http://mme.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

بهمن ۱۳۹۲، دوره ۱۳ شماره ۱۱ ص‌ص ۷۷-۸۷

مقاله پژوهشی کامل
تاریخ دریافت ۹۱/۱۲/۱۰
تاریخ پذیرش ۹۲/۳/٤
ارائه در سایت ۹۲/۹/۳۰

کنترل سرعت موتور القایی جهت بکارگیری در سیستم تست HIL واحد کنترل سوخت موتور جت با استفاده از کنترل‌کنندهٔ ANFIS و الگوریتم علف‌های هرز مهاجم

امین صالحی[۱]، مرتضی منتظری[۲*]، احسان محمدی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی‌ارشد مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
۲- استاد مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
۳- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران
* تهران، صندوق پستی۱۶۳- ۱۶۷۶۵، montazeri@iust.ac.ir

چکیده- واحد کنترل سوخت موتور جت (FCU) در طی چند سال گذشته در آزمایشگاه شبیه‌سازی و کنترل سیستم‌های دانشگاه علم و صنعت ایران، طراحی و ساخته شده است و در حال حاضر در مرحلهٔ تست سخت‌افزار در حلقه قرار گرفته است. با توجه به این که در دستگاه تست FCU، موتور جت به صورت واقعی وجود ندارد، لذا از یک موتور القایی به‌عنوان عملگر واسطه استفاده شده است تا از طریق آن بتوان میزان دور بدست آمده از نتایج شبیه‌سازی موتور جت را به پمپ دنده‌ای FCU منتقل کرد. در این مقاله، کنترل سرعت این موتور القایی مطابق با شرایط دستگاه تست ارائه شده است. بدین منظور از روش شناسایی سیستم برای مدل‌سازی اجزای بکار رفته در سیستم کنترل سرعت موتور القایی استفاده گردیده و مدل ارائه شده با استفاده از نتایج بدست‌آمده از تست عملی مورد ارزیابی قرار گرفت. این مدل جهت طراحی کنترلر فازی- عصبی- تطبیقی (ANFIS) استفاده شده است و با بکارگیری الگوریتم علف‌های هرز مهاجم (IWO) به‌عنوان یک ابزار قدرتمند کاوش در فضاهای جستجوی وسیع و نامنظم به تنظیم پارامترهای این کنترلر پرداخته شده است. کنترلر طراحی شده بر روی سیستم واقعی پیاده‌سازی شد. نتایج بدست‌آمده از شبیه‌سازی و پیاده‌سازی کنترلر طراحی شده نشان‌دهنده عملکرد مناسب کنترلر ANFIS طراحی شده با الگوریتم IWO می‌باشد.

کلیدواژگان: واحد کنترل سوخت موتور جت، شناسایی سیستم، کنترلر ANFIS، الگوریتم بهینه‌یابی IWO.

Induction motor control using ANFIS controller and IWO optimization algorithm for using in HIL testing of turbojet FCU

A. Salehi[1], M. Montazeri-GH[2*], E. Mohammadi[3]

1- MSc. Student, Mech. Eng., IUST., Tehran, Iran
2- Prof., Mech. Eng., IUST., Tehran, Iran
3- PhD. Student, Mech. Eng., IUST., Tehran, Iran
* P.O.B 16765-163, Tehran, Iran. montazeri@iust.ac.ir

Abstract- Jet engine Fuel Control Unit (FCU) has been manufactured recently in the SSAC laboratory of Iran University of science and technology, and is being tested now using HIL testing. Regarding there is no possibility utilizing a jet engine in this test set; an induction motor was used as an actuator to transit rotation acquired using jet engine real time simulation to the FCU pump. In this paper, the induction motor's velocity control is presented considering condition for the test set. To do so, system identification method is used to model the components employed in induction motor velocity control system. Then, the model is evaluated using experimental test results. Afterward, it is used to design ANFIS controller, and the controller parameters is adjusted employing IWO optimization algorithm as a strong tool for seeking in vast disorder spaces. Subsequently, the controller designed is implemented on a real system. Results gained using simulation and the designed controller implementation show that ANFIS controller designed using IWO algorithm works appropriately.

Keywords: Fuel Control Unit, System Identification, ANFIS Controller, IWO.

۱- مقدمه

در آزمایشگاه شبیه‌سازی و کنترل سیستم‌های دانشگاه علم و صنعت از چندین سال پیش، همگام با سایر مراکز تحقیقاتی دیگر، پروژه طراحی و ساخت واحد کنترل سوخت موتور توربین گاز آغاز گردیده و در حال انجام است که نتایج اولیه این تحقیقات منجر به ساخت اولین نمونه سیستم کنترل سوخت در کشور شده است [۱]. این نمونه ساخته شده از سیستم کنترل سوخت از دو قسمت الکترونیکی (ECU[1]) و الکتروهیدرولیکی (FCU[2]) تشکیل شده است. در حال حاضر نیز تحقیقات در زمینه تست نمونه ساخته‌شده از FCU در جهت تکمیل و اطمینان از صحت عملکرد آن در حال انجام است. در این راستا، با توجه به محدودیت‌های موجود برای تست سیستم کنترل سوخت در شرایط واقعی، برای اولین بار طرح استفاده از شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه[3] برای تست FCU مطرح گردید [۳،۲] که یکی از روش‌های متداول برای تست اجزای ساخته‌شده و بررسی عملکرد آنها در حین فعالیت کل سیستم می‌باشد [۵،۴].

یکی از ملزومات روش شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه، ایجاد یک بستر تست مناسب جهت انجام تست‌های مورد نیاز و اعمال سیگنال‌های مربوطه به واحد سخت‌افزاری (FCU) می‌باشد. در یک موتور جت واقعی دور محور دورانی موتور جت از طریق یک جعبه دنده کاهنده به پمپ FCU منتقل می‌شود ولی با توجه به این که در سیستم تستFCU، موتور جت به صورت واقعی وجود ندارد، لذا نیاز به یک عملگر واسطه می‌باشد تا از طریق آن بتوان میزان دور موتور جت بدست آمده از نتایج شبیه‌سازی را به پمپ دنده‌ای FCUمنتقل کرد. در این سیستم از یک موتور القایی سه‌فاز تغذیه شده با درایور V/F، جهت انجام این‌کار استفاده شده است. سرعت این موتور القایی باید با نسبتی از سرعت موتور جت که توسط شبیه‌سازی زمان واقعی به دست می‌آید برابر باشد، بنابراین نیاز به طراحی و پیاده‌سازی یک سیستم کنترل جهتکنترل سرعت موتور القایی با توجه به شرایط سیستم تست می‌باشد.

در مرجع [۶] از روش شناسایی سیستم جهت مدل‌سازی سیستم موتور القایی و از کنترلر PIDجهت تنظیم سرعت آن استفاده شده است. هر چند کنترل کننده‌های کلاسیک نظیر PID، PI به‌طور گسترده در اغلب سیستم‌های صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۸،۷] ولی در بسیاری از موارد این کنترل‌کننده‌ها عملکرد بهینه‌ای ندارند. عمده اشکال این نوع کنترل‌کننده‌ها وابسته بودن به مدل ریاضی سیستم و دشواری تنظیم پارامتر آنها، برای داشتن پاسخ مطلوب در نقاط مختلف کاری می‌باشد. از طرفی دیگر معمولاً مدل‌های بدست آمده برای موتورهای القایی و ادوات الکترونیک قدرت با توجه به متغیر بودن پارامترهای سیستم در طی زمان، دقیق نبوده و طراحی کنترلر کلاسیک را با مشکل روبرو می‌کند [۹-۱۱]. جهت رفع این مشکل از روش‌های کنترل هوشمند نظیر روش-های مبتنی بر منطق فازی و شبکه‌های عصبی استفاده می‌شود. این روش‌ها به صورت قابل ملاحظه‌ایی از وابستگی فرایند طراحی کنترلر به مدل ریاضی سیستم کاسته‌اند و عملکرد بهتری در کنترل سیستم‌ها از خود نشان می‌دهند [۹]. همچنین در [۱۲] نشان داده شده است که کنترل‌کننده‌های فازی در مواجهه با تغییرات بزرگ ورودی، پاسخ سریع‌تری نسبت به کنترل‌کننده‌های کلاسیک دارند.

