



بررسی پایداری سیستم سروالکترو هیدرولیک با روش کنترلی هوشمند فازی

عبدا... اکبری^۱، امیررضا زارع بیدکی^{۲*}، امیررضا حسینی^۳، مهدی علیاری شوردهلی^۴

۱- مربی گروه مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوئین زهرا، بوئین زهرا

۲- مربی مهندسی برق کنترل، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوئین زهرا، بوئین زهرا

۳- دانشجوی دکتری مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت

۴- استادیار مهندسی مکاترونیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران

* بوئین زهرا، صندوق پستی ۳۴۵۱۶۸۶۷۹۹، zare@Buinau.ac.ir

چکیده

سیستم سروالکترو هیدرولیک به دلیل عملکرد مناسب در گشتاور اینرسی بار بالا و همچنین دست‌یابی به سرعت پاسخ سریع در محدوده وسیعی از کاربردهای صنعتی مدرن مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به طیف گسترده کاربرد این سیستم، موضوع کنترل شامل کنترل سرعت، کنترل موقعیت و کنترل گشتاور در آن از اهمیت خاصی برخوردار است. روش‌های پیشنهادی که برای کنترل سیستم ارائه شده‌اند با در نظر گرفتن یک سری عوامل عدم قطعیت در سیستم بوده که می‌توان به وجود اصطکاک داخلی، شار داخلی، اثر غیر خطی مدل و نویز خارجی اشاره کرد. در این مقاله از یک کنترل کننده هوشمند فازی با استفاده از روش جبران توزیع شده به صورت موازی و بر پایه مدل تاکاگی سوگنو استفاده شده است. نتایج تحقیق حاضر در مقایسه با سایر کنترل کننده‌ها عملکرد بهتری در پاسخگویی سیستم (کنترل سرعت) نشان می‌دهد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۸ اسفند ۱۳۹۱

پذیرش: ۱۴ اردیبهشت ۱۳۹۲

ارائه در سایت: ۲۱ اردیبهشت ۱۳۹۳

کلید واژگان:

سیستم سروالکترو هیدرولیک

روش نامساوی ماتریس خطی

روش جبران توزیع شده به صورت موازی

Investigation of the stability of electro hydraulic servo system using fuzzy intelligent controller

Abdulah Akbari¹, Amir Reza Zare Bidaki^{1*}, Amir Reza Hosseini², Mehdi Aliyari Shoredeli³

1- Department of Mechanical Engineering, Buinzahra Branch, Islamic Azad University, Buin Zahra, Iran

2- Mechanical Engineering, Guilan University, Rasht, Iran

3- Mechanical Engineering, Khaje Nasir University, Tehran, Iran

*P.O.B. 3451686799 Bueinzahra, Iran. zare@Buinau.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 18 March 2013
Accepted 04 May 2013
Available Online 11 May 2014

Keywords:

Electro Hydraulic Servo Systems
Linear Matrix Inequality Approach
Parallel Distributed Compensator Approach

ABSTRACT

Electro hydraulic servo systems (EHSS) are widely used in all aspects of industry, due to their ability to handle large torque loads and quick response. According to the wide range of use, the desired control objectives for EHSS are: velocity, force/torque and position control. Existing approaches for control of electro hydraulic servo systems are in the presence of external noises, internal friction and non-linearity in the model behavior which is considered as uncertainty parameters. In this paper fuzzy intelligent controller by using parallel distributed compensator (PDC) method based on Takagi-Sugeno is used. The controller is designed for a high level performance (velocity control) which could reach the main control goals. The concluding results of this approach best fit the other researches data.

۱- مقدمه

الکتريکی می‌توان به مواردی نظیر ۱- طراحی ساده، ۲- قابلیت افزایش نیرو، ۳- سادگی و دقت کنترل، ۴- انعطاف پذیری، ۵- راندمان بالا و ۶- اطمینان اشاره کرد. از مزایای دیگر سیستم‌های هیدرولیک و نیوماتیک به سایر سیستم‌های مکانیکی آن است که قطعات محرک کمتری دارند و می‌توانند در هر نقطه به حرکت‌های خطی یا دورانی با قدرت بالا و کنترل مناسب دست یابند، چون انتقال قدرت توسط جریان سیال پرفشار در خطوط انتقال (لوله‌ها و شلنگ‌ها) صورت می‌گیرد، در صورتی که در سایر سیستم‌های مکانیکی برای انتقال قدرت از اجزایی مانند بادامک، چرخ دنده، گاردان، اهرم، کلاچ و غیره استفاده می‌شود. در این سیستم‌ها می‌توان با اعمال نیروی کمی (مانند باز و بسته کردن شیرها) وظیفه کنترلی را انجام داد.

امروزه در بسیاری از فرایندها، انتقال قدرت به صورت کم‌هزینه و با دقت زیاد مورد نظر است. از این رو استفاده از سیال تحت فشار در انتقال و کنترل قدرت در تمامی شاخه‌های صنعت رو به گسترش است. استفاده از قدرت سیال به دو شاخه تقسیم می‌شود: ۱- هیدرولیک، ۲- نیوماتیک. از نیوماتیک در مواردی که نیروهای نسبتاً پایین (حدود یک تن) و سرعت‌های حرکتی بالا نیاز باشد (نظیر سیستم‌هایی که در قسمت محرک ربات‌ها بکار می‌روند) استفاده می‌شود، در صورتی که سیستم‌های هیدرولیک در موارد قدرت بالا و سرعت‌های کنترل شده دقیق (نظیر جک‌های هیدرولیک، ترمز و فرمان هیدرولیک) بکار می‌روند. از مزایای سیستم‌های هیدرولیک و نیوماتیک نسبت به سیستم‌های مکانیکی و

