

بکارگیری ایده آموزش پسخورد خطا برای کنترل سرعت سیستم سروالکتروهیدرولیک با استفاده از روش لاگور

امیررضا زارع بیدکی^(۱) - مجتبی ملبوبی^(۲) - سید محمد کارگر^(۳) - مهدی علیاری شوره دلی^(۴)

(۱) مربی - دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بوئین زهرا، باشگاه پژوهشگران جوان

(۲) مربی - دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم تحقیقات، تهران

(۳) استادیار - دانشکده برق، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد نجف آباد

(۴) استادیار - دانشکده مهندسی مکترونیک، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی تهران

تاریخ دریافت: پاییز ۱۳۹۱ تاریخ پذیرش: پاییز ۱۳۹۲

خلاصه: در این مقاله کنترل کننده جدید لاگور برای کنترل سرعت سیستم سروالکتروهیدرولیک پیشنهاد شده است. در این کنترل کننده روش آموزش پسخورد خطا با ایده Tracking، برای کنترل سیستم سرو به کار گرفته شده است. کنترل کننده پیشنهادی توانسته است با یک سیگنال کنترلی مناسب و در کمترین زمان نشست نسبت به روش‌های پیشین به اهداف کنترلی دست یابد. نتایج به دست آمده با کمک شبیه‌سازی معادلات غیر خطی سیستم در محیط مطلب (MATLAB)، نشان دهنده مزیت کنترل کننده جدید در زمان نشست و دامنه سیگنال کنترلی می‌باشد.

کلمات کلیدی: سیستم سروالکتروهیدرولیک، آموزش پسخورد خطا، کنترل کننده لاگور.

Using Feedback Error Learning for Control of Electro Hydraulic Servo System by Laguerre

Amir Reza Zare Bidaki⁽¹⁾ - Mojtaba Malboubi⁽²⁾ - Seyyed Mohammad Kargar⁽³⁾ - Mehdi Aliyari Shoreh Deli⁽⁴⁾

(1) Instructor - Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Boueen Zahra Branch
zareamirreza@yahoo.com

(2) Instructor - Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Science & Research Branch, Tehran
mojtaba_malboubi@yahoo.com

(3) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Najafabad Branch
kargar@pel.iaun.ac.ir

(4) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Khajeh Nasirodin Toosi University, Tehran
aliyari@ieee.org

In this paper, a new Laguerre controller is proposed to control the electro hydraulic servo system. The proposed controller uses feedback error learning method and leads to significantly improved performance in terms of settling time and amplitude of control signal rather than other controllers. All derived results are validated by simulation of nonlinear mathematical model of the system. The simulation results show the advantages of the proposed method for improving control in terms of both settling time and amplitude of control signal.

Index Terms: Electro hydraulic servo system (EHSS), feedback error learning (FEL), laguerre controller.

۱- مقدمه

نامحدود را با تعداد ضرایب ناچیز و پیچیدگی محاسباتی کم شناسایی کنند. علاوه بر این بر خلاف دیگر ساختارهای با پاسخ ضربه نامحدود، کنترل کننده‌های لاگور از خصوصیات پایداری مناسبی بهره می‌برند و همین امر آنها را برای پیاده‌سازی‌های عملی بسیار مناسب می‌سازد [۸]. روش ارائه 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. تکنیک کنترلی به کار گرفته شده برای کنترل سیستم سروالکتروهیدرولیک، روش آموزش پس‌خورده خطا است که اولین بار توسط Kawato ارائه شد [۹،۱۰].

مزیت روش آموزش پس‌خورده خطا در کنترل کننده‌های تطبیقی، عدم نیاز به محاسبه ماتریس ژاکوبین برای یادگیری وزن‌ها می‌باشد که این یکی از بزرگترین دلایل استفاده از این روش در کاربردهای کنترلی نظامی و صنعتی محسوب می‌شود.

