



مدل سازی فشار محفظه و طراحی کنترل کننده برای کنترل پروفایل فشار در توکامک دماوند

حسین رسولی^{۱*}، مهدی علیاری شوره‌دلی^۲، مهدی امینی^۲

۱. پژوهشکده پلاسما و گدازت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، صندوق پستی: ۱۴۳۹۹-۵۱۱۱۳، تهران- ایران

۲. گروه کنترل، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، صندوق پستی: ۱۶۳۱۵-۱۳۵۵، تهران- ایران

*Email: hossein.rasouli1@gmail.com

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۳/۱۲ تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۵/۳

چکیده

یکی از سامانه‌های لازم جهت ارتقاء توکامک دماوند، کنترل اتوماتیک پروفایل فشار محفظه است. در این مقاله شناسایی و مدل سازی فشار محفظه خلأ توکامک دماوند و همچنین طراحی کنترل کننده مبتنی بر مدل انجام می‌گیرد. در این راستا ابتدا اقدام به طراحی و اجرای ساختار آزمایشی جهت اعمال سیگنال شناسایی و داده برداری از سیستم فشار محفظه خلأ توکامک دماوند صورت می‌پذیرد. بدین صورت که پس از ایجاد خلأ پایه، با تغییر و اعمال ولتاژ ورودی به عملگر پیزوالکتریک به طور هم زمان فشار محفظه خلأ و ولتاژ اعمالی اندازه گیری می‌شود. پس از انجام فرایند داده گیری، در فرایند شناسایی، چندین مدل خطی حاصل گردید. هدف اصلی از شناسایی در این مقاله، طراحی کنترل کننده مناسب بود. که پس از تهیه مدل، کنترل کننده‌های PID مبتنی بر روش ZN و کنترل کننده پیش بین مبتنی بر مدل طراحی و شبیه سازی گردید که نتایج مطلوبی داشتند. در این پژوهش، برای داشتن خروجی بدون فراجهش و زمان خیز قابل تنظیم از طرف کاربر، پروفایل فشار مطلوب تهیه و فشار محفظه بر اساس کنترل کننده پیش بین مورد ارزیابی قرار گرفت. برای حفظ ایمنی پیزو الکتریک، کنترل کننده‌های خانواده PID و پیش بین با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملی در سیگنال کنترلی ($25 < V_p < 65$) شبیه سازی شد در آخر نیز نتایج عملکرد آن‌ها بر اساس حذف تأخیر ذاتی سیستم، دنبال رندگی مدل مرجع، دامنه سیگنال کنترلی و حذف اغتشاش مقایسه و بررسی گردید که نتایج مطلوبی در ردیابی پروفایل فشار مطلوب، حذف تأخیر ذاتی سیستم و قابلیت پیاده سازی به دلیل محدود بودن دامنه سیگنال کنترلی دارند.

کلیدواژه‌ها: توکامک، پلاسما، محفظه خلأ، پمپ روتاری، پمپ توربومولکولار، عملگر پیزو، شناسایی سیستم، کنترل کننده پیش بین

Modeling of vacuum vessel pressure and model-based controller design for pressure profile control in Damavand Tokamak

H. Rasouli^{*1}, M. Aliyari Shuredeli², M. Amini²

1. Plasma and Nuclear Fusion Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O. Box: 14399-51113, Tehran - Iran

2. Control Department, Faculty of Electrical Engineering, Khwaja Nasiruddin Tusi University, P.O. Box: 16315-1355, Tehran - Iran

Research Article

Received 2.6.2022, Accepted 25.7.2022

Abstract

One of the essential systems for the upgrade of Damavand Tokamak is the automatic control of the vacuum vessel pressure profile. This research performs the identification, modeling, and control of the vacuum chamber pressure in Damavand Tokamak. As a first step, the experimental structure is designed and implemented for the application of an identification signal and for the collection of data from the vacuum vessel pressure. Following the creation of the base vacuum, the input voltage to the piezoelectric is changed and applied. At the same time, both the vacuum vessel pressure and applied voltage are measured. Using experimental data, several linear models are identified for control. Then, considering the practical limitations of the control signal ($25 < V_p < 65$), Ziegler-Nichols-based PID and predictive controllers are designed and simulated. Also, their performance results were compared and evaluated based on compensating for the system's inherent delay, disturbance rejection, and reference model following. The simulation results show the performance of controllers.

Keywords: Tokamak, Plasma, Vacuum vessel, Rotary pump, Turbo molecular pump, Piezoelectric, Model identification, Predictive controller



۱. مقدمه

دستگاه توکامک، یکی از محتمل‌ترین راه حل برای رسیدن به انرژی پاک در همجوشی هسته‌ای است. در آن پلاسمای بسیار گرم با به‌کارگیری میدان مغناطیسی محصور و کنترل می‌شود [۱]. توکامک دماوند یک دستگاه پژوهشی برای محصورسازی مغناطیسی با محفظه خلأ به حجم 0.9 m^3 متر مکعب و خلأ بسیار پایین کار می‌کند. خلأ آن از طریق ۲ عدد پمپ توربومولکولار^۱ با سرعت تخلیه 250 l/s و ۲ عدد پمپ پشتیبان روتاری^۲ با سرعت تخلیه 15 l/s به فشار پایه 10^{-7} torr می‌رسد. در این ماشین تخلیه الکتریکی (شات) برای تولید و نگه‌داشت پلاسمای داغ در محدوده فشار $10^{-5} < P < 10^{-4} \text{ torr}$ است. در حال حاضر، توکامک دماوند فاقد کنترل اتوماتیک فشار محفظه بوده و از طریق رویت فردی و تنظیم دستی، فرایند کنترل فشار به‌صورت حلقه باز انجام می‌گردد. در حالی که با پیشرفت تکنولوژی و علم کنترل، فشار محفظه خلأ در بسیاری از توکامک‌های دنیا به صورت سیستمی کنترل و بر اساس مدل فشار مطلوب ردیابی می‌شود.

در توکامک ADITYA یک مدار الکترونیکی بر پایه میکروکنترلر PIC برای ثابت نگه داشتن فشار گاز در محفظه طراحی شده است که کنترل فشار با تزریق مداوم مقدار صحیح گاز انجام می‌شود تا تغییرات در مقدار گاز وارد شده به سیستم در طول فرایند را جبران کند [۲]. در سیستم‌های مختلف تنظیم و کنترل فشار از کنترل‌کننده‌های PID^۳ یا کنترل‌کننده‌های شبکه عصبی^۴ و دیگر کنترل‌کننده‌ها استفاده شده است [۳، ۴].

توکامک X-7 که دارای چندین دریچه ورودی است، برای عملکرد درست و سریع، هر یک از آن‌ها نیازمند کنترل اتوماتیک می‌باشند. در ساختار سیستم کنترلی استفاده شده در آن از PLC(SV) برای پردازش استفاده گردیده است [۵]. در توکامک ISTTOK سیستم کنترل فشار یکی از زیرسیستم‌های اتاق کنترل یکپارچه که بر مبنای استاندارد ATCA^۵ است، می‌باشد. پردازش اطلاعات در آن براساس MARTE^۶ و ارتباطات آن از طریق PCIe^۷ انجام می‌گیرد [۶]. در توکامک EAST کنترل فشار محفظه بر پایه PLC سری S4 و شبکه‌ای از پمپ‌های توربومولکولار پیاده‌سازی شده است [۷].

