طراحی کنترل‌کننده فازی PI^{λ} برای کنترل زاویه گام در توربین بادی سرعت متغیر

فاطمه فرجامی[۱]، کارشناس ارشد، اردشیر محمدزاده[۲]، استادیار، علی احمدیان[۳]، استادیار، سجاد شجاع مجیدآباد[۴]، استادیار

۱- دانشگاه سمنان- سمنان- ایران
khaterehfarjami@yahoo.com
۲-دانشکده فنی دانشگاه بناب-بناب-ایران
a.mzadeh@ubonab.ac.ir
۳-دانشکده فنی دانشگاه بناب-بناب-ایران
ali.ahmadian۱۳۶۷@gmail.com
۴-دانشکده فنی دانشگاه بناب-بناب-ایران
shoja.sajjad@ubonab.ac.ir

چکیده: از وظایف مهم سیستم کنترل در توربین‌های بادی ثابت نگه‌داشتن توان در مقدار نامی در بادهای با سرعت بیشتر از سرعت نامی می‌باشد زیرا عدم ثابت نگه‌داشتن توان در مقدار نامی در ناحیه سوم محنی توان توربین، سبب آسیب زدن به توربین و افزایش تنش‌های مکانیکی می‌شود. این هدف با کنترل زاویه گام در ناحیه سوم از منحنی توان توربین بادی محقق می‌شود. در این پژوهش به طراحی کنترل‌کننده فازی تناسبی_انتگرالی مرتبه‌کسری (فازی PI^{λ}) برای زاویه گام توربین بادی پرداخته‌شده‌است و سپس با کنترل‌کننده تناسبی_انتگرالی مرتبه‌کسری (PI^{λ}) و تناسبی_ انتگرالی مرتبه صحیح(PI) مورد مقایسه و ارزیابی قرار داده‌شده‌است و نتایج بر روی یک مدل معیار توربین بادی ۱۰۰ کیلووات سرعت متغیر طراحی و شبیه‌سازی شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داده‌اند که کنترل‌کننده‌ی فازی PI^{λ} با توجه به معیار RMSE عملکرد بهتری در مقایسه با کنترل‌کننده PI^{λ} و کنترل‌کننده PI کلاسیک داشته‌است و کنترل‌کننده فازی PI^{λ} کنترل هموارتر و تثبیت مناسب‌تری بر روی سیگنال‌های توان خروجی و سرعت ژنراتور در ناحیه سوم عملکرد داشته‌است.

واژه‌های کلیدی: کنترل زاویه گام، توربین بادی، کنترل‌کنندهPI، کنترل‌کننده PI مرتبه‌کسری، کنترل‌کننده فازی PI^{λ}

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۱۱

نام نویسنده‌ی مسئول: اردشیر محمدزاده

نشانی نویسنده‌ی مسئول: بناب، دانشگاه بناب

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-13]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.1.9]

[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.1]

۱-مقدمه

انرژی‌های تجدیدپذیر به دلیل دارا بودن مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی توجه بیشتری را در سیستم‌های قدرت امروزی به خود جلب‌کرده‌است[۱]. ضریب نفوذ این منابع در سیستم‌های قدرت، به‌خصوص در سطح شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی به‌صورت مداوم در حال افزایش است. در بین انواع انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی بادی به دلیل قیمت کم‌تر انرژی تولیدی بیشتر موردتوجه قرارگرفته‌است. یکی از مسائل مهم در بهره-برداری از توربین‌های بادی، تنظیم زاویه گام توربین‌ها در سرعت‌های باد بالا می‌باشد[۲]. به طور خلاصه، انتظارات خواسته شده از یک سیستم کنترل زاویه گام توربین‌های بادی شامل موارد زیر است [۳]:

۱) مدولاسیون و بهینه‌سازی توان خروجی توربین بادی
۲) دست‌یابی به حداکثر توان خروجی توربین بادی از طریق دست‌یابی به توان ماکزیمم
۳) استفاده از کنترل زاویه گام برای تنظیم توان آیرودینامیکی زمانی‌که سرعت باد نامی بالاست.

در صورت عدم کنترل زاویه گام توربین‌های بادی، کنترل سرعت و توان توربین‌ها انجام نخواهدشد. بنابراین، با فراتر رفتن توان از سرعت نامی خود، بیشینه توان خروجی قابل دسترس نخواهدشد و از نقطه نظر بهره‌برداری بهینه از توربین مطلوب نخواهدشد.

برای کنترل زاویه گام از کنترل‌کننده‌های متفاوتی استفاده شده‌است اما امروزه از کنترل‌کننده‌های PID مرتبه‌کسری $(PI^{\lambda}D^{\mu})$ استفاده زیادی در صنعت می‌شود زیرا دارای دو پارامتر تنظیم بیشتر نسبت به دیگر کنترل‌کننده‌ها می‌باشد و همین موضوع کارایی آن را نسبت به دیگر کنترل‌کننده‌ها بیشتر می‌کند و باعث بهبود عملکرد سیستم کنترل می‌شود. در مرجع [۴] کنترل‌کننده PID مرتبه‌کسری فازی بر اساس الگوریتم DPSO[۱]، برای بهینه‌سازی بهره‌های کنترل‌کننده PID مرتبه‌کسری فازی و بهبود کارایی در نیروگاه سیکل ترکیبی شفت یکپارچه (CCPP)[۲] ارائه شده‌است. در مرجع [۵] تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده $PD^{\beta}+I$ به وسیله‌ی الگوریتم بهینه‌سازی ذرات (PSO) پیشنهاد شده‌است و چندین شبیه‌سازی در محیط متلب برای ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده پیشنهادی ارائه شده‌است. در مرجع [۶] از بهینه‌سازی چند متغیره برای طرح بهینه پارتو[۳] کنترل‌کننده‌های PID مرتبه‌کسری فازی برای پلنت با عدم قطعیت‌های پارامتریک استفاده شده‌است. در [۶] همچنین از دو تابع هدف متضاد در طراحی پارتو کنترل‌کننده PID مرتبه‌کسری فازی استفاده شده‌است. مرجع [۷] به تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده PID مرتبه‌کسری فازی تطبیقی پرداخته است که با استفاده از تئوری کنترل مدرن، پارامترهای مشخصی از یک تابع هدف را به صورت آنلاین تشخیص می‌دهد و در واقع با استفاده از روش فازی به تنظیم کنترل‌کننده تطبیقی پرداخته است که این کنترل‌کننده را کنترل‌کننده تطبیقی فازی نامیده است. در سال‌های اخیر کنترل‌کننده PID مرتبه‌کسری موضوع بسیار مهمی برای دانشمندان شده‌است، زمانی‌که آن را با کنترل‌کننده‌های PID معمولی مقایسه کرده‌اند، به این نتیجه رسیدند که زمان نشست[۴] کوتاه‌تر است و اوورشوت[۵] و نوسان ندارد، همچنین مقاومت بیشتری دارد بویژه هنگامی که سیستم دارای لینک‌های غیرخطی و متغیر با زمان است، اثرات تنظیم عالی است [۷]. به دلیل گسترش روزافزون تولید برق بادی، بهبود روند کنترل توربین‌های بادی با روش‌های کلاسیک یا هوشمند ضروری می‌باشد. یکی از کنترل‌کننده‌های متداول در سیستم‌های صنعتی، کنترل‌کننده PI است که علی رغم سادگی ساختار از عملکرد قابل قبولی (به ویژه در حوزه سیستم‌های خطی) برخوردار است [۸]. در [۹] و [۱۰] کاربرد کنترل‌کننده PI برای کنترل توربین‌های بادی آمده‌است. با این وجود در سیستم‌هایی همچون توربین بادی که از عوامل غیرخطی و نامعینی برخوردار هستند، استفاده از کنترل‌کننده ساده PI پاسخ مطلوبی ندارد. در [۹] و [۱۰] به علت استفاده از کنترل‌کننده PI، پارامترهای سیستم کنترل با تغییر سرعت باد و لذا تغییر نقطه کار سیستم، نیاز به تنظیم مجدد دارند. این عیب را می توان با استفاده از روش‌های کنترلی غیرخطی کلاسیک (تطبیقی/مقاوم) و یا با روش‌های کنترلی هوشمند برطرف کرد. در[۱۱] تا [۱۳] از روش کنترلی مدلغزشی برای کنترل سیستم توربین بادی استفاده شده‌است. همچنین در [۱۴] تا [۱۶] از روش‌های هوشمند عصبی_فازی برای رسیدن به جواب‌های مطلوب در طراحی سیستم‌های کنترل توربین‌های بادی استفاده شده‌است و نتایج قابل قبولی را داشته‌است. در مقاله [۱۷] سه ناحیه عملیاتی برای یک توربین بادی نمونه ۵ مگاواتی در نظر گرفته شده‌است که ناحیه اول برای سرعت‌های کم‌تر از سرعت مجاز باد می‌باشد که تقریبا ۱۰

[۱] Dynamic particle swarm optimization
[۲] Combined cycle power plant
[۳] Parto
[۴] Setlling time
[۵] Overshoot

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-13]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.1.9]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.1]

