

طراحی جبران‌ساز توزیع‌شده موازی فازی برای ناحیه جذب حداکثر توان از یک توربین باد

یاسر شکری کلاندرق^{۱*}، علی‌اکبر افزلیان^۲

^۱ کارشناس ارشد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی

y.shokri1206@aut.ac.ir

^۲ دانشیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، پردیس فنی و مهندسی شهید عباسپور، دانشگاه شهید بهشتی

afzalian@sbu.ac.ir

چکیده: توربین بادی یکی از مهم‌ترین منابع تولید برق است که سریع‌ترین رشد را در بین منابع تجدیدپذیر انرژی از لحاظ ظرفیت تولید، به خود اختصاص داده است. دغدغه کار کنترل بر روی این سیستم، به سبب برداشت انرژی با بازدهی بالا، همواره مد نظر محققان بوده است. از آنجایی که توربین بادی دارای یک مدل ریاضی غیرخطی است، برای استفاده از تکنیک‌های کنترل خطی در این گزارش، ترم غیرخطی برحسب یک پارامتر خطی‌سازی شده و سپس مدل فازی T-S بر روی مدل‌های خطی کارگزاری می‌شود تا متناسب با سرعت باد، استنتاجی از مدل‌های خطی شده را در هر لحظه نتیجه دهد. در مرحله بعد، یک کنترل‌کننده بهره‌برنامه‌ریزی‌شده موازی تحت عنوان «جبران‌ساز توزیع‌شده موازی (PDC)» در فضای حالت استفاده شده است که مبتنی بر مدل فازی T-S توربین بادی، با تغییر سرعت باد تغییرات لازم در بهره‌های بازگشتی را اعمال می‌کند. با توجه به تداخل توابع عضویت در مدل توربین و کنترل‌کننده، به کمک تابع Lyapunov مخصوص با استفاده از نامساوی‌های ماتریسی خطی اثبات می‌گردد که کنترل‌کننده طراحی شده، سیستم پایداری را ایجاد کرده است. در نهایت، مقایسه‌ای بین کنترل‌کننده‌های کلاسیک تناسبی-انتگرال‌گیر-مشتق‌گیر (PID) و طرح مقاله صورت گرفته است.

واژه‌های کلیدی: کنترل توربین باد، مدل‌سازی فازی توربین باد، جبران‌سازهای توزیع‌یافته موازی، نامساوی‌های ماتریسی خطی.

۱. مقدمه

مقایسه کاملی بین دو دسته کنترل‌کننده اشاره‌شده صورت گیرد. در این مقاله، سعی شده است تا حد وسطی بین دو دسته کنترل‌کننده کلاسیک و مدرن رعایت شود.

در ادامه بخش‌های مقاله در بخش دوم، به بررسی طرح کلی جبران‌سازهای توزیع‌یافته موازی، در بخش سوم به نحوه استخراج مدلی از توربین باد که قابل استفاده برای طرح کنترلی مورد نظر است، در بخش چهارم به بیان اهداف کنترلی، در بخش پنجم به انجام شبیه‌سازی و مقایسه نتایج و در نهایت در بخش ششم، به بررسی نتایج و طرح یک جمع‌بندی پرداخته شده است.

۲. طرح کلی جبران‌سازهای توزیع‌یافته موازی^۴ (PDC)

کنترل‌کننده‌ها با بهره برنامه‌ریزی‌شده^۵ هم‌اکنون در بسیاری از کاربردها از جمله صنعت هوانوردی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۵]. مزیت عمده این دسته از کنترل‌کننده‌ها قابلیت کاربرد آن‌ها در سیستم‌های غیرخطی با استفاده از قضیه‌های مطرح‌شده در حوزه سیستم‌های خطی است. چنین ایده‌ای از طریق خطی‌سازی سیستم غیرخطی در نقاط کار مختلف عملی می‌شود. سپس در این شرایط، برای هر کدام از نقاط کار یک کنترل‌کننده خطی طراحی می‌شود. از این روش بعضاً تحت عنوان الگوی جبران‌سازی توزیع‌یافته موازی (PDC) نیز یاد می‌شود. استفاده از محاسبات فازی در کنار این روش به این الگو، مزیت‌هایی از قبیل امکان درون‌یابی بین نقاط کار مختلف و اعمال قانون کنترل غیرخطی و هموار را اعطا می‌کند. (در مرجع [۱۶] برابری کنترل‌کننده‌های فازی با کنترل هموار با بهره برنامه‌ریزی‌شده، مطرح و اثبات شده است).