در بسیاری از کاربردهای صنعتی تکنولوژی خلأ، تثبیت و یا کنترل پروفایل فشار گاز امری قابل توجه است. ضروری است برای ارتقاء توکامک دماوند نیز سیستم کنترل فشار محفظه مناسبی طراحی و پیاده‌سازی گردد که قابلیت ردیابی فشار مطلوب و عملکرد مناسبی داشته باشد. یکی از نیازمندی‌های آن تهیه مدل فشار سیستم است و سپس طراحی کنترل‌کننده بر مبنای مدل و در نهایت پیاده‌سازی آن می‌باشد. در این مقاله، مدل‌سازی فشار محفظه این توکامک، برای مد تخلیه الکتریکی اصلی (شات) یعنی محدوده فشار $10^{-7} < P < 10^{-4} \text{ torr}$ بر پایه داده‌های تجربی صورت می‌گیرد و در مرحله بعد کنترل‌کننده‌های مختلفی طراحی، شبیه‌سازی و ارزیابی می‌گردند.

با توجه به مطالب بیان شده، ابتدا در بخش ۲، اجزای ساختار فعلی سیستم کنترل فشار محفظه معرفی می‌شود، طراحی ساختار آزمایش برای تهیه داده‌های عملی و شناسایی مدل در بخش ۳ و سپس مدل‌سازی فشار محفظه در بخش ۴ صورت می‌گیرد. در بخش ۵، کنترل‌کننده‌های مختلفی بر پایه مدل، طراحی، شبیه‌سازی و ارزیابی می‌شوند. در نهایت نتیجه‌گیری ارائه می‌گردد.

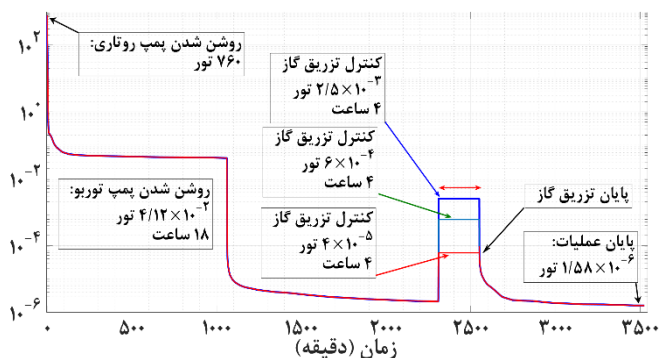
۲. معرفی اجزای ساختار فعلی سیستم کنترل فشار محفظه

در حالت کلی بلوک دیاگرام کنترل فشار مطابق شکل ۱ است. در ابتدا محفظه از طریق پمپ‌های مولد خلأ توربومولکولار و روتاری، به فشار بسیار پایین می‌رسد. سپس فشار کاری محفظه، با کنترل میزان تزریق گاز خالص هیدروژن از دریچه ورودی گاز تنظیم می‌گردد. بدین ترتیب که فشار محفظه خلأ با استفاده از سنسور خلأسنج ACC-1009 در طول فرایند اندازه‌گیری می‌شود و در ادامه اختلاف فشار لحظه‌ای محفظه با فشار مطلوب به عنوان سیگنال خطا وارد کنترل‌کننده شده و با توجه به میزان فشار مطلوب، سیگنال کنترلی تولید می‌شود. بعد از اعمال سیگنال کنترلی به شیر پیزوالکتریک^۸ MV-112، میزان ورود گاز به محفظه کنترل می‌گردد، همین روند تا رسیدن فشار محفظه به میزان مطلوب ادامه دارد. اما در حال حاضر در توکامک دماوند، در طول فرایند، فشار گاز از طریق سنسور فشارسنج (Alcatel) ACC-1009 اندازه‌گیری و مقدار آن در نمایشگر ACM1000 نمایش داده می‌شود. اپراتور با مشاهده مقدار لحظه‌ای فشار و با توجه به مقدار فشار نهایی مطلوب، با تنظیم دستی میزان ولتاژ اعمالی به پیزوالکتریک، عمل کنترل را به‌صورت حلقه باز انجام می‌دهد که مشکلات زیادی به‌خاطر وابستگی به اپراتور از قبیل عدم تنظیم دقیق، عدم امکان اعمال

1. Turbomolecular Pump
2. Rotary Pump
3. Proportional Integral Derivative
4. Neural Network Controller
5. Advanced Telecommunications Computing Architecture
6. Multithreaded Application Real-Time Execution
7. Peripheral Component Interconnect Express

8. Piezoelectric Valve





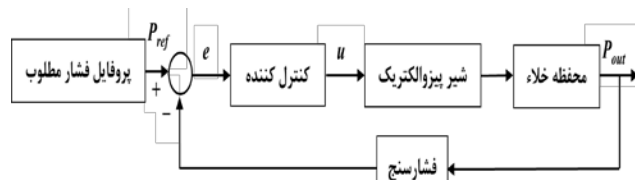
۴. شناسایی مدل فشار محفظه خلأ

شناسایی را از یک منظر می‌توان به دو روش عمده تقسیم‌بندی نمود: شناسایی بهنگام^۱. شناسایی نابهنگام^۲. در یک دسته‌بندی دیگر، با دو دیدگاه درباره فرایند شناسایی روبه‌رو هستیم: شناسایی غیرمستقیم و شناسایی مستقیم [۹].

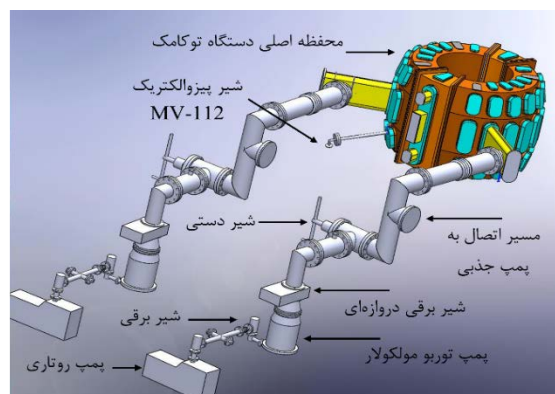
شناسایی در این پژوهش، از شناسایی نوع ناهنگام و روش مستقیم است. که البته کنترل آن توسط اپراتور به صورت دستی و حلقه باز اتفاق می‌افتد. شکل ۴ سلسله مراتبی روند شناسایی سیستم از ابتدا تا انتها را نشان می‌دهد.

۳. طراحی ساختار آزمایش جهت تهیه داده‌های تجربی

قابل ذکر این که در مد تخلیه اصلی (شات) محدوده فشار محفظه در حدود 10^{-5} torr است. لذا پس از ایجاد خلأ بسیار پایین (10^{-7} torr)، با تزریق گاز هیدروژن از طریق کنترل ولتاژ پیزوالکتریک، فشار محفظه به محدوده 10^{-5} torr برای مد شات اصلی رسانده می شود.



