

کنترل سرعت سامانه سروالکتروهیدرولیک با استفاده از روش ترکیبی فازی

محسن جهانشاهی^۲

باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد تهران مرکزی،
دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

امیررضا زارع بیدکی^۱

باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، واحد بوئین زهرا،
دانشگاه آزاد اسلامی، بوئین زهرا، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۱/۱۲؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۹/۲۸)

چکیده

کنترل سامانه‌های سروالکتروهیدرولیک به دلیل عملکرد مناسب در گشتاور اینرسی بار بالا و همچنین دستیابی به سرعت پاسخ سریع بسیار حائز اهمیت می‌باشد. کنترل سرعت، کنترل موقعیت و کنترل گشتاور جزء مهم‌ترین روش‌های کنترلی برای این سامانه‌ها می‌باشد. روش‌های پیشنهادی که برای کنترل سامانه ارائه شده‌اند دارای یک سری عدم قطعیت در سامانه از جمله وجود اصطکاک داخلی، شار داخلی، اثر غیرخطی مدل و نویز خارجی می‌باشند. در این مقاله از یک روش ترکیبی با استفاده از روش جبران توزیع شده به صورت موازی و بر پایه مدل تاکاگی سوگنو و کنترل کننده فازی با ایده آموزش بازخورد خطا استفاده شده است. علاوه بر این، کنترل سرعت و شناسایی مدل سامانه توسط ایده تنظیم یابی انجام شده است. نتایج تحقیق حاضر در مقایسه با سایر کنترل کننده‌ها عملکرد بهتری در پاسخگویی سامانه نشان می‌دهد. همچنین پایداری کنترل کننده توسط روش نامساوی ماتریس خطی به اثبات رسیده است.

واژه‌های کلیدی: سامانه سروالکتروهیدرولیک، روش نامساوی ماتریس خطی، روش جبران توزیع شده به صورت موازی، کنترل کننده فازی، آموزش بازخورد خطا

Velocity of Control of Electro Hydraulic Servo System by Using Fuzzy Coupled Method

A.R. Zare Bidaki

Young Researchers And Elite Club, Buinzahra
Branch, Islamic Azad University, Buinzahra, Iran

M. Jahanshahi

Young Researchers And Elite Club, Central Tehran
Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

(Received: 01/April/2017 ; Accepted: 19/December/2017)

ABSTRACT

Electro hydraulic control systems are important in their ability to handle large torque loads and quick response. Velocity, position and torque control are the most important controlling methods for the systems. The control systems suggested before including uncertainty parameters such as: internal friction, external noises, and non-linearity in the model behavior. Parallel distributed compensator method based on Takagi-Sugeno and fuzzy controller are used in this paper by feedback error learning's idea. In addition velocity control and identification of the model is carried out by applying regulation scheme. Results indicate that the controller presents better performance and response to the other controllers Also stability of controller is validated by linear matrix inequality method

Keywords: Electro Hydraulic Servo Systems, Parallel Distributed Compensator Approach, Fuzzy Controller, Feedback Error Learning

۱- دانشجوی دکتری: amirrezazare@gmail.com

۲- دانشیار (نویسنده پاسخگو): mjahanshahi@iauctb.ac.ir

فهرست علائم و اختصارات

A_i	بردار حالت
B_i	بردار ورودی
B_m	ضریب ویسکوزیته، Nms
C_i	بردار خروجی
c_d	ضریب تخلیه
c_f	ضریب اصطکاک داخلی، N/m^2
c_{im}	ضریب افت موتور در داخل
F_1	بهره فیدبک حالت
F_2	بهره فیدبک حالت
J_t	مجموع ممان اینرسی موتور و بار رجوع شده به شفت موتور،
K_r	بهره شیر، $\frac{m^3}{s \times v}$
K_q	بهره شار شیر، $\frac{m^2}{s}$
M_{ij}	قانون فازی
P_s	فشار منبع، Pa
q_m	جابه‌جایی حجمی موتور، $\frac{m^3}{rad}$
r	تعداد قانون فازی
T_r	ثابت زمانی شیر، s
u_{CFC}	خروجی کنترل کننده قراردادی، v
u_F	خروجی کنترل کننده مسیر پیشرو، v
u_T	ورودی سامانه، v
V_o	حجم سیلندر موتور، m^3
w	گرادیان سطح، m
x_1	سرعت زاویه‌ای موتور
x_2	فشار تفاضلی بار
x_3	جابجایی شیر

علائم یونانی

β_e	ضریب حجمی
ρ	چگالی روغن، $\frac{Kg}{m^3}$
η	نرخ آموزش
θ	وزن‌های قابل تنظیم

۱- مقدمه

سامانه 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. نمونه‌هایی از این کاربردها عبارتند از سامانه‌های تعلیق فعال، کنترل ربات‌های صنعتی، ماهواره‌ها، شبیه‌سازی پرواز و توربین‌های صنعتی می‌توان اشاره کرد [۱-۲]. هیدرولیک، علم شار مایع، دارای تاریخچه‌ای طولانی است. در زمان نیوتن مطالعات او بر علم شار مایع باعث معرفی کمیت چسبندگی سیال شد، در بخش کنترل هر دو ترم گاز و مایع می‌توانند استفاده شوند. سامانه‌هایی که با مایع کنترل می‌شود، هیدرولیک و سامانه‌هایی که با گاز کنترل می‌شود، پنیوماتیک نام دارد. در بخش تحقیق بر روی سامانه هیدرولیک [۳]، مطالعه بر روی واسطه انتقال قدرت ضروری است. سیال هیدرولیک به دو بخش تقسیم می‌شود:

۱- سیال با مواد پایه نفتی

۲- سیال با مواد ترکیبی مصنوعی

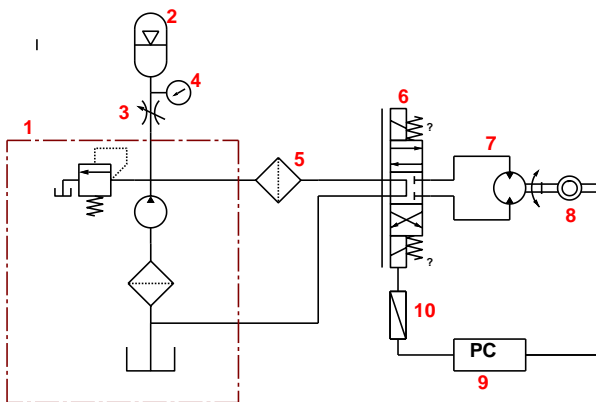
سیال‌های ساخته شده از مواد نفتی مانند روغن به مراتب دارای کاربرد بیشتری نسبت به سیال‌های ساخته شده از مواد ترکیبی مصنوعی هستند. سیال‌های بر پایه مواد نفتی معمولاً از پالایش نفت خام به دست می‌آیند. البته اشکال عمده این مواد به علت آسیب‌پذیری در حرارت بالا و آتش گرفتن آن‌ها است. سیال‌های ترکیبی مصنوعی طوری ساخته می‌شوند که در مقابل سوختن مقاوم‌تر و دارای عملکرد بهتری در حرارت‌های بالا هستند. سامانه‌های هیدرولیک در مقایسه با راه‌اندازی دیگر سامانه‌ها از جمله موتورهای الکتریکی دارای مشخصه‌های منحصر به فردی هستند، که می‌توان به برخی از این مزیت‌ها [۴] اشاره کرد: ۱- دارای قدرت بالا نسبت به وزنشان، توزیع گشتاور در راه‌اندازی‌های هیدرولیک متناسب با فشار تفاضلی سامانه است. از آن‌جا که استحکام مواد به کار رفته در ساختمان راه‌اندازه‌های هیدرولیک بالا است، آن‌ها می‌توانند انرژی مکانیکی بالایی را در مقایسه با ابعادشان تحویل دهند. ۲- دارای پاسخ سریعی نسبت به ورودی خود دارند. ۳- سامانه‌های هیدرولیک دارای قابلیت‌های اجرا به طور پیوسته، متناوبی، معکوس و حرکت توقف ناگهانی دون آسیب رسیدن به سامانه، هستند. ۴- سامانه‌های هیدرولیک دارای سختی بالاتری نسبت به موتورها هستند، به عنوان مثال وقتی موتورها به یک بار وصل می‌شوند، سرعت آن‌ها دچار افت می‌شود. که این خاصیت سامانه‌های هیدرولیک سبب برتری آن‌ها نسبت به موتورها در مواقعی که دقت موقعیت در راه‌اندازها دارای اهمیت هستند. از مزایای دیگر سامانه‌های

این سامانه در دهه‌های اخیر پیشنهاد شده است که می‌توان به روش‌های شبکه عصبی فازی [۶]، کنترل غیرخطی [۷]، روش هوشمند و شبکه عصبی [۸-۷] و روش ترکیبی حالت لغزشی با شبکه عصبی فازی [۹] اشاره کرد. روش به‌کار 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. برای کنترل سامانه سروالکتروهیدرولیک از روش ترکیبی جبران توزیع شده به‌صورت موازی و بر پایه مدل تاکاگی سوگنو و کنترل کننده فازی که از ایده آموزش بازخورد خطا استفاده شده است. هدف از به‌کارگیری این کنترل کننده بهبود در عملکرد پاسخ سامانه (کنترل سرعت) و شناسایی مدل سامانه بوده است که توانسته است به خوبی به اهداف کنترلی دست یابد.

این مقاله به‌ترتیب زیر آماده شده است: در بخش ۲ شماتیک و مدل ریاضی غیرخطی سامانه سروالکتروهیدرولیک توصیف شده است. در بخش ۳ طراحی کنترل کننده با روش جبران توزیع شده به‌صورت موازی و بر پایه مدل تاکاگی سوگنو و کنترل کننده فازی و همچنین ایده آموزش بازخورد خطا معرفی شده است. در بخش ۴ نتایج شبیه‌سازی شده برای آزمودن قابلیت‌های کنترل کننده مورد نظر ارائه گردیده و در نهایت در بخش ۵، جمع بندی و نتیجه‌گیری شده است.

۲- توصیف سامانه

شکل ۱ شمایی از یک سامانه سروالکتروهیدرولیک و دینامیک سرعت را نمایش می‌دهد.



شکل (۱): سامانه سروالکتروهیدرولیک.

قسمت‌های اصلی این سامانه عبارتند از: ۱- منبع انرژی الکتریکی، ۲- آکومولاتور، ۳- شیر شارژ، ۴- فشارسنج، ۵- فیلتر، ۶- شیر الکتریکی دو حالت، ۷- موتور هیدرولیکی،

