.55$ نیز گزارش شده است [۱]. رابطه گشتاور چرخشی یا گشتاور آیرودینامیکی توربین برحسب سرعت باد به صورت روابط ذیل است:

$$T_{rot} = \frac{P_{rot}}{\omega_{rot}} = \frac{1}{2\omega_{rot}} \rho \pi R^2 u^3 C_p(\beta, \lambda) \quad (5)$$

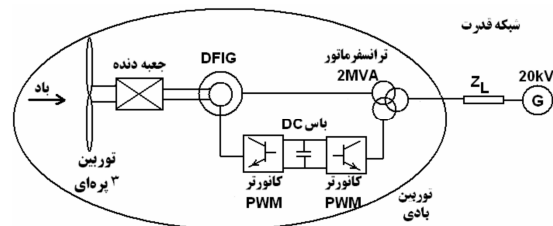
$$T_{rot} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 u^2 C_Q(\beta, \lambda) \quad (6)$$

در روابط فوق، C_Q ضریب گشتاور است و به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود:

$$C_Q = C_p / \lambda \quad (7)$$

۱.۲ سیستم‌های تبدیل کننده انرژی باد بر مبنای ژنراتور DFIG

این نوع آرایش مربوط به توربین‌های سرعت متغیر با مبدل فرکانسی با ظرفیت کسری است که در شکل (۱) نشان داده شده است.

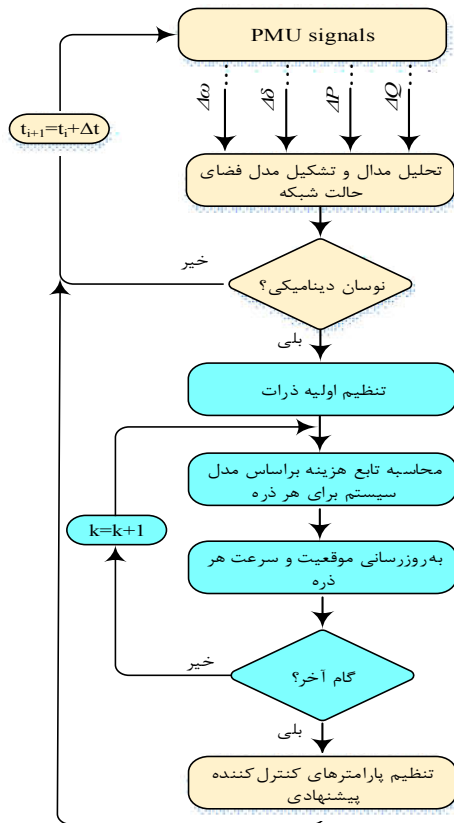


شکل (۱): ساختمان توربین بادی نوع DFIG [۷]

ظرفیت مبدل فرکانسی با ظرفیت کسری حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد توان نامی ژنراتور است و این امر باعث کاهش قیمت مبدل‌ها می‌شود. این مبدل کنترل توان حقیقی را انجام می‌دهد و می‌توان راکتیو و ضریب توان را نیز به وسیله آن کنترل کرد و در ضمن اتصال به شبکه هموارتری را به دست می‌دهد. با استفاده از این نوع توربین‌ها در بیشتر مواقع، بیشینه توان مکانیکی ممکن، از باد قابل جذب است و این امر بازده سیستم را به صورت قابل توجهی افزایش می‌دهد. مزیت دیگر این نوع توربین‌ها، هزینه کم فیلترهاست. در این آرایش، ژنراتور از طریق یک مبدل فرکانسی توان کامل به شبکه متصل است. مبدل فرکانسی، علاوه بر کنترل سرعت و توان حقیقی ژنراتور، جریان‌سازی توان راکتیو را نیز انجام می‌دهد و اتصال به شبکه هموارتری را به دست می‌دهد. از مزایای این روش این است که سطح ولتاژ و توان راکتیو می‌توانند توسط کانورتورهای الکترونیک قدرت تنظیم شوند.

۲.۲ تنظیم فرکانس سیستم تک ناحیه‌ای در حضور توربین بادی با ژنراتور DFIG

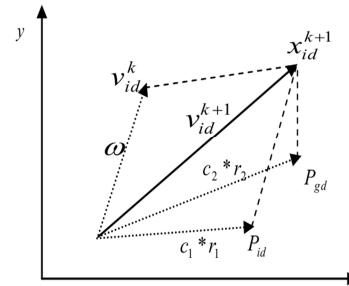
شکل (۲) بلوک دیاگرام ساختار تنظیم فرکانس سیستم قدرت



