



به نام خدا

عنوان:

Wind turbine pid fuzzy controller

نام درس:

مقدمه‌ای بر هوش محاسباتی

نام استاد:

دکتر حیدر علی طالبی

دکتر ایمان شریفی

نگارش :

محمد برابادی

مارال مرداد

محیا حقگو

سجاد قدیری

(۱) مطالعه و تعیین معادلات غیرخطی سیستم

معرفی

بحران انرژی یکی از بزرگ‌ترین مسائلی است که انسان‌ها در قرن بیستم با آن مواجه‌اند. افزایش تقاضا برای انرژی و محدودیت سوخت‌های فسیلی باعث شد تا به انسان‌ها به فکر جایگزینی برای انرژی‌های فسیلی باشند. انرژی‌های تجدیدپذیر کاندیدهای مناسبی بودند. سه نوع مهم انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی خورشیدی، انرژی گرانشی و انرژی Geothermal می‌باشد.

انرژی باد یکی از انواع انرژی می‌باشد که باعث گردش هوا بین مناطق گرم و سرد می‌شود.

انرژی جنبشی موجود در باد را می‌توان با استفاده از یک توربین بادی به انرژی مکانیکی و با استفاده از ژنراتور توربین بادی به انرژی الکتریکی تبدیل کرد.

با در نظر گرفتن m به عنوان جرم جریان هوا و v به عنوان سرعت حرکت آن، انرژی جنبشی باد به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$E = \frac{1}{2}mv^2$$

همچنین با در نظر گرفتن A به عنوان سطح پره روتوری که در معرض جریان باد می‌باشد، انرژی جنبشی به صورت زیر قابل بیان است:

$$E = \frac{1}{2}\rho v^2$$

که ρ چگالی هوا و v حجم بسته هوای در دسترس روتور است. توان را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$P = \frac{1}{2}\rho Av^3$$

هنگامی که باد از توربین عبور می‌کند، تنها بخشی از انرژی آن قابل استخراج است و مابقی آن توسط باد عبوری منتقل می‌شود. ضریب C_p تعیین کننده میزان توانی است که توسط روتور تولید می‌شود.

حداکثر توان قابل استخراج از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_t = \frac{1}{2}\rho AC_p v^3$$

ضریب C_p به نسبت بین سرعت خطی نوک تیغه و سرعت باد بستگی دارد.

نسبت بین سرعت خطی نوک تیغه و سرعت باد به صورت زیر است:

$$\lambda = \frac{wt * R}{v}$$

که R در این رابطه شعاع توربین می باشد.

استخراج مدل

Rated generator power, P_e	1000 KW
Rated generator speed, W_g	1500 rpm
Rated turning speed of rotor, W_t	20 rpm
Wind turbine blade radius, R	35 m
References pitch angle, β_d	0 to 90 deg
Rate of change of pitch angle	0.6 deg / sec
Control accuracy of pitch angle	0.3 deg
Damping coefficient, B	2 N.m./ rad /sec
Drive-train inertia, J_t	0.75 N.m ²

• مدل

رابطه تغییرات در زاویه Pitch به صورت زیر می باشد که T_β زمان تغییرات زاویه می باشد:

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{\beta_d - \beta}{T_\beta}$$

$$T_\beta \frac{d\beta}{dt} + \beta = \beta_d$$

با تبدیل لاپلاس از دوطرف رابطه خواهیم داشت:

$$T_\beta(\beta s) + \beta = \beta_d$$

$$\beta(T_\beta s + 1) = \beta_d$$

$$\frac{\beta_d}{\beta} = \frac{1}{T_\beta s + 1}$$

برای محاسبه T_β با توجه به مقادیر داده شده در جدول داریم:

$$T_\beta = \frac{\beta_d - \beta}{\frac{d\beta}{dt}} = \frac{0.3}{0.6} = 0.5$$

در نتیجه خواهیم داشت:

$$\frac{\beta}{\beta_d} = \frac{1}{0.5s + 1}$$

استخراج مدل

پارامترهای در نظر گرفته شده در هنگام مدل سازی به صورت زیر هستند:

Parameters	Description
J_T	Wind turbine inertia
J_G	Generator inertia
K_a	Stiffness coefficient
B	Damper coefficient
T_T	Wind turbine torque
T_G	Generator electromechanical torque
W_T	Wind turbine shaft speed
W_g	Generator shaft speed
θ_T	Wind turbine shaft angle
θ_g	Generator shaft angle
$\frac{1}{n_{gear}}$	Gear ratio

معادلات دینامیکی سیستم به صورت زیر نوشته می شوند:

$$J_T \cdot \frac{d}{dt}(W_T) = T_T - (K_s \cdot \delta \theta_T + B \delta W)$$

$$\frac{d}{dt}(\delta \cdot \theta) = \delta \cdot W$$

حال با استفاده از قانون دوم نیوتن داریم:

$$J \cdot \frac{dw}{dt} = T - Bw$$

از دو طرف معادله تبدیل لاپلاس می‌گیریم:

$$J \cdot Ws = T - BW$$

$$J \cdot Ws + BW = T$$

$$J \cdot Ws + BW = T$$

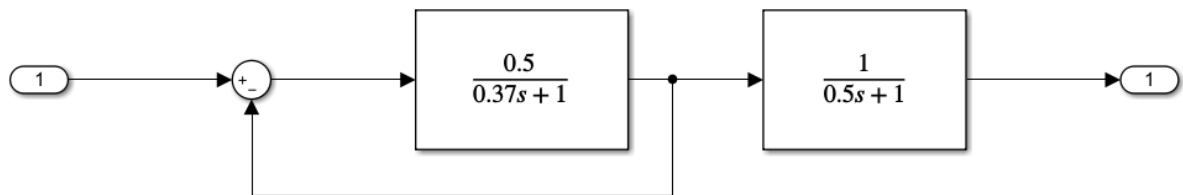
$$W(Js + B) = T$$

$$\frac{W}{T} = \frac{1}{(Js + B)}$$

$$\frac{W}{T} = \frac{\frac{1}{B}}{(\frac{J}{B}s + 1)} = \frac{\frac{1}{2}}{(\frac{0.75}{2}s + 1)} = \frac{0.5}{(0.375s + 1)}$$