در مقالات بسیاری از جمله [۱۳-۲۰]، از منطق فازی برای کنترل سرعت موتور القایی استفاده شده است. در [۱۳] از روش شناسایی سیستم جهت مدل‌سازی اجزای بکار رفته در سیستم کنترل سرعت موتور القاییاستفاده گردیده و از کنترلر فازی جهت تنظیم سرعت موتور القایی استفاده شده است. از طرفی یکی از مشکلات بسیار مهم در طراحی کنترل کننده‌های فازی نیاز آن به دانش فرد خبره در تنظیم پارامترها و قواعد آن می‌باشد واز این‌رو استفاده از سیستم‌های هوشمند ترکیبی که مزایای سیستم‌های فازی و شبکه‌های عصبی را بطور یک جا دارا باشند، بسیار مفید خواهد بود. ساختار فازی- عصبی- تطبیقی (ANFIS)[4]، یک شبکه تطبیقی بر اساس سیستم استنتاج فازی است و در واقعیک روش ترکیبی برای پیاده‌سازی سیستم فازی می‌باشد. در ساختار ANFIS این امکان وجود دارد که پارامترهای کنترلر فازی به عنوان وزن‌های یک شبکه عصبی در طی فرایند آموزش بدست‌آورده شوند. این ساختار اولین بار توسط راجر جنگ[5] ارائه شده است که از مدل فازی تاکاگی- سوگنو- کانک (TSK) بهره می‌گیرد [۲۱].

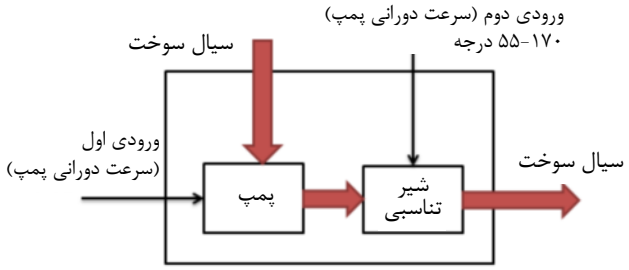
1. Electronic Control Unit
2. Fuel Control Unit (FCU)
3. Hardware-in-the-Loop
4. Adaptive Neuro Fuzzy Interface System (ANFIS)
5. R. Jang

در این مقاله که پا را یک گام فراتر از پـژوهش مشـابه [۱۳] قرار داده، از روش شناسایی سیستم جهت مـدل‌سـازی اجـزای سیستم کنترل سرعت موتور القایی و از کنترلـر ANFIS بـرای تنظیم سرعت موتور القایی استفادهشده اسـت کـه پارامترهـای این کنترلربه‌وسیله‌ی الگوریتم بهینه‌یابی سراسری " علـف‌هـای هرز مهاجم"[1] بدست آمده است.ساختار مقاله ارائه شده به ایـن صورت است که درابتدا توضـیحاتی اجمـالی پیرامـون سیسـتم کنترل سوخت و بستر تست آن ارائه شده است تـا خواننـده بـا نقش موتور القایی در سیستم تست واحد کنترل سـوخت آشـنا گردد و سپس به معرفی اجزای سیستم کنتـرل سـرعت موتـور القایی و جایگاه آن در سیستم تست FCU پرداخته شده است. برای طراحـی سیسـتم کنتـرل سـرعت موتـور القـایی، در گـام نخسـت بـا بکـارگیری روش شناسـایی سیسـتم و بـا تحریـک ورودی‌های سیستمبوسیله‌ی سیگنال APRBS[2]، مدلی خطـی از سیستم موتور القایی ارائه می‌شود. در گام دوم، بـرای تنظـیم سرعت موتور القایی، به طراحی یک کنترلـر بـا سـاختار فـازی- عصبی- تطبیقی (ANFIS) پرداخته مـی‌شـود. در نهایـت،برای بهینه‌یابی پارامترهای کنترلر پیشنهادی، از الگوریتم بهینه‌یـابی سراسری علف‌های هرز مهاجم استفاده می‌شود.

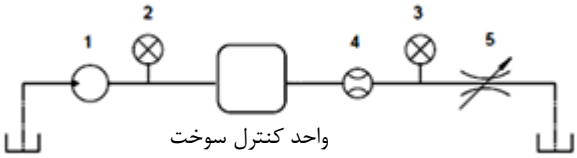
۲- واحد کنترل سوخت و سیستم تست آن

واحد کنترل سوخت موتور جت یک سیستم الکتروهیدرولیکی است که از دو قسمت بلوک هیدرولیک و بلوک کنترل تشکیل شده است. در بلوک هیدرولیک یک پمپ هیدرولیکی که وظیفه تأمین توان هیدرولیکی واحد کنترل سوخت را به عهده دارد به همراه فیلتر و لوازم جانبی آن، سوخت را از مخزن سوخت دریافت کرده و به بلوک کنترل ارسال می‌کند. میزان دبی تحویلی را می‌توان توسط مجموعه بلوک کنترل که شامل یک شیر تنظیم دبی و یک شیر تنظیم اختلاف فشار می‌باشد، کنترل نمود که این کار بر مبنای جابجایی اسپول شیر تنظیم دبی به وسیله یک عملگر الکتریکی صورت می‌پذیرد. FCU به عنوان یک سیستم، دارای دو ورودی و یک خروجی می‌باشد: ورودی اول، موقعیت اسپول شیر تنظیم دبی است که در واقع تعیین کنندهٔ میزان باز بودن شیر تنظیم دبی سوخت خواهد بود. این ورودی توسط یک سروو موتور الکتریکی اعمال می‌گردد. ورودی دوم نیز سرعت دورانی پمپ دنده‌ایی است که در سیستم واقعی توسط شفت موتور توربین گاز تأمین می‌شود؛ ولی در دستگاه تست HIL از یک موتور القایی جهت تأمین دور پمپ استفاده شده است. خروجی این سیستم نیز میزان دبی سوخت تحویلی به نازل سوخت‌پاش می‌باشد که در سیستم تست توسط یک دبی‌سنج جرمی اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۱ بلوک دیاگرام مربوط به FCU را بصورت شماتیک نشان می‌دهد.

در شکل ۲ شماتیکی از مدار هیدرولیکی سیستم تست طراحی شده ارائه شده است. همان طور که در این شکل مشخص شده است، بوستر پمپ (۱) سیال را از مخزن اتمسفریک مکش نموده و به ورودی واحد کنترل سوخت انتقال می‌دهد به کمک یک گیج فشار (۲) می‌توان از فشار سیال در ورودی پمپ اطلاع حاصل نمود. دبی تنظیم شده از مسیر خروجی به سمت نازل هدایت می‌شود و فشار آن توسط سنسور فشار (۳) و گیج فشار قابل ضبط و مشاهده است، همچنین دبی سیال نیز توسط فلومتر (۴) اندازه‌گیری می‌شود. سوخت پس از عبور از نازل به مخزن برگردانده می‌شود. در این سیستم تست به لحاظ ایمنی به جای سوخت از روغن سفید غیرقابل اشتعال استفاده شد که از لحاظ ویسکوزیته و دانسیته نزدیک به سوخت موتور جت می‌باشد.



