



## کنترل توربین بادی در ناحیه وسیعی از تغییرات نقطه کاری با در نظر گرفتن دینامیک های محلی

محمد خیاط<sup>۱</sup>، محمد علی نکویی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات واحد تهران، mohammadkhayat1988@gmail.com

<sup>۲</sup>دانشگاه خواجه نصیر الدین طوسی، manekoui@eetd.kntu.ac.ir

چکیده - توربین های سرعت متغیر به طور گسترده ای در سیستم های قدرت مورد استفاده قرار می گیرند. در این توربین ها ژنراتور به طور مستقیم به شبکه متصل نمی شود. نوع سرعت متغیر توربین بادی قابلیت کنترل سرعت روتور را فراهم می کند، این کار به ما اجازه می دهد تا توربین بادی نزدیک نقطه بهینه خود کار کند. در این مقاله کنترل کننده ای طراحی می شود که در ناحیه سوم کاری، توان توربین بادی را ثابت و حدالمقدور تغییرات سرعت روتور را حول سرعت نامی کاهش دهد. در همین راستا ابتدا با استفاده از فیدبک گرفتن سرعت روتور و معادلات حالت سیستم، حالت ها و همچنین سرعت باد با استفاده از روش پیشنهادی تخمین زده می شود، و پس از آن کنترل کننده که با استفاده از روش  $LQR$  و قواعد فازی طراحی می گردد. با توجه به تغییرات مدل خطی در نقاط مختلف کاری، از ایده کنترل فازی تاکاگی - سوگنو برای تنظیم سرعت روتور با استفاده از گردش پره ها، استفاده می شود. در سیستم کنترلی مورد نظر سرعت روتور به عنوان خروجی سیستم و ورودی کنترل کننده و همچنین زاویه پره ها به عنوان خروجی کنترل کننده در نظر گرفته شده است.

کلید واژه - توربین بادی، کنترلر فازی،  $LQR$ ، سرعت روتور

یک سیستم ذخیره ساز انرژی باتری، برای سیستم تولید انرژی بادی به طور معمول جهت جبران سازی نوسانات تولید شده بوسیله توربین بادی مورد نیاز است.

در مرجع [۱] با استفاده از روش کنترل پیش بین غیرخطی به دنبال دریافت حداکثری انرژی از توربین های بادی بوده است. در مرجع [۲] از روش کنترلر فازی-تناسبی برای کنترل زاویه پیتچ توربین های بادی و با هدف کاهش نوسانات بار استفاده شده است. در مرجع [۳] نیز کنترل پیتچ توربین بادی مبتنی بر روش فازی پیش بین ارائه شده است. در این مرجع نیز حداکثرسازی توان در سه ناحیه کاری انجام شده است. توربین بادی با استفاده از مدل فازی تاکاگی-سوگنو بیان شده است. در مرجع [۴] از کنترلر پیش بین خطی بهینه شده توسط پارتو برای توربین های بادی استفاده شده است. در این مقاله یک کنترل کننده ای طراحی می شود که در ناحیه سوم کاری، توان توربین بادی را ثابت و حدالمقدور تغییرات سرعت روتور را حول سرعت نامی کاهش دهد. برای شبیه سازی این شرایط، یک مدل غیرخطی و با جزئیات کامل لازم است. شبیه ساز SimWindFarm برای مدل سازی و ارزیابی توربین های بادی استفاده می شود که بطور مشترک توسط دانشگاه Aalborg و آزمایشگاه ملی انرژی های

