



## کنترل بهینه چندمتغیره جریان سوخت رسانی و IGV توربین گازی با استفاده از طراحی کنترلر PID-PSO در شرایط آلوده به نویز

مجتبی حسنلو<sup>۱</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، کارشناس ارشد مهندسی مکانیک، گرایش طراحی کاربردی، دانشکده مکانیک، دانشگاه گیلان  
\* ba@gmail.com

### چکیده

کنترل جریان سوخت رسانی و IGV توربین گازی با استفاده از طراحی کنترلر PID در شرایط آلوده به نویز موضوع مورد بحث و بررسی این مقاله می باشد. امروزه بدلیل افزایش نقش لاینفک توربین های گازی در تولید انرژی و بهره وری در صنایع مختلف، محققان را بر آن داشت که پارامترهای فیزیکی مختلفی از عملکرد سیستم توربین را به بحث بکشانند و بتوانند با پیچیده تر نمودن مدل های ریاضی سیستم، واقعیت موضوع را به تصویر کشانده و بالطبع راندمان کاری توربین های گازی را افزایش دهند. پارامترهای مهم جریان سوخت رسانی و ورق راهنمای ورودی یا همان IGV بعنوان پارامترهای حیاتی در میزان افزایش یا کاهش بهره وری سیستم توربین گازی میتواند در توان تولیدی سیستم تاثیرگذار باشد. در این پژوهش یک سیستم توربین گازی را در حوزه فرکانس به بررسی کنترل چندمتغیره پارامترهای بیان شده با استفاده از کنترلر PID ارائه کرده ایم. از آنجایی که سیستم ها در واقعیت با نویز همراه هستند برآن شدیم که شرایط عملکردی سیستم را در شرایط آلوده به نویز و اغتشاش شبیه سازی نموده ایم بطوریکه بتوانیم با طراحی ضرایب کنترلر PID بصورت سعی و خطا، سرعت، توان و دمای گاز خروجی را به مقادیر نامی خود برسانیم که این خود بیانگر ردیابی پارامترها از میزان مرجع خود می باشد.

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۹ مرداد ۱۳۹۸

پذیرش: ۴ آذر ۱۳۹۸

ارائه در سایت: ۲۵ آذر ۱۳۹۸

### کلیدواژگان

کنترل چند متغیره

توربین گازی

کنترلر PID

نویز و اغتشاش

## Multivariable Optimal Control of Fuel inlet and IGV Parameters of Gas Turbine via PID-PSO Controller in presence of Noise

M.Hasanlu<sup>1\*</sup>

1- Ms Graduated of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

\* ba@gmail.com

### Article Information

Original Research Paper

Received 10 August 2019

Accepted 25 November 2019

Available Online 16 December 2019

### Keywords

Multivariable Control

Gas Turbine

PID Controller

Noise and Disturbance

### ABSTRACT

Multivariable control of fuel inlet (FI) and inlet gas vane (IGV) parameters of gas turbine via PID controller in presence of noise, that is discussed in this paper. Nowadays, there is undoubtedly main rules (energy harvesting and high efficiency) of gas turbine in various industries. Researchers think and discover about different physical parameters of gas turbine. So, they can present model of complicate gas turbine in order to model should be near reality structure and also gas turbine model has more perfect features. Therefore, fuel FI and IGV are critical parameters for increasing and decreasing efficiency of system of gas turbine, where are effected on power system. In this research, we are modeling and simulating gas turbine in frequency and time domains respectively, for controlling FI and IGV parameters based on PID controller in existence of noise signals. PID coefficients are determined on trail and error approach, in order to system preserve or track its velocity, power and temperature of outlet gas in nominal and reference values.