برای ارائه ایده مطرح‌شده، سیستم فازی آورده‌شده در رابطه (۱) در نظر گرفته شده است:

$$\text{Rule } i: \text{ if } z_1(t) \text{ is } M_{i1} \text{ and } \dots \text{ and } z_n(t) \text{ is } M_{in} \text{ then} \quad (1)$$

$$\dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) \quad i = 1, \dots, r$$

که در آن $x(t) = [x_1(t), \dots, x_m(t)]^T$ متغیرهای حالت، $z_j(t)$ متغیرهای ورودی سیستم، $u(t) = [u_1(t), \dots, u_l(t)]^T$ ورودی سیستم فازی، $M_j(t)$ متغیرهای توابع عضویت زبان فازی و r تعداد قوانین فازی است. با مدل‌سازی یک توربین باد بدین شکل می‌توان مدل غیرخطی آن را به r مدل خطی تفکیک کرده و با ترکیب این مدل‌ها مطابق رابطه (۲)، رابطه غیرخطی را ارائه کرد.

هم‌زمان با ترویج توربین‌های سرعت متغیر، کار بر روی بحث‌های کنترلی و مانیتورینگ^۱ آن به‌منظور افزایش راندمان و طول عمر آن‌ها در دستور کار قرار گرفت و هنوز هم تحقیقات در این راستا ادامه دارد [۱ و ۲]. در زمینه کنترل توربین باد، استفاده از کنترل‌کننده‌های PID^۲ به‌عنوان یک استاندارد صنعتی برای کنترل زاویه $pitch$ پره‌های و گشتاور ژنراتور آن از اولین ایده‌ها بوده [۳] و هنوز هم بحث آن مطرح است. در حالت کلی، سه مکان برای توربین باد برحسب سرعت باد تعریف می‌شود که در هر کدام، یک استراتژی کنترل خاص مطرح است. در این مقاله، هدف ما کنترل در موقعیتی است که سرعت باد زیر سرعت نامی بوده و استراتژی کنترلی جذب حداکثر توان موجود در باد است. با توجه به اینکه بیشترین توان در زاویه $pitch$ صفر درجه جذب می‌شود [۴] و بالا نبودن فشار باد در این ناحیه و نظر به اینکه کنترل با زاویه $pitch$ پیچیده‌گی‌های خاص خود را به همراه دارد، تنها از کنترل گشتاور ژنراتور استفاده خواهد شد.

با توجه به رفتار غیرخطی توربین، عدم قطعیت بالا در مدل‌سازی این سیستم و اثرات نامطلوب تغییرات سریع در باد، کارایی کنترل‌کننده کلاسیک PID محدود بوده و امکان به‌کارگیری توربین در شرایط باد آشفته با استفاده از این کنترل‌کننده وجود ندارد. برای رفع این مشکل، کنترل‌کننده PID با زمان‌بندی بهره در مراجع [۵ و ۶] معرفی شد. با ادامه روند طراحی‌ها کنترل‌کننده‌ها به سمت مدرن و پیچیده شدن حرکت کردند. برای مثال می‌توان به مراجع [۷ و ۸] اشاره کرد که به ترتیب به طرح یک کنترل‌کننده چندمتغیره و مقاوم پرداخته‌اند. در مراجع [۹ و ۱۰] نیز کارهایی هستند که به کاهش محافظه‌کاری و اصلاح کنترل‌کننده مقاوم طراحی‌شده در مرجع [۸] پرداخته‌اند و بسیاری دیگر از قبیل مراجع [۱۱ و ۱۲] با بهره‌گیری از کنترل بهینه، [۱۳] کنترل تطبیقی و [۱۴] کنترل غیرخطی و...

کارهای پیشین را اصلاح کرده یا طرح جدیدی ارائه داده‌اند. برخی مراجع نیز از طرح‌های ترکیبی استفاده کرده‌اند که از آن جمله می‌توان به مرجع [۴] اشاره کرد که در آن، از ساختار نرو-فازی^۳ تطبیقی استفاده شده است. توجه به این نکته حائز اهمیت است که به‌علت ساختار کاملاً غیرخطی توربین بادی، استفاده از روش‌های کلاسیک پاسخ مطلوبی را در پی نداشته و از طرفی، روش‌های کنترل مدرن و پیشرفته هنگام پیاده‌سازی، با مشکلات عملی مواجه می‌شوند. با این حال، باید به‌روزرسانی انجام شود و جهت متقاعد کردن صنعت برای ارتقای کنترل‌کننده‌های خود،

۱. رصد وضعیت بخش‌های مختلف توربین برای جلوگیری از وقوع خسارات ناگهانی
 ۲. proportional-integral-derivative
 ۳. ترکیب به‌کاررفته از شبکه‌های عصبی و مدل‌های فازی

4. Parallel distributed compensation
 5. Gain scheduling

عمده بخش غیرخطی موجود در سیستم‌های توربین بادی، روابط مربوط به زیرسیستم‌های آیرودینامیکی و گشتاور الکتریکی است.