شکل ۱. بلوک دیاگرام سیستم حلقه بسته و کنترل فشار، محافظه.

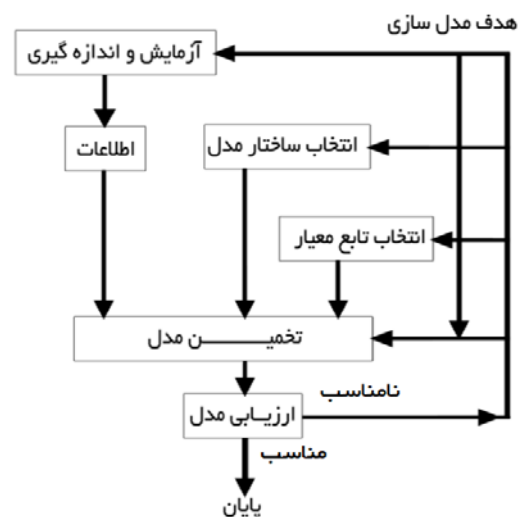


شکل ۲. محفظه خلأ توکامک دماوند به همراه سیستم مولد خلأ.



مناسبی گردد قابل قبول است. در این جا تغییرات ولتاژ به صورت پله‌های کوتاه افزایشی است تا بتوان به کمک آن شناسایی مناسبی از سیستم به دست آورد. لبه‌های بالا رونده کمک شایانی به شناسایی تأخیر و بهره سیستم می‌نمایند.

در بین مدل‌های خطی می‌توان از مدل‌سازی‌های مبتنی بر فضای حالت یا ورودی-خروجی استفاده نمود که روش دوم انتخاب شد چون تعداد ورودی‌ها و خروجی زیاد نیستند. در مدل‌های تابع انتقالی یا همان ورودی-خروجی می‌توان از مدل سه پارامتری، روش‌های چند جمله‌ای همانند ARX^1 ، $ARMAX^2$ و OE^3 استفاده کرد که رابطه هر کدام از این روش‌ها در ادامه آورده شده است [۹].



شکل ۴. نمودار سلسله مراتبی شناسایی یک سیستم.

در ادامه، مراحل اصلی شناسایی سیستم به طور مختصر در بندهای الف تا ه بیان می‌گردد:

الف) آزمایش، اندازه‌گیری و انتخاب ورودی/خروجی‌ها

چگونگی انجام آزمایش و شرایط آن در بخش قبلی و مورد بررسی قرار گرفته است. اما ورودی در این فرایند شناسایی ولتاژ و خروجی فشار محفظه است، لذا شناسایی شامل عملگر و محفظه است و سیستم یک ورودی-یک خروجی است.

برای نمونه‌برداری و ذخیره داده از ولتاژ اعمالی به پیزوالکتریک خروجی آنالوگ راه‌انداز پیزوالکتریک با مدار واسط تقسیم‌کننده ۱:۱۰ به مازول سیستم داده‌گیری وصل می‌گردد. در نتیجه ولتاژ اعمالی به پیزوالکتریک به‌طور پیوسته ذخیره و نمایش داده می‌شود. هم‌چنین فشار قسمت‌های مختلف سیستم خلأ (۶ کانال) به‌طور پیوسته با خوانش $ACM1000$ اندازه‌گیری و نمایش داده می‌شود. سپس داده‌های آن توسط ارتباط سریال RS۲۳۲ به سیستم داده‌گیری منتقل می‌گردد. فرکانس نمونه‌برداری برای عملگر حدود 10 kHz است و زمان نمونه‌برداری برای فشارسنج‌ها 0.4096 ثانیه است. لذا ضروری است داده‌های عملگر پیزوالکتریک و فشارسنج هم‌زمان شوند که این موضوع در قسمت شناسایی لحاظ شده است.

ب) انتخاب ساختار

در این راستا می‌توان روش‌های گوناگونی را به کار برد. باید توجه داشت هدف از این موضع کنترل است. در این مقاله، شناسایی با هدف کنترل اتفاق می‌افتد و نه کنترل با هدف شناسایی. بدین معنی که سیستم شناسایی می‌شود تا کنترل‌کننده مناسبی برای آن طراحی شود. بنابراین اگر خطایی هم در شناسایی وجود داشته باشد اما منجر به طراحی کنترل‌کننده ساده و

که در آن، v ، u و y به ترتیب سیگنال نویز سفید، سیگنال ورودی و خروجی هستند، A تا F چند جمله‌ای‌های دلخواه در حوزه گسسته هستند.

ج) انتخاب تابع معیار

معمولاً برای این موضوع مجموع مربعات خطا که متناسب با میزان برازش است انتخاب می‌شود.

د) تخمین پارامترهای مدل

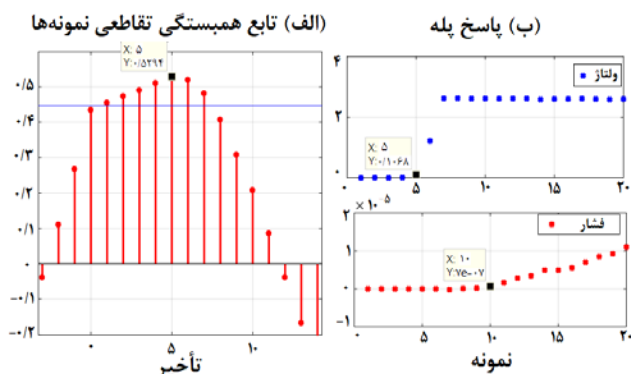
برای این قسمت روش‌های گوناگونی وجود دارد که دقیق‌ترین آن روش گرادیان نزولی است که در این جا بر همین مبنا شناسایی صورت می‌گیرد. تخمین تمام پارامترها معادل با شناسایی کامل مدل است. از جعبه ابزار شناسایی سیستم‌ها در نرم‌افزار MATLAB بهره می‌گیریم.

ه) ارزیابی مدل

برای این منظور داده‌ها به دو قسمت داده‌های شناسایی و تست تقسیم می‌شود. که مدل تخمین زده شده با داده‌های تست ارزیابی می‌گردد.

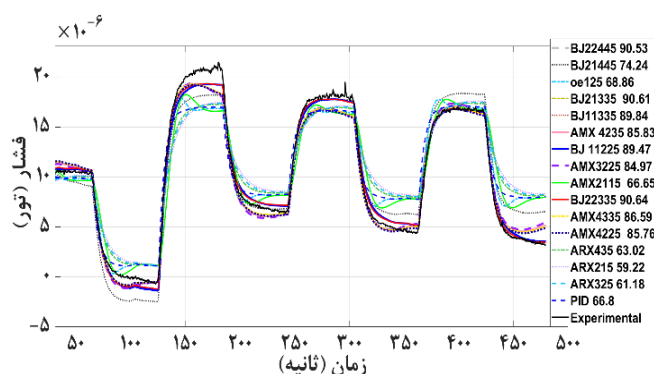
1. Auto Regressive with Exogenous Input
2. Auto Regressive Moving Average with Exogenous Input
3. Output Error
4. Box Jenkins





شکل ۶. شناسایی تأخیر ورودی و خروجی فرایند، الف) روش

cross correlation داده‌های ورودی و خروجی، ب) روش آزمون پله.



