

# طراحی کنترل کننده فازی $PI^\lambda$ برای کنترل زاویه گام در توربین بادی سرعت متغیر

فاطمه فرجامی<sup>۱</sup>، کارشناس ارشد، اردشیر محمدزاده<sup>۲</sup>، استادیار، علی احمدیان<sup>۳</sup>، استادیار، سجاد شجاع مجیدآباد<sup>۴</sup>، 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.ahmadian۱۳۶۷@gmail.com

۴- دانشکده فنی دانشگاه بناب-بناب-ایران

shoja.sajjad@ubonab.ac.ir

**چکیده:** از وظایف مهم سیستم کنترل در توربین های بادی ثابت نگه داشتن توان در مقدار نامی در بادهای با سرعت بیشتر از سرعت نامی می باشد زیرا عدم ثابت نگه داشتن توان در مقدار نامی در ناحیه سوم محنی توان توربین، سبب آسیب زدن به توربین و افزایش تنش های مکانیکی می شود. این هدف با کنترل زاویه گام در ناحیه سوم از محنی توان توربین بادی محقق می شود. در این پژوهش به طراحی کنترل کننده فازی تناسبی-انتگرالی مرتبه کسری ( $PI^\lambda$ ) برای زاویه گام توربین بادی پرداخته شده است و سپس با کنترل کننده تناسبی-انتگرالی مرتبه کسری ( $PI^\lambda$ ) 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 شبیه سازی شده اند. نتایج شبیه سازی ها نشان داده اند که کنترل کننده فازی  $PI^\lambda$  با توجه به معیار RMSE عملکرد بهتری در مقایسه با کنترل کننده  $PI^\lambda$  و کنترل کننده PI کلاسیک داشته است و کنترل کننده فازی  $PI^\lambda$  کنترل هموارتر و تثبیت مناسب تری بر روی سیگنال های توان خروجی و سرعت ژنراتور در ناحیه سوم عملکرد داشته است.

**واژه های کلیدی:** کنترل زاویه گام، توربین بادی، کنترل کننده PI، کنترل کننده  $PI^\lambda$  مرتبه کسری، کنترل کننده فازی  $PI^\lambda$

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۸/۱۲/۱۱

نام نویسنده ی مسئول: اردشیر محمدزاده

نشانی نویسنده ی 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 بالاست.

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<sup>۳</sup> 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 آنالاین تشخیص می‌دهد و در واقع با استفاده از روش فازی به تنظیم 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<sup>۴</sup> کوتاه‌تر است و اوورشوت<sup>۵</sup> 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 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 تقریباً ۱۰

<sup>۳</sup> Parto<sup>۴</sup> Settling time<sup>۵</sup> Overshoot<sup>۱</sup> Dynamic particle swarm optimization<sup>۲</sup> Combined cycle power plant

متر بر ثانیه در نظر گرفته شده است و ناحیه عملیاتی دوم برای سرعت‌های کمی بالاتر از سرعت مجاز باد می‌باشد که تقریباً ۱۴ متر بر ثانیه می‌باشد، سپس برای طراحی کنترل کننده، دو روش مختلف خطی سازی را به کار برده است و کنترل کننده‌ای را که با روش اول، خطی سازی شده است نوع A و کنترل کننده‌ای 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 مرتبه‌های به مراتب بالاتر می‌باشد در حالی که مدل B مرتبه‌های پایین تری دارد که باعث سادگی طرح می‌شود و بنابراین در [۱۷] توصیه می‌شود که طرح‌های کنترلی برای طراحی کنترل کننده‌های MPC<sup>۶</sup> برای توربین‌های بادی تا حد امکان ساده باشد. در [۱۸] الگوریتم جدید پیش بین فازی برای کنترل گام اشتراکی توربین‌های بادی بزرگ ارائه شده است. کنترل کننده‌های 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 ( $T-S^v$ ) مدل سازی شده است و مدل کنترل کننده پیش بین بر اساس مدل فازی با توجه به محدودیت‌های عملکرد گام طراحی شده است. 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 کنترل کننده‌های 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 بهینه سازی با استفاده از مدل پلنت فعلی و سیگنال‌های 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 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 شده است. مدل سازی توربین بادی سرعت متغیر شامل یک توربین محور افقی همراه

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 ۴/۸ 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 سیستم‌های کنترل در جمع‌آوری، تجزیه و تحلیل و پردازش داده‌ها از توربین بادی می‌باشد. ضبط و گرفتن توان برای WECS<sup>۹</sup> اهمیت زیادی دارد و مناسب ترین 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 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 سازی‌ها برای سه کنترل کننده انتگرالی تناسبی مرتبه کسری و انتگرالی تناسبی فازی انجام شده است که برای کنترل کننده‌های انتگرالی تناسبی مرتبه کسری و صحیح، توربین بادی برای نقطه تنظیم توان ۴/۸ مگاوات و سرعت باد ۱۳ متر بر ثانیه، خطی سازی شده است، همچنین مرتبه کسری ۰/۵ در نظر گرفته شده است. برای ارزیابی عملکرد کنترل کننده‌ها در [۲۰] از معیار انتگرال حاصل ضرب زمان