شکل ۱ بلوک دیاگرام FCU



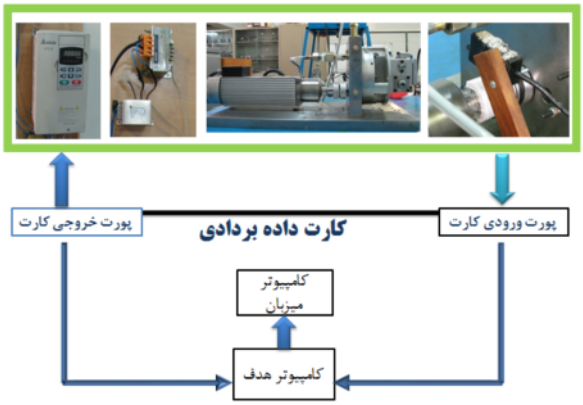
شکل ۲ شماتیک مدار هیدرولیکی سیستم تست FCU

1. Invasive Weed Optimization (IWO)
2. Amplitude-Modulated Pseudo Random Binary Signal (APRBS)

۳- چیدمان اجزای سیستم کنترل سرعت

شکل ۳ اجزای سیستم کنترل سرعت موتور القایی را نشان می‌دهد. سیستم مربوط به موتور القایی از یک درایور فرکانس متغیر v/f ثابت، یک موتور القایی سه فاز قفس سنجابی، تاکومتر نوری جهت تبدیل سرعت دورانی موتور الکتریکی به پالس الکتریکی و یک مبدل فرکانس به ولتاژ تشکیل شده است.مهم‌ترین جزء مربوط به سیستم کنترل سرعت، درایو فرکانس متغیر می‌باشد. این درایو به عنوان واسطه بین کنترلر و موتور القایی قرار دارد. خروجی کنترلر توسط کارت داده‌برداری به‌صورت یک ولتاژ آنالوگ ۱۰- ۰ ولت به درایو منتقل می‌شود. یک رابطه خطی بین ولتاژ آنالوگ ورودی به درایو و فرکانس خروجی آن وجود دارد. درایو فرکانس متغیر بر اساس استراتژی V/F ثابت، ولتاژ و فرکانس تغذیه استاتور موتور القایی را تنظیم می‌کند. در این سیستم از یک مجموعه فیلتر نویز نیز به منظور حذف نویزهای ناشی از درایو فرکانس متغیر استفاده شده است.

برای کنترل موتور القایی تحت شرایط زمان– واقعی، از امکان xPC-target و RTW نرم‌افزار متلب[1] برای رسیدن به این منظور استفاده شده است. در ساختار xPC، کامپیوتر میزبان شامل کنترلر طراحی شده برای کنترل سرعت موتور القایی می‌باشد و کامپیوتر هدف شامل فایل کمپایل شده کنترلر طراحی شده در محیط نرم‌افزار سیمولینک است که می‌تواند بصورت زمان- واقعی اجرا شود. در این ساختارکامپیوتر میزبان دارای سیستم عامل ویندوز و نرم‌افزار متلب است در صورتی که کامپیوتر هدف، فاقد سیستم عامل می‌باشد و لذا برای اجرای آزمایش به شکل زمان- واقعی بسیار مناسب است.

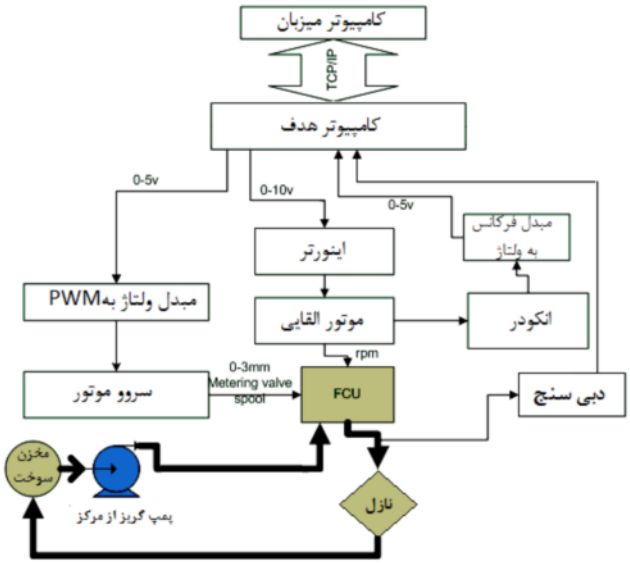


شکل ۳ اجزای موجود در سیستم کنترل سرعت موتور القایی، در سیستم تست FCU

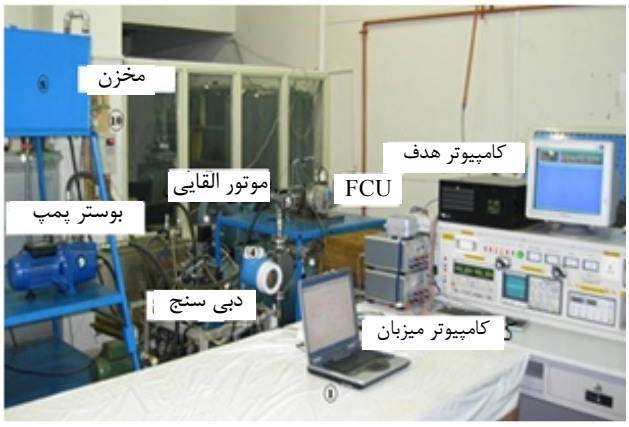
1. Matlab

کامپیوتر میزبان و هدف را می‌توان بر اساس پروتکل RS232 و یا بر اساس پروتکل TCP/IP به هم متصل نمود که در اینجا از پروتکل TCP/IP استفاده می‌شود. در اینجا کامپیوتر میزبان فقط نقش مانیتورینگ سیگنال‌های موجود را در محیط گرافیکی ویندوز و متلبر عهده دارد برای اتصال کامپیوتر هدف به سخت‌افزار از کارت‌های داده‌برداری استفاده شده است. شکل ۴ شماتیکی از کل سیستم کنترل موتور القایی و جایگاه آن را در سیستم تست FCU نشان می‌دهد.

شکل ۵ نیز تصویری از سیستم تست آزمایشگاهی موجود را نشان می‌دهد.



شکل ۴ بستر سیستم تست FCU



شکل ۵ سیستم تست آزمایشگاهی در آزمایشگاه شبیه‌سازی و کنترل سیستم‌ها

۴- مدل‌سازی موتور القایی

به‌منظور طراحی کنترلر مناسب، نیاز به یک مدل مناسب و دقیق از سیستم تحت کنترل می‌باشد. تحقیقات قابل توجهی در دهه‌های گذشته برای مدل‌سازی موتورهای القایی صورت گرفته است. مدل‌سازی تحلیلی موتور الکتریکی و همچنین درایور آن با توجه به رفتار غیرخطی و نیز به علت تغییر مقادیر پارامترها در طی زمان، دشوار بوده [۹-۱۱] و اغلب این مدل به دلیل پیچیده بودن مناسب برای طراحی کنترلر نمی‌باشد [۲۲]. مقالات زیادی به عنوان نمونه مراجع [۲۳-۲۵] از روش شناسایی سیستم برای مدل‌سازی موتور القایی و درایور آن استفاده کردند. در این مقاله نیز از روش شناسایی سیستم[1]، برای بدست‌آوردن مدل دینامیکی موتور القایی و سایر اجزای موجود در سیستم کنترل سرعت استفاده شده است که در ادامه به شرح مراحل مختلف مدل‌سازی پرداخته خواهد شد.