### ۱- مقدمه

با گسترش روز افزون جوامع انسانی و توسعه صنعتی جوامع مختلف، نیاز به منابع انرژی، در حال افزایش است. از سویی دیگر منابع فسیلی درجهان رو به اتمام هستند، این منابع، از نظر اندازه و مقدار محدود بوده و درضمن آلاینده محیط زیست نیز محسوب می شوند. توربین های سرعت متغیر به طور گسترده ای در سیستم های قدرت مورد استفاده قرار می گیرند. در این توربین ها ژنراتور به طور مستقیم به شبکه متصل نمی شود. نوع سرعت متغیر توربین بادی قابلیت کنترل سرعت روتور را فراهم می کند، این کار به ما اجازه می دهد تا توربین بادی نزدیک نقطه بهینه خود کار کند. بیشتر توربین های بادی با بازه توان بیشتر از ۱/۵ مگاوات از نوع سرعت متغیر می باشند. توربین بادی باید در شرایط باد آشفته و غیرقابل پیش بینی کار کند، از این رو مدلسازی توربین نیز بعلت رفتار غیرخطی و متغیر با زمان آن دشوار است. یک طرح کنترلی مناسب در سیستم تولید انرژی بادی تحت شرایط عملکرد نرمال برای کنترل صحیح و درست تولید توان اکتیو نیاز است. در رویداد افزایش اغتشاش شبکه،



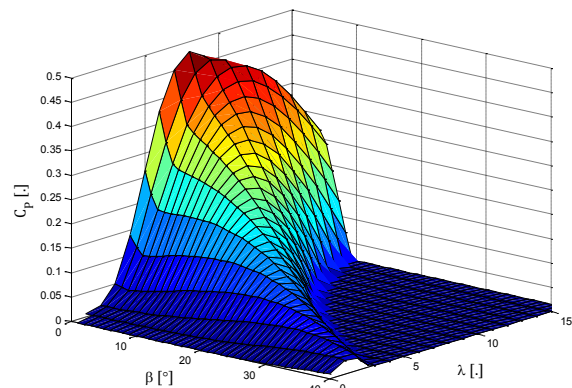
تجدیدپذیر آمریکا گسترش یافته است و توانایی تولید شرایط نزدیک به واقعیت را دارد.

به ترتیب تغییرات بردار حالت، زاویه و سرعت باد از نقطه کار را نشان می دهند. همچنین ماتریس های سیستم به صورت زیر است

توان آنرودینامیکی که توسط باد، پره ها را می گرداند در معادله ۱ نشان داده شده است که کسری از کل توان باد است، که این کسر توسط ضریب توان ( $C_p$ ) تعیین می شود و تابعی غیرخطی از زاویه پره ها

## ۲- تشریح مدل مساله

توان آنرودینامیکی که توسط باد، پره ها را می گرداند در معادله ۱ نشان داده شده است که کسری از کل توان باد است، که این کسر توسط ضریب توان ( $C_p$ ) تعیین می شود و تابعی غیرخطی از زاویه پره ها



شکل ۱ فاکتور توان  $C_p(\lambda, \beta)$

و نسبت نوک سرعت پره ( $\lambda = R\omega_r / V$ ) است. شکل نمودار تغییرات فاکتور توان را نسبت به زاویه یکسان پره ها و نسبت سرعت نوک پره نشان می دهد.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{N_g} & 1 & 0 \\ \frac{K_{dt}}{J_g N_g} & -\frac{(B_{dt} + B_g N_g^2)}{N_g^2 J_g} & \frac{B_{dt}}{N_g J_g} & 0 \\ -\frac{K_{dt}}{J_r} & \frac{B_{dt}}{N_g J_r} & -\frac{B_{dt} + B_r}{J_r} + \frac{1}{J_r} \frac{\partial T_a}{\partial \omega_r} & \frac{1}{J_r} \frac{\partial T_a}{\partial \beta} \\ 0 & 0 & 0 & -1/\tau \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1/\tau \end{bmatrix}$$

(۳)

با فرض سرعت باد نامی ۱۴ متر بر ثانیه و بار 5MW بصورت

زیر است:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -0.0103 & 1 & 0 \\ 16746 & -1.23 & 119.96 & 0 \\ -24.47 & 0.0018 & -0.275 & -0.0157 \\ 0 & 0 & 0 & -20 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -20 \end{bmatrix}$$

$$B_d = [0 \ 0 \ 0.0263 \ 0]^T, C = [0 \ 0 \ 1 \ 0]$$

(۴)