<sup>۸</sup> Fractional Order Proportional Integral  
<sup>۹</sup> Wind energy converter system

<sup>۶</sup> Model predictive control  
<sup>۷</sup> Takagi-Sugeno

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 [21]. برتری کنترل کننده انتگرالی تناسبی فازی بر دو کنترل کننده دیگر این بود که برای مدل غیرخطی سیستم هم به کار می رود و برعکس دو کنترل کننده دیگر، نیازی به خطی سازی سیستم نبوده است و همچنین عدم قطعیت ها را به خوبی با مدل فازی می توان مدل کرد. اما اشکال این روش عدم بهینه سازی بهره های کنترل کننده می باشد در حالی که در روش پیشنهادی در این پژوهش، از فازی برای بهینه سازی بهره های کنترل کننده  $PI^{\lambda}$  استفاده شده است که در هر سرعتی از باد به صورت آنلاین بهترین بهره ها را خواهیم داشت که در جدول مناسبی آورده ایم. در واقع سیستم فازی آموزش داده شده، بهره های مناسب کنترل کننده را در سرعت های مختلف باد تعیین می کند.

در ادامه موضوعات بر این قرار است: در بخش 2 مدل سازی توربین بادی شرح داده شده است و در بخش 3 استراتژی های کنترلی و در بخش 4 روش طراحی کنترل کننده پیشنهادی بر روی یک نمونه توربین بادی 100 کیلووات سرعت متغیر ارائه شده است و در بخش پنجم شبیه سازی ها و نتایج شبیه سازی بر روی توربین بادی مدل معیار آورده شده است.

## 2- مدل سازی توربین بادی

هدف از مدل سازی توربین بادی دستیابی به یک مدل دقیق ریاضی است که با استفاده از معادلات سیستم بتوان ضمن حفظ محدودیت ها 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 می باشد و به دو بخش مکانیکی و الکتریکی تقسیم می شوند. در بعضی از توربین های بادی، سیستم انتقال قدرت حذف شده و نیروی پره ها مستقیماً به ژنراتور منتقل می شود که اصطلاحاً Direct drive نامیده می شوند.

## 2-1 آیرودینامیک

در توربین های بادی دو عامل مهم یعنی نیروهای حاصل از تراکنش باد و پره های توربین باعث ایجاد حرکت می شوند. بنابراین از قسمت های مهم شبیه سازی 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

موجود در نقاط مختلف پره را در نظر بگیریم. در ادامه به معرفی ضریب توان ( $C_p$ ) می پردازیم.

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 زاویه ای روتور و شرایط جغرافیایی بستگی دارد [22]. اما در حالت کلی می توان تغییرات ضریب توان  $C_p(\lambda, \beta)$  را به صورت تابعی از پارامتر زاویه گام پره ( $\beta$ ) و نسبت سرعت نوک  $\lambda$  نشان داد. که  $\lambda$  نرخ سرعت باد در بالای پره نسبت به سرعت باد منطقه است که با رابطه ی (4) نشان داده می شود. بر اساس تحقیقات قبلی، مقدار ضریب توان نمی تواند از  $C_{pmax} = 16.27$  ۵۹٪ بیشتر بشود که به آن حد بتز<sup>۱۱</sup> می گویند. توان آیرودینامیکی یک سطح مشخص از جریان باد به صورت زیر محاسبه می گردد [23].

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

$V$  سرعت باد،  $\rho$  چگالی هوا،  $R$  شعاع روتور،  $A$  کل سطح جاروب شده توسط پره ها و  $P_a$  کل توان آیرودینامیکی موجود در سطح مورد نظر از جریان باد است. بنابراین ضریب توان را می توان از رابطه ی (3) و (4) 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  $\omega$  سرعت زاویه ای روتور می باشد [24]. برای مدل سازی بخش مکانیکی توربین بادی از رابطه ی (3-1) استفاده می شود. ورودی های مدل آیرودینامیکی، دور ژنراتور، سرعت باد و زاویه گام هستند، خروجی آن هم گشتاور آیرودینامیک است. مطابق رابطه (3)، توان دریافتی باد ابتدا توسط توربین و سپس گشتاور آیرودینامیکی محاسبه می شود.

## 2-2 اجزای الکتریکی شامل ژنراتور و مبدل الکترونیک قدرت توربین بادی

<sup>۱۱</sup> Tip speed ratio

<sup>۱۲</sup> Betz

<sup>۱۰</sup> 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،  $\omega_g$  سرعت مکانیکی ژنراتور،  $P$  تعداد زوج قطبها،  $J$  ممان اینرسی و  $T_e$  گشتاور الکترومکانیکی ژنراتور است.

معادلات الکتریکی PMSG در چهارچوب مرجع سنکرون محورها  $d$  و  $q$  به صورت زیر داده شده است [۲۸].

