

ارائه یک مدل غیرخطی جامع برای شیرهای کنترل جریان اسپولی مبتنی بر وضعیت-های مختلف انطباقی

محمدحسن توفیقی فارغ‌التحصیل دکتری دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
فرید نجفی دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
سیدحسین ساداتی استادیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
علی اصغر جعفری دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

چکیده

شیرهای هیدرولیکی رفتارهای غیرخطی متنوعی را به نمایش می‌گذارند. در بسیاری از کاربردها، مدل‌های اجزای هیدرولیک می‌توانند به صورت ساده و خطی فرض شوند، لکن در کاربردهای دقیق، عبارات غیرخطی مذکور نمی‌توانند صرف‌نظر گردند. برای استخراج مدل شیر کنترل جریان اسپولی چهارراهه، از ترکیب دو معادله غیرخطی جریان عبوری از روزنه شیر استفاده می‌گردد. در این مقاله یک مدل یکپارچه برای شیرهای کنترل جریان اسپولی ارائه می‌گردد و اثر انطباق اسپول بر روی خواص سیستم هیدرولیک مدار باز مورد تحلیل قرار می‌گیرد. معادلات ریاضی غیرخطی حاصله، دبی‌ها را از طریق پورت‌های شیر به پارامترهای آن مرتبط می‌سازند. دبی‌ها به صورت توابعی پیوسته و غیرخطی از پارامترهای انطباق و نیز پارامترهای متعارف شیر بیان شده‌اند. این معادلات برای انواع مختلف شیرهای کنترل جریان اسپولی قابل استفاده می‌باشند و حالات شیرهای انطباق بحرانی، فرا انطباقی و فرو انطباقی را پوشش می‌دهند. هندسه عرض اسپول به تنهایی توسط پارامترهای مدل کنترل می‌شوند. عدم تساوی عرض اسپول‌ها و موقعیت خنثی نامتعارف اسپول‌های شیر نیز می‌تواند با استفاده از این مدل شبیه‌سازی شود.

کلمات کلیدی: سیستم سرو هیدرولیک، شیر کنترل جریان، پارامتر انطباقی، مدل سازی غیر خطی، شبیه سازی

A Completely Nonlinear Model for Spool Control Valves Based on Various Lappings

M. H. Toufighi Ph.D. Graduate, K. N. Toosi University of Technology, Tehran
F. Najafi Associated Prof. K. N. Toosi University of Technology, Tehran
S. H. Sadati Assistant Professor, K. N. Toosi University of Technology, Tehran
A. A. Jafari Associated Prof. K. N. Toosi University of Technology, Tehran,

Abstract

The hydraulic valves display various nonlinear behaviors. In many applications, the models of hydraulic components can be assumed to be simple and linear, but in the precise applications, the nonlinear terms can not be ignored. To derive an appropriate model for a four-way flow control valve, a combination of two nonlinear equations derived for the valve orifice is used. In this paper, a complete nonlinear model for the flow control valves is presented and the effect of lapping parameter on the properties of a open-circuit hydraulic system is analyzed. The resulting nonlinear equations relate the flow rates to the valve parameters through the ports. The flow rates have expressed in the continuous and nonlinear functions including lapping parameter and some conventional parameters of the valves.

These equations are applicable for various types of flow control valves and cover all of lapping modes of spools such as critical lapped, overlapped, and underlapped. The land geometry of the valve is controlled by the model parameters. Wide disparity of the lands and unusual null position can also be simulated using this model.

Keywords: Hydraulic servo-system, flow control valve, lapping parameter, Nonlinear modeling, Simulation.