شکل ۷. مقایسه خروجی تجربی و خروجی مدل‌ها برای داده‌های آموزش.

با توجه به پایدار بودن فرایند (ورودی محدود و خروجی محدود)، مدل شناسایی از سیستم باید پایدار باشد. بنابراین با حذف مدل‌های ناپایدار و حذف مدل‌هایی که صفر سریع‌تری دارند، مدل‌های پایدار قابل قبول در جدول ۱ آمده است. همچنین خروجی تست واقعی و خروجی مدل‌ها برای داده‌های تست، جهت مقایسه در شکل ۸ آورده شده است. مشخص است که نتایج مدل‌سازی با هر کدام از مدل‌ها مناسب بوده و هر کدام از آن‌ها با توجه به میزان خطای مدل و پیچیدگی مدل می‌تواند برای طراحی کنترل‌کننده استفاده شود. از بین آن‌ها مدل bj11225 با رابطه زیر، به لحاظ خطای پایین و سادگی مدل می‌تواند مدل مناسبی برای فشار محفظه توکامک در نظر گرفته شود.

$$y(t) = \frac{1.65 \times 10^{-7} z^{-5}}{1 - 1.6212 z^{-1} + 0.6383 z^{-2}} u(t) + \frac{1 - 0.5437 z^{-1}}{1 - 1.2448 z^{-1} + 0.2476 z^{-2}} e(t) \quad (5)$$

۴.۱ داده‌های تجربی برای شناسایی و تست

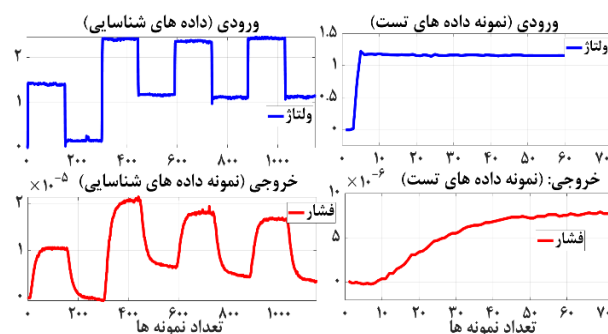
در این پژوهش مدل‌سازی فشار محفظه قبل از شات یعنی محدوده فشار $1 \times 10^{-5} < P < 4 \times 10^{-3}$ torr مد نظر است بنابراین آزمایش‌های عملی و داده‌های شناسایی در این نقطه کار انجام گردید. در عمل داده‌های خام اخذ شده از فرایند به دلایل مختلف نمی‌توانند به صورت مستقیم برای شناسایی به کار روند و لازم است بر روی آن‌ها پیش‌پردازش انجام گیرد. این پیش‌پردازش‌ها عبارتند از: تصحیح فرکانس نمونه‌برداری، کاهش سطح قله‌ها، برش داده‌ها، فیلتر کردن فرکانس‌های بالا و پایین، یکنواخت کردن مقیاس‌ها، تخمین تأخیر. بر این اساس داده‌های شناسایی و تست بعد از پیش‌پردازش‌های فوق، در شکل ۵ آورده شده است.

۴.۲ تخمین تأخیر

یکی از مهم‌ترین پارامترها در شناسایی یک سیستم، تخمین تأخیر است. اگر تأخیر سیستم به درستی تخمین زده شود مدل در پیاده‌سازی و ارزیابی نهایی دچار مشکل نخواهد شد. برای به‌دست‌آوردن تأخیر یک سیستم روش‌های متفاوتی چون آزمون پله، تحلیل همبستگی عرضی (تقاطع) وجود دارد. در این مقاله جهت بررسی دقیق آن از روش ۲ روش فوق استفاده شده است. در شکل ۶ نتایج تخمین تأخیر بر اساس روش همبستگی عرضی (تقاطع) داده‌های ورودی و خروجی و همچنین آزمون پله نشان داده شده است. با هر دو روش، تأخیر ۵ گام نمونه‌برداری یا به عبارت دیگر تأخیر ۲/۰۴۸ ثانیه بین ورودی و خروجی ناشی از فرایند و اندازه‌گیری سنسورها وجود دارد.

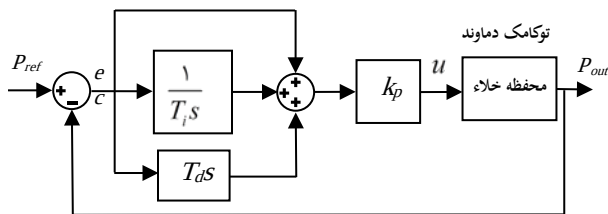
۴.۳ شناسایی مدل

در ادامه با انتخاب ساختارهای مدل سه پارامتری ARMAX، ARX، و BJ با عمق چند جمله‌ای‌های متفاوت و تنظیم تأخیر ۵ گام، شناسایی مدل انجام گردید. نتایج شناسایی جهت مقایسه خروجی واقعی با خروجی هر کدام از مدل‌ها و میزان تطابق هر کدام از آن‌ها در شکل ۷ آورده شده است.



شکل ۵. نمونه‌ای از داده‌های شناسایی و تست بعد از پیش‌پردازش.





شکل ۹. سیستم کنترل PID با ساختار غیرتداخلی استاندارد.

تابع تبدیل کنترل‌کننده PID مطابق رابطه (۶) است. هدف تعیین پارامترهای k_p ، T_i و T_d است. روش‌های مختلفی برای تنظیم پارامترهای فوق وجود دارد. در این پژوهش، از روش تنظیم براساس پاسخ فرایند (PR^1)، روش‌های فرتیک خودتنظیم (FR^2) و روش زیگلر-نیکولز (ZN^3) با ساختار ورودی مرجع وزن‌دار ($WPID^4$) جهت تنظیم پارامترها استفاده شده است [۱۰].

$$C(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \quad (۶)$$

در روش پاسخ فرایند، ضرایب k_p ، T_i و T_d براساس میزان تأثیر آن‌ها در پاسخ فرایند تنظیم می‌شوند. اساس آن بدین صورت است که هر ضریب را تا جایی تغییر می‌دهیم که سیستم به نوسان دائم بیفتد. سپس ضریب را به اندازه مناسبی از مقدار بحرانی دور می‌کنیم. به‌طور خلاصه گام‌های تنظیم پارامترها به صورت زیر هستند:

گام ۱) ضریب k_p و T_d کم‌ترین مقدار و T_i بیش‌ترین مقدار ممکن قرار داده شود.

گام ۲) ضریب k_p را به تدریج افزایش داده تا آن‌که خروجی دچار نوسان پایدار شود. لذا بهره k_p برابر $\frac{k_{p\sim}}{4}$ انتخاب می‌گردد.