۴-۱- تعریف سیستم

یک گام بسیار مهم برای شروع مدل‌سازی به روش شناسایی سیستم تعریف سیستم می‌باشد. در تعریف سیستم باید دقت نمود تا در ابتدا ورودی‌ها و خروجی‌های سیستم به درستی مشخص شوند. با توجه به این که در این قسمت هدف کنترل سرعت موتور القاییمی‌باشد از این‌رو خروجی سیستم سرعت دورانی موتور می‌باشد. عواملی که می‌توانند بر سرعت دورانی موتور القایی اثرگذار بوده و قابل تعیین از سوی کاربر باشند نیز به عنوان ورودی در نظر گرفته می‌شوند [۲۶]. در این سیستم دو عامل می‌توانند باعث تغییر در سرعت شوند که توسط کاربر قابل تغییر می‌باشند. ورودی اول میزان ولتاژ فرمان اعمالی به اینورتر است که این ولتاژ در واقع تعیین کننده ولتاژ و فرکانس اعمالی به استاتور می‌باشد. ورودی دوم این سیستم نیز میزان جابجایی دورانی بادامک متصل به شیر تناسبی است. جابجایی این بادامک سبب تغییر موقعیت اسپول شیر تنظیم دبی و در نتیجه تغییر دبی عبوری می‌شود. در واقع تغییر در میزان باز و بسته بودن این شیر سبب تغییر در گشتاور و بار اعمالی بر موتور القایی شده و بر مقدار سرعت آن اثر می‌گذارد و از اینرو می‌توان آنرا به عنوان یک ورودی برای سیستم تحت کنترل در نظر گرفت.

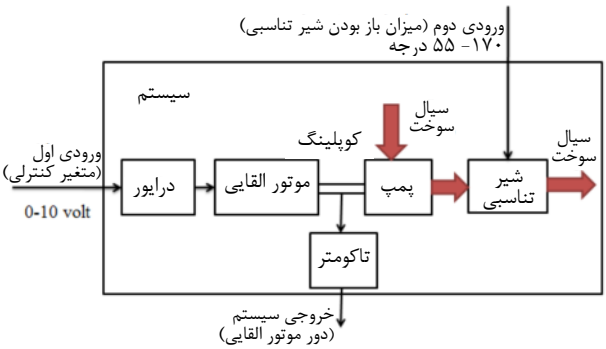
1. System Identification

محدودهٔ تغییرات برای ورودی اول ۰ تا ۱۰ ولت می باشد که این ولتاژ در اینورتر مطابق یک تابع خطی، فرکانس و ولتاژ استاتور را تعیین می‌کند. همچنین محدوده تغییرات برای ورودی دوم ۵۵-۱۷۰ درجه می‌باشد که این مقدار در واقع میزان باز بودن شیر جلوی پمپ را در محدوده ۰/۹ الی۳ میلی‌متر تعیین می‌کند. خروجی سیستم نیز بر حسب هرتز در کامپیوتر ذخیره می‌شود. شکل ۶ سیستم در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی را نشان می‌دهد.

۴-۲- سیگنال تست

یکی ازمهم‌ترین مسائلی که در زمینه شناسایی سیستم ها وجود دارد انتخاب ورودی مناسب برای انجام آزمون شناسایی می‌باشد. عوامل متعددی در طراحی سیگنال تست باید در نظر گرفته شوند. به عنوان مثال نسبت سیگنال به نویز همواره باید در بالاترین حد ممکن قرار گیرد و یا این که تمام محدوده عملکردی که یک سیستم می‌تواند در طول عملکرد خود تجربه کند به خصوص در مرزها باید در ورودی پوشش داده شود [۲۷].

یکی از سیگنال‌های استاندارد و بسیار مناسب جهت تحریک سیستم‌ها، سیگنال APRBS می‌باشد. یکی از پارامترهایی که باید در سیگنال APRBS ازسوی کاربر انتخاب شود زمان پایش[2] سیگنال یعنی کوتاه‌ترین زمانی که سیگنال ثابت باقی می‌ماند، می‌باشد. با تغییر مقدار این پارامتر که تعداد تغییرات را در واحد زمان نشان می‌دهد می‌توان بر روی خواص فرکانسی سیگنال مورد نظر تأثیر گذاشت. این مقدار را می‌توان با توجه به محدوده فرکانسی مربوط به عملکرد مدل تعیین نمود.



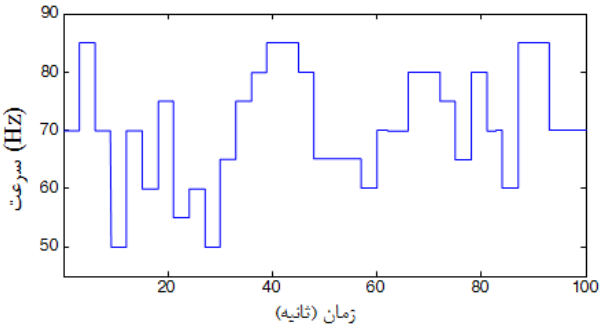
شکل ۶ تعریف سیستم و تعیین ورودی‌ها و خروجی‌های آن

2. Clock Period

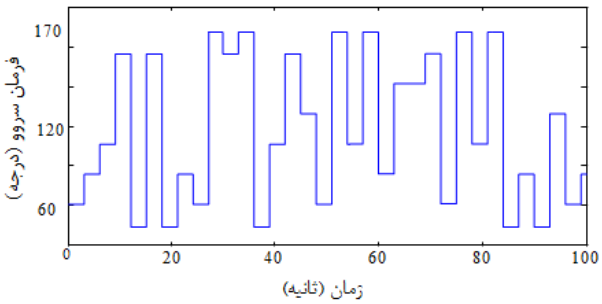
انتخاب این پارامتر برابر با بزرگترین ثابت زمانی سیستم در هر کانال ورودی یک انتخاب منطقی خواهد بود [۲۷].پارامتر دیگر از این سیگنال، محدوده‌ی تغییرات دامنه سیگنال می‌باشد که با توجه با حدود مجاز تغییرات ورودی‌های سیستم انتخاب می‌شود. مطابق آنچه بدان اشاره شد دو سیگنال تست APRBSبرای تحریک ورودی‌های سیستم طراحی شد. شکل‌های ۷ و ۸ سیگنال‌های طراحی شده بدین منظور را نشان می‌دهند.

۴-۳- انجام آزمایش[1]

سیگنال‌ها بعد از طراحی و آماده‌سازی در نرم‌افزار متلب به ورودی‌های سیستم اعمال شدند. برای انجام آزمایش در حالت زمان- واقعی از امکان xPc-target نرم‌افزار متلب استفاده شد. شکل ۹ پاسخ سیستم را به ورودی‌های اعمال شده نشان می‌دهد.

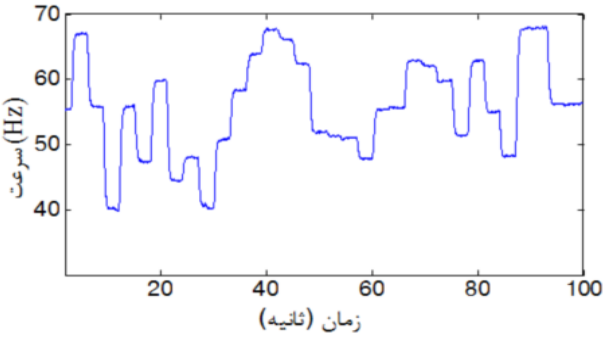


شکل ۷ سیگنال APRBS طراحی شده برای تحریک ورودی اول (موتور القایی)



شکل ۸ سیگنال APRBS طراحی شده برای تحریک ورودی دوم (سروو موتور)