با فرض در دسترس بودن تمامی حالات فیدبک حالت طراحی می شود. برای این کار قطبهای سیستم حلقه بسته در نقاط مناسب جایابی می شود. فرض کنیم قطبهای مطلوب بصورت زیر باشد

$$P = \{-0.08, -0.7 \pm 14j, -20\}$$

در این صورت با حل معادله زیر داریم

$$\text{eig}(A - B * K) = P$$

$$\Rightarrow K = [0.0209 \ 0.0022 \ 1.4752 \ -0.064]$$

ابتدا با استفاده از فیدبک گرفتن سرعت روتور و معادلات حالت سیستم، حالت ها و همچنین سرعت باد با استفاده از روش پیشنهادی تخمین زده می شود، و پس از آن کنترل کننده که با استفاده از روش LQR و قواعد فازی طراحی می گردد. شکل ۲ نمای کلی از نحوه ارتباط بین کنترل کننده و توربین بادی را نمایش می دهد. همانطور که مشخص است با استفاده از سرعت روتور و معادلات حالت سیستم، باد و همچنین حالت های

$$T_a(\omega_r(t), \beta(t), V(t)) = \frac{\rho \pi R V(t)^2}{2 \lambda(t)} C_p(\lambda(t), \beta(t))$$

(۱)

دینامیک خطی سازی شده توربین بادی حول نقطه کار بالای سرعت نامی باد در نظر گرفته شده است. در این ناحیه فرض می شود ورودی گشتاور ثابت است. بنابراین در مدل خطی، ورودی کنترلی منحصر به عملگر پره ها خواهد بود. معادلات مدل به صورت زیر است

$$\dot{x}(t) = A x(t) + B u(t) + B_d d(t)$$

$$y(t) = C x(t)$$

(۲)

بطوریکه

$$x(t) = [\Delta \theta_\Delta(t) \ \Delta \omega_g(t) \ \Delta \omega_r(t) \ \Delta \beta]^T$$

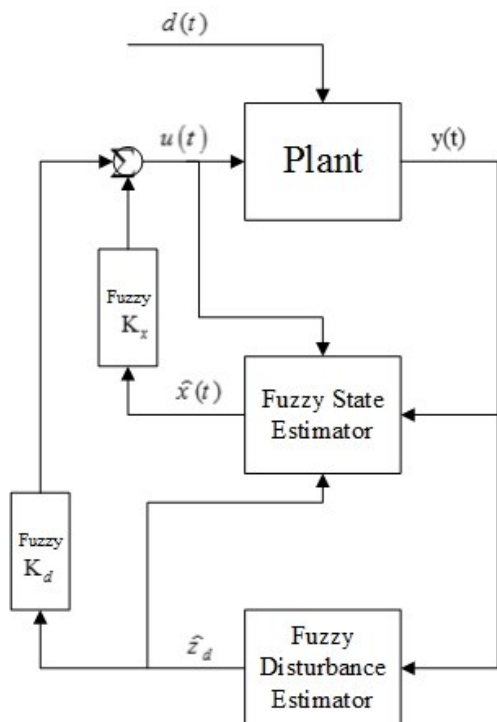


$$J = \min_u \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (8)$$

با توجه به تغییرات مدل خطی در نقاط مختلف کاری، از ایده کنترل فازی تاکاگی- سوگنو برای تنظیم سرعت روتور با استفاده از گردش پره ها، استفاده می شود.

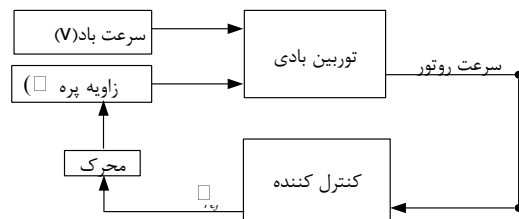
برای نقاط کاری مختلف یک روتور و یک کنترل فیدبک LQR طراحی می شود. بطوریکه شرایط پایداری T-S را داشته باشد. روتور طراحی شده، علاوه بر تخمین حالت ها، از الگوریتم تطبیق برای شناسایی اغتشاش باد استفاده می کند. بطوریکه یک مدل برای سیگنال خارجی اغتشاش در نظر گرفته می شود و به عنوان یک حالت در پروسه تخمین استفاده می شود.