Please cite this article using:

A. Akbari, A.R. Zare Bidaki, A.R. Hosseini, M. Aliyari Shoredeli, Investigation of the stability of electro hydraulic servo system using fuzzy intelligent controller, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 2, pp. 36-42, 2014 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

کنترلی بسیاری برای کنترل این سیستم در دهه‌های اخیر پیشنهاد شده است که می‌توان به روش‌های کنترل غیر خطی [۱]، روش شبکه نرو فازی [۴]، روش هوشمند و شبکه عصبی [۵،۶] و روش ترکیبی مود لغزشی با شبکه نرو فازی [۷] اشاره کرد. روش بکار گرفته شده در این مقاله توانسته است با موفقیت به اهداف کنترلی که مهمترین آنها زمان نشست مناسب و سیگنال کنترلی قابل دسترس می‌باشد دست یابد. کنترل کننده هوشمند فازی با استفاده از روش جبران توزیع شده به صورت موازی و بر پایه مدل تاکاگی سوگنو استفاده شده است. هدف از بکارگیری این کنترل کننده بهبود در عملکرد پاسخ سیستم (کنترل سرعت) بوده است که توانسته است به خوبی به اهداف کنترلی دست یابد.

ساختار کنترلی بر مبنای تبدیل سیستم غیر خطی و تبدیل آن به زیر سیستم‌های خطی است که قوانین اگر و آنگاه فازی بر مبنای زیر سیستم‌های خطی بدست می‌آیند، همچنین سیگنال کنترلی بر مبنای قواعد بدست آمده از زیر سیستم خطی است. قانون به کار گرفته شده در قوانین سیگنال کنترلی با بکارگیری از فیدبک حالت است. قابل ذکر است که بهره‌های فیدبک حالت از طریق روش نامساوی ماتریس خطی بدست می‌آید که تضمین کننده پایداری کنترل کننده است.

این مقاله به ترتیب زیر آماده شده است: در بخش ۲ شماتیک و مدل ریاضی غیر خطی سیستم سروالکتروهیدرولیک توصیف شده است. در بخش ۳ طراحی کنترل کننده با روش جبران توزیع شده به صورت موازی و بر پایه مدل تاکاگی سوگنو معرفی شده است. در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی شده برای آزمون قابلیت‌های کنترل کننده مورد نظر ارائه گردیده و در نهایت در بخش ۵، مطالب و داده‌های موجود در این مقاله جمع بندی و نتیجه‌گیری شده است.

۲- توصیف سیستم

شکل ۱ شماتیک مربوط به یک سیستم سروالکتروهیدرولیک و دینامیک سرعت را نمایش می‌دهد.

قسمت‌های اصلی این سیستم عبارتند از: ۱- منبع انرژی الکتریکی، ۲- آکومولاتور، ۳- شیر شارژ، ۴- فشارسنج، ۵- فیلتر، ۶- شیر الکتریکی دو حالت، ۷- موتور هیدرولیکی، ۸- دستگاه اندازه‌گیری سرعت، ۹- کامپیوتر کنترل کننده و ۱۰- میدل ولتاژ به جریان.

همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، ابتدا کامپیوتر یک ولتاژ کنترلی تولید نموده که توسط میدل ولتاژ به جریان، به جریان تبدیل می‌شود. این جریان الکتریکی باعث جابجایی شیر الکتروهیدرولیکی شده و این جابجایی باعث تغییر فشار هوا در خروجی شیر الکتریکی می‌شود که با تغییرات فشار هوا، می‌توان سرعت موتور هیدرولیکی را تنظیم کرد. قابل ذکر است که این سیستم الکتروهیدرولیکی علاوه بر استفاده از هوا جهت تنظیم سرعت موتور، توسط روغن نیز می‌تواند این کار را انجام دهد. با بکارگیری قانون دوم نیوتن معادلات فضای حالت سیستم برای حرکت چرخشی شفت موتور به صورت زیر محاسبه می‌شود.

در روابط فوق، x_1 سرعت زاویه‌ای موتور، x_2 فشار تفاضلی بار و x_3 جابجایی شیر^۱ است.

همچنین مقادیر نامی پارامترها به صورت زیر می‌باشند:

هدف از کنترل این سیستم، کنترل پایداری برای هر نقطه کاری سیستم می‌باشد. به سادگی می‌توان نشان داد که نقطه تعادل سیستم به صورت زیر است:

سیستم‌های هیدرولیک و نیوماتیک به خاطر اصطکاک کم و هزینه پایین دارای راندمان بالایی هستند. همچنین با استفاده از شیرهای اطمینان و سوئیچ‌های فشاری و حرارتی می‌توان سیستمی مقاوم در برابر بارهای ناگهانی، حرارت یا فشار بیش از حد ساخت که نشان از اطمینان بالای این سیستم‌ها دارد.