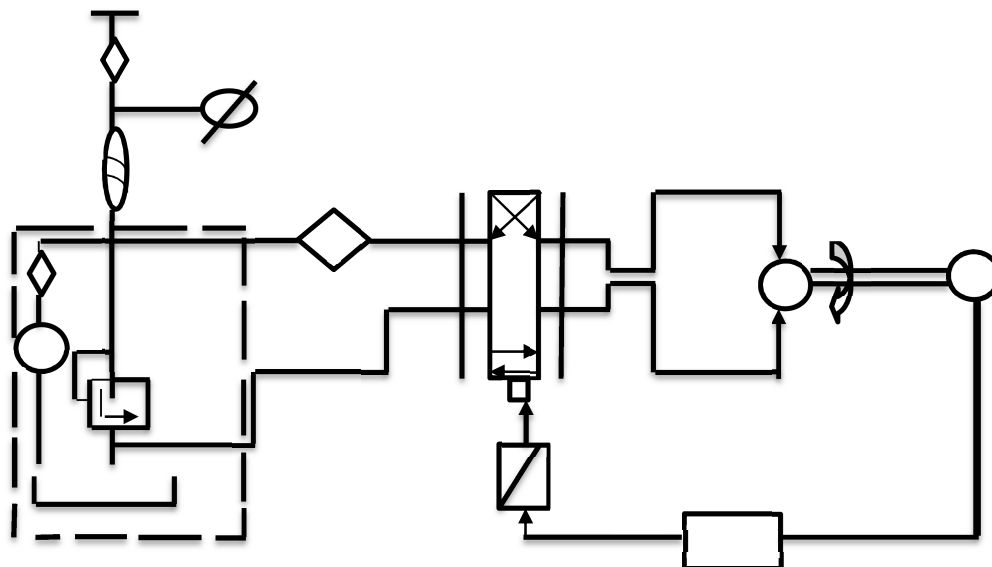
این مقاله به فرم زیر سازمان داده شده است: در بخش (۲) شماتیک و مدل ریاضی غیر خطی سیستم سروالکتروهیدرولیک توصیف شده است. در بخش (۳) طراحی کنترل کننده بر اساس ساختار تطبیقی لاگور معرفی شده است. در بخش (۴) نتایج شبیه‌سازی شده برای آزمودن قابلیت‌های کنترل کننده مورد نظر ارائه گردیده و در بخش (۵)، مطالب و داده‌های موجود در این مقاله جمع‌بندی و نتیجه‌گیری شده است.

با پیدایش تکنولوژی‌های نو در دهه‌های اخیر سیستم سرو الکتروهیدرولیک در پهنه وسیعی از کاربردهای صنعتی مورد استفاده قرار گرفته است که در این میان می‌توان به سیستم‌های تعلیق فعال و کنترل صنعتی اشاره کرد. همچنین به دلیل عملکرد مناسب این سیستم در گشتاور بالا و دست یابی به پاسخ سریع و دقت بالا، به طور وسیعی در هواپیماهای تجاری، ماهواره‌ها، سیمولاتورهای پرواز، کنترل توربین و بی شماری از کاربردهای نظامی مورد استفاده قرار گرفته است [۱،۲].

موضوع کنترل سیستم سروالکتروهیدرولیک در دو کلاس مورد بررسی قرار می‌گیرند: ۱- کنترل موقعیت ۲- کنترل سرعت یا گشتاور. تکنیک‌های کنترلی بسیاری برای کنترل این سیستم در دهه‌های اخیر پیشنهاد شده است که می‌توان به روش‌های کنترل غیر خطی [۳]، روش شبکه عصبی فازی [۴]، روش هوشمند و شبکه عصبی [۵،۷] و روش ترکیبی مود لغزشی با شبکه عصبی فازی [۶] اشاره کرد.

اگرچه 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.

در این مقاله از کنترل کننده‌های لاگور برای کنترل سرعت سیستم سرو الکتروهیدرولیک استفاده شده است. ساختار کنترل کننده‌های لاگور آنها را قادر می‌سازد تا بتوانند سیستم‌های با پاسخ ضربه طولانی یا



شکل (۱) شماتیک دینامیک سرعتی سیستم سروالکتروهیدرولیک
Fig. (1): Schematic of servo electro hydraulic system

۲- توصیف سیستم

شماتیک مربوط به دینامیک سرعت سیستم سروالکتروهیدرولیک در شکل (۱) نمایش داده شده است.

قسمتهای اصلی این سیستم عبارتند از: ۱- منبع انرژی الکتریکی، ۲- اکومولاتور، ۳- شیر شارژ، ۴- فشارسنج، ۵- فیلتر، ۶- شیر الکتریکی دو حالته، ۷- موتور هیدرولیکی، ۸- دستگاه اندازه گیری سرعت، ۹- کامپیوتر کنترل کننده و ۱۰- مبدل ولتاژ به جریان. همان گونه که در شکل (۱) نشان داده شده است، ابتدا کامپیوتر یک ولتاژ کنترلی تولید نموده که توسط مبدل ولتاژ به جریان، به جریان تبدیل می شود. این جریان الکتریکی باعث جابجایی شیر الکترو هیدرولیکی شده و این جابجایی باعث تغییر فشار هوا در خروجی شیر الکتریکی می شود که با تغییرات فشار هوا، می توان سرعت موتور هیدرولیکی را تنظیم نمود. قابل ذکر است که این سیستم الکتروهیدرولیکی علاوه بر استفاده از هوا جهت تنظیم سرعت موتور توسط روغن نیز می تواند این کار را انجام دهد.