۲) بررسی پایداری سیستم مورد مطالعاتی

تابع تبدیل سیستم در شکل زیر آمده است:



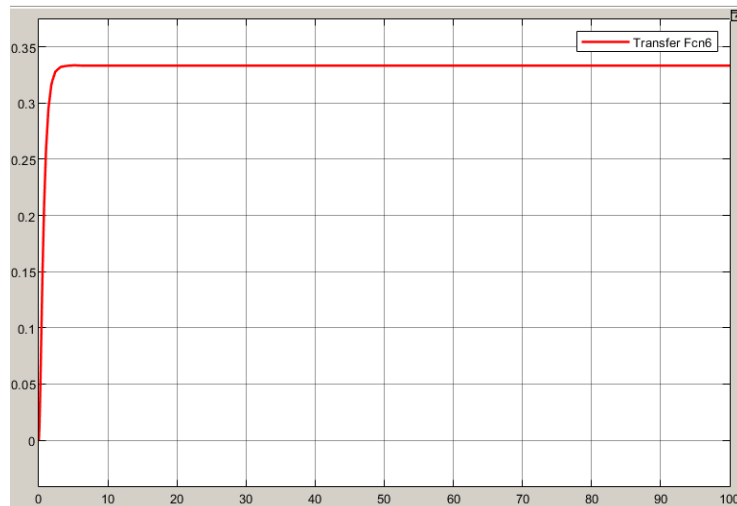
$$G_{driveTerrain} = \frac{\frac{0.5}{0.37s + 1}}{1 + \frac{0.5}{0.37s + 1}} = \frac{0.5}{0.37s + 1.5}$$

$$G_{pitchActuator} = \frac{1}{0.5s + 1}$$

$$G_{plant} = G_{driveTerrain} \times G_{pitchActuator}$$

همان طور که مشخص است قطب‌های تابع تبدیل سیستم 2- و 4.0541- است که هر دو قطب سمت چپ محور $j\omega$ هستند پس سیستم دارای پایداری ورودی خروجی است.

به سیستم حلقه باز ورودی پله داده شده است و نتیجه به شکل زیر به دست آمده است.



با توجه به این که پاسخ پله سیستم حلقه باز پایدار است، پس سیستم پایداری دارد.

۳) طراحی کنترل کننده فازی برای سیستم

کنترل کننده های زاویه Pitch برای توربین بادی:

روش کنترل زاویه Pitch یکی از رویکردهای رایج برای بهبود عملکرد سیستم تولید توان توسط توربین های بادی می باشد. توربین های بادی می توانند هم به صورت عمودی و افقی ساخته شوند. ما بر روی توربین های افقی که رایج تر هستند تمرکز می کنیم. هدف کلی این نوع کنترل به صورت زیر می باشد:

۱- بهینه سازی توان خروجی توربین بادی

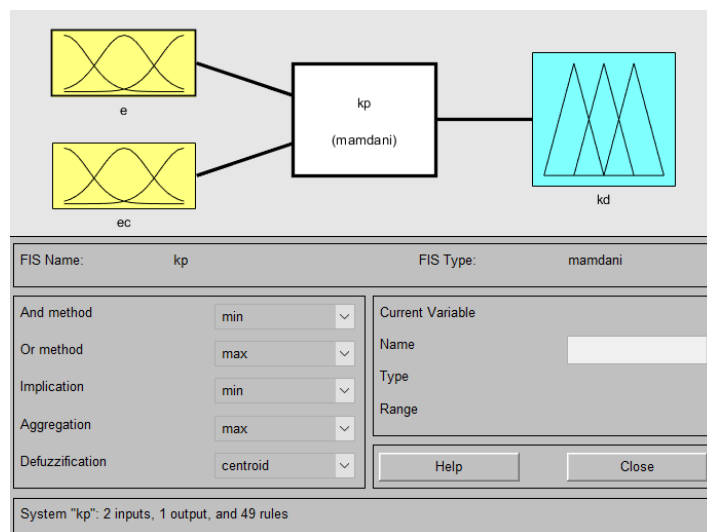
به معنا که تحت سرعت نامی، زاویه Pitch باید در مقدار بهینه خود باشد تا حداکثر توان را بدهد.

۲- در سرعت های بالاتر از سرعت نامی، کنترل زاویه Pitch روش موثری برای تنظیم توان آیرودینامیکی و بارهای تولید شده توسط روتور فراهم می آورد.

۳- طراحی کنترلر باید تأثیر بارها را در نظر بگیرد و کنترل کننده باید اطمینان حاصل کند که بارهای بیش از حد از عمل کنترل ایجاد نمی شود.

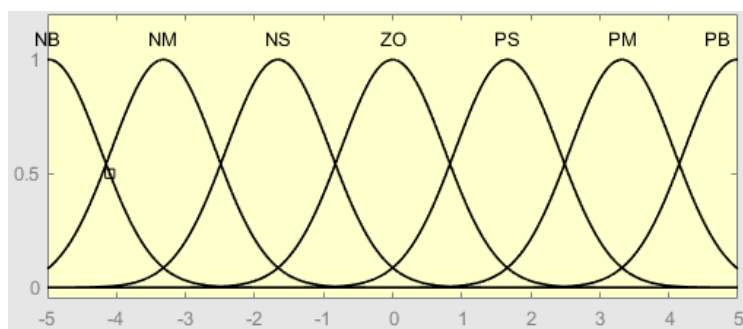
برای کنترل سیستم مورد مطالعه در این پروژه کنترلر fuzzy pid طراحی شده است. به این منظور ورودی های سیستم فازی خطا زاویه و مشتق خطا زاویه در نظر گرفته شده است. برای پیاده سازی کنترلر fuzzy

pid، برای هر بلوک fuzzyLogic دو ورودی و یک خروجی که یکی از ضرایب pid است در نظر گرفته شده است.