۱- مقدمه

با وجود این، در آن سیال تراکم ناپذیر فرض شده و لذا مدل ارائه شده فاقد رفتار دینامیکی برای شیر می‌باشد. در [۱۰] نیز شیر کنترلی سرو در یک سیستم انتقال قدرت هیدرولیک به روش باند گراف با یک عنصر مقاومت مدل شده و تراکم پذیری سیال منظور نشده است. مدل مذکور برای شیر تناسبی بوده و سیال عبوری از آن نیز غیر قابل تراکم فرض شده است. در این تحقیق، مدل سازی شیر سرو انطباقی دو مرحله‌ای با لحاظ کردن تراکم پذیری سیال مد نظر قرار می‌گیرد. در این مقاله یک مدل ریاضی غیرخطی برای شیر عمومی کنترل جریان اسپولی توسعه می‌یابد. این مدل یک دسته خواص هندسی اسپول و متغیرهای فیزیکی را به دبی عبوری از پورت های شیر مرتبط می‌سازد.

۲- توسعه مدل عمومی روزنه شیر اسپولی

عموماً از روزنه متغیر برای کنترل جریان سیال استفاده می‌شود. حرکت اسپول موجب می‌شود که عرض اسپول مساحت پورت A_v مربوط به جریان و به موجب آن رابطه جریان بر حسب فشار روزنه را تغییر دهد. یک اسپول فرو انطباقی دارای یک عرض پورت روزنه است که از عرض اسپول بزرگتر است، در حالی که یک اسپول فرا انطباقی دارای یک عرض پورت روزنه است که کوچکتر از عرض اسپول می‌باشد. روزنه متغیر نشان داده شده در شکل ۱ عنصر اصلی کنترل سیستم‌های هیدرولیکی است که دارای سه دبی مرتبط با پورت های روزنه است. پورت‌های تغذیه Q_S و تخلیه Q_R به ترتیب به پمپ و تانک متصل می‌شوند. پورت خروجی روزنه دبی تنظیم شده یا کنترلی Q_C را فراهم می‌سازد و معمولاً به یک عملگر مانند یک جک هیدرولیکی یا هیدروموتور متصل می‌شود. پارامترهای δ_S و δ_R مقادیر انطباقی در وضعیت خنثی اسپول $A_v = 0$ را در پورت-های تغذیه و تخلیه بیان می‌کنند، و می‌توانند به طور مستقل وجود داشته باشند. در یک شیر نو معمولاً این مقادیر با هم مساوی هستند.

با فرضیات مذکور معادله ساده شده روزنه شیر به گونه‌ای که فقط یکی از روزنه‌های تغذیه یا تخلیه در لحظه معین باز است به صورت زیر نشان داده می‌شود [۳]:

$$Q_C = \begin{cases} K_V x_V \sqrt{\Delta P_S}, & x_V \geq 0 \\ -K_V x_V \sqrt{\Delta P_R}, & x_V < 0 \end{cases} \quad (الف)$$

و یا بر حسب A_v ؛

$$Q_C = \begin{cases} C_V A_V \sqrt{\Delta P_S}, & A_V \geq 0 \\ -C_V A_V \sqrt{\Delta P_R}, & A_V < 0 \end{cases} \quad (ب)$$

شیرهای غیرخطی رفتارهای غیرخطی متنوع هموار و ناهموار را به نمایش می‌گذارند. عامل غیرخطی اصلی در مدل‌های شیر هیدرولیکی، جمله جذر در معادلات جریان روزنه می‌باشد که همواره وجود دارد. این جمله، تابعی غیرخطی از اختلاف فشارهای محفظه در یک عملگر هیدرولیکی متصل به شیر می‌باشد. خطاهای ساختی در هندسه اسپول و یا خرابی‌ها، به ویژه در حوالی موقعیت خلاص^۱ اسپول نیز، موجب غیرخطی شدن پاسخ شیر می‌شوند. تغییرات کوچک در هندسه اسپول ممکن است آثار بزرگی را در دینامیک سیستم هیدرولیک داشته باشد. به عنوان مثال، یک شیر فرا انطباقی^۲ به خاطر مشخصه ناحیه مرده آن در دبی جریان سیال، می‌تواند موجب خطای حالت ماندگار گردد [۱]. این خطا می‌تواند در کاهش عملکرد مطلوب سیستم‌های دقیق و حساس، مانند موشک، مؤثر واقع شود. در عوض یک شیر فرو انطباقی^۳ به خاطر افزایش دبی جریان در مجاورت موقعیت خلاص، ممکن است نگرانی‌ها در خصوص پایداری سیستم را تقویت نماید [۲].