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M.Hasanlu, Multivariable Optimal Control of Fuel inlet and IGV Parameters of Gas Turbine via PID-PSO Controller in presence of Noise, *Journal of Mechanical Engineering and Vibration*, Vol. 10, No. 3, pp. 31-38, 2019 (In Persian)

## ۱- مقدمه

توربین های گازی از مهمترین و پرکاربردترین محرک های اصلی در سیستم حمل و نقل، نظیر هواپیما و ماشین ها میباشند. علاوه بر این، توربین های گازی کاربرد وسیعی در زمینه سیستمهای قدرت و ژنراتورها دارند. یک شاخه قدیمی در مهندسی، تحقیق درباره ی رفتار حالت ماندگار توربین گازی، بر حسب مشخصه های استاتیک توربین گازی میباشد. جزئیات حالت ماندگار مدل یک توربین گازی در یک نقطه ی گازی مشخص در فهم رفتار دینامیکی یک توربین گازی کمک می کند. این نوع مدل ها، بر پایه مشخصات اجزای موتور می باشند و مشخصات اجزای موتور نیز، از طریق محاسبات مقدماتی با اندازه گیری ها قابل دستیابی است. این نوع مدل ها، به وسیله ی روش های مختلفی توصیف شده است. همانطور که میدانید، بیش از ۹۵ درصد کنترلر های موجود در سیستم صنعتی، از نوع PID میباشد، در نتیجه شایسته است پژوهش هایی در زمینه ی روش های طراحی و بهینه سازی این دسته از کنترلرها و همچنین میزان مقاوم بودن و در عین مقاوم سازی بیشتر آنها ضمن بهینه بودن عملکردشان انجام پذیرد. در صنایع فرآیندی، سه دسته روش برای طراحی کنترل کننده وجود دارد:

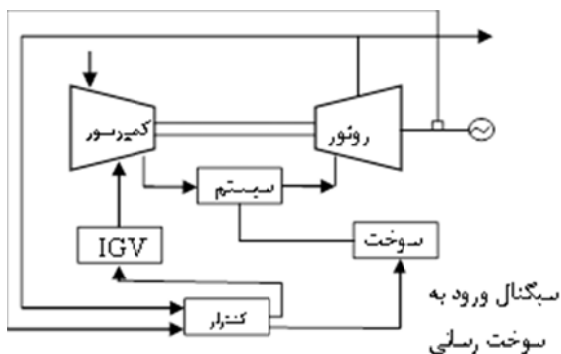
۱. تنظیم پاسخ زمانی: نقطه ی آغاز برای این دسته، کارهای انجام شده توسط Ziegler and Nichols (۱۹۴۲) میباشد که با استفاده از پاسخ پله زمانی و مشخصات آن، پارامترهای مربوط به کنترلر حاصل میشود.

۲. روش های بهینه سازی حوزه زمانی: مفهوم انتخاب ضرایب کنترلر به شرطی که تابع هزینه انتگرالی را مینیمم کند، گویند و در قالب هایی مثل LAE تعریف میشوند.

۳. عملکرد حوزه ی فرکانسی: انتخاب پارامترهای کنترل کننده به صورتی که حد فاز و حد بهره و مفاهیم مرتبط با آنها، شرایط خاصی را ارضا کنند.

روشهای کنترل کننده مدرن مطرح شده: امروزه یک سری قالب های کاری جدید مطرح شده که در مساله ی بهینه سازی اهداف متفاوتی نیز دنبال میشوند: ترکیب ورودی فرکانس، حذف اغتشاش بار و نویز اندازه گیری شده جزو این اهداف