۱.۳. مدل LPV

مدل LPV یکی از مدل‌های متداولی است که در مراجع بسیاری، از جمله [۱۸] برای توربین بادی نیز مطرح شده است. در این مدل، در فضای حالت از تکنیک تبدیل یک معادله غیرخطی به یک مدل LTI با ماتریس‌های متغیر A و B تحت تأثیر یک متغیر خارجی استفاده می‌شود (رابطه ۵).

$$\begin{bmatrix} \dot{x}(t) \\ y(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A(p(t)) & B(p(t)) \\ C(p(t)) & D(p(t)) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(t) \\ u(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

در این مقاله، مدل خطی با پارامتر متغیر (LPV) توربین باد تحت پوشش سیستم فازی قرار می‌گیرد. برای رسیدن به این مدل دو مورد خطی‌سازی به صورت زیر انجام شده است. گشتاور جذب شده توسط پره‌های روتور:

$$T_r = \frac{1}{2\lambda} \rho \pi R^3 V^2 C_p(\lambda, \beta) \Rightarrow T_r = aV + b\omega_r + c\beta \quad (6)$$

در این رابطه $\lambda = \frac{R\omega_r}{V}$ نسبت سرعت نوک، ρ چگالی هوا، R شعاع روتور، V سرعت باد، C_p ضریب جذب توان، ω_r سرعت زاویه‌ای چرخش روتور و β زاویه $pitch$ پره‌ها می‌باشد. گشتاور تولید شده توسط ژنراتور:

$$T_g = -\frac{2}{3} \frac{v_s^2}{\omega_s} \frac{R_r/s}{(R_r/s)^2 + (\omega_s l_r)^2} \Rightarrow T_g = B_g(\omega_g - \omega_s) \quad (7)$$

که در آن، $\omega_s = \frac{2\pi f_s}{p_f}$ سرعت زاویه‌ای میدان‌گردان، f_s فرکانس شبکه، p_f تعداد قطب‌های ژنراتور، $s = \frac{\omega_s - \omega_g}{\omega_s}$ لغزش ژنراتور، ω_g سرعت زاویه‌ای روتور، v_s ولتاژ دو سر استاتور و سایر عبارات‌های موجود در مخرج کسر راکتانس و مقاومت اتلافی روتور و استاتور هستند.

به دلیل تلفات بالایی که در سرعت‌های دورتر از ω_s توسط مقاومت ژنراتور رخ می‌دهد، همواره با تنظیم ولتاژ و فرکانس سرعت شفت ژنراتور در محدوده $\omega_g = (1 \pm 0.02)\omega_s$ کار می‌کند. از این روست که می‌توان رابطه خطی (۷) را به دست آورد که در آن، شیب خط مماس بر منحنی گشتاور در $\omega_s = \omega_g$ است. در این رابطه، ولتاژ ورودی استاتور مخفی شده است و برای دستیابی به گشتاور مطلوب، در نزدیکی سرعت $\omega_s = \omega_g$ استفاده می‌شود. این در حالی است که همواره با استفاده از ω_s به عنوان ورودی کترلی مشخصه گشتاور روی محور افقی شیفتم می‌شود.

$$\dot{x}(t) = \frac{\sum_{i=1}^r M_i(z) [A_i x(t) + B_i u(t)]}{\sum_{i=1}^r M_i(z)} \quad (2)$$

نکته مهم این است که در ساختار PDC همان توابع عضویت ورودی مدل برای کنترل‌کننده‌ها نیز در نظر گرفته می‌شود و برای هر کدام از مدل‌های خطی، یک کنترل‌کننده فیدبک حالت مطابق آنچه در رابطه (۳) آورده شده است، طراحی می‌گردد:

$$\text{Rule } i: \text{ if } z_1(t) \text{ is } M_{i1} \text{ and } \dots \text{ and } z_n(t) \text{ is } M_{in} \text{ then} \quad (3)$$

$$\dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) \quad i = 1, \dots, r$$

که در آن، K_i ماتریس فیدبک حالت مدل خطی نام با ابعاد مناسب است. با توجه به قضیه لیاپانوف^۱ سیستم فوق پایدار است اگر ماتریس مثبت معین p یافت شود که در شرایط (۴) صدق کند:

$$[A_i - B_i K_i]^T p - p [A_i - B_i K_i] < 0 \quad (4)$$

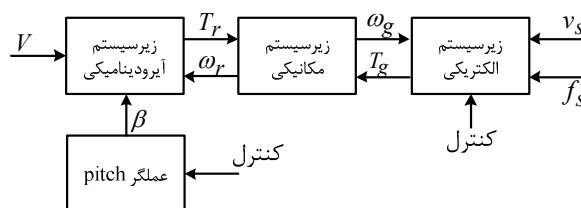
for $i, j \in 1, 2, \dots, r$ & $M_i M_j \neq 0$

یافتن یک چنین ماتریس مثبت معینی به صورت تحلیلی کار ساده‌ای نیست. یک راهکار مؤثر که در این مقاله نیز از آن استفاده شده است، روش عددی در حل توسط الگوریتم جست‌وجوی نامساوی‌های ماتریسی خطی^۲ است. با دقت در رابطه (۴)، قابل مشاهده است که توابع عضویت فازی نیز وارد شروط بررسی پایداری شده‌اند، زیرا برای بررسی پایداری کل سیستم لازم است علاوه بر نقاط کار مسیره‌ای ایجاد شده بین این نقاط نیز بررسی شوند (می‌توان برای کسب اطلاعات بیشتر به مرجع [۱۷] مراجعه کرد).