در مراجع [۱] و [۳] به ترتیب مدل‌هایی برای شیرهای انطباقی بحرانی^۴ و فرو انطباقی ارائه شده‌اند. مرجع [۴] نیز مدلی برای شیر انطباقی بحرانی با لحاظ کردن نشتی در شیر ارائه داده است. مرجع [۵] با تعریف شیر به صورت یک رابطه خطی، موجب تأخیری در پاسخ سیستم به خاطر حذف دینامیک شیر شده است که با تمهیدات کنترلی در صدد جبران آن برآمده است. مرجع [۶] یک مدل غیرخطی ریاضی برای یک شیر سرو هیدرولیک غیر متعارف ارائه کرده که در آن از دو اسپول (به جای یک اسپول در شیرهای متعارف) استفاده شده است. در مدل او احتمال معکوس شدن جریان در شیر نادیده گرفته شده است. این مدل محدود به حالت انطباق بحرانی شیر می‌باشد و فقط اصطکاک لزج در مدل شیر لحاظ شده است. همچنین تداخل دینامیک‌های عملگر و شیر مد نظر قرار نگرفته است.

در مرجع [۷] مدلی برای یک شیر کنترل فشار یک مرحله‌ای ارائه شده است. او همچنین مدلی را برای یک شیر کنترل فشار تناسبی معرفی کرده است [۸]. این مدل‌ها برای نوعی شیر کنترل فشار الکترو هیدرولیکی ارائه شده و در آن‌ها تأثیر بسیاری از عوامل غیرخطی مورد نظر این تحقیق لحاظ نشده است. برای یک شیر یک مرحله‌ای تناسبی با در نظر گرفتن برخی غیرخطی‌های ناهموار نیز مدلی ارائه شده است [۹]

^۱Null

^۲Overlapped

^۳Underlapped

^۴Critical (zero) lapped

$$A_v^* = \begin{cases} 0 & ; & A_v \leq \sigma_s \\ A_v - \sigma_s & ; & \sigma_s < A_v < A_p + \sigma_s \\ A_p & ; & A_v \geq A_p + \sigma_s \end{cases}$$

$$A_v^{**} = \begin{cases} 0 & ; & A_v \geq -\sigma_R \\ -(A_v + \sigma_R) & ; & -(A_p + \sigma_R) < A_v < -\sigma_R \\ A_p & ; & A_v \leq -(A_p + \sigma_R) \end{cases}$$

در عبارات فوق

$$\sigma_s = \delta_s w, \quad \sigma_R = \delta_R w, \quad A_p = L_p w$$

در معادلات جریان ۲ و ۳ فرض شده که جریان عبوری از روزنه-ها به صورت مغشوش بدون وجود نشتی و عدم وقوع پدیده کاویتاسیون باشد. یافتن رابطه‌ای برای دبی خروجی روزنه که هر دو جریان آرام و مغشوش را در برگردد و به صورت تابعی از سطح بازشدگی روزنه بیان شود، می‌تواند دقت مدل روزنه را افزایش دهد. با فرض تعریف رابطه ضریب تخلیه شیر و عدد رینولدز به فرم زیر [۱۱]

$$C_V = K \sqrt{Re} \quad (۴)$$

که در آن

$$K = C_d \sqrt{\frac{2}{\rho}}$$

و با توجه به وجود رابطه مستقیم بین عدد رینولدز و دبی سیال، می‌توان C_V را به صورت تابعی از دبی Q_C در نظر گرفت و معادله ۱ را به شکل زیر نوشت