هیدرولیک و نیوماتیک به سایر سامانه‌های 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 سامانه‌های مکانیکی برای انتقال قدرت از اجزایی مانند بادامک، چرخ دنده، گاردان، اهرم، کلاچ و ... استفاده می‌شود. در این سامانه‌ها می‌توان با اعمال نیروی کمی (مانند باز و بسته کردن شیرها و ...) وظیفه کنترلی را انجام داد. با وجود تمام این مزیت‌ها سامانه‌های هیدرولیک دارای معایبی از جمله: ۱- قدرت هیدرولیک به‌سادگی در دسترس نیست. ۲- سامانه‌های هیدرولیک در ترازهای قدرت پایین مانند موتورهای الکتریکی انعطاف‌پذیر نیستند. ۳- سیال سامانه هیدرولیک روغن می‌باشد، که باعث آلودگی می‌شود و به‌مرور زمان سامانه عملکرد مناسب خود را از دست می‌دهد. ۴- سیال هیدرولیک دارای محدودیت در دمای بالا است. ۵- از بزرگ‌ترین معایب سامانه‌های هیدرولیک، می‌توان به غیرخطی بودن مدل دینامیکی آن‌ها اشاره کرد، که خود سبب محدودیت و پیچیدگی در امر طراحی و کنترل این سامانه‌ها می‌شود. یک سامانه هیدرولیکی دارای ۴ بخش اصلی می‌باشد که عبارتند از: ۱- مخزن: جهت نگه‌داری سیال، ۲- پمپ: به منظور به راه انداختن سیال در سامانه که توسط الکترو موتور صورت می‌گیرد، ۳- شیرها: برای کنترل فشار، جریان و جهت حرکت سیال، ۴- عملگرها: به‌منظور تبدیل انرژی سیال تحت فشار به نیروی مکانیکی مولد کار. سامانه‌ها را معمولاً با مدل فضای حالت نمایش می‌دهند که هر متغیر حالت، بیانگر یک حالت خاص از سامانه می‌باشد. برای یک سامانه خطی می‌توان مدل‌های مختلفی از فضای حالت را نمایش داد. برای سامانه سروالکتروهیدرولیک مدل‌های متفاوتی با توجه به اهداف کنترلی معرفی شده‌اند که از معروف‌ترین مدل‌ها می‌توان به مدل جوانوویچ [۵] اشاره کرد. سامانه سروالکتروهیدرولیک یک سامانه غیرخطی است پس در توصیف مدل سامانه به‌صورت فضای حالت یک سری عدم قطعیت در مدل لحاظ می‌شود. قابل ذکر است که کنترل سامانه سروالکتروهیدرولیک با حضور شار غیرخطی و اصطکاک داخلی انجام شده است [۵]. موضوع کنترل سامانه سروالکتروهیدرولیک در دو کلاس مورد بررسی قرار می‌گیرد: ۱- کنترل موقعیت ۲- کنترل سرعت یا گشتاور. تکنیک‌های کنترلی بسیاری برای کنترل

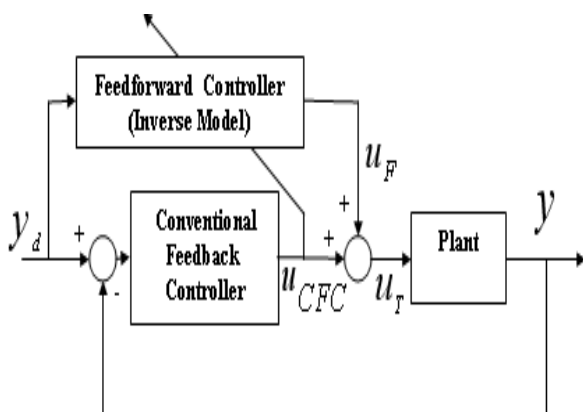
جهته باشد. بنابراین، همواره $x_3 > 0$ خواهد بود. این امر بدان معناست که در حالت سکون $x_3 = 0$ است و در حالت گردش $x_3 > 0$ می‌باشد.

۳- ساختار پیشنهادی برای کنترل سرعت سامانه سروالکتروهیدرولیک

در این بخش روش آموزش باز خورد خطا و مدل فازی تاکاگی سوگنو و همچنین ساختار کنترلی بکارگرفته شده برای سامانه سروالکتروهیدرولیک معرفی شده است.

۳-۱- آموزش باز خورد خطا

تمامی حرکت انسان بر مبنای سامانه عصبی مرکزی انجام می‌شود که به‌عنوان موتور کنترل کننده در علم فیزیولوژی عصبی شناخته می‌شود. در مقایسه با این موتور کنترلی که در ذهن انسان شکل می‌گیرد روبات‌های انسان نما یا فرایندهای دیگر که تحت کنترل می‌باشند اصلاً نمی‌توانند به سهولت موتور کنترل انسانی، وظیفه خود را انجام دهند که این موضوع به‌خاطر وجود نقض در سنسورها و غیردقیق بودن آن‌ها و همچنین تاخیرهایی است که به‌صورت ذاتی در سامانه موجود است و یا بعضاً ناشی از فرآیند کنترل می‌باشد. با توجه به سامانه آموزشی که ذهن در تقابل با پدیده به‌وجود می‌آید و همچنین انجام بسیاری از کارهای کنترلی که ذهن براساس همین سامانه انجام می‌دهد، ایده‌های اولیه آموزش برگشتی بر مبنای خطا شکل گرفت. این ساختار [۹-۱۱] توسط دانشمند ژاپنی کاواتو مطرح شد و به‌خاطر استفاده از خطا در آموزش معکوس فرآیند، آموزش بازخورد خطا نام گرفت. ساختار این شیوه در شکل ۲ نمایش داده شده است.



شکل (۲): بلوک دیاگرام آموزش بازخورد خطا [۱۰].