۳. استخراج مدل توربین باد

در این بخش، مدلی که ابتدا در نظر گرفته شده، از مرجع [۱۸] اقتباس شده است که برای رسیدن به هدف طراحی مقاله فازی‌سازی شده است.

توربین بادی سیستمی است که عموماً به صورت مجموعه‌ای از زیرساخت‌های بهم‌پیوسته نگریسته می‌شود. به طور کلی، این مجموعه در قالب زیرسیستم‌های مکانیکی، آیرودینامیکی و الکتریکی مطابق شکل (۱) دسته‌بندی می‌شود.



شکل (۱): زیرسیستم‌های توربین بادی [۱۸]

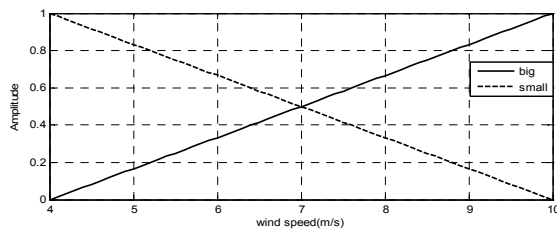
3. Linear Parameter Varying
4. Linear Time Invariant

1. Lyapunov
2. Linear Matrix Inequality

با توجه به این رابطه، چنانچه استراتژی کنترلی بتواند با موفقیت پیاده شود، تنها ترم متغیر در رابطه (۱۰) سرعت زاویه‌ای روتور بوده و $b(\theta)$ به صورت خطی با ω_r تغییر خواهد کرد و چون ω_r به صورت خطی با سرعت باد تغییر می‌کند، برای تقریب $b(\theta)$ برحسب سرعت باد در سیستم فازی، تنها می‌توان از دو تابع عضویت خطی استفاده کرد. قوانین و توابع عضویت در ادامه آورده شده‌اند. توجه شود که محدوده زیر سرعت نامی باد بازه $[4,10]m.s^{-1}$ در نظر گرفته شده است.

$$Rule1: \text{if } V \text{ is big then } b(\theta) = \frac{10}{2\lambda_{opt}^2} \rho \pi R^4 C_{p,Max} \quad (11)$$

$$Rule2: \text{if } V \text{ is small then } b(\theta) = \frac{4}{2\lambda_{opt}^2} \rho \pi R^4 C_{p,Max}$$

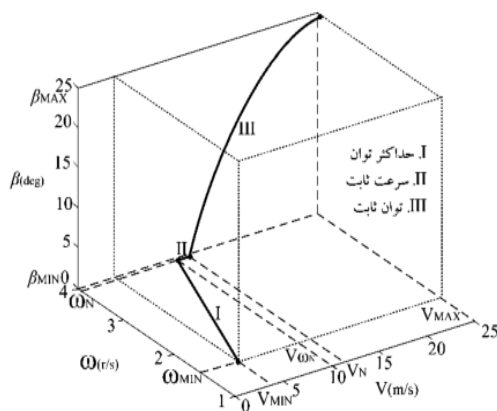


شکل (۲): توابع عضویت فازی برای مدلسازی $b(\theta)$

۴. اهداف کنترلی

در عمده طراحی‌های کنترل‌کننده برای توربین باد، دو متغیر کنترلی جهت کنترل توان خروجی وجود دارد که زاویه $pitch$ پره‌ها و سرعت روتور هستند. بسته به سرعتی از باد که می‌وزد، کنترل‌کننده‌ها در سه مکان و در سه استراتژی مختلف برای رسیدن به منحنی شکل (۳) طراحی می‌شوند [۱۸].

طبق آنچه در مقدمه بیان شد، هدف از کنترل در این مقاله، جذب حداکثر توان ممکن از باد است (یعنی مسیر I در شکل ۳).



شکل (۳): موقعیت ایده‌آل متغیرهای کنترلی در سه مکان مختلف برحسب سرعت باد

(همواره در حالت ژنراتوری $\omega_g < \omega_s$ می‌باشد).

با نوشتن روابط دو زیرسیستم دیگر و ادغام همه با هم، مدل LPV توربین باد را می‌توان به صورت زیر در فضای حالت به دست آورد:

$$G: \begin{cases} \dot{x} = A(\theta)x + B(\theta)u \\ y = Cx + Du \end{cases} \quad (8)$$

$$\dot{x} = [\theta_s \ \omega_r \ \omega_g \ \beta]^T, \quad u = [V \ \beta_d \ \omega_z]^T, \quad y = [\omega_g \ T_g]^T$$

$$A(\theta) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 \\ -K_s/J_r & \frac{b(\theta) - B_s}{J_r} & B_s/J_r & c(\theta)/J_r \\ K_s/J_g & B_s/J_g & -\frac{B_s + B_g}{J_g} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1/\tau \end{bmatrix}$$

$$B(\theta) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ a(\theta)/J_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_g/J_g \\ 0 & 1/\tau & 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & B_g & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -B_g \end{bmatrix}$$

که در آن، β_d زاویه $pitch$ مطلوب، ω_z سرعت میدان سنکرون مطلوب، K_s ضریب سختی محور انتقال، J_r لختی روتور، J_g لختی ژنراتور، B_s میرایی محور انتقال و τ ثابت زمانی عملگر $pitch$ هستند.