1. Identification Test



شکل ۹ پاسخ سیستم به ازای اعمال ورودی‌های APRBS

۴-۴- انتخاب ساختار و مدل‌سازی

داده‌های ورودی و خروجی جمع‌آوری شده از سیستم به دو قسمت تقسیم شدند. از یک قسمت برای مدل‌سازی و از قسمت دیگر به منظور بررسی و ارزیابی مدل‌های بدست‌آمده استفاده گردید. ساختار در نظر گرفته شده برای مدل‌سازی سیستم در رابطه ۱نشان داده شده است که پارامترهای این ساختار با استفاده از جعبه‌ابزار شناسایی نرم افزار متلب بدست آمده‌اند. الگوریتم مورد استفاده در این جعبه‌ابزار، الگوریتم بر پایهٔ مشتق لونبرگ-مارکوات[2] می‌باشد.

$$y = G_1(s)u_1 + G_2(s)u_2 \qquad (۱)$$

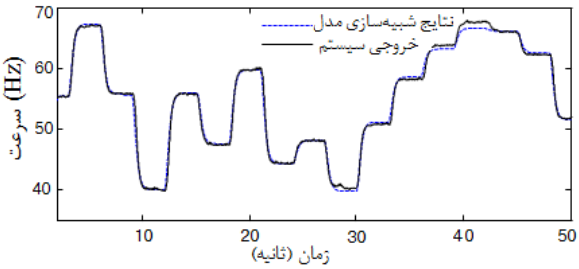
که در رابطه (۱)، روابط (۲) و (۳) برقرار می‌باشند.

$$G_1(s) = \frac{1.9423(s+111.7)}{(s+8.073)(s+8.036)(s+4.385)}e^{-0.018s} \qquad (۲)$$

$$G_2(s) = \frac{-0.17791(s+0.01522)}{(s+4.891)(s+4.688)(s+0.0004)}e^{-0.03s} \qquad (۳)$$

به‌منظور اطمینان از صحت مدل بدست آمده، مدل به وسیله قسمت دوم از داده‌های تست مورد ارزیابی قرار گرفته است که شکل ۱۰ نتایج مربوط به شبیه‌سازی مدل با استفاده از این داده‌ها را نشان می‌دهد. برای انجام مقایسه و تعیین میزان دقت مدل بدست‌آمده، از معیار "بهترین سازگاری[3]" معرفی شده در رابطه (۴)، برای مقایسه خروجی مدل با خروجیسیستم استفاده شده است. این معیار تعیین‌کننده میزان تطابق خروجی مدل با خروجی سیستم واقعی می‌باشد.

2. Levenberg-Marquardt
3. Best Fit



شکل ۱۰ شبیه‌سازی مدل بدست‌آمده برای اجزای سیستم کنترل سرعت موتور القایی

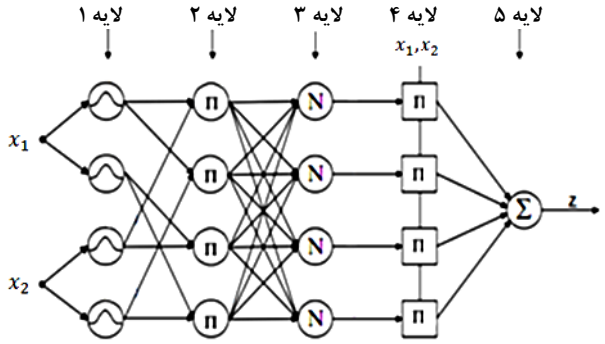
در این رابطه N برابر با تعداد داده‌ها است [۲۸]. نتیجه بدست آمده از این معیار برای مدل ارائه شده برابر با ۹۶/۳ درصد می‌باشد.

$$Best\ Fit = \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^{N}|y_i - \hat{y}_i|}{\sum_{i=1}^{N}|y_i - \bar{y}|}\right) \times 100\% \qquad (۴)$$

نتایج ارائه شده حاکی از دقت مناسب مدل بدست آمده است.

۵- کنترلر فازی- عصبی- تطبیقی

مستقل بودن کنترل کننده فازی از مدل سیستم تحت کنترل به‌ویژه هنگامی که که با عدم قطعیت در مدل، دینامیک مدل نشده و اغتشاشات ناخواسته مواجه هستیم مزیتی بزرگ محسوب می‌شود. اما یکی از مشکلات بسیار مهم در طراحی کنترل کننده‌های فازی نیاز آن به دانش فرد خبره در تنظیم پارامترها و قواعد آن می‌باشد. این واقعیت که برای بسیاری از سیستم‌های مهندسی این دانش وجود ندارد، استفاده از سیستم‌های فازی را با مشکل مواجه می‌سازد. از این‌رو استفاده از سیستم‌های هوشمند ترکیبی که مزایای سیستم‌های فازی و شبکه‌های عصبی را به‌طور یک جا دارا باشند، بسیار مفید خواهد بود. شبکه عصبی- فازی ANFIS یک شبکه تطبیقی بر اساس سیستم استنتاج فازی است که توانایی مدل‌سازی، توسط مجموعه‌ای از قواعد اگر-آنگاه با پارامترهای تطبیق‌پذیر را دارد. به‌طوری که با استفاده از روش تعلیم مناسب می‌توان این پارامترها را تنظیم نمود. شکل ۱۱ یک ساختار نمونه از ANFIS را نشان می‌دهد. در این شکل دایره‌ها نشان دهنده یک نود ثابت و مربع نشان دهندهٔ نودهای تطبیقی می‌باشد. ساختار نشان داده شده دارای ۲ ورودی x_1، x_2 و یک خروجی Z می‌باشد. همان طور که اشاره شد ANFIS از مدل‌های فازی سوگنو استفاده می‌کند.



شکل ۱۱ ساختار ANFIS

برای یک مدل سوگنوی مرتبه یک، یک مجموعه قانون معمولی با دو قاعده اگر- آنگاه به صورت زیر نوشته می‌شود:

قانون اول:

$$if\ \ x_1\ is\ A_{11}\ \ AND\, x_2\ \ is\, A_{21}\ \ then \qquad z_1 = p_1 x + q_1 y + r_1.$$

قانون دوم:

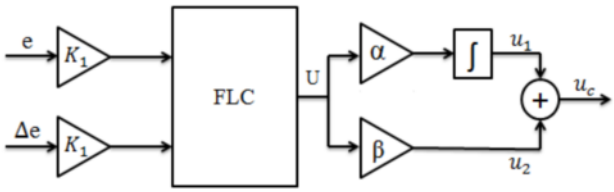
$$if\ \ x_1\ is\ A_{12}\ \ AND\, x_2\ \ is\ A_{22}\ \ then \qquad z_2 = p_2 x + q_2 y + r_2.$$

که در آن x_1 و x_2 بیانگر متغیرهای ورودی، A بیانگر مجموعه‌های فازی و p_i q_i، r_i پارامترهای خروجی می‌باشند. در ANFIS پارامترهای مربوط به مجموعه‌های فازی و پارامترهای خروجی در فرایند آموزش بدست می‌آیند.

همان طور که در شکل ۱۱ نشان داده شده است ساختار ANFIS از پنج لایه تشکیل شده است. خروجی نهاییANFIS به صورت ذیل محاسبه می‌شود.

$$O_i^4 = \sum_{i=1}^{2} \overline{w}_i z_i = \frac{w_1 z_1 + w_2 z_2}{w_1 + w_2} \qquad (۵)$$

با توجه به مطالب فوق ملاحظه می‌شود که شبکه ANFIS یک شبکهٔ تطبیقی است که نقش آن معادل یک کنترلر فازی TSK است. به‌طور کلی یک کنترلر فازی را می‌توان در فرم‌های تناسبی (P)، تناسبی- انتگرالی (PI) و یا تناسبی- انتگرالی- مشتقی (PID) در نظر گرفت. شکل ۱۲ ساختار یک کنترلر PID-FUZZY را نشان می‌دهد. این کنترلر فازی در واقع از ترکیب یک کنترلر PI و PD تشکیل شده است. همان طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است ورودی کنترلر مقدار خطا (e) و تغییرات خطا (Δe) می‌باشد. خروجی کنترلر (u_c) نیز از مجموع دو خروجی u_1 و u_2 بدست می‌آید که u_1 خروجی کنترلر PI و u_2 خروجی کنترلر PD می‌باشد [۱۳].