با توجه به قضیه جدایی طراحی کنترلر از طراحی روتور جدا است بنابراین می توان تحلیل پایداری را برای قسمت بهره کنترل کننده LQR جداگانه انجام داد. مدل جزئی تر کنترل کننده پیشنهادی در شکل زیر نشان داده شده است



شکل ۳ ساختار کنترل کننده پیشنهادی

سیستم تخمین زده شده و سیگنال کنترلی تولید و به روز می شود. در سیستم کنترلی مورد نظر سرعت روتور به عنوان خروجی سیستم و ورودی کنترل کننده و همچنین زاویه پره ها به عنوان خروجی کنترل کننده در نظر گرفته شده است.



شکل ۲ نحوه کنترل توربین بادی در این تحقیق

با توجه به اینکه سیستم حول نقطه نامی مورد بررسی و مطالعه قرار می گیرد و در این نقطه سرعت باد توان روتور و سرعت روتور و بقیه پارامترها مقدار مشخصی دارند، برای راحت تر شدن محاسبات و کاهش پیچیدگی با استفاده از یک تغییر متغیر سیستم را به نقطه تعادل خواهیم برد در این صورت خواهیم داشت:

$$\dot{\bar{x}} = f(\bar{x}, \bar{q}, \bar{v}) \quad (5)$$

که در آن :

$$\bar{x} = x_0 + x \quad (6)$$

$$\bar{q} = q_0 + q$$

$$\bar{v} = v_0 + v$$

قانون کنترل بصورت زیر است

$$u = - (k_x \hat{x}(t) + k_d \hat{z}_d(t)) \quad (7)$$

$k_x$  و  $k_d$  ماتریس های فیدبک حالت و فیدبک اغتشاش و

$\hat{x}$  و  $\hat{z}_d$  تخمین های حالت های سیستم هستند. در بخش بعدی نحوه بدست آوردن این دو ماتریس و همچنین نحوه طراحی روتور جهت تخمین حالت ها بررسی شده است.

برای بدست آوردن این ماتریس از روش حل مسئله تنظیم مرتبه دوم خطی (LQR) استفاده شده است [۱]:

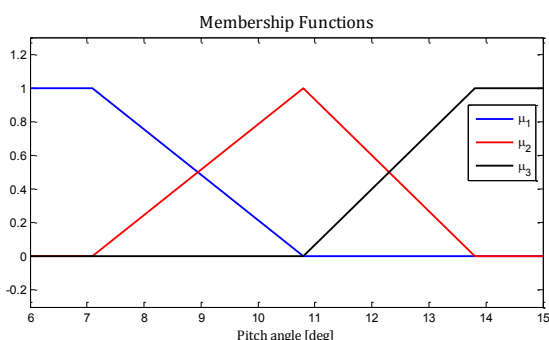
اگر ماتریس های (A,B) کنترل پذیر باشند آنگاه  $k_x$  می تواند از روی حل مسئله مرتبه دوم خطی با فرمول زیر بدست می آید:



جدول ۲ مقدار پارامترهای استفاده شده

پارامتر	معادل	مقدار
R	شعاع موثر پره روتور	۶۳
$D_s$	ضریب میرایی شفت	۶۲۱۵۰۰۰
$J_r$	اینرسی روتور	۳۵۴۴۴۰۶۷
$N_g$	نسبت چرخ دنده	۹۷
K	ضریب سختی	۸۶۷۶۳۷۰۰۰
$J_g$	اینرسی ژنراتور	۵۳۴,۱۱۶
$\rho$	چگالی	۱,۲۲۳۱

با در نظر گرفتن مدل خطی توربین بادی در معادلات کنترل کننده و رویتر با توابع عضویت بصورت شکل ۴ طراحی شد. برای تشخیص نقطه کار، از موقعیت زاویه پره ها استفاده شده است.



شکل ۴ توابع عضویت

ابتدا برای باد ثابت با سرعت ۱۵ متر بر ثانیه شبیه سازی انجام شد که نتایج با یک کنترل کننده PI مقایسه شده است. که در ادامه سرعت ژنراتور، سرعت روتور و زاویه ورودی پره ها نشان داده شده است.