متر بر ثانیه در نظر گرفته شده‌است و ناحیه عملیاتی دوم برای سرعت‌های کمی بالاتر از سرعت مجاز باد می‌باشد که تقریبا ۱۴ متر بر ثانیه می‌باشد، سپس برای طراحی کنترل‌کننده، دو روش مختلف خطی‌سازی را به کار برده‌است و کنترل‌کننده‌ای را که با روش اول، خطی سازی شده‌است نوع A و کنترل‌کننده‌ای که با روش دوم خطی‌سازی شده‌است را نوع B نامیده‌است سپس این دو روش را مورد ارزیابی قرار داده‌است. یک تفاوت عمده بین نوع A و نوع B در [۱۷] سادگی آن‌ها می‌باشد زیرا مدل A دارای مرتبه‌های به مراتب بالاتر می‌باشد در حالی که مدل B مرتبه‌های پایین‌تری دارد که باعث سادگی طرح می‌شود و بنابراین در [۱۷] توصیه می‌شود که طرح‌های کنترلی برای طراحی کنترل‌کننده‌های MPC[۶] برای توربین‌های بادی تا حد امکان ساده باشد. در [۱۸] الگوریتم جدید پیش بین فازی برای کنترل گام اشتراکی توربین‌های بادی بزرگ ارائه شده‌است. کنترل‌کننده‌های گام در این مقاله به منظور حفظ سرعت و توان مجاز در سه ناحیه عملیاتی توربین‌های بادی عمل می‌کنند. توربین بادی در مقاله [۱۸] با مدل فازی تاکاگی سوگنو (T-S[۷]) مدل‌سازی شده‌است و مدل کنترل‌کننده پیش بین بر اساس مدل فازی با توجه به محدودیت‌های عملگر گام طراحی شده‌است. مقاله [۱۸] کنترل هماهنگ زاویه گام پره ژنراتورهای توربین بادی و وسایل نقلیه هیبریدی متصل به برق را برای کنترل فرکانس بار میکرو شبکه با استفاده از مدل کنترل‌کننده‌های پیش بین ارائه می‌دهد. MPC ها یک مدل موثر بر اساس کنترل پیش بین هستند به طوریکه محاسبات سیگنال‌های کنترلی آینده را به وسیله‌ی روش بهینه‌سازی با استفاده از مدل پلنت فعلی و سیگنال‌های گذشته سیستم محاسبه می‌کند [۱۸]. در مرجع [۱۹] یک مطالعه شبیه‌سازی برای کنترل سرعت توربین بادی انجام شده‌است تا عملکرد و اثربخشی کنترل‌کننده $PI^{\lambda}D^{\mu}$ خودتنظیم حلقه بسته مطلوب را نشان بدهد. نتیجه نهایی [۱۹] این بوده‌است که توانسته یک تکنیک جدید برای تنظیم کنترل‌کننده $PI^{\lambda}D^{\mu}$ ارائه دهد که هدف آن کنترل سرعت توربین بادی بوده که در مدل ریاضی به کار برده شده نیاز به کنترل‌کننده مقاوم بوده‌است. از مزایای اصلی روش گفته شده در مقاله [۱۹] سادگی آن است که می‌توان پارامترهای کنترل‌کننده را مستقیم از پارامترهای پلنت و با توجه به ویژگی‌های مطلوب به دست آورد.

در مرجع [۲۰] یک سیستم ترکیبی که به صورت توربین بادی و پیل سوختی می‌باشد، استفاده شده‌است. مدل‌سازی توربین بادی سرعت متغیر شامل یک توربین محور افقی همراه با یک روتور سه پره می‌باشد. در این مدل کنترل‌کننده انتگرالی تناسبی مرتبه‌کسری (FOPI[۸]) قرار است که روی زاویه گام عمل کنند تا توان خروجی در حدود توان نامی ۴/۸مگاوات باشد. در بخش کنترلی مقاله [۲۰] چهار ناحیه عملیاتی در رابطه با توان و قدرت باد به طور جداگانه بررسی شده‌است تا توربین بادی سرعت متغیر در مدل‌سازی رفتار مطلوبی را از خود نشان بدهد. در مقاله [۲۰] کنترل‌کننده مرتبه‌کسری فقط بر روی نواحی دوم و سوم پیاده‌سازی شده‌است.

در انتهای [۲۰] به سبب اعتبارسنجی کنترل‌کننده FOPI، شبیه‌سازی و مقایسه بین FOPI و کنترل‌کننده PID مرتبه صحیح انجام شده‌است و عملکرد خوب این روش را نشان‌داده‌است. مرجع [۲۱] برای کنترل گام توربین بادی، کنترل‌کننده انتگرالی تناسبی مرتبه‌کسری و انتگرالی تناسبی مرتبه صحیح و کنترل‌کننده انتگرالی تناسبی فازی را بر روی یک مدل معیار توربین بادی از نوع سرعت متغیر پیاده‌سازی می‌کند و در آخر نتایج پیاده‌سازی این سه نوع کنترل‌کننده را با یکدیگر مقایسه می‌کند. همانطور که در مقاله[۲۱] هم بیان شده‌است، یک مسئله مهم برای سیستم تبدیل انرژی باد، توانایی سیستم‌های کنترل در جمع‌آوری، تجزیه و تحلیل و پردازش داده‌ها از توربین بادی می‌باشد. ضبط و گرفتن توان برای WECS[۹] اهمیت زیادی دارد و مناسب‌ترین رویکرد برای جذب توان بیشتر توسط روتور، استفاده از سیستم کنترل گام می‌باشد که به واسطه‌ی موقعیت‌های مختلف پره‌ها می‌توان زاویه گام را به گونه‌ای مناسب تنظیم کرد تا به هدف نهایی که گرفتن حداکثر توان است، رسید [۲۱]. در طرح استراتژی کنترلی توربین بادی در مقاله[۲۱]، یک سری جنبه‌های مهم مثل سرعت باد، اجزای توربین بادی و عملکردهای آن‌ها در یک سیستم حلقه بسته در نظر گرفته شده‌است و مانند مقاله[۲۰] چهار منطقه عملیاتی را برای توربین بادی داریم. ساختار کنترل‌کننده انتگرالی تناسبی فازی مقاله[۲۱] به این صورت است که دو ورودی، یکی خطای کنترلی و دیگری تغییر خطا و همچنین یک خروجی که سیگنال کنترلی در نظر گرفته شده‌است. در انتها [۲۱] شبیه‌سازی‌ها برای سه کنترل‌کننده انتگرالی تناسبی مرتبه‌کسری و انتگرالی تناسبی مرتبه صحیح و انتگرالی تناسبی فازی انجام شده‌است که برای کنترل‌کننده‌های انتگرالی تناسبی مرتبه‌کسری و صحیح، توربین بادی برای نقطه تنظیم توان ۴/۸ مگاوات و سرعت باد ۱۳ متر برثانیه، خطی‌سازی شده‌است، همچنین مرتبه‌کسری ۰/۵ در نظر گرفته شده‌است. برای ارزیابی عملکرد کنترل‌کننده‌ها در [۲۰] از معیار انتگرال حاصل ضرب زمان

[۶] Model predictive control

[۷] Takagi-Sugeno

[۸] Fractional Order Proportional Integral

[۹] Wind energy converter system

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-13]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.1.9]

[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.1]

در قدرمطلق خطا (ITAE[۱۰]) استفاده شده‌است. نتایج مقایسه نشان داده‌است که کنترل‌کننده FOPI عملکرد سیستم را با توجه به خطای سیستم و تلاش کنترلی سیستم نسبت به کنترل‌کننده کلاسیک مرتبه صحیح ارتقاءبخشیده‌است[۲۱].برتری کنترل‌کننده انتگرالی تناسبی فازی بر دو کنترل‌کننده دیگر این بود که برای مدل غیرخطی سیستم هم به کار می‌رود و برعکس دو کنترل‌کننده دیگر، نیازی به خطی‌سازی سیستم نبوده‌است و همچنین عدم قطعیت‌ها را به خوبی با مدل فازی می‌توان مدل کرد. اما اشکال این روش عدم بهینه‌سازی بهره‌های کنترل‌کننده می‌باشد در حالی‌که در روش پیشنهادی در این پژوهش، از فازی برای بهینه‌سازی بهره‌های کنترل‌کننده PI^{λ} استفاده‌شده‌است که در هر سرعتی از باد به صورت آنلاین بهترین بهره‌ها راخواهیم داشت که در جدول مناسبی آورده‌ایم. در واقع سیستم فازی آموزش داده‌شده، بهره‌های مناسب کنترل‌کننده را در سرعت‌های مختلف باد تعیین می‌کند.

در ادامه موضوعات بر این قرار است: در بخش ۲ مدل‌سازی توربین بادی شرح داده‌شده‌است و در بخش ۳ استراتژی‌های کنترلی و در بخش ۴ روش طراحی کنترل‌کننده پیشنهادی بر روی یک نمونه توربین بادی ۱۰۰ کیلووات سرعت متغیر ارائه شده‌است و در بخش پنجم شبیه‌سازی‌ها و نتایج شبیه‌سازی بر روی توربین بادی مدل معیار آورده شده‌است.