با استخراج این مدل، در ادامه باید سیستم فازی تک‌تک پارامترهای $a(\theta)$ ، $b(\theta)$ و $c(\theta)$ را برحسب تغییرات $\theta = [V \ \omega_r \ \beta]$ تقریب زده (این تقریب باید طوری باشد که معادله غیرخطی و خطی هرچه بیشتر به هم منطبق شوند) و مدل فازی T-S¹ برای پیاده‌سازی کار کنترل به دست آید. با این کار، تمام پیچیدگی‌های موجود در رابطه غیرخطی توربین باد به توابع عضویت فازی منتقل شده و در صورت مسئله تنها با چندین رابطه خطی درگیر خواهیم بود. باید توجه داشت که به سبب بالا بودن تعداد پارامترهایی که سیستم فازی باید آن‌ها را تقریب بزند (سه پارامتر بر حسب سه متغیر)، گزینه‌های بسیاری در دست خواهند بود تا رابطه (۶) ممکن شود و از طرفی، استخراج یک مدل فازی که بتواند با سه متغیر ورودی طبق یک قاعده خاص در موقعیت‌های مختلف سه خروجی در اختیار سیستم قرار دهد کار بسیار دشواری است، به همین دلیل رابطه (۹) جایگزین رابطه (۶) شده است.

$$T_r = \frac{1}{2\lambda} \rho \pi R^3 V^2 C_p(\lambda, \beta) \Rightarrow T_r = b(\theta)\omega_r \quad (9)$$

از این رو حاصل می‌شود:

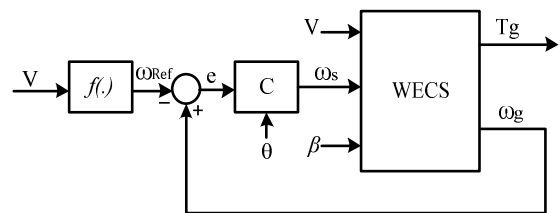
$$T_r = \frac{1}{2\lambda} \rho \pi R^3 V^2 C_p(\lambda, \beta) \Rightarrow b(\theta) = \frac{1}{2} \rho \pi R^5 \frac{C_p \omega_r}{\lambda^3} \quad (10)$$

به سبب رؤیت واضح تر اختلاف نتایج، دو مورد شبیه سازی صورت گرفته است. در مورد اول که نتایج در شکل های (۵) تا (۸) نشان داده شده، فرض بر این است که سرعت باد یک تغییر پله ای از 4 m.s^{-1} به 10 m.s^{-1} در ثانیه اول شبیه سازی داشته است. در شکل (۵)، منحنی توان خروجی ژنراتور رسم شده است که با توجه به ثابت بودن سرعت باد در یک ثانیه اول و یک ثانیه دوم شبیه سازی، توان نیز مقداری ثابت و برابر حداکثر مقدار قابل جذب است. سطوح حداکثر توان قابل جذب در شکل (۵) مشخص اند و در جهش انجام شده در ثانیه اول شبیه سازی، جبران ساز توزیع یافته موازی فازی در مقایسه با کنترل کننده PI، سریع تر به سطح دوم همگرا شده است.

در شکل (۶)، خطای سرعت روتور، از سرعت محاسبه شده برای جذب حداکثر توان باد به نمایش گذاشته شده است. مشخص است که نتایج شکل (۵) نیز تحت تأثیر همگرایی سرعت روتور در شکل (۶) بوده است. در شکل (۷)، مقدار ورودی کنترلی به نمایش درآمده است. ورودی کنترلی مورد نظر سرعت میدان گردان ژنراتور است که تحت تأثیر فرکانس تغذیه ژنراتور بوده و مستقیماً بر روی گشتاور ژنراتور مؤثر است. در شکل (۷)، مقادیر در دو کنترل کننده تا حد زیادی نزدیک به هم بوده و مشکل اشباع در هیچ یک پیش نیامده است. در نهایت، برای این مورد شبیه سازی تغییرات ضریب جذب توان از باد توسط توربین در شکل (۸) نمایش داده شده است که با توجه به نتیجه شکل (۵) با انتظار قبلی مطابقت داشته و در PDC ضریب همواره مقدار بالاتری دارد.