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

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

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

که  $u_d$  و  $u_q$  ولتاژ محورهایی  $dq$ ،  $i_d$  و  $i_q$  جریان محورهایی  $dq$ ،  $R_s$  مقاومت استاتور،  $L_d$  و  $L_q$  اندوکتانس محورهایی  $dq$  و  $\phi$  شار مغناطیس دائم است [۲۸]. با فرض  $L_d = L_q = L$  معادلات (۹) تا (۱۱) را می توان 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 مدل سازی مبدل های 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 مبدل ها، ساختار ساده آن، سیستم کنترلی ساده و مهم تر از همه هزینه پایین آن در مقایسه با ساختارهای سه طحی می باشد. برای حذف اغتشاشات هارمونیک هم از یک فیلتر خروجی استفاده می شود. 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 می شود که مقدار آن در این پروژه برابر ۶۸۰۰۰ میکروفاراد است. برای مبدل سمت شبکه (GSC) و مبدل سمت ژنراتور (MSC) کنترل کننده های PI به صورت جداگانه برای تنظیم جریان ژنراتور و توان تحویلی به شبکه در نظر گرفته می شوند. 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<sup>۱۳</sup> به شبکه AC متصل می شود. این سیستم مبدل از مبدل سمت ماشین<sup>۱۴</sup> (MSC) و مبدل سمت شبکه<sup>۱۵</sup> (GSC) تشکیل شده است. برای به دست آوردن بیشترین انرژی باد، سرعت زاویه ای روتور PMSG<sup>۱۶</sup> 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 توربین های بادی غالباً از نوع ژنراتور سنکرون مغناطیس دائم می باشد. 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 می دهد. ژنراتورهای سنکرون در مقایسه با سایر ژنراتورها، بازده بالاتری در توان های بالا دارد و همچنین دارای قابلیت کنترل ولتاژ پایانه و توان راکتیو می باشد، به همین علت کاربرد فراوانی در زمینه تولید انرژی الکتریکی دارد [۲۵ و ۲۶]. کاربرد این ژنراتور در توربین های بادی می باشد به طوری که ژنراتورهای مورد استفاده در نسل قبلی توربین های بادی از نوع آسنکرون می باشد که در آنها برای ایجاد ولتاژ و فرکانس مورد نظر از گیربکس استفاده می شد. با استفاده از این ژنراتور دیگر احتیاج به گیربکس نیست و پره به طور مستقیم به ژنراتور متصل می شود.

لذا در این مقاله برای طراحی و شبیه سازی توربین بادی در نرم افزار متلب از ژنراتور PMSG استفاده شده است. در توربین بادی، باد باعث حرکت پره های توربین می گردد و این پره ها 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 (۵) و (۶) می باشد [۲۷]:

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

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

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

<sup>۱۳</sup> full converter back to back

<sup>۱۴</sup> Machine side converter

<sup>۱۵</sup> Grid side converter

<sup>۱۶</sup> Permanent magnet synchronous generator

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 می‌باشد 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 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 کنترل‌کننده‌های مرتبه کسری را می‌توان به چهار دسته کنترل‌کننده‌های CRONE، کنترل‌کننده‌های TID<sup>۱۷</sup>، کنترل‌کننده‌های پس فاز و پیش فاز جبران ساز و مهم‌تر از همه کنترل‌کننده‌های مرتبه کسری  $PI^\lambda D^\mu$  با انتگرال گیر از مرتبه کسری  $\lambda$  و مشتق گیر از مرتبه کسری  $\mu$  تقسیم‌بندی کرد [۲۹].

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

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

برای تقریب کنترل‌کننده 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  $(\omega_b \text{ و } \omega_h)$  صادق است. در این رابطه داریم:

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

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

$\gamma$  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 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 استفاده شده است. به این ترتیب که ابتدا زاویه گام ۲ درجه و سرعت باد  $10 \frac{m}{s}$  در نظر گرفته شده است، 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<sup>۱۸</sup> حلقه باز به دست آمده است. مقدار تاخیر  $\tau_d = 0.422$  و ثابت زمانی  $\tau = 15/0.9$  و بهره  $k = 5/0.4$  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 کنترل‌کننده $PI^\lambda$

برای طراحی کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی مرتبه کسری از روش طراحی زیگلر نیکولز در مرجع [۳۰] استفاده شده است. برای این رویکرد، نخست پاسخ S شکل حلقه باز را به دست آورده و پس از آن مقدار تاخیر  $\tau_d$  و ثابت زمانی  $\tau$  از روی پاسخ حلقه باز یادداشت شده است. و با استفاده از این داده‌ها مقدار  $P$  و  $I$  و  $\lambda$  (مرتبه انتگرال کسری) برای کنترل‌کننده  $PI^\lambda$  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 شده است. سپس با

<sup>۱۸</sup> Ziegler Nichols

<sup>۱۷</sup> Tilted integral derivative controller

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 $PI^\lambda$

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

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  $\mu$  نزدیک به ۰/۹ به دست آمد، بنابراین مرتبه انتگرالگیر ۰/۹ در نظر گرفته شده است. حال داده های به دست آمده برای تنظیم سیستم فازی در جدول ۱ نشان داده شده است.