شکل (۴): طرح‌واره پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم PSO

۴. نتایج مدل‌سازی کنترل‌کننده پیشنهادی مبتنی بر PSO

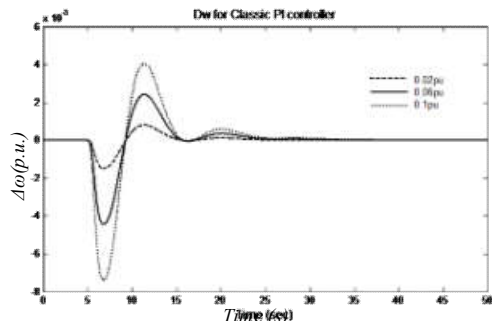
مشکل اجتناب‌ناپذیر در طراحی کنترل‌کننده‌های کلاسیک تنظیم ضرایب آن به روش سعی و خطاست که این امر وقت زیادی از طراحان را به خود اختصاص می‌دهد و با وجود واحدهای بادی در سیستم‌های قدرت که تغییر پارامترهای بیشتری را به سیستم تحمیل می‌کند، باعث می‌شود کارایی سیستم کنترل به‌شدت پایین آید. استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی هوشمندی مانند الگوریتم ازدحام ذرات راهکار مناسبی برای غلبه بر این مشکل است. در این قسمت به منظور بهینه‌سازی تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده، استفاده از این الگوریتم پیشنهاد می‌شود. در ادامه سیستم با کنترل‌کننده بهینه شبیه‌سازی شده و نتایج با سیستم شبیه‌سازی شده با کنترل‌کننده کلاسیک مقایسه می‌شود. کنترل‌کننده متعارف دارای دو پارامتر ضریب تناسبی و ضریب انتگرالی K_p و K_i است که باید به‌نحو مناسبی تنظیم شوند تا معیارهای عملکردی مورد نظر طراح را برآورده سازند. معادلات حالت سیستم مطابق با رابطه (۱۴) توصیف می‌شود.



شکل (۳): طرح‌واره برداری روابط الگوریتم PSO

پارامترهای قابل تنظیم در PSO، تعداد ذرات m فاکتور اینرسی ω ، فاکتورهای آموزش C_1 و C_2 و حداکثر تعداد تکرار N هستند. طبق روابط ذکر شده، هر ذره حرکت خود را در جهت ثابت تا زمانی ادامه می‌دهد که از محدوده وضعیت ذره خارج شود؛ بنابراین الگوریتم تنها در صورتی پاسخ قابل قبولی ارائه می‌دهد که در مسیر حرکت ذره پاسخ مناسبی موجود باشد. در واقع با توجه به رابطه می‌توان گفت که سرعت ذره بدون در نظر گرفتن جمله اول، تنها به موقعیت فعلی و بهترین موقعیت قبلی ذره و گروه بستگی دارد؛ بنابراین اگر ذره‌ای در ابتدا دارای بهترین موقعیت سرتاسری باشد، این ذره با سرعت صفر حرکت می‌کند و یا به عبارتی در همان وضعیت باقی می‌ماند تا سایر ذرات هم به وضعیت بهینه خود برسند. بنابراین بدون در نظر گرفتن جمله اول، تمام ذرات به طرف وضعیت مشابهی حرکت می‌کنند؛ یعنی تولید نسل تصادفی است که منطبقاً مورد جست‌وجو را محدود می‌کند و تنها زمانی که بهینه سرتاسری در ناحیه جست‌وجوی اولیه باشد، شانس یافتن پاسخ وجود دارد و پاسخ نهایی تا حد زیادی به تخمین اولیه وابسته است. سپس با افزودن جمله اول، ناحیه جست‌وجو افزایش و به جست‌وجوی نقطه بهینه سرتاسری نزدیک‌تر می‌شود. طرح‌واره پیشنهادی مبتنی بر الگوریتم PSO در شکل (۴) نشان داده شده است.

K_p	K_i	ΔP_D	t_d (sec)
۱۲/۳۲	۴/۳	۰/۰۲	۵
۱۲/۳۲	۴/۳	۰/۰۶	۵
۱۲/۳۲	۴/۳	۰/۱	۵



شکل (۵): سرعت توربین بادی به ازای بار ۰/۰۲، ۰/۰۶ و ۰/۱ پروینت

همان‌طور که در شکل (۵) نشان داده شده، با افزایش تغییرات بار بیک کنترل‌کننده نیز افزایش می‌یابد که امری واضح است. برای بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده با استفاده از روش PSO ابتدا باید یک معیار بهینه‌سازی تعریف شود.

