



کنترل زاویه گام یک توربین بادی توان بالا توسط کنترل کننده PID مرتبه کسری بهینه

امیرحسین اصغرینیا¹، رضا شهنازی^{2*}، علی جمالی³

1- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

2- استادیار، مهندسی برق، دانشگاه گیلان، رشت

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

* رشت، صندوق پستی 416353756، shahnazi@guilan.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 11 دی 1395

پذیرش: 19 بهمن 1395

ارائه در سایت: 14 اسفند 1395

کلید واژگان:

توربین بادی

کنترل زاویه گام پره‌های توربین

کنترل کننده مرتبه کسری

بهینه‌سازی

چکیده

در این مقاله کنترل کننده تناسبی، انتگرال گیر و مشتق گیر مرتبه کسری (PID مرتبه کسری) بهینه برای کنترل زاویه گام توربین بادی از نوع فراساحلی با توان 5 مگاوات پیشنهاد شده است. این کنترل کننده در سرعت‌هایی بیش از سرعت نامی توربین فعال می‌شود تا با تنظیم زاویه حمله پره‌های توربین بادی، سرعت زاویه‌ای ژنراتور و در نتیجه توان توربین را در مقادیر نامی نگاه دارد. از سویی چون نامعینی در مدل برای کاربردهای واقعی اجتناب‌ناپذیر است، کنترل کننده پیشنهادی نیاز به دانستن مدل توربین ندارد. برای یافتن متغیرهای کنترل کننده PID مرتبه کسری، تابع هدفی مرکب پیشنهاد شده است که حاصل جمع قدر مطلق سیگنال خطا و قدر مطلق نرخ سیگنال کنترلی در سه سرعت باد مختلف در ابتدا، میانه و انتهای بازه خواهد بود. بدین ترتیب کنترل کننده طراحی شده قادر خواهد بود تا در تمام سرعت‌های باد، عملکرد مطلوبی داشته باشد و نیاز به کنترل کننده‌های پیچیده و غیرخطی را مرتفع سازد. تابع هدف تعریف شده توسط سه الگوریتم تکامل تفاضلی، الگوریتم کرم شیتاب و الگوریتم ازدحام ذرات مورد کمینه‌سازی قرار می‌گیرد. در ادامه برای ارزیابی قوام کنترل کننده PID مرتبه کسری طراحی شده و مقایسه آن با کنترل کننده PID مرتبه صحیح بهینه، توربین بادی تحت پروفیل‌های باد با سرعت‌ها و نوسانات مختلف قرار می‌گیرد. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهند که کنترل کننده PID مرتبه کسری عملکرد و قوام بهتری در تنظیم کردن سرعت و توان ژنراتور نسبت به کنترل کننده PID مرتبه صحیح بهینه از خود نشان می‌دهد.

Pitch Angle Control of a High-Power Wind Turbine Using Optimal Fractional-order PID Controller

Amirhossein Asgharnia¹, Reza Shahnazi^{2*}, Ali Jamali¹

1- Department of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

2- Department of Electrical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

* P.O.B. 416353756, Rasht, Iran, shahnazi@guilan.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 31 December 2016

Accepted 07 February 2017

Available Online 04 March 2017

Keywords:

Wind turbine

Pitch control

Fractional order controller

Optimization

ABSTRACT

In this paper, an optimal Fractional-order Proportional-Integral-Derivative (FOPID) controller is proposed to control an offshore 5MW wind turbine's pitch angle in above rated speed. The proposed pitch controller regulates the generator angular speed and consequently the generator power to its nominal value without any knowledge of the model. In order to find the parameters of the controller, a hybrid cost function is proposed, which consists of sum of absolute error signal and absolute rate of control signal in three different wind speeds. The wind speeds are chosen in the beginning, middle and at the end of the interval, thus the optimized controller is able to show an acceptable performance in a whole range of wind speeds, without any demand for nonlinear and complex controllers. To this end, the proposed cost function is minimized using three optimization algorithms: Differential Evolution (DE), Firefly algorithm (FA) and Particle Swarm Optimization (PSO). In order to evaluate the robustness of proposed FOPID, numerous wind profiles with different speeds and fluctuations are applied and the results are compared with the optimal integer order PID controller. The comparison demonstrates that the proposed FOPID has more effective performance and robustness than optimal integer order PID in regulating the generator speed and power.

1- مقدمه

کنترل توربین‌های بادی مهم‌ترین عامل توسعه استفاده از انرژی باد بوده است [3]. تا کنون استفاده از توربین‌های بادی افقی بیشتر از سایر راه‌های جذب انرژی باد مورد توجه قرار گرفته است. به طور کلی توربین‌های بادی افقی را می‌توان به دو دسته سرعت ثابت¹ و سرعت متغیر² تقسیم کرد. در

دنیا در دهه اخیر شاهد رشد انواع راه‌کارهای تولید انرژی پاک بوده است. در میان آن‌ها توجه بسیاری به انرژی باد شده است [1]. بر این اساس گسترش و نصب تجهیزات جذب این انرژی سریع‌ترین رشد را در مقایسه با سایر انرژی‌های تجدیدپذیر داشته است [2]. گفته می‌شود که پیشرفت فناوری در

¹ Fixed Speed Wind Turbine (FSWT)² Variable Speed Wind Turbine (VSWT)

Please cite this article using:

A. Asgharnia, R. Shahnazi, A. Jamali, Pitch Angle Control of a High-Power Wind Turbine Using Optimal Fractional-order PID Controller, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 3, pp. 167-176, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

توربین‌های بادی که از نوع سرعت ثابت است، با تغییر سرعت باد سرعت زاویه‌ای روتور همواره ثابت نگه داشته می‌شود [2]. بدین ترتیب فرکانس برق تولید شده ثابت می‌ماند، اما کاهش راندمان این توربین‌ها در جذب انرژی از باد در سرعت‌های مختلف سبب ابداع نوع جدیدتری از توربین‌ها شد که به سرعت متغیر شهرت داشتند [4]. در این توربین‌ها سرعت زاویه‌ای روتور با استفاده از سیستم کنترل گشتاور به گونه‌ای مطابق با سرعت باد تنظیم می‌شود که جذب انرژی از باد در هر سرعتی بیشینه مقدار ممکن باشد. در گونه خاص‌تری از توربین‌های بادی سرعت متغیر که به گام متغیر¹ موسوم است [6,5,3,1] از دو استراتژی برای کنترل توربین استفاده می‌شود. در سرعت‌های باد کمتر از سرعت نامی² از روشی مشابه توربین‌های سرعت متغیر معمولی برای کنترل توربین استفاده می‌شود، ولی با گذر سرعت باد از سرعت نامی سیستم کنترل زاویه گام وارد عمل می‌شود. در این استراتژی زاویه حمله پره‌های توربین به گونه‌ای تنظیم می‌شود که نیروی بالا بر³ وارد بر پره ثابت بماند و در نتیجه سرعت روتور در سرعت نامی باقی بماند. این امر سبب می‌شود که توان خروجی توربین در توان نامی باقی بماند. در سرعت‌های باد بسیار بالا یا بسیار کم، فعالیت توربین متوقف می‌شود. حد پایین سرعت باد برای فعالیت توربین سرعت وصل⁴ و حد بالای⁵ آن سرعت قطع نامیده می‌شود. توربین‌های بادی گام متغیر را می‌توان به دو دسته تقسیم کرد: توربین‌های با کنترل تجمعی پره‌های توربین و کنترل تکی پره‌ها. در کنترل تجمعی با توجه به سرعت باد متوسطی که پره‌ها را به گردش در می‌آورد، تمام پره‌ها هم‌زمان به اندازه‌ای برابر دوران می‌کنند [6,5,3,1] و در کنترل تکی، هر کدام از پره‌ها به طور جداگانه و با توجه به سرعت مؤثر همان پره کنترل می‌شود [7].

تاکنون روش‌های گوناگونی برای کنترل زاویه گام پیشنهاد شده است [6,5,3,1]. در [1] با طراحی یک مشاهده‌گر حالت گسترش یافته، میزان اغتشاشات تخمین زده شده و با جمع کردن آن با خروجی کنترل کننده PI این اغتشاشات جبران می‌شود. کنترل کننده حاصل شده توانایی بیشتری در بهبود خطا و کم کردن نیروی کنترلی دارد. در [3] مقایسه‌ای بین کنترل کننده PID و H_{∞} در حضور نامعینی در مدل و ورودی صورت گرفته که در آن برتری کنترل کننده مقاوم هم در دنبال کردن ورودی و هم در کاهش خطا در هنگام وجود عدم قطعیت نشان داده شده است. در [5] کنترل کننده فازی‌ای طراحی شده که زاویه گام پره توربین را با استفاده از مقدار توان تولیدی ژنراتور و سرعت زاویه‌ای آن به نحوی مطلوب تنظیم می‌کند. در [6] با بهینه‌سازی کنترل کننده‌های PI در بادهای با سرعت‌های مختلف و سپس آموزش یک شبکه عصبی، کنترل کننده‌ای بهینه حاصل شده است که پارامترهای مناسب کنترل کننده را در هر سرعتی از باد به صورت تطبیقی تنظیم می‌کند.