۲-مدل‌سازی توربین بادی

هدف از مدل‌سازی توربین بادی دست‌یابی به یک مدل دقیق ریاضی است که با استفاده از معادلات سیستم بتوان ضمن حفظ محدودیت‌ها و ایمنی، به حداکثر توان دست یافت. اجزای اصلی سازنده توربین بادی شامل پره، سیستم انتقال قدرت یا جعبه دنده، ژنراتور و مبدل الکترونیک قدرت می‌باشد و به دو بخش مکانیکی و الکتریکی تقسیم می‌شوند. در بعضی از توربین‌های بادی، سیستم انتقال قدرت حذف شده و نیروی پره‌ها مستقیما به ژنراتور منتقل می‌شود که اصطلاحا Direct drive نامیده می‌شوند.

۲-۱ آیرودینامیک

در توربین‌های بادی دو عامل مهم یعنی نیروهای حاصل از تراکنش باد و پره‌های توربین باعث ایجاد حرکت می‌شوند. بنابراین از قسمت‌های مهم شبیه‌سازی رفتار توربین بادی، تعیین نیروهای آیرودینامیکی خواهد بود که برای این هدف باید یک مدل مناسب در اختیار داشته‌باشیم. برای به دست آوردن یک مدل ساده و مناسب باید تاثیر برآیند نیروهای موجود در نقاط مختلف پره را در نظر بگیریم. در ادامه به معرفی ضریب توان (C_p) می‌پردازیم.

ضریب توان نسبت توان آیرودینامیکی جذب شده توسط توربین به کل توان آیرودینامیکی موجود در جریان باد است. ضریب توان به سرعت متوسط باد، سرعت زاویه‌ای روتور و شرایط جغرافیایی بستگی دارد[۲۲].اما در حالت کلی می توان تغییرات ضریب توان $C_p(\lambda,\beta)$ را به صورت تابعی از پارامتر زاویه گام پره (β) و نسبت سرعت نوک[۱۱] (λ) نشان داد. که λ نرخ سرعت باد در بالای پره نسبت به سرعت باد منطقه است که با رابطه‌ی (۴) نشان داده‌می‌شود. بر اساس تحقیقات قبلی، مقدار ضریب توان نمی‌تواند از $C_{p\,max} = ۱۶.۲۷ =$ ۵۹٪ بیشتر بشود که به آن حد بتز[۱۲] می‌گویند. توان آیرودینامیکی یک سطح مشخص از جریان باد به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۲۳] .

$$P_a = \frac{۱}{۲}\rho A V^{۳} \;,\; A = \pi R^{۲} \qquad (۱)$$

V سرعت باد، ρ چگالی هوا، R شعاع روتور، A کل سطح جاروب شده توسط پره‌ها و P_a کل توان آیرودینامیکی موجود در سطح موردنظر از جریان باد است. بنابراین ضریب توان را می‌توان از رابطه‌ی (۳) و (۴) محاسبه کرد.

$$C_p = \frac{P}{P_a} = \frac{P}{\frac{۱}{۲}\rho\pi R^{۲} V^{۳}} \qquad (۲)$$

$$P = \frac{۱}{۲} C_p \rho\pi R^{۲} V^{۳} \qquad (۳)$$

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V_{wind}} \qquad (۴)$$

P توان منتقل‌شده به توربین، R شعاع روتور و ω سرعت زاویه‌ای روتور می‌باشد [۲۴] . برای مدل‌سازی بخش مکانیکی توربین بادی از رابطه‌ی (۳-۱) استفاده می‌شود. ورودی‌های مدل آیرودینامیکی، دور ژنراتور، سرعت باد و زاویه گام هستند، خروجی آن هم گشتاور آیرودینامیک است. مطابق رابطه (۳)، توان دریافتی باد ابتدا توسط توربین و سپس گشتاور آیرودینامیکی محاسبه می‌شود.

۲-۲ اجزای الکتریکی شامل ژنراتور و مبدل الکترونیک قدرت توربین بادی

[۱۰] The integral of time multiplied by the absolute value

[۱۱] Tip speed ratio

[۱۲] Betz

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-13]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.1.9]

[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.1]

بخش قدرت توربین بادی شامل یک ساختار ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم (PMSG) است که از طریق مبدل کامل پشت به پشت[۱۳] به شبکه AC متصل می‌شود. این سیستم مبدل از مبدل سمت ماشین (MSC[۱۴]) و مبدل سمت شبکه (GSC[۱۵]) تشکیل شده‌است. برای به دست آوردن بیشترین انرژی باد، سرعت زاویه‌ای روتور PMSG[۱۶] باید از طریق MSC کنترل‌شود هرچند GSC نیز مسئولیت تغذیه انرژی تولید شده به شبکه برق متناوب AC را دارد. ژنراتور مورداستفاده در توربین‌های بادی غالبا از نوع ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم می‌باشد. ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم (PMSG) از دو قسمت اصلی تشکیل-شده‌است: الف) قسمت ساکن که استاتور است. ب) قسمت گردان به نام آرمیچر یا القا شونده که عمل تبدیل انرژی الکتریکی در ژنراتورها را انجام می‌دهد. ژنراتورهای سنکرون در مقایسه با سایر ژنراتورها، بازده بالاتری در توان‌های بالا دارد و همچنین دارای قابلیت کنترل ولتاژ پایانه و توان رآکتیو می‌باشد، به همین علت کاربرد فراوانی در زمینه تولید انرژی الکتریکی دارد [۲۵و۲۶]. کاربرد این ژنراتور در توربین‌های بادی می‌باشد به طوری‌که ژنراتورهای مورد استفاده در نسل قبلی توربین‌های بادی از نوع آسنکرون می‌باشد که در آن‌ها برای ایجاد ولتاژ و فرکانس موردنظر از گیربکس استفاده می‌شد. با استفاده از این ژنراتور دیگر احتیاج به گیربکس نیست و پره به طور مستقیم به ژنراتور متصل می‌شود.

لذا در این مقاله برای طراحی و شبیه‌سازی توربین بادی در نرم افزار متلب از ژنراتور PMSG استفاده شده‌است. در توربین بادی، باد باعث حرکت پره‌های توربین می‌گردد و این پره‌ها به روتور ژنراتور سنکرون متصل هستند. با چرخش روتور نیز انرژی الکتریکی در ژنراتور سنکرون بسته به میزان سرعت باد تولید خواهدشد.

معادله مربوط به توان آیرودینامیکی تولید شده توسط پره و گشتاور آیرودینامیک به ترتیب به صورت رابطه(۵) و (۶) می باشد [۲۷]:

$$P_{\omega} = \frac{\rho \pi R^{۲} C_p(\lambda, \beta)}{۲} \qquad (۵)$$

$$T_{\omega} = \frac{P_{\omega}}{\omega_m} = \frac{\rho \pi R^{۳} C_p(\lambda, \beta)}{۲\lambda} \qquad (۶)$$

مدل‌سازی جعبه دنده به صورت روابط (۷) و (۸) می باشد:

$$\omega_e = P\omega_g = PN\omega_m \qquad (۷)$$

$$T_e = T_{\omega} + B\omega_m + J\frac{d}{dt}\omega_m \qquad (۸)$$

در روابط بالا، N نسبت تبدیل گیربکس، ω_g سرعت مکانیکی ژنراتور، P تعداد زوج قطب‌ها، J ممان اینرسی و T_e گشتاور الکترومکانیکی ژنراتور است.

معادلات الکتریکی PMSG در چهارچوب مرجع سنکرون محورd و محورq به صورت زیر داده‌شده‌است[۲۸].

$$u_d = R_s i_d + \frac{d}{dt}L_d i_d - \omega_e L_q i_q \qquad (۹)$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d}{dt}L_q i_q + \omega_e(L_d i_d + \phi) \qquad (۱۰)$$

$$T_e = \frac{۳}{۲}P\left(\left(L_d - L_q\right)i_d i_q + \phi i_q\right) \qquad (۱۱)$$

که u_d و u_q ولتاژ محورهای dq، i_d و i_q جریان محورهای dq، R_s مقاومت استاتور، L_d و L_q اندوکتانس محورهای dq و ϕ شار مغناطیس دائم است [۲۸]. با فرض $L_d = L_q = L$ معادلات (۹) تا (۱۱) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{d}{dt}i_d = -\frac{R_s}{L}i_d + \omega_e i_q + \frac{۱}{L}u_d \qquad (۱۲)$$

$$\frac{d}{dt}i_q = -\frac{R_s}{L}i_q - \omega_e i_d - \frac{\omega_e \phi}{L} + \frac{۱}{L}u_d \qquad (۱۳)$$

$$T_e = \frac{۳}{۲}P\phi i_q \qquad (۱۴)$$

برای مدل‌سازی مبدل‌های مورد استفاده در سیستم توربین بادی سرعت متغیر، مبدل پشت به پشت(back to back) بیشترین کاربرد را دارد. مزیت این مبدل نسبت به سایر مبدل‌ها، ساختار ساده‌ی آن، سیستم کنترلی ساده و مهم‌تر از همه هزینه پایین آن در مقایسه با ساختارهای سه طحی می‌باشد. برای حذف اغتشاشات هارمونیکی هم از یک فیلتر خروجی استفاده می‌شود. این مبدل شامل دو مبدل منبع ولتاژی شش سوئیچ با یک خازن در بین آنها است که معمولا به آن خازن لینک DC یا خازن جداساز گفته می‌شود که مقدار آن در این پروژه برابر ۶۸۰۰۰ میکروفاراد است. برای مبدل سمت شبکه (GSC) و مبدل سمت ژنراتور (MSC) کنترل کننده‌های PI به صورت جداگانه برای تنظیم جریان ژنراتور و توان تحویلی به شبکه در نظر گرفته می‌شوند. مبدل سمت ژنراتور (MSC) باید حداکثر توان ممکن را با کنترل سرعت توربین از ژنراتور دریافت کند و به لینک خازنی بین دو مبدل تحویل بدهد. وظیفه مبدل سمت ژنراتور حداقل کردن

[۱۳] full converter back to back
[۱۴] Machine side converter
[۱۵] Grid side converter
[۱۶] Permanent magnet synchronous generator

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-13]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.1.9]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.1]

میزان توان رآکتیو جذب شده یا تولید شده توسط ژنراتور نیز می‌باشد.