انتگرال مربع خطا، معیار مناسبی برای کاهش خطا در الگوریتم بهینه‌سازی است.

$$J = \int_{t_0}^{t_f} e^2(t) dt = \int_{t_0}^{t_f} \Delta\omega^2(t) dt \quad (۱۶)$$

مراحل بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده با استفاده از الگوریتم PSO به صورت زیر است:

۱. ابتدا باید مقادیر پارامترهای روش PSO تعیین گردد. این مقادیر شامل تعداد ذرات یا تعداد پرندگان n ، تعداد تکرار یا گام‌ها ω ، فاکتورهای آموزش c_1 و c_2 و پارامتر اینرسی ω است؛

۲. مکان اولیه ذرات و سرعت اولیه آن‌ها در این مرحله تعیین می‌شود؛

۳. تعیین مقدار اولیه پارامترهای بهینه‌سازی $a_1 = K_p$ و $a_2 = K_i$ ؛

۴. تعیین هزینه اولیه ذرات براساس معیار ISE با کمک شبیه‌سازی و محاسبه انتگرال مربع خطا؛

۵. شروع حلقه تکرار PSO برای رسیدن به پارامترهای بهینه؛

۶. اتمام گام‌های بهینه‌سازی و محاسبه پارامترهای بهینه کنترل‌کننده PI.

$$\dot{x} = Ax + Bu + LP$$

$$x = [\Delta P_h \ \Delta P_g \ \Delta f \ \Delta X_1 \ \Delta X_2 \ \Delta w \ \Delta P_{NC}]^T$$

$$u = k_{wp} \Delta w + k_{wi} \int \Delta w dt$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_h} & 0 & -\frac{1}{RT_h} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_t} & -\frac{1}{T_t} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{k_p}{T_p} & -\frac{1}{T_p} & 0 & 0 & 0 & \frac{k_p}{T_p} \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_r} & -\frac{1}{T_r} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_r} & -\frac{1}{T_r} & -\frac{1}{T_w} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2H_e} & -\frac{1}{2H_e} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{RT_a} & 0 & -\frac{1}{T_a} \end{bmatrix} \quad (۱۴)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{T_a} \end{bmatrix}^T$$

$$P = \Delta P_D$$

$$L = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{k_p}{T_p} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T$$

معادلات فضای حالت سیستم در حالت کلی با دو ورودی u

و ΔP_D و یک خروجی $\Delta\omega$ به صورت رابطه (۱۵) تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \bar{A}x + \bar{B}[u, \Delta P_D]^T \\ y &= \bar{C}x + \bar{D}[u, \Delta P_D]^T \\ \bar{A} &= A \\ \bar{B} &= [B, L] \\ \bar{C} &= [0, 0, 0, 0, 0, 1, 0] \\ \bar{D} &= [0, 0] \end{aligned} \quad (۱۵)$$

ورودی u همان خروجی کنترل‌کننده بوده و ورودی ΔP_D تغییر بار یا به تعبیری اغتشاش وارد شده به سیستم است. معادلات فوق برای شبیه‌سازی سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرند.

به منظور ارزیابی توانایی طرح پیشنهادی در میراسازی نوسانات دینامیکی شبکه، عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی به ازای تغییرات بار ۰/۰۲، ۰/۰۶ و ۰/۱ پروینت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی سیستم با استفاده از کنترل‌کننده کلاسیک برای کنترل تغییرات سرعت توربین بادی و در نظر گرفتن ورودی اغتشاش (تغییر بار) به صورت ورودی پله‌ای که در زمان $t_d = 5 \text{ sec}$ وارد می‌شود، در شکل (۵) نشان داده شده است.

جدول (۱): اطلاعات شبیه‌سازی

۱.۴. نتایج شبیه سازی کنترل کننده بهینه سازی شده با

الگوریتم PSO

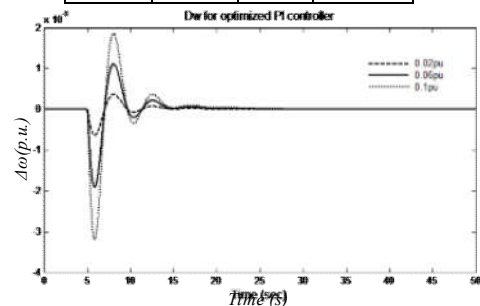
سیستم تحت مطالعه، با در نظر گرفتن کنترل کننده بهینه PSO، به ازای تغییر بار ۰/۰۲ پریونیت طراحی شده و برای تغییر بارهای مختلف اجرا شده است و نتایج با کنترل کننده کلاسیک مقایسه شده است. نتایج شبیه سازی در شکل (۶) قابل مشاهده است. پارامترهای انتخابی الگوریتم PSO در جدول (۲) نشان داده شده است. جدول (۳) نیز معرف مقادیر بهینه شده پارامترهای K_p و K_i می باشد که طی ۵۰ بار تکرار الگوریتم به دست آمده است. شایان ذکر است که تنظیم پارامترها توسط PSO برای تغییر بار ۰/۰۲ پریونیت اجرا شده است.