میباشند که در مساله ی بهینه سازی LQG جای میگیرند. در واقع با فرض ساختار کنترلی مشخص (برای مثال PID)، تابع هزینه ی LQG همراه با وزن دهی انجام شده مینیمم میشود. مقالات متعددی برای شبیه سازی توربین های گازی به کار گرفته شده است که از آن جمله می توان به مقاله [1,2] برای اعمال بر توربین های گازی صنعتی و [3-4] برای اعمال بر موتور هواپیمای غیر نظامی اشاره کرد. روش های مدل سازی مختلفی برای توربین های گازی ارائه شده است که از آن جمله میتوان مدلهایی همچون مدل دینامیکی ژنراتور توربین گازی با استفاده از گراف مرتبه علی [5]، مدل سازی غیر خطی توربین گازی تک محور با کاربرد در تولید توان و خطی سازی در نقاط کار مختلف [6] و مدل سازی بر پایه تخمین مدل NARMAX و شبکه عصبی [7] و [8] اشاره نمود. همچنین، روشهای کنترلی مختلفی برای کنترل اجزای توربین های گازی بکار گرفته شده است که از آن جمله میتوان به روشهایی چون روش طراحی کنترلر نایکوئست معکوس [9]، روش طراحی الگوریتم PSO با هدف بهینه کردن پارامترهای کنترلر PID [10]، طراحی کنترلر خطی همچون کنترلر LQ [11] و کنترلر سروو LQ برای تعقیب یک سیگنال LQG/LTR [12] و طراحی سیستم کنترل مقاوم [13] و روش طراحی منترلر غیر خطی و تعمیم یافته و بلوکی بر پایه ی لیاپانف [14] و روش طراحی کنترلر چند متغیره با استفاده از الگوریتم ژنتیک چند هدفه MOGAS [15]، روش طراحی کنترلر PI فازی به همراه الگوریتم ژنتیک تطبیقی برای بهینه سازی بهره ها [16] و کنترلر تغذیه توربین گازی برای منطق فازی [17] و روش طراحی کنترلر مقاوم ساختار ساده شده با استفاده از دیسک های گرشگارتن سیستم [18] اشاره نمود. بیش از ۹۵ درصد کنترلرهای موجود در سیستم های صنعتی، از نوع PID میباشد، از این رو روشها و ایده های متنوعی همچون روشهای تنظیم پاسخ زمانی (مثل روش زیگلر نیکولز و ...) و روشهای تنظیم بر پایه عملکرد حوزه فرکانسی (مثل روش نایکوئست و ...) و روشهای طراحی مدرن کنترلی همچون روش LQG برای طراحی این نوع کنترلرها ارائه شده است. یکی از روشهای ارائه شده در این زمینه، روش طراحی



شکل ۳: بلوک دیاگرام مکانیکی توربین گازی

حال برای گویاتر شدن مدل ریاضی بلوک دیاگرام شکل ۳ به ارائه شکل ۴ که بلوک دیاگرام دینامیکی توربین گازی را توضیف می نماید، بپردازیم.

کنترلر ساختار محدود PID بر پایه مینیم سازی تابع هزینه تعریف شده، همچون تابع هزینه ی LQG می باشد [19-23]. در این روش، تابع هزینه تعریف شده، شامل دو بخش وزن دهی خطای کنترلی و عمل کنترلی میباشد که با تنظیم هر کدام از این ضرایب وزن دهی، ضرایب مطلوب کنترلر PID بدست می آید.

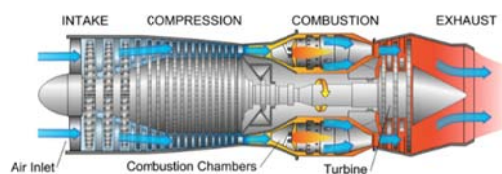
## ۲-مدلسازی

مراجع مختلف مدل های مختلفی از توربین های گازی مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش مدل روئن<sup>۱</sup> ارائه شده است.