از طرف دیگر مبدل سمت شبکه (GSC) توان موجود را از لینک خازنی به شبکه تحویل می‌دهد. در واقع وظیفه این مبدل هماهنگی با شبکه قدرت می باشد تا بتواند توان اکتیو و رآکتیو موردنیاز را به شبکه تحویل بدهد و علاوه بر این مقدار ولتاژ لینک خازنی را ثابت کند.

۳-استراتژی کنترلی

۳-۱ کنترل‌کننده‌های مرتبه کسری

حسابان کسری، که یکی از شاخه‌های علم ریاضیات به شمار می‌آید به نوعی از تعاریف انتگرال و مشتق کلاسیک استخراج می‌شود[۲۹]. حساب دیفرانسیل و انتگرال کسری یک تعمیم دیفرانسیل و انتگرال مرتبه غیر صحیح است. با ${}_aD_t^\alpha$ نشان داده‌می‌شود، a و t دامنه عملیات و $\alpha \in R$. که به صورت زیر نشان داده می‌شود.

$$ {}_aD_t^\alpha = \begin{cases} \dfrac{d^\alpha}{dt^\alpha}, & \alpha > ۰, \\ ۱, & \alpha = ۰ \\ \displaystyle\int_a^t (d\tau)^\alpha, & \alpha < ۰ \end{cases} \qquad (۱۵) $$

به طور کلی کنترل کننده‌های مرتبه‌کسری را می‌توان به چهار دسته کنترل‌کننده‌های CRONE، کنترل‌کننده های TID[۱۷]، کنترل‌کننده‌های پس فاز و پیش فاز جبران ساز و مهم‌تر از همه کنترل‌کننده‌های مرتبه‌کسری $PI^\lambda D^\mu$ با انتگرال گیر از مرتبه‌کسری λ و مشتق گیر از مرتبه‌کسری μ تقسیم‌بندی کرد [۲۹].

در این مقاله برای کنترل زاویه گام توربین بادی از کنترل‌کننده PI^λ استفاده کرده‌ایم زیرا کنترل‌کننده PI نسبت به PID دارای ساختار ساده‌تر، طراحی آسان و هزینه‌های کم‌تری در صنعت می‌باشد. تابع انتقال کنترل‌کننده PI^λ در حوزه لاپلاس به صورت زیر است [۲۹]:

$$ C(s) = K_p + \frac{K_i}{S^\lambda} \qquad (۱۶) $$

برای تقریب کنترل‌کننده تناسبی انتگرالی مرتبه‌کسری از تقریب اوستالوپ استفاده می‌کنیم. این تقریب را به صورت رابطه (۱۷) نشان می‌دهیم:

$$ S^\gamma = k \prod_{k=-N}^{N} \frac{S + \omega'_k}{S + \omega_k} \qquad (۱۷) $$

این تقریب در محدوده فرکانسی (ω_b و ω_h) صادق است. در این رابطه داریم:

$$ \omega'_k = \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b}\right)^{\frac{k+N+\frac{۱}{۲}(۱-\gamma)}{۲N+۱}} $$

$$ \omega_k = \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b}\right)^{\frac{k+N+\frac{۱}{۲}(۱+\gamma)}{۲N+۱}} \text{ و } k = \omega_h^\gamma $$

γ مرتبه مشتق یا انتگرال کسری و۲N+۱ مرتبه تقریب است.

مطالعات اخیر نشان می دهد که تقریب Oustaloup از مرتبه ۵ برای عناصر مرتبه‌کسری در حوزه $\omega \in \{۱۰^{-۲}, ۱۰^{۲}\}$ رادیان رادیان بر ثانیه، رایج ترین و کاربردی ترین تقریب برای سیستم های کنترلی می باشد.

۳-۲ طراحی کنترل‌کننده PI کلاسیک برای کنترل زاویه گام توربین بادی

برای طراحی کنترل‌کننده PI کلاسیک در کنترل زاویه گام توربین بادی از پاسخ ورودی پله در زاویه گام استفاده‌شده‌است. به این ترتیب که ابتدا زاویه گام ۲ درجه و سرعت باد $۱۰\frac{m}{s}$ در نظرگرفته‌شده‌است، سپس زاویه گام یک درجه افزایش یافته و در این حالت افت دور ژنراتور مشاهده‌می‌شود، از روی پاسخ S شکل سرعت ژنراتور، مقدار تاخیر و ثابت زمانی را به دست آورده و بعد از آن مقادیر بهره‌های تناسبی و انتگرالی با روش زیگلر نیکولز[۱۸] حلقه باز به‌دست‌آمده‌است. مقدار تاخیر= τ_d ۰/۴۲۲ و ثابت زمانی τ = ۱۵/۰۹ و بهره‌ی k=۵/۰۰۴ بر حسب رادیان بر ثانیه و برای سرعت دوران پره محاسبه‌می‌شود زیرا هدف تغییر زاویه گام پره می‌باشد. همچنین مقدار بهره $k_p = ۴۵/۷۸$ و $T_i = ۱/۳۹$ به‌دست آمد.

۳-۳ طراحی کنترل‌کننده PI^λ

برای طراحی کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی مرتبه‌کسری از روش طراحی زیگلر نیکولز در مرجع [۳۰] استفاده شده‌است. برای این رویکرد،نخست پاسخ S شکل حلقه باز را به‌دست‌آورده و پس از آن مقدار تاخیر τ_d و ثابت زمانی τ از روی پاسخ حلقه باز یادداشت شده‌است.و با استفاده از این داده‌ها مقدار P و I و λ (مرتبه انتگرال کسری) برای کنترل‌کننده PI^λ به‌دست‌آمد. بهره تناسبی با استفاده از روش موجود در [۳۰] برابر ۳/۱۷۷، و بهره انتگرالی۳/۸۹ به دست آمد و همچنین مرتبه انتگرال‌گیر برابر ۰/۹ مقدار ثابت در نظرگرفته شده‌است. سپس با

[۱۷] Tilted integral derivative controller

[۱۸] Ziegler Nichols

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-13]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.1.9]

[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.1]

جایگذاری این مقادیر در بلوک‌های کنترل‌کننده در قسمت سیمولینک نرم افزار متلب، پاسخ سرعت به‌دست آمده‌است.

۳-۴ طراحی کنترل‌کننده فازی PI^{λ}

در این بخش برای طراحی کنترل‌کننده فازی PI^{λ}، با کمک سیستم فازی بهره های کنترل‌کننده PI^{λ} در هر سرعتی از باد، به صورت بهینه به‌دست‌آمده‌است. به این ترتیب که ابتدا بهره‌های کنترل‌کننده PI^{λ} در هر سرعتی از باد با روش موجود در [۳۰] به‌دست‌آمده یعنی برای سرعت‌های مختلف باد کنترل‌کننده PI^{λ} طراحی شده‌است. سپس از داده‌های تولید شده استفاده‌شده تا فازی ساخته شود یعنی به جای ضرایب K_p و T_i حالا سیستم فازی در اختیار می‌باشد. فازی سبب می‌شود تا در سرعت‌های مختلف باد ضریب مناسب وجود - داشته باشد. در ضمن از آنجایی که در سرعت‌های مختلف باد، مقدار μ نزدیک به ۰/۹ به دست آمد، بنابراین مرتبه انتگرالگیر ۰/۹ در نظر گرفته شده‌است.

حال داده‌های به دست آمده برای تنظیم سیستم فازی در جدول ۱ نشان‌داده‌شده‌است.