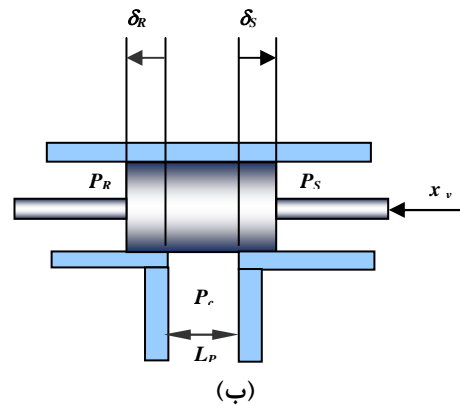
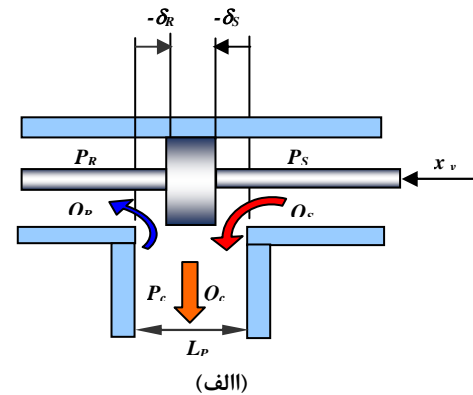
$$Q_C = f(Q_C) A_v \operatorname{sgn}(\Delta P_S) \sqrt{|\Delta P_S|} \quad (۵)$$

ملاحظه می‌شود که یک رابطه ضمنی برای محاسبه دبی به صورت تابعی از سطح بازشدگی شیر حاصل خواهد شد که در آن محاسبات دچار فرایند تکرار شده و کار مدل‌سازی را با مشکل مواجه خواهد نمود. به منظور پرهیز از بروز این مشکل فرض می‌شود که ضریب تخلیه شیر ثابت می‌باشد. نهایتاً دبی کنترل Q_C عبوری از پورت خروجی شیر به صورت زیر تعریف می‌شود

$$Q_C = Q_S - Q_R \quad (۶)$$

معادلات دبی ۲، ۳، و ۶ به صورت کاملاً عمومی هستند و آثار غیر خطی به ویژه، فرا انطباقی یا فرو انطباقی بودن شیر، موقعیت غیر متقارن اسپول، و نیز معکوس شدن جریان را مدل می‌کنند. اگر از یک تابع اشباع u_S استفاده شود، این معادلات می‌توانند به طور ساده‌تری بیان شوند.

$$u_S(A_v, \sigma, A_p) = \begin{cases} 0 & ; & A_v \leq -\sigma \\ A_v + \sigma & ; & -\sigma < A_v < A_p - \sigma \\ A_p & ; & A_v \geq A_p - \sigma \end{cases} \quad (۷)$$



شکل ۱- نمایش شماتیک روزنه شیر؛ (الف) فروانطباقی، (ب) فراانطباقی

که در آن؛

$$K_V = C_d w \sqrt{\frac{2}{\rho}} A_v = x_v w, \quad C_V = K_V / w$$

$$\Delta P_S = P_S - P_C > 0$$

$$\Delta P_R = P_C - P_R > 0$$

و K_V یا C_V ضریب جریان یا ضریب تخلیه شیر، w عرض روزنه، A_v سطح بازشدگی روزنه و ρ چگالی سیال می‌باشد. سیستم‌های کنترل هیدرولیک، تغییرات سریع خواص جریان سیال با ورودی‌های اغتشاش و حرکت بارهای دینامیکی بزرگ مرتبط می‌باشند. تحت این شرایط وضعیت‌های نامتعارف مختلفی برای جریان ممکن است اتفاق بیفتد. معادلات تعمیم یافته که شامل غیرخطی‌های مختلف است به ترتیب برای دبی‌های تغذیه و تخلیه شیر بر اساس شکل ۱ به صورت زیر بیان می‌شوند