جدول (۲): پارامترهای انتخابی الگوریتم PSO

اینرسی ω	آموزش c_2	آموزش c_1	بعد	گامها	پرندهگان (n)
۰/۹	۱/۲	۰/۱۲	۲	۵۰	۵۰

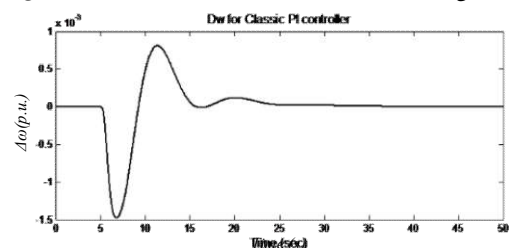
جدول (۳): اطلاعات شبیه سازی

K_p	K_i	ΔP_D	t_d (sec)
۶۸۲/۹۱	۳۰۰/۰۶	۰/۰۲	۵
۶۸۲/۹۱	۳۰۰/۰۶	۰/۰۶	۵
۶۸۲/۹۱	۳۰۰/۰۶	۰/۱	۵

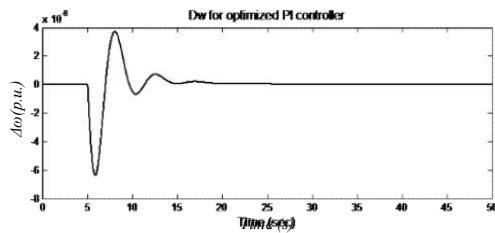


شکل (۶): نمودار تغییرات سرعت توربین بادی- زمان برای کنترل کننده بهینه به ازای تغییر بار ۰/۰۲، ۰/۰۶، ۰/۱ پریونیت

به منظور نشان دادن بهتر بهبود نتایج حاصل از کنترل کردن تغییرات سرعت توربین بادی با کنترل کننده بهینه سازی شده با الگوریتم PSO نسبت به کنترل کننده کلاسیک نتایج شبیه سازی به ازای تغییر بار ۰/۰۲ پریونیت در کنار هم در شکل (۷) رسم شده که این امر با مقایسه شکل های (۵) و (۶) نیز برای سایر تغییرات بار محقق می شود.



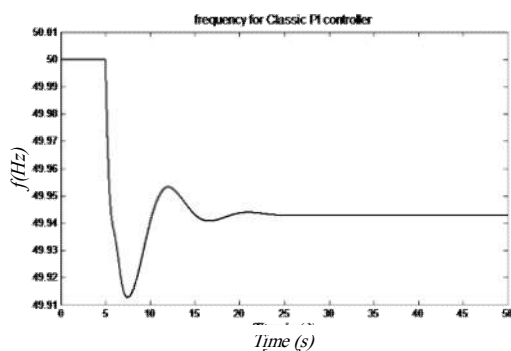
(الف)



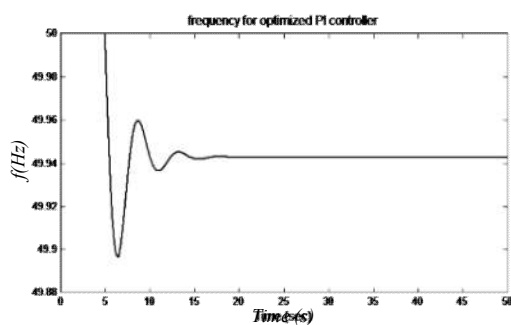
(ب)

شکل (۷): مقایسه نمودار تغییرات سرعت توربین بادی- زمان برای کنترل کننده بهینه و کلاسیک به ازای تغییر بار ۰/۰۲ پریونیت

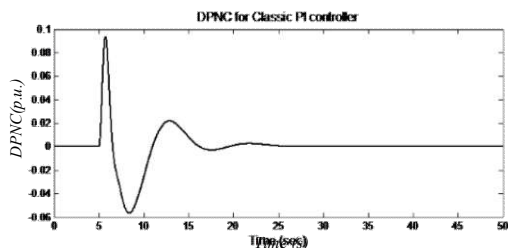
همان طور که در شکل (۷) نشان داده شده، پیک خطای کنترل کننده کلاسیک در ابعاد $1/5 \times 10^{-3}$ است؛ در حالی که پیک خطای کنترل کننده بهینه سازی شده با الگوریتم PSO در ابعاد 7×10^{-6} می باشد و بسیار کوچک تر است. پس واضح است که بهینه سازی تنظیم پارامترهای کنترل کننده توسط الگوریتم ازدحام ذرات یا PSO توانسته به نحو مطلوبی نتایج کنترل کننده سرعت توربین بادی را بهبود بخشد. در شکل (۸-الف تا د) نمودار فرکانس با در نظر گرفتن کنترل کننده کلاسیک و بهینه برای کنترل سرعت توربین بادی به ازای تغییر بارهای ۰/۰۲ و ۰/۱ پریونیت رسم شده است.