جدول(۱): مقادیر بهره‌ها و زاویه گام مناسب در سرعت باد مشخص

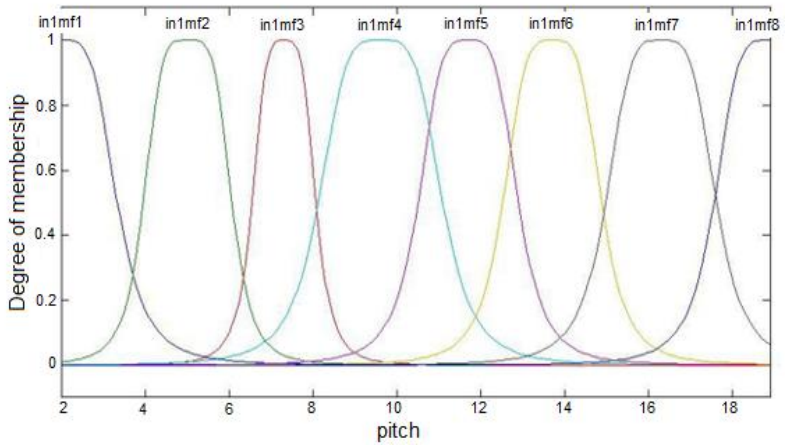
باد	k_p	T_i	مقدار گام در ۳۲۵ دور در دقیقه	λ
۱۰	۳/۱۷۷	۳/۸۹۲	۳/۵	۰/۸۵
۱۱	۱/۷۹	۳/۵	۶	۰/۸۹
۱۲	۰/۰۹۵	۳/۴۵۱	۷/۹	۰/۹۵
۱۳	۱/۶۰۴	۳/۳۴	۹/۶	۰/۹۹۹
۱۴	۱/۱	۲/۹۹	۱۱/۱	۱/۱۶
۱۵	۰/۸۲	۲/۶۹	۱۲/۵	۰/۰۴۵
۱۶	۰/۷۷	۲/۳۴	۱۴	۱/۰۶
۱۷	۰/۶۹	۲/۱۱	۱۵/۲	۱/۰۷۹
۱۸	۰/۳۳	۲/۰۲	۱۶/۵	۱/۰۸۷
۱۹	۰/۱۹	۱/۴۸	۱۷/۷	۱/۱۲
۲۰	۰/۰۲۵	۱/۷۱	۱۸/۹	۱/۱

بنابراین در کنترل‌کننده فازی، سیستم‌های فازی جایگزین بهره تناسبی و بهره انتگرالی می‌شود. به این صورت که برای هر کدام از بهره ها (تناسبی و انتگرالی) یک سیستم فازی به صورت جداگانه درنظر گرفته‌شده‌است. ورودی هر سیستم، زاویه گام و خروجی آن، مقدار ضریب K_p و T_i می‌باشد. همچنین برای بهره تناسبی و انتگرالی هرکدام هشت تابع عضویت گوسین و هشت قانون وجوددارد، که این توابع در شکل‌های (۱) و (۲) نشان داده‌شده‌است که برای هر هشت تابع عضویت نیز یک قانون موجوداست که به صورت زیر می‌باشد:

If pitch is MF_i then k_p is w_i, i=۱،۲،...۸

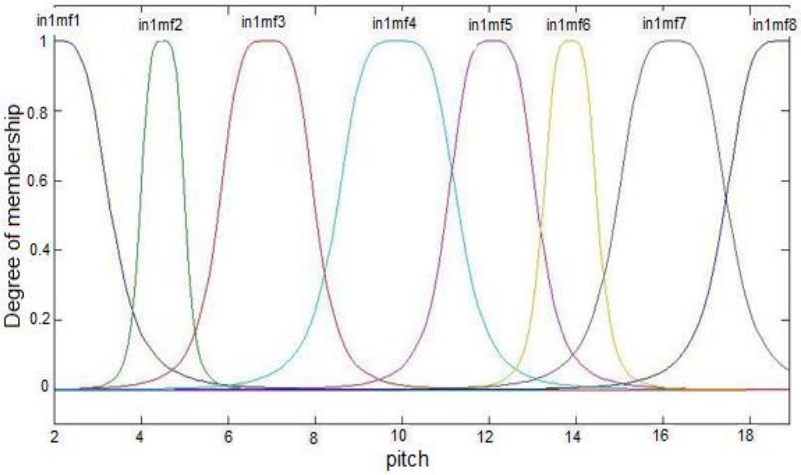
If pitch is MF_i then T_i is w_i, i =۱،۲،...۸

w_i مقدار بهره‌ی خروجی در قانون *i*ام می‌باشد که بهینه شده‌است.



شکل(۱): توابع عضویت گوسین برای بهره تناسبی k_p

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-13]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.1.9]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.1]

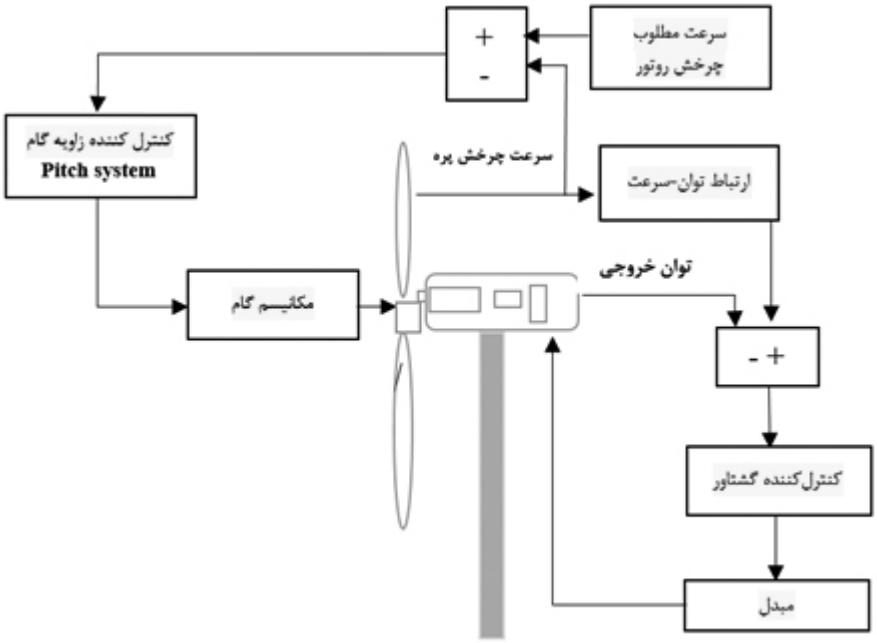


شکل(۲):توابع عضویت گوسین برای بهره انتگرالی T_i

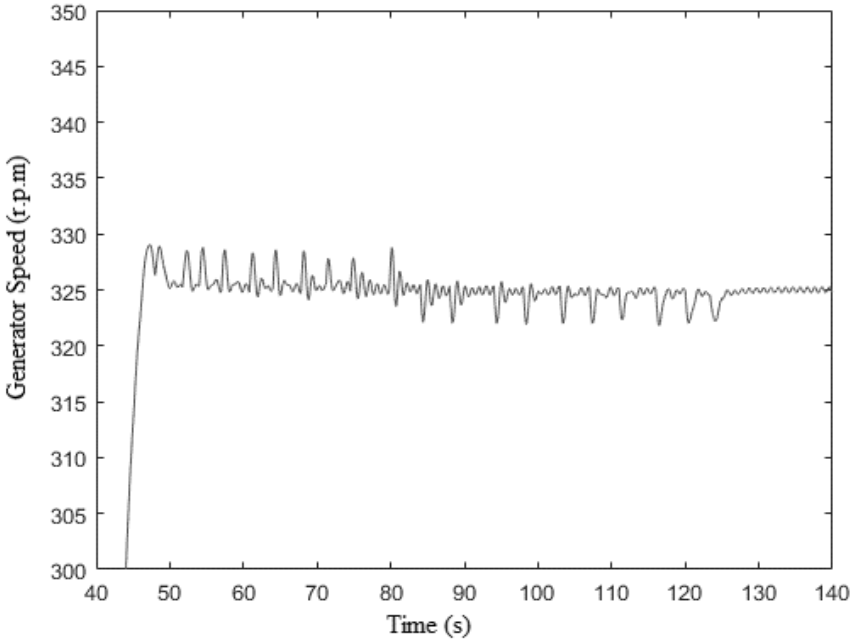
۴.شبیه‌سازی‌ها و نتایج

در بیشتر سیستم‌های صنعتی جهت افزایش دقت در طراحی و مهم‌تر از همه، کاهش هزینه‌ها، نیاز به ابزاری می‌باشد که به کمک آن بتوان عملکرد بخش‌های مختلف سیستم را قبل از ساخت نمونه نهایی ارزیابی کرد. یکی از ابزارهای بسیار کارآمد، نرم افزارهای شبیه‌سازی می‌باشند که رفتار سیستم را در شرایط مختلف به خوبی نشان می‌دهند. از آنجایی که سیستم توربین بادی از آن دسته سیستم‌های صنعتی می‌باشد که دارای هزینه راه‌اندازی بالایی است، بنابراین در این بخش از محیط simulink نرم‌افزارMATLAB جهت شبیه‌سازی عملکرد سیستم توربین بادی در شرایط مختلف استفاده شده‌است. شکل کلی فلوچارت شبیه‌سازی، در شکل (۳) نشان-داده‌شده‌است. به منظور شبیه‌سازی توربین بادی باید اجزا و زیرسیستم‌های آن شناسایی و شبیه‌سازی شوند. همانطور که در شکل (۳) مشخص است و طبق توضیحات بخش مدل‌سازی، اجزای اصلی سازنده توربین بادی شامل پره، سیستم انتقال‌قدرت، ژنراتور و مبدل الکترونیک قدرت می‌باشد که به دو بخش مکانیکی و الکتریکی تقسیم می‌شوند. بخش مکانیکی شامل پره و سیستم انتقال قدرت و بخش الکتریکی شامل ژنراتور و مبدل الکترونیک قدرت است. مدل‌سازی بخش الکتریکی توربین بادی به همراه روابط ریاضی آن، در قسمت ۲-۲ توضیح داده‌شد. برای شبیه‌سازی بخش مکانیکی توربین بادی نیز از بلوک Aero_Forces متلب استفاده شده‌است که ورودی‌های این بخش دور ژنراتور، زاویه‌گام و سرعت باد و خروجی آن شامل گشتاور آیرودینامیک است. حال آزمون شبیه‌سازی بر روی سه کنترل‌کننده PI کلاسیک و PI^{λ} و فازی و PI^{λ} برای کنترل زاویه گام بر روی مدل معیار توربین بادی ۱۰۰ کیلووات انجام شده‌است و نتایج شبیه‌سازی‌ها برای پاسخ سرعت ژنراتور با کنترل‌کننده PI وPI^{λ} و فازیPI^{λ} به ترتیب در شکل‌های (۴)، (٦) و (۸)و همچنین توان خروجی توربین برای کنترل‌کننده PI وPI^{λ} و فازیPI^{λ} به ترتیب در شکل‌های (۵)، (۷) و (۹) نشان‌داده‌شده‌است.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-13]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.1.9]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.1]