با به کارگیری قانون دوم نیوتن معادلات فضای حالت سیستم برای حرکت چرخشی شفت موتور به صورت زیر به دست خواهد آمد:

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

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

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

$$y = x_1$$

در حالی که (x_1, x_2, x_3) به صورت زیر تعریف شده اند:

$$-x_1 \text{ - سرعت زاویه ای موتور}$$

$$-x_2 \text{ - فشار تفاضلی بار}$$

$$-x_3 \text{ - جابجایی ولو}$$

و مقادیر نامی پارامترها به صورت زیر می باشند:

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

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

$$B_m = 1.1 \times 10^{-3} \text{ Nms} \text{ : ضریب ویسکوزیته, } c_f = 0.104 \text{ : ضریب}$$

$$\text{اصطکاک داخلی, } V_o = 1.2 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ : حجم سیلندر موتور, } p_a$$

$$\text{: } \beta_e = 1.391 \times 10^9 \text{ : ضریب حجمی کاری سیستم, } c_d = 0.61$$

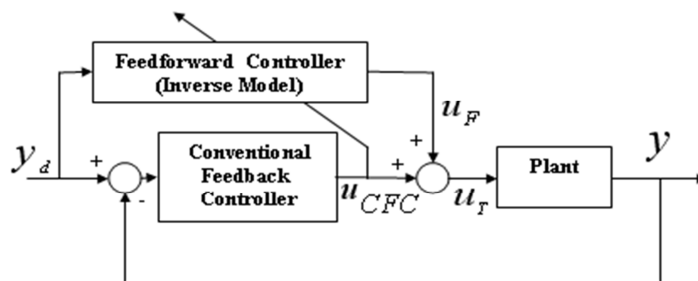
$$\text{ضریب تخلیه, } c_{im} = 1.69 \times 10^{-11} \frac{m^3}{Pa \cdot s} \text{ : ضریب افت موتور در}$$

$$\text{داخل, } P_s = 10^7 \text{ Pa} \text{ : فشار منبع, } \rho = 850 \frac{Kg}{m^3} \text{ : چگالی روغن,}$$

$$T_r = 0.01 \text{ s} \text{ : ثابت زمانی شیر, } K_r = 1.4 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s \cdot v} \text{ : بهره}$$

$$\text{شیر, } K_q = 1.66 \frac{m^2}{s} \text{ : بهره شار شیر, } mw = 8\pi \times 10^{-3} \text{ : گرادیان}$$

سطح.



شکل (۲): ساختار آموزش پسخورد خطا

Fig. (2): Structure of feedback error learning

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

از آنجایی که در بحث کنترلی می توان جهت چرخش موتور را همواره در یک جهت فرض کرد، یعنی $x_1 > 0$ (که این یک فرض واقعی می باشد)، لزومی ندارد که جابجایی شیر نیز دو 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 $x_3 > 0$ می باشد.

هدف از کنترل این سیستم، کنترل پایداری برای هر نقطه کاری سیستم می باشد. به سادگی می توان نشان داد که نقطه تعادل سیستم به صورت زیر می باشد:

$$x_{1N} - \text{Arbitrary constant value of our choice}^1,$$

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

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

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

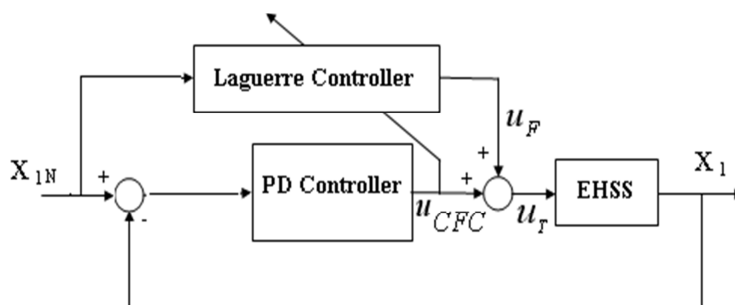
برای آموزش وزن‌های کنترل کننده مسیر پیشرو استفاده می‌گردد. در شکل (۲) ورودی سیستم، u_T بردار خروجی کنترل کننده مسیر پیشرو و u_{CFC} بردار خروجی کنترل کننده می‌باشد. عموماً از کنترل کننده PID یا PD برای کنترل کننده پس‌خورده در شیوه آموزش پس‌خورده خطا استفاده شده است. تنها ملاک سنجش برای به دست آوردن بهره در کنترل کننده پس‌خورده، پایداری سیستم می‌باشد. البته قابل ذکر است که از ساختار آموزش پس‌خورده خطا خود می‌توان به دو شیوه استفاده کرد. این دو شیوه عبارتند از ساختار Regulation و Tracking. در ساختار Regulation ورودی کنترل کننده مسیر پیشرو سیگنال خطا (اختلاف میان سیگنال ورودی و خروجی) می‌باشد در حالی که در ساختار Tracking ورودی کنترل کننده مسیر پیشرو سیگنال مرجع می‌باشد و هدف تعقیب سیگنال ورودی است. در این مقاله از ایده Tracking استفاده شده است که ساختار کنترلی آن در شکل (۳) نشان داده شده است.