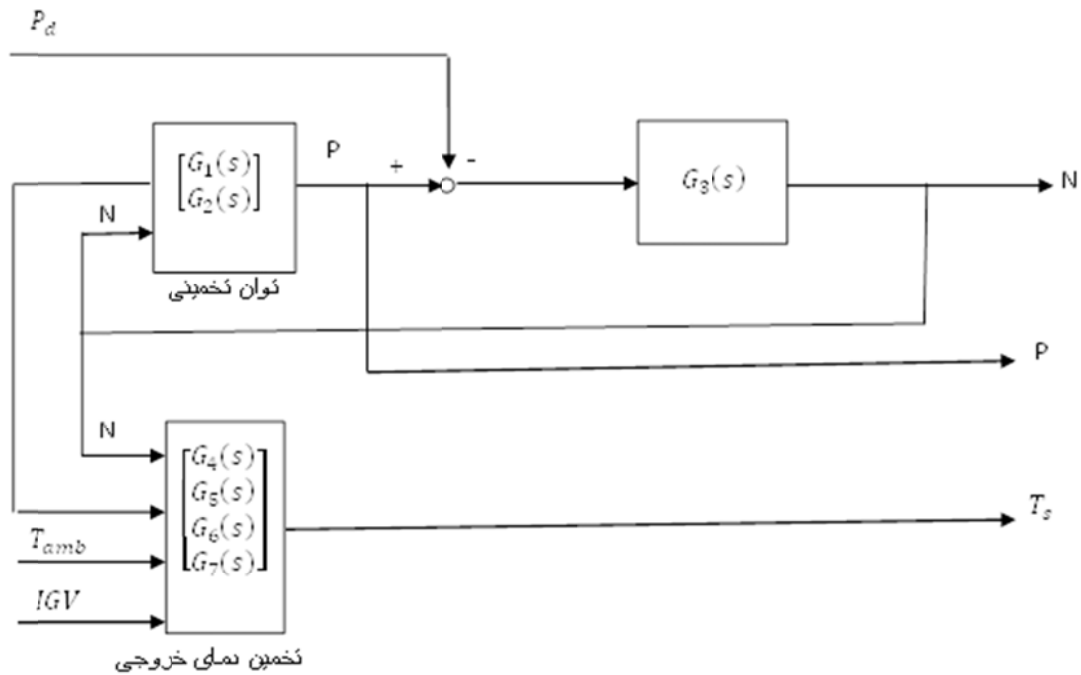
شکل ۱: مدل واقعی توربین تک محوره

مدل توربین گازی شامل محفظه احتراق و کمپرسور جریان محوری چند مرحله ای که به ژنراتور الکتریکی اتصال یافته است. گرم نگه داشتن بویلر از خروجی استفاده شده است. بنابراین گرم نگه داشتن توسط پره راهنما که در مسیر ورودی هوای کمپرسور قرار گرفته است، کنترل میشود. حال براساس توضیحات گفته شده بلوک دیاگرام مدل کنترلی بصورت شکل زیر قابل بازگو می باشد.



شکل ۲: قسمت های مختلف توربین گازی

<sup>1</sup> Rowen



شکل ۴: بلوک دیاگرام حلقه باز سیستم توربین گازی

بصورت زیر قابل بازگو می باشد. همچنین در تابع تبدیل  $G_3$  پارامتر ثابت  $\tau_r$  به اندازه ۱۸٫۵ ثانیه فرض شده است [۳].  $F$  و IGV بعنوان ورودی های کنترلی محسوب شده که توسط کنترلر این پارامترها تولید میشود. همانطور که از شکل ۳ پیداست مدل مورد بررسی در این تحقیق یک مدل کنترلی چند متغیره ۴ ورودی - ۳ خروجی می باشد.

$$G_1 = \frac{P}{F(s)} = \frac{0.3827s^2 + 0.8935s + 0.2562}{s^2 + 1.3331s + 0.2015} \quad (۱)$$

$$G_2 = \frac{P}{N(s)} = \frac{-0.212s^2 - 0.4496s - 0.05068}{s^2 + 1.3331s + 0.2015} \quad (۲)$$

$$G_3(s) = \frac{1}{\tau_r s} \quad (۳)$$

$$G_4 = \frac{T_x(s)}{N(s)} = \frac{21.98s^2 + 207.6s + 327.2}{s^2 + 3.266s + 0.9384} \quad (۴)$$

$$G_5 = \frac{T_x(s)}{N(s)} = \frac{0.7975s^2 + 0.8849s - 1.42}{s^2 + 3.266s + 0.9384} \quad (۵)$$

$$G_6 = \frac{T_x(s)}{F(s)} = \frac{79.19s^2 + 344.5s + 372.3}{s^2 + 3.266s + 0.9384} \quad (۶)$$

پارامترهای نشان داده شده در شکل ۲ را در جدول ۲ میتوان بصورت تفکیک شده ارائه داد.

جدول ۱: مشخصات پارامتریک توربین گازی

پارامتر	علائم
دمای محیط	$T_{amb}$
ورق راهنمای ورودی	IGV
جریان سوخت	F
دمای خروجی گاز	$T_x$
سرعت توربین	N
توان تولیدی	P

توابع تبدیل بیان شده بعنوان توابع تبدیل هستند که از داده های واقعی مدل توربین گاز استخراج شده است [۴]. بنابراین

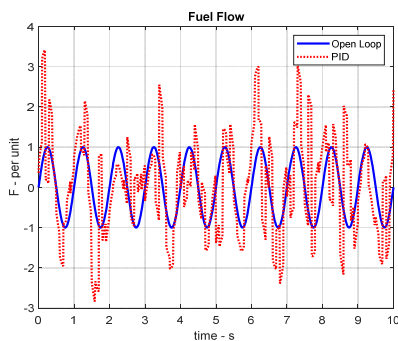
بنابراین تابع تبدیل یک کنترلر PID بصورت زیر در می آید.