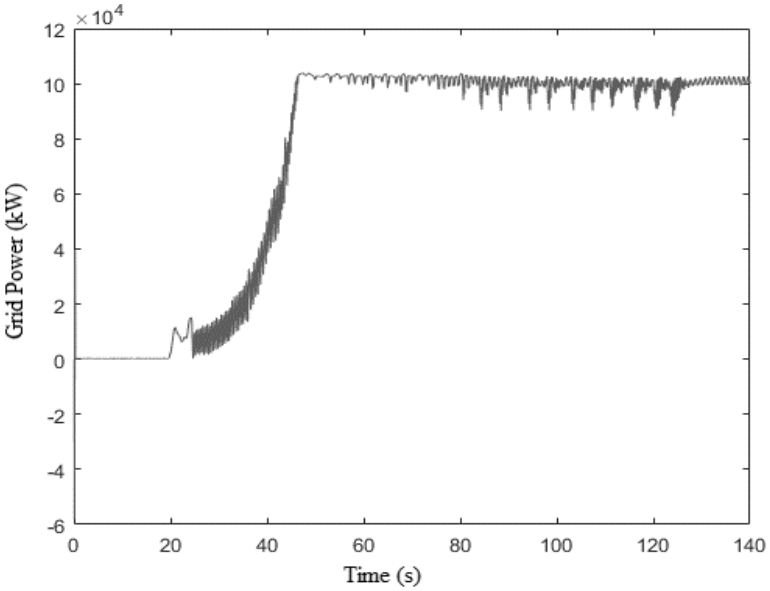


شکل(۳): فلوچارت مدل توربین بادی شبیه‌سازی شده

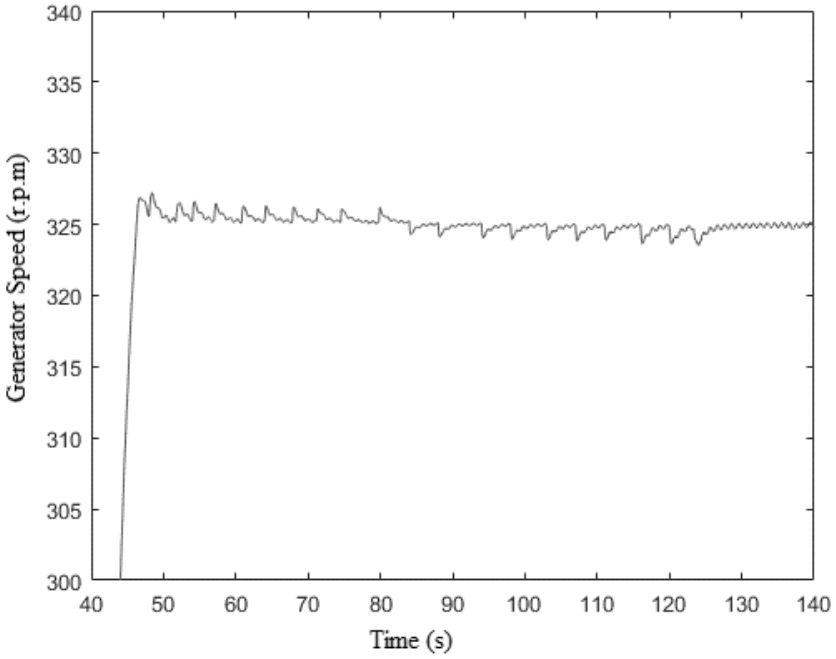


شکل(۴): پاسخ سرعت ژنراتور با کنترل‌کننده PI

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-13]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.1.9]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.1]

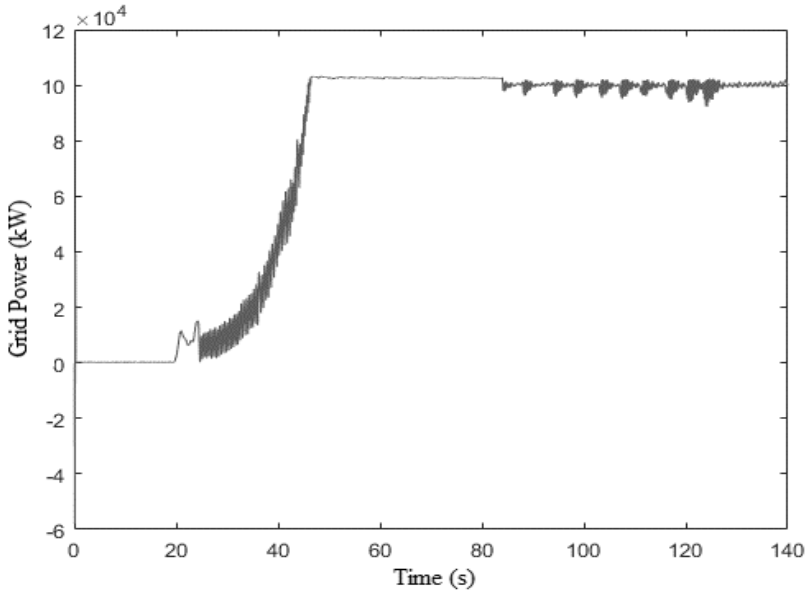


شکل(۵): توان خروجی توربین با کنترل‌کننده PI

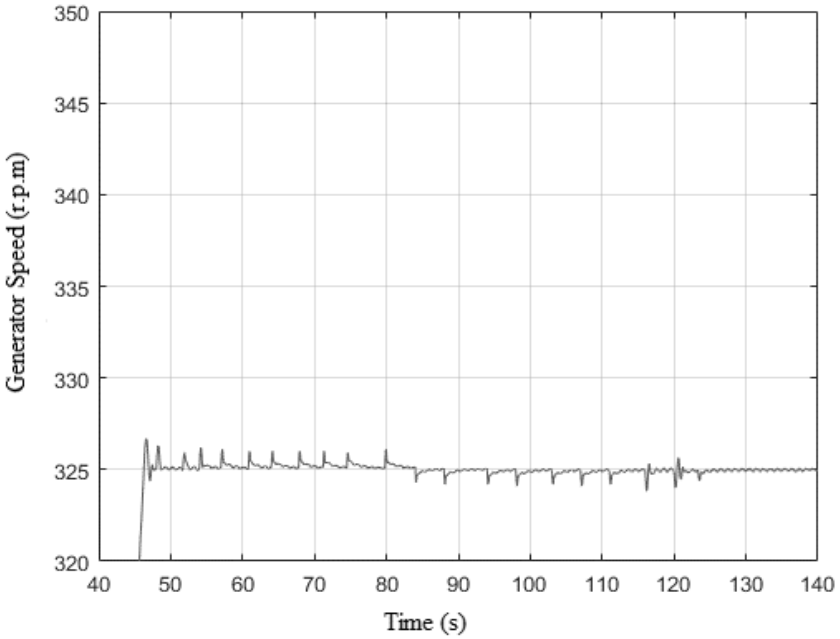


شکل(۶): پاسخ سرعت ژنراتور با کنترل‌کننده PI^{λ}

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-13]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.1.9]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.1]