۳- ساختار پیشنهادی برای کنترل سرعت سیستم سروالکتروهیدرولیک

۳-۱ آموزش پس‌خورده خطا

شیوه آموزش پس‌خورده خطا برای اولین بار به وسیله Kawato برای سیستم‌های خطی و غیرخطی پیشنهاد شد [10,11,12] ساختار این شیوه در شکل (۲) نمایش داده شده است.

ایده اصلی الگوریتم آموزش پس‌خورده خطا مبتنی بر آموزش یک کنترل کننده با ساختار دینامیکی توسط یک کنترل کننده کلاسیک می‌باشد که در آن هدف، دستیابی به مدل معکوس فرایند است. الگوریتم آموزش پس‌خورده خطا از دو بخش تشکیل شده است: در بخش اول، سیگنال‌های ورودی وارد کنترل کننده مسیر پیشرو شده (Feed Forward Controller) تا اینکه سیگنال‌های خروجی‌های (u_F) را به وجود آورند. در بخش دوم، بردار خروجی کنترل کننده قراردادی (Conventional Feedback Controller)، u_{CFC} به عنوان خطا



شکل (۳): ساختار آموزش پس‌خورده خطا برای کنترل سرعت سیستم سروالکتروهیدرولیک

Fig. (3): Structure of feedback error learning for velocity control of an electro hydraulic servo system

می‌گردد ولی برای کنترل مناسب یک سیستم نیاز به تعداد ضرائب زیادی دارد که این امر خود باعث پیچیدگی آن‌ها می‌شود. تابع تبدیل ساختارهای IIR علاوه بر صفر دارای قطب نیز بوده و می‌تواند با تعداد ضرائب کم عملکرد کنترلی خوبی از خود نشان دهند ولی از طرفی دارای مشکل پایداری می‌باشند. مزیت مهم ساختارهای لاگور در آن است که IIR بوده و می‌توانند سیستم‌های با پاسخ ضربه با عمر طولانی یا نامحدود را با تعداد ضرائب کم تخمین بزنند و در عین حال همانند ساختارهای FIR پایداری مناسبی داشته باشند. در حقیقت ساختار لاگور دارای مزیت فیلترهای IIR از نقطه نظر پیچیدگی کم محاسباتی و مزیت فیلترهای FIR از نقطه نظر پایداری می‌باشد [۸]. همین امر باعث شده است که ساختار لاگور در بسیاری از کاربردهای تخمین و شناسایی سیستم‌ها در زمینه‌های کنترل و مخابرات مانند کنترل فعال نوبز و پیش‌بینی خطی سیستم‌ها مورد استفاده قرار گیرد. در این مقاله قبل از نشان دادن ساختار لاگور معادلات توصیفی مربوط به فیلترهای IIR و FIR به اختصار نشان داده شده است. معادلات مربوط به فیلتر FIR به صورت زیر بیان می‌شود:

۳-۱-۱- کنترل کننده پس‌خورده قراردادی

در اینجا برای کنترل کننده پس‌خورده قراردادی از یک کنترل کننده PD استفاده شده است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$u_{PD} = K_p(x_{1d} - x_1) + K_d(\dot{x}_{1d} - \dot{x}_1) \quad (7)$$

که در آن K_p و K_d بهره‌های نسبی و تفاضلی پس‌خورده متعلق به PD می‌باشند. همچنین خروجی کنترل کننده پس‌خورده قراردادی به صورت زیر بیان می‌شود:

$$u_{CFC} = u_{PD} \quad (8)$$

با انتخاب مناسب برای مقادیر K_p و K_d می‌توان سیستم سروالکتروهیدرولیک را کنترل کرد.

۳-۲ کنترل کننده لاگور

کنترل کننده‌ها را از لحاظ پاسخ ضربه می‌توان به دو نوع کنترل کننده با پاسخ ضربه با عمر محدود (FIR) و کنترل کننده با پاسخ ضربه با عمر نامحدود (IIR) تقسیم بندی کرد. تابع تبدیل ساختارهای FIR تنها دارای صفر بوده که این امر باعث پایدار بودن مناسب آن‌ها

ضرایب W_i که در ترکیب خطی ذکر شده مورد استفاده قرار می‌گیرند، وزن‌های فیلتر FIR نامیده می‌شوند که تعداد آن‌ها مشخص کننده طول فیلتر FIR (L) می‌باشد.