### ۳- تحلیل نتایج

در این مقاله توان توربین بادی توسط ثابت نگه داشتن سرعت روتور در ناحیه سوم مورد مطالعه قرار گرفته است. ورودی باد، به عنوان اغتشاش و یکی از حالت های سیستم در نظر گرفته شده و از طریق رویتر فازی همه حالت های سیستم تخمین و سپس قانون کنترل اعمال شده است. نقطه ضعف روش های پیشین نادیده گرفتن دینامیک غیرخطی و تاثیر آن در تخمین و قاعده کنترل سیستم است. لذا با ارائه شبیه سازیهای گویا سعی شده است تا کارایی روش پیشنهادی تحقیق شود. در این مقاله نتیجه روش استفاده شده با کنترل کننده تناسبی-انتگرالگیر مقایسه شده است، که نتیجه آن نشان دهنده کارآمدی رویکرد بوده است. با توجه به سیستم مورد مطالعه که توربین بادی ۵ مگا وات دور از ساحل محور افق آزمایشگاه ملی انرژی های تجدیدپذیر، مشخصات توربین در جدول ۱ شرح داده شده است:

جدول ۱ مشخصات توربین بادی

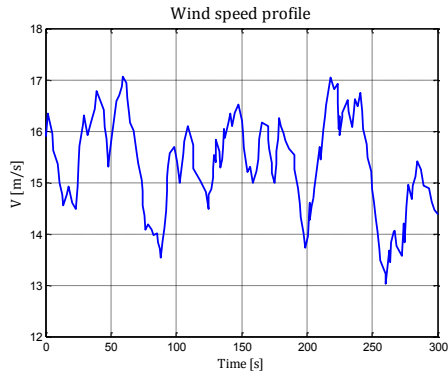
رتبه	۵ مگاوات
جهت و پیکربندی روتور	خلاف جهت باد، سه پره
کنترل	سرعت متغیر، گام زاویه مشترک
جعبه دنده	سرعت بالا، چند مرحله ای
قطر روتور و هاب	۱۲۶ و ۳ متر
ارتفاع هاب	۹۰ متر
سرعت پایین باد، مجاز، بیشه سرعت باد	۳، ۱۱، ۴، ۲۵ متر بر ثانیه
سرعت حداقل و مجاز روتور	۶، ۹ و ۱۲، ۱ دور در دقیقه
نسبت سرعت نوک	۸۰ متر بر ثانیه
جرم روتور	۱۱۰,۰۰۰ کیلوگرم
جرم ناسل	۲۴۰,۰۰۰ کیلوگرم
جرم برج	۳۴۷,۴۶۰ کیلوگرم

مقادیر پارامتری توربین بادی نیز در جدول ۲ آمده است:

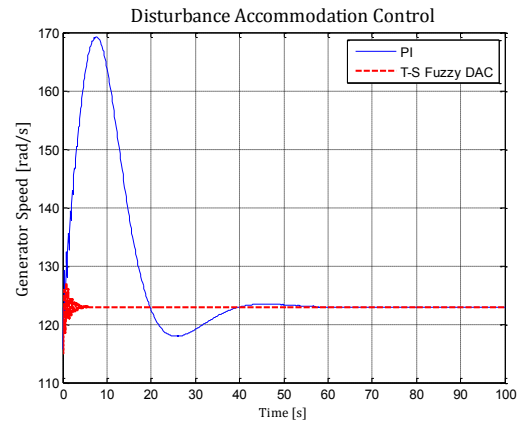




سرعت ژنراتور، سرعت روتور و زاویه ورودی پره‌ها نشان داده شده است.