در سال‌های اخیر کنترل کننده‌های مرتبه کسری توجه بسیاری را به خود معطوف داشته‌اند. این کنترل کننده‌ها بر پایه حساب کسری بنا شده و دارای رابطه عمومی کنترل کننده‌های مرتبه صحیح است، اما مرتبه مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر در آن‌ها می‌تواند اعدادی غیرصحیح باشد. این موضوع سبب افزایش انعطاف کنترل کننده و در نتیجه تنظیم بهتر کارایی کنترل کننده می‌شود [8]. بدین ترتیب درجات آزادی بیشتر این کنترل کننده‌ها و در نتیجه

انعطاف‌پذیری بالاتر می‌تواند سبب افزایش توانایی آن‌ها در کنترل فرآیندهای پیچیده شود [9]. به عبارت دیگر در بدترین شرایط کنترل کننده مرتبه کسری دارای عملکردی مانند کنترل کننده مرتبه صحیح متناظر خواهد بود. تاکنون تأثیر عملکرد این کنترل کننده‌ها بر بسیاری از کاربردهای مهندسی مثبت بوده است و این کنترل کننده‌ها عملکرد مقاوم‌تری از خود نشان داده‌اند. در [8] تأثیر کنترل کننده‌های مرتبه کسری و فازی بر گاورنر کنترل فرکانس بار بررسی شده است. در این مطالعه ضمن مقایسه دو کنترل کننده با PI - مرتبه صحیح، نشان داده شد که کنترل کننده PI - مرتبه کسری عملکرد مقاوم‌تری از خود نشان می‌دهد. در [10] از ترکیب کنترل کننده مرتبه کسری و فازی کنترل کننده‌ای برای ربات دو درجه آزادی طراحی شده و عملکرد آن در حضور نویز و عدم اطمینان بررسی شده است. در [11] کنترل کننده PI - مرتبه کسری⁶ برای کنترل زاویه گام توربین بادی 4.8 مگاواتی پیشنهاد گشته و عملکرد آن با کنترل کننده‌های PI و فازی مقایسه شده است. در [11] پارامترهای کنترل کننده‌ها به صورت حدس و خطا تعیین شده بودند. فقط از پروفیل بادی با سرعت متوسط 13 m/s برای مقایسه عملکرد کنترل کننده‌ها استفاده شده بود؛ در صورتی که عملکرد قابل قبول آن در بازه گسترده‌ای از سرعت‌های باد یکی از ویژگی‌های کنترل کننده مطلوب برای کنترل گام توربین بادی است. نتیجه این مطالعه نشان داد که کنترل کننده مرتبه کسری تأثیر اندکی در کاهش خطا دارد، ولی تأثیر بیشتری در کاهش سیگنال کنترلی از خود نشان می‌دهد.

در این مقاله از الگوریتم‌های تکامل تفاضلی⁷، الگوریتم کرم شبتاب⁸ و الگوریتم ازدحام ذرات⁹ برای بهینه‌سازی کنترل کننده‌های PID و PID - مرتبه کسری¹⁰ برای کنترل زاویه گام توربین بادی استفاده شده است. برای شبیه‌سازی کنترل کننده‌ها از مدل توربین بادی 5 مگاواتی آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر¹¹ آمریکا استفاده شده است. با توجه به آن‌که دینامیک توربین بادی در سرعت‌های مختلف باد تغییر می‌کند برای به‌دست‌آوردن پارامترهای بهینه استفاده از تابع رویکردی که سرعت باد را در چند نقطه مورد نظر قرار دهد پیشنهاد می‌شود. بدین ترتیب با انتخاب سه سرعت باد در ابتدا، میانه و انتهای ناحیه‌ای که کنترل کننده در آن فعال است، کنترل کننده‌ای حاصل خواهد شد که در تمام گستره سرعت‌های باد مجاز عملکرد مطلوبی از خود نشان خواهد داد. تابع هزینه پیشنهادی در این مقاله مجموع انتگرال قدرمطلق خطا و انتگرال قدرمطلق نرخ سیگنال کنترلی در هر سه سرعت باد خواهد بود. بدین ترتیب کنترل کننده‌ای طراحی می‌شود که علاوه بر کمینه کردن خطا، بار وارده بر توربین را نیز کمینه کند تا از ارتعاشات ناخواسته جلوگیری به عمل آید. نتایج حاصل از بهینه‌سازی با استفاده از روش پیشنهادی برتری کنترل کننده FOPID بهینه را نسبت به کنترل کننده PID نشان می‌دهد. برای مقایسه قوام کنترل کننده‌های FOPID و در بخش پایانی عملکرد آن‌ها در حالتی که توربین در معرض سرعت‌های باد و نوسانات مختلف قرار می‌گیرد، بررسی خواهد شد. نتایج نشان از برتری قوام کنترل کننده FOPID نسبت به کنترل کننده PID نیز دارند.

این مقاله در 6 قسمت تهیه شده است. بخش 2 به مدل‌سازی توربین باد می‌پردازد. در بخش 3 کنترل کننده پیشنهادی در مقاله معرفی می‌شوند. بخش 4 به تشریح الگوریتم‌های بهینه‌سازی به کار رفته می‌پردازد. در بخش 5

⁶ FOPI⁷ DE⁸ FA⁹ PSO¹⁰ FOPID¹¹ NREL¹ Variable Pitch² Rated speed³ Lift⁴ Cut-in speed⁵ Cut-out speed

نتایج شبیه سازی ارائه می شودند و در نهایت در بخش 6 به نتیجه گیری پرداخته می شود.

2- مدل سازی توربین بادی

در این مقاله از توربین بادی 5 مگاواتی فراساحلی¹، افقی، گام متغیر² و سرعت متغیر³ استفاده شده است [12]. توربین بادی مدل شده دارای 5 بخش مرتبط با یکدیگر خواهد بود. این بخش ها عبارت است از: روتور توربین که انرژی باد آن ها را به حرکت در می آورد، عملگرهای⁴ روتور توربین که زاویه پره ها را تغییر می دهد، مجموعه انتقال توان⁵ و ژنراتور. این بخش ها تحت نظارت سیستم کنترل خواهند بود.

1-2- آئرو دینامیک

توان جذب شده توسط توربین پره های توربین با رابطه (1) محاسبه می شود.

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (1)$$

در آن P توان جذب شده توسط پره ها، ρ چگالی هوا، R شعاع روتور، C_p ضریب جذب توان و v سرعت باد است. ضریب جذب را می توان از طریق معادلات غیرخطی ارائه شده به دست آورد [3]، ولی در این مقاله ضریب جذب با درونیابی از جداول ارائه شده در [12] به دست آمده است. C_p خود تابعی از زاویه گام (β) و نسبت سرعت نوک (λ) است. نسبت سرعت نوک پره توربین به صورت رابطه (2) تعریف می شود.

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega_r}{v} \quad (2)$$

ω_r سرعت زاویه ای روتور توربین است و در نهایت گشتاور وارد شده از جانب باد برابر با رابطه (3) خواهد بود.

$$T_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_p(\lambda, \beta) \frac{v^2}{\lambda} \quad (3)$$

2-2- ژنراتور

ژنراتور وظیفه تبدیل انرژی جنبشی که در توربین بادی چرخش روتور است، را به انرژی الکتریکی دارد. توربین های بادی متناسب با نوع عملکردشان از ژنراتورهای گوناگونی بهره می برند. ژنراتورهای قفس سنجایی که در توربین های سرعت ثابت استفاده می شوند [2]، القایی دو سوپه تغذیه⁶ [13] و ژنراتورهای سنکرون با آهنربای دائمی⁷ [5] سه نوع ژنراتور مرسوم در این صنعت هستند. در این مقاله برای مدل سازی ژنراتور از یک سیستم مرتبه اول با روابط (4,5) استفاده شده است [12].

$$\dot{T}_g = \frac{1}{\tau_g} (T_{ref} - T_g) \quad (4)$$

$$P_g = \eta_g \cdot \omega_g \cdot T_g \quad (5)$$

در آن ها T_g گشتاور مورد نیاز برای چرخش ژنراتور، τ_g ثابت زمانی ژنراتور، T_{ref} گشتاور مرجع ژنراتور، P_g توان تولید شده توسط ژنراتور، ω_g سرعت زاویه ای و η_g راندمان ژنراتور است. در سرعت های بالای سرعت نامی، T_{ref} از رابطه (6) تعیین می شود.

$$T_{ref} = \frac{P_{nom}}{\omega_g} \quad (6)$$

که P_{nom} توان نامی توربین است.