شکل ۱۲ ساختار کنترلر PID-ANFIS

۶- بهینه‌یابی پارامترهای کنترلر ANFIS

در این پژوهش، با توجه به تعدد پارامترهای قابل تنظیم سیستم کنترل، دست‌یابی به پارامترهایی از آن که به کمک آن بتوان پاسخ زمانی سیستم را بهبود بخشید، از طریق آزمون و خطا بسیار دشوار بوده و از این‌رو نیازمند اعمال یک روش بهینه‌یابی قدرتمند با قابلیت جستجو در فضاهای پیچیده و چندبعدی می‌باشد. همان گونه که پیشتر نیز اشاره شد، در این مقاله از الگوریتم IWO برای این منظور استفاده شده است. شکل ۱۳ بلوک دیاگرام سیستم کنترلی و چگونگی استفاده از الگوریتم IWO در بهینه‌یابی پارامترهای کنترلر ANFIS را نشان می‌دهد.

با توجه به اینکه چگونگی تعیین تابع هدف، تأثیر قابل توجهی بر نحوه همگرایی و کیفیت پاسخ‌های بدست آمده از الگوریتم‌های مبتنی بر جمعیت دارد، لذا در این بخش، پس از معرفی مکانیزم عملکردی الگوریتم IWO، در ادامه تعریفی از تابع هدف ارائه خواهد شد.

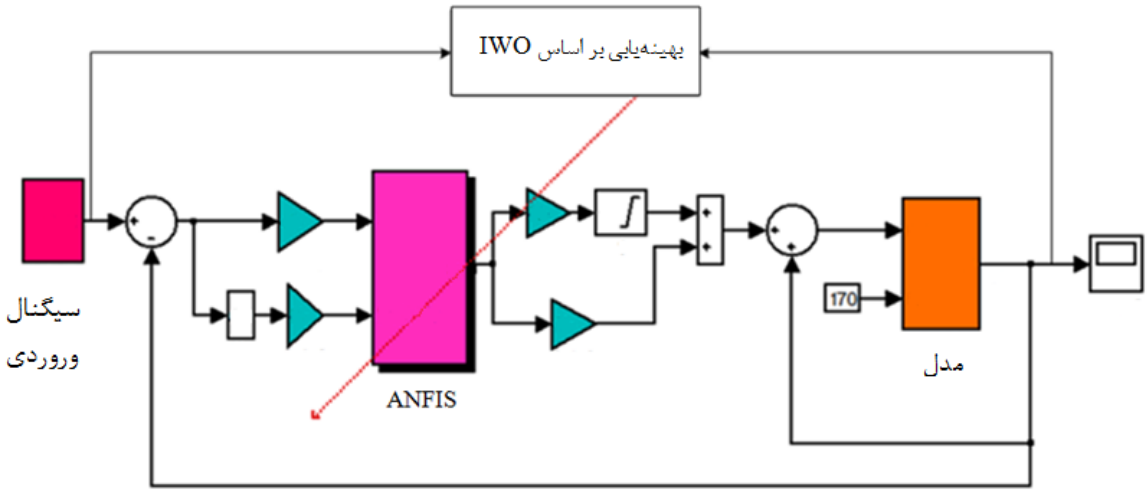
۶-۱- الگوریتم بهینه‌یابی علف‌های هرز مهاجم

الگوریتم بهینه‌یابی علف‌های هرز مهاجم که نخستین بار توسط محرابیان و همکارش [۲۹] ارائه گردید، یک ابزار بهینه‌یابی قدرتمند بر پایه تکامل تدریجی بوده و با الهام از ویژگی‌های طبیعی منحصر به فرد علف‌های هرز در تولید و انتشار بذر، در سال‌های اخیر به عنوان یک الگوریتم ساده و در عین حال کارآمد و موثر برای بهینه‌یابی در فضاهای جستجوی پیچیده توجه زیادی را به خود جلب کرده است.

در این الگوریتم، ابتدا می‌بایست متغیرهای بهینه‌یابی تعیین شده و دامنه تغییرات هریک مشخص شود. سپس تعداد معینی دانه به صورت تصادفی در فضای حل پخش می‌شوند و در ادامه با بکارگیری یک تابع هدف، میزان برازندگی هریک از دانه‌ها تعیین می‌شود. در این مرحله، هر گیاه تعداد معینی دانه تولید می‌نماید. تعداد دانه‌ای که هر گیاه مجاز است تولید کند به میزان برازندگی خود و همچنین ماکزیمم و مینیمم برازندگی کلونی علف‌های هرز بستگی داشته و این تعداد با افزایش میزان برازندگی به صورت خطی افزایش خواهد یافت. دانه‌های تولید شده توسط هر گیاه، بر اساس یک توزیع نرمال در فضای جستجو پراکنده می‌شوند. مقدار میانگین این توزیع، صفر بوده و واریانس آن از رابطه (۱)، تعیین می‌شود.

$$\sigma_{iter} = \left(\frac{iter_{max} - iter}{iter_{max}}\right)^n (\sigma_i - \sigma_f) + \sigma_f \qquad (۶)$$

در رابطه (۶)، $iter$ و $iter_{max}$ به ترتیب نشان‌دهنده تکرار و حداکثر تعداد تکرار بوده و σ_i، σ_f و σ_{iter} به ترتیب معرف واریانس اولیه، نهایی و واریانس در هر تکرار می‌باشد. پارامتر n نیز شاخص تنظیم واریانس بودهو به آن اندیس ماژولار غیرخطی گفته می‌شود و معمولاً به صورت تجربی تعیین می‌شود.



شکل ۱۳ استفاده از الگوریتم IWO در بهینه‌یابی پارامترهای کنترلر ANFIS

بر اساس رابطه (۶)، با افزایش تعداد تکرارها (با پیشرفت الگوریتم)، به منظور افزایش قدرت استخراج و کمک به همگرایی الگوریتم، از میزان واریانس کاسته خواهد شد. با گذشت چند تکرار، تعداد گیاهان موجود در فضای حل به حداکثر تعداد مجاز P_{max} می‌رسد. بنابراین تنها گیاهانی امکان بقا می‌یابند که برازندگی بیشتری داشته باشند. برای این منظور، دانه‌های پراکنده شده جدید توسط تابع هدف ارزیابی شده و به همراه گیاهان والد خود در قالب یک کلونی، بر اساس میزان برازندگی رتبه‌بندی می‌شوند. از میان گیاهان موجود، به تعداد P_{max} گیاهی که در مقایسه با سایرین از برازندگی بیشتری برخوردارند، انتخاب شده و مابقی از کلونی حذف می‌شوند.گیاهانی که شانس بقا یافته‌اند، مجدداً بازتولید شده و مراحل فوق را تکرار می‌کنند و به این ترتیب پاسخ‌های بدست آمده در هر تکرار از برازندگی بیشتری برخوردار خواهد بود. هنگامی‌که تعداد تکرارها به حداکثر تکرار مجاز برسد، این الگوریتم متوقف می‌شود.

۶-۲- تعریف تابع هدف

میزان شایستگی هر پاسخ محتمل برای حضور در تکرار بعد، با ارزیابی آن پاسخ بر مبنای یک تابع هدف تعیین می‌شود. به طور کلی تابع هدف، بر اساس اهداف و قیود مسأله، تعریف می‌شود. در این مطالعه، دست‌یابی به پاسخ زمانی مناسب از طریق مینیمم‌سازی زمان استقرار[1] و فراجهش، به عنوان اهداف بهینه‌یابی در نظر گرفته شده است.

