

طراحی کنترل کننده 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

khaterehfajami@yahoo.com

۲- دانشکده فنی دانشگاه بناب-بناب-ایران

a.mzadeh@ubonab.ac.ir

۳- دانشکده فنی دانشگاه بناب-بناب-ایران

ali.ahmadian1367@gmail.com

۴- دانشکده فنی دانشگاه بناب-بناب-ایران

shoja.sajjad@ubonab.ac.ir

چکیده: از وظایف مهم سیستم کنترل در توربین‌های بادی ثابت نگاه‌داشتن توان در مقدار نامی در بادهای با سرعت بیشتر از سرعت نامی می‌باشد زیرا عدم ثابت نگاه‌داشتن توان در مقدار نامی در ناحیه سوم منحنی 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 کنترل کننده فازی تناسبی-انتگرالی مرتبه کسری (فازی PI^λ) برای زاویه گام توربین بادی پرداخته شده است و سپس با کنترل کننده تناسبی-انتگرالی مرتبه کسری (PI^λ) و تناسبی-انتگرالی مرتبه صحیح (PI) مورد مقایسه و ارزیابی قرار داده شده است و نتایج بر روی یک مدل معیار توربین بادی ۱۰۰ کیلووات سرعت متغیر طراحی و شبیه‌سازی شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داده‌اند که کنترل کننده فازی PI^λ با توجه به معیار RMSE عملکرد بهتری در مقایسه با کنترل کننده PI^λ و کنترل کننده PI کلاسیک داشته است و کنترل کننده فازی PI^λ کنترل هموارتر و تثبیت مناسب‌تری بر روی سیگنال‌های توان خروجی و سرعت ژنراتور در ناحیه سوم عملکرد داشته است.

واژه‌های کلیدی: کنترل زاویه گام، توربین بادی، کنترل کننده PI، کنترل کننده PI^λ مرتبه کسری، کنترل کننده 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

۱- مقدمه

انرژی‌های تجدیدپذیر به دلیل دارا بودن مزایای زیست‌محیطی و اقتصادی توجه بیشتری را در سیستم‌های قدرت امروزی به خود جلب کرده‌است [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 مورد توجه قرار گرفته‌است. یکی از مسائل مهم در بهره‌برداری 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 زمانی که سرعت باد نامی بالاتر است.

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

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 $DPSO^1$ برای بهینه‌سازی بهره‌های کنترل‌کننده PID مرتبه‌کسری فازی و بهبود کارایی در نیروگاه سیکل ترکیبی شفت یکپارچه $^2(CCPP)$ ارائه شده‌است. در مرجع [۵] تنظیم پارامترهای کنترل‌کننده $PD^{\beta} + I$ به وسیله 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 آنالین 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، زمانی که 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 علی‌رغم 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 می‌توان با استفاده از روش‌های کنترلی غیرخطی کلاسیک (تطبیقی/مقاوم) و یا با روش‌های کنترلی هوشمند برطرف کرد. در [۱۱] تا [۱۳] از روش کنترلی مدل‌گزشی 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 تقریباً ۱۰

^۳ Parto

^۴ Settling time

^۵ Overshoot

^۱ Dynamic particle swarm optimization

^۲ Combined cycle power plant

با یک روتور سه پره می‌باشد. در این مدل کنترل کننده انتگرالی تناسبی مرتبه کسری ($FOPI^\lambda$) قرار است که روی زاویه گام عمل کنند تا توان خروجی در حدود توان نامی $4/8$ مگاوات باشد. در بخش کنترلی مقاله [۲۰] چهار ناحیه عملیاتی در رابطه با توان و قدرت باد به طور جداگانه بررسی شده است تا توربین بادی سرعت متغیر در مدل سازی رفتار مطلوبی را از خود نشان بدهد. در مقاله [۲۰] کنترل کننده مرتبه کسری فقط بر روی نواحی دوم و سوم پیاده سازی شده است.

در انتهای [۲۰] به سبب اعتبارسنجی کنترل کننده $FOPI$ شبیه سازی و مقایسه بین $FOPI$ و کنترل کننده PID مرتبه صحیح انجام شده است و عملکرد خوب این روش را نشان داده است. مرجع [۲۱] برای کنترل گام توربین بادی، کنترل کننده انتگرالی تناسبی مرتبه کسری و انتگرالی تناسبی مرتبه صحیح و کنترل کننده انتگرالی تناسبی فازی را بر روی یک مدل معیار توربین بادی از نوع سرعت متغیر پیاده سازی می‌کند و در آخر نتایج پیاده سازی این سه نوع کنترل کننده را با یکدیگر مقایسه می‌کند. همانطور که در مقاله [۲۱] هم بیان شده است، یک مسئله مهم برای سیستم تبدیل انرژی باد، توانایی سیستم های کنترل در جمع آوری، تجزیه و تحلیل و پردازش داده ها از توربین بادی می‌باشد. ضبط و گرفتن توان برای WECS^۹ اهمیت زیادی دارد و مناسب ترین رویکرد برای جذب توان بیشتر توسط روتور، استفاده از سیستم کنترل گام می‌باشد که به واسطه ی موقعیت های مختلف پره ها می‌تواند زاویه گام را به گونه ای 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 جنبه های مهم مثل سرعت باد، اجزای توربین بادی و عملکردهای آن ها در یک سیستم حلقه بسته در نظر گرفته شده است و مانند مقاله [۲۰] [چهار منطقه عملیاتی را برای توربین بادی داریم. ساختار کنترل کننده 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 شده است. در انتها [۲۱] شبیه سازی ها برای سه کنترل کننده انتگرالی تناسبی مرتبه کسری و انتگرالی تناسبی مرتبه صحیح و انتگرالی تناسبی فازی انجام شده است که برای کنترل کننده های انتگرالی تناسبی مرتبه کسری و صحیح، توربین بادی برای نقطه تنظیم توان $4/8$ مگاوات و سرعت باد 13 متر بر ثانیه، خطی سازی شده است، همچنین مرتبه کسری $0/5$ در نظر گرفته شده است. برای ارزیابی عملکرد کنترل کننده ها در [۲۰] از معیار انتگرال حاصل ضرب زمان

متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است و ناحیه عملیاتی دوم برای سرعت های کمی بالاتر از سرعت مجاز باد می‌باشد که تقریباً 14 متر بر ثانیه می‌باشد، سپس برای طراحی کنترل کننده، دو روش مختلف خطی سازی را به کار برده است و کنترل کننده ای را که با روش اول، خطی سازی شده است نوع A و کنترل کننده ای که با روش دوم خطی سازی شده است را نوع B نامیده است سپس این دو روش را مورد ارزیابی قرار داده است. یک تفاوت عمده بین نوع A و نوع B در [۱۷] سادگی آنها می‌باشد زیرا مدل A دارای مرتبه های به مراتب بالاتر می‌باشد در حالی که مدل B مرتبه های پایین تری دارد که باعث سادگی طرح می‌شود و بنابراین در [۱۷] توصیه می‌شود که طرح های کنترلی برای طراحی کنترل کننده های MPC^۶ برای توربین های بادی تا حد امکان ساده باشد. در [۱۸] الگوریتم جدید پیش بین فازی برای کنترل گام اشتراکی توربین های بادی بزرگ ارائه شده است. کنترل کننده های گام در این مقاله به منظور حفظ سرعت و توان مجاز در سه ناحیه عملیاتی توربین های بادی عمل می‌کنند. توربین بادی در مقاله [۱۸] با مدل فازی تاکاگی سوگنو ($T-S^v$) مدل سازی شده است و مدل کنترل کننده پیش بین بر اساس مدل فازی با توجه به محدودیت های عملکرد گام طراحی شده است. مقاله [۱۸] کنترل هماینگ زاویه گام پره ژنراتورهای توربین بادی و وسایل نقلیه هیبریدی متصل به برق را برای کنترل فرکانس بار میکرو شبکه با استفاده از مدل کنترل کننده های پیش بین ارائه می‌دهد. MPC ها یک مدل موثر بر اساس کنترل پیش بین هستند به طوریکه محاسبات سیگنال های کنترلی آینده را به وسیله ی روش بهینه سازی با استفاده از مدل پلنت فعلی و سیگنال های گذشته سیستم محاسبه می‌کند [۱۸]. در مرجع [۱۹] یک مطالعه شبیه سازی برای کنترل سرعت توربین بادی انجام شده است تا عملکرد و اثربخشی کنترل کننده $PI^\lambda D^\mu$ خودتنظیم حلقه بسته مطلوب را نشان بدهد. نتیجه نهایی [۱۹] این بوده است که توانسته یک تکنیک جدید برای تنظیم کنترل کننده $PI^\lambda D^\mu$ ارائه دهد که هدف آن کنترل سرعت توربین بادی بوده که در مدل ریاضی به کار برده شده نیاز به کنترل کننده مقاوم بوده است. از مزایای اصلی روش گفته شده در مقاله [۱۹] سادگی آن است که می‌توان پارامترهای کنترل کننده را مستقیماً از پارامترهای پلنت و با توجه به ویژگی های مطلوب به دست آورد.

در مرجع [۲۰] یک سیستم ترکیبی که به صورت توربین بادی و پیل سوختی می‌باشد، استفاده شده است. مدل سازی توربین بادی سرعت متغیر شامل یک توربین محور افقی همراه

^۸ Fractional Order Proportional Integral
^۹ Wind energy converter system

^۶ Model predictive control
^۷ Takagi-Sugeno

وجود 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 می‌توان تغییرات ضریب توان $C_p(\lambda, \beta)$ را به صورت تابعی از پارامتر زاویه گام پره (β) و نسبت سرعت نوک λ نشان داد. که λ نرخ سرعت باد در بالای پره نسبت به سرعت باد منطقه است که با رابطه‌ی (۴) نشان داده می‌شود. بر اساس تحقیقات قبلی، مقدار ضریب توان نمی‌تواند از $C_{p\max} = 16.27$ بیشتر بشود که به آن حد بتز^{۱۱} می‌گویند. توان آیرودینامیکی یک سطح مشخص از جریان باد به صورت زیر محاسبه می‌گردد [۲۳].

$$P_a = \frac{1}{2} \rho A V^3, \quad A = \pi R^2 \quad (1)$$

V سرعت باد، ρ چگالی هوا، R شعاع روتور، A کل سطح جاروب شده توسط پرها 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.

$$C_p = \frac{P}{P_a} = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3} \quad (2)$$

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3 \quad (3)$$

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V_{wind}} \quad (4)$$

P توان منتقل شده 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

در قدرمطلق خطا ($ITAE^{10}$) استفاده شده است. نتایج مقایسه نشان داده است که کنترل کننده FOPI عملکرد سیستم را با توجه به خطای سیستم و تلاش کنترلی سیستم نسبت به کنترل کننده کلاسیک مرتبه صحیح ارتقاء بخشیده است [۲۱]. برتری کنترل کننده انتگرالی تناسبی فازی بر دو کنترل کننده دیگر این بود که برای مدل غیرخطی سیستم هم به کار می‌رود و برعکس دو کنترل کننده دیگر، نیازی به خطی‌سازی سیستم نبوده است و همچنین عدم قطعیت‌ها را به خوبی با مدل فازی می‌توان مدل کرد. اما اشکال این روش عدم بهینه‌سازی بهره‌های کنترل کننده می‌باشد در حالی که در روش پیشنهادی در این پژوهش، از فازی برای بهینه‌سازی بهره‌های کنترل کننده PI^{λ} استفاده شده است که در هر سرعتی از باد به صورت آنلاین بهترین بهره‌ها را خواهیم داشت که در جدول مناسبی آورده ایم. در واقع سیستم فازی آموزش داده شده، بهره‌های مناسب کنترل کننده را در سرعت‌های مختلف باد تعیین می‌کند.

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

۲-۲ 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 پرها مستقیماً به ژنراتور منتقل می‌شود که اصطلاحاً Direct drive نامیده می‌شوند.