در سرعت های پایین تر از سرعت نامی برای تنظیم T_{ref} از یک کنترل کننده استفاده می شود [12].

2-3- مجموعه انتقال توان

مجموعه انتقال توان شامل جعبه دنده، شافت های انتقال توان، پاتاقان ها و پره های توربین است. این قسمت از سیستم توربین بادی، علاوه بر انتقال گردش پره ها به ژنراتور، سرعت گردش را نیز افزایش می دهد. در توربین های بادی موسوم به درایو مستقیم⁸ که مجهز به ژنراتورهای سنکرون با آهنربای دائمی اند، جعبه دنده از مجموعه حذف می شود.

طولیل بودن پره های توربین های بادی توان بالا سبب تغییر شکل قابل توجهی در ساختار آن ها می شود. این تغییر شکل می تواند سبب ایجاد خطا در شبیه سازی شود. از این رو روش های گوناگونی در مدل سازی مجموعه انتقال توان جهت مدل سازی دقیق پیشنهاد شده است. معمولاً از جرم های گسسته در مدل سازی این جزء بهره گیری می شود. مدل های 1- جرمی، 2- جرمی، 3- جرمی و 6- جرمی مدل های مرسوم در مدل سازی توربین بادی هستند [14,3]. در [14] این مدل ها به تفصیل با یکدیگر مقایسه و نشان داده شده است که مدل 2- جرمی در حین سادگی، دقت قابل قبولی در مدل سازی توربین به ویژه در شرایط گذرا خواهد داشت. در این مقاله نیز از مدل 2- جرمی استفاده شده است. شکل 1 این مدل را به صورت شماتیک نشان می دهد.

معادله روتور توربین به صورت روابط (7,8) نوشته می شود.

$$J_r \dot{\omega}_r = T_a - T_{ls} - K_r \omega_r \quad (7)$$

$$T_{ls} = K_{ls}(\psi_r - \psi_{ls}) + B_{ls}(\omega_r - \omega_{ls}) \quad (8)$$

J_r ممان اینرسی روتور، K_r میرایی روتور، T_{ls} گشتاور شافت کم سرعت، T_a گشتاور وارده از جانب باد، K_{ls} سفتی شافت کم سرعت و B_{ls} میرایی معادل شافت کم سرعت است.

به علاوه ω_r و ω_{ls} به ترتیب سرعت زاویه پره های توربین و شافت کم سرعت است. ψ_r و ψ_{ls} نیز به ترتیب انحراف شافت در روتور و شافت کم سرعت است. در سمت ژنراتور رابطه (9) برقرار است.

$$J_g \dot{\omega}_g = T_{hs} - T_g - K_g \omega_g \quad (9)$$

که J_g ممان اینرسی دوم ژنراتور، T_{hs} گشتاور شافت پر سرعت و K_g میرایی ژنراتور است. جعبه دنده رابطه ای بین T_{ls} و T_{hs} برقرار می کند که به صورت رابطه (10) نوشته می شود.

$$N_g = \frac{T_{hs}}{T_{ls}} = \frac{\omega_g}{\omega_{ls}} \quad (10)$$

N_g نسبت تبدیل جعبه دنده و ω_{ls} سرعت زاویه ای شافت کم سرعت خواهد بود. طبق روابط (7-10) مدل فضای حالت مجموعه را می توان به رابطه صورت (11) نوشت.

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_r \\ \dot{\omega}_g \\ \dot{T}_{ls} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_r \\ \omega_g \\ T_{ls} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ b_{31} \end{bmatrix} \cdot T_a + \begin{bmatrix} c_{11} \\ c_{21} \\ c_{31} \end{bmatrix} \cdot T_g \quad (11)$$

که در رابطه (11) روابط (12) حاکم است.

$$\begin{aligned} a_{11} &= -\frac{K_r}{J_r}, & a_{12} &= 0, & a_{13} &= -\frac{1}{J_r}, \\ a_{21} &= -\frac{K_g}{J_g}, & a_{22} &= -\frac{K_g}{J_g}, & a_{23} &= \frac{1}{N_g J_g}, \end{aligned}$$

⁸ Direct-Drive

¹ Offshore

² Variable Pitch

³ Variable Speed

⁴ Actuator

⁵ Drivetrain

⁶ Doubly Fed Induction Generator (DFIG)

⁷ Permanent-Magnet Synchronous Generator (PMSG)

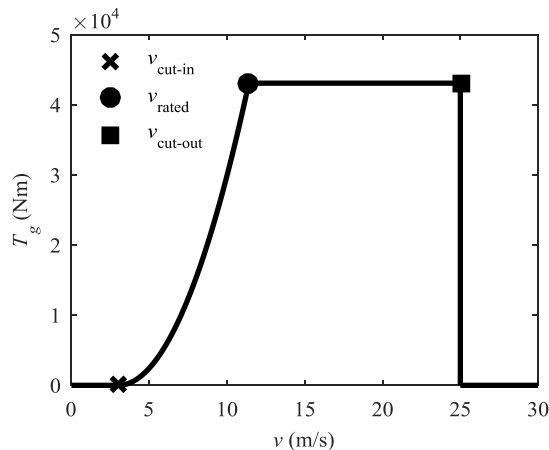


Fig. 2 Control regions of variable speed wind turbine

شکل 2 ناحیه‌های کنترلی توربین بادی سرعت متغیر

نتیجه توان تولید شده جلوگیری کند. بدین ترتیب این سیستم سرعت زاویه‌ای ژنراتور و توان خروجی را در مقدار نامی خود (به ترتیب برابر ω_{gnom} و P_{nom}) ثابت نگه می‌دارد.

هنگامی که سرعت باد از سرعت قطع فراتر رود، توربین به طور کامل خاموش می‌شود تا ایجاد تنش بیشتر در ساختار توربین جلوگیری شود [2].

3- کنترل کننده مرتبه کسری

ماهیت مقاوم و همچنین سادگی کنترل کننده‌های PID، آن‌ها را به پرکاربردترین کنترل کننده در صنایع گوناگون بدل ساخته است. این کنترل کننده سه متغیر دارد. حال با در نظر گرفتن مرتبه برای عملگرهای مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر در PID، به‌عنوان متغیر، می‌توان در حین حفظ سادگی، قابلیت‌های کنترل کننده را بهبود بخشید. تابع تبدیل کنترل کننده PID-مرتبه کسری به صورت رابطه (14) است.

$$C(s) = K_p + K_i \cdot \frac{1}{s^\lambda} + K_d \cdot s^\mu \quad (14)$$

در آن λ و μ متغیرهایی گویاست. اگر این دو متغیر برابر 1 فرض شوند، کنترل کننده به‌دست‌آمده همان PID خواهد بود. برای شبیه‌سازی این کنترل کننده‌ها معمولاً از تقریب‌های زمانی استفاده می‌شود. در این مقاله از تقریب استالوپ استفاده شده است. در این تقریب که ضمن امکان شبیه‌سازی کنترل کننده، شمایی از نحوه پیاده‌سازی آن را نیز به دست می‌دهد، از حاصل ضرب تعدادی فیلتر پیش‌فاز و پس‌فاز استفاده می‌شود. این حاصل ضرب به صورت رابطه (14) قابل بیان است [16,9,8].

$$s^\mu = K \cdot \prod_{k=-N}^N \frac{s + \omega'_k}{s + \omega_k}, \quad 0 < \mu < 1 \quad (15)$$

که در آن روابط (16) را به صورت زیر خواهیم داشت.

$$\begin{aligned} \omega_k &= \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b} \right)^{\frac{k+N+\frac{1}{2}(1+\mu)}{2N+1}} \\ \omega'_k &= \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b} \right)^{\frac{k+N+\frac{1}{2}(1-\mu)}{2N+1}} \\ K &= \omega_h^\mu \end{aligned} \quad (16)$$

و $2N+1$ تعداد فیلترهای تشکیل‌دهنده تقریب است. ω_b و ω_h به ترتیب حد بالا و پایین فرکانس‌هایی است که تخمین استالوپ در آن‌ها معتبر است.

در صورتی که $\mu \geq 1$ می‌توان رابطه (17) را نوشت:

$$\begin{aligned} a_{31} &= K_{ls} - \frac{B_{ls}K_r}{J_r}, & b_{21} &= 0, \\ a_{32} &= \frac{1}{N_g} \left(\frac{B_{ls}K_g}{J_g} - K_{ls} \right), & c_{11} &= 0, \\ a_{33} &= -B_{ls} \left(\frac{J_r + N_g^2 J_g}{N_g^2 J_r J_g} \right), & c_{31} &= \frac{B_{ls}}{N_g J_g}, \\ b_{11} &= \frac{1}{J_r}, & & \\ b_{31} &= \frac{B_{ls}}{J_r}, & & \\ c_{21} &= -\frac{1}{J_g}, & & \end{aligned} \quad (12)$$

2-4- عملگر زاویه گام

پره‌های توربین در توربین بادی گام متغیر می‌توانند حول محور طولی خود دوران کنند. این دوران معمولاً توسط عملگرهایی اعمال می‌شود که در ریشه پره جای گذاری شده است. نکته حائز اهمیت در این سیستم وجود محدودیت در اندازه و نرخ تغییر زاویه پره‌هاست [7, 12]. در این مقاله فرض می‌شود که عملگر زاویه گام مرتبه اول است، رابطه این عملگر به صورت (13) است.

$$\dot{\beta} = \frac{1}{\tau_\beta} (\beta_{ref} - \beta) \quad (13)$$

که در رابطه (13) β_{ref} خروجی کنترل کننده و τ_β ثابت زمانی آن است.