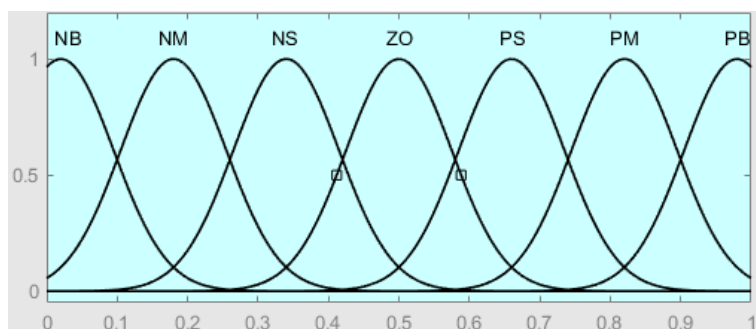


برای طراحی بخش فازی از دستگاه استنتاج ممدانی و ضدفازی ساز centroid استفاده شده است. توابع عضویت به شکل زیر و از نوع گوسی تعریف شده اند.

تابع عضویت خطا و مشتق خطا:



تابع عضویت ضرایب pid:



قوانین فازی برای ضریب k_p :

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	ZO	ZO
NM	PB	PB	PM	PS	PS	ZO	NS
NS	PM	PM	PM	PS	ZO	NS	NS
ZO	PM	PM	PS	ZO	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZO	NS	NS	NM	NM
PM	PS	ZO	NS	NM	NM	NM	NB
PB	ZO	ZO	NM	NM	NM	NB	NB

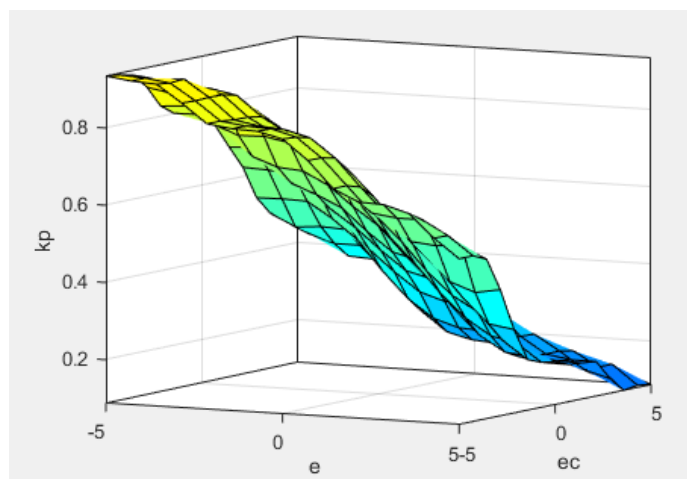
قوانین فازی برای ضریب k_i :

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	ZO	ZO
NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZO	ZO
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PS
ZO	NM	NM	NS	ZO	PS	PM	PM
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB	PB
PB	ZO	ZO	PS	PM	PM	PB	PB

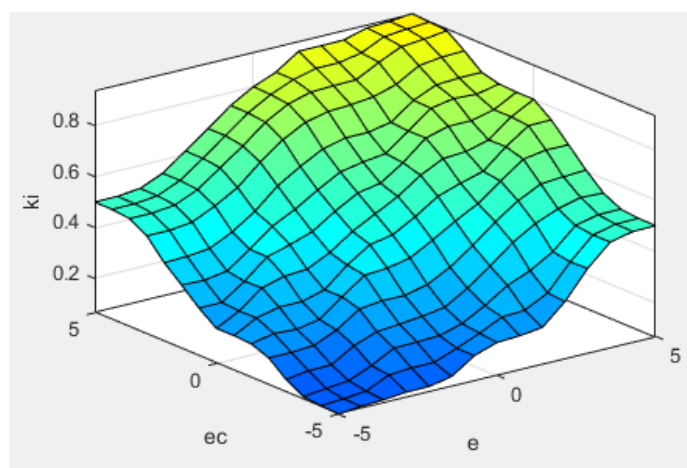
قوانین فازی برای k_d :

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	PS
NM	PS	NS	NB	NM	NM	NS	ZO
NS	ZO	NS	NM	NM	NS	NS	ZO
ZO	ZO	NS	NS	NS	NS	NS	ZO
PS	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO	ZO
PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PB
PB	PB	PM	PM	PS	PS	PS	PB

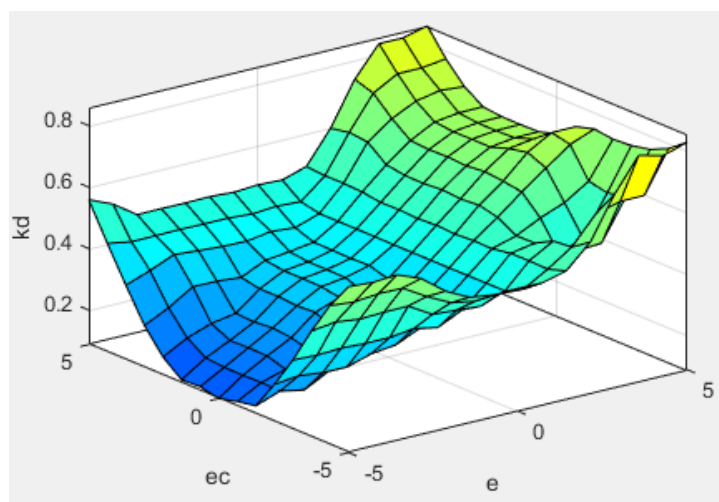
Surface rule diagram برای ضریب k_p :