به طور کلی به منظور دست‌یابی به زمان استقرار مناسب، روش‌های مختلفی برای تعریف تابع هدف وجود دارد که در این مقاله از معیار متداول انتگرال قدرمطلق خطا استفاده شده است. برای دست‌یابی به عملکرد بهینه می‌بایست تابع هدف تعریف شده، مینیمم شود. بنابراین با توجه به اهداف و قیود بهینه‌یابی که پیشتر معرفی شد، تابع هدف را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد.

$$Fitnessfunction = \frac{1}{\omega_1 + \omega_2}(\omega_1 \times IEA + \omega_1 \times OS)$$

$$IEA = \sum_{j=0}^{SP} |e(j)| = \sum_{j=0}^{SP} |N_{des}(j) - N(j)|$$

1. Settling Time

$$\begin{cases} OS_1 = \dfrac{N(t_{N-Max}) - N_{des}(t_{N-Max})}{N_{des}(t_{N-Max})} \\ OS_2 = \dfrac{N_{des}(t_{N-Min}) - N(t_{N-Min})}{N_{des}(t_{N-Min})} \end{cases} \rightarrow OS = \frac{OS_1 + OS_2}{2}$$

(۷)

در روابط بالا، OS، IEA، N و N_{des} به ترتیب میزان فراجهش، انتگرال قدر مطلق خطا، دور موتور و دور مطلوب را نشان می‌دهد. همچنین J، w_i و SP به ترتیب شماره گام زمانی، ضرایب وزنی و حداکثر تعداد گام‌های زمانی در کل شبیه‌سازی را نشان می‌دهد.لازم به ذکر است که t_{N-max} و t_{N-min} لحظاتی هستند که سرعت به ترتیب به حداکثر و حداقل مقدار خود می‌رسد.

۷- شبیه‌سازی

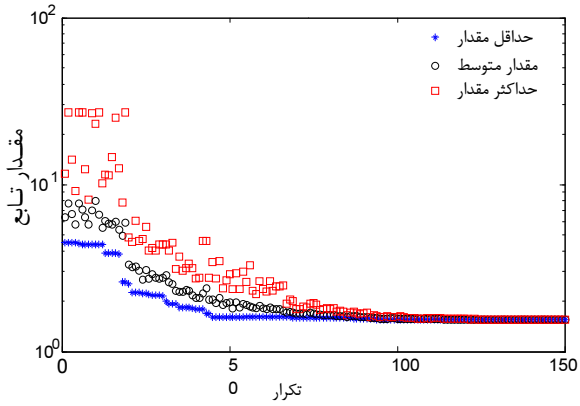
کنترلر ANFIS معرفی شده در بخش گذشته در محیط سیمولینک نرم‌افزار متلب طراحی و شبیه‌سازی شد.

در این پژوهش برای هر ورودی ۷ تابع عضویت گاوسی در نظر گرفته شده است. برای ارزیابی بهتر کنترلر ANFIS، عملکرد آن با یک کنترلر کلاسیک PIنیز مقایسه شده است. با توجه به اینکه فرایند بهینه یابی توسط الگوریتم IWO طبیعتی تصادفی دارد، به همین دلیل در این مطالعه فرایند بهینه‌یابی ۱۰ مرتبه برای دو کنترلر مورد بحث (در شرایط یکسان از نظر تابع هزینه برای هر دو کنترلر) تکرار شده و بهترین نتیجه به عنوان نتیجه نهایی ارائه شده است. جدول ۱ پارامترهای در نظر گرفته شده برای الگوریتم بهینه‌یابی را نشان می‌دهد.

شکل ۱۴ روند همگرایی تابع هدف را به ازای بهینه‌یابی با بهترین برازندگی (یکی از ۱۰ مرحله تکرار فرایند بهینه‌یابی)، برای کنترلر ANFISنشان می دهد.

جدول ۱ پارامترهای درنظر گرفته شده برای الگوریتم IWO

پارامترهای الگوریتم	مقدار پارامتر
اندازه اولیه دانه‌ها	۱۰
ماکزیمم تعداد مجاز گیاهان	۲۰
ماکزیمم تعداد تولید دانه جدید توسط یک دانه	۵
مینیمم تعداد تولید دانه جدید توسط یک دانه	۰
اندیس ماژولار غیرخطی (n)	۳
مقدار انحراف استاندارد	(دامنه تغییرات هر متغیر) × ۰/۳
معیار توقف	تعداد تکرار(۱۵۰)

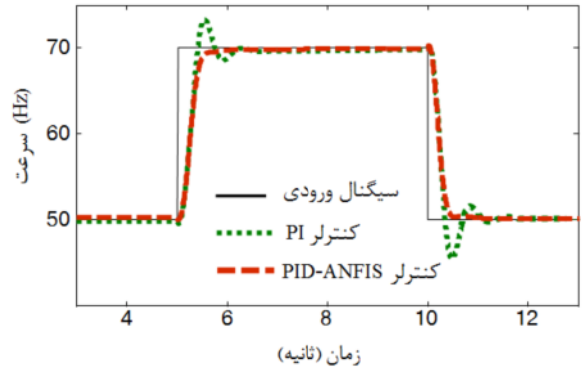


شکل ۱۴ روند همگرایی تابع هدف

شکل ۱۵ نتایج حاصل از شبیه سازی سیستم کنترل حلقه بسته موتور القایی با استفاده از کنترلرهای طراحی شده را به ازای ورودی پله نشان می‌دهد. همان طور که در این شکل مشاهده می‌شود، در فاز شبیه‌سازی، کنترلر فازی در قیاس با کنترلر کلاسیک PI از نظر پاسخ زمانی (مقدار فراجهش و زمان نشست) عملکرد به مراتب بهتری از خود نشان می‌دهد.

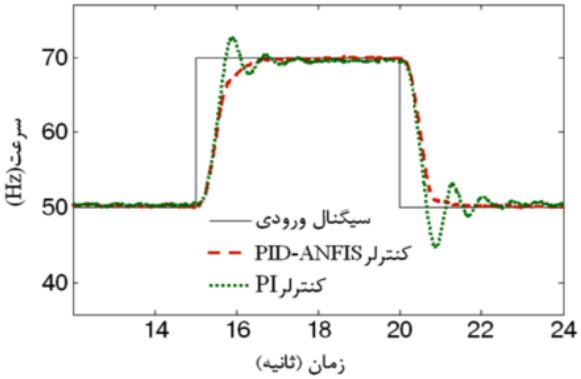
۸- نتایج مربوط به پیاده‌سازی کنترلر

شکل ۱۶ نتایج حاصل از تست و پیاده‌سازی سیستم کنترل سرعت موتور القایی با استفاده از کنترلر PID-ANFIS و کنترلر PI را نشان می‌دهد. همان گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، اگرچه عملکرد هر دو کنترلر پیاده‌سازی شده دارای افتی جزئی نسبت به شرایط شبیه‌سازی می‌باشند، اما آنچه که به سهولت قابل مشاهده است این است که کنترلر PID-ANFIS در مقایسه با کنترلر PI عملکرد به مراتب بهتری از نقطه نظر پاسخ زمانی از خود نشان می‌دهد.



شکل ۱۵ نتایج مربوط به شبیه‌سازی کنترلر ANFIS و PI

به علاوه نتایج حاکی از آن است که کنترلر PID-ANFIS در قیاس با کنترلر PI، تاثیرپذیری کمتری از عدم‌قطعیت‌های احتمالی موجود در شرایط تست (نظیر نویز سنسورها و غیره) داشته و از این‌رو می‌توان آن را مقاوم‌تر از کنترلر PI دانست.