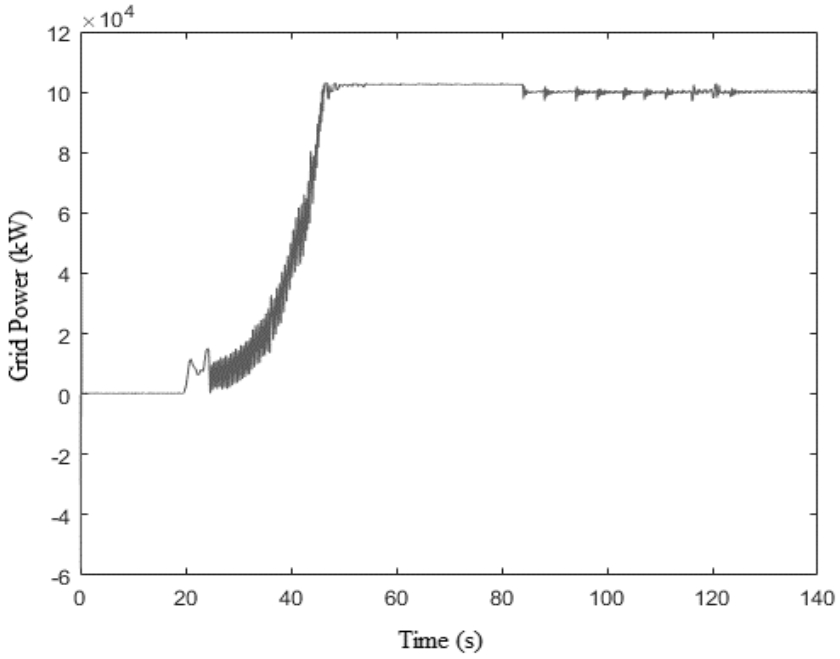


شکل(۷): توان خروجی توربین با کنترل‌کننده PI^{λ}

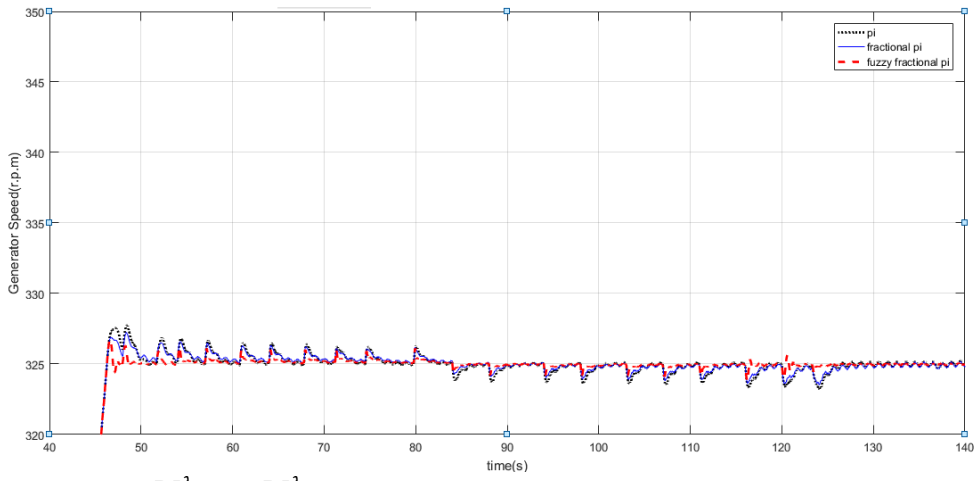


شکل (۸): پاسخ سرعت ژنراتور با کنترل‌کننده فازی PI^{λ}

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-13]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.1.9]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.1]

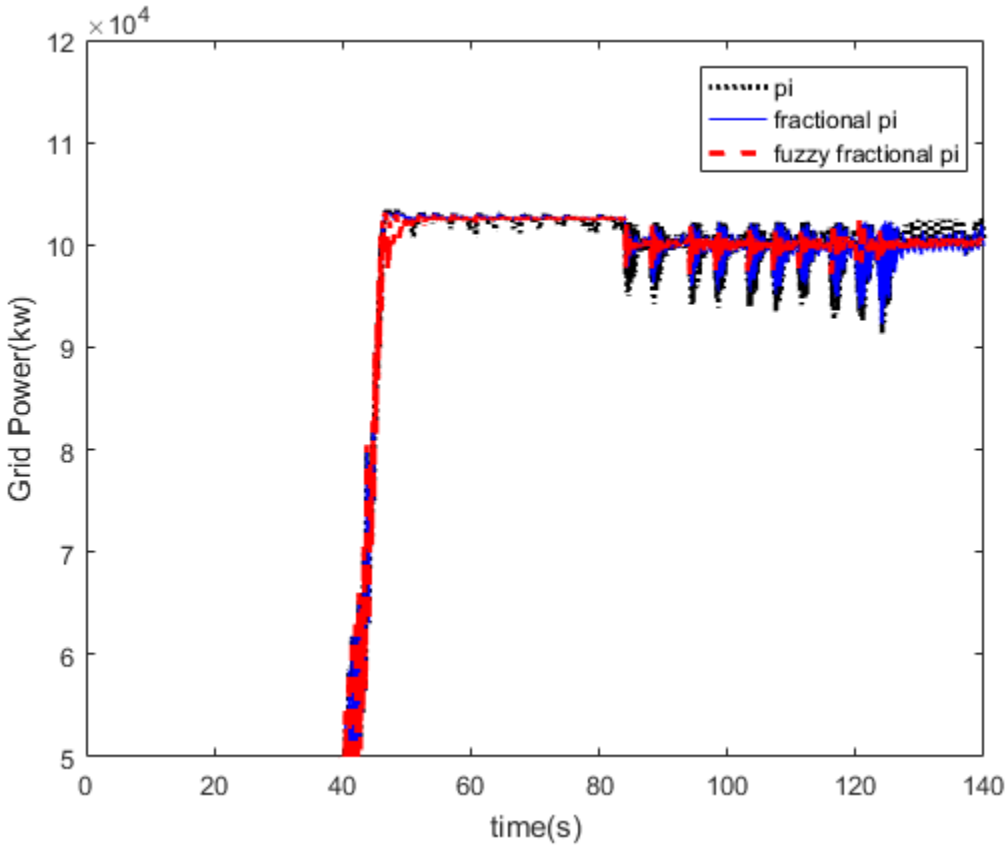


شکل(۹): توان خروجی توربین با کنترل‌کننده فازی PI^{λ}



شکل(۱۰): مقایسه پاسخ سرعت ژنراتور با سه کنترل‌کننده PI و PI^{λ} و فازی PI^{λ}

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-13]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.1.9]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.1]



شکل (۱۱): درشتنمایی توان خروجی سه کنترل‌کنندهPI و PI^{λ} و فازی PI^{λ}

لازم به ذکر است که توان خروجی توربین با هر سه کنترل‌کننده طبق شکل‌های (۵)، (۷) و (۹) از ثانیه ۸۰ به بعد دارای نوسانات زیادی است به این علت که کنترل‌کننده برای افزایش سرعت باد و در واقع افزایش زاویه گام در ناحیه سوم توربین بادی طراحی شده‌است و از ثانیه ۸۰ به بعد سرعت باد در حال افت است و باید زاویه گام را کاهش داد، حال برای عملکرد بهتر و حذف این نوسانات بایستی که کنترل‌کننده برای کاهش زاویه گام به صورت جداگانه طراحی شود که نیاز به ملزومات خاصی دارد که در این مقاله از آن صرف نظر شده‌است.

همانطور که در شکل‌های (۱۰) و (۱۱) دیده می‌شود کنترل‌کننده فازی PI^{λ} پاسخ نرم‌تر و نوسانات کم‌تری نسبت به کنترل‌کننده PI و کنترل‌کننده PI^{λ} دارد. در حقیقت با استفاده از فازی در هر نقطه کار بهترین بهره‌های بهینه به دست آمده‌است و در جدولی ثبت شده‌است که جدول‌بندی بهره نامیده می‌شود. حال برای مقایسه‌ی سه کنترل‌کننده از معیار عددی مناسب مجذور میانگین مربعات خطا(RMSE[۱۹]) استفاده شده‌است.

بااستفاده از معیار RMSE می‌توان میزان مطلوبیت عملکرد سه کنترل‌کننده را دقیق‌تر بررسی کرد. نتایج به‌دست‌آمده در جدول (۲) نشان‌داده‌شده‌اند. برای محاسبه RMSE از رابطه (۱۸) استفاده شده‌است. همانطور که در جدول (۲)مشاهده می‌شود، معیار RMSE در مورد سرعت ژنراتور و توان خروجی توربین برای کنترل‌کننده فازی PI^{λ}، مقدار کوچکتری نسبت به دو کنترل‌کننده دیگر به دست آمد. به این ترتیب برتری این کنترل‌کننده با قطعیت اثبات شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(x_i - x_{naminal})^2} \qquad (۱۸)$$

[۱۹] Root mean square error

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-13]
[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.1.9]
[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.1]

جدول(۲): مقایسه سه کنترل‌کننده با معیار rmse

	کنترل کننده PI	کنترل کننده PI^{λ}	کنترل کننده فازی PI^{λ}
سرعت ژنراتور(rpm)	۰/۶۶	۰/۶۰۵۴	۰/۳۵۴۷
توان خروجی(KW)	۳/۱۸۰۴	۲/۶۹	۱/۸۴

۵. نتیجه گیری

با توجه به اهمیت مسئله تنظیم مناسب زاویه گام توربین بادی در توربین‌های بادی سرعت متغیر، طراحی کنترل‌کننده موثر فازی PI^{λ} با کمک جدول‌بندی‌بهره مطرح شد. در حقیقت ابتدا سه روش کنترلی در مورد آن مورد آزمایش قرار گرفت. برای هر کدام از روش‌های کنترلی نحوه طراحی کنترل-کننده توضیح داده‌شده‌است و سپس بر روی مدل توربین بادی مورد آزمون قرارگرفته‌است. سه کنترل‌کننده موردآزمایش، کنترل‌کننده‌های PI، PI^{λ} و فازی PI^{λ} می‌باشند، که همانطور از نتایج به دست آمد، کنترل‌کننده فازی PI^{λ} با کمک جدول‌بندی بهره برای کنترل زاویه گام نتایج بهتری را نشان داد. در طراحی کنترل‌کننده فازی PI^{λ}، از منطق فازی به تنهایی استفاده نمی‌کنیم بلکه سیستم فازی را برای تعیین بهره‌های کنترل‌کننده به صورت بهینه و با جدول بندی بهره‌به کار می‌بریم. همانطور که نتایج آزمایش‌های کنترل‌کننده‌های پیشنهادی نشان می‌دهد در کنترل زاویه گام، کنترل‌کننده فازی PI^{λ} با توجه به شکل‌های رسم شده و هم‌چنین معیار RMSE عملکرد بهتری را در مقایسه با کنترل‌کننده PI و کنترل‌کننده PI^{λ} دارد. به این‌صورت که کنترل‌کننده فازی PI^{λ} توانسته‌است به صورت نرم‌تر و هموارتر و با خطای کم‌تری، سرعت چرخش روتور و مقدار توان خروجی را در مقدار نامی خود تنظیم کند. بنابراین به طور کلی می‌توانیم نتیجه بگیریم که کنترل‌کننده مناسب برای کنترل زاویه گام، کنترل‌کننده‌ای است که بتواند خود را با تغییرات نقاط کار تطبیق داده و با ایجاد زاویه گام مناسب، سرعت توربین و توان تولیدی را بر روی مقادیر نامی آن‌ها به صورت نرم‌تری تنظیم کند.