در خصوص شبیه سازی دوم که نتایج در شکل های (۹) تا (۱۲) به نمایش درآمده است، یک ورودی باد سینوسی با فرکانس ۲۰ هرتز، دامنه 3 m.s^{-1} و آفست 7 m.s^{-1} (به طوری که با توابع عضویت شکل (۲) همخوانی داشته باشد)، به مدل توربین اعمال شده است. مشابه نتایج موجود در شکل های (۵) تا (۸) در این بخش نیز به ترتیب نمودارهای مربوط به توان خروجی، خطای سرعت روتور از سرعت مرجع، ورودی کنترلی و تغییرات ضریب جذب توان ترسیم شده است. شکل (۹) بیشتر بودن توان جذب شده توسط طرح مقاله، شکل (۱۰) کمتر بودن خطای تعقیب سرعت روتور مرجع محاسبه شده توسط طرح مقاله و شکل (۱۲) نیز بیشتر بودن ضریب جذب توان توسط طرح مقاله را نشان می دهند. تمام این تفاوت ها در جهتی است که بهتر بودن طرح مقاله نسبت به کنترل کننده PID را تصدیق می کند. در شکل (۱۱) نیز ورودی های کنترلی دو ساختار کنترلی PDC و PID آورده شده اند که تفاوت قابل لمسی را نشان نمی دهند.

این مهم زمانی قابل حصول است که ضریب جذب توان (C_p) بیشترین مقدار ممکن را به خود بگیرد. تجربه نشان داده است که این مقدار نمی تواند بیشتر از 0.59 باشد و با توجه به رابطه ای که Betz استخراج کرده است [۱۹] و اینجا نیز از آن استفاده شده است، حداکثر 0.41 بوده و با توجه به مدل ما^۱ در $\beta = 0$ درجه و $\lambda_{opt} = 8$ به دست می آید. بدین معنی که نیازی به استفاده از کنترل کننده زاویه pitch نبوده و با تنظیم ورودی کنترلی دیگر که با توجه به رابطه (۸) ω_r است، می توان به صورت خطی متناسب با سرعت باد، رابطه $\omega_r = \frac{\lambda_{opt} V}{R}$ را محقق کرد. مطابق آنچه در شکل (۴) نشان داده شده است، مقدار مرجع سرعت روتور اندازه گیری شده و با سرعت زاویه ای شفت ژنراتور به عنوان نماینده ای از سرعت واقعی روتور مقایسه می شود و کنترل کننده فازی با استناد به مقادیر پارامترهای ورودی خود (θ) بهره لازم در مسیر خطا را تنظیم می کند.



شکل (۴): حلقه کنترلی به کاررفته برای تنظیم حداکثر توان در خروجی توربین [۱۸]

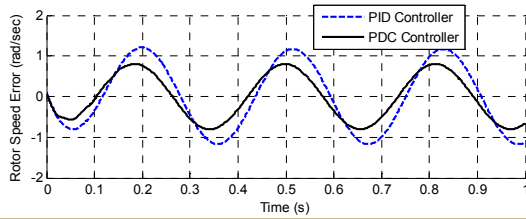
شبیه سازی و بررسی نتایج در این بخش، با انجام یک سری شبیه سازی، مقایسه ای بین طرح مقاله با یک کنترل کننده PID کلاسیک انجام شده است. مقادیر مطلوب پارامترهای جبران ساز توزیع یافته موازی فازی و کنترل کننده PID به صورت سعی و خطا و در بهترین مقادیر ممکن قرار داده شده اند. کنترل کننده های به دست آمده به ترتیب در روابط (۱۲) و (۱۳) در جایگاه نشان داده شده در شکل (۴) آورده شده اند.

$$C(s) = 20 + \frac{5}{s} \quad (12)$$

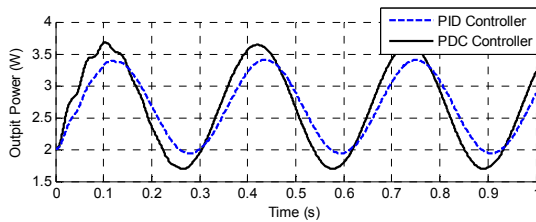
$$K_1 = 152600, \quad K_2 = 173600 \quad (13)$$

معیار انتخاب بهره ها در دو کنترل کننده فوق، حداقل شدن نرم خطای تعقیب سرعت روتور محاسبه شده، متناسب با سرعت باد است. مقادیر استفاده شده مربوط به توربین 1MW به نام SUT-1000، سه پره، محور افقی و سرعت متغیر است [۲۰].

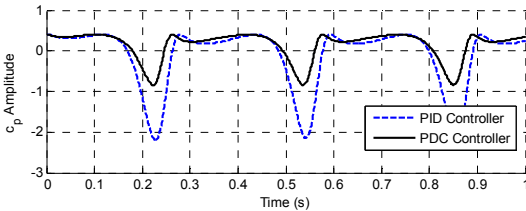
۱. مقادیر استفاده شده مربوط به توربین 1MW به نام SUT-1000، سه پره، محور افقی و سرعت متغیر است [۱۶].