۸- دستگاه اندازه‌گیری سرعت، ۹- کامپیوتر کنترل کننده و ۱۰- مبدل ولتاژ به جریان. همان‌گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، ابتدا کامپیوتر یک ولتاژ کنترلی تولید نموده که توسط مبدل ولتاژ به جریان، به جریان تبدیل می‌شود. این جریان الکتریکی باعث جابه‌جایی شیر الکتروهیدرولیکی شده و این جابه‌جایی باعث تغییر فشار هوا در خروجی شیر الکتریکی می‌شود که با تغییرات فشار هوا، می‌توان سرعت موتور هیدرولیکی را تنظیم نمود. قابل ذکر است که این سامانه الکتروهیدرولیکی علاوه بر استفاده از هوا جهت تنظیم سرعت موتور، توسط روغن نیز می‌تواند این کار را انجام دهد. با به‌کارگیری قانون دوم نیوتن معادلات فضای حالت سامانه برای حرکت چرخشی شفت موتور به‌صورت زیر محاسبه می‌شود [۵].

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

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

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

$y = x_1$
هدف از کنترل این سامانه، کنترل پایداری برای هر نقطه کاری سامانه می‌باشد. به‌سادگی می‌توان نشان داد که نقطه تعادل سامانه به‌صورت زیر می‌باشد:

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

$$x_{2N} = \frac{1}{q_m} \{B_m x_{1N} + q_m P_s c_f\},$$

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

در حالی که میزان سیگنال کنترلی لازم برای نگه داشتن x_3 در نقطه تعادل به‌صورت زیر است:

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

از آن‌جایی 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 که جابه‌جایی شیر نیز دو

* سامانه‌های فازی گسسته:

Model Rule i:

IF $Z_1(t)$ is M_{i1} and...and $Z_p(t)$ is M_{ip}

THEN

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

در این جا، $Z(t)$ بردار در نظر گرفته شده و به متغیرهای $Z_1(t), \dots, Z_p(t)$ تفکیک شده است. متغیرهای فرضی تابعی از متغیرهای ورودی $u(t) \in R^m$ نیستند. این فرض به دلیل دوری از پیچیدگی فرآیند غیرفازی سازی در کنترل کننده‌های فازی است. هر معادله خطی ارائه شده با $A_i x(t) + B_i u(t)$ یک زیرسامانه نامیده می‌شود. خروجی سامانه فازی با توجه به جفت $(x(t), u(t))$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

* سامانه‌های فازی پیوسته:

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

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

* سامانه‌های فازی گسسته:

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

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

الگوریتم آموزش بازخورد خطا از دو بخش تشکیل شده است: در بخش اول، سیگنال‌های ورودی در یک کنترل کننده مسیر پیشرو خورنده شده‌اند تا این که خروجی‌های را به وجود آورند. در بخش دوم، بردار خروجی کنترل کننده قراردادی، به عنوان خطا برای پس انتشار از راه کنترل کننده مسیر پیشرو در نظر گرفته شده‌اند. در شکل ۲ ورودی سامانه، بردار خروجی کنترل کننده مسیر پیشرو و بردار خروجی کنترل کننده بازخورد می‌باشد. بیشتر از کنترل کننده تناسبی انتگرال گیر مشتق گیر یا تناسبی مشتق گیر برای کنترل کننده بازخورد در شیوه آموزش خطا بازخورد استفاده شده است. تنها ملاک سنجش برای به دست آوردن بهره در کنترل کننده بازخورد، پایداری سامانه می‌باشد. البته قابل ذکر است دو ایده برای آموزش بازخورد خطا وجود دارد که شامل ردیابی و تنظیم یابی است. همچنین باید اشاره کرد که در این مقاله از ایده دوم یعنی تنظیم یابی استفاده شده و همچنین نکته قابل اهمیت در این مقاله آن است که به جای استفاده از کنترل کننده تناسبی انتگرال گیر مشتق گیر از کنترل کننده فازی جبران کننده توزیع یافته موازی استفاده شده است. شایان ذکر است پایداری این کنترل کننده توسط روش ناتساوی ماتریس خطی اثبات شده است.

۳-۲- مدل فازی تاکاگی سوگنو

روش طراحی با ارائه یک سامانه غیرخطی با مدل فازی تاکاگی سوگنو می‌باشد. مدل فازی تاکاگی سوگنو با قوانین اگر و آنگاه فازی توصیف می‌شود [۱۶-۱۲]. ویژگی اصلی مدل فازی تاکاگی سوگنو بیان دینامیک‌های محلی قوانین مفهوم فازی با یک مدل سامانه خطی است. روی هم رفته مدل فازی سامانه با مدل‌های سامانه خطی دست یافتنی است. قوانین مدل فازی تاکاگی سوگنو با توجه به سامانه‌های فازی پیوسته و سامانه‌های فازی گسسته تفکیک شده‌اند:

* سامانه‌های فازی پیوسته:

Model Rule i:

IF $Z_1(t)$ is M_{i1} and...and $Z_p(t)$ is M_{ip}

THEN

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

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:

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

به ازای تمامی زمان‌ها:

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

۳-۳- ساختار کنترل کننده فازی

سامانه کنترل فازی زیر، برای تولید سیگنال کنترلی U_F به صورت زیر تعریف شده است:

Ruleⁱ¹ⁱ²: IF e_x is A_1^{i1} and e_x is A_2^{i2} THEN U_F is θ^{i1i2}

به طوری که

$$A_2^{i2}, \quad i_2 = 1, 2, \dots, n_2 \quad A_1^{i1}, \quad i_1 = 1, 2, \dots, n_1$$