$$G_c = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (11)$$

در بسیاری از کنترلرها بعلت حساسیت عبارت مشتق نسبت به نویز و دشواری اجرا، از آن صرفنظر و کنترل را بصورت PI پیاده سازی می کنند. سیگنال  $u(t)$  خروجی PID براساس تستی از خطای کنونی سیستم (عملکرد حاضر) به اضافه مجموع خطاهای سیستم (رفتار گذشته) به اضافه مشتق خطای کنونی ( تخمین خطی رفتار آینده) محاسبه میشود و برای اصلاح خطا به سیستم اعمال میگردد. ضرایب  $K$ ،  $T_i$  و  $T_d$  نیز میتوانند با روش های شناخته شده ای مانند تابع انتقال بصورت بهینه محاسبه شوند. اگرچه در کاربردهای عملی، بطور رضایت بخش میتوانند با آزمون و خطا و مشاهده رفتار سیستم بطور تقریبی تخمین زد.

#### ۴- شبیه سازی

در این بخش براساس معادلات ارائه شده بصورت تابع تبدیل و ادغام آن با کنترلر بهینه PID-PSO می توان به نتایج بهینه زیر دست یافت.



شکل ۵: ردیابی سوخت رسانی به توربین با و بدون کنترلر

$$G_7 = \frac{T_x(s)}{IGV(x)} = \frac{-119s^2 + 312.3s - 148.6}{s^2 + 3.266s + 0.9384} \quad (7)$$

بنابراین میتوان رابطه بین ورودی و خروجی سیستم را بصورت رابطه زیر بیان کرد.

$$\begin{bmatrix} N \\ P \\ T_x \end{bmatrix} = T \cdot \begin{bmatrix} P_d \\ T_{amb} \\ F \\ IGV \end{bmatrix} \quad (8)$$

ماتریس T یک ماتریس انتقال بوده که بصورت ماتریس تابع تبدیل زیر قابل ارائه می باشد [۵].

$$T = \begin{bmatrix} \frac{-G_3}{1-G_2G_3} & 0 & \frac{G_1G_3}{1-G_2G_3} & 0 \\ \frac{-G_2G_3}{1-G_2G_3} & 0 & \frac{G_1}{1-G_2G_3} & 0 \\ \frac{-G_3G_4}{1-G_2G_3} & G_5 & \frac{G_1G_3G_4}{1-G_2G_3} + G_6 & G_7 \end{bmatrix} \quad (9)$$

#### ۳- کنترلر PID

کنترلر PID از رایج ترین نمونه های الگوریتم کنترل بازخوردی است که در بسیاری از فرآیندهای کنترلی نظیر کنترل سرعت موتور DC، کنترل فشار، کنترل دما و ... کاربرد دارد. کنترلر PID مقدار خطا بین خروجی فرآیند و مقدار مطلوب<sup>۱</sup> محاسبه می کند. هدف کنترلر، به حداقل رساندن خطا<sup>۲</sup> با تنظیم ورودی های کنترل فرآیند است. PID از سه قسمت مجزا تناسبی<sup>۳</sup>، انتگرال گیر<sup>۴</sup>، مشتق گیر<sup>۵</sup>، تشکیل شده که هرکدام از آنها سیگنال خطا را بعنوان ورودی گرفته و عملیاتی را روی آن انجام میدهند و در نهایت خروجی آنها باهم جمع میگردد. خروجی این مجموعه که همان خروجی کنترلر PID است برای اصلاح خطا به سیستم فرستاده میشود. فرموا استاندارد PID به فرم زیر است.

$$output(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de}{dt} \right) \quad (10)$$