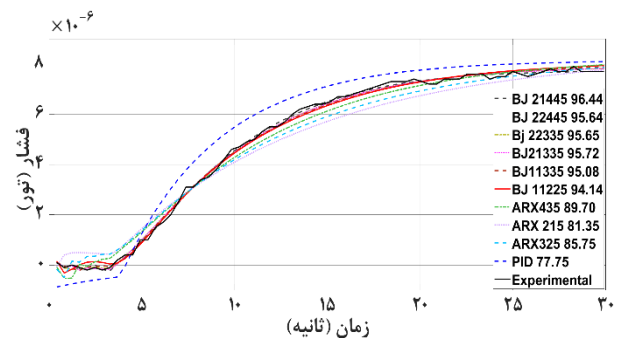
گام ۳) مقدار T_i را کاهش داده تا جایی که خروجی فرایند به نوسان پایدار دچار شود لذا $T_i = 3.3 T_{i\sim}$ انتخاب می‌گردد.

گام ۴) مقدار T_d را افزایش داده تا جایی که خروجی فرایند به نوسان پایدار دچار شود. لذا $T_d = 0.7 T_{d\sim}$ انتخاب می‌گردد.

در این روش سعی می‌شود با ایجاد حاشیه امنیت کافی، به پاسخ مناسب و در عین حال مقاوم نسبت به تغییر محدود در پارامترها برسیم. پارامترهای هر کدام از روش مذکور برای ۴ کنترل‌کننده، در جدول ۲ تجمیع شده است.

جدول ۱. مدل‌های شناسایی شده منتخب

مدل	عمق چند جمله‌ای $[n_b, n_c, n_d, n_f, n_k]$	درصد تخمین
P1D	مدل سه پارامتری	۷۷٫۷۵
arx۳۲۵	$[۳, ۲, ۵]$	۸۵٫۷۵
arx۲۱۵	$[۲, ۱, ۵]$	۸۱٫۳۵
arx۴۳۵	$[۴, ۳, ۵]$	۸۹٫۷
b۲۱۴۴۵	$[۲, ۱, ۴, ۴, ۵]$	۹۶٫۴۴
bj۱۱۲۲۵	$[۱, ۱, ۲, ۲, ۵]$	۹۴٫۱۴
bj۱۱۳۳۵	$[۱, ۱, ۳, ۳, ۵]$	۹۵٫۰۸
bj۲۲۳۳۵	$[۲, ۲, ۳, ۳, ۵]$	۹۵٫۶۵
bj۲۲۴۴۵	$[۲, ۲, ۴, ۴, ۵]$	۹۵٫۶۴
bj۲۱۳۳۵	$[۲, ۱, ۳, ۳, ۵]$	۹۵٫۷۲



شکل ۸. مقایسه خروجی تجربی و خروجی مدل‌ها برای داده‌های تست.

۵. طراحی کنترل‌کننده بر مبنای مدل شناسایی شده

در این بخش به طراحی کنترل‌کننده بر مبنای مدل پرداخته می‌شود. کنترل‌کننده‌های متعددی بر اساس کاربرد و پیچیدگی مدل می‌تواند استفاده شود. در کاربردهای معمول صنعتی از کنترل‌کننده‌های خانواده PID ساده استفاده می‌شود. در این بخش ۴ نوع کنترل‌کننده از خانواده PID بر پایه مدل (۵) با روش مختلف طراحی و شبیه‌سازی می‌گردد و در ادامه کنترل‌کننده پیش‌بین یک گام به جلو بر پایه مدل (۵) طراحی و شبیه‌سازی می‌شود. در نهایت پاسخ همه کنترل‌کننده‌ها در ردیابی پروفایل فشار مرجع مورد مقایسه قرار گرفته و عملکرد آن‌ها در حذف اثر اغتشاش بررسی می‌گردد.

۱۰.۵ طراحی کنترل‌کننده PID

ساختار مورد استفاده برای پیاده‌سازی کنترل‌کننده PID، ساختار غیرتداخلی استاندارد می‌باشد [۹] که در شکل ۹ نشان داده شده است.

1. Process Response

2. Fertik

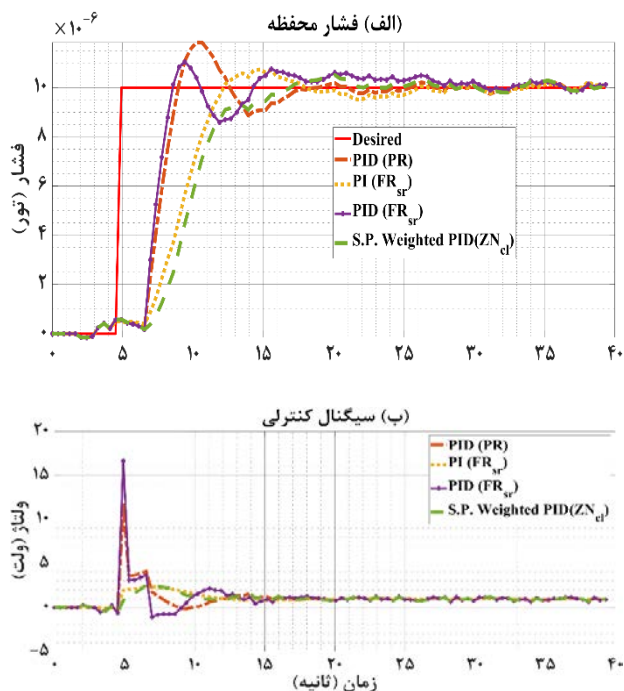
3. Ziegler Nichols

4. Setpoint Weighted PID

Journal of Nuclear Science and Technology

Vol. 44 (4), Serial Number 105, 2023, P 130-139





شکل ۱۰. نتایج شبیه سازی سیستم حلقه بسته با کنترل کننده های PID و ورودی پله. الف) فشار محفظه (P_{out} ، ب) سیگنال کنترلی (u).

با توجه به [۱۱] می توان نشان داد در روش کنترل یک گام به جلو^۱، با در نظر گرفتن قانون کنترل فیدبک مطابق با رابطه (۱۰)، خروجی را در زمان $t+d$ ، به مقدار مطلوب $y^*(t+d)$ می رساند.

$$\beta(q^{-1})u(t) = y^*(t+d) - \alpha(q^{-1})y(t); t \geq 0 \quad (10)$$

که در آن d تأخیر ذاتی سیستم و α و β به صورت زیر است:

$$\alpha(q^{-1}) = \alpha_0 + \alpha_1 q^{-1} + \dots + \alpha_{n-1} q^{-(n-1)} = G(q^{-1}) \quad (11)$$

$$\beta(q^{-1}) = \beta_0 + \beta_1 q^{-1} + \dots + \beta_{m+d-1} q^{-(m+d-1)} = F(q^{-1})B'(q^{-1}) \quad (12)$$