شکل (۱۰): خطای تعقیب سرعت مرجع محاسبه شده برای روتور در شرایط ورودی باد سینوسی با فرکانس ۲۰ هرتز



شکل (۱۱): ورودی ω_2 در شرایط ورودی باد سینوسی با فرکانس ۲۰ هرتز



شکل (۱۲): تغییرات ضریب جذب توان در شرایط ورودی باد سینوسی با فرکانس ۲۰ هرتز

۱.۴. تحلیل پایداری

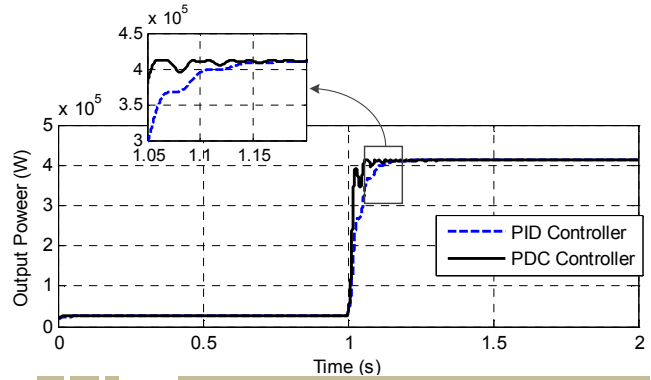
برای تحلیل پایداری با توجه به قضیه آورده شده در رابطه (۴) به دنبال ماتریس مثبت معین p هستند که شرایط مورد نیاز را برآورده سازد. با توجه به اینکه فقط از دو قانون فازی استفاده شده است، به صورت زیر محاسبه می شود:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1.88 & 0.01 & 0.003 \\ 26542 & 51.34 & -48.78 \end{bmatrix}, A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1.88 & 0.03 & 0.003 \\ 26542 & 51.34 & -48.78 \end{bmatrix}$$

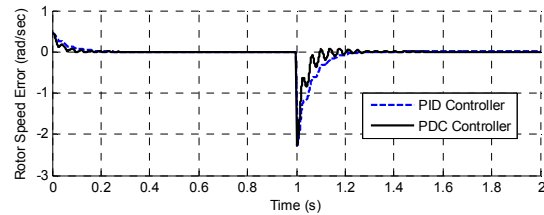
$$K_1 = [0 \ 0 \ 152600] \quad K_2 = [0 \ 0 \ 173600]$$

با قرار دادن این روابط در رابطه (۳) ماتریس مثبت معین p به صورت زیر به دست می آید که مثبت معین بوده و گواهی پایداری این الگوریتم است.

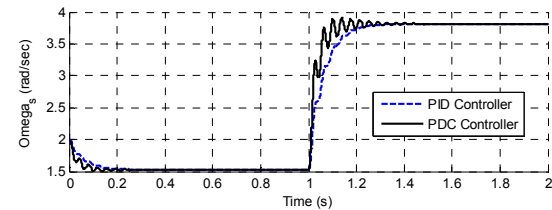
$$p = \begin{bmatrix} 0.27 & -4.2 & -3.7 \times 10^{-4} \\ -4.2 & 89.08 & 1.33 \times 10^5 \\ -3.7 \times 10^{-4} & 1.33 \times 10^5 & 1.02 \times 10^{-5} \end{bmatrix}$$



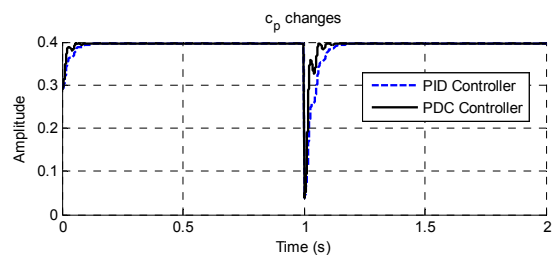
شکل (۵): توان خروجی توربین در جهش باد از سرعت 4 m.s^{-1} به 10 m.s^{-1} در ثانیه ۱ شبیه سازی



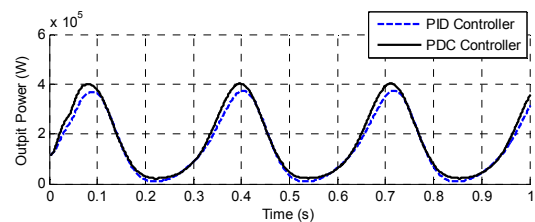
شکل (۶): خطای تعقیب سرعت مرجع محاسبه شده برای پره های روتور



شکل (۷): ورودی کنترلی ω_2 در دو حالت کنترل PID و PDC فازی



شکل (۸): تغییرات ضریب جذب توان در دو حالت کنترل PID و PDC



شکل (۹): توان خروجی توربین در شرایط باد سینوسی با فرکانس ۲۰ هرتز

۵. نتیجه گیری

پیچیدگی های مدل غیرخطی به توابع عضویت فازی، مدل به مراتب ساده تری درگیر مسئله گردید و نتایج شبیه سازی نیز تصدیق فرضیات اولیه شد. در نهایت با استناد به معادله لیاپانوف در اثبات پایداری سیستم های پیوسته در زمان، به کمک استفاده از نامساوی های ماتریسی خطی نشان داده شد که طرح پیاده شده از پایداری لازم برخوردار است.