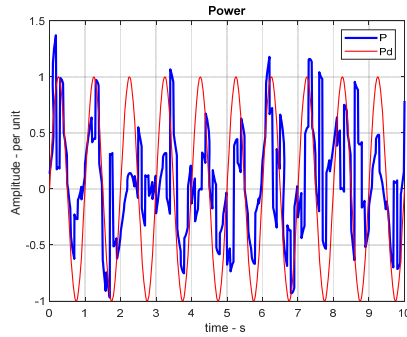
<sup>1</sup> Set Point

<sup>2</sup> Error

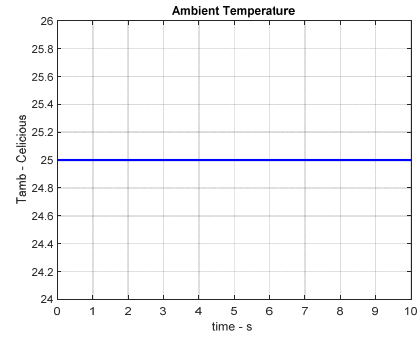
<sup>3</sup> Proportional

<sup>4</sup> Integral

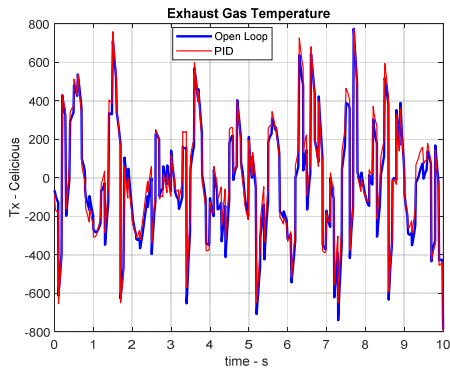
<sup>5</sup> Derivative



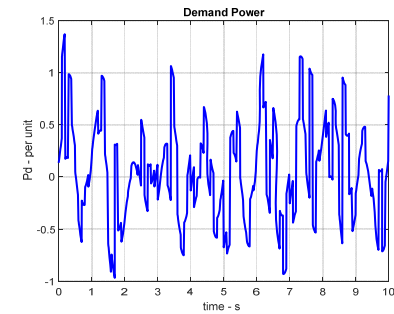
شکل ۵: مقایسه توان مورد نظر با توان اسمی توربین



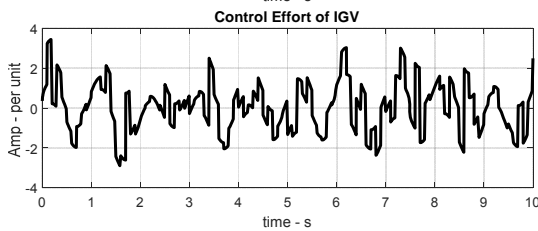
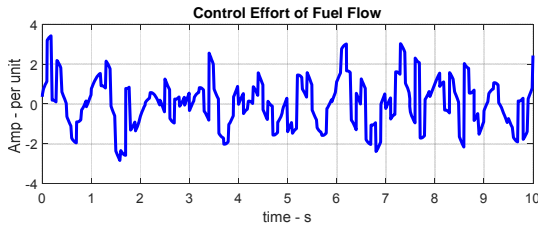
شکل ۶: دمای محیط در مدت زمان شبیه سازی



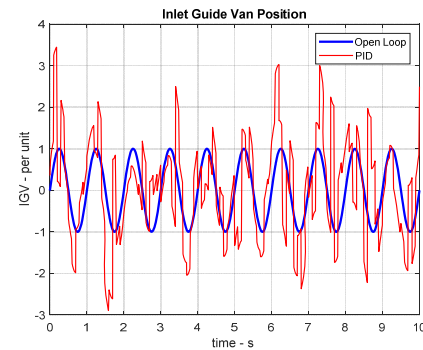
شکل ۷: دمای گاز خروجی توربین



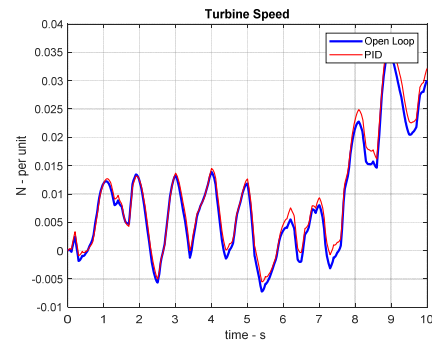
شکل ۸: توان موردنظر توربین در بازه شبیه سازی



شکل ۹: تلاش کنترلی کنترلر PID



شکل ۱۱: ردیابی IGV توربین در مدل دوم با و بدون کنترلر



شکل ۱۲: سرعت توربین با و بدون کنترلر

ویژگی بهینه بودن و مقاوم بودن را بصورت همزمان دارا بوده و

نسبت بین این دو با یک ضریب مقاوم بودن، قابل تنظیم است.