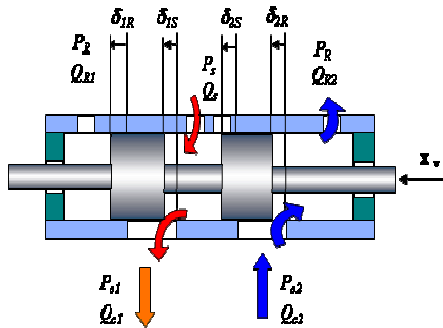
$$Q_S = C_V A_v^* \operatorname{sgn}(\Delta P_S) \sqrt{|\Delta P_S|} \quad (۲)$$

$$Q_R = C_V A_v^{**} \operatorname{sgn}(\Delta P_R) \sqrt{|\Delta P_R|} \quad (۳)$$

که در آن

پارامتر σ_{SI} و σ_{RI} می‌تواند تغییر کند. یک عرض اسپول فرو انطباقی متقارن دارای پارامترهای $\sigma_S, \sigma_R > 0$ و یک عرض اسپول فرو انطباقی متقارن دارای پارامترهای $\sigma_S, \sigma_R < 0$ است. خواص غیر متقارن اسپول و انحراف از موقعیت خنثی نیز می‌تواند با استفاده از مقادیر فرا انطباقی یا فرو انطباقی به گونه ای که $\sigma_S \neq \sigma_R$ باشد مدل شود. این ملاحظات به طور مشابه برای پارامترهای پورت ۲ نیز به کار می‌رود.

حالت خاص دیگر، حالتی است که در یک شیر فرا انطباقی به دلیل انحراف بیش از حد اسپول از حالت تعادل صفر آن رخ می‌دهد که در این جا آن را حالت ترکیبی فرا-فرو انطباقی می‌نامیم. این حالت می‌تواند به علت وجود عیب در شیر باشد که البته امکان رفع و تنظیم آن نیز میسر نباشد. در این حالت، ترکیبی از دو حالت فرا انطباقی و فرو انطباقی را در شیر خواهیم داشت. معادلات ۱۱ می‌تواند برای این حالت نیز مورد استفاده قرار گیرد. شکل ۳ مدل فیزیکی این حالت خاص اسپول شیر را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمایش شماتیک یک شیر اسپولی چهارراهه فرا-فرو انطباقی در وضعیت $x_v=0$

مدل چند موضوعی باندگراف شیر اسپولی با احتساب تراکم-پذیری سیال در شیر در شکل ۴ نشان داده شده است [۱۲] و [۱۳].

نتایج این مطالعه در طراحی و پیاده سازی یک الگوریتم کنترلی غیر خطی مبتنی بر روش اغتشاش منفرد به منظور کنترل دقیق موقعیت و یا سرعت خروجی هیدروموتور به خوبی مورد استفاده قرار گرفته و نتایج آن با تست‌های تجربی صحه‌گذاری شده است [۱۴، ۱۵، ۱۶ و ۱۷].

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدل جامعی برای شیرهای کنترل جریان اسپولی ارائه گردیده و اثر انطباق اسپول بر روی خواص سیستم هیدرولیک مدار باز مورد تحلیل قرار گرفته است.

با استفاده از این تابع، معادلات روزه می‌توانند به صورت زیر ساده‌تر بیان شوند

$$Q_S = C_V u_S(A_V, -\sigma_S, A_P) \operatorname{sgn}(\Delta P_S) \sqrt{|\Delta P_S|} \quad (۸)$$

$$Q_R = C_V u_S(-A_V, -\sigma_R, A_P) \operatorname{sgn}(\Delta P_R) \sqrt{|\Delta P_R|} \quad (۹)$$

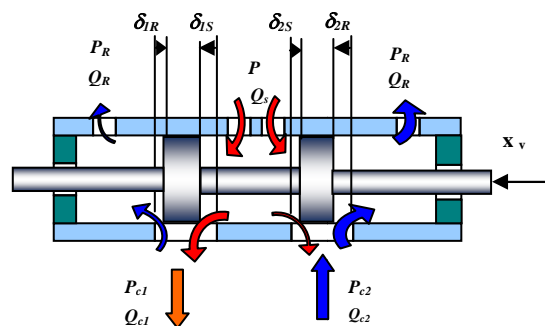
$$Q_C = C_V [u_S(A_V, -\sigma_S, A_P) \operatorname{sgn}(\Delta P_S) \sqrt{|\Delta P_S|} - u_S(-A_V, -\sigma_R, A_P) \operatorname{sgn}(\Delta P_R) \sqrt{|\Delta P_R|}] \quad (۱۰)$$

