



NGHIÊN CỨU TÍNH NĂNG CỦA HỆ THỐNG TRUYỀN ĐỘNG THỦY TĨNH LƯU LƯỢNG PHỐI HỢP ĐIỀU CHỈNH HAI PHA

Phạm Văn Minh^{1*}

Tóm tắt: Bài báo đề cập đến hệ thống truyền động thủy tĩnh lưu lượng phối hợp điều chỉnh hai pha, phát triển mở rộng hệ thống áp lực phối hợp thành hệ thống lưu lượng phối hợp. Giới thiệu về các thành phần, nguyên lý cấu tạo và đặc điểm của hệ thống lưu lượng phối hợp điều chỉnh hai pha; phân tích sự khác nhau giữa hệ thống truyền động thủy tĩnh lưu lượng phối hợp điều chỉnh hai pha và hệ thống áp lực phối hợp điều chỉnh hai pha; tiến hành nghiên cứu thực nghiệm. Kết quả thí nghiệm chứng minh rằng, hệ thống truyền động thủy tĩnh lưu lượng phối hợp điều chỉnh hai pha có thể thực hiện thu hồi và tái sử dụng thế năng của hệ thống, đồng thời có thể phối hợp một cách hợp lý động cơ điện, bình tích áp và phụ tải để đạt được sự phối hợp công suất một cách tối ưu.

Từ khóa: Truyền động thủy lực; bình tích áp; tiết kiệm năng lượng; lưu lượng phối hợp; điều chỉnh hai pha.

Summary: The new concept of static hydraulic system with secondary regulation was mentioned, extending the coupling concept from the pressure coupled system to the flow coupled system. The constituent configuration, working tenet and characteristics of the flow coupled system with secondary regulation were introduced and the differences between the flow coupled system with secondary regulation and the pressure coupled system with secondary regulation was shown. The experimental test was performed for the flow coupled system with secondary regulation. Test results indicate that the flow coupled system with secondary regulation can recover and reuse potential energy of weight. Simultaneously, achievement of reasonable power matching can be realized among the electric motor, the hydraulic accumulator and load.

Keywords: Hydraulic transmission; hydraulic accumulator; energy-saving; flow coupled system; secondary regulation.

Nhận ngày 6/7/2016, chỉnh sửa ngày 14/9/2016, chấp nhận đăng 26/12/2016



1. Giới thiệu

Hệ thống truyền động thủy tĩnh áp lực phối hợp điều chỉnh hai pha với nhiều phụ tải mắc song song có nhiều ưu điểm như: đặc tính điều khiển tốt, có khả năng thực hiện thu hồi động năng (trong quá trình phanh) và thế năng của hệ thống đã và đang được chú trọng nghiên cứu. Các nước tiên tiến đã ứng dụng công nghệ này trong nhiều lĩnh vực như truyền động ô tô, công nghiệp chế tạo tàu thủy, các mô hình thí nghiệm lớn [1]. Nhưng khi làm việc với môi trường đẳng áp hệ thống truyền động thủy tĩnh phối hợp điều chỉnh hai pha tồn tại một số vấn đề: thứ nhất hệ thống sử dụng bình tích áp để thu hồi năng lượng và tái sử dụng tồn tại mâu thuẫn về sự đẳng áp của nguồn và thay đổi áp lực của bình tích áp trong quá trình làm việc, điều này hạn chế hiệu suất thu hồi và tái sử dụng năng lượng; thứ hai là khi hệ thống sử dụng cơ cấu chấp hành không thể thay đổi lưu lượng (xi lanh, mô tơ không đổi lưu lượng), thì không thể trực tiếp điều khiển tốc độ hoặc các tham số khác. Muốn giải quyết hai vấn đề nêu trên, có một phương pháp là trong hệ thống bố trí thêm một phần tử biến đổi năng lượng (biến áp thủy lực), ví dụ như các nghiên cứu ở Thụy Điển, Đức, Nhật Bản và Trung Quốc (đại học Triết Giang, đại học Cáp Nhĩ Tân) [2-8],... đang triển khai nghiên cứu. Còn một phương pháp khác là căn cứ vào đặc tính phụ tải yêu cầu, lợi dụng đặc điểm của hệ lưu lượng phối hợp, kết hợp công nghệ điều chỉnh hai pha cùng với hệ lưu lượng phối hợp để thành lập hệ thống truyền động thủy tĩnh lưu lượng phối hợp điều chỉnh hai pha. Bài báo dựa trên cơ sở phương pháp thứ hai, nghiên cứu sử dụng bình tích áp để thu hồi năng lượng của hệ thống truyền động thủy tĩnh lưu lượng phối hợp điều chỉnh hai pha; đồng thời đưa ra kết quả thực nghiệm để đánh giá hiệu quả tiết kiệm năng lượng và các yếu tố cải thiện các điều kiện làm việc của động cơ dẫn động hệ thống.