۲-۱ آیرودینامیک

در توربین‌های بادی دو عامل مهم یعنی نیروهای حاصل از تراکنش باد و پرها 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 داشته باشیم. برای به دست آوردن یک مدل ساده و مناسب باید تاثیر برآیند نیروهای

^{۱۱} Tip speed ratio

^{۱۲} Betz

^{۱۰} The integral of time multiplied by the absolute value

$$\omega_e = P\omega_g = PN\omega_m \quad (7)$$

$$T_e = T_\omega + B\omega_m + J\frac{d}{dt}\omega_m \quad (8)$$

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 محور d و محور q به صورت زیر داده شده است [28].

$$u_d = R_s i_d + \frac{d}{dt}L_d i_d - \omega_e L_q i_q \quad (9)$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d}{dt}L_q i_q + \omega_e(L_d i_d + \phi) \quad (10)$$

$$T_e = \frac{3}{2}P \left((L_d - L_q) i_d i_q + \phi i_q \right) \quad (11)$$

که u_d و u_q ولتاژ محورهای dq ، i_d و i_q جریان محورهایی dq ، R_s مقاومت استاتور، L_d و L_q اندوکتانس محورهایی dq و ϕ شار مغناطیس دائم است [28]. با فرض $L_d = L_q = L$ معادلات (9) تا (11) را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\frac{d}{dt}i_d = -\frac{R_s}{L}i_d + \omega_e i_q + \frac{1}{L}u_d \quad (12)$$

$$\frac{d}{dt}i_q = -\frac{R_s}{L}i_q - \omega_e i_d - \frac{\omega_e \phi}{L} + \frac{1}{L}u_q \quad (13)$$

$$T_e = \frac{3}{2}P\phi i_q \quad (14)$$

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 هارمونیک هم از یک فیلتر خروجی استفاده می‌شود. این مبدل شامل دو مبدل منبع ولتاژی شش سوئیچ با یک خازن در بین آنها است که معمولاً 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

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^{۱۴} (MSC) و مبدل سمت شبکه^{۱۵} (GSC) تشکیل شده است. برای به دست آوردن بیشترین انرژی باد، سرعت زاویه‌ای روتور^{۱۶} PMSG باید از طریق MSC کنترل شود هرچند GSC نیز مسئولیت تغذیه انرژی تولید شده به شبکه برق متناوب AC را دارد. ژنراتور مورد استفاده در توربین‌های بادی غالباً از نوع ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم می‌باشد. ژنراتورهای سنکرون مغناطیس دائم (PMSG) از دو قسمت اصلی تشکیل شده است: 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 راکتیو می‌باشد، به همین علت کاربرد فراوانی در زمینه تولید انرژی الکتریکی دارد [25 و 26]. کاربرد این ژنراتور در توربین‌های بادی می‌باشد به طوری که 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 شده است. 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 خواهد شد.

معادله مربوط به توان آیرودینامیکی تولید شده توسط پره و گشتاور آیرودینامیک به ترتیب به صورت رابطه (5) و (6) می‌باشد [27]:

$$P_\omega = \frac{\rho \pi R^3 C_p(\lambda, \beta)}{2} \quad (5)$$

$$T_\omega = \frac{P_\omega}{\omega_m} = \frac{\rho \pi R^3 C_p(\lambda, \beta)}{2\lambda} \quad (6)$$

مدل‌سازی جعبه دنده به صورت روابط (7) و (8) می‌باشد:

^{۱۳} full converter back to back

^{۱۴} Machine side converter

^{۱۵} Grid side converter

^{۱۶} Permanent magnet synchronous generator

میزان توان راکتیو 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 راکتیو موردنیاز را به شبکه تحویل بدهد و علاوه بر این مقدار ولتاژ لینک خازنی را ثابت کند.

۳- استراتژی کنترلی

۳-۱ کنترل کننده‌های 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^α نشان داده می‌شود، a و t دامنه عملیات و $\alpha \in R$ که به صورت زیر نشان داده می‌شود.

$${}_aD_t^\alpha = \begin{cases} \frac{d^\alpha}{dt^\alpha}, & \alpha > 0, \\ 1, & \alpha = 0, \\ \int_a^t (d\tau)^\alpha, & \alpha < 0. \end{cases} \quad (15)$$

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

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

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s^\lambda} \quad (16)$$

برای تقریب کنترل کننده تناسبی انتگرالی مرتبه کسری از تقریب اوستالوپ استفاده می‌کنیم. این تقریب را به صورت رابطه (۱۷) نشان می‌دهیم:

$$S^\gamma = k \prod_{k=-N}^N \frac{S + \omega'_k}{S + \omega_k} \quad (17)$$

این تقریب در محدوده فرکانسی $(\omega_b$ و $\omega_h)$ صادق است. در این رابطه داریم:

$$\omega'_k = \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b} \right)^{\frac{k+N+\frac{1}{2}(1-\gamma)}{2N+1}}$$

$$\omega_k = \omega_b \left(\frac{\omega_h}{\omega_b} \right)^{\frac{k+N+\frac{1}{2}(1+\gamma)}{2N+1}} \quad \text{و} \quad k = \omega_h^\gamma$$

γ مرتبه مشتق یا انتگرال کسری و $2N+1$ مرتبه تقریب است. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که تقریب Oustaloup از مرتبه ۵ برای عناصر مرتبه کسری در حوزه $\{\omega \in \{10^{-2}, 10^2\}\}$ رادیان رادیان بر ثانیه، رایج ترین و کاربردی ترین تقریب برای سیستم های کنترلی می باشد.

۳-۲ طراحی کنترل کننده PI کلاسیک برای

کنترل زاویه گام توربین بادی

برای طراحی کنترل کننده PI کلاسیک در کنترل زاویه گام توربین بادی از پاسخ ورودی پله در زاویه گام استفاده شده‌است. به این ترتیب که ابتدا زاویه گام ۲ درجه و سرعت باد $10 \frac{m}{s}$ در نظر گرفته شده‌است، سپس زاویه گام یک درجه افزایش یافته و در این حالت افت دور ژنراتور مشاهده می‌شود، 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 به دست آمده‌است. مقدار تاخیر $\tau_a = 0.422$ و ثابت زمانی $\tau = 15/0.9$ و بهره $k = 5/0.04$ بر حسب رادیان بر ثانیه و برای سرعت دوران پره محاسبه می‌شود زیرا هدف تغییر زاویه گام پره می‌باشد. همچنین مقدار بهره $k_p = 45/78$ و $T_i = 1/39$ به دست آمد.