همچنین معادلات مربوط به فیلتر IIR به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$y(n) = \sum_{m=1}^N b_m y(n-m) + \sum_{m=0}^{M-1} a_m x(n-m) \quad (12)$$

معادله فوق بیان می‌کند که سیگنال خروجی فیلتر y ، در لحظه n از ترکیب خطی N نمونه از نمونه‌های قبلی سیگنال خروجی و M نمونه از نمونه‌های حال و قبلی سیگنال ورودی به دست می‌آید.

در این مقاله برای کنترل سرعت سیستم سرو با استفاده از کنترل کننده لاگور، کنترل کننده لاگور در حوزه پیوسته مورد استفاده قرار گرفته شده است. ساختار کنترلی لاگور در حوزه گسسته در شکل (۴) نشان داده شده است.

$$y(n) = \sum_{l=0}^{L-1} w_l x(n-l) = W^T X(n) \quad (9)$$

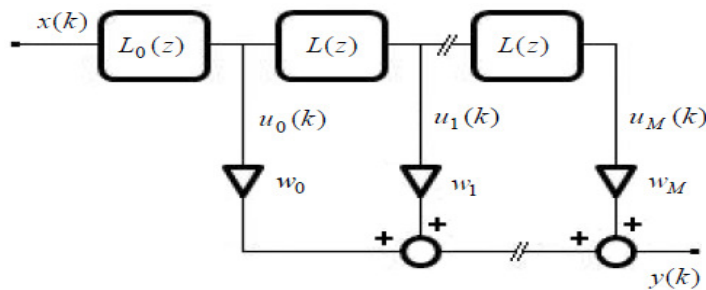
که در آن

$$X(n) = [x(n) \ x(n-1) \ \dots \ x(n-L+1)] \quad (10)$$

$$W = [w_0 \ w_1 \ \dots \ w_{L-1}]^T \quad (11)$$

که در آن، y بیانگر سیگنال خروجی فیلتر دیجیتال، x بیانگر سیگنال گسسته زمان ورودی فیلتر می‌باشد [۱۳].

همان طور که ملاحظه می‌شود در یک فیلتر FIR با طول L خروجی فیلتر در هر لحظه n ، از ترکیب خطی مقدار فعلی و تعداد محدود (L عدد) از نمونه‌های قبلی سیگنال ورودی با ضرایب فیلتر به دست می‌آید.



شکل (۴): ساختار کنترلی لاگور

Fig. (4): Laguerre control structure

که در آن a یک عدد حقیقی است که مکان قطب ساختار لاگور را مشخص می‌کند و دامنه آن باید از یک کوچکتر باشد تا پایداری را تضمین کند.

خروجی ساختار لاگور $y(k)$ از ترکیب خطی خروجی‌های فیلترهای پایین گذر و تمام گذر و وزن‌های w مطابق معادله زیر به دست می‌آید.

$$y(k) = \sum_{m=0}^M w_m u_m(k) \quad (15)$$

می‌توان نشان داد که خروجی هر یک از بلوک‌های IIR در ساختار لاگور در حقیقت حاصل از تجزیه سیگنال ورودی بر روی پایه‌های متعامد در فضای هیلبرت می‌باشند. به عبارت دیگر هر یک از

سیگنال‌های u یکی از مؤلفه‌های متعامد تشکیل دهنده سیگنال x در فضای هیلبرت می‌باشد که این امر نشان دهنده توانایی خوب ساختار لاگور در تخمین انواع سیستم‌ها می‌باشد [۱۴]. همچنین کم بودن پیچیدگی محاسباتی و گویا بودن تابع تبدیل کلی ساختار لاگور با طول‌های مختلف، پیاده‌سازی آن‌ها را برای سیستم‌های عملی بسیار مناسب می‌سازد.

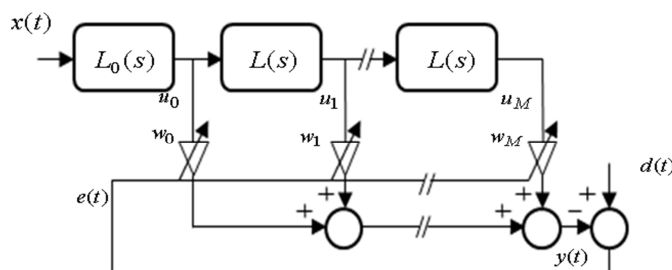
همان طور که ملاحظه می‌شود کنترل کننده لاگور مرتبه M از قرار دادن یک فیلتر پایین گذر و تک قطبی $L_0(z)$ بر سر راه سیگنال ورودی x و M فیلتر تمام گذر تک قطبی $L(z)$ به صورت سری شده در بعد از آن به دست می‌آید. قطب تمامی فیلترهای تمام گذر و نیز فیلتر پایین گذر یکسان هستند. قابل ذکر است که ساختار کنترلی لاگور در حوزه گسسته کاملاً مشابه با ساختار کنترلی در حوزه پیوسته می‌باشد. به بیان دیگر، ساختار لاگور ترکیبی از ساختارهای FIR و IIR می‌باشد که با جایگزینی یک تابع تبدیل با یک صفر و یک قطب به جای هر یک از بلوک‌های تاخیر در ساختار فیلترهای FIR که فقط دارای صفر می‌باشد به دست می‌آید.