مقادیر فازی که با توابع تعلق $\mu_{A_1}^{i_1}(e_x)$ و $\mu_{A_2}^{i_2}(e_x)$

نشان داده شده‌اند. خروجی فازی با استفاده از غیرفازی ساز میانگین مراکز و موتور استنتاج ضرب فازی ساز منفرد حاصل شده است. پس می‌توان به صورت زیر تعریف کرد:

$$U_F = \frac{\sum_{i_1=1}^{n_1} \sum_{i_2=1}^{n_2} \theta^{i_1 i_2} [\mu_{A_1}^{i_1}(e_x) \mu_{A_2}^{i_2}(e_x)]}{\sum_{i_1=1}^{n_1} \sum_{i_2=1}^{n_2} [\mu_{A_1}^{i_1}(e_x) \mu_{A_2}^{i_2}(e_x)]} \quad (16)$$

۳-۳-۱- الگوریتم آموزش

هدف الگوریتم آموزشی به روز کردن وزن‌های شبکه از راه کمینه کردن تابع هزینه زیر می‌باشد.

$$E = \frac{1}{2} e^2 \quad (17)$$

که در آن:

$$e = u_{CFC} = u_T - u_F$$

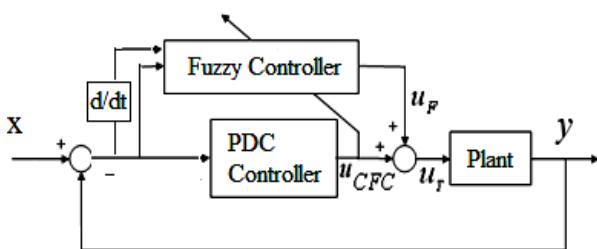
با استفاده از شیوه آموزش پس انتشار خطا پارامترهای قابل تنظیم شبکه به گونه‌ای تنظیم می‌شوند تا خطا در رابطه (۱۷) به صفر میل کند. الگوریتم پس از انتشار خطا، برای وزن‌ها را می‌توان به صورت رابطه (۱۸) نوشت.

$$\theta(k+1) = \theta(k) - \eta \left(\frac{\partial E(k)}{\partial \theta(k)} \right) \quad (18)$$

به دلیل ساختار دینامیکی کنترل کننده فازی استفاده از روش مربعات خطا به منظور تخمین صحیح و دقیق از متغیرهای سامانه می‌باشد لذا سیگنال بازگشتی به کنترل کننده فازی باعث ایجاد تخمین صحیح و کمینه کردن اختلاف بین متغیرهای حالت تخمین زده شده با متغیرهای سامانه می‌شود. چون طبق رابطه (۱۷) اختلاف سیگنال کنترلی فازی با سیگنال کنترل کننده وارد به سامانه که به عنوان سیگنال خطا معرفی شده است، صفر می‌شود. دلیل کمینه شدن در رابطه (۱۸) مشهود است.

۳-۳-۲- پیاده سازی کنترل کننده‌ها با ایده خطای یادگیری بازگشتی

شکل ۳ بلوک دیاگرام کنترلی سامانه سروالکترو هیدرولیک را نشان می‌دهد که همان طور در بخش قبلی اشاره شد، از ایده تنظیم یابی در روش یادگیری بازگشتی خطا استفاده شده است.



شکل (۳): بلوک دیاگرام کنترلی برای کنترل سامانه

سروالکترو هیدرولیک.

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

$$z_i = x_i - x_{iN} \quad \forall i = 1, 2, 3; \quad (19)$$

$$v = u - u_N$$

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

که در آن:

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

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

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

$$R_3 = \frac{2\beta_e (c_d w \min(z_2))}{V_o}$$

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

Model Rule 2:

IF $q(t)$ is max THEN $\dot{z} = A_{\max} z(t) + B_{\max} v(t)$

و:

که در آن:

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

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

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

$$R_6 = \frac{2\beta_e (c_d w \max(z_2))}{V_o}$$

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

این مدل فازی تاکاگی سوگنو دقیقاً سامانه غیرخطی را در ناحیه $[-x_{2N}, p_s - x_{2N}]$ بر روی متغیر Z_2 ارائه می‌دهد. میزان بیشینه و کمینه $q(t)$ را می‌توان به صورت زیر ارائه داد:

$$q(t) = z_2(t) = M_{11}q(t) \cdot \min(z_2) + M_{12}q(t) \cdot \max(z_2) \quad (22)$$

که در آن:

$$\min z_2 = -1.3164 \times 10^6, \max z_2 = 7.6836 \times 10^6 \quad (23)$$

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

بنابراین، می‌توان توابع تعلق را از روابط (۱۹) و (۲۰) به دست آورد:

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= \frac{1}{j_t} \{-B_m z_1 + q_m z_2\} \\ \dot{z}_2 &= \frac{2\beta_e}{V_o} \{-q_m z_1 - (c_{im} + \gamma(z_z))z_2 \\ &\quad + c_d w x_3 \sqrt{\frac{1}{\rho}(p_s - x_{2N} - z_2)}\}, \\ \dot{z}_3 &= \frac{1}{T_r} \{-z_3 + \frac{K_r}{K_q} v\} \end{aligned} \quad (20)$$

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 $x_1 > 0$ و $x_3 > 0$ در نظر گرفته شده است، می‌توان متغیرهای فضای حالت را به صورت زیر بیان کرد:

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

که در آن:

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

با توجه به این که تغییر متغیر داده شده است و معادلات فضای حالت به فرم معادله (۲۰) تعریف شده است، داریم:

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

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

با توجه به معادله (۲۰) سامانه دارای دو ترم غیرخطی 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 این جا فقط متغیر حالت Z_2 به عنوان ترم غیرخطی در نظر گرفته شده است. پس داریم:

$$q(t) = z_2(t) \quad (21)$$

بنابراین، مدل فازی تاکاگی سوگنو بر مبنای معادله (۲۰) به صورت زیر تعریف می‌شود:

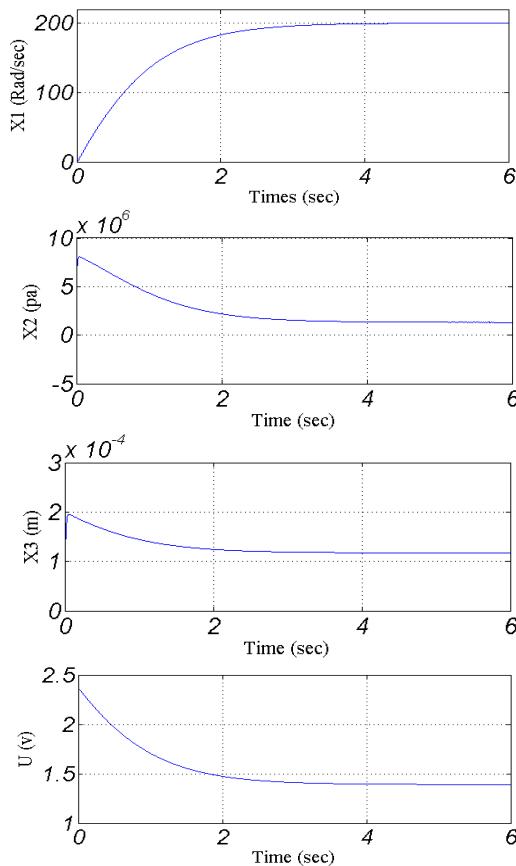
Model Rule 1:

IF $q(t)$ is min THEN $\dot{z} = A_{\min} z(t) + B_{\min} v(t)$

شکل ۵ نشان‌دهنده خروجی سامانه سروالکتروهیدرولیک است. در این مقاله نتایج تحلیل کنترل کننده فازی با در نظر گرفتن شرایط اولیه زیر به دست آمده است:

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

در حدود ۳/۶ ثانیه سرعت سامانه به ۲۰۰ rad/s می‌رسد.



شکل (۵): نتایج شبیه‌سازی شده سامانه سروالکتروهیدرولیک.

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

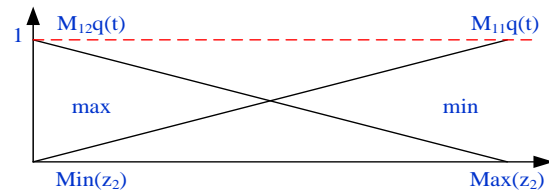
با مقایسه روش ارائه شده در این مقاله با روش‌های دیگر می‌توان مزایای کنترل کننده را به صورت زیر خلاصه کرد:

بهبود در سیگنال کنترلی در طراحی کنترل کننده که از دو کنترل کننده هوشمند فازی با به کارگیری ایده آموزش بازخورد خطا استفاده شده است سیگنال

$$M_{11}q(t) = \frac{1.3164 \times 10^6 + q(t)}{9 \times 10^6} \quad (24)$$

$$M_{12}q(t) = \frac{7.6836 \times 10^6 + q(t)}{9 \times 10^6} \quad (25)$$

در شکل ۴ توابع تعلق نمایش داده شده است.



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

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

Control Rule 1:

$$\text{IF } q(t) \text{ is min THEN } u(t) = -F_1 z(t)$$

و

Control Rule 2:

$$\text{IF } q(t) \text{ is max THEN } u(t) = -F_2 z(t)$$

برای طراحی کنترل کننده پایدار با کمک شرایط لیاپانوف [۱۷] 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:

$$X > 0$$

$$-(AX + XA') + (BM + M'B') > 0 \quad (26)$$

$$M = FX^{-1}, X = P^{-1}$$

بنابراین، بهره‌های فیدبک حالت با حل معادلات بالا در نامساوی ماتریس خطی به صورت زیر تعریف شده‌اند:

$$F_1 = [0.0116 \quad 0.1025e-13 \quad -.2658e-4]$$

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

قابل ذکر است که نرخ آموزش در کنترل کننده فازی $\eta = 0.008$ در نظر گرفته شده است. همچنین توابع تعلق به کار گرفته شده نیز از نوع مثلثی می‌باشند.

۴- نتایج شبیه‌سازی شده

با اعمال بهره‌های فیدبک حالت به دست آمده با استفاده از روش نامساوی ماتریس خطی در زیر سامانه‌های خطی شده و با در نظر گرفتن تابع تعلق مثلثی، طبق تعریف سیگنال‌های کنترلی در مدل تاکاگی سوگنو

ایده ردیابی فقط ورودی مرجع به کنترل کننده خورنده می شود. از مزایای این نوع طراحی یعنی استفاده همزمان کنترل کننده مسیر پیش رو و فیدبک در صورت اعمال اغتشاش در سامانه با کمترین زمان می توان خطای حاصل در خروجی سامانه را دفع کرد. در صورتی که اگر تنها از کنترل کننده های فیدبک دار استفاده شود زمان بیشتری برای دفع اثر اغتشاش و یا خطای حاصل شده در خروجی نیاز می باشد لذا این زمان ممکن است که سامانه را از حالت پایداری خارج شود.

در جدول ۱ به اختصار نتایج مربوط به زمان نشست و سیگنال کنترلی کنترل کننده ارائه شده و با دیگر کنترل کننده ها مقایسه شده است.

جدول (۱): مقایسه کنترل کننده ها از لحاظ عملکرد.