اکنون با روشن شدن مزیت‌های سیستم‌های هیدرولیک و نیوماتیک به توضیح ساده‌ای در مورد نحوه کار این سیستم‌ها پرداخته می‌شود. برای انتقال قدرت به یک سیال تحت فشار (تراکم‌پذیر یا تراکم‌ناپذیر) نیاز است که توسط پمپ‌های هیدرولیک می‌توان نیروی مکانیکی را تبدیل به قدرت سیال تحت فشار نمود. مرحله بعد انتقال نیرو به نقطه دلخواه است که این وظیفه را لوله‌ها، شلنگ‌ها و بست‌ها به عهده می‌گیرند. بعد از کنترل فشار و تعیین جهت جریان توسط شیرهای سیال تحت فشار به سمت عملگرها (سیلندرها یا موتورهای هیدرولیک) هدایت می‌شوند تا قدرت سیال به نیروی مکانیکی مورد نیاز (به صورت خطی یا دورانی) تبدیل شود. اساس کار تمام سیستم‌های هیدرولیکی و نیوماتیکی بر اساس قانون پاسکال استوار است. کارکرد سیستم‌های نیوماتیک مشابه سیستم‌های هیدرولیک است فقط در آن به جای سیال تراکم‌ناپذیر مانند روغن از سیال تراکم‌پذیر مانند هوا استفاده می‌کنند. در سیستم‌های نیوماتیک برای دست یافتن به یک سیال پر فشار، هوا را توسط یک کمپرسور فشرده کرده تا به فشار دلخواه برسد. سپس آن را در یک مخزن ذخیره می‌کنند، البته دمای هوا پس از فشرده شدن به شدت بالا می‌رود که می‌تواند به قطعات سیستم آسیب برساند. لذا هوای فشرده قبل از هدایت به خطوط انتقال قدرت باید خنک شود. به دلیل وجود بخار آب در هوای فشرده و پدیده میعان در فرایند خنک‌سازی باید از یک واحد بهینه‌سازی برای خشک کردن هوای پر فشار استفاده کرد.

یک سیستم هیدرولیکی دارای ۴ بخش اصلی می‌باشد که عبارتند از: ۱- مخزن: جهت نگهداری سیال، ۲- پمپ: به منظور به راه انداختن سیال در سیستم که توسط الکترو موتور صورت می‌گیرد، ۳- شیرها: برای کنترل فشار، جریان و جهت حرکت سیال، ۴- عملگرها: به منظور تبدیل انرژی سیال تحت فشار به نیروی مکانیکی مولد کار. اگر چه تمامی این کنترل کننده‌ها توانسته‌اند با موفقیت به اهداف کنترلی دست یابند، ولی در این روش‌ها آنقدر مقدار سیگنال کنترلی زیاد است که قابل دسترسی نمی‌باشد و یا در برخی مواقع میزان زمان نشست برای دست‌یابی به پاسخ مورد نظر بالا می‌باشد. سیستم‌ها را معمولاً با مدل فضای حالت نمایش می‌دهند که هر متغیر حالت، بیانگر یک حالت خاص از سیستم می‌باشد. برای یک سیستم خطی می‌توان مدل‌های مختلفی از فضای حالت را نمایش داد. برای سیستم سروالکتروهیدرولیک مدل‌های متفاوتی با توجه به اهداف کنترلی معرفی شده‌اند که از معروف‌ترین مدل‌ها می‌توان به مدل جوانوویچ [۱] اشاره کرد. سیستم سروالکتروهیدرولیک یک سیستم غیر خطی است پس در توصیف مدل سیستم به صورت فضای حالت یک سری عدم قطعیت در مدل لحاظ می‌شود. قابل ذکر است که کنترل سیستم سروالکتروهیدرولیک با حضور شار غیر خطی و اصطکاک داخلی انجام شده است [۱]. این سیستم در گشتاور بالا و دست‌یابی به پاسخ سریع و دقت بالا، به طور وسیعی در هواپیماهای تجاری، ماهواره‌ها، سیمولاتورهای پرواز، کنترل توربین و بی‌شماری از کاربردهای نظامی دیگر مورد استفاده قرار گرفته است. [۲،۳].

موضوع کنترل سیستم سروالکتروهیدرولیک در دو کلاس مورد بررسی قرار می‌گیرد: ۱- کنترل موقعیت ۲- کنترل سرعت یا گشتاور. تکنیک‌های

که جابجایی شیر نیز دو جهت باشد. بنابراین همواره $x_3 > 0$ خواهد بود. این امر به آن معناست که در حالت سکون $x_3 = 0$ است و در حالت گردش $x_3 > 0$ می‌باشد.

۳- ساختار پیشنهادی برای کنترل سرعت سیستم سروالکتروهیدرولیک

۳-۱- مدل فازی تاکاگی سوگنو

روش طراحی با ارائه یک سیستم غیر خطی با مدل فازی تاکاگی سوگنو می‌باشد. مدل فازی تاکاگی سوگنو با قوانین اگر و آنگاه فازی توصیف می‌شود [۸،۹]. ویژگی اصلی مدل فازی تاکاگی سوگنو بیان دینامیک‌های محلی قوانین مفهوم فازی با یک مدل سیستم خطی است. روی هم رفته مدل فازی سیستم با مدل‌های سیستم خطی دست یافتنی است. قوانین مدل فازی تاکاگی سوگنو با توجه به سیستم‌های فازی پیوسته^۱ و سیستم‌های فازی گسسته^۲ تفکیک شده‌اند:

* سیستم‌های فازی پیوسته:

قانون مدل فازی (i):

اگر $Z_1(t) = M_{i1}$ و $Z_2(t) = M_{i2}$ و ... و $Z_r(t) = M_{ip}$ آنگاه رابطه (۷) برقرار است.