۳- مدل عمومی شیر اسپولی چهارراهه

با داشتن رابطه جریان عبوری از روزه، اکنون این رابطه در مدل شیر کنترل جریان اسپولی چهار راهه شکل ۲ منظور می‌گردد. این مدل از ترکیب دو معادله روزه به دست می‌آید به گونه‌ای که دو اسپول با عرض‌های مساوی L_S به صورت صلب به هم متصل و در نتیجه هر دو با جابه‌جایی‌های یکسان x_V حرکت می‌کنند. معادلات جریان برای پورت‌های ۱ و ۲ مشابه با معادلات ۸ تا ۱۰ می‌باشند. لیکن با توجه به این که برای پورت ۲ موقعیت خطوط تغذیه و تخلیه در مقایسه با پورت ۱ عوض می‌شوند، در نتیجه داریم

$$Q_{C1} = C_V [u_S(A_V, -\sigma_{S1}, A_P) \operatorname{sgn}(\Delta P_{S1}) \sqrt{|\Delta P_{S1}|} - u_S(-A_V, -\sigma_{R1}, A_P) \operatorname{sgn}(\Delta P_{R1}) \sqrt{|\Delta P_{R1}|}] \quad (۱۱-الف)$$

$$Q_{C2} = C_V [u_S(A_V, -\sigma_{R2}, A_P) \operatorname{sgn}(\Delta P_{R2}) \sqrt{|\Delta P_{R2}|} - u_S(-A_V, -\sigma_{S2}, A_P) \operatorname{sgn}(\Delta P_{S2}) \sqrt{|\Delta P_{S2}|}] \quad (۱۱-ب)$$



شکل ۲- نمایش شماتیک یک شیر اسپولی چهارراهه فرو انطباقی

معادلات ۱۱ می‌توانند برای شبیه‌سازی تمامی رفتارهای غیرخطی مهم شیرهای اسپولی چهارراهه هیدرولیکی مورد استفاده قرار گیرند. به طور خاص، فرا انطباقی یا فرو انطباقی بودن و نیز نامتقارن بودن عرض اسپول می‌تواند با تغییر پارامترهای شیر شبیه‌سازی شود. مشخصات پورت ۱ از طریق

with directional Damping", Journal of Simulation Modelling Practice and Theory, 10, pp. 51-67, 2002.

[8] Dasgupta, K., and Watton, J., "Dynamic analysis of proportional solenoid controlled piloted relief valve by bond graph", Simulation Modelling Practice and Theory, 13, pp. 21-38, 2005.

[9] Eryilmaz, B., Wilson, B. H., "Unified Modeling and Analysis of a Proportional Valve", Journal of the Franklin Institute, 343, pp. 48-68, 2006.

[10] Dasgupta, K., Watton J. and Pan S. , " Open-loop dynamic performance of a servo-valve controlled motor transmission system with pump loading using steady-state characteristics, Mechanism and Machine Theory 41, pp. 262-282.

[11] Borutzky, W., Barnard, B., Thoma, J.U., "Describing bond graph models of hydraulic components in Modelica" J. of Mathematics and Computers in Simulation, No. 53, pp. 381-387, 2000.

[12] Toufighi, M. H., Sadati, S. H. and Najafi, F., "Modeling and Analysis of a Mechatronic Actuator System by Using Bond Graph Methodology", IEEE Aerospace Conference 2007, Big Sky, USA, IEEEAC paper No. 1243, Mar. 2007.