با انتخاب مناسب مکان قطب ساختار لاگور شناسایی سیستم‌های با پاسخ ضربه نامحدود با تعداد پارامترهای بسیار کم، امکان‌پذیر خواهد بود، در عین این که پایداری کنترل کننده نیز تضمین خواهد شد. تابع تبدیل فیلتر پایین گذر $L_0(s)$ و فیلترهای تمام گذر $L(s)$ به صورت زیر می‌باشند:

$$L_0(s) = \frac{\sqrt{2a}}{s+a} \quad (13)$$

$$L(s) = \frac{s-a}{s+a}, \quad a > 0 \quad (14)$$

در کاربردهای تخمین و شناسایی می‌توان قطب‌های طبقات فیلتر لاگور [۱۵] یا وزن‌های فیلتر لاگور [۱۳] را با روش‌های بازگشتی آموزش داد. در این مقاله سعی در رسیدن به اهداف کنترلی مناسب با آموزش وزن‌های فیلتر داریم و قطب‌های فیلتر لاگور را ثابت در نظر



شکل (۵): آموزش وزن‌های ساختار لاگور

Fig. (5): Training the weights of Laguerre structure

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

قطب مربوط به تابع گویای پایین گذر $L_0(s)$ در $(a=55)$ ثابت شده است. طول فیلتر لاگور در این طراحی برابر ۴۰ می‌باشد و قطب‌های مربوط به بلوک‌های توابع گویای $L(s)$ برای هر چهار بلوک در یک نقطه به شرح زیر در نظر گرفته شده‌اند:

$$a_1 = 10, a_2 = 20, a_3 = 30, a_4 = 40, a_5 = 50, \\ a_6 = 60, a_7 = 70, a_8 = 80, a_9 = 90, a_{10} = 100$$

گام آموزشی برای الگوریتم به روز رسانی وزن‌ها برابر

$$\mu = .1 \times 10^{-8}$$

است. ضرائب کنترل کننده PD به صورت زیر در نظر گرفته شده است:

$$K_p = .0056, K_d = .000057$$

کنترل کننده طراحی شده توانسته است سیستم سروالکترو هیدرولیک را در یک زمان مناسب و سیگنال کنترلی قابل دسترسی، کنترل کند. نتایج شبیه سازی شده با استفاده از کنترل کننده لاگور در شکل (۶) نشان داده شده است.

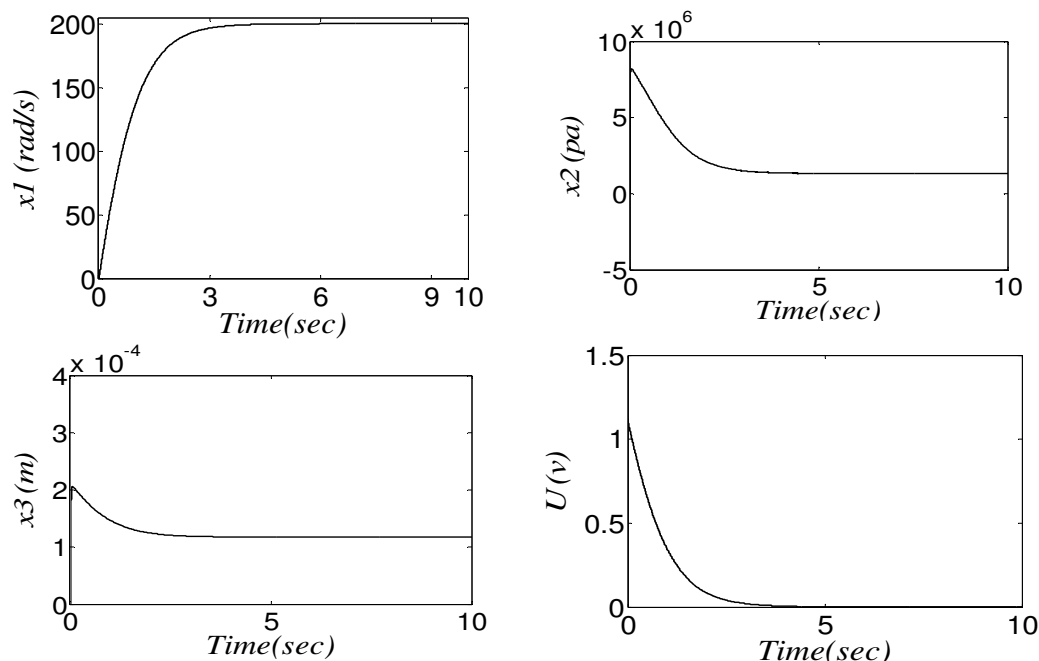
در آموزش وزن‌ها توسط الگوریتم گرادین نزولی هدف ما کمینه کردن خطا در هر لحظه $(e(k))$ است. منظور از $e(k)$ مقدار خطای بین سیگنال خروجی ساختار لاگور $(y(k))$ و سیگنال مطلوب مورد نظر ما $(d(k))$ که برای کنترل کننده مناسب است می‌باشد. به عبارت دیگر می‌خواهیم ضرایبی از ساختار لاگور (بردار W) را بیابیم که خطا را کمینه کند. با استفاده از الگوریتم LMS در به روز رسانی وزن‌ها رابطه زیر برای به روز رسانی وزن‌های فیلتر لاگور به دست می‌آید:

$$W(k+1) = W(k) + \mu x(k)e(k) \quad (16)$$

که در آن μ طول گام الگوریتم LMS می‌باشد. همان گونه که از معادله (۱۶) مشخص است بردار وزن‌های w در کنترل کننده لاگور توسط الگوریتم بازگشتی و با توجه به مقادیر نمونه‌های سیگنال ورودی و سیگنال خطا دائما به روز رسانی می‌شود تا به بهترین مقدار برای وزن‌های کنترل کننده دست یابیم.

۴- نتایج شبیه سازی

در این مقاله نتایج تحلیل کنترل کننده لاگور با استفاده از ایده آموزش پس‌خورده خطا، در حوزه لاپلاس، با در نظر گرفتن شرایط اولیه زیر به دست آمده است:



شکل (۶): نتایج شبیه سازی شده با استفاده از ایده آموزش پسخورد خطا برای کنترل سیستم سرو با استفاده از کنترل کننده لاگور
 Fig (6): Simulation results using feedback error learning for control of an electro servo system with the help of Laguerre controller

Table (1): Comparison between controllers based on Performance

جدول (۱): مقایسه کنترل کننده‌ها از لحاظ عملکرد

ش	انواع کنترل کننده‌ها	زمان نشست (ثانیه)	هدف از کنترل
۱-	FEL (لاگور) - روش پیشنهادی	۳.۵ ثانیه	کنترل سرعت
۲-	شبکه نروفازی	۴ ثانیه	کنترل سرعت
۳-	مود لغزشی و شبکه نروفازی	۲ ثانیه	کنترل سرعت
۴-	شبکه عصبی	۶ ثانیه	کنترل سرعت
۵-	غیر خطی (خطی سازی فیدبک)	۵ ثانیه	کنترل سرعت

همان گونه که در شکل (۶) دیده می‌شود، کنترل کننده لاگور توانسته است سرعت سیستم سرو الکترو هیدرولیک مربوط را در زمان نشست $3/5$ ثانیه و با سیگنال کنترلی با دامنه $1/1$ ولت کنترل کند. همچنین کم بودن چشمگیر پیچیدگی محاسباتی در امر طراحی در این روش از مزیت‌های این کنترل کننده می‌باشد.

• بهبود در سیگنال کنترلی u : در کنترل کننده لاگور سیگنال کنترلی نسبت به روش‌های کنترلی از جمله کنترل کننده شبکه نروفازی، شبکه عصبی، کنترل ترکیبی مود لغزشی با شبکه عصبی فازی و همچنین کنترل کننده غیر خطی دارای دامنه کمتر و مناسبتر برای پیاده سازی‌های عملی می‌باشد.

• بهبود در زمان نشست: روش لاگور نسبت به بقیه کنترل کننده‌های طراحی شده زمان نشست کمتری دارد. البته باید اشاره

۱-۴- 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 عصبی فازی، شبکه عصبی، کنترل ترکیبی مود لغزشی با شبکه عصبی فازی و کنترل کننده غیر خطی مقایسه شده است. در تمامی کنترل کننده‌ها خروجی مطلوب برای سیستم

می‌توان با تغییر مکان قطب‌های کنترل کننده لاگور به دلخواه، کاری کرد که سیگنال خروجی مطلوبی که مدنظر است به دست آید. در این مقاله، تعیین مکان قطب‌ها به صورت تجربی باعث شده است تا کنترل کننده لاگور بهترین عملکرد خود را در ایجاد یک سیگنال کنترلی مناسب نشان دهد و در عین حال با آموزش وزن‌های کنترل کننده به صورت تطبیقی، کنترل کننده بتواند عمل تخمین و تطبیق خود با شرایط را به خوبی انجام دهد.