Surface rule diagram برای ضریب k_i :

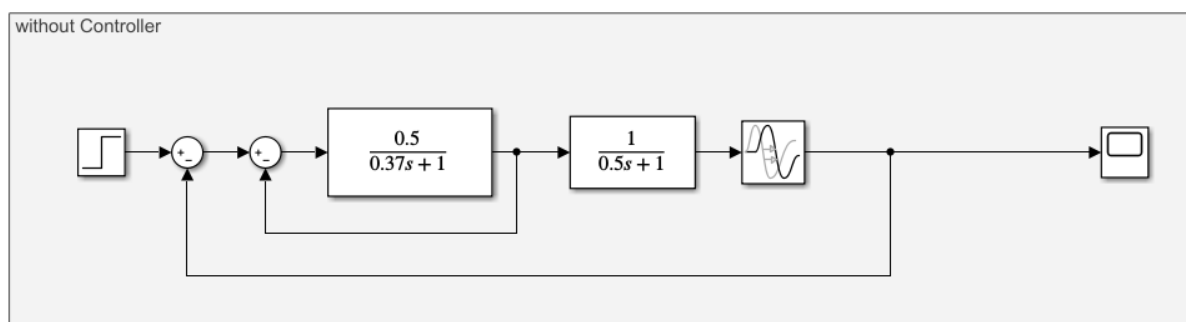


Surface rule diagram برای ضریب k_d :

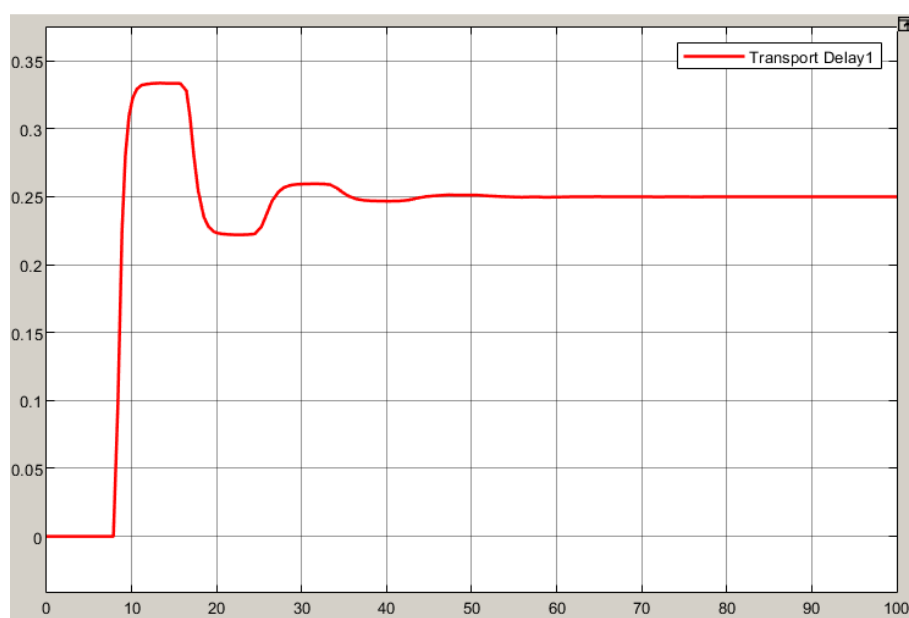


(۴) شبیه سازی

شبیه سازی سیستم بدون کنترلر و با فیدبک حالت و به همراه تاخیر ۸ ثانیه:



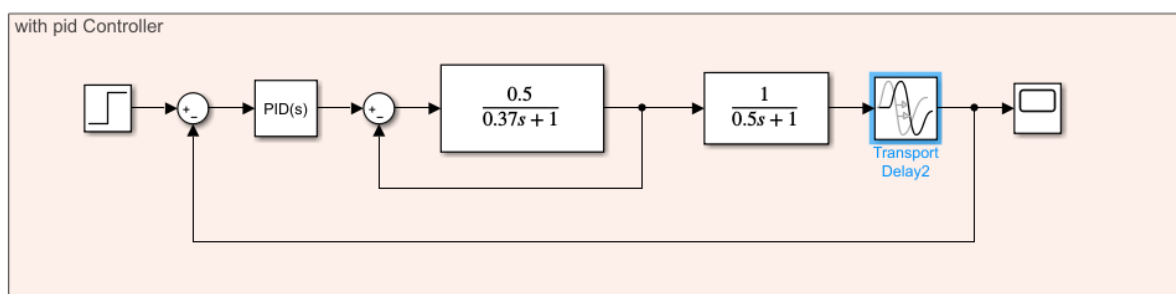
پاسخ پله سیستم بدون کنترلر:



مشخصات پاسخ پله سیستم بدون کنترلر:

Time Domain	Result without controller
Delay Time	8 sec
Rise Time	864.7 msec
Settling Time	42 sec
Peak overshoot(%)	33.83
Steady state error	0.75 sec