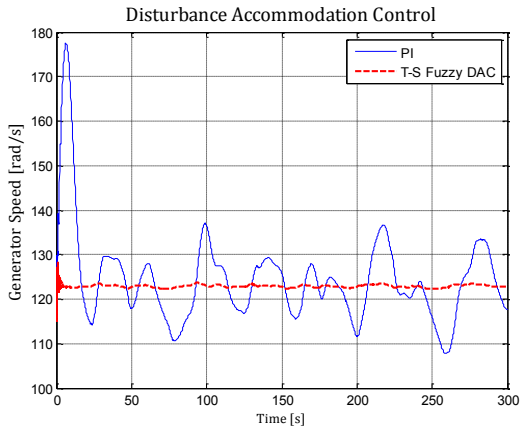


شکل ۸ پروفایل باد



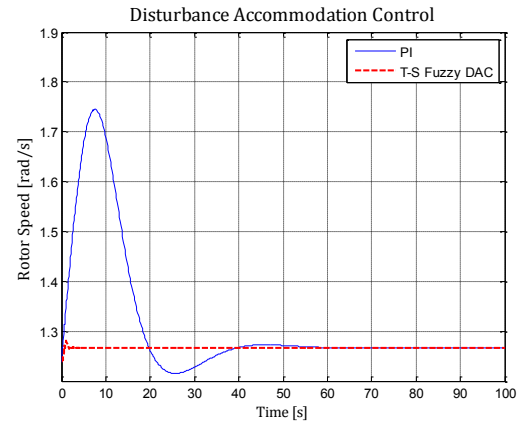
شکل ۵ سرعت ژنراتور برای باد ثابت با کنترل کننده پیشنهادی (خط

آبی) و PI (خط چین قرمز)



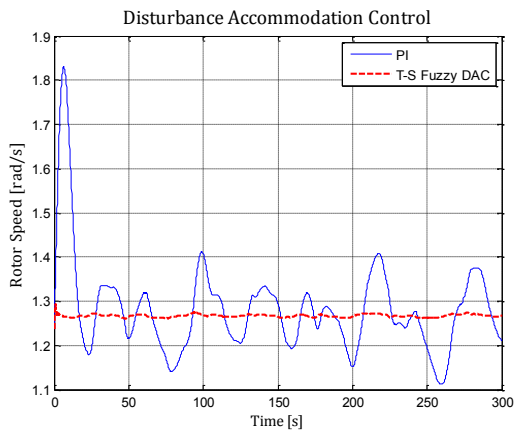
شکل ۹ سرعت ژنراتور برای باد ثابت با کنترل کننده پیشنهادی (خط

آبی) و PI (خط چین قرمز)



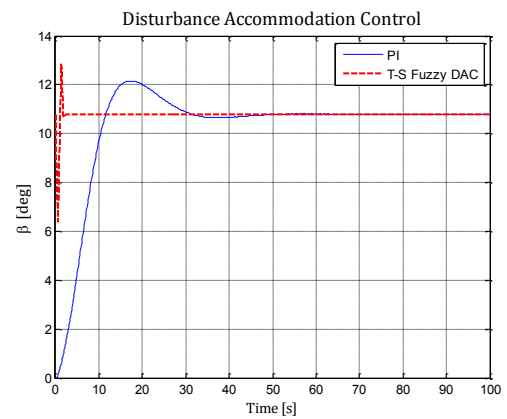
شکل ۶ سرعت روتور برای باد ثابت با کنترل کننده پیشنهادی (خط

آبی) و PI (خط چین قرمز)



شکل ۱۰ سرعت روتور برای باد ثابت با کنترل کننده پیشنهادی (خط

آبی) و PI (خط چین قرمز)



شکل ۷ تغییرات زاویه پره‌ها برای باد ثابت با کنترل کننده

پیشنهادی (خط آبی) و PI (خط چین قرمز)