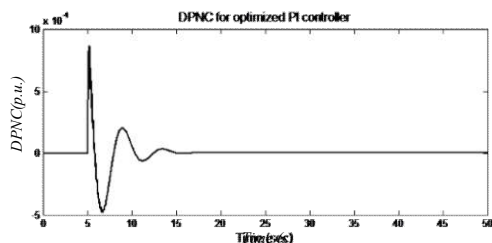
(الف)



(ب)

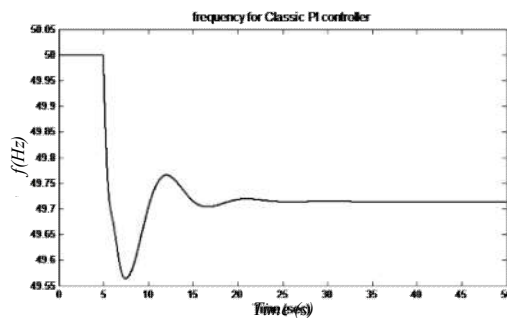


(الف)

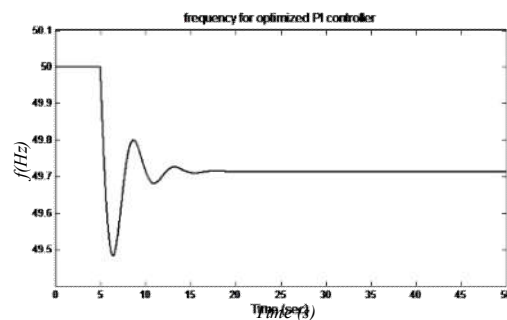


(ب)

شکل (۹): عملکرد کنترل کننده به ازای تغییرات توان واحدهای بادی (الف) کنترل کننده کلاسیک؛ (ب) کنترل کننده بهینه



(ج)



(د)

شکل (۸): نمودار فرکانس با در نظر گرفتن کنترل کننده کلاسیک و بهینه کنترل سرعت توربین بادی به ازای تغییرات بار (الف) کنترل کننده کلاسیک و بار ۰/۰۲ پریونیت؛ (ب) کنترل کننده بهینه و بار ۰/۰۲ پریونیت؛ (ج) کنترل کننده کلاسیک و بار ۰/۱ پریونیت؛ (د) کنترل کننده بهینه و بار ۰/۱ پریونیت

نکته قابل توجه در تغییرات توان تولیدشده توسط واحدهای بادی بدین صورت است که با در نظر گرفتن کنترل کننده بهینه، تزریق توان در شبکه به شکل قابل ملاحظه‌ای کم شده که این امر گویای توانایی مناسب کنترل کننده بهینه در بهبود عملکرد کنترلی در شبکه است.

۲.۴ مقایسه کنترل کننده پیشنهادی با روش‌های پیشین

در این بخش، به منظور ارزیابی اثربخشی کنترل کننده پیشنهادی، یک مطالعه مقایسه‌ای جامع بین رویکرد پیشنهادی و چند مطالعه اخیر که در جدول (۱) خلاصه شده‌اند، بررسی شده است. در مورد ارزیابی نتایج مناسب، با در نظر گرفتن سناریوی خطای مشابه معرفی شده در بخش ۱.۴، رفتار دینامیکی سیستم و عملکرد میرایی کنترل کننده‌ها بررسی شده است. نتایج مقایسه کنترل کننده پیشنهادی با روش‌های پیشین در جدول (۴) نشان داده شده است.

مطابق با جدول (۴)، کنترل کننده پیشنهادی نتایج بهتری را به ازای سناریو خطای یکسان به همراه دارد. مزیت اصلی کنترل کننده پیشنهادی استفاده از سیگنال فازوری برخط و عدم وابستگی به مدل شبکه بوده که منجر به کاهش تنظیمات هزینه و پیچیدگی شده و می‌توان از آن در طیف گسترده‌ای از برنامه‌ها استفاده کرد. همچنین، در مقایسه، اکثر روش‌های پیشین نیازمند دوره زمانی میراسازی بالا و وابستگی زیاد به ماتریس امپدانس سیستم هستند.