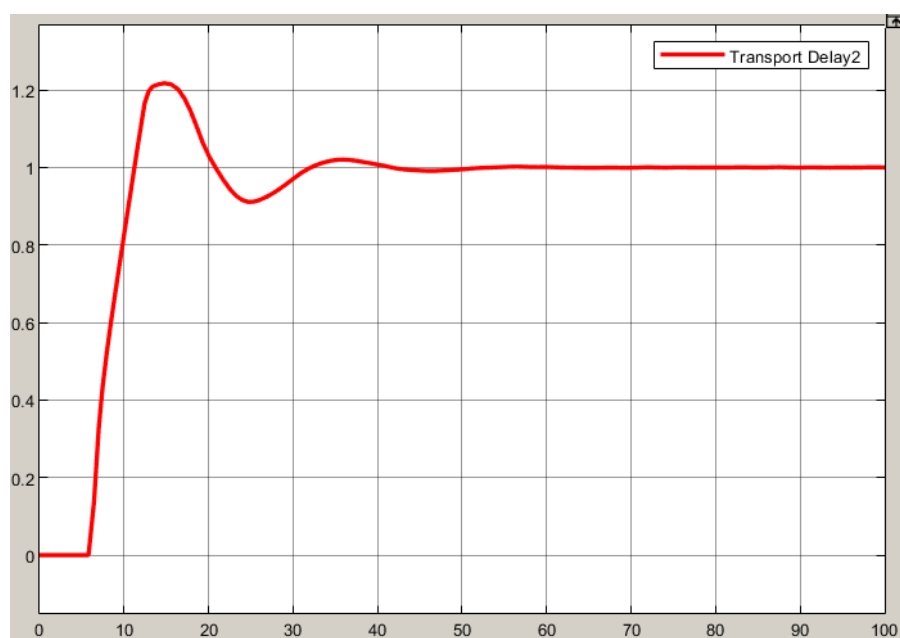
شبیه سازی سیستم با کنترلر PID به همراه تاخیر ۶ ثانیه:



ضرایب PID به شرح زیر می باشند:

$$K_p = 1.3, K_i = 0.41, K_d = -2.18$$

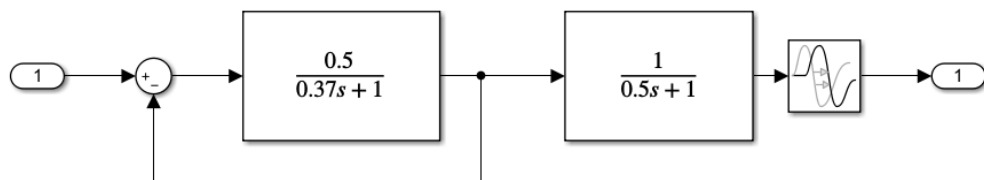
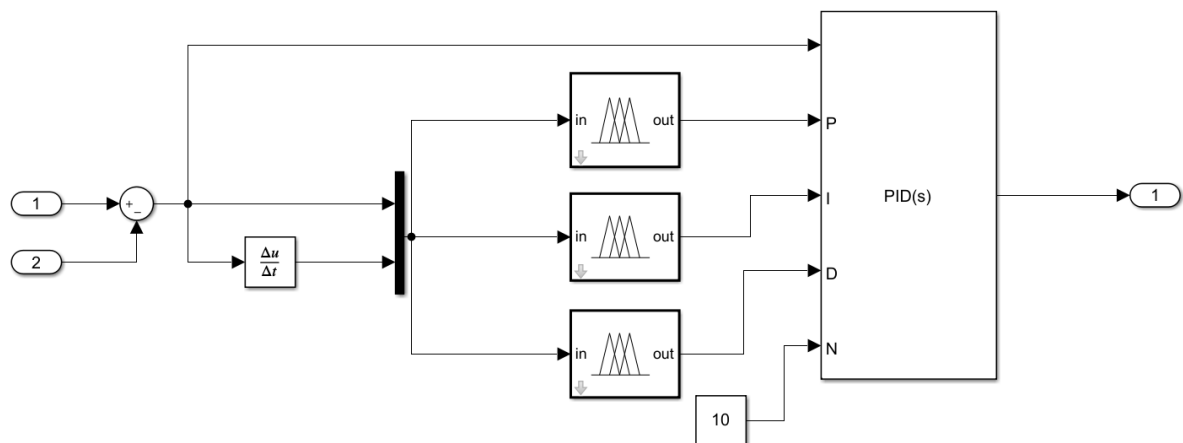
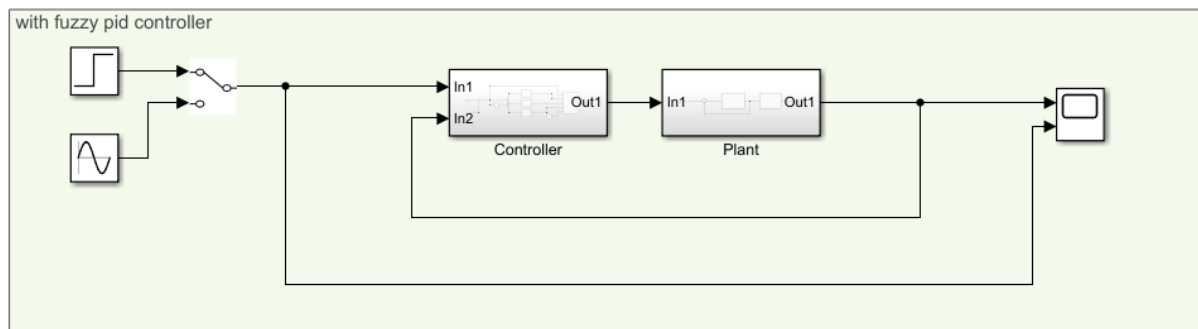
پاسخ پله سیستم به همراه کنترلر PID:



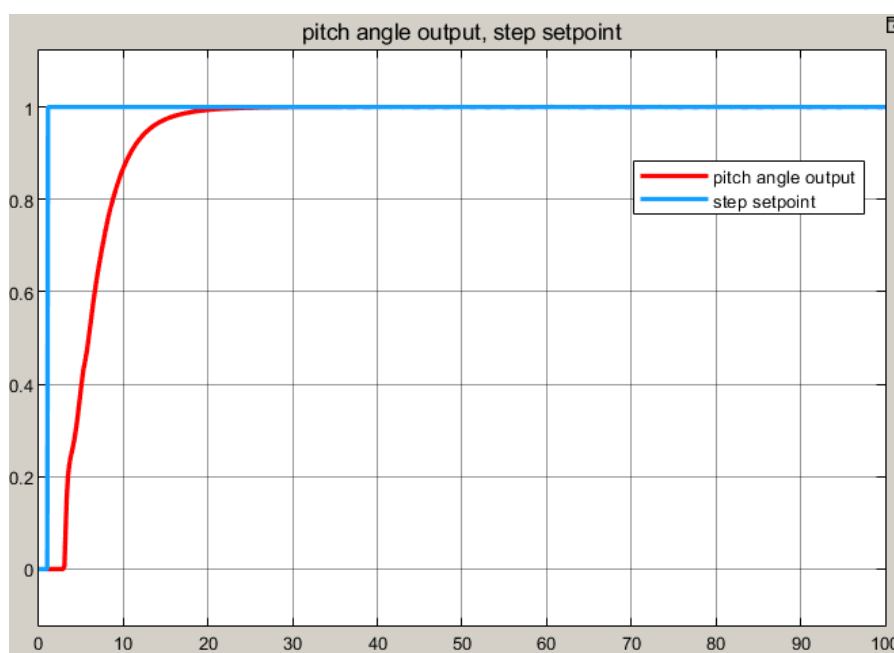
مشخصات پاسخ پله سیستم با کنترلر PID:

Time Domain	PID
Delay Time	6 sec
Rise Time	4.19 sec
Settling Time	37 sec
Peak overshoot(%)	21.34
Steady state error	0

شبیه سازی سیستم به همراه کنترلر فازی pid به همراه تاخیر ۲ ثانیه:



پاسخ پله سیستم با کنترلر فازی pid :



Time Domain	Result with fuzzy pid controller
Delay Time	2 sec
Rise Time	7.49 sec
Settling Time	20.5 sec
Peak overshoot(%)	0
Steady state error	0

نکته ۱: در شبیه‌سازی‌ها تاخیر آورده شده است و مقدار این تاخیر در حالت‌های مختلف اعم از بدون کنترلر، با کنترلر pid و با فازی pid کنترل متفاوت است. دلیل وجود این تاخیر بزرگ و سنگین بودن ساختار بدنه و پره‌های توربین بادی است که باعث می‌شود پره‌ها به ازای سرعت‌های پایین نچرخند و بعد از یک سرعتی مشخص شروع به چرخش کنند. دلیل تفاوت این تاخیر در حالت‌های مختلف بررسی شده است که هرچقدر کنترلر قوی‌تر باشد، پره‌ها سریع‌تر شروع به چرخش می‌کنند. این قضیه با اضافه کردن تاخیرهای متفاوت شبیه‌سازی شده است.

نکته ۲: همان‌طور که در جداول نتایج مشخص است سیستم به همراه کنترلر هم دارای زمان نشست بالایی می‌باشد (حدود ۲۰ ثانیه) که نسبت به حالت بدون کنترلر که حدود ۴۵ ثانیه بود بسیار بهتر شده است. و قابل ذکر است که این زمان‌های نشست به همراه تاخیر نسبتاً زیادی هستند. در این پروژه که کنترل زاویه پره‌ها مد نظر است حساسیت خیلی زیادی روی زمان نشست وجود ندارد و ۲۰ ثانیه مطلوب است.

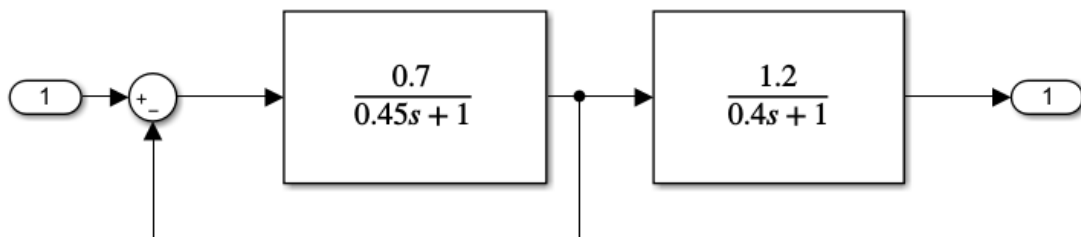
۵) بررسی پایداری سیستم فازی

همان طور که در بخش قبل بررسی شد پاسخ پله سیستم به همراه کنترلر فازی pid پایدار می‌باشد و دارای مشخصات مطلوب مد نظر است.

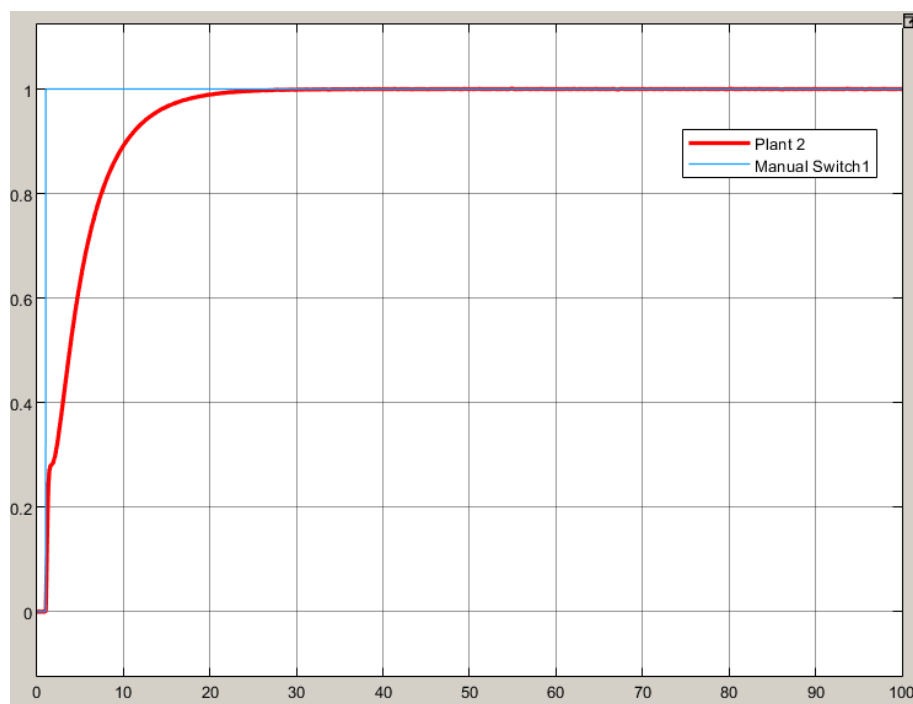
۶) بررسی عملکرد و پایداری سیستم فازی در حضور عدم قطعیت‌های پارامتری