برای پروفایل باد متلاطم شبیه سازی انجام شد. که در ادامه

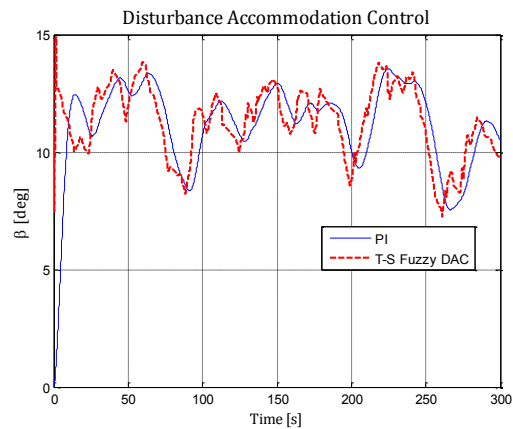


#### ۴- نتیجه گیری

در این مقاله کنترل کننده فازی پیشنهادی برای پروفایل باد ثابت و متلاطم و بر روی مدل غیر خطی یک توربین بادی 5MW پیاده سازی شد. با استفاده از سرعت روتور و معادلات حالت سیستم، باد و همچنین حالت های سیستم تخمین زده شد و سیگنال کنترلی تولید و به روز شد. در سیستم کنترلی مورد نظر سرعت روتور به عنوان خروجی سیستم و ورودی کنترل کننده و همچنین زاویه پره ها به عنوان خروجی کنترل کننده در نظر گرفته شد. کنترلر دارای دو بخش تخمین و فیدبک از حالت های تخمینی است که کارایی رویتگر و سیستم حلقه بسته با استفاده از شبیه سازی ها نشان داده شد. برای مقایسه کنترلر پیشنهادی از کنترل کننده متداول PI استفاده شد که نتایج، برتری قابل توجه کنترل کننده فازی طراحی شده را نشان می دهد.

#### مراجع

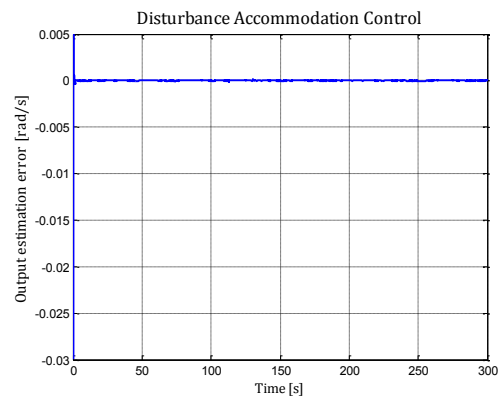
- [1] A. Bektachea, B. Boukhezzar, "Nonlinear predictive control of a DFIG-based wind turbine for power capture optimization", Electrical Power and Energy Systems, 2018.
- [2] Zafer civelek, Murat Lüy, Ertuğrul Çam, Hayati Mamur, "A new fuzzy logic proportional controller approach applied to individual pitch angle for wind turbine load mitigation", Renewable Energy, 2017.
- [3] Ahmed Lasheen, Abdel Latif Elshafei, "Wind-turbine collective-pitch control via a fuzzy predictive algorithm", Renewable Energy, 2016.
- [4] Peter Fogh Odgaard, Lars F.S. Larsen b, Rafael Wisniewski, Tobias Gybel Hovgaard, "On using Pareto optimality to tune a linear model predictive controller for wind turbines", Renewable Energy, 2015.
- [5] Zhenbin Zhang, Hui Fang, Feng Gao, Jose Rodriguez, and Ralph Kennel, "Multiple-Vector Model Predictive Power Control for Grid-Tied Wind Turbine System with Enhanced Steady State Control Performance", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, 2017.



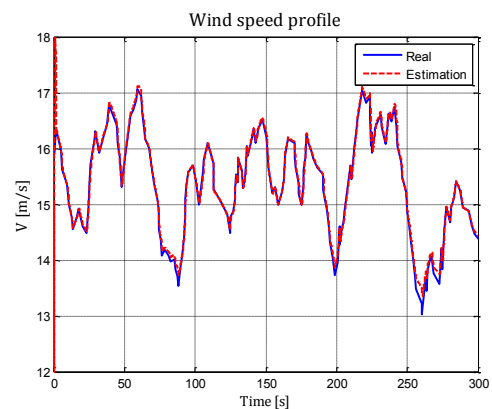
شکل ۱۱ تغییرات زاویه پره ها برای باد ثابت با کنترل کننده

پیشنهادی (خط آبی) و PI (خط چین قرمز)

برای نشان دادن کارایی رویتگرهای طراحی شده، خطای تخمین خروجی و نیز تخمین اغتشاش باد در شکل های زیر نشان داده شده است.



شکل ۱۲ خطای تخمین خروجی ( $e_y = y - \hat{y}$ )



شکل ۱۳ سرعت باد واقعی (خط آبی) و تخمین سرعت باد با رویتگر

پیشنهادی (خط چین قرمز)