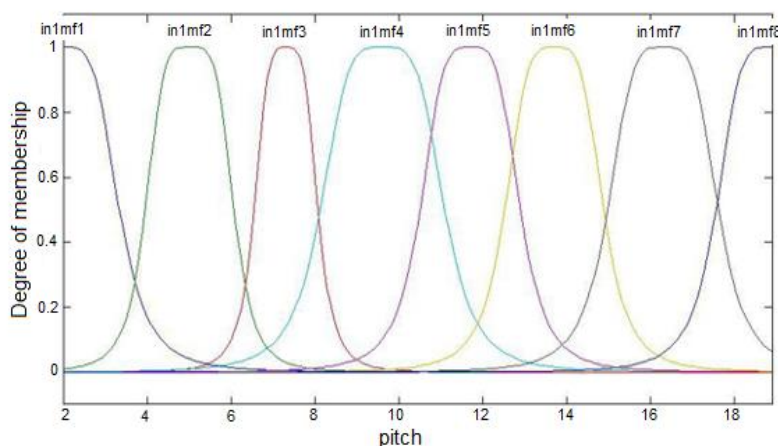
جدول (۱): مقادیر بهره ها و زاویه گام مناسب در سرعت باد مشخص

| باد | $k_p$ | $T_i$ | مقدار گام در ۳۲۵ دور در دقیقه | $\lambda$ |
|-----|-------|-------|-------------------------------|-----------|
| 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       |

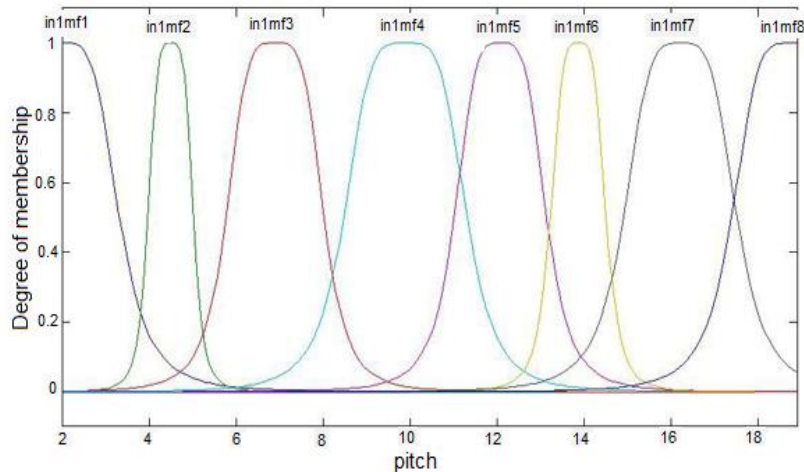
شکل های (۱) و (۲) نشان داده شده است که برای هر هشت تابع عضویت نیز یک قانون موجود است که به صورت زیر می باشد:

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  $\lambda$ 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  $k_p$