2-5- سیستم کنترل کننده

چهار ناحیه بر طبق سرعت باد در کنترل توربین بادی در نظر گرفته می‌شود. این چهار ناحیه توسط 3 سرعت باد از یکدیگر تفکیک می‌شوند. این سه سرعت باد و رفتار توربین بین آن‌ها در شکل 2 نمایش داده شده است. توربین بادی در سرعت‌های کمتر از سرعت قطع (v_{cut-in}) و بیشتر از سرعت وصل ($v_{cut-out}$) خاموش خواهد بود. با گذشتن سرعت باد از سرعت وصل کنترل کننده مرکزی توربین بادی، سیستم کنترل گشتاور ژنراتور را وارد مدار می‌کند. در این ناحیه با اندازه‌گیری لحظه‌ای سرعت باد یا تخمین آن [15]، گشتاور ژنراتور طوری تنظیم می‌شود تا با تغییر سرعت زاویه‌ای روتور، C_p همواره بیشترین مقدار ممکن را داشته باشد و نسبت سرعت نوک در مقدار بهینه ثابت بماند. در توربین بادی مورد بحث در این مقاله حداکثر ضریب جذب توان برابر 0.482 و سرعت نوک بهینه 7.55 است [6]. در این ناحیه زاویه گام نیز روی صفر تنظیم می‌شود.

با گذشتن سرعت باد از سرعت نامی و افزایش آن سیستم کنترل زاویه گام وارد مدار می‌شود. با افزایش بیشتر سرعت باد، کنترل کننده، زاویه گام توربین را افزایش می‌دهد تا از بیشتر شدن سرعت روتور و گشتاور ژنراتور در

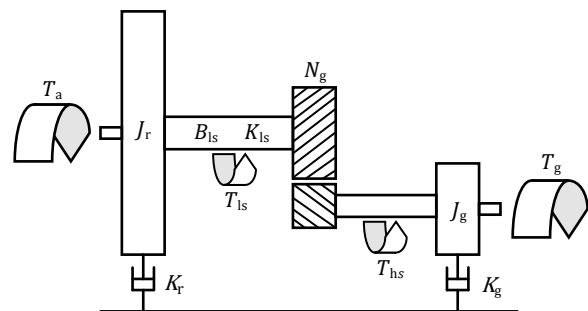


Fig. 1 Schematics of a 2-mass drivetrain

شکل 1 شماتیک مجموعه انتقال توان 2- جرمی

می‌کند.

2-4- الگوریتم کرم شبتاب

الگوریتم کرم شبتاب از جمله الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت و تصادفی است. این الگوریتم در سال 2008 ابداع شد [18]. در این الگوریتم از میل طبیعی کرم‌های شبتاب در جذب یکدیگر به وسیله نوری که ساطع می‌کنند الهام گرفته شده است. در این راستا فرض می‌شود عامل کشش یک کرم شبتاب به دیگری پارامتری به نام جذابیت باشد. جذابیت علاوه بر درخشندگی یک کرم شبتاب، به فاصله کرم شبتاب کم نورتر به پرنورتر نیز دارد؛ بنابراین ممکن است یک کرم شبتاب جذب کرم شبتاب دیگری که کم‌نور تر است، ولی فاصله کم‌تری دارد شود. بدین ترتیب نقاط هرچه بیشتری از فضای جستجو مورد بررسی قرار می‌گیرند. برای مدل‌سازی اثر فاصله در جذابیت فرض می‌شود که محیط نور را جذب می‌کند.

رابطه (20) ساده‌ترین رابطه بیان‌کننده روشنایی است. در این رابطه روشنایی رابطه نمایی با فاصله دارد.

$$I = I_0 \cdot e^{-\gamma \cdot r} \quad (20)$$

که در آن I روشنایی دیده‌شده در فاصله r ، I_0 روشنایی هر کرم شبتاب و γ به عبارتی مقدار تابع هزینه و ضریب جذب هوا خواهد بود. به همین ترتیب جذابیت به صورت رابطه (21) تعریف می‌شود.

$$\beta = \beta_0 \cdot e^{-\gamma \cdot r^2} \quad (21)$$

که در رابطه (21)، β جذابیت هر کرم شبتاب و β_0 جذابیت کرم شب‌تاب در فاصله صفر است.

فاصله دو کرم شبتاب i و j به صورت رابطه (22) قابل محاسبه خواهد بود.

$$r_{ij}^t = \|X_i^t - X_j^t\| = \sqrt{\sum_{k=1}^n (X_{i,k}^t - X_{j,k}^t)^2} \quad (22)$$

که در آن، r_{ij}^t فاصله دو کرم شبتاب i و j در تکرار t ، X_i^t و X_j^t دو ماتریس $n \times 1$ که هر مؤلفه آن یکی از پارامترهای طراحی در تکرار t محسوب می‌شود و n نشانگر تعداد متغیرهاست.

در هر تکرار موقعیت هر کرم شبتاب به وسیله رابطه (23) تغییر می‌کند و به طرف کرم شبتابی که روشنایی بیشتری دارد میل می‌کند.

$$X_i^{t+1} = X_i^t + \beta_0 \cdot e^{-\gamma \cdot r_{ij}^2} (X_i^t - X_j^t) + \alpha \cdot \varepsilon_i \quad (23)$$

α یک عدد تصادفی بین 0 و 1، ε_i یک بردار با n متغیر است که از روی توزیع نرمال به‌دست می‌آید.

این روند تکراری تا رسیدن به شرط توقف الگوریتم ادامه دارد.

3-4- الگوریتم ازدحام ذرات

الگوریتم ازدحام ذرات از جمله الگوریتم‌های تکاملی است که با الهام گرفتن از رفتار دسته پرنده‌گان توسعه یافته است. در این الگوریتم ابتدا تعداد مشخصی پاسخ به نام ذره به صورت اتفاقی حدس زده می‌شود و سپس با عملگری اختصاصی در طی تکرارهای متناوب، ذرات را به پاسخ بهینه مطلق نزدیک می‌کند. از جمله نوآوری‌هایی که در روش PSO وجود دارد، در نظر گرفتن بهترین پاسخ یافت‌شده در هر مرحله است. عملگر اصلی PSO به صورت روابط (24، 25) تعریف می‌شود [19، 6].

$$V_i^{t+1} = w \cdot V_i^t + c_1 \cdot \text{rand}_1 \cdot (pBest_i^t - X_i^t) + c_2 \cdot \text{rand}_2 \cdot (gBest^t - X_i^t) \quad (24)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1} \quad (25)$$

$$s^\mu = s^n \cdot s^\beta, n = \mu - \beta, 0 < \beta < 1 \quad (17)$$

تعیین پارامترهای رابطه (14)، همواره چالشی پیش‌روی مهندسان کنترل بوده است. برای طراحی کنترل‌کننده‌ها، روش‌های گوناگونی چون زیگلر-نیکولز و استفاده از مکان هندسی ریشه‌ها پیشنهاد می‌شود. رفتار غیرخطی ضریب جذب توان در توربین باد، وجود محدودکننده‌های نرخ سیگنال کنترلی و غیرقابل پیش‌بینی بودن سرعت باد سبب می‌شود تا روش‌های نامبرده کارایی لازم را نداشته باشند. از این‌رو استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ابتکاری پیشنهاد می‌شود.

4- الگوریتم‌های بهینه‌سازی

در این بخش الگوریتم‌های استفاده‌شده در بهینه‌سازی کنترل‌کننده به طور خلاصه معرفی می‌شوند. این الگوریتم‌ها مجموعه پارامترهایی را به‌دست می‌دهند که در شرایط بهینه‌سازی شده بهترین پاسخ را خواهند داشت. در این مقاله از سه الگوریتم تکامل تفاضلی، کرم شبتاب و ازدحام ذرات استفاده شده است.

1-4- الگوریتم تکامل تفاضلی

الگوریتم تکامل تفاضلی از قدیمی‌ترین الگوریتم‌ها بهینه‌سازی ابتکاری محسوب می‌شود. این الگوریتم مبتنی بر انتخاب اتفاقی ذرات اولیه است. در این الگوریتم ذرات اولیه را جمعیت می‌نامند. در تکامل تفاضلی از چندین عملگر متفاوت با نام‌های جهش، تقاطع و انتخاب برای یافتن نقطه بهینه سراسری استفاده می‌شود.