برای بررسی عدم قطعیت‌ها می‌توان پارامترهای مختلف سیستم را به میزان معقول تغییر داد. برای مثال در این قسمت یکی از مهم‌ترین پارامترها یعنی ضرایب توابع تبدیل را که ممکن است بر اثر دلایل مختلفی همچون مدل‌سازی نادقیق و در نظر نگرفتن بعضی دینامیک‌های سیستم، گسسته‌سازی و... به وجود بیاید را تغییر دادیم. در واقع این تغییر در ضرایب باعث عوض شدن معادله مشخصه و در نتیجه عوض شدن قطب‌های سیستم می‌شود.

تغییرات اعمال شده سری اول به شرح زیر است:

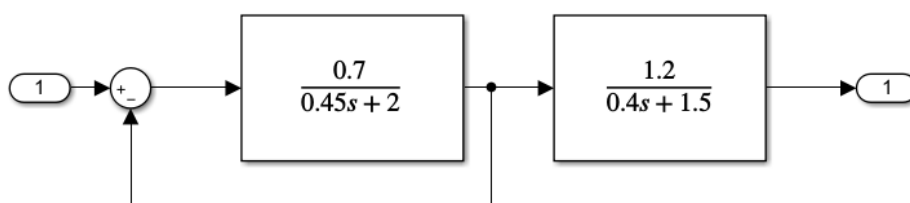


پاسخ پله به همراه عدم قطعیت در پارامترها (تغییرات سری اول):



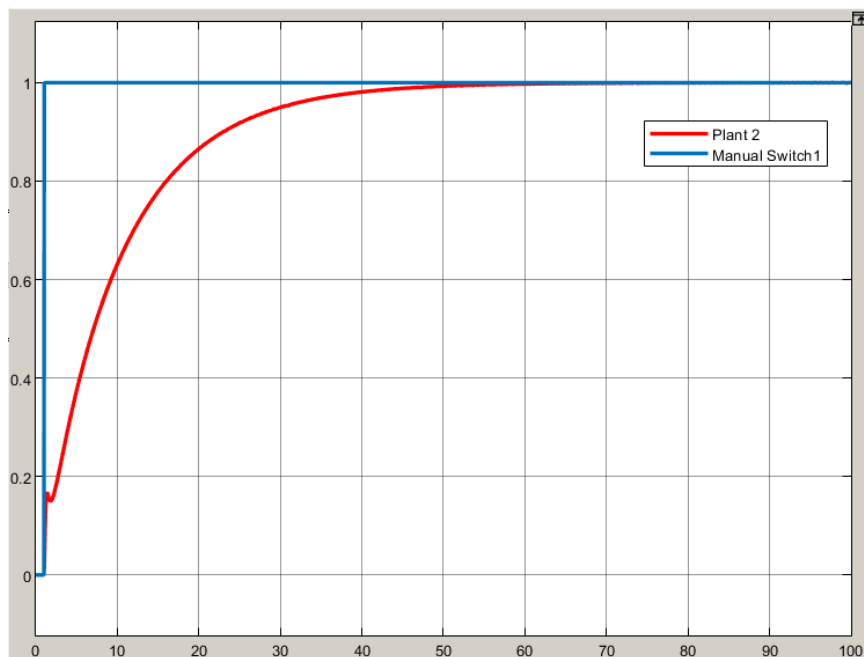
همان‌طور که مشخص است تغییرات ضرایب تاثیر ناچیزی در پاسخ سیستم داشته است.

تغییرات اعمال شده سری دوم به شرح زیر است:



که این سری تغییر در تمام پارامترها به مقدار زیاد اعمال شده است.

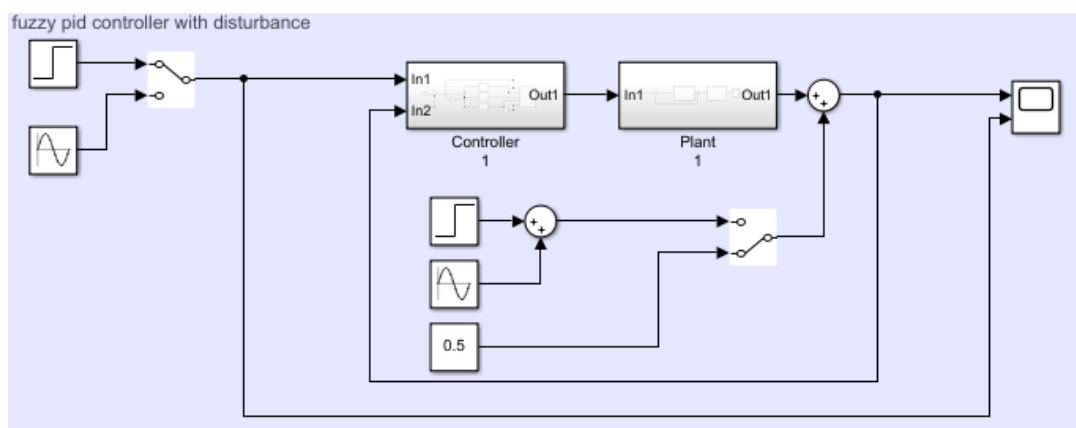
پاسخ پله به همراه عدم قطعیت در پارامترها (تغییرات سری دوم):