با معرفی دستاورد PDC فازی در این مقاله، طرح کنترل بهره برنامه ریزی شده با موفقیت به فرم فازی آن تبدیل شده و علاوه بر استفاده از تکنیک های کنترل خطی برای یک سیستم غیرخطی، ریسک ناپایداری در اثر جابجایی بین دو نقطه کار مجاور از بین رفت. در این طرح، منطق کلامی انسان وارد بحث های ریاضی شده و با انتقال

مراجع

- [1] Mohammadi, K., et al. "Predicting the wind power density based upon extreme learning machine" Elsevier, *Energy*, Vol. 86, pp. 232–239, 2015.
- [2] Yang, Wenxian, et al. "Wind turbine condition monitoring: technical and commercial challenges." Wily, *Wind Energy*, Vol. 17, No. 5, pp. 673–693, May 2014.
- [3] Hand, M. M, *Variable-speed wind turbine controller systematic design methodology: a comparison of nonlinear and linear model-based designs*, National Renewable Energy Lab., Golden, CO, NREL/TP-500-25540, July 1999.
- [4] ÇOKÜNLÜ Gürol, *Wind Turbine Modeling and Controller Design*, M.Sc. Thesis. Istanbul Technical University. Date of submission: 10 May 2007.
- [5] Hansen, M. H, Hansen, A, Larsen, T. J, Oye, S, Sorensen, P, Fuglsang, P, "Control Design for a Pitch-regulated Variable-speed Wind Turbine" Report #R-1500(EN) Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, 2005.
- [6] Leith, D. J. and Leithead, W. E, "Appropriate realization of gain-scheduled controller with application to wind turbine" Taylor & Francis, *International Journal of Control* 65(2), pp.223–248, 1996.
- [7] Rocha, R, Siqueira, L, Filho, M, "A Multivariable H_∞ Control for Wind Energy Conversion System" Proceeding of IEEE conference on control applications, Vol. 1, pp.206-211, 2003.
- [8] Takaai, H, Chida, Y, Sakurai, K, Isobe, T, "Pitch angle control of wind turbine generator using less conservative robust control" 18th IEEE International Conference on Control Applications, 2009.
- [9] Rezaei, V., and Salmasi, F., "Robust Adaptive Fault Tolerant Pitch Control of Wind Turbines" *Wind Engineering*, Vol.38, No.6, pp.601-612, 2014.
- [10] Bianchi, F.D, Mantz, R.J, Christiansen, C.F, "Control of variable-speed wind turbines by LPV gain scheduling" Wily, *Wind Energy*, Vol. 7, pp. 1–8, 2004.
- [11] Johnson, K. E, *Adaptive torque control of variable speed wind turbines*, National Renewable Energy Lab, Golden CO, NREL/TP-500-36265, Aug 2004.
- [12] Johnson, Kathryn. E, et al, "Control of variable-speed wind turbines: standard and adaptive techniques for maximizing energy capture" *Control Systems, IEEE* Vol.26, No. 3, pp.70-81, 2006.
- [13] Johnson. K. E, Fingersh. L. J, "Adaptive pitch control of variable speed wind turbines" American Society of Mechanical Engineers, *Journal of Solar Energy Eng.*, Vol. 130, No. 3, August 2008.
- [14] RAJENDRAN. Saravanakumar, and J. E. N. A. Debashisha. "Backstepping sliding mode control of a variable speed wind turbine for power optimization" Springer, *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, pp.1-9, 2015.
- [15] Reichert. R.T, Rugh. W.J, Nichols. R. A, "Gain scheduling for H-infinity controllers: a flight control example," *IEEE Trans. Control Systems Technology*, Vol. 1, No. 2, pp. 69-79, Jun. 1993.
- [16] H.Ying, "The Takagi–Sugeno fuzzy controllers using the simplified linear control rules are nonlinear variable gain controller" Elsevier, *Automatica*, Vol. 34, No. 2, 1998.
- [17] Boyd Stephen, et al, *Linear Matrix Inequalities in System and Control Theory*, Philadelphia: Society for Industrial and Applied Mathematics SIAM, 1994.
- [18] Bianchi. F.D, H. D. Battista, Mantz. R.J, *Wind Turbine Control Systems: Principles, modeling and gain-scheduling design*, Springer-Verlag London, 2007.
- [19] Yao, Xing-jia, Guo Chang-Chun, and Li Yan. "LPV H-infinity controller design for variable-pitch variable-speed wind turbine" *IEEE 6th International Power*

Electronics and Motion Control Conference, IPEMC'09, 2009.

power extraction of wind turbine with continuously variable transmission" Elsevier, *Energy*, pp.868-874,

[20] Petković. Dalibor, et al. "*Adaptive neuro-fuzzy maximal*

2014.