هدف از کنترل	میزان سیگنال (ولت)	زمان نشست (ثانیه)	انواع کنترل کننده ها	ردیف
کنترل سرعت	۲/۴	۳/۶	روش پیشنهادی	۱
کنترل سرعت	۱/۶	۴	شبکه عصبی فازی [۴]	۲
کنترل سرعت	۲۸	۲	حالت لغزشی و شبکه عصبی فازی [۷]	۳
کنترل سرعت	۳/۸	۶	شبکه عصبی [۵]	۴

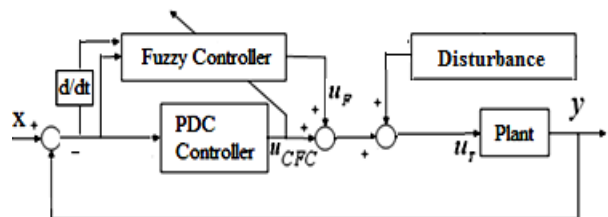
همچنین کنترل کننده طراحی شده در مقابل اغتشاش های وارد شده به سامانه مقاوم می باشد و این بدان معنی نمی باشد که کنترل کننده، مقاوم طراحی شده است زیرا کنترل کننده های مقاوم براساس عدم قطعیت در مدل سامانه ها طراحی می شوند. با وجود عدم قطعیت های موجود در مدل، طراحی کنترل کننده بدون در نظر گرفتن عدم قطعیت در سامانه انجام شده است و کنترل کننده قابلیت مقاوم بودن در مقابل اغتشاش را دارد.

کنترلی نسبت به روش های کنترلی از جمله کنترل کننده شبکه عصبی فازی، شبکه عصبی، کنترل ترکیبی حالت لغزشی با شبکه عصبی فازی و همچنین کنترل کننده غیرخطی دارای دامنه کمتر و تغییراتی نرمتر و مناسبتر برای پیاده سازی های عملی می باشد.

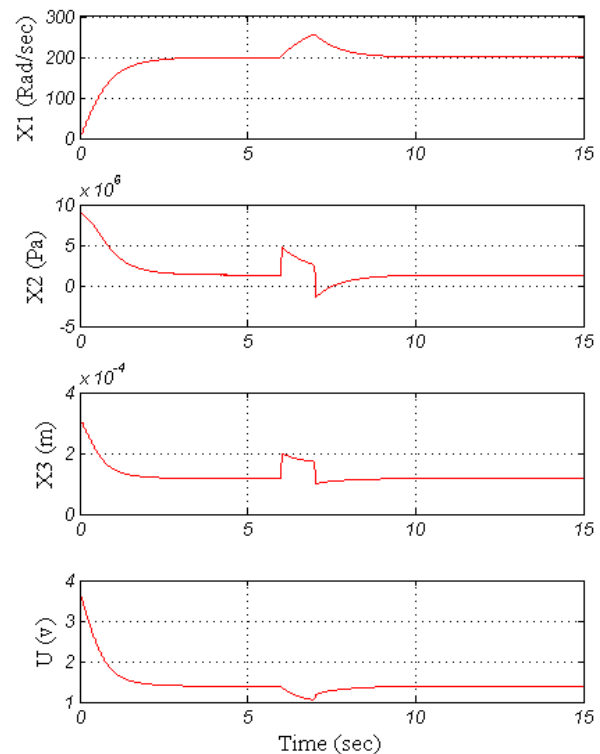
بهبود در زمان نشست: در این روش نسبت به بقیه کنترل کننده های طراحی شده زمان نشست کمتری دارد. البته باید اشاره داشت که در روش ترکیبی حالت لغزشی با شبکه عصبی فازی زمان نشست ۲ ثانیه حاصل خواهد شد، ولی باید در نظر داشت که سیگنال کنترلی که در این روش تولید شده است غیرقابل دسترسی و خارج از اعتبار می باشد زیرا حداکثر میزان سیگنال کنترلی که می توان برای سامانه سرو در نظر گرفت در بازه صفر تا پنج ولت است. بهبود در بار محاسباتی، در مقایسه با کنترل کننده های غیرخطی که با استفاده از روش خطی سازی فیدبک صورت گرفته است و کنترل کننده ترکیبی حالت لغزشی با شبکه عصبی فازی، طراحی، محاسبات ریاضی و تعداد عملیات ریاضی مورد نیاز در روش پیشنهادی بسیار ساده و مناسب می باشد. همچنین نکته قابل اهمیت در این روش پیشنهادی به دست آوردن مدل معکوس سامانه که با استفاده از روش آموزش بازخورد خطا با ایده تنظیم یابی بوده است و همچنین پایداری کنترل کننده که توسط روش ناتساوی ماتریس خطی اثبات شده است. باید متذکر شد دو ایده ردیابی و تنظیم یابی در آموزش بازخورد خطا وجود دارد. ایده ردیابی در شکل ۲ نشان داده شده است و هدف از ردیابی پایداری خروجی سامانه در اثر تغییرات در ورودی مرجع می باشد در حالی که مفهوم تنظیم یابی تنها به دنبال صفر کردن خطای خروجی سامانه می باشد. قابل ذکر است که در ایده تنظیم یابی اختلاف ورودی مرجع و خروجی به کنترل کننده فازی خورنده می شود در صورتی که در

۲-۴- کنترل کننده طراحی شده با اعمال اغتشاش

در این بخش یک سیگنال پله‌ای با دامنه یک ولت به‌عنوان اغتشاش در بازه زمانی شش تا هفت ثانیه به سامانه اعمال گردید. در شکل ۶ بلوک دیاگرام ورودی اغتشاشی نشان داده شده است و همچنین، شکل ۷ نشان می‌دهد که کنترل کننده توانسته است در مقابل اغتشاش مقاوم باشد و بتواند خروجی سامانه را به ناحیه عملکردی مناسب بازگرداند.



شکل (۶): بلوک دیاگرام کنترلی با ورودی اغتشاشی.