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) \\ y(t) = C_i x(t) \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (7)$$

* سیستم‌های فازی گسسته:

اگر $Z_1(t) = M_{i1}$ و $Z_2(t) = M_{i2}$ و ... و $Z_p(t) = M_{ip}$ آنگاه می‌توان رابطه (۸) را نوشت.

$$\begin{cases} x(t+1) = A_i x(t) + B_i u(t) \\ y(t) = C_i x(t) \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (8)$$

به طوری که شرایط زیر برقرارند:

$$A_i \in \mathbb{R}^{n \times n} \quad \text{و} \quad x(t) \in \mathbb{R}^n$$

$$B_i \in \mathbb{R}^{n \times m} \quad \text{و} \quad u(t) \in \mathbb{R}^m$$

$$C_i \in \mathbb{R}^{q \times n} \quad \text{و} \quad y(t) \in \mathbb{R}^q$$

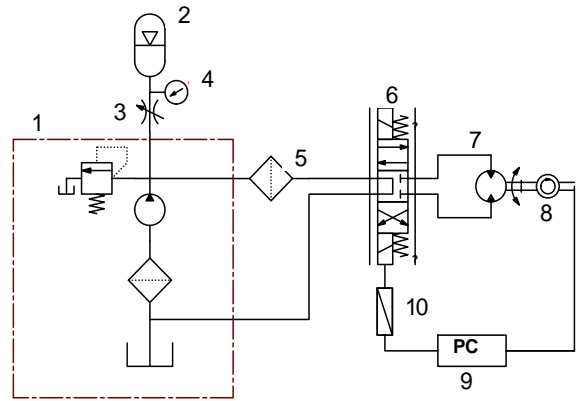
$Z_1(t), \dots, Z_p(t)$ متغیرهای فرضی و r تعداد قوانین فازی و M_{ij} مقدار فازی است. در اینجا $Z(t)$ بردار در نظر گرفته شده و به متغیرهای $Z_1(t), \dots, Z_p(t)$ تفکیک شده است. متغیرهای فرضی تابعی از متغیرهای ورودی $u(t) \in \mathbb{R}^m$ نیستند. این فرض به دلیل دوری از پیچیدگی فرایند غیر فازی سازی در کنترل کننده‌های فازی است. هر معادله خطی ارائه شده با $A_i x(t) + B_i u(t)$ یک زیر سیستم^۳ نامیده می‌شود. خروجی سیستم فازی با توجه به جفت $(x(t), u(t))$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

* سیستم‌های فازی پیوسته:

$$\dot{x}(t) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t)) \{A_i x(t) + B_i u(t)\}}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} =$$

$$\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \{A_i x(t) + B_i u(t)\} \quad (9)$$

$$y(t) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t)) \{C_i x(t)\}}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \{C_i x(t)\} \quad (10)$$



شکل ۱ سیستم سروالکتروهیدرولیک

$$\dot{x}_1 = \frac{1}{J_t} \{-B_m x_1 + q_m x_2 - q_m c_f p_s\} \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{2\beta_e}{V_o} \{-q_m x_1 - c_{im} x_2 - c_d w x_3 \sqrt{\frac{1}{\rho}(p_s - x_2)}\} \quad (2)$$

$$\dot{x}_3 = \frac{1}{T_r} \{-x_3 + \frac{K_r}{K_q} u\} \quad y = x_1 \quad (3)$$

مجموع ممان اینرسی موتور و بار رجوع شده به شفت موتور $J_t = 0.03 \text{ kgm}^2$

$$q_m = 7.96 \times 10^{-7} \frac{\text{m}^3}{\text{rad}} \quad \text{جابجایی حجمی موتور}$$

$$B_m = 1.1 \times 10^{-3} \text{ Nms} \quad \text{ضریب ویسکوزیته}$$

$$c_f = 0.104 \quad \text{ضریب اصطکاک داخلی}$$

$$V_o = 1.2 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \quad \text{حجم سیلندر موتور}$$

$$\beta_e = 1.391 \times 10^9 \text{ Pa} \quad \text{ضریب حجمی کاری سیستم}$$

$$c_d = 0.61 \quad \text{ضریب تخلیه}$$

$$c_{im} = 1.69 \times 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{Pa} \cdot \text{s}} \quad \text{ضریب افت موتور در داخل}$$

$$p_s = 10^7 \text{ Pa} \quad \text{فشار منبع}$$

$$\rho = 850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \quad \text{چگالی روغن}$$

$$T_r = 0.01 \text{ s} \quad \text{ثابت زمانی شیر}$$

$$K_r = 1.4 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s} \cdot \text{v}} \quad \text{بهره شیر}$$

$$K_q = 1.66 \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad \text{بهره شار شیر}$$

$$w = 8\pi \times 10^{-3} \text{ m} \quad \text{گرادیان سطح}$$

در حالی که میزان سیگنال کنترلی لازم برای نگه داشتن x_3 در نقطه تعادل به صورت رابطه (۶) می‌باشد:

$$x_{1N} = 200 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \quad (4)$$

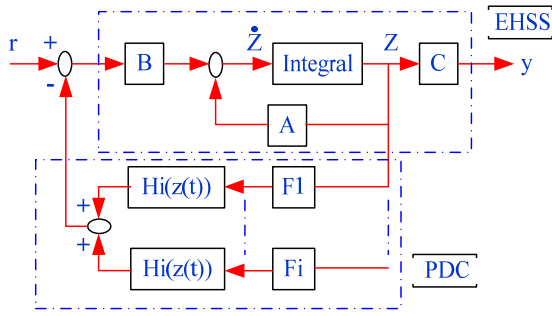
$$x_{2N} = \frac{1}{q_m} \{B_m x_{1N} + q_m p_s c_f\} \quad (4)$$

$$x_{3N} = \frac{q_m x_{1N} + c_{im} x_{2N}}{c_d w \sqrt{\frac{1}{\rho}(p_s - x_{2N})}} \quad (5)$$

$$u_N = \frac{K_q}{K_r} x_{3N} \quad (6)$$

از آنجا که در بحث کنترلی می‌توان جهت چرخش موتور را همواره در یک جهت فرض کرد، یعنی $x_1 > 0$ (که این یک فرض واقعی می‌باشد)، لزومی ندارد