۳-۳ طراحی کنترل کننده PI^λ

برای طراحی کنترل کننده تناسبی-انتگرالی مرتبه کسری از روش طراحی زیگلر نیکولز در مرجع [۳۰] استفاده شده‌است. برای این رویکرد، نخست پاسخ S شکل حلقه باز را به دست آورده و پس از آن مقدار تاخیر τ_a 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 کنترل کننده PI^λ به دست آمد. بهره تناسبی با استفاده از روش موجود در [۳۰] برابر $3/177$ و بهره انتگرالی $3/89$ به دست آمد و همچنین مرتبه انتگرال گیر برابر 0.9 مقدار ثابت در نظر گرفته شده‌است. سپس با

^{۱۸} Ziegler Nichols

^{۱۷} Tilted integral derivative controller

شده استفاده شده تا فازی ساخته شود یعنی به جای ضرایب K_p و T_i حالا سیستم فازی در اختیار می باشد. فازی سبب می شود تا در سرعت های مختلف باد ضریب مناسب وجود داشته باشد. در ضمن از آنجایی که در سرعت های مختلف باد، مقدار μ نزدیک به $0/9$ به دست آمد، بنابراین مرتبه انتگرالگیر $0/9$ در نظر گرفته شده است. حال داده های به دست آمده برای تنظیم سیستم فازی در جدول ۱ نشان داده شده است.

جایگذاری این مقادیر در بلوک های کنترل کننده در قسمت سیمولینک نرم افزار متلب، پاسخ سرعت به دست آمده است.

۳-۴ طراحی کنترل کننده فازی PI^λ

در این بخش برای طراحی کنترل کننده فازی PI^λ ، با کمک سیستم فازی بهره های کنترل کننده PI^λ در هر سرعتی از باد، به صورت بهینه به دست آمده است. به این ترتیب که ابتدا بهره های کنترل کننده PI^λ در هر سرعتی از باد با روش موجود در [۳۰] به دست آمده یعنی برای سرعت های مختلف باد کنترل کننده PI^λ طراحی شده است. سپس از داده های تولید

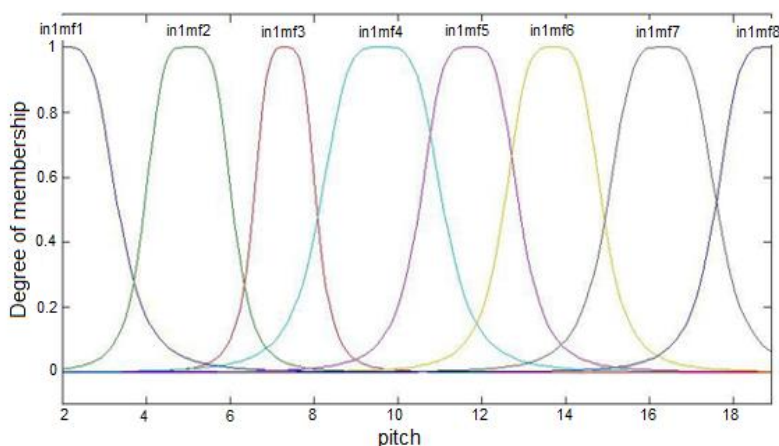
جدول (۱): مقادیر بهره ها و زاویه گام مناسب در سرعت باد مشخص

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

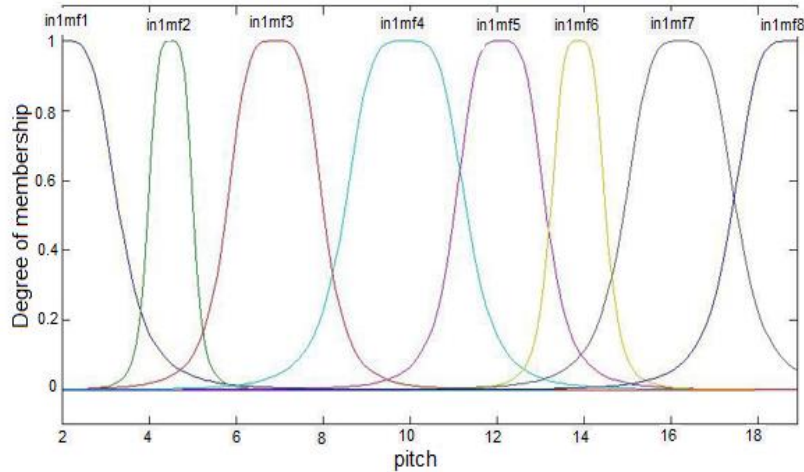
شکل های (۱) و (۲) نشان داده شده است که برای هر هشت تابع عضویت نیز یک قانون موجود است که به صورت زیر می باشد:

If pitch is MF_i then k_p is w_i , $i=1,2,\dots,8$
 If pitch is MF_i then T_i is w_i , $i=1,2,\dots,8$
 w_i مقدار بهره ی خروجی در قانون λ ام می باشد که بهینه شده است.

بنابراین در کنترل کننده فازی، سیستم های فازی جایگزین بهره تناسبی و بهره انتگرالی می شود. به این صورت که برای هر کدام از بهره ها (تناسبی و انتگرالی) یک سیستم فازی به صورت جداگانه در نظر گرفته شده است. ورودی هر سیستم، زاویه گام و خروجی آن، مقدار ضریب K_p و T_i می باشد. همچنین برای بهره تناسبی و انتگرالی هر کدام هشت تابع عضویت گوسین و هشت قانون وجود دارد، که این توابع در