۵- نتیجه گیری

در این مقاله ساختار کنترل کننده لاگور با ایده آموزش پس‌خورده خطا برای کنترل سرعت سیستم سروالکترو هیدرولیک که یکی از سیستم‌های پر استفاده در کاربردهای صنعتی و نظامی می‌باشد، معرفی شده است. نتایج شبیه سازی شده نشان می‌دهد که کنترل کننده پیشنهادی توانسته است نسبت به کنترل کننده‌های دیگر، سیستم سرو الکترو هیدرولیک را با یک عملکرد مناسبتر کنترل کند. از جمله این عملکردهای مناسب می‌توان به زمان نشست و سیگنال کنترلی مناسب و همچنین سادگی در امر طراحی اشاره کرد.

پی‌نوشت:

$$1- x_{1N} = 200 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

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 غیرخطی 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 (۲) به اختصار نتایج مربوط به زمان نشست و سیگنال کنترلی کنترل کننده ارائه شده و دیگر کنترل کننده‌ها مقایسه شده است.

۴-۲- اثر کنترل کننده لاگور بر عملکرد سیستم

مزیت مهم کنترل کننده‌های لاگور در کم بودن پیچیدگی محاسباتی آن‌ها و کم بودن تعداد عملیات ریاضی برای محاسبه خروجی به ازای هر یک از نمونه‌های سیگنال ورودی می‌باشد. این امر باعث می‌شود تا کنترل کننده‌های لاگور برای کاربردهای عملی بسیار مناسب باشند و بتوان به راحتی آن‌ها را بر روی پردازشگرهای دیجیتال پیاده‌سازی نمود. در عین حال قابلیت تعیین مکان قطب‌های کنترل کننده‌های لاگور به صورت تجربی یا توسط روش‌های تطبیقی، به آن‌ها انعطاف پذیری لازم برای استفاده در انواع سیستم‌ها را می‌دهد. به عبارت دیگر

References

- [1] H.E. Merritt, "Hydraulic control system", New York: John Wiley & Sons, Inc., 1967.
- [2] J. Watton, "Fluid power system", New York: Prentice Hall, 1989.
- [3] M.Jo., "Nonlinear control of an Electro Hydraulic Velocity Servo System", ACC, Anchorage, Alaska, USA, 2002.
- [4] S.A.R. Mohseni, M. Aliyari Shooredeli, M. Teshnehlab, "EHSS velocity control by fuzzy neural networks", IEEE/NAFIPS, pp. 13-18, Meeting of the 2006.
- [5] H. Azimian, R. Adlgostar, M.Teshnehlab, "Velocity control of an electro hydraulic servomotor by neural networks", IEEE/ICPC, Russia, Aug. 24-26, 2005.
- [6] S.A.R. Mohseni, M. Aliyari Shooredeli, M. Teshnehlab, "Decoupled sliding-mode with fuzzy neural network controller for EHSS velocity control", IEEE/ICIAS, Malaysia, 2007.
- [7] Ch.L. Asokanathan, "CMAC based controller for hydro mechanical systems", IEEE/ACC, Arlington, VA, SA, 2001.
- [8] T. Oliveira e Silva, "Laguerre filters: An introduction", Revista do DETUA, Vol. 1, No. 3, pp. 237-248, Jan. 1995.
- [9] H. Miyamoto, M. Kawato, T. Setoyama, R. Suzuki, "Feedback error learning neural network for trajectory control of a robotic manipulator", Neural Networks, Vol. 1, pp. 251-265, 1988.
- [10] M. Kawato, "Computational schemes and neural network models for formation and control of multijoint arm trajectory", In W.T. Miller, R.S. Sutton, P.J. Werbos (Eds), Neural networks for control, The MIT Press, 1990.
- [11] V.D. Kalanovic, D. Popovic, N.T.Skaug, "Feedback error learning neural netmoral 1989work for Trans-femoral prosthesis", IEEE Trans. on Rehab. Eng., Vol. 8, No.1, March 2000.
- [12] M. Tavan, M. Aliyari Shooredeli, A.R. Zare Bidaki, "Stability of feedback error learning for linear systems", Milano, Italy, IFAC World Congress, 2011.
- [13] M. Malboubi, F. Razzazi, M. Aliyari Shooredeli, "Elimination of power line noise from EMG signals using an efficient adaptive laguerre filter", IEEE/ICSES, 2010.
- [14] H. Belt, "Orthonormal bases for adaptive filtering", PhD Thesis 2008 .
- [15] M. Asadi, F. Razzazi, "Adaptive determination of the free parameters of generalized orthonormal IIR adaptive filters using genetic algorithm", IEEE/ICCCC, 2009.