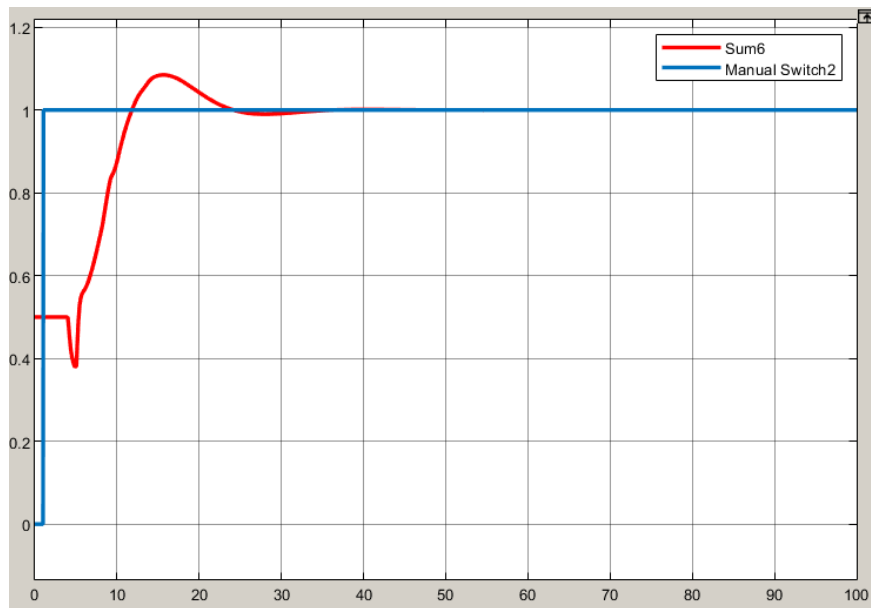
تغییرات بسیار زیاد در تمامی پارامترها به معنی مدل سازی خیلی بد می باشد که همان طور که مشخص است باعث کندی سیستم شده است.

۷) بررسی عملکرد و پایداری سیستم فازی در حضور اغتشاش

سیستم به همراه اغتشاش ثابت و پله به همراه سینوس به شکل زیر است.

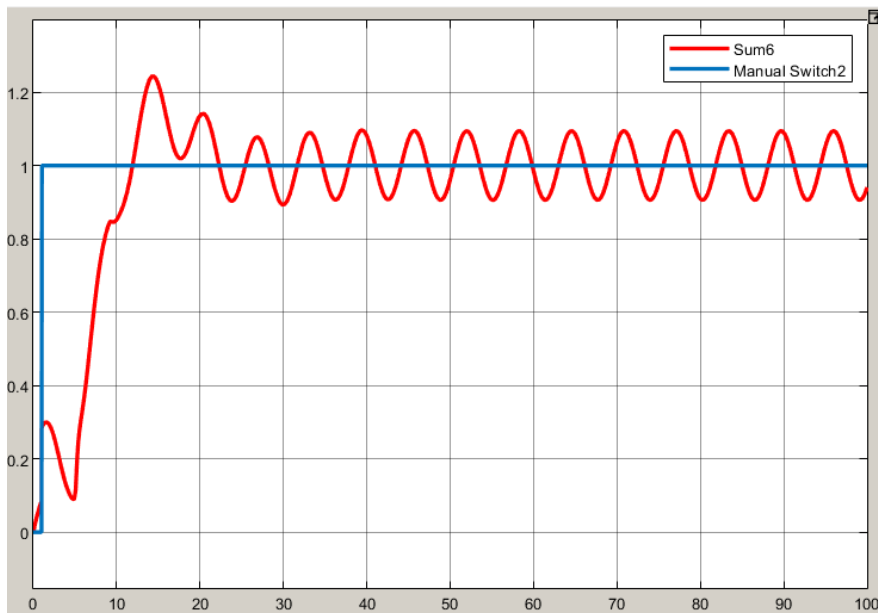


نتیجه ورود اغتشاش ثابت ۰,۵:



همان طور که مشخص است با این که اغتشاشی به دامنه نصف ورودی مرجع به سیستم داده شده است همچنان سیستم توانسته با اثر اغتشاشات مقابله کند و زمان نشست و اورشوت خیلی زیاد نشده است.

نتیجه ورود اغتشاش پله با دامنه ۰,۲ به همراه موج سینوسی با دامنه ۰,۱:



در این حالت سیستم را با اغتشاش سنگین تری مواجه کردیم به این منظور ترکیبی از موج سینوسی و پله را به سیستم اعمال کردیم همان طور که مشاهده می کنید پاسخ سیستم نسبت به حالت قبل بدتر شده و در واقع سینوسی شده و به یک عدد ثابت میل نمی کند.

۸) ارزیابی

در این پروژه، کنترل زاویه پره‌های توربین جهت افزایش توان عبوری از توربین بادی مورد بررسی قرار گرفت. سیستم بدون کنترل دارای اورشوت بسیار زیاد و خطای حالت دائم (۷۵ درصد) غیر قابل چشم پوشی بود. برای کنترل این سیستم دو کنترلر pid و فازی به همراه pid مورد بررسی قرار گرفت. نتایج در حالت کنترلر فازی رضایت بخش و قابل قبول بود. مزیت کنترلر فازی نسبت به کنترلر pid ساده این است که در حالت فازی دیگر کنترلر، ضرایب ثابت در برابر هر خطایی ندارد بلکه در هر بار اجرای حلقه کنترل بر اساس میزان خطا و مشتق خطا و قوانین تعریف شده تصمیم می‌گیرد که چه اعدادی به ضرایب نسبت دهد.

- 1) [Pitch Angle control of the variable speed wind turbine](#)
- 2) [Pitch Control of Wind Turbine through PID, Fuzzy and adaptive Fuzzy-PID controllers](#)
- 3) [The Application of Fuzzy PID Control in Pitch Wind Turbine](#)
[کنترل فازی توربین بادی سرعت متغیر با استفاده از ANFIS](#)

(4)