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

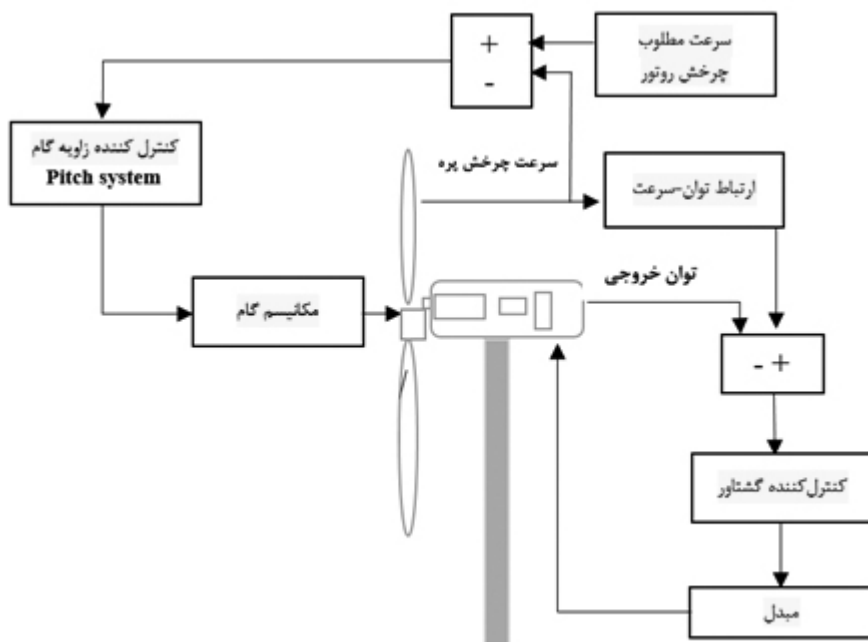


شکل (۲): توابع عضویت گوسین برای بهره انتگرالی T_i

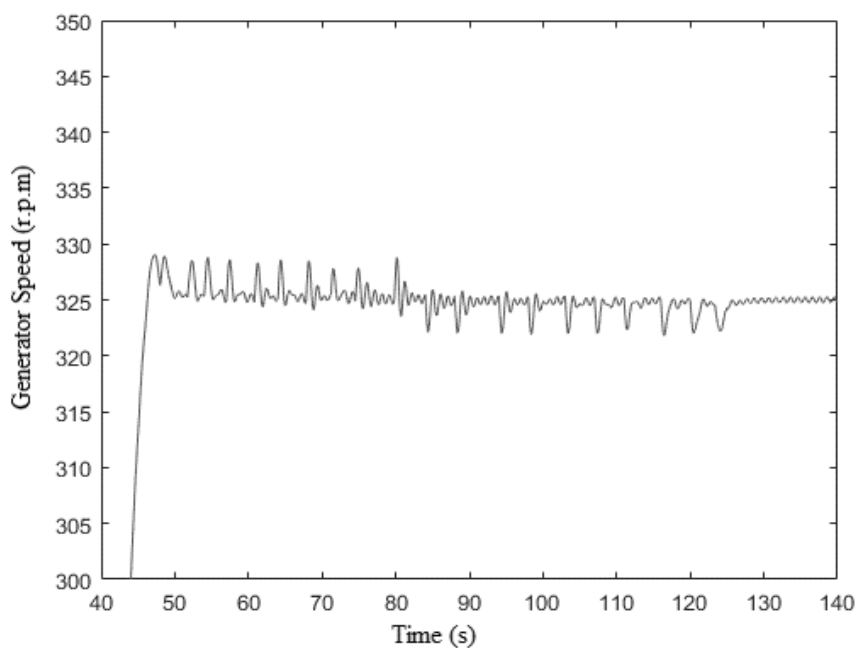
۴. شبیه‌سازی‌ها و نتایج

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* نرم‌افزار *MATLAB* جهت شبیه‌سازی عملکرد سیستم توربین بادی در شرایط مختلف استفاده شده‌است. شکل کلی فلوچارت شبیه‌سازی، در شکل (۳) نشان‌داده شده‌است. 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

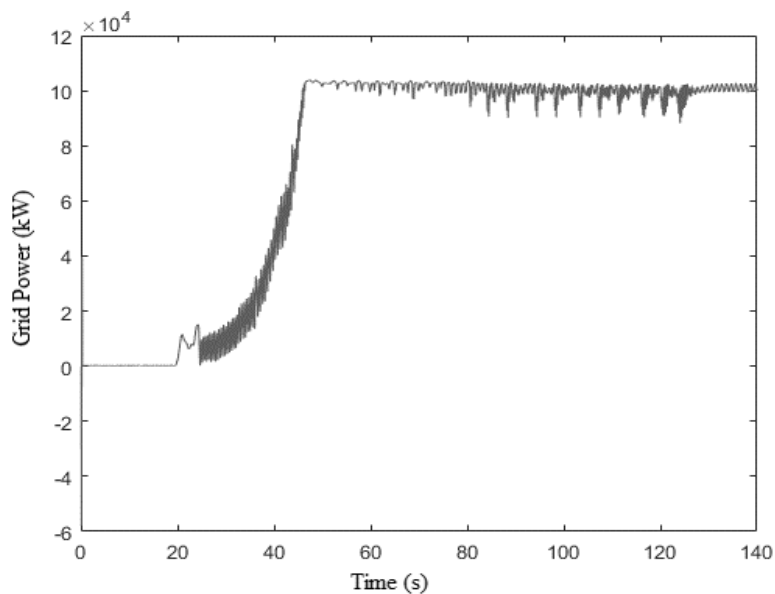
انتقال قدرت، ژنراتور و مبدل الکترونیک قدرت می‌باشد که به دو بخش مکانیکی و الکتریکی تقسیم می‌شوند. بخش مکانیکی شامل پره و سیستم انتقال قدرت و بخش الکتریکی شامل ژنراتور و مبدل الکترونیک قدرت است. مدل‌سازی بخش الکتریکی توربین بادی به همراه روابط ریاضی آن، در قسمت ۲-۲ توضیح داده شد. برای شبیه‌سازی بخش مکانیکی توربین بادی نیز از بلوک *Aero_Forces* متلب استفاده شده‌است که ورودی‌های این بخش دور ژنراتور، زاویه گام و سرعت باد و خروجی آن شامل گشتاور آیرودینامیک است. حال آزمون شبیه‌سازی بر روی سه کنترل کننده *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 کنترل کننده *PI* و PI^λ و فازی PI^λ به ترتیب در شکل‌های (۴)، (۶) و (۸) و همچنین توان خروجی توربین برای کنترل کننده *PI* و PI^λ و فازی PI^λ به ترتیب در شکل‌های (۵)، (۷) و (۹) نشان داده شده‌است.



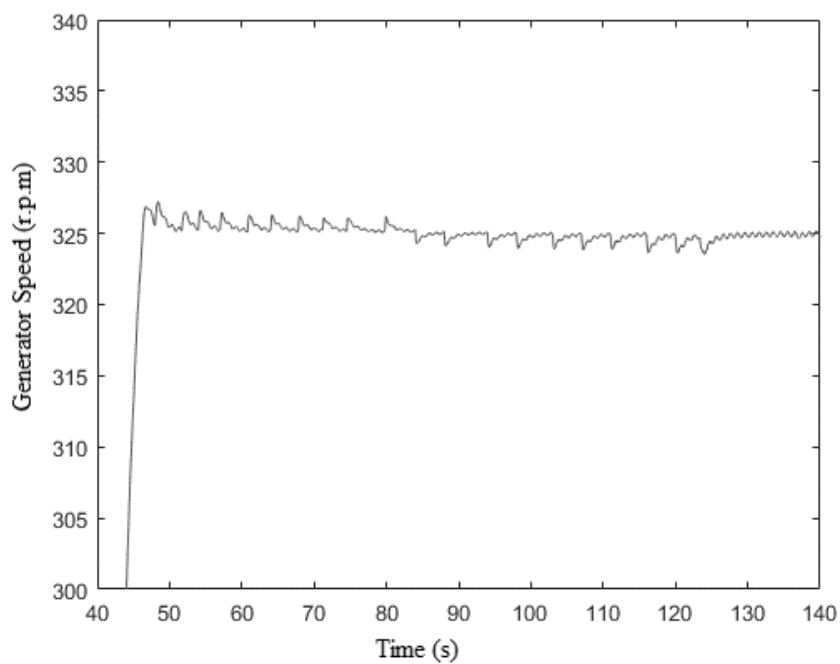
شکل (۳): فلوچارت مدل توربین بادی شبیه‌سازی شده