شکل (۷): خروجی سامانه با اعمال اغتشاش.

۶- نتیجه‌گیری

استفاده از روش ترکیبی جبران‌سازی موازی توزیع‌یافته و فازی با ایده آموزش بازخورد خطا برای سامانه سرو الکتروهیدرولیک، در مقایسه با کنترل‌کننده‌های دیگر که بر روی سامانه پیاده‌سازی شده‌اند، روشی قدرتمند، ساده و مفهومی است که علاوه بر کنترل سامانه سروالکتروهیدرولیک توانسته است مدل معکوس سامانه را نیز به‌دست آورد. همچنین می‌توان به برخی از مزایای این روش اشاره کرد:

۱- سرعت پاسخ کنترل کننده (زمان نشست برای متغیر X_1) در حدود $3/6$ ثانیه است که نسبت به کنترل‌کننده‌های دیگر بهتر است. البته روش کنترل تطبیقی عصبی فازی، زمان نشست کمتری دارد ولی در کل مقدار سیگنال کنترلی در روش کنترل تطبیقی عصبی فازی بسیار زیاد است. ۲- پاسخ خروجی اصلاً فراجهدش ندارد. ۳- مقدار سیگنال کنترلی با توجه به زمان نشست در مقایسه با سایر کنترل‌کننده‌ها مطلوب و در حد معقولی قرار دارد. ۴- در این روش تنها از دو تابع تعلق استفاده شده است که در مقایسه با دیگر کنترل‌کننده‌های هوشمند مثل کنترل‌کننده‌های فازی و شبکه عصبی فازی که از ۲۵ تابع عضویت استفاده کرده‌اند، مطلوب‌تر است این امر موجب سادگی در طراحی ساختار کنترل‌کننده پیشنهادی و کاهش محاسبات ریاضی می‌شود.

۷- مراجع

1. H. E. Merritt, "Hydraulic Control Systems", New York, John Wiley & Sons, Inc, 1967.
2. Watton, J. "Fluid Power Systems, Modelling Simulation and Microcomputer Control", Englewood Cliffs, N. J. Prentice-Hall, pp. 323-345, 1988.
3. Cloy, D. Mc. and Martin, H.R. "The Control of Fluid Power", New York, John Wiley & Sons, 1973.
4. Rui, Liu. "Nonlinear Control of Electro-Hydraulic Servo Systems: Theory and Experiment", Master Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1998.
5. Jovanovic, M. "Nonlinear Control of an Electro Hydraulic Velocity Servo System", American Control Conference, Anchorage, Alaska, USA, Vol. 1, pp. 588-593, 2002.

۵- تقدیر و تشکر

این مقاله با حمایت مالی باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوئین زهرا انجام شده است که نویسنده از حمایت‌های آن تشکر می‌نماید.

12. Asadi Asad Abad, M.R., Zare Bidaki, A.R., and Jahanshahi, M. "Velocity Control Of Electro-Hydraulic Servo System by Tracking Method". International Journal of Smart Electrical Engineering, Vol. 1, No. 3. pp 1-6. 2014.
13. Wang, H. O., Tanaka, K. Griffin, M. "Parallel Distributed Compensation of Nonlinear Systems by Takagi-Sugeno Fuzzy Model", Proc. American Control Conference, Seattle, USA, Vol. 2, pp. 531-538, 1995.
14. Wang, H. O., Tanaka, K. "Fuzzy Control Systems Design and Analysis", New York, Wiley, pp. 5-81, 2001.
15. Akbari, A., Zare Bidaki, A.R., Hosseini, A.R., Aliyari Shhooredeli, M. "Investigation of Stability of Electro-Hydraulic Servo System Using Fuzzy Intelligent Controller". Journal of Mechanical of Modares, Vol. 14, No. 3, pp. 36-42, 2014.
16. Moetakef Imani, B, Ghorashi Khalil S.H, "Implementation of Adaptive and Proportional-Integral Algorithms in Servo Hydraulic Fatigue Testing Machin", Journal of Mechanic of Emam Hossein, Vol 4, pp. 1-9, 1395.
17. Kashefi, S, "Predictive Adaptive Autopilot for STT Missile Based on Model Reference Method and Lyapanov Theorem", Journal of Mechanic of Emam Hossein, Vol 3, pp. 91-100, 1391.
6. Mohseni, S. A., Aliyari, M., and Teshnehlab, M. "EHSS Velocity Control by Fuzzy Neural Networks", IEEE Conf, North American Fuzzy Information Processing, Society, pp 13-18, 2006.
7. Azimian, H. Adlgostar, R., and Teshnehlab, M. "Velocity Control of an Electro Hydraulic Servomotor by Neural Networks", International Conference Physcon, Saint Petersburg, RUSSIA, pp. 677-682, 2005.
8. Chan, L. C. Y. and Asokanthan, S. F. "CMAC Based Controller for Hydro Mechanical Systems", American Control Conference, Arlington, USA, Vol. 6, pp. 4496-4501, 2001.
9. Mohseni, S. A. Aliyari Shooredeli, M. Teshnehlab, M. "Decoupled Sliding-Mode with Fuzzy Neural Network Controller for EHSS Velocity Control", International Conference on Intelligent, .Malaysia, pp. 7-11, 2007.
10. M. Kawato, "Computational Schemes and Neural Network Models for Formation and Control of Multijoint Arm Trajectory", Massachusets, MIT university, 1990.
11. Miyamoto, H., Kawato, M., Setoyama, T., and Suzuki, R. "Feedback Error Learning Neural Network for Trajectory Control of a Robotic Manipulator Neural Networks", Journal of Neural Networks of Elsevier, Vol. 1, pp. 251-265, 1988.