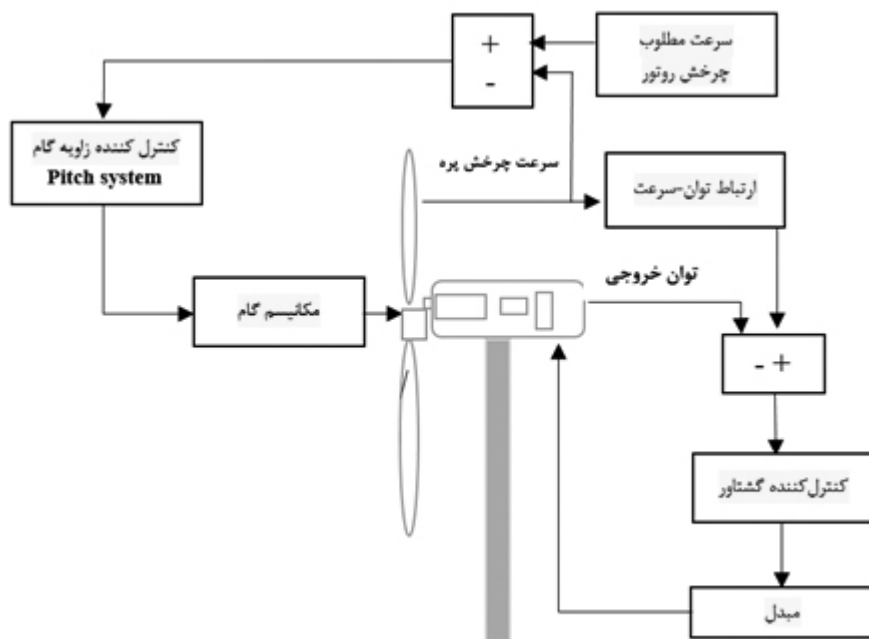


شکل (۲): توابع عضویت گوسین برای بهره انتگرالی  $T_i$

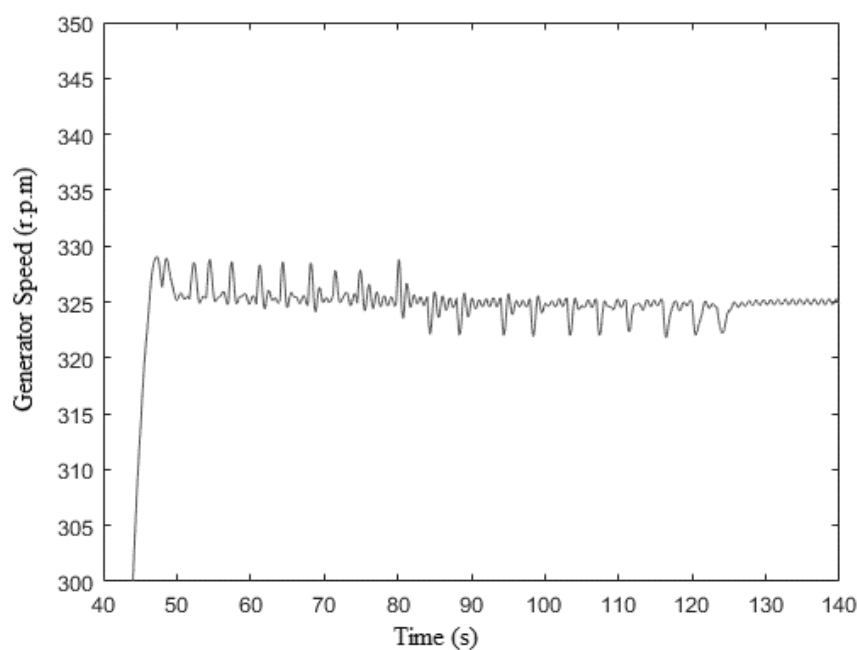
#### ۴. شبیه‌سازی‌ها و نتایج

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 نرم‌افزار MATLAB جهت شبیه‌سازی عملکرد سیستم توربین بادی در شرایط مختلف استفاده شده است. شکل کلی فلوچارت شبیه‌سازی، در شکل (۳) نشان داده شده است. 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

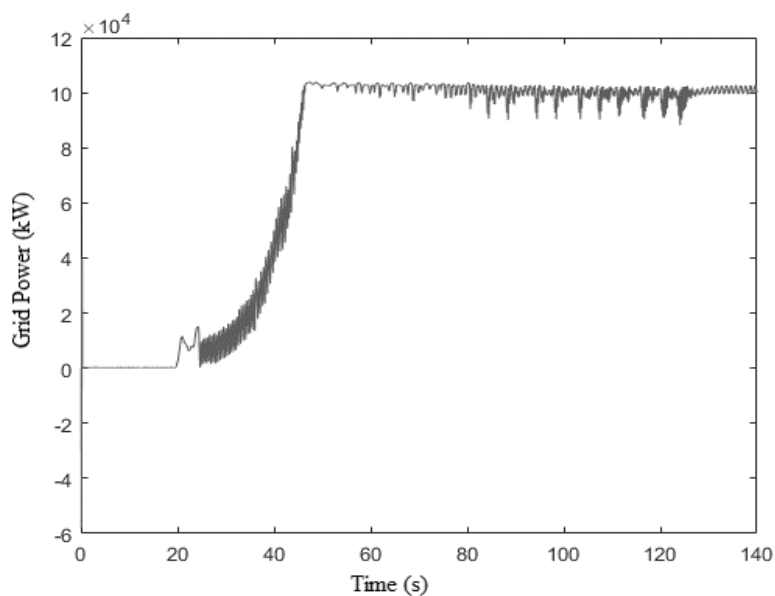
انتقال قدرت، ژنراتور و مبدل الکترونیک قدرت می‌باشد که به دو بخش مکانیکی و الکتریکی تقسیم می‌شوند. بخش مکانیکی شامل پره و سیستم انتقال قدرت و بخش الکتریکی شامل ژنراتور و مبدل الکترونیک قدرت است. مدل‌سازی بخش الکتریکی توربین بادی به همراه روابط ریاضی آن، در قسمت ۲-۲ توضیح داده شد. برای شبیه‌سازی بخش مکانیکی توربین بادی نیز از بلوک Aero\_Forces متلب استفاده شده است که ورودی‌های این بخش دور ژنراتور، زاویه گام و سرعت باد و خروجی آن شامل گشتاور آیرودینامیک است. حال آزمون شبیه‌سازی بر روی سه کنترل‌کننده PI کلاسیک و  $PI^\lambda$  و فازی و  $PI^\lambda$  برای کنترل زاویه گام بر روی مدل معیار توربین بادی ۱۰۰ کیلووات انجام شده است و نتایج شبیه‌سازی‌ها برای پاسخ سرعت ژنراتور با کنترل‌کننده PI و  $PI^\lambda$  و فازی  $PI^\lambda$  به ترتیب در شکل‌های (۴)، (۶) و (۸) و همچنین توان خروجی توربین برای کنترل‌کننده PI و  $PI^\lambda$  و فازی  $PI^\lambda$  به ترتیب در شکل‌های (۵)، (۷) و (۹) نشان داده شده است.