جدول (۴): مقایسه کنترل کننده پیشنهادی با روش‌های پیشین

در مقایسه کنترل کننده کلاسیک و بهینه می‌توان گفت که با در نظر گرفتن کنترل کننده بهینه برای کنترل سرعت توربین بادی فرکانس با سرعت بیشتری به مقدار ثابتی رسیده است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، هنگامی که انحراف فرکانسی در سیستم قدرت به وجود می‌آید، سرعت رتور کاهش پیدا می‌کند. بنابراین کنترل کننده سرعت به کنترل سرعت توربین می‌پردازد. از طرفی با توجه به اینکه ژنراتورهای DFIG واحدهای تولید انرژی بادی توانایی تزریق سریع توان اکتیو به شبکه را دارند، با تزریق سریع توان یک کنترل فرکانس اولیه را انجام می‌دهد و باعث کاهش نرخ تغییرات فرکانس می‌شود. تغییرات تولیدشده توسط واحدهای بادی در شکل (۹-الف و ب) نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که به محض ایجاد انحراف در فرکانس واحد بادی با وجود DFIG به سرعت برای جبران آن به منظور کنترل فرکانس به شبکه توان تزریق می‌کند.

ردیف	روش	(p.u.)	شاخص معیار	تعداد مورد نیاز	میانگین	انحراف استاندارد	شبکه های بزرگ؟
[۱]	Decision Tree	۰/۸۰۵۶	۵	خیر	متوسط	بله	
[۲]	Unified Residue	۰/۶۱۵۲	۶	بالا	متوسط	خیر	
[۳]	Nonsmooth WADC	۰/۶۵۳۲	۵	متوسط	بالا	خیر	
[۴]	Adaptive WADC	۰/۳۶۵۸	>۱۰	خیر	متوسط	بله	
[۵]	Fixed WADC	۰/۷۵۴۹	۵	بالا	متوسط	بله	
[۶]	Scheduling WADC	۰/۷۹۸۴	۷	متوسط	بالا	خیر	
[۷]	Resilient WADC	۰/۵۹۶۲	۸	متوسط	بالا	خیر	
[۸]	H2 norm	۰/۶۳۹۷	>۱۰	متوسط	بالا	خیر	
[۹]	Delay Compensation	۰/۴۶۷۶	>۱۰	متوسط	متوسط	بله	
[۱۰]	Data-Driven WADC	۰/۶۸۴۹	۶	خیر	متوسط	خیر	
[--]	طرح کنترلی پیشنهادی	۱/۱۲۳	۲	خیر	کم	بله	

خطاست.
مزایای کنترل کننده پیشنهادی را می توان به صورت ذیل عنوان نمود:

۱. اندازه گیری لحظه ای توان توربین بادی مبتنی بر سیگنال فازوری برخط؛
۲. تعیین بهینه پارامترهای کنترلی تحت شرایط مختلف نوسان در شبکه مبتنی بر الگوریتم PSO و LHS؛
۳. تعیین مدل دقیق فضای حالت شبکه در حضور منابع بادی؛
۴. تعیین متغیرهای تأثیرگذار در مدل فضای حالت شبکه در کنترل توان توربین بادی؛
۵. طرح کنترل تطبیقی توان توربین بادی به ازای تغییر شرایط بهره برداری و در شرایط نوسان توان توربین بادی.

نتایج نشان داده است با حضور کنترل کننده پیشنهادی، فرکانس با سرعت بیشتری به مقدار ثابتی رسیده و توان تزریق شده به شبکه نیز کمتر از کنترل کننده کلاسیک بوده است. برای تنظیم پارامترهای کنترل کننده، الگوریتم بهینه سازی به ازای تغییر بارهای مختلف اجرا گردید. نتایج به دست آمده همچنین نشان دهنده میرایی مطلوب کنترل کننده پیشنهادی به ازای تغییرات بارهای مختلف نیز بوده است. در بحث مطالعات آینده، حضور منابع با اینرسی کم مبتنی بر اینورتر و توسعه سیستم های AC/DC دو چالش مهم در پایداری سیستم های قدرت شناخته می شوند. برای این موضوع، با توجه به منابع اینورتری، اینرسی معادل سیستم کاهش می یابد که منجر به مسائل ناپایداری گذرا در کل سیستم قدرت می شود. همچنین، پاسخ فرکانسی متناظر این سیستم های اینرسی پایین، بزرگ تر از مرزهای مجاز است که ناپایداری های گذرا فرکانس را از طریق رویدادهای خطا فراهم می کند. بنابراین، در مورد توسعه طرح پیشنهادی از طریق سیستم های اینرسی پایین، ارزیابی پاسخ های گذرا و فرکانس سیستم برای جلوگیری از خاموشی های بزرگ مهم است. در این مورد، طرح کنترلی در یک سیستم مجموعه ای از توربین بادی همچنان به عنوان یک موضوع مهم باقی می ماند که باید مورد بررسی قرار گیرد. همچنین، از طریق سیستم های قدرت AC/DC، در نظر گرفتن خطوط انتقال HVDC پیچیدگی بیشتری را از طریق طرح های کنترلی فراهم می کند. در این حالت، اگر این خطوط HVDC به عنوان یک مرز در نظر گرفته شود، سیستم کنترل مربوطه پیچیده تر می شود. بنابراین، بررسی عملکرد پیوندهای HVDC و طرح های کنترل فرکانس و کنترل توان توربین بادی می تواند موضوعی جالب توجه بوده و در مطالعات آتی مد نظر قرار داشته باشد.