برای عملگر جهش روابط گوناگونی پیشنهاد شده است [17]. در این مقاله از رابطه (18) جهت عملیات جهش استفاده گشته‌است.

$$V_i^t = X_i^t + F^t \times (X_i^t - XBest^t) + F^t \times (A^t - B^t) \quad (18)$$

که در آن، V ، $XBest$ ، A و B همگی ماتریس‌های $1 \times N$ هستند که N تعداد پارامترهای طراحی خواهد بود. V_i^t مکان جهش یافته فرد i در تکرار t ، X_i^t مکان اولیه فرد i در تکرار t ، $XBest^t$ مکان بهترین فرد در تکرار t ، A^t و B^t دو فرد انتخاب‌شده به صورت اتفاقی از بین جمعیت در تکرار t خواهد بود. F^t مقدار ثابتی که به صورت اتفاقی برای هر فرد از جمعیت بین 0.5 و 1 و به صورت اتفاقی انتخاب می‌شود.

در مرحله بعد، عملیات تقاطع روی افراد اعمال می‌شود. این عملگر به صورت رابطه (19) تعریف می‌شود.

$$U_i^t(n) = \begin{cases} X_i^t(n), & \text{اگر } \text{rand} > Cr \\ V_i^t(n), & \text{اگر } \text{rand} \leq Cr \text{ یا } n = n_{\text{rand}} \end{cases} \quad (19)$$

در رابطه (19)، Cr ضریب عملگر تقاطع در الگوریتم DE است و معمولاً بین 0-1 انتخاب می‌شود، همچنین ماتریس U_i^t که ترکیب ماتریس‌های X_i^t و V_i^t ساخته، ماتریس آزمایش نامیده می‌شود. به ازای هر کدام از متغیرهای دخیل در بهینه‌سازی عددی اتفاقی rand بین 0 و 1 انتخاب می‌شود. در صورتی که عدد بیشتر از Cr باشد، متغیر از X_i^t انتخاب، و در صورتی که کمتر از Cr باشد یا n_{rand} باشد یا درایه ماتریس‌ها برابر شود، متغیر از V_i^t انتخاب خواهد شد. n_{rand} یک عدد صحیح بین 1 و N خواهد بود که برای هر فرد یک‌بار در هر تکرار انتخاب می‌شود.

در مرحله آخر از میان U_i^t و X_i^t ، ماتریسی که بهترین پاسخ را داشته باشد انتخاب می‌شود. تابع هدف با تکرار این رویه به مقدار بهینه خود میل می‌کند. این فرآیند تا آن‌جا که شرط پایان الگوریتم برقرار شود ادامه پیدا

جدول 1 برخی از مشخصات توربین بادی استفاده شده [12]

مشخصه	مقدار	واحد
توان نامی	5	MW
سرعت نامی ژنراتور	122.9	rad/s
گشتاور نامی ژنراتور	43,093.55	Nm
سرعت وصل	3	m/s
سرعت نامی	11.4	m/s
سرعت قطع	25	m/s
شعاع روتور	63	m
نسبت تبدیل جعبه دنده	1:97	-
حداکثر نرخ تغییر زاویه گام	±8	deg/s

می‌کند؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود برای بهینه‌سازی پارامترهای PID از چند سرعت باد به طور هم‌زمان استفاده شود. سرعت‌های 12 m/s و 24 m/s از آن جهت که نزدیک حد پایین و حد بالای ناحیه سوم کنترل توربین بادی قرار می‌گیرند بسیار حائز اهمیت خواهند بود، همچنین سرعت 18 m/s که تقریباً در وسط ناحیه سوم کنترلی قرار دارد نیز در بهینه‌سازی لحاظ خواهد شد. بدین ترتیب تابع هزینه (26) به رابطه (27) گسترش میابد:

$$Cost = Cost_{12} + Cost_{18} + Cost_{24} = \sum_{v=12,18,24} \int_0^{\infty} |e(t)|_v \cdot dt + |\dot{u}(t)|_v \cdot dt \quad (27)$$

که در رابطه (27)، $|e(t)|_v$ و $|\dot{u}(t)|_v$ به ترتیب قدرمطلق خطا و قدرمطلق نرخ سیگنال کنترلی در سرعت باد v است.

برای بهینه‌سازی کنترل‌کننده با تابع هزینه رابطه (27) زاویه اولیه گام توربین بادی را در ابتدای فرآیند بهینه‌سازی در شرایط اولیه‌ای برابر با زاویه نامی خود قرار داده می‌شود. منظور از شرایط نامی زاویه گام زاویه‌ای است که اگر زاویه حمله پره توربین در هر سرعت باد روی آن تنظیم شود سرعت ژنراتور در سرعت نامی خود باقی می‌ماند، اما برای به‌دست‌آوردن زاویه گام نامی نخست با یکی از الگوریتم‌ها و استفاده از تابع هزینه عنوان‌شده در رابطه (26) و سپس انتخاب زاویه صفر به‌عنوان زاویه اولیه گام و پارامترهایی که در جداول 2-4 برای الگوریتم‌ها آمده است، کنترل‌کننده PID (یا FOPID)، در هر سه سرعت باد عنوان‌شده به صورت مجزا مورد بهینه‌سازی قرار می‌گیرد.

در این صورت کنترل‌کننده‌های پایداری طراحی می‌شود که در صورت اعمال پارامترهای آن به سیستم و میل کردن سیستم به سمت پاسخ ماندگار، زاویه گام نامی در آن سرعت به‌دست می‌دهد. جدول 5 این زاویه‌ها را نشان می‌دهد. توجه شود که کنترل‌کننده به‌دست‌آمده با استفاده از هر کدام از الگوریتم‌ها پایدار است و زاویه گام در شرایط ماندگار به مقدار نامی خود میل می‌کند؛ بنابراین در صورت استفاده از هر کدام از الگوریتم‌ها پاسخ به‌دست‌آمده یکسان خواهد بود.

با در نظر گرفتن داده‌های جدول 5 به‌عنوان زاویه گام اولیه توربین بادی، بهینه‌سازی این‌بار در 100 ثانیه شبیه‌سازی و با استفاده از رابطه (27) به‌عنوان تابع هزینه انجام می‌شود. دلیل قرار دادن شرایط ابتدایی زاویه گام توربین در موقعیتی غیر از موقعیت صفر در فرآیند بهینه‌سازی وجود محدودیت در نرخ افزایش سیگنال کنترلی یا زاویه گام است. زیرا در صورتی که زاویه گام صفر به‌عنوان نقطه آغاز بهینه‌سازی انتخاب می‌شود، هنگام انجام فرآیند بخش عمده‌ای از عملکرد سیستم در ابتدای امر در محدوده اشباع‌شدگی عملکرد قرار می‌گرفت که این موضوع سبب کاهش مشاهده تأثیر کنترل‌کننده‌ها در شرایط عادی، یعنی شرایطی که توربین در معرض نوسانات

در روابط (25,24)، V ، Z ، $pBest$ و $gBest$ ماتریس‌هایی $1 \times N$ است که هر درایه آن یکی از متغیرهای دخیل در بهینه‌سازی خواهد بود. V_i^t سرعت ذره i ام در تکرار t ، $pBest_i^t$ بهترین موقعیت پیشین ذره i ام در تکرار t ، $gBest^t$ بهترین پاسخ در بین تمامی ذرات تا تکرار t و X_i^t موقعیت ذره i ام در تکرار t است. به همین ترتیب الگوریتم تا رسیدن به شرایط توقف ادامه می‌یابد.

5- روش پیشنهادی و شبیه‌سازی

در این قسمت ابتدا پارامترهای کنترل‌کننده‌های PID و PID مرتبه کسری معرفی‌شده در بخش 3 برای توربین بادی 5MW، توسط الگوریتم‌های معرفی‌شده در بخش 4 و استفاده از تابع هزینه‌ای که تعریف خواهد شد به‌دست می‌آیند، سپس نتایج مورد بررسی و تحلیل قرار خواهند گرفت.

شکل 3 ساختار کنترلی توربین بادی مجهز به FOPID را نشان می‌دهد. در این ساختار با اندازه‌گیری سرعت زاویه‌ای ژنراتور و محاسبه اختلاف آن با مقدار نامی، مقدار خطا در هر لحظه محاسبه می‌شود. از خطا به‌عنوان ورودی FOPID استفاده می‌شود. خروجی کنترل‌کننده نیز زاویه گام مرجع خواهد بود.