1- Continuous Fuzzy System
2- Discrete Fuzzy System
3- Subsystem



شکل ۳ شماتیک کنترل کننده با استفاده از روش PDC برای سیستم سروالکتروهیدرولیک

در این فصل سیستم غیر خطی با مدل فازی تاکاگی سوگنو و کنترل کننده فازی طراحی شده با مفهوم جبران سازی موازی توزیع یافته (PDC) ارائه شده است.

قبل از شروع طراحی، از تغییر متغیر زیر استفاده می‌شود:

$$z_i = x_i - x_{in} \quad \forall i = 1, 2, 3$$

$$v = u - u_N \quad (16)$$

بنابراین معادلات فضای حالت با توجه به فرض یک جهت بودن چرخش موتور و تغییر متغیر داده شده به صورت زیر بازنویسی می‌شود:

$$\dot{z}_1 = \frac{1}{J_t} \{-B_m z_1 + q_m z_2\}$$

$$\dot{z}_2 = \frac{2\beta_e}{V_0} \{-q_m z_1 - (c_{im} + \gamma(z_2)) z_2 + c_d W x_3 \sqrt{\frac{1}{\rho} (p_s - x_{2N} - z_2)}\}$$

$$\dot{z}_3 = \frac{1}{T_r} \{-z_3 + \frac{K_r}{K_q} v\} \quad (17)$$

در حالی که:

$$\gamma(z_2) = \frac{c_d W x_{3N}}{\sqrt{\rho(p_s - x_{2N} - z_2)} + \sqrt{\rho(p_s - x_{2N})}} \geq 0$$

در این جا $x(0)=0$ فرض شده است و با توجه به این که متغیرهای $x_i > 0$ و $x_3 > 0$ در نظر گرفته شده است، می‌توان متغیرهای فضای حالت را به صورت زیر بیان کرد:

$$\{x_1, x_2, x_3\} \in [0, x_{1max}] \times [0, p_s] \times [0, x_{3max}]$$

که در آن:

$$x_{1max} = 404 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, p_s = 10^7 \text{Pa}, x_{3max} = 4 \times 10^{-4} \text{m}$$

با توجه به این که تغییر متغیر داده شده است و معادلات فضای حالت به فرم معادله (۱۷) تعریف شده است، داریم:

$$\{z_1, z_2, z_3\} \in [-x_{1N}, x_{1max} - x_{1N}] \times [-x_{2N}, p_s - x_{2N}] \times [-x_{3N}, x_{3max} - x_{3N}]$$

در قدم بعدی یک مدل فازی تاکاگی سوگنو بر پایه مفهوم جبران کننده توزیع موازی برای سیستم سروالکتروهیدرولیک طراحی می‌شود.

با توجه به معادله (۱۷) سیستم دارای دو ترم غیر خطی است:

$$q_1(t) = \gamma(z_2)$$

$$q_2(t) = \sqrt{\frac{1}{\rho} (p_s - x_{2N} - z_2)}$$

ولی به دلیل سادگی و کاهش تعداد توابع تعلق در اینجا فقط متغیر حالت Z_2 بعنوان ترم غیر خطی در نظر گرفته شده است. پس می‌توان رابطه (۱۸) را نوشت.

* سیستم‌های فازی گسسته:

$$x(t+1) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t)) \{A_i x(t) + B_i u(t)\}}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} = \frac{\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \{A_i x(t) + B_i u(t)\}}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} \quad (11)$$

$$y(t) = \frac{\sum_{i=1}^r w_i(z(t)) \{C_i x(t)\}}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} = \frac{\sum_{i=1}^r h_i(z(t)) \{C_i x(t)\}}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} \quad (12)$$

که در آن:

$$z(t) = [z_1(t) \ z_2(t) \ \dots \ z_p(t)]$$

$$w_i(z(t)) = \prod_{j=1}^p M_{ij}(z_j(t)), h_i(z(t)) = \frac{w_i(z(t))}{\sum_{i=1}^r w_i(z(t))} \quad (13)$$

به ازای همه زمان‌ها، ترم $M_{ij}(z_j(t))$ اندازه تابع تعلق $Z_j(t)$ در M_{ij} است. از این رو می‌توان رابطه (۱۴) را نوشت.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^r w_i(z(t)) > 0 \\ w_i(z(t)) \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, r \end{cases} \quad (14)$$

و به ازای تمامی زمان‌ها رابطه (۱۵) برقرار است.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) = 1 \\ h_i(z(t)) \geq 0 \quad i = 1, 2, \dots, r \end{cases} \quad (15)$$

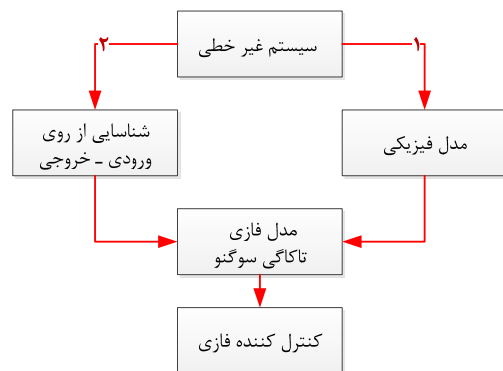
۳-۲- ساختار مدل فازی

شکل ۲ به تشریح رهیافت طراحی مدل پایه‌ای کنترل فازی می‌پردازد. طراحی کنترل فازی نیازمند یک مدل تاکاگی سوگنو فازی برای یک سیستم غیرخطی است. بنابراین ارائه ساختار مدل فازی و روش پایه‌ای مهم است. به طور جامع دو راهکار برای ساختار مدل فازی وجود دارد: ۱- شناسایی (مدل کردن فازی) با بکارگیری از داده‌های ورودی - خروجی، ۲- استنتاج از معادلات غیر خطی سیستم.