در این حالت، عملکرد کنترکننده به شدت به شرایط بهره برداری و ساختار توپولوژیکی شبکه بستگی دارد و در صورت تغییر شرایط بهره برداری، نیازمند به روزرسانی پارامترهای کنترلی است. از آنجاکه در کنترل کننده پیشنهادی از یک رویکرد برخط مبتنی بر سیگنال های اندازه گیری فازوری بهره گرفته شده است، می توان از آن به راحتی در سیستم های قدرت گوناگون با هزینه ها و پیچیدگی های کمتر بهره گرفت.

۵. نتیجه گیری

این مقاله به روشی به منظور کنترل بار فرکانس در شبکه در حضور توربین های بادی سرعت متغیر و تنظیم بهینه پارامترهای کنترل کننده به منظور عملکرد بهینه کنترل فرکانس در حضور عدم قطعیت باد، انجام گرفت. برای این منظور، مدل فضای حالت در حضور واحدهای بادی ارائه شده و سیستم مورد نظر با استفاده از کنترل کننده کلاسیک در حضور اغتشاش های کوچک شبیه سازی گردید. از آنجاکه توان خروجی تولیدات بادی دارای نوسان است، تغییرات بار کلی سیستم ناشی از تغییرات بار واقعی و تغییر در تولید واحدهای بادی می باشد. در زمینه عدم قطعیت حضور واحدهای بادی، با طراحی کنترل کننده مطلوب، تغییرات بار در گستره بیشتر دنبال می شود. برای بهینه سازی پارامترهای کنترل کننده از الگوریتم هوشمند ازدحام ذرات استفاده گردید. نتایج سیستم قدرت با در نظر گرفتن کنترل کننده بهینه شده تغییرات سرعت توربین بادی، نشان دهنده کنترل بهینه سرعت توربین بادی در شرایط مختلف بهره برداری و پیشامد

جدول اختصارات	
حد اکثر تعداد تکرار	N
تعداد ذرات	n
بهترین محل یا p_{best} برای ذره i ام در تکرار k ام	P_{id}
بهترین محل یا g_{best} برای ذره i ام در تکرار k ام	P_{gd}
شعاع رتور	R
ضریب تنظیم سرعت یا دروپ	R
اعداد تصادفی در بازه (۰،۱)	r_2 و r_1
ثابت زمانی گاورنر	T_h
ثابت زمانی توربین	T_t
سرعت باد	u
سرعت زاویه‌ای رتور	ω_{rot}
فاکتور اینرسی	ω
سرعت ذره i ام در تکرار k ام	$vid(k)$
موقعیت ذره i ام در تکرار k ام	$x_{id}(k)$

جدول متغیرها	
ρ	چگالی هوا
β	زاویه گام
λ	نسبت سرعت نوک یا لبه
\underline{P}	بردار اغتشاش یا تغییر بار
A	ماتریس حالت
Γ	ماتریس اغتشاش
c_2 و c_1	فاکتورهای آموزش
C_p	ضریب تولید توان توربین
C_Q	ضریب گشتاور
D	ضریب میرایی بار
H	ثابت اینرسی
K_p	ضریب تناسبی
K_i	ضریب انتگرالی
kw_i و kw_p	ضرایب کنترل کننده سرعت توربین بادی

پیوست ۱: پارامترهای سیستم	
Th=0.1;	Sec
Tt=1;	Sec
R=3;	Hz/PU.MW
kp=62;	HZ/PU
Tp=10;	Sec
Tr=0.1;	Sec
Tw=6;	Sec
He=3;	PU. MW.sec
Ta=0.2;	Sec