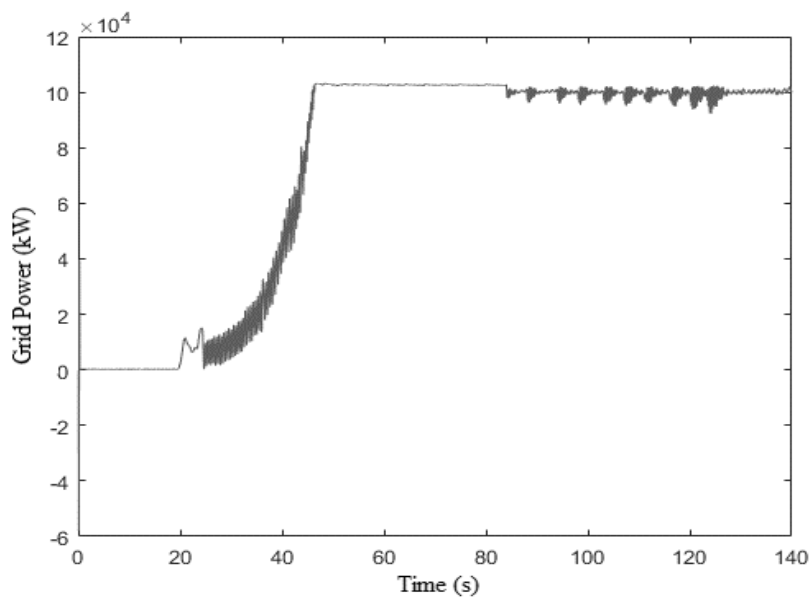
شکل (۴): پاسخ سرعت ژنراتور با کنترل کننده PI



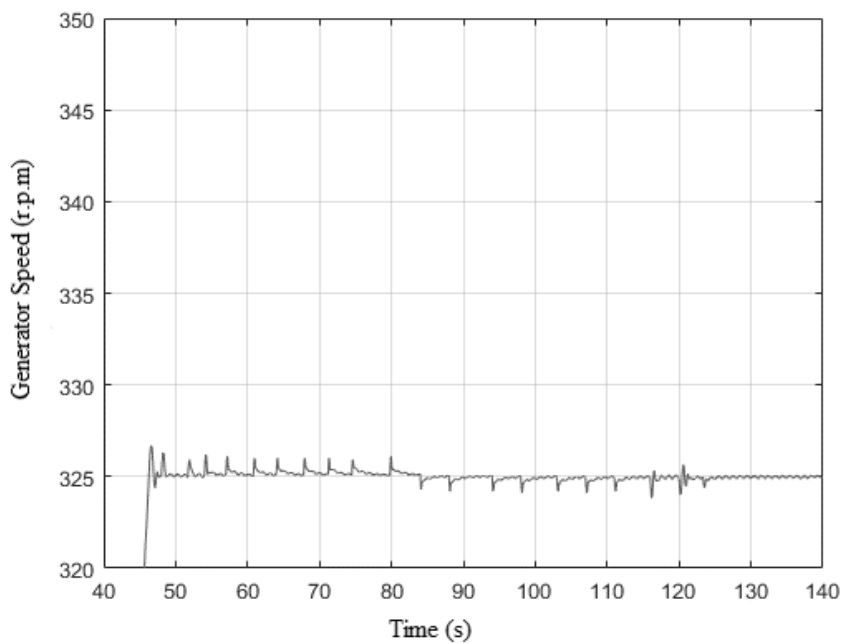
شکل (۵): توان خروجی توربین با کنترل کننده PI



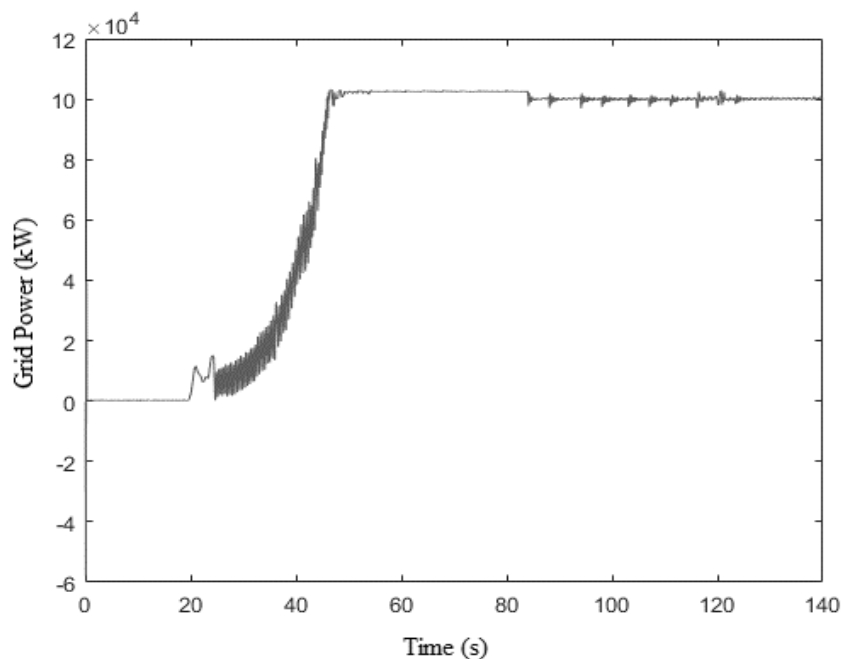
شکل (۶): پاسخ سرعت ژنراتور با کنترل کننده PI^{λ}