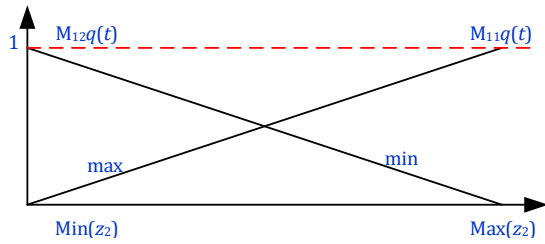
۳-۳- طراحی کنترل کننده فازی با استفاده از روش جبران سازی

توزیع یافته موازی

شماتیک کلی کنترل کننده با استفاده از روش جبران سازی موازی توزیع یافته برای سیستم سرو در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۲ مدل پایه‌ای طراحی کنترل فازی



شکل ۴ توابع تعلق $M_{11}q(t)$ و $M_{12}q(t)$

قانون اول کنترل:

$$u(t) = -F_1 z(t) \text{ اگر } q(t) = \min$$

و قانون دوم کنترل:

$$u(t) = -F_2 z(t) \text{ اگر } q(t) = \max$$

۳-۴- طراحی کنترل کننده فازی تاکاگی سوگنو پایدار با روش نامساوی ماتریس خطی

برای طراحی کنترل کننده پایدار با کمک شرایط لیاپونوف برای هر مدل یک سری نامعادله به دست می‌آید که به کمک نامساوی ماتریس خطی شرط کافی پایداری و ماتریس فیدبک حالت حاصل می‌شود. این نامعادلات در حالت کلی به صورت زیر می‌باشند:

$$X > 0$$

$$-(AX + XA') + (BM + M'B') > 0$$

$$M = FX^{-1}, X = P^{-1} \quad (23)$$

بنابراین بهره‌های $[F_1, F_2]$ با حل معادلات (۲۳) در نامساوی ماتریس خطی به صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$F_1 = [0.0116 \quad 0.1025e-13 \quad -0.2658e-4]$$

$$F_2 = [0.0036 \quad .032e-13 \quad -0.2658e-4]$$

با بکارگیری روش نامساوی ماتریس خطی، ماتریس p بدست آمده پایداری کنترل کننده و عملکرد آن را تضمین می‌کند.

$$p = \begin{pmatrix} 637 \times 10^7 & 0.0114 \times 10^{-7} & 1 \\ 0.0114 \times 10^{-7} & 1 \times 10^{-20} & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix} > 0,$$

۴- نتایج شبیه‌سازی شده

در این مقاله نتایج تحلیل کنترل کننده فازی با در نظر گرفتن شرایط اولیه زیر بدست آمده است:

$$x_{1N} = 200 \frac{\text{rad}}{\text{s}}, x(0) = 0$$

در حدود ۳ ثانیه سرعت سیستم به 200 rad/s می‌رسد. در ضمن پاسخ سیستم بدون فرآهش است که نشان دهنده آن است که از لحاظ کنترلی بسیار خوب عمل کرده است. همچنین سیگنال کنترلی، مناسب و با تغییرات نرمی به مقدار نامی خود رسیده است. شکل ۵ نشان دهنده خروجی سیستم سروالکترومیدرولیک است.

نشان دهنده خروجی سیستم سروالکترومیدرولیک است.

۴-۱- مقایسه کنترل کننده طراحی شده با سایر کنترل کننده‌ها

به منظور نشان دادن مزیت کنترل کننده ارائه شده نسبت به کنترل کننده‌های پیشین، نتایج حاصل از عملکرد این کنترل کننده با نتایج کنترل کننده‌های شبکه نروفازی، شبکه عصبی، کنترل ترکیبی مود لغزشی با شبکه نروفازی و کنترل کننده غیر خطی مقایسه شده است.

$$q(t) = z_2(t) \quad (18)$$

بنابراین مدل فازی تاکاگی سوگنو بر مبنای معادله (۱۷) به صورت زیر تعریف می‌شود:

قانون اول کنترل:

$$\dot{z} = A_{\min} z(t) + B_{\min} v(t) \text{ اگر } q(t) = \min \text{ که در آن:}$$

$$A_{\min} = \begin{pmatrix} -\frac{B_m}{J_t} & \frac{q_m}{J_t} & 0 \\ R_1 & R_2 & R_3 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_r} \end{pmatrix}$$

$$R_1 = \frac{-2\beta_c q_m}{V_o}$$

$$R_2 = \frac{-2\beta_c}{V_o} (c_{im} + \min(z_2))$$

$$R_3 = \frac{2\beta_c}{V_o} (c_{dw} \min(z_2))$$

$$B_{\min} = \frac{K_r}{K_q T_r} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