¹ TS, Khoa Cơ khí Xây dựng, Trường Đại học Xây dựng.

*Tác giả chính. E-mail: phamkhanhminh@gmail.com.



2. Sự phát triển của công nghệ truyền động thủy tĩnh điều chỉnh hai pha

2.1 Hệ thống truyền động thủy tĩnh lưu lượng phối hợp điều chỉnh hai pha

Công nghệ truyền động thủy tĩnh điều chỉnh hai pha thông thường có thể định nghĩa: trong hệ thống truyền động thủy lực có áp lực cân bằng đối với phần tử thứ cấp (mô tơ thủy lực/bơm thủy lực) cùng với van tiết lưu thực hiện điều khiển mạch kín [6-8]. Do vậy hệ thống thông thường làm việc với áp lực phối hợp, được gọi là CPS[9-10] (Common Pressure System) CPR[9] (Common Pressure Rail), hoặc SCS[10] (Secondary Controlled System). Căn cứ vào giá trị đầu ra của hai tham số công suất (áp lực và lưu lượng) của nguồn năng lượng, trong quá trình vận hành có hay không thay đổi cùng với phụ tải, có thể đem hệ thống chia làm bốn loại: hệ thống có lưu lượng không đổi - áp suất thay đổi, hệ thống có áp suất không đổi - lưu lượng thay đổi, hệ thống có lưu lượng và áp suất thay đổi, hệ thống có lưu lượng và áp suất không đổi. Hệ thống đẳng áp là một hình thức của hệ thống có áp suất không đổi - lưu lượng thay đổi. Bài báo phát triển mở rộng công nghệ điều chỉnh hai pha có hệ thống áp lực phối hợp thành hệ thống lưu lượng phối hợp, tức là hệ thống có lưu lượng không đổi - áp suất thay đổi. Khái niệm về hệ thống truyền động thủy tĩnh lưu lượng phối hợp điều chỉnh hai pha (Flow Coupled System with Secondary Regulation, FCSSR) có thể định nghĩa như sau: Hệ thống truyền động thủy tĩnh lưu lượng phối hợp điều chỉnh hai pha là trong quá trình làm việc lưu lượng phối hợp có khả năng sử dụng phần tử chuyển hóa năng lượng (phần tử thứ cấp) để thực hiện điều khiển mạch kín không có tiết lưu. Hệ thống truyền động thủy tĩnh lưu lượng phối hợp điều chỉnh hai pha là sự kết hợp của công nghệ điều chỉnh hai pha cùng với hệ lưu lượng phối hợp; nhằm mục đích phát huy ưu thế của từng hệ thống hợp thành, nâng cao tính năng điều khiển của hệ thống, đồng thời cung cấp một số trường hợp có khả năng thu hồi năng lượng. Hệ thống truyền động thủy tĩnh lưu lượng phối hợp điều chỉnh hai pha là sự phát triển và mở rộng lĩnh vực áp dụng của hệ thống áp lực phối hợp truyền động thủy tĩnh điều chỉnh hai pha. Sau khi sử dụng lưu lượng phối hợp hệ thống áp lực phối hợp truyền động thủy tĩnh điều chỉnh hai pha có đặc trưng như sau: có khả năng sử dụng phần tử (phần tử thứ cấp) chuyển hóa năng lượng, điều khiển mạch kín mà không cần đến tiết lưu.