برای تخمین عملگرهای مشتق‌گیر و انتگرال‌گیر از تخمین استالوپ مرتبه 5 و بازه فرکانسی [0.01,100] هرگز استفاده شده است [9]. بدین صورت کنترل‌کننده ایجادشده، حاصل‌ضرب 5 جبران‌ساز خواهد بود. برای مقایسه عملکرد در شبیه‌سازی کنترل‌کننده PID نیز از همان سری استالوپ با فرض $\mu = \lambda = 1$ استفاده می‌شود. علاوه بر آن جدول 1 مشخصات توربین بادی استفاده شده در شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.

در این مقاله در ابتدا برای به‌دست‌آوردن پارامترهای بهینه، تابع (26) به‌عنوان تابع هزینه پیشنهاد می‌شود، که $|e(t)|$ و $|\dot{u}(t)|$ به ترتیب قدر مطلق خطا و قدر مطلق نرخ سیگنال کنترلی هستند.

$$Cost = IAE + IARCS = \int_0^{\infty} w_1 \cdot |e(t)| \cdot dt + w_2 \cdot |\dot{u}(t)| \cdot dt \quad (26)$$

استفاده از تابع (26) سبب می‌شود تا علاوه بر بهینه‌سازی خطا به طور متناسب نرخ سیگنال کنترلی نیز بهینه شود و عملکردها در معرض خطر اشباع‌شدگی قرار نگیرند.

برای تأثیر برابر در بهینه‌سازی خطا و نرخ سیگنال کنترلی فرض می‌شود که $w_1 = w_2 = 1$ در توربین بادی، سیگنال کنترلی، زاویه پره توربین است، اما از آنجایی که در کاربردهای عملی این زاویه بین صفر تا نود درجه قرار می‌گیرد در رابطه (26) تنها نرخ تغییرات آن لحاظ شده است. دینامیک سیستم توربین بادی تحت سرعت‌های مختلف باد تغییر

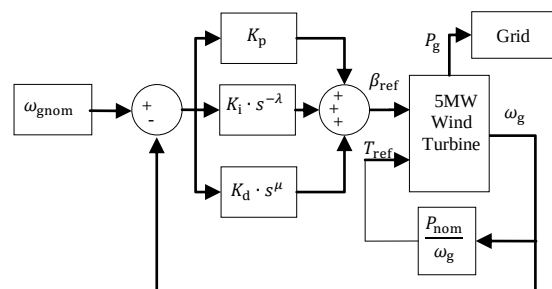


Fig. 3 Control structure of a wind turbine equipped to FOPID

شکل 3 ساختار کنترلی توربین بادی مجهز به کنترل‌کننده FOPID

جزئی سرعت باد قرار می‌گیرد، می‌شود. برای اندازه‌گیری دقیق زاویه اولیه گام، می‌توان از سنسورهای غیرتماسی زاویه گام توربین بادی استفاده کرد [20].

حال با استفاده الگوریتم‌های نامبرده و پارامترهایی که در جدول 2-4 برای الگوریتم‌ها درج شده، تابع (27) برای کنترل‌کننده رابطه (14) بهینه می‌شود. نتایج بهینه‌سازی در جدول 6 آورده شده است. سپس کنترل‌کننده PID نیز به همان شیوه (با فرض $\mu = \lambda = 1$) طراحی می‌شود. پارامترهای این کنترل‌کننده در جدول 7 آمده است. پاسخ‌های به‌دست‌آمده حاکی از برتری الگوریتم کرم شبتاب در بهینه‌سازی هر دو کنترل‌کننده بر دو الگوریتم دیگر است. علاوه بر آن الگوریتم تکامل تفاضلی نیز بهتر از الگوریتم ازدحام ذرات عمل کرده است.

در تمام الگوریتم‌ها تعداد جمعیت اولیه طوری فرض شده که تعداد فراخواندن تابع هزینه تقریباً برابر باشد. در نتیجه زمان فرآیند بهینه‌سازی برای همه الگوریتم‌ها یکسان خواهد بود.

اکنون برای مقایسه عملکرد کنترل‌کننده‌های PID و FOPID در سرعت‌های باد مختلف و بررسی مقاوم بودن این کنترل‌کننده‌ها در شرایطی که برای آن‌ها بهینه نشده‌اند، سیستم توربین بادی تحت 18 پروفیل سرعت باد با نوسانات مختلف قرار می‌گیرد. شکل‌های 4 و 5 به ترتیب انتگرال قدرمطلق خطا و مقدار رابطه (26) را برای این 18 پروفیل باد نشان می‌دهند. پارامترهای این کنترل‌کننده‌ها بهترین جواب‌های مندرج در جدول 6 و 7

جدول 2 پارامترهای الگوریتم تکامل تفاضلی

مشخصه	مقدار
بیشترین تکرار	50
تعداد افراد	30
ضریب تقاطع (C_r)	0.6
F	تصادفی بین [0.5-1]

جدول 3 پارامترهای الگوریتم کرم شبتاب

مشخصه	مقدار
بیشترین تکرار	50
تعداد کرم‌های شبتاب	8
ضریب جذب نور	1
ضریب کشش اولیه	2
α	0.2

جدول 4 پارامترهای الگوریتم ازدحام ذرات

مشخصه	مقدار
بیشترین تکرار	50
تعداد ذرات	30
$c_1 = c_2$	2.05
w	0.729

جدول 5 زاویه‌های گام نامی در سرعت‌های ثابت

سرعت باد (m/s)	زاویه گام (درجه)
12	3.98
18	14.90
24	22.03

Table 5 rated pitch angles in constant wind speed

خواهند بود. پروفیل‌های باد اعمال شده با استفاده از مدل باد کیمال¹ [21] ساخته شده‌اند. سرعت پروفیل‌های باد اعمال‌شده بین 15 m/s و 23 m/s است. تغییرات استاندارد سرعت باد (σ) بین 0.5-2.0 فرض شده است. شاخصی از میزان نوسانات سرعت باد است [21]، با افزایش آن میزان دامنه نوسانات سرعت باد حول مقدار میانگین افزایش می‌یابد، همچنین زمان شبیه‌سازی برای این مرحله 130 ثانیه فرض می‌شود. برای آن‌که در ابتدای شبیه‌سازی انجام‌شده شرایط ابتدایی سیستم در شرایط نامی باشد، فرض می‌شود که در زمان صفر ثانیه سرعت باد 8 m/s است و زاویه گام روی صفر قرار دارد. سرعت باد با شیب ثابت تا سرعت پروفیل‌ها افزایش می‌یابد؛ به طوری که در زمان 30 ثانیه به پروفیل سرعت باد مشخص شده برسد. اندازه‌گیری پارامترها که برای مقایسه استفاده می‌شود از ثانیه 30ام شبیه‌سازی آغاز می‌شود. پارامترهای کنترل‌کننده براساس بهترین داده‌های جداول 6 و 7 انتخاب شده‌اند. در شکل 4 و 5 همان‌طور که دیده می‌شود، عملکرد کنترل‌کننده مرتبه کسری در کاهش خطا و تابع هزینه رابطه (26) به ترتیب به طور متوسط 32% و 11% نسبت به کنترل‌کننده مرتبه صحیح بهتر بوده است.

شکل 6 پروفیل بادی با سرعت متوسط 19 m/s و تغییرات استاندارد 1.5 را نشان می‌دهد. این پروفیل سرعت به‌عنوان نمونه از میان 18 پروفیل گفته شده، انتخاب گشته است. شکل‌های 7-11 به ترتیب عملکرد زاویه گام، سرعت ژنراتور، توان تولید شده، نرخ زاویه گام و گشتاور روتور توربین را تحت پروفیل سرعت نشان داده شده در شکل 6 را برای کنترل‌کننده‌های PID و FOPID به تصویر می‌کشند. همان‌طور که مشاهده می‌شود کنترل‌کننده FOPID عملکرد بهتری در کنترل توان و سرعت نسبت به کنترل‌کننده PID داشته است. همان‌طور که از شکل‌های 10 و 11 مشاهده می‌شود با وجود عدم مشاهده اختلاف در نرخ سیگنال کنترلی، دامنه تغییرات گشتاور روتور در کنترل‌کننده FOPID کاهش بیشتری نسبت به کنترل‌کننده PID داشته است. کمتر شدن دامنه تغییرات روتور با کاهش تنش خستگی وارد بر سیستم انتقال قدرت معادل بوده و در نتیجه سبب افزایش طول عمر توربین می‌شود [15].

در این مقاله وزن خطا و نرخ سیگنال کنترلی جهت بهینه‌سازی برابر هم و برابر با 1 انتخاب شده‌اند ($w_1 = w_2 = 1$). این کار سبب تأثیر برابر در بهینه‌سازی خطا و نرخ سیگنال کنترلی می‌شود. علاوه بر این با توجه به جداول 6 و 7 و با توجه به نمودار نرخ زاویه گام در شکل 10 مشاهده می‌شود

جدول 6 پارامترهای بهینه برای کنترل‌کننده FOPID

DE	FA	PSO	
-1.1548	-1.0797	-0.8762	K_p
-0.7722	-0.8504	-0.8897	K_i
-1.2649	-1.2766	-1.2591	K_d
0.9862	1.0000	1.0031	λ
0.6669	0.6574	0.5938	μ
66.9	66.4	75.3	$\sum_{v=12,18,24}^{\infty} \int_0^{\infty} e(t) \cdot dt$
82.7	80.5	86.0	$\sum_{v=12,18,24}^{\infty} \int_0^{\infty} \dot{u}(t) \cdot dt$
149.6	146.9	161.3	تابع هزینه (25)

Table 6 Optimized parameters for FOPID

¹ Kaimal

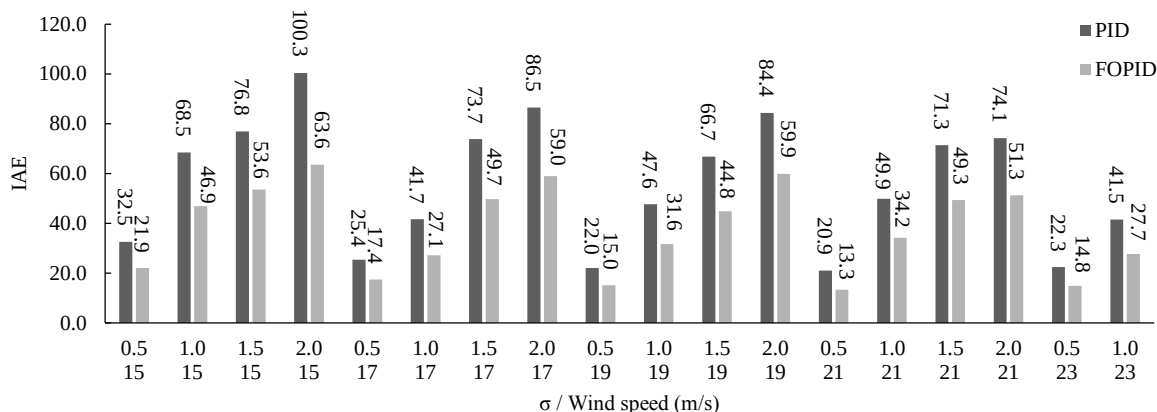


Fig. 4 Comparison of IAE

شکل 4 مقایسه انتگرال قدرمطلق خطا

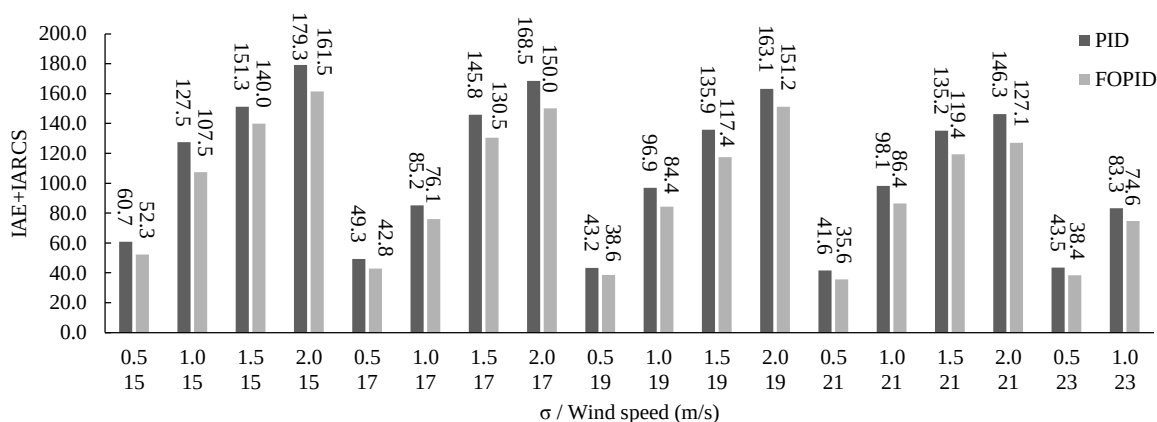


Fig. 5 Comparison of cost function (Eq. (24))

شکل 5 مقایسه تابع هزینه (رابطه (25))

6- نتیجه گیری

در این مقاله مقایسه‌ای بین کنترل کننده مرتبه کسری و مرتبه صحیح برای کنترل زاویه گام توربین بادی صورت گرفته است. کنترل کننده‌های به کار رفته سرعت زاویه‌ای روتور ژنراتور را در سرعت‌های بیشتر از سرعت نامی توربین در دور نامی نگه می‌دارند. برای مقایسه بهتر دو کنترل کننده ابتدا از

که اختلاف عددی زیادی بین انتگرال خطا و انتگرال نرخ سیگنال کنترلی وجود ندارد. در نتیجه انتخاب برابر وزن‌ها نتیجه قابل قبولی را ارائه داده است. باید توجه کرد که تابع هزینه رابطه (26) در واقع دو تابع هزینه با اهداف متضاد است که برای رسیدن به نتیجه‌ای مطلوب‌تر باید روش‌های بهینه‌سازی دو هدفه را مورد نظر قرار داد. این موضوع محل تحقیق آتی است.

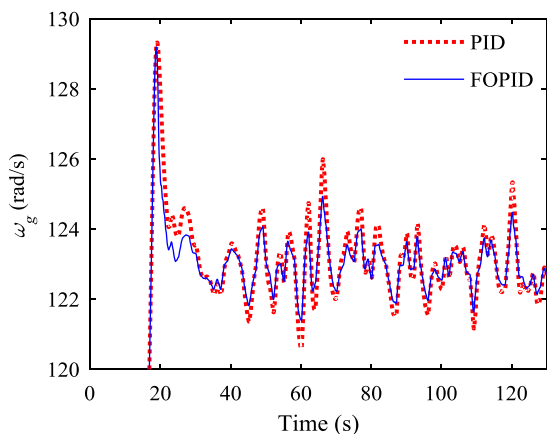


Fig. 7 Generator angular speed

شکل 7 سرعت زاویه‌ای ژنراتور

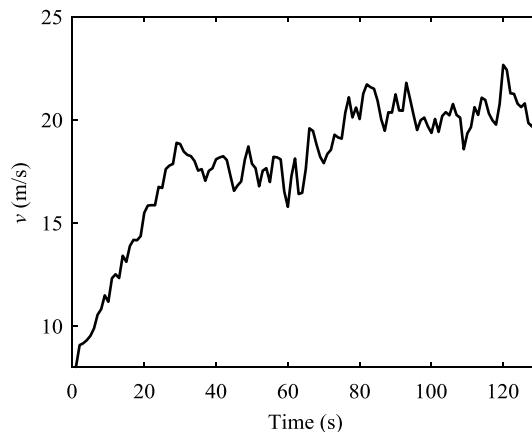


Fig. 6 Wind speed profile

شکل 6 پروفیل سرعت باد

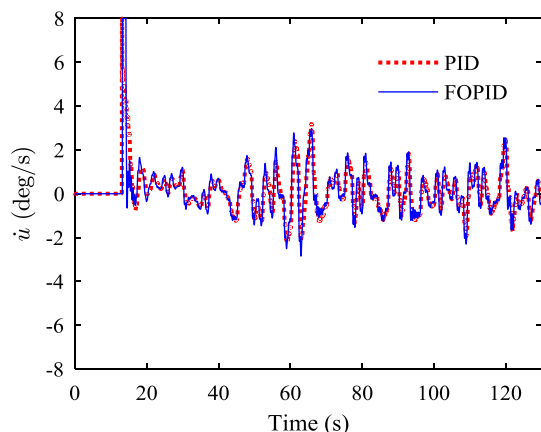


Fig.10 Pitch angle rate

شکل 10 نرخ زاویه گام

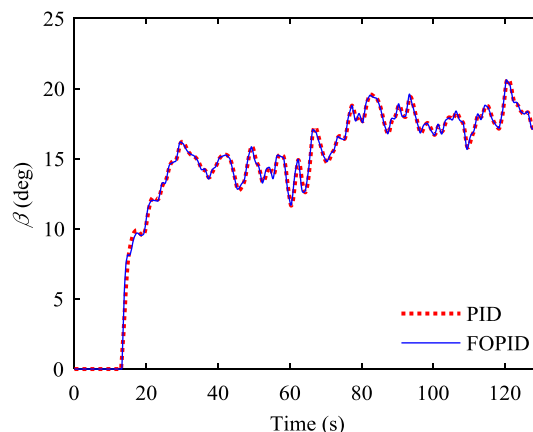


Fig. 8 Pitch angle

شکل 8 زاویه گام

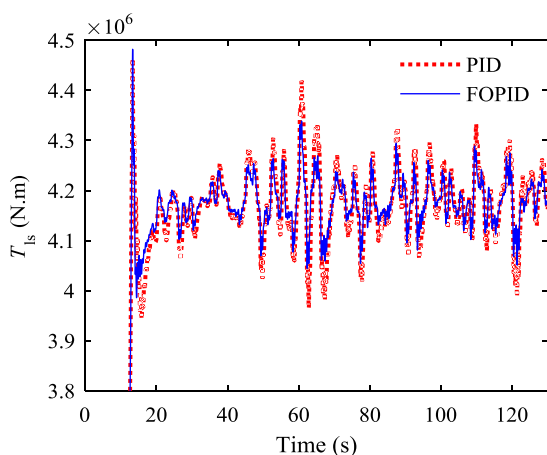


Fig. 11 Low speed shaft torque

شکل 11 گشتاور شافت کم سرعت

تحت سرعت‌های باد ثابت نشان داده شد، ولی برای نشان دادن برتری این کنترل‌کننده در شرایطی که سرعت باد دارای تغییرات باشد، 18 پروفیل سرعت باد که میانگین و درصد اغتشاشات متفاوتی داشتند، به کنترل‌کننده‌ها اعمال شد. نتیجه به‌دست‌آمده برتری کنترل‌کننده‌های مرتبه کسری را در کاهش خطا و تنظیم‌کردن توان ژنراتور نشان می‌دهد، همچنین نشان داده شد که تغییرات بار اعمال‌شده روی روتور توربین که به طور مستقیم به پره‌های توربین متصل است کاهش می‌یابد. بدین ترتیب کنترل‌کننده FOPID سبب کاهش تنش خستگی روی سیستم انتقال توان و در نتیجه افزایش طول عمر توربین می‌شود. در کارهای آتی مطالعه و طراحی کنترل FOPID بهینه با استفاده از روش‌های بهینه‌سازی چندهدفه مورد نظر است.

7- مراجع

- [1] Y. Ren, L. Li, J. Brindley, L. Jiang, Nonlinear PI control for variable pitch wind turbine, *Control Engineering Practice*, Vol. 50, pp. 84-94, 2016.
- [2] P. Sebastian, U. Nair, Improved Low Voltage Ride through Capability of a Fixed Speed Wind Generator Using Dynamic Voltage Restorer, *Procedia Technology*, Vol. 25, pp. 767-774, 2016.
- [3] H. Moradi, G. Vossoughi, Robust control of the variable speed wind turbines in the presence of uncertainties: A comparison between H_∞ and PID controllers, *Energy*, Vol. 90, pp. 1508-1521, 2015.
- [4] P. Novak, T. Ekelund, I. Jovik, B. Schmidbauer, Modeling and control of variable-speed wind-turbine drive-system dynamics, *IEEE Control Systems*, Vol. 15, No. 4, pp. 28-38, 1995.
- [5] T. L. Van, T. H. Nguyen, D.-C. Lee, Advanced pitch angle control based on fuzzy logic for variable-speed wind turbine systems, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 30, No. 2, pp. 578-587, 2015.

جدول 7 پارامترهای بهینه برای کنترل‌کننده PID

Table 7 Optimized parameters for PID

DE	FA	PSO	
-1.1310	-1.1487	-1.0041	K_p
-0.5199	-0.5224	-0.4792	K_i
-0.3782	-0.3841	-0.3670	K_d
93.7	92.7	102.4	$\sum_{v=12,18,24} \int_0^\infty e(t) \cdot dt$
80.7	81.3	75.9	$\sum_{v=12,18,24} \int_0^\infty \dot{u}(t) \cdot dt$
174.4	174.0	178.3	تابع هزینه (25)

سه الگوریتم بهینه‌سازی ابتکاری تکامل تفاضلی، الگوریتم کرم شیتاب و ازدحام ذرات برای به‌دست آوردن پارامترهای کنترل‌کننده استفاده شده است. و پارامترهایی که منجر به کوچک‌ترین تابع هزینه شده، انتخاب شده است. برای تعیین پارامترهای کنترل‌کننده‌ها، تابع هزینه‌ای تعریف گشت که از مجموع خطا و نرخ سیگنال کنترلی در 3 سرعت بادی 12، 18 و 24 متر بر ثانیه تشکیل شده است. دلیل انتخاب سرعت‌های نامبرده نیز واقع بودن آن‌ها در ابتدا، میانه و انتهای ناحیه کنترلی سوم است. پس از انجام فرآیند بهینه‌سازی، عملکرد بهتر کنترل‌کننده مرتبه کسری در تنظیم سرعت ژنراتور

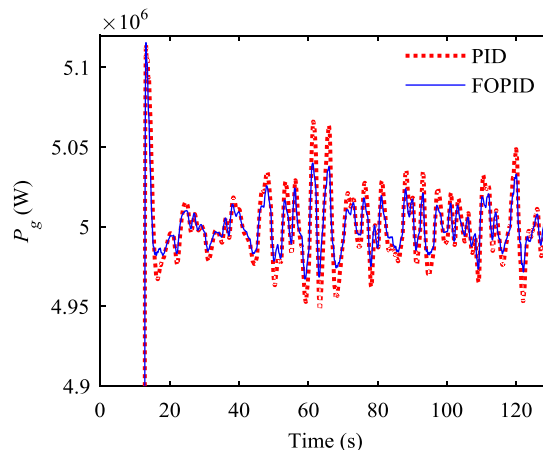


Fig. 9 Generator power

شکل 9 توان ژنراتور

- and doubly-fed induction wind turbines during power system disturbances, *IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, Vol. 150, No. 3, pp. 343-352, 2003.
- [14] S. Mueen, M. H. Ali, R. Takahashi, T. Murata, J. Tamura, Y. Tomaki, A. Sakahara, E. Sasano, Comparative study on transient stability analysis of wind turbine generator system using different drive train models, *IET Renewable Power Generation*, Vol. 1, No. 2, pp. 131-141, 2007.
- [15] B. Boukhezzer, H. Siguerdidjane, Nonlinear control of a variable-speed wind turbine using a two-mass model, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 26, No. 1, pp. 149-162, 2011.
- [16] M. S. Tavazoi, M. Tavakoli Kakhki, *Fractional order systems and controllers*, pp. 237-239, Tehran: Khaje Nasir Toosi University of Technology, 2015. (in Persian فارسی)
- [17] A. K. Qin, V. L. Huang, P. N. Suganthan, Differential evolution algorithm with strategy adaptation for global numerical optimization, *IEEE transactions on Evolutionary Computation*, Vol. 13, No. 2, pp. 398-417, 2009.
- [18] X.-S. Yang, *Nature-inspired metaheuristic algorithms*, Second Edition., pp. 81-89, Cambridge: Luniver press, 2010.
- [19] R. C. Eberhart, J. Kennedy, A new optimizer using particle swarm theory, *Proceeding of the sixth international symposium on micro machine and human science*, New York, NY: IEEE, pp. 39-43, 1995.
- [20] C. Jauch, N. Nussel, Development of a contactless pitch angle measurement system, *Wind Engineering*, Vol. 38, No. 6, pp. 621-632, 2014.
- [21] International Electrotechnical Commission, IEC 61400-1: Wind turbines part 1: Design requirements, *International Electrotechnical Commission*, 2005.
- [6] I. Poultangari, R. Shahnazi, M. Sheikhan, RBF neural network based PI pitch controller for a class of 5-MW wind turbines using particle swarm optimization algorithm, *ISA Transactions*, Vol. 51, No. 5, pp. 641-648, 2012.
- [7] K. A. Stol, W. Zhao, A. D. Wright, Individual blade pitch control for the controls advanced research turbine (CART), *Solar Energy Engineering*, Vol. 128, No. 4, pp. 498-505, 2006.
- [8] A. Zamani, S. M. Barakati, S. Yousofi-Darmian, Design of a fractional order PID controller using GBMO algorithm for load-frequency control with governor saturation consideration, *ISA Transactions*, Vol. 64, pp. 56-66, 2016.
- [9] S. Das, I. Pan, S. Das, Performance comparison of optimal fractional order hybrid fuzzy PID controllers for handling oscillatory fractional order processes with dead time, *ISA transactions*, Vol. 52, No. 4, pp. 550-566, 2013.
- [10] R. Sharma, K. Rana, V. Kumar, Performance analysis of fractional order fuzzy PID controllers applied to a robotic manipulator, *Expert Systems With Applications*, Vol. 41, No. 9, pp. 4274-4289, 2014.
- [11] C. Viveiros, R. Melício, J. M. Igreja, V. M. F. Mendes, Fuzzy, integer and fractional-order control: Application on a wind turbine benchmark model, *Proceeding of 2014 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, Międzyzdroje, Poland: IEEE, pp. 252-257, 2014.
- [12] J. Jonkman, S. Butterfield, W. Musial, G. Scott, Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development, *National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, Technical Report No. NREL/TP-500-38060*, 2009.
- [13] L. Holdsworth, X. Wu, J. Ekanayake, N. Jenkins, Comparison of fixed speed