و قانون دوم کنترل:

$$\dot{z} = A_{\max} z(t) + B_{\max} v(t) \text{ اگر } q(t) = \max \text{ که در آن:}$$

$$A_{\max} = \begin{pmatrix} -\frac{B_m}{J_t} & \frac{q_m}{J_t} & 0 \\ R_4 & R_5 & R_6 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_r} \end{pmatrix}$$

$$R_4 = \frac{-2\beta_c q_m}{V_o}$$

$$R_5 = \frac{-2\beta_c}{V_o} (c_{im} + \max(z_2))$$

$$R_6 = \frac{2\beta_c}{V_o} (c_{dw} \max(z_2))$$

$$B_{\max} = \frac{K_r}{K_q T_r} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

حال این مدل فازی تاکاگی سوگنو دقیقاً سیستم غیر خطی را در ناحیه $[-X_{2N}, p_s - X_{2N}]$ بر روی متغیر z_2 ارائه می‌دهد. میزان ماکزیمم و مینیمم $q(t)$ را می‌توان به صورت رابطه (۱۹) ارائه داد.

$$q(t) = z_2(t) = M_{11}q(t) \cdot \min(z_2) + M_{12}q(t) \cdot \max(z_2) \quad (19)$$

که در آن رابطه (۲۰) برقرار است.

$$\min z_2 = -1.3164 \times 10^6, \max z_2 = 7.6836 \times 10^6$$

$$M_{11}q(t) + M_{12}q(t) = 1 \quad (20)$$

بنابراین می‌توان توابع تعلق را از روابط (۱۹) و (۲۰) بدست آورد:

$$M_{11}q(t) = \frac{1.3164 \times 10^6 + q(t)}{9 \times 10^6} \quad (21)$$

$$M_{12}q(t) = \frac{7.6836 \times 10^6 + q(t)}{9 \times 10^6} \quad (22)$$

در شکل ۴ توابع تعلق نمایش داده شده است.

در روش جبران توزیع یافته موازی به ازای هر مدل قانون نظیر آن قانون کنترل در نظر گرفته می‌شود که به صورت زیر تعریف می‌شود:

در تمامی کنترل کننده‌ها خروجی مطلوب برای سیستم سروالکترو هیدرولیک برابر ۲۰۰ رادیان بر ثانیه در نظر گرفته شده و هدف دسترسی به این میزان سرعت در زمان نشست مناسب و با سیگنال کنترلی قابل دسترس می‌باشد. با مقایسه روش ارائه شده در این مقاله با روش‌های دیگر می‌توان مزایای کنترل کننده جبران سازی توزیع یافته موازی را به صورت زیر خلاصه کرد:

بهبود در سیگنال کنترلی u : در کنترل کننده جبران سازی توزیع یافته موازی سیگنال کنترلی نسبت به روش‌های کنترلی از جمله کنترل کننده شبکه نروفازی، شبکه عصبی، کنترل ترکیبی مود لغزشی با شبکه نروفازی و همچنین کنترل کننده غیر خطی دارای دامنه کمتر و مناسبتر برای پیاده‌سازی‌های عملی می‌باشد.

بهبود در زمان نشست: روش جبران سازی توزیع یافته موازی نسبت به بقیه کنترل کننده‌های طراحی شده زمان نشست کمتری دارد. البته باید اشاره داشت که در روش ترکیبی مود لغزشی با شبکه نروفازی زمان نشست ۲ ثانیه حاصل خواهد شد، ولی باید در نظر داشت که سیگنال کنترلی که در این روش تولید شده است غیر قابل دسترسی و خارج از اعتبار می‌باشد زیرا حداکثر میزان سیگنال کنترلی که می‌توان برای سیستم سرو در نظر گرفت در بازه صفر تا پنج ولت است.

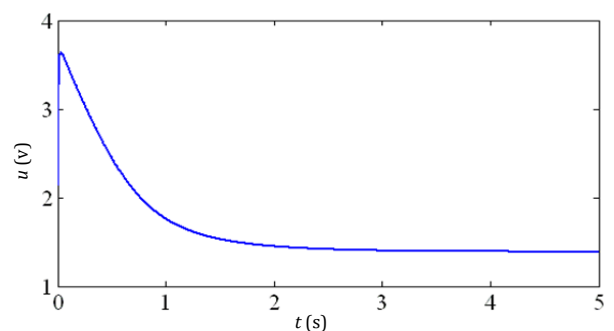
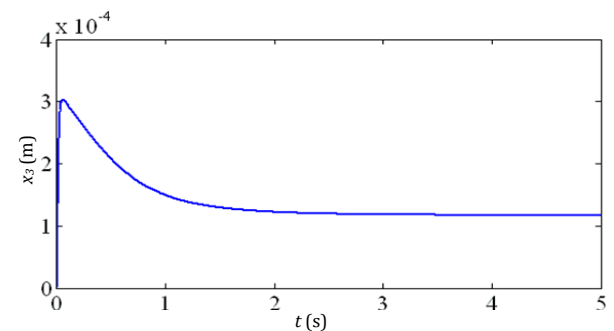
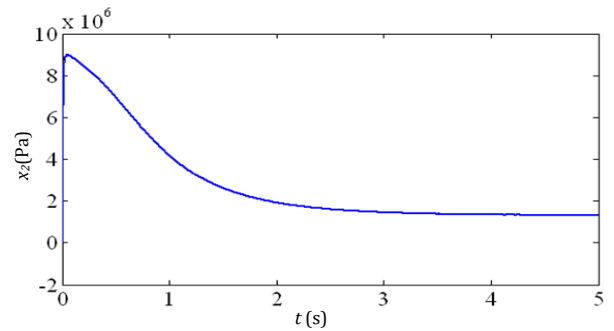
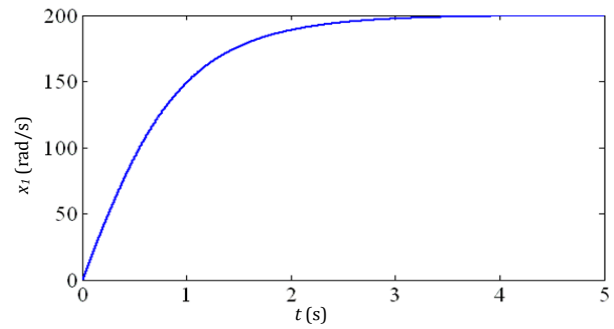
بهبود در بار محاسباتی: در مقایسه با کنترل کننده‌های غیر خطی که با استفاده از روش خطی سازی فیدبک صورت گرفته است و کنترل کننده ترکیبی مود لغزشی با شبکه نروفازی، طراحی، محاسبات ریاضی و تعداد عملیات ریاضی مورد نیاز در روش پیشنهادی بسیار ساده و مناسب می‌باشد. در جدول ۱ به اختصار نتایج مربوط به زمان نشست و سیگنال کنترلی کنترل کننده ارائه شده و با دیگر کنترل کننده‌ها مقایسه شده است.