شکل ۱۶ نتایج مربوط به پیاده‌سازی کنترلر ANFIS و PI بر روی موتور القایی

۹- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله مدل‌سازی و طراحی سیستم کنترل سرعت موتور القایی برای بکارگیری در سیستم تست واحد کنترل سوخت (FCU) موتور جت ارائه گردید. همان گونه که در ابتدا اشاره شد، جهت انجام تست سخت‌افزار در حلقه FCU با توجه به اینکه در دستگاه تست ساخته شده، موتور جت بصورت واقعی حضور ندارد، از یک موتور القایی جهت تأمین دور پمپ دنده‌ای FCU مطابق با مقدار بدست آمده از نتایج شبیه‌سازی زمان واقعی موتور توربوجت استفاده شده است. در این مطالعه ابتدا اجزای موجود در سیستم کنترل سرعت موتور القایی با توجه به شرایط دستگاه تست و به روش شناسایی سیستم مدل‌سازی شد. در ادامه با توجه به مدل بدست آمده و برای تنظیم سرعت موتور القایی، یک کنترلر PID-ANFIS در محیط نرم‌افزاری Simulink طراحی و شبیه‌سازی گردید و برای بهینه‌یابی پارامترهای آن از الگوریتم علف‌های هرز مهاجم استفاده شد.

نتایج نشان داد که در فاز شبیه‌سازی، کنترلر ANFIS در قیاس با کنترلر کلاسیک PI از نقطه نظر پاسخ زمانی (مقدار فراجهش و زمان نشست) عملکرد به مراتب بهتری از خود نشان می‌دهد. در نهایت کنترلرهای طراحی شده بر روی موتور القایی پیاده‌سازی شده و نتایج مربوط به پیاده‌سازی این کنترلرها نشان می‌دهد که اگرچه عملکرد هر دو کنترلر پیاده‌سازی شده دارای افتی جزئی نسبت به شرایط شبیه‌سازی می‌باشند، اما کنترلر PID-ANFIS تأثیرپذیری کمتری از عدم‌قطعیت‌های احتمالی موجود در شرایط تست (مانند نویز سنسورها و غیره) داشته و

همانند شرایط شبیه‌سازی، در مقایسه با کنترلر PI از عملکرد بـه مراتب بهتری از نقطه نظر پاسخ زمانی برخوردار است.

۱۰- مراجع

[1] Montazeri GH. M., Nasiri M., Jafari S., "Real-time multi-rate HIL simulation platform for evaluation of a jet engine fuel controller", *simulation modeling practice & theory*, Vol. 19, No. 3, 2011, pp. 996-1006.

[2] Montazeri GH.M., Nasiri M., Rajabi M., jamshidfard M., "Actuator-based hardware-in-the-loop testing of a jet engine fuelcontrol unit in flight conditions", *simulation modeling practice & theory*,Vol. 21, 2012, pp. 65-77.

[3] Nasiri M., *Time-delay compensation for hardware-in-the-loop testing of jet engine fuel control system*, PhD Thesis, school of Mechanical Engineering, Iran university of science and technology, Tehran, 1391. (In Persian)

[4] Cheng T., "Hardware in the loop simulation of mini type turbojet engine digital control regulator", *Journal of Aerospace Power*, Vol. 19 No. 3, pp. 383-386.

[5] Cao Y., Teng W., Zhang H., "Hardware-in-the-loop simulation for engine idle speed control based on ANFIS", *Proceedings of the World Congress on Intelligent Control and Automation (WCICA)*, 2008, pp. 3125-3130.

[6] Saleem A., Issa R., Tutunji T., "Hardware-In-the-Loop for on-line identification and controlof three-phase squirrel cage induction motors", *Simulation Modelling Practice and Theory,* Vol. 18, 2010, pp. 277-290.

[7] Astrom K.J., Hagglund T., "The future of PID control", *Control Engineering Practice*, Vol. 9, 2001, pp. 1163-75.

[8] Astrom K.J., Hagglund T., "PID controllers: theory, design, and tuning", *2nd edition, Instrument Society of America*, ISBN 1-55617-516-7, 1995.

[9] Bose B.K. "Modern Power Electronics and AC Drives", *Prentice Hall,* 2002.

[10] EI-Saady G., Shara A.M., Makky A., Sherbiny M.K., and Mohamed, G., "A high performance induction motor drive system using fuzzy logic controller", *in Proceedings, 7th Mediterranean ElectrotechnicalConerence,* Vol. 3, 1994, pp. 1058-1061

[11] Mohan N., Undeland T., and Robbins W., "Power Electronics: Converters, Applications, and Design", *John Wiley & SonsInc*, 2004.

[12] Ibrahim Z, Levi E., "A comparative analysis of fuzzy logic and PI speed controlin high-performance AC drives using experimental approach", *IEEE Transactions on Industry Applications*; Vol. 38, 2002, pp. 1210-1218.

[13] Saad N., Arrofiq M., "A PLC-based modified-fuzzy controller for PWM-driven induction motor drive with constant V/Hz ratio control", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing,*Vol. 28, 2012, 95-112.

[14] Chung H-Y., Chen B-C., Lin J-J., "A PI-type fuzzy controller with self-tuningscaling factors", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 93, 1998, pp. 23-8.

[15] Guzelkaya M., Eksin I., Yesil E., "Self-tuning of PID-type fuzzy logic controller coefficients via relative rate observer", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, Vol. 16, 2003, pp. 227-36.

[16] Karasakal O., Yesil E., Guzelkaya M., Eksin I., "Implementation of a new self-tuning fuzzy PID controller on PLC", *Turkish Journal of Electrical Engineering*, 2005, 13:277-86.

[17] Mudi R.K., Pal NR., "A robust self-tuning scheme for PI- and PD-type fuzzy controllers", *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, Vol. 7, No. 1, 1999, pp. 2-16.

[18] Mudi RK, Pal NR., "A self-tuning fuzzy PI controller", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 115, No. 2, 2000, pp. 327–338.

[19] Qiao WZ., Mizumoto M., "PID type fuzzy controller and parameters adaptive method", *Fuzzy Sets and Systems*, 1996, 78:23-35.

[20] Woo Z-W., Chung H-u., Lin J-J., "A PID type fuzzy controller with self-tuning scaling factors", *Fuzzy Sets and Systems*;Vol. 115, No. 2, 2000, pp. 321-326

[21] Jang J. S. R., "Adaptive network based fuzzy inference systems", *IEEE Transactions on systems man and cybernetics*,1993, pp. 665-685.

[22] Capolino G.A., "Non-linear Modeling and Control of Some Classes of Induction Machine", Springer, *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, Vol. 122, 1989, pp. 519-528.

[23] Yaacob S., MohamedF. A., "Black Boxmodeling of the Induction Motor", *The Thirty Seventh SICE Annual Conference(SICE '98),* 1998, pp. 883-886.

[24] Mohamed F.A., KoivoH., "Modeling of induction motor using identification Non-Linear neural network system", *SICE 2004 Annual Conference,* Vol. 2, 2004, pp. 977-982.

[25] Arrofiq M., Saad N., Noh Karsiti M., "An Identification of model for integrated variable speed drive, induction motor and dynamometer", *IEEE Symposium on Industrial Electronics and Applications (ISIEA),* 2009, pp. 337-342.

[26] ZhuY., "Multivariable system identification for processcontrol", USA, *Elsevier Science Inc*, 2001, pp. 31–37.

[27] Nelles O., "Nonlinear system identification: From classical approaches to Neural networks and Fuzzy models", *Springer*, 2001.

[28] Ljung L., "System identification toolboxTM7 user's guide", The Math Works, Inc. 2008.

[29] Mehrabian A.R. and Lucas C., "A novel numerical optimization algorithm inspired from weed colonization", *Ecological Informatics,* Vol. 1, 2006, pp. 355-366.