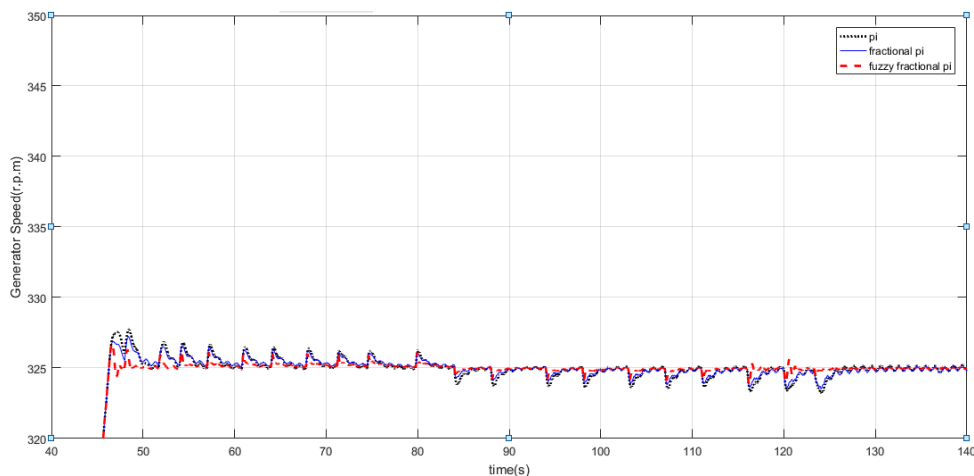
شکل (۷): توان خروجی توربین با کنترل کننده PI^λ



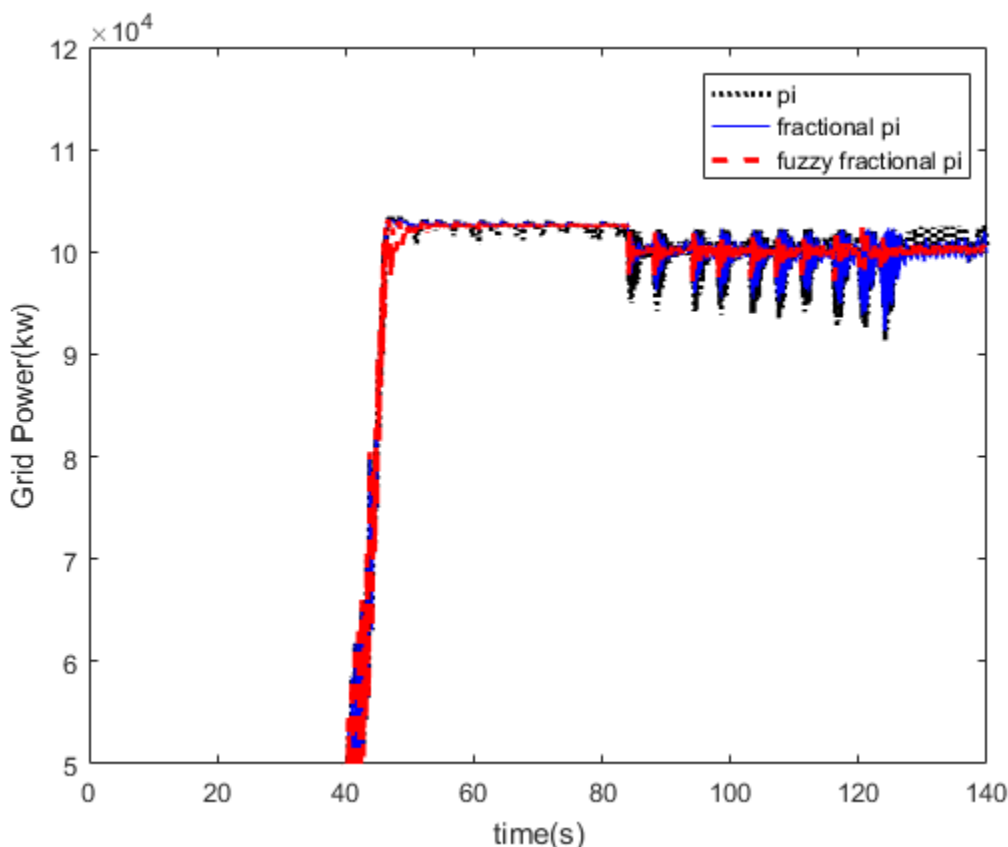
شکل (۸): پاسخ سرعت ژنراتور با کنترل کننده فازی PI^λ



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



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



شکل (۱۱): درشتنمایی توان خروجی سه کنترل کننده PI^λ و فازی PI^λ

معیار عددی مناسب مجذور میانگین مربعات خطا) $RMSE^{19}$ استفاده شده است.

با استفاده از معیار $RMSE$ می توان میزان مطلوبیت عملکرد سه کنترل کننده را دقیق تر بررسی کرد. نتایج به دست آمده در جدول (۲) نشان داده شده اند. برای محاسبه $RMSE$ از رابطه (۱۸) استفاده شده است. همانطور که در جدول (۲) مشاهده می شود، معیار $RMSE$ در مورد سرعت ژنراتور و توان خروجی توربین برای کنترل کننده فازی PI^λ ، مقدار کوچکتری نسبت به دو کنترل کننده دیگر به دست آمد. به این ترتیب برتری این کنترل کننده با قطعیت اثبات شد.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{nominal})^2} \quad (18)$$

¹⁹ Root mean square error

لازم به ذکر است که توان خروجی توربین با هر سه کنترل کننده طبق شکل های (۵)، (۷) و (۹) از ثانیه ۸۰ به بعد دارای نوسانات زیادی است به این علت که کنترل کننده برای افزایش سرعت باد و در واقع افزایش زاویه گام در ناحیه سوم توربین بادی طراحی شده است 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 کنترل کننده برای کاهش زاویه گام به صورت جداگانه طراحی شود که نیاز به ملزومات خاصی دارد که در این مقاله از آن صرف نظر شده است.

همانطور که در شکل های (۱۰) و (۱۱) دیده می شود کنترل کننده فازی PI^λ پاسخ نرم تر و نوسانات کمتری نسبت به کنترل کننده PI و کنترل کننده PI^λ دارد. در حقیقت با استفاده از فازی در هر نقطه کار بهترین بهره های بهینه به دست آمده است و در جدولی ثبت شده است که جدول بندی بهره نامیده می شود. حال برای مقایسه ی سه کنترل کننده از

جدول (۲): مقایسه سه کنترل کننده با معیار $rmse$

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

Electric Industry Journal of Quality and Productivity ۱, no. ۲ (۲۰۱۳): ۸-۱۸.

[۷]: Safaei, 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* ۶, no. ۲ (۲۰۱۸): ۳۴-۴۵.