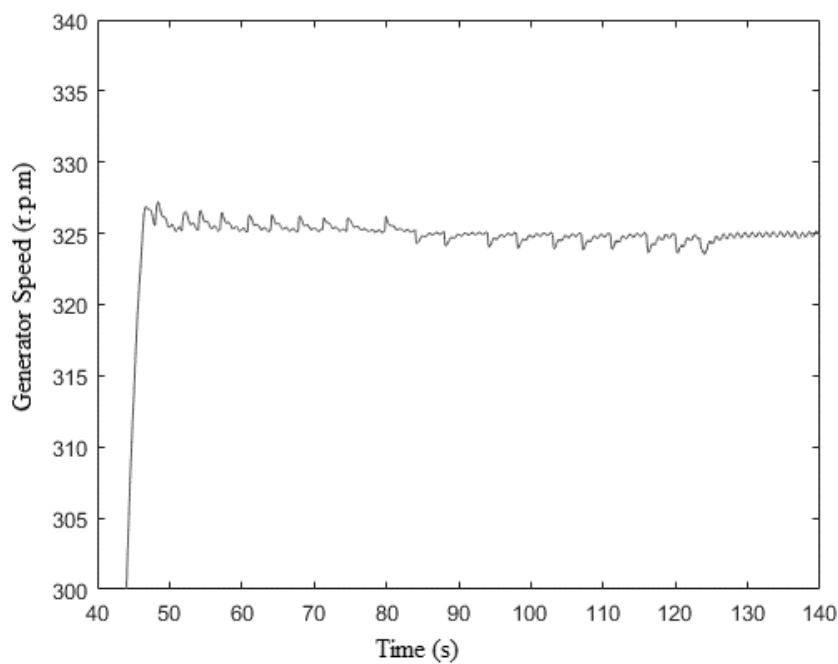
شکل (۳): فلوچارت مدل توربین بادی شبیه سازی شده



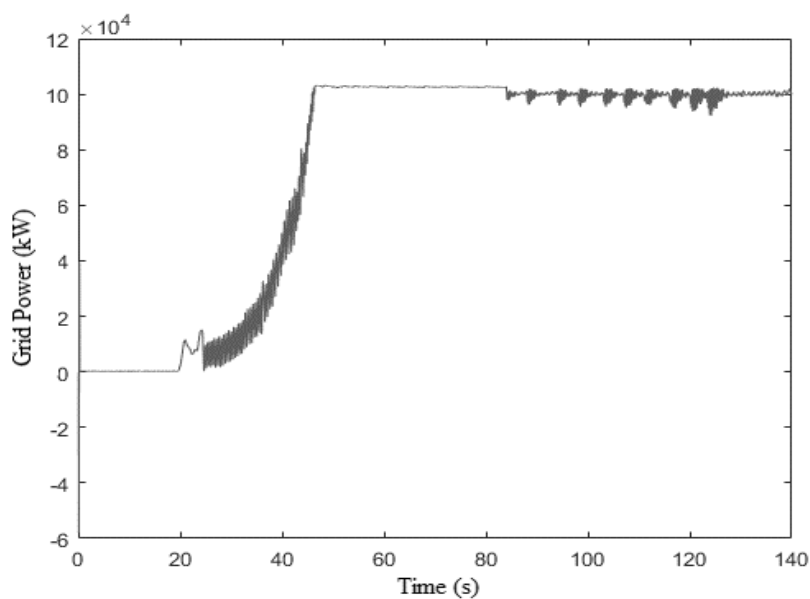
شکل (۴): پاسخ سرعت ژنراتور با کنترل کننده PI



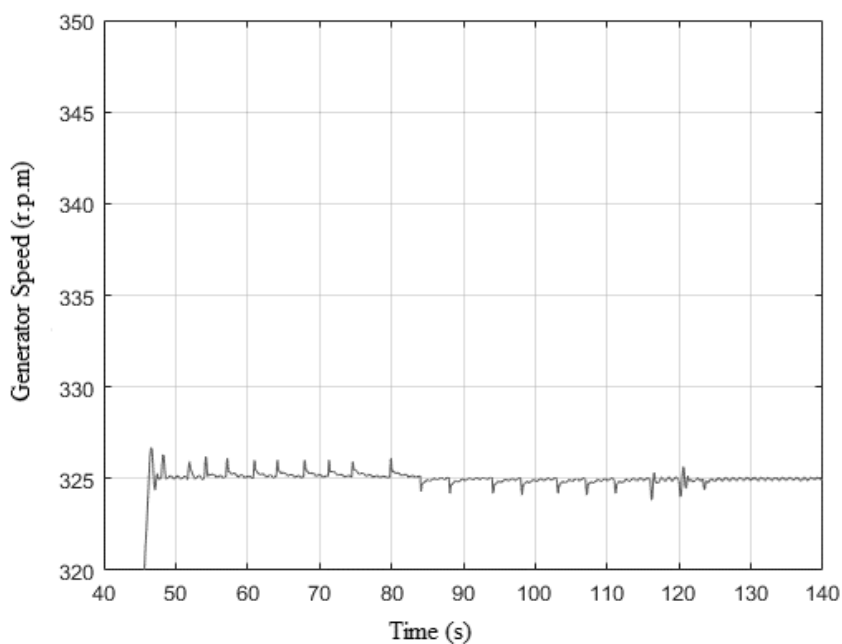
شکل (۵): توان خروجی توربین با کنترل کننده PI