## ۶- مراجع

[1] <https://www.siemens.com/global/en/home/products/energy/power-generation/gas-turbines/sgt-100.html>

[2] [https://energyeducation.ca/encyclopedia/Gas\\_turbine](https://energyeducation.ca/encyclopedia/Gas_turbine)

[3] Rowen WI, Simplified Mathematical Representation of Havy-Duty Gas Turbines, J Eng Gas Turbines Power 1983, 105:865-9.

[4] Gorbani H, Gaffari A, Rahnama M, Constrained Model Predictive Control Implementation for A Heavy-Duty Gas Turbine Power Plant, WSEAS Trans Syst Cont, 2008, 3:507-16.

[5] Robust Control of Speed and Tempertuare in A Power Plant Gas Turbine, E.Najimi, M.H.Ramezani, ISA Transaction, 51(2012)304-308.

[1] Camporeal, S. M., Fortunate, b., & Mastrovito, M. (2006). A modular code for real time dynamic simulation of gas turbines in simulink. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 123(3), 506-517.

[2] Visser, W. P., kogenhop, o., & Oostveen, M. (2006). A generic approach for gas turbine adaptive modeling. Jpurnal of Engineering for gas turbines and power, 128(1), 13-19

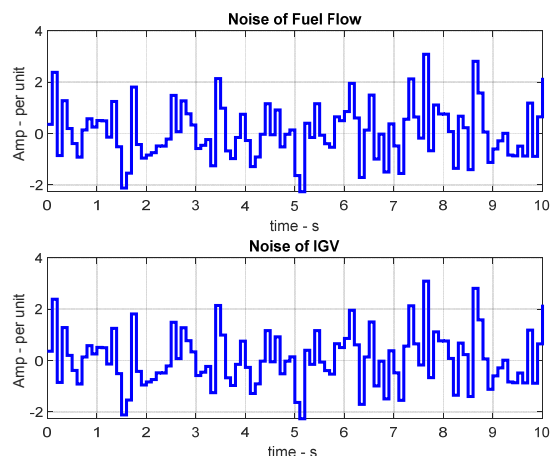
[3] Borguet, S., Kelner, V., & Leonard, O. (2007). Cycle optimization of a turbine engine: an approach based on genetic algorithms. Power, 13, 12

[4] Martin, S., Vallance, I., & Bates, D. G. (2008). Development and validation of a civil aircraft engine simulation model for advanced controller design. Journal of Engineering foe Gas Turbines and Power, 130(5), 051601

[5] Li, P., Degobert, P., Francois, B., & robyns, B. (2006, October). Modeling and control of a gas micro turbine generator by using a causal ordering graph. In Computational Engineering in System Applications, IMACS Multiconference on( Vol. 1, pp.271-277). IEEE.

[6] Abdollahi, Z., Hantehzadeh, M., Sadegh. A. K., & Khaledi. H. (2010, November). Multilinear Modeling and Identification of the N94.2 Gas Turbine for Control System Design purposes. In Computer Modelind and Simulation (EMS). 2010 Fourth UKSim European Sumposium on (pp.295-300). IEEE.

[7] Mu, J., Rees, D., & Liu < G. P. (2005). Advanced controller design for aircraft gas turbine engines. Control Engineering Practices, 13(8), 1001-1015



شکل ۱۳: پارامترهای ورودی کنترلی آلوده به نویز

## جدول ۲: ضرایب کنترلر در مدل دوم

کنترلر برای جریان سوخت	
Kp	۱
Ki	۰/۰۳
Kd	۰/۰۴
کنترلر برای IGV	
Kp	۱
Ki	۰/۰۲
Kd	۰/۰۵

## ۵- نتیجه گیری

بیش از ۹۵ درصد کنترل کننده های موجود در سیستم های صنعتی، از نوع PID می باشد. در این مقاله، روشی مدرن برای طراحی کنترل کننده ساختار محدود PID توسعه داده شد که در آن، ضرایب کنترل کننده PID، به گونه ای محاسبه می شوند که تابع هزینه ای از جنس ای با ویژگی همزمان بهینه بودن و مقاوم بودن را مینیمم سازند. این تابع هزینه، دارای توابع وزن دهی روی عمل کنترلی و خطای کنترلی و مقاوم بودن می باشد که با تغییر این پارامترها، کنترلی با رفتار مطلوب نتیجه می شود. از ویژگی های بارز این روش، توانایی طراحی کنترل کننده هایی که