۵- نتیجه گیری

کنترل کننده فازی که با استفاده از روش جبران سازی موازی توزیع یافته برای سیستم سرو الکترو هیدرولیک طراحی شده است، در مقایسه با کنترل کننده‌های دیگر که بر روی سیستم پیاده‌سازی شده‌اند، روشی قدرتمند، ساده و مفهومی است که می‌توان به برخی از مزایای این روش اشاره کرد: ۱- سرعت پاسخ کنترل کننده (زمان نشست برای متغیر x_1) در حدود ۳ ثانیه است که نسبت به کنترل کننده‌های دیگر بهتر است. البته روش‌های آموزش پسخورد خطا (کنترل کننده فازی) و کنترل تطبیقی عصبی فازی زمان نشست کمتری دارند ولی در کل از لحاظ مقدار سیگنال کنترلی در روش کنترل تطبیقی عصبی فازی بسیار زیاد است. ۲- پاسخ خروجی اصلاً فراجاهش ندارد. ۳- مقدار سیگنال کنترلی با توجه به زمان نشست در مقایسه با سایر کنترل کننده‌ها مطلوب و در حد معقولی قرار دارد. ۴- در این روش تنها از دو تابع تعلق استفاده شده است که در مقایسه با دیگر کنترل کننده‌های هوشمند مثل کنترل کننده‌های فازی و شبکه نروفازی که از ۲۵ قانون استفاده کرده‌اند، بسیار مطلوب است که خود سبب سادگی در طراحی ساختار کنترل کننده جبران سازی توزیع یافته موازی گردیده است.

۶- مراجع

[1] M. Jovanovic, Nonlinear control of an electrohydraulic velocity servosystem, in *Proceeding of*, Vol.1, pp. 588-593, 2002.
 [2] H. E. Merritt, *Hydraulic control systems*, New York.: Wiley, 1967.
 [3] J. Watton, *Fluid power systems : modelling simulation and microcomputer control*, pp. 323-345, Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall, 1988.



شکل ۵ نتایج شبیه‌سازی شده سیستم سرو الکترو هیدرولیک

جدول ۱ مقایسه کنترل کننده‌ها از لحاظ عملکرد

ردیف	انواع کنترل کننده‌ها	زمان نشست	میزان سیگنال	هدف از کنترل
۱	روش هوشمند فازی جبران سازی توزیع یافته موازی	۳ ثانیه	۴ ولت	کنترل سرعت
۲	شبکه نرو فازی [۴]	۴ ثانیه	۱/۶ ولت	کنترل سرعت
۳	مود لغزشی و شبکه نرو فازی [۷]	۲ ثانیه	۲۸ ولت	کنترل سرعت
۴	شبکه عصبی [۵]	۶ ثانیه	۳/۸ ولت	کنترل سرعت
۵	غیر خطی (خطی سازی فیدبک) [۱]	۵ ثانیه	۲/۳ ولت	کنترل سرعت

- [7] S. A. Mohseni, M. A. Shooredeli, M. Teshnehlab, Decoupled sliding-mode with fuzzy neural network controller for EHSS velocity control, in *Proceeding of*, pp. 7-11, 2007.
- [8] H. O. Wang, K. Tanaka, M. Griffin, Parallel distributed compensation of nonlinear systems by Takagi-Sugeno fuzzy model, in *Proceeding of*, Vol.2, pp. 531-538, 1995.
- [9] Kazuo Tanaka, Hua o. Wang, *Fuzzy Control Systems Design and Analysis*, pp. 5-81, New York.: Wiley, 2001
- [4] S. A. Mohseni, M. Aliyari, M. Teshnehlab, EHSS Velocity Control by Fuzzy Neural Networks, in *Proceeding of*, pp. 13-18, 2006.
- [5] H. Azimian, R. Adlgostar, M. Teshnehlab, Velocity control of an electro hydraulic servomotor by neural networks, in *Proceeding of*, pp. 677-682, 2005.
- [6] L. C. Y. Chan, S. F. Asokanathan, CMAC based controller for hydro-mechanical systems, in *Proceeding of*, Vol.6, pp. 4496-4501, 2001.