مراجع

- [1] Ranjbar, S., Aghamohammadi M. R., Haghjoo F., "A new scheme of WADC for damping inter-area oscillation based on cart technique and thevenine impedance", International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Vol. 94, No.2, pp. 339-353, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.07.010>.
- [2] Qi, J., Wu, Q., Zhang Y., Weng G., Zhou D., "Unified residue method for design of compact wide-area damping controller based on power system stabilizer", Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, Vol. 8, No. 2, pp. 367-376, <https://doi.org/10.35833/MPCE.2018.000370>
- [3] Mou, Q., Ye, H., Liu, Y., "Nonsmooth optimization-based wadc tuning in large delayed cyber-physical power system by interarea mode tracking and gradient sampling", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 34, No. 1, pp. 668-679, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2867739>.
- [4] Ranjbar, S., "STATCOM-based intelligent wide-area controller for damping interarea oscillation", IEEE Systems Journal, Vol. 17, No.03, <https://doi.org/10.1109/JSYST.2023.3263889>.
- [5] Bento, M., "Fixed wide-area damping controller considering time delays and power system operation uncertainties," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 35, No. 5, pp.3918-3926, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2020.2978426>.
- [6] Zhou, Y., Liu, L., Li, Y., Gan, C., Li, H., Liu, Y., "A gain scheduling wide-area damping controller for the efficient integration of photovoltaic plant", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 34, No. 3, pp. 1703-1715, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2018.2879987>.
- [7] Shen, Y., Yao, W., Wen, J., Jiang, L., "Resilient

- wide-area damping control using grhdp to tolerate communication failures*", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 10, No. 3, pp. 2547-2557, <https://doi.org/10.1109/TSG.2018.2803822>.
- [8] Naguru, N., Sarkar, R., "Practical supplementary controller design for the bi-layer WAC architecture through structurally constrained H2 norm optimization", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 13, No. 7, pp. 1095-1103, <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.5442>.
- [9] Ranjbar, S., "Adaptive criteria of estimating power system separation times based on inter-area signal", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol.17, No.3, pp.573-588, <https://doi.org/10.1049/gtd2.12750>.
- [10] Shi, X., Cao, Y., Shahidehpour M., Li, Y., Wu, X., Li, Z., "Data-Driven wide-area model-free adaptive damping control with communication delays for wind farm", IEEE Transactions on Smart Grid, Vol. 11, No. 6, pp. 5062-5071, <https://doi.org/10.1109/TSG.2020.3001640>.
- [11] Surinkaew, T., Shah, R., Nadarajah, M., Muyeen, S.M., "Forced oscillation damping controller for an interconnected power system", IET Generation, Transmission & Distribution, Vol. 14, No. 2, pp. 339-347, <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1115>.
- [12] Naguru, N., Ganapavarapu Y., "Design of a limited state feedback wide-area power system damping controller without communication channels", IEEE Access, Vol. 8, pp.160931-160946, 2020. <https://doi.org/10.1109/access.2020.3021599>.
- [13] Baltas, G.N., Lai, N.B., Marin L., Tarrasó A., Rodriguez P., "Grid-forming power converters tuned through artificial intelligence to damp subsynchronous interactions in electrical grids", IEEE Access, vol. 8, pp. 93369-93379, <https://doi.org/10.1109/access.2020.2995298>
- [14] Ranjbar, S., "Online estimation of controlled islanding time intervals using dynamic state trajectories through cascading failures from WAMS data", Electric Power Systems Research, Vol. 214, Part A, pp. 584-596, <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108890>.
- [15] Ranjbar, S., Al-Sumaiti A., Sangrody R., Byon Y., Marzband M., "Dynamic clustering-based model reduction scheme for damping control of large power systems using series compensators from wide area signals", International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol. 131, <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107082>.
- [16] Wang, W., Jiang, L., Cao, Y., Li, Y., "A parameter alternating VSG controller of VSC-MTDC systems for low frequency oscillation damping", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 35, No. 6, pp. 4609-4621, <https://doi.org/10.1109/tpwrs.2020.2997859>.
- [17] Ghosh, S., Isbeih, Y. J., El Moursi, M. S., El-Saadany E. F., "Cross-Gramian model reduction approach for tuning power system stabilizers in large power networks", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 35, No. 3, pp. 1911-1922, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2019.2924495>.
- [18] Ranjbar, S., "Wide area voltage sag control in transmission lines using modified UPFC", Electr Eng, Vol. 19, No. 2, pp. 2675-2685, <https://doi.org/10.1007/s00202-023-01846-y>.
- [19] De Almeida, R.G., Peças Lopes, J.A., "Participation of doubly fed induction wind generators in system frequency regulation", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 22, No. 3, pp. 278-301, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2007.901096>.
- [20] Mauricio, J.M., Marano, A., Expósito, A.G., Martínez, J.L., "Frequency regulation contribution through variable-speed wind energy conversion systems", IEEE Trans. on Power Systems., Vol. 24, No. 1, pp. 125-139, <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2008.2009398>.