[۸]: Abir, Afdhal, Dhaoui Mehdi, and Sbita Lassaad. "Pitch angle control of the variable speed wind turbine." In *۲۰۱۶ 11th International Conference on Sciences and Techniques of Automatic Control and Computer Engineering (STA)*, pp. ۵۸۲-۵۸۷. IEEE, ۲۰۱۶.

[۹]: Jesus, Isabel S., and Ramiro S. Barbosa. "Fuzzy fractional PID controller tuned through a PSO algorithm." In *CONTROLO'۲۰۱۴-Proceedings of the 11th Portuguese Conference on Automatic Control*, pp. ۲۰۷-۲۱۶. Springer, Cham, ۲۰۱۵.

[۱۰]: 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): ۲۳۲-۲۳۶.

[۱۱]: Tian, Xiaomin, Yourui Huang, and Canming Zhang. "The tuning principle of adaptive fuzzy fractional-order PID controller parameters." *Procedia Engineering* ۷ (۲۰۱۰): ۲۵۱-۲۵۵.

[۱۲]: M. W. Foley, R. H. Julien, and B. R. Copeland, "A Comparison of PID Controller Tuning Methods," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. ۸۲, no. ۴, pp. ۷۱۲-۷۲۲, ۲۰۰۸.

[۱۳]: Astrom, K. J., and T. Hagglund. "PID controllers: Theory, Design, and Tuning 2nd Ed.. Instr." *Society of America* (۱۹۹۵).

[۱۴]: 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. ۴ (۲۰۰۶): ۹۰۹-۹۲۰.

[۱۵]: 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.

[۱۶]: 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): ۱۰۵۷۰۴.

[۱۷]: 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).

[۱۸]: Lan, Jianglin, Ron J. Patton, and Xiaoyuan Zhu. "Fault-tolerant wind turbine pitch control using adaptive sliding mode estimation." *Renewable Energy* ۱۱۶ (۲۰۱۸): ۲۱۹-۲۳۱.

۵. نتیجه گیری

با توجه به اهمیت مسئله تنظیم مناسب زاویه گام توربین بادی در توربین‌های بادی سرعت متغیر، طراحی کنترل کننده موثر فازی PI^λ با کمک جدول بندی بهره 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 داده شده است و سپس بر روی مدل توربین بادی مورد آزمون قرار گرفته است. سه کنترل کننده مورد آزمایش، کنترل کننده‌های PI ، PI^λ و فازی PI^λ می‌باشند، که همانطور از نتایج به دست آمد، کنترل کننده فازی PI^λ با کمک جدول بندی بهره برای کنترل زاویه گام نتایج بهتری را نشان داد. در طراحی کنترل کننده فازی PI^λ ، از منطق فازی به تنهایی استفاده نمی‌کنیم بلکه سیستم فازی را برای تعیین بهره‌های کنترل کننده به صورت بهینه و با جدول بندی بهره به کار می‌بریم. همانطور که نتایج آزمایش‌های کنترل کننده‌های پیشنهادی نشان می‌دهد در کنترل زاویه گام، کنترل کننده فازی PI^λ با توجه به شکل‌های رسم شده و هم‌چنین معیار RMSE عملکرد بهتری را در مقایسه با کنترل کننده PI و کنترل کننده PI^λ دارد. به این صورت که کنترل کننده فازی PI^λ توانسته است 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 کنترل کننده مناسب برای کنترل زاویه گام، کنترل کننده‌ای 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*

- [۲۸]: Slootweg, Han, and E. De Vries. "Inside wind turbines-Fixed vs. variable speed." *Renewable Energy World* ۶, no. ۱ (۲۰۰۳): ۳۰-۴۱.
- [۲۹]: 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)* ۲۹, no. ۳ (۱۹۹۹): ۳۷۱-۳۸۸.
- [۳۰]: Valério, Duarte, and José Sá Da Costa. "Tuning of fractional PID controllers with Ziegler-Nichols-type rules." *Signal processing* ۸۶, no. ۱۰ (۲۰۰۶): ۲۷۷۱-۲۷۸۴.
- [۱۴]: 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* ۵, no. ۳ (۲۰۰۷): ۱۴۳-۱۵۰.
- [۱۵]: 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* (۲۰۱۶).
- [۱۶]: 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* ۷۹ (۲۰۱۸): ۲۷-۴۴.
- [۱۷]: Hur, Sung-ho, and Bill Leithead. "Model predictive control of a variable-speed pitch-regulated wind turbine." In *۲۰۱۶ UKACC 11th International Conference on Control (CONTROL)*, pp. ۱-۶. IEEE, ۲۰۱۶.
- [۱۸]: Lasheen, Ahmed, and Abdel Latif Elshafei. "Wind-turbine collective-pitch control via a fuzzy predictive algorithm." *Renewable energy* ۸۷ (۲۰۱۶): ۲۹۸-۳۰۶.
- [۱۹]: 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* ۱۰, no. ۱ (۲۰۱۶): ۹۷-۱۰۵.
- [۲۰]: Viveiros, C., Rui Melício, José M. Igreja, and Vítor Manuel Fernandes Mendes. "Fractional order control on a wind turbine benchmark." In *۲۰۱۴ 14th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC)*, pp. ۷۶-۸۱. IEEE, ۲۰۱۴.
- [۲۱]: 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 *۲۰۱۴ 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR)*, pp. ۲۵۲-۲۵۷. IEEE, ۲۰۱۴.
- [۲۲]: 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 ۲۰۱۶-17th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, pp. ۴۰۷۲-۴۰۷۷. IEEE, ۲۰۱۶.
- [۲۳]: 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. ۴۴۹-۴۶۶. Springer, Cham, ۲۰۱۴.
- [۲۴]: 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* ۱۶۱, no. ۱ (۲۰۰۶): ۷۰۷-۷۲۲.
- [۲۵]: 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* ۱۱, no. ۱ (۲۰۱۷): ۴۱-۴۸.
- [۲۶]: El-Refaie, Ayman M. "Fractional-slot concentrated-windings synchronous permanent magnet machines: Opportunities and challenges." *IEEE Transactions on industrial Electronics* ۵۷, no. ۱ (۲۰۱۰): ۱۰۷-۱۲۱.
- [۲۷]: Burton, Tony, David Sharpe, and Nick Jenkins. *Handbook of wind energy*. John Wiley & Sons, ۲۰۰۱.