چند جمله ای های $G(q^{-1})$ و $F(q^{-1})$ یکتا هستند که از حل معادله دیوفانتین مطابق رابطه (۱۳) به دست می آیند:

$$F(q^{-1})A(q^{-1}) + q^{-d}G(q^{-1}) = 1 \quad (13)$$

با در نظر گرفتن مدل (۵)، تأخیر ذاتی آن و حل معادله دیوفانتین (۱۳)، ضرایب کنترل کننده پیش بین به صورت زیر حاصل می شود:

$$\alpha(q^{-1}) = 2.3 - 1.46q^{-1}$$

$$\beta(q^{-1}) = 10^{-7}(1.05 + 2.67q^{-1} + 3.28q^{-2} + 3.61q^{-3} + 3.76q^{-4}) \quad (14)$$

جدول ۲. پارامترهای خانواده کنترل کننده های PID

کنترل کننده	k_p	k_i	k_d
PID (PR)	۳۳۷۷۷۷/۴	۰/۱۰۴۳	۱/۰۱۲۷
PI (FR _{sr})	۱۹۶۶۹۵/۸۰۴۵	۰/۱۱۲۲	۰
PID (FR _{sr})	۲۶۶۳۱۵/۲۱۴۵	۰/۱۶۶۴	۲/۱۵۰۴
Setpoint Weighted PID (ZN _{cl})	۴۰۵۳۳۲/۸۸	۰/۲۱۲۳	۱/۱۷۷۶

نتایج شبیه سازی سیستم حلقه بسته با در نظر گرفتن مدل (۵)، کنترل کننده ها و ورودی پله با دامنه 10^{-6} torr شکل ۱۰ آورده شده است. مشخص است که خطای حالت ماندگار خروجی نزدیک صفر است. سیستم علاوه بر پایداری و حذف خطای حالت ماندگار، نسبت به تغییر محدود پارامترها مقاوم می باشد.

قابل ذکر این که، با توجه به مشخصه های پیزو الکتریک MV-۱۱۲ و آزمایش های عملی صورت گرفته، ولتاژهای شکست، خاموشی و خرابی پیزو به ترتیب حدود ۳۳، ۲۱ و ۱۰۰ ولت می باشد. ولتاژ کنترلی در این شبیه سازی ها با حذف ولتاژ بایاس (شکست پیزو) است. در عمل عدد ثابت ولتاژ شکست به ولتاژ کنترلی اضافه می گردد. در حالت کلی که حاصل جمع ولتاژ کنترلی و شکست پیزو باید بیش تر از ولتاژ خاموشی و کم تر از ولتاژ خرابی پیزو الکتریک باشد. با این قاعده، مشخص است که در شبیه سازی شکل ۱۰، در عمل محدودیتی در کنترل فرایند نخواهد داشت. مشخص است که هر کدام از کنترل کننده ها، با صرف نظر از زمان تأخیر ذاتی، کنترل مناسب و بدون خطای ماندگاری از فشار محفظه دارند. در ضمن کنترل کننده PID بر اساس پاسخ فرایند (PR) عملکرد مطلوب تری دارد. نتیجه عملکرد آن ها در جدول ۳ بیان شده است.

۲.۵ طراحی کنترل کننده پیش بین

اگر معادلات سیستم زمان گسسته را به صورت زیر تعریف کنیم:

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) \quad (7)$$

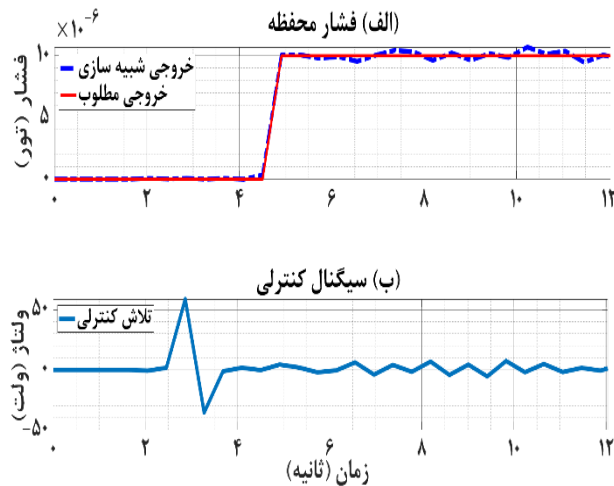
که در آن

$$A(q^{-1}) = 1 + A_1 q^{-1} + A_2 q^{-2} + \dots + A_n q^{-n} \quad (8)$$

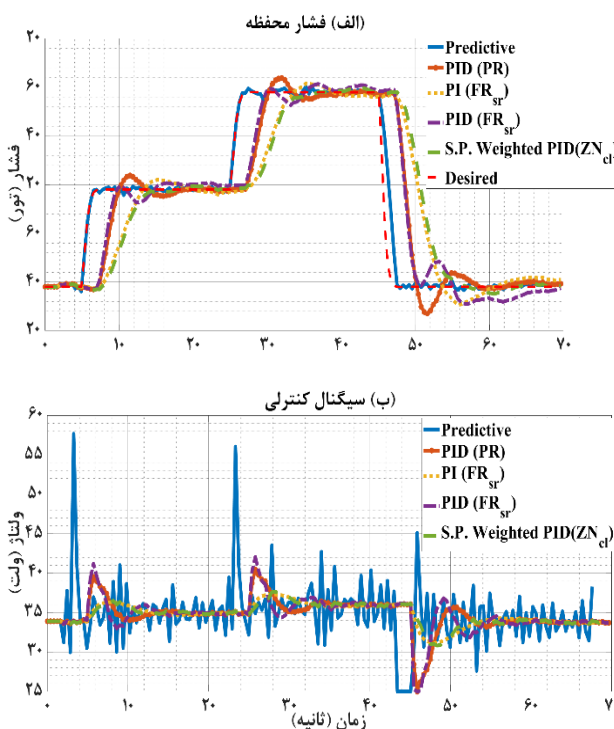
$$B(q^{-1}) = q^{-d}(B_0 + B_1 q^{-1} + \dots + B_m q^{-m}) = q^{-d}B'(q^{-1}) \quad (9)$$



حد اشباع پایین نیز مانع از خاموشی پیزو شده است. کنترل‌کننده‌های PID نیز به همراه تأخیر ذاتی و سرعت خیز مربوط به خود، خطای ماندگار بسیار محدودی داشته‌اند. نتیجه این‌که با توجه محدود بودن سیگنال‌های کنترلی آن‌ها، بر اساس خواسته طراحی و نوع آزمایش لازم در توکامک می‌توان هر کدام از کنترل‌کننده‌ها را برای مقاصد مختلفی پیاده‌سازی کرد.



شکل ۱۱. نتایج شبیه‌سازی سیستم حلقه بسته با کنترل‌کننده پیش‌بین و ورودی پله.



شکل ۱۲. (الف) پاسخ سیستم و (ب) سیگنال کنترلی آن، تحت کنترل‌کننده‌های مختلف برای ورودی فشار مطلوب با زمان خیز ۰.۲۵

نتایج شبیه‌سازی سیستم حلقه بسته با در نظر گرفتن مدل (۵)، کنترل‌کننده پیش‌بین و ورودی پله با دامنه 10^{-5} torr در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همان‌طوری که انتظار داشتیم، توانسته ورودی پله را با خطای بسیار کمی ردیابی کند و خطای ناشی از تأخیر ذاتی سیستم را حذف کند ولی سیگنال کنترلی بیش‌تری برای این ردیابی نیاز است که البته کم‌تر از ولتاژ خرابی پیزو الکتریک است.