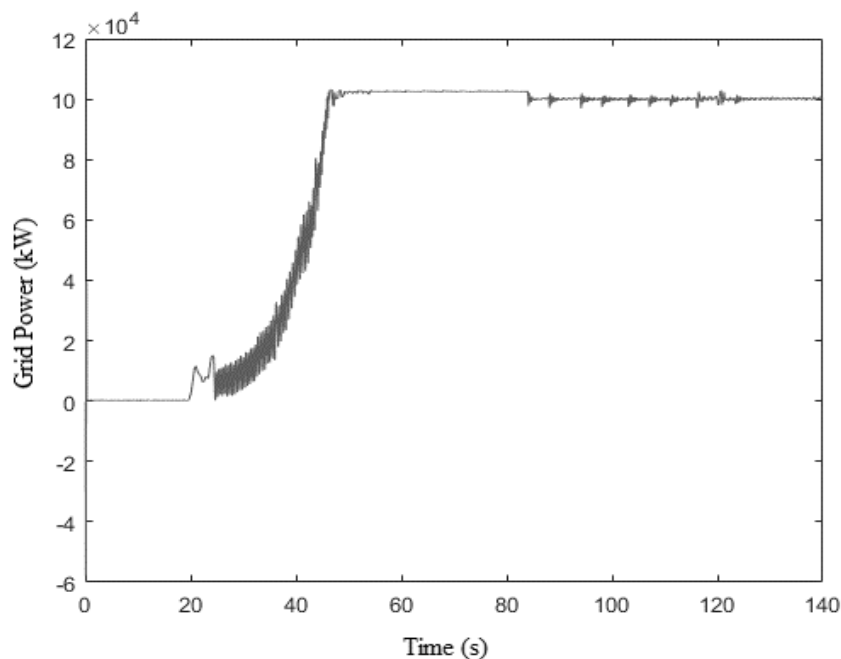
شکل (۶): پاسخ سرعت ژنراتور با کنترل کننده  $PI^{\lambda}$



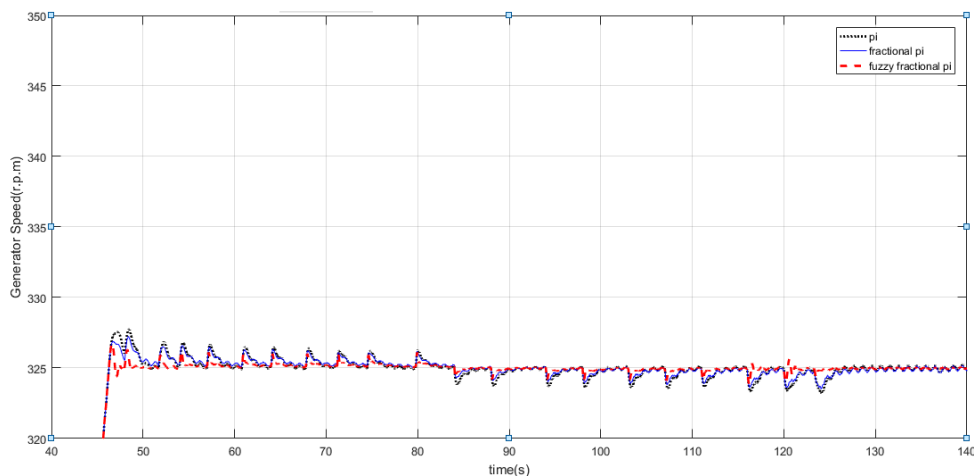
شکل (۷): توان خروجی توربین با کنترل کننده  $PI^\lambda$



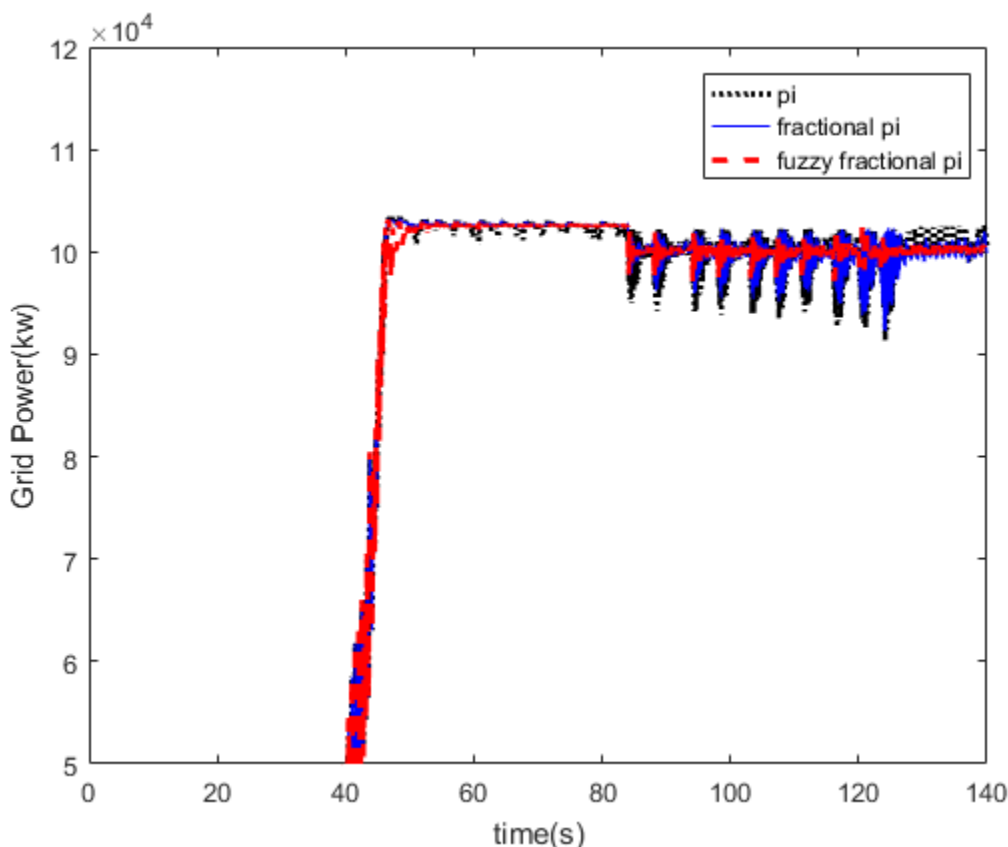
شکل (۸): پاسخ سرعت ژنراتور با کنترل کننده فازی  $PI^\lambda$