2.2 Nguyên lý và đặc điểm làm việc

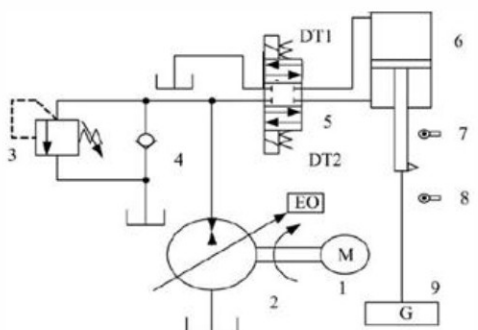
Hệ thống lưu lượng phối hợp điều chỉnh hai pha có ba hình thức thu hồi năng lượng: thu hồi năng lượng bằng bình tích áp (Hình 2), thu hồi năng lượng bằng cơ khí (quán tính của bánh đà Hình 3) và thu hồi năng lượng bằng phương pháp phát ra điện năng (Hình 4). Hình 1 trình bày về hệ thống lưu lượng phối hợp điều chỉnh hai pha có cơ cấu chấp hành là xy lanh. Áp lực của hệ thống quyết định việc xy lanh nâng hạ phụ tải, thông qua điều chỉnh thể tích danh nghĩa phần tử 2 thực hiện điều khiển tốc độ của xy lanh. Lợi dụng tín hiệu đóng mở công tắc hành trình để điều khiển van đổi hướng để thay đổi hướng, thực hiện chuyển động qua lại của xy lanh. Khi phụ tải chuyển động có thể năng thay đổi, làm cho hệ thống có thể cung cấp các khả năng để thu hồi năng lượng. Phần tử 2 trong quá trình nâng vật làm việc ở chế độ bơm thủy lực, cung cấp năng lượng để dẫn động phụ tải; còn trong quá trình phụ tải đi xuống, phần tử 2 làm việc ở chế độ động cơ thủy lực, có thể đem thế năng của phụ tải thu hồi và tái sử dụng.

Hình 2 là sử dụng bình tích áp để thực hiện việc thu hồi năng lượng trong hệ thống truyền động thủy tĩnh lưu lượng phối hợp điều chỉnh hai pha. Hình thức thu hồi năng lượng này đem thế năng của xy lanh và phụ tải chuyển hóa thành năng lượng thủy lực tích lũy trong bình tích áp. Trong hệ thống này hai phần tử 2, 3 và động cơ điện 1 liên kết cứng; trong hành trình đi lên của pít tông 8, phần tử thủy lực số 3 nhận năng lượng từ bình tích áp 5 phối hợp với động cơ điện 1 cùng dẫn động phần tử thủy lực số 2 làm nhiệm vụ của bơm thủy lực cung cấp dòng thủy lực có áp suất cao đẩy pít tông 8 đi lên; trong quá trình pít tông 8 đi xuống, xy lanh 8 xem như một bơm thủy lực cung cấp dòng thủy lực có áp suất cao đi ra khỏi xy lanh dẫn động phần tử thủy lực số 2 làm việc như một động cơ thủy lực phối hợp với động cơ điện 1 cùng dẫn động phần tử thủy lực số 3 làm việc với vai trò một bơm thủy lực, đem năng lượng (thế năng) thu hồi và tích lũy trong bình tích áp 5. Trong quá trình nâng phụ tải bình tích áp giải phóng năng lượng làm cho phần tử thủy lực số 3 làm việc như một động cơ thủy lực phối hợp với động cơ điện dẫn động phần tử thủy lực số 2 làm việc cung cấp năng lượng theo nhu cầu của xy lanh, từ đó thực hiện việc thu hồi và tái sử dụng năng lượng. Quá trình trên lặp lại tương tự ở các chu kỳ làm việc tiếp theo của hệ thống.