۳.۵ مقایسه کنترل‌کننده‌های طراحی شده

در عمل به منظور ایجاد فشار مطلوب در محفظه توکامک لزومی به اعمال سیگنال پله نیست و لازم است فشار محفظه، مطابق فشار مدل مرجع که سرعت تغییرات آن محدود و براساس خواسته طراح می‌باشد، ردیابی گردد. داشتن یک پاسخ گذرای مطلوب، یکی از ملزومات اساسی اغلب سیستم‌های کنترلی است که دارای نمادهای کمی هم‌چون حداکثر فراجهش، زمان خیز، زمان نشست مطلوب با معیارهای مختلف می‌باشد. یکی از مهم‌ترین روش‌ها در ارتباط بین ضرایب چندجمله‌ای و پاسخ گذرای سیستم روش نمودار ضرایب^۱ (CDM) و روش^۲ CRA است [۱۲، ۱۳]. در این‌جا برای داشتن خروجی بدون فراجهش و زمان‌خیز ۲ ثانیه، مدل مرجع مطلوب به صورت رابطه (۱۵) حاصل می‌گردد. که در عمل با عبور سیگنال پله از فیلتر (۱۵) به‌دست می‌آید.

$$\frac{V_p}{s^2 + \delta s + V_p} \quad (15)$$

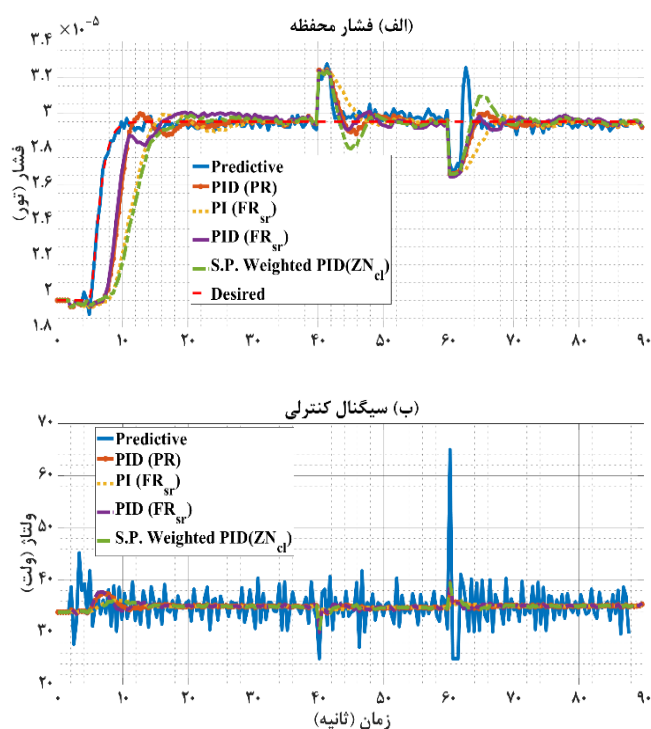
با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملی و هم‌چنین حفظ ایمنی بیش‌تر برای ولتاژ خرابی پیزو، می‌توان ولتاژ خاموشی و خرابی را به ترتیب ۲۵ و ۶۵ ولت در نظر گرفت و برای سیگنال کنترلی حد اشباع $25 < V_p = u < 65$ را لحاظ کرد. با قید این محدودیت عملی و اضافه کردن ولتاژ شکست به سیگنال کنترلی، نتایج شبیه‌سازی سیستم حلقه بسته با کنترل‌کننده‌های PID (جدول ۲) و پیش‌بین و هم‌چنین ورودی فشار مطلوب در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود. مشخص است که کنترل‌کننده پیش‌بین با حذف خطای ذاتی، دنبال‌روی خوبی از فشار مطلوب (P_{ref}) داشته و زمان خیزی در حدود ۲ ثانیه و بدون فراجهش داشته است. ولی دامنه سیگنال کنترلی آن بیش‌تر از کنترل‌کننده‌های PID است. با وجود آن به حد اشباع بالایی نرسیده و

1. Coefficient Diagram Method
2. Characteristic Ratio Assignment



یکی از کمیت‌ها در بررسی عملکرد کنترل فرایند، حذف اغتشاش خروجی فرایند است. جهت بررسی این موضوع در فرایند مذکور، یک اغتشاش پله با دامنه 2×10^{-6} torr در زمان ۴۰ ثانیه و به مدت ۲۰ ثانیه در خروجی فرایند اضافه می‌کنیم. عملکرد هر کدام از کنترل کننده‌ها در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

با توجه به شکل ۱۴، مشخص است که همه کنترل کننده‌ها، اغتشاش را حذف کرده‌اند و در خطای حالت ماندگار ناشی از اغتشاش ندارند. طبیعتاً سیگنال کنترلی آن، دامنه بیشتری دارد. همچنین مجموع مربعات خطا در بازه ۴۰ تا ۸۰ ثانیه که اغتشاش حضور داشته، در جدول ۴ آورده شده است. مشخص است که کنترل پیش‌بین، در حذف اثر اغتشاش نیز موفق‌تر از سایر کنترل کننده‌ها عمل کرده است.



شکل ۱۴. پاسخ کنترل کننده‌های مختلف به اغتشاش خروجی.

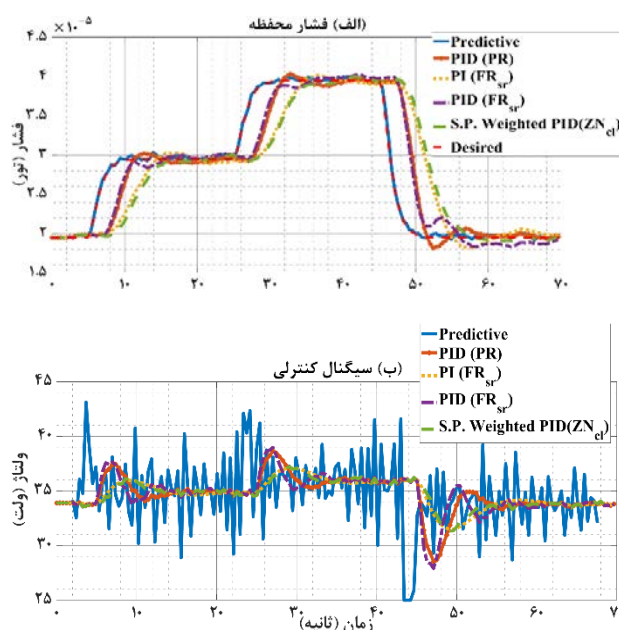
جدول ۴. مجموع مربعات خطا در محدوده ۴۰ تا ۸۰ ثانیه ($\times 10^{-12}$)

Predictive	S.P.W.PID (ZN _{cl})	PID (FR _{sr})	PI (FR _{sr})	PID (PR)
۱۲۵/۱۱	۱۴۴/۹۵	۱۳۲/۸۳	۱۹۳/۱۳	۱۳۱/۹۳