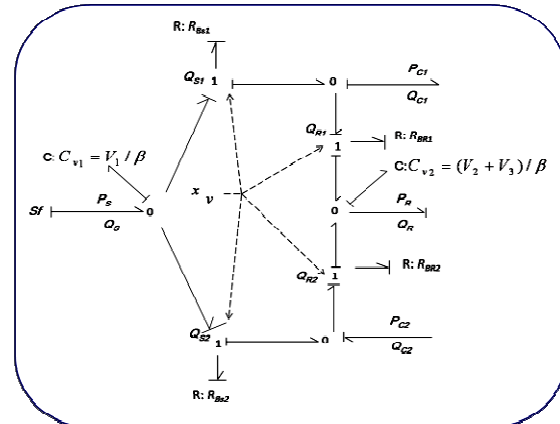
[13] Toufighi, M. H., Sadati, S. H., Najafi, F., "Model-based fault diagnosis of a pump-displacement-controlled actuator with a multidisciplinary approach using bond graph", Int. J. of Multiphysics, Vol. 4, No.1, pp. 63-76, 2010.

[14] Sazgar, H., Toufighi, M. H., Najafi, F., Sadati, S. H., "Experimental parameter identification and investigation of dimensionless state space variables for a rotary servo-hydraulic system", ISME2010 International Conference on Mechanical Engineering, paper No. 2715, Tehran, Iran, In Persian, May 2010.

[15] Toufighi, M. H., Sazgar, H., Najafi, F., Sadati, S. H., "Modeling and Experimental Identification of a Rotary Servo-Hydraulic System in Presence of Noise and Structural Uncertainties", Iranian Journal of Control, Vol.3, No.4, pp. 1-10, In Persian, Feb. 2010.

[16] Toufighi, M. H., Sazgar, H., Najafi, F., Sadati, S. H., "Modeling and Experimental Identification of a Rotary Servo-Hydraulic System in Presence of Noise and Structural Uncertainties", Iranian Journal of Control, Vol.3, No.4, pp. 1-10, In Persian, Feb. 2010.

[17] Toufighi, M. H., Sadati, S. H., Najafi, F., and Jafari, A. A., "Experimental Robust Singular Perturbation Control of a Servo-hydraulic System in the presence of a Parameter Uncertain Variations", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, under review, 2011.



شکل ۴- مدل باندگراف یک شیر کنترل جریان اسپولی چهارراهه

معادلات غیرخطی برای دی‌های کنترلی و بار به صورت توابعی پیوسته و غیرخطی از پارامتر انطباق و پارامترهای متعارف شیر بیان می‌شوند. این معادلات برای انواع مختلف شیرهای کنترل جریان اسپولی قابل استفاده می‌باشند و وضعیت‌های متعارف انطباقی شیرها و به ویژه وضعیت‌های خاص و ترکیبی مانند وضعیت فرا- فرو انطباقی را پوشش می‌دهند. عدم تساوی عرض اسپول‌ها و موقعیت خنثای نامتعارف اسپول‌های شیر نیز می‌تواند با استفاده از این مدل شبیه‌سازی شود.

مراجع

- [1] Merrit, H. E., "Hydraulic Control Systems", Wiley and Sons, New York, 1967.
- [2] Istif, I., Kongar, E., "Neural Network Predictive Control of a Servo valve Driven Hydraulic Motor", 35th International Conference on Computers and Industrial Engineering, Turkey, pp. 1011-1016, 2002.
- [3] Watton, J., "Fluid Power Systems: modeling, simulation, analog and microcomputer control", Prentice Hall, UK, 1989.
- [4] Ellman, A., "Leakage behavior of four-way servovalve", In Proceedings of the ASME Fluid Power Systems and Technology Division, pp. 163-167, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 1998.
- [5] Kwon J. H., Kim. T.H., Jang, J.S., Lee, I.y." Feedback Linearization Control of a Hydraulic Servo System", SICE-ICASE International Joint Conference 2006, Bexco, Busan, Korea, Oct. 2006.
- [6] Anderson, R. T., Li, P. Y., "Mathematical Modeling of a Two Spool Flow Control Servovalve Using a Pressure Control Pilot", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 124, pp. 420-427, 2002.
- [7] Dasgupta, K., and Karmakar, R., "Modeling and Dynamics of Single Stage Pressure Relief Valve