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



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



شکل (۱۱): در شتمایی توان خروجی سه کنترل کننده  $PI^\lambda$  و فازی  $PI^\lambda$

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  $PI^\lambda$ ، مقدار کوچکتری نسبت به دو کنترل کننده دیگر به دست آمد. به این ترتیب برتری این کنترل کننده با قطعیت اثبات شد.

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

<sup>19</sup> 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  $PI^\lambda$  پاسخ نرم تر و نوسانات کمتری نسبت به کنترل کننده  $PI$  و کنترل کننده  $PI^\lambda$  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<br>$PI^{\lambda}$ | کنترل کننده $PI^{\lambda}$ | 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.

[۲]: Safaei, Arman, Seyed Hossein Hosseini, 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.

[۳]: 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.

[۴]: Jesus, Isabel S., and Ramiro S. Barbosa. "Fuzzy fractional PID controller tuned through a PSO algorithm." In *CONTROLO'2014-Proceedings of the 11th Portuguese Conference on Automatic Control*, pp. ۲۰۷-۲۱۶. Springer, Cham, ۲۰۱۵.

[۵]: 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.

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

[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. ۴, pp. ۷۱۲-۷۲۲, ۲۰۰۸.

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

[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. ۴ (۲۰۰۶): ۹۰۹-۹۲۰.

[۱۰]: Hand, M., and Mark Balas. "Systematic approach for PID controller design for pitch-regulated, variable-speed wind turbines." In *1998 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): ۱۰۵۷۰۴.

[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* ۱۱۶ (۲۰۱۸): ۲۱۹-۲۳۱.

## ۵. نتیجه گیری

با توجه به اهمیت مسئله تنظیم مناسب زاویه گام توربین بادی در توربین های بادی سرعت متغیر، طراحی کنترل کننده موثر فازی  $PI^{\lambda}$  با کمک جدول بندی بهره مطرح شد. در حقیقت ابتدا سه روش کنترلی در مورد آن مورد آزمایش قرار گرفت. برای هر کدام از روش های 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 کننده های  $PI$ ،  $PI^{\lambda}$  و فازی  $PI^{\lambda}$  می باشند، که همانطور از نتایج به دست آمد، کنترل کننده فازی  $PI^{\lambda}$  با کمک جدول بندی بهره برای کنترل زاویه گام نتایج بهتری را نشان داد. در طراحی کنترل کننده فازی  $PI^{\lambda}$ ، از منطق فازی به تنهایی استفاده نمی کنیم بلکه سیستم فازی را برای تعیین بهره های کنترل کننده به صورت بهینه و با جدول بندی بهره به کار می بریم. همانطور که نتایج آزمایش های کنترل کننده های پیشنهادی نشان می دهد در کنترل زاویه گام، کنترل کننده فازی  $PI^{\lambda}$  با توجه به شکل های رسم شده و هم چنین معیار RMSE عملکرد بهتری را در مقایسه با کنترل کننده  $PI$  و کنترل کننده  $PI^{\lambda}$  دارد. به این صورت که کنترل کننده فازی  $PI^{\lambda}$  توانسته است به صورت نرم تر و هموارتر و با خطای کمتری، سرعت چرخش روتور و مقدار توان خروجی را در مقدار نامی خود تنظیم کند. بنابراین به طور کلی می توانیم نتیجه بگیریم که کنترل کننده مناسب برای کنترل زاویه گام، کنترل کننده ای 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 آن ها به صورت نرم تری 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* (۲۰۱۹).
- [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 Leithhead. "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 Víctor 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 Víctor MF Mendes. "Fuzzy, integer and fractional-order control: Application on a wind turbine benchmark model." In *۲۰۱۴ 14th 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.