عملاً در کنترل فرایند فشار محفظه توکامک، ضرورتی برای افزایش سرعت کنترل فشار محفظه نیست. بنابراین یک راهکار جهت جلوگیری از افزایش دامنه سیگنال کنترلی و جلوگیری از اشباع آن در روش کنترل پیش‌بین، کاهش سرعت (زمان خیز) پروفایل ورودی مرجع است. در شبیه‌سازی بعدی، مدل مرجع فشار مطلوب را با کمیت‌های بدون فراجش و زمان خیز ۵ ثانیه در نظر می‌گیریم که بر اساس آن مدل مرجع به صورت رابطه (۱۶) حاصل می‌شود. خروجی سیستم و سیگنال کنترلی آن‌ها به این ورودی در شکل ۱۳ نشان داده شده است. مشخص است که کنترل کننده پیش‌بین علاوه بر دنبال‌روی مناسب (زمان‌خیزی در حدود ۵ ثانیه)، دامنه سیگنال کنترلی آن به مراتب کمتر از قبل (شکل ۱۲ ب) شده است و به اشباع بالا و پایین هم نرسیده است. کنترل کننده‌های PID نیز با سرعت خیز مربوط به خود، کنترل بهتری داشته‌اند.

$$(16) \quad \frac{1}{s^2 + 1/8s + 1}$$

جهت بررسی دقیق‌تر عملکرد کنترل کننده‌ها، معیار مجموع مربعات خطا را برای هر کدام از آن‌ها در جدول ۳ آمده است.



شکل ۱۳. الف) پاسخ سیستم ب) سیگنال کنترلی آن، تحت کنترل کننده‌های مختلف برای ورودی فشار مطلوب با زمان خیز ۵S.

جدول ۳. مجموع مربعات خطا به ازای کنترل کننده‌های مختلف ($\times 10^{-9}$)

پروفایل فشار	PID (PR)	PI (FR _{sr})	PID (FR _{sr})	S.P.W.PI D (ZN _{cl})	Predictive
$t_r=2S$	۳/۳۶	۵/۱۱	۳/۱۹	۵/۶۹	۰/۲
$t_r=5S$	۲/۴۲	۴/۴۳	۲/۲۲	۴/۹۱	۰/۰۱۱۱



۶. نتیجه‌گیری

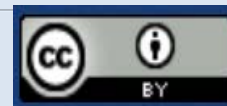
مراجع

1. M. Ariola, A. Pironti, *Magnetic control of tokamak plasmas*, Springer (2008).
2. M.S. Khan, S.B. Bhatt, *Automatic pressure controller using microcontroller*, Technical Report, (2010).
3. Ch. Ou, L. Mao, Zh. Wang, *An Investigation of intelligent control for gas injection pressure in GAIM*, IEEE International conference on control and automation, May 30 to June 1, (2007).
4. Sh-Ch Chen, Sh-M Chao, *Closed-loop control of gas pressure in the gas-assisted injection molding process*, ADV WILEY, January 5, (1999).
5. J. Schacht, et al, *Gate valve and shutter control system for the fusion experiment W7-X*, IAEA 9th Technical Meeting, May 7, (2013).
6. I. Carvalho, *Real-time control for long ohmic alternate current discharges*, IAEA 9th Technical Meeting, (2013).
7. L. Wang, et al, *Design and construction of vacuum control system on EAST*, Fusion Engineering and Design, **83**, 295-299 (2008).
8. H. Rasouli, C. Rasouli, A. Koohi, *Identification and control of plasma vertical position using neural network in Damavand Tokamak*, Review of Scientific Instruments, **84**, 023504 (2013).
9. O. Nelles, *Nonlinear System Identification*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 465-471 (2001).
10. A.R. Fatehi, *Process Control Systems*, K.N. Toosi University of Technology Publications, (2013) (In Persian).
11. G.C. Goodwin, K.S. Sin, *Adaptive Filtering Prediction and Control*, Dover Publications, Inc. Mineola, New York, 120-121 (2009).
12. Y.C. Kim, L.H. Keel, S.P. Bhattacharyya, *Transient response Control via characteristic ratio assignment*, IEEE Transactions on Automatic Control, **48**, iss. 12, 2238-2244 (2003).
13. S. Manabe, *Coefficient Diagram method*, 14th IFAC Symp. On Automatic Control in Aerospace, Seoul, (1998).

در این مقاله، جهت طراحی و پیاده‌سازی سیستم کنترل فشار محفظه برای توکامک دماوند، مدل‌سازی فشار محفظه، با اجرای ساختار آزمایشی و داده‌برداری از سیستم فشار صورت پذیرفت. این فرایند، با ایجاد خلأ پایه و اعمال ولتاژ متغیر به عملکرد پیزوالکتریک ۱۱۲-MV در محدوده فشار تنظیمی برای ایجاد پلاسما با پله‌های مختلف انجام گردید. در فرایند شناسایی، چندین مدل خطی حاصل گردید. که در مقایسه با داده‌های تست نشان از عملکرد مناسب آن دارد. در ادامه کنترل‌کننده‌های مختلف PID مبتنی بر ۳ روش تنظیم براساس پاسخ فرایند (PR)، روش‌های فرتیک خودتنظیم (FR)، روش زیگلر-نیکولز (ZN) با ساختار ورودی مرجع وزن‌دار (WPID) طراحی و شبیه‌سازی شد که نتایج آن عملکرد مناسبی داشت. در ادامه به منظور کنترل پروفایل فشار مطلوب بدون تأخیر ذاتی سیستم، کنترل‌کننده پیش‌بین مبتنی بر مدل طراحی و شبیه‌سازی گردید در این مقاله، برای داشتن خروجی بدون فراجش و زمان‌خیز قابل تنظیم پروفایل فشار مطلوب تهیه و فشار محفظه بر اساس کنترل‌کننده‌ها مورد ارزیابی قرار گرفت. برای حفظ ایمنی پیزوالکتریک، کنترل‌کننده‌های خانواده PID و پیش‌بین با در نظر گرفتن محدودیت‌های عملی در سیگنال کنترلی ($25 < V_p < 65$) شبیه‌سازی شد که نتایج مطلوبی در ردیابی پروفایل فشار مطلوب، حذف تأخیر ذاتی سیستم و محدود بودن دامنه سیگنال کنترلی دارند. نتیجه این‌که با توجه محدود بودن سیگنال‌های کنترلی آن‌ها، بر اساس خواسته طراحی و نوع آزمایش لازم در توکامک می‌توان هر کدام از کنترل‌کننده‌ها را برای اهداف مختلفی پیاده‌سازی کرد.

COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

حسین رسولی، مهدی علیاری شوره‌دلی، مهدی امینی (۱۴۰۲)، مدل‌سازی فشار محفظه و طراحی کنترل‌کننده برای کنترل پروفایل فشار در توکامک دماوند، ۱۳۰-۱۳۹

DOI: 10.24200/nst.2022.1139.1750

Url: https://jonsat.nstri.ir/article_1486.html