مراجع

[۱]: Shamsnia, Ali, Hossein Hosseini, and Saeed Danyali. "Modeling and simulation of PV cell-wind turbine hybrid inverter with MPPT algorithms." *Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity* ۱, no. ۲ (۲۰۱۳): ۸-۱۸.

[۲]: Safaeei, Arman, Seyed Hossein Hosseinian, and Hossein Askarian Abyaneh. "Fault Ride through Capability Improvement of the DFIG-Based Wind Turbine in Microgrid." *Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity* ٦, no. ۲ (۲۰۱۸): ۳٤-٤٥.

[۳]: Abir, Afdhal, Dhaoui Mehdi, and Sbita Lassaad. "Pitch angle control of the variable speed wind turbine." In *۲۰۱٦ ۱۱th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, pp. ٥٨٢-٥٨٧. IEEE, ۲۰۱٦.

[٤]: Jesus, Isabel S., and Ramiro S. Barbosa. "Fuzzy fractional PID controller tuned through a PSO algorithm." In *CONTROLO'۲۰۱٤–Proceedings of the ۱۱th Portuguese Conference on Automatic Control*, pp. ۲۰۷-۲۱٦. Springer, Cham, ۲۰۱٥.

[٥]: Rahmani, Mohsen, Ali Barootiha, and Mahmoud Samadi. "Robust Fuzzy Fractional-Order PID Controller Design using Multi-Objective Optimization." *J. Basic Appl. Sci. Res.* ۳, no. ۲ (۲۰۱۳): ۲۳۲-۲۳٦.

[٦]: Tian, Xiaomin, Yourui Huang, and Canming Zhang. "The tuning principle of adaptive fuzzy fractional-order PID controller parameters." *Procedia Engineering* ۷ (۲۰۱۰): ۲٥۱-۲٥٥.

[۷]: M. W. Foley, R. H. Julien, and B. R. Copeland, "*A Comparison of PID Controller Tuning Methods*," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. ۸۳, no. ٤, pp. ۷۱۲–۷۲۲, ۲۰۰۸.

[۸]: Astrom, K. J., and T. Hagglund. "PID controllers: Theory, Design, and Tuning ۲nd Ed.. Instr." *Society of America* (۱۹۹٥).

[۹]: Tapia, Gerardo, Arantxa Tapia, and J. Xabier Ostolaza. "Two alternative modeling approaches for the evaluation of wind farm active and reactive power performances." *IEEE transactions on energy conversion* ۲۱, no. ٤ (۲۰۰٦): ۹۰۹-۹۲۰.

[۱۰]: Hand, M., and Mark Balas. "Systematic approach for PID controller design for pitch-regulated, variable-speed wind turbines." In *۱۹۹۸ ASME Wind Energy Symposium*, p. ۳۱. ۱۹۹۸.

[۱۱]: Yin, Xiuxing, Wencan Zhang, Zhansi Jiang, and Li Pan. "Adaptive robust integral sliding mode pitch angle control of an electro-hydraulic servo pitch system for wind turbine." *Mechanical Systems and Signal Processing* ۱۳۳ (۲۰۱۹): ۱۰٥۷۰٤.

[۱۲]: Colombo, L., M. L. Corradini, G. Ippoliti, and G. Orlando. "Pitch angle control of a wind turbine operating above the rated wind speed: A sliding mode control approach." *ISA transactions* (۲۰۱۹).

[۱۳]: Lan, Jianglin, Ron J. Patton, and Xiaoyuan Zhu. "Fault-tolerant wind turbine pitch control using adaptive sliding mode estimation." *Renewable Energy* ۱۱٦ (۲۰۱۸): ۲۱۹-۲۳۱.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-13]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.1.9]

[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.1]

[۱٤]: Vieira, João PA, Marcus VA Nunes, Ubiratan H. Bezerra, and Walter Barra Jr. "Novas estratégias de controle fuzzy aplicadas ao conversor do DFIG para melhoria da estabilidade transitória em sistemas eólicos." *IEEE Latin America Trans* ٥, no. ٣ (٢٠٠٧): ١٤٣-١٥٠.

[١٥]: Civelek, Zafer. "Optimization of fuzzy logic (Takagi-Sugeno) blade pitch angle controller in wind turbines by genetic algorithm." *Engineering Science and Technology, an International Journal* (٢٠١٩).

[١٦]: Asgharnia, Amirhossein, Reza Shahnazi, and Ali Jamali. "Performance and robustness of optimal fractional fuzzy PID controllers for pitch control of a wind turbine using chaotic optimization algorithms." *ISA transactions* ٧٩ (٢٠١٨): ٢٧-٤٤.

[١٧]: Hur, Sung-ho, and Bill Leithead. "Model predictive control of a variable-speed pitch-regulated wind turbine." In *٢٠١٦ UKACC ١١th International Conference on Control (CONTROL)*, pp. ١-٦. IEEE, ٢٠١٦.

[١٨]: Lasheen, Ahmed, and Abdel Latif Elshafei. "Wind-turbine collective-pitch control via a fuzzy predictive algorithm." *Renewable energy* ٨٧ (٢٠١٦): ٢٩٨-٣٠٦.

[١٩]: Pahasa, Jonglak, and Issarachai Ngamroo. "Coordinated control of wind turbine blade pitch angle and PHEVs using MPCs for load frequency control of microgrid." *IEEE Systems Journal* ١٠, no. ١ (٢٠١٦): ٩٧-١٠٥.

[٢٠]: Viveiros, C., Rui Melício, José M. Igreja, and Víctor Manuel Fernandes Mendes. "Fractional order control on a wind turbine benchmark." In *٢٠١٤ ١٨th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, pp. ٧٦-٨١. IEEE, ٢٠١٤.

[٢١]: Viveiros, Carla, Rui Melício, José M. Igreja, and Victor MF Mendes. "Fuzzy, integer and fractional-order control: Application on a wind turbine benchmark model." In *٢٠١٤ ١٩th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, pp. ٢٥٢-٢٥٧. IEEE, ٢٠١٤.

[٢٢]: Yassin, H. M., H. H. Hanafy, and Mohab M. Hallouda. "Design and implementation of PI controllers of direct drive PMSG wind turbine system tuned by Linearized biogeography-based optimization technique." In *IECON ٢٠١٦-٤٢nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. ٤٠٧٢-٤٠٧٧. IEEE, ٢٠١٦..

[٢٣]: Vidal, Yolanda, Leonardo Acho, Ningsu Luo, and Christian Tutiven. "Hardware in the loop wind turbine simulator for control system testing." In *Wind Turbine Control and Monitoring*, pp. ٤٤٩-٤٦٦. Springer, Cham, ٢٠١٤.

[٢٤]: Onar, O. C., M. Uzunoglu, and M. S. Alam. "Dynamic modeling, design and simulation of a wind/fuel cell/ultra-capacitor-based hybrid power generation system." *Journal of power sources* ١٦١, no. ١ (٢٠٠٦): ٧٠٧-٧٢٢.

[٢٥]: Song, Juncai, Fei Dong, Jiwen Zhao, Siliang Lu, Shaokun Dou, and Hui Wang. "Optimal design of permanent magnet linear synchronous motors based on Taguchi method." *IET Electric Power Applications* ١١, no. ١ (٢٠١٧): ٤١-٤٨.

[٢٦]: El-Refaie, Ayman M. "Fractional-slot concentrated-windings synchronous permanent magnet machines: Opportunities and challenges." *IEEE Transactions on industrial Electronics* ٥٧, no. ١ (٢٠١٠): ١٠٧-١٢١.

[٢٧]: Burton, Tony, David Sharpe, and Nick Jenkins. *Handbook of wind energy*. John Wiley & Sons, ٢٠٠١.

[٢٨]: Slootweg, Han, and E. De Vries. "Inside wind turbines-Fixed vs. variable speed." *Renewable Energy World* ٦, no. ١ (٢٠٠٣): ٣٠-٤١.

[٢٩]: Mann, George KI, Bao-Gang Hu, and Raymond G. Gosine. "Analysis of direct action fuzzy PID controller structures." *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)* ٢٩, no. ٣ (١٩٩٩): ٣٧١-٣٨٨.

[٣٠]: Valério, Duarte, and José Sá Da Costa. "Tuning of fractional PID controllers with Ziegler–Nichols-type rules." *Signal processing* ٨٦, no. ١٠ (٢٠٠٦): ٢٧٧١-٢٧٨٤.

[Downloaded from ieijqp.ir on 2026-07-13]

[DOR: 20.1001.1.23222344.1399.9.1.1.9]

[DOI: 10.29252/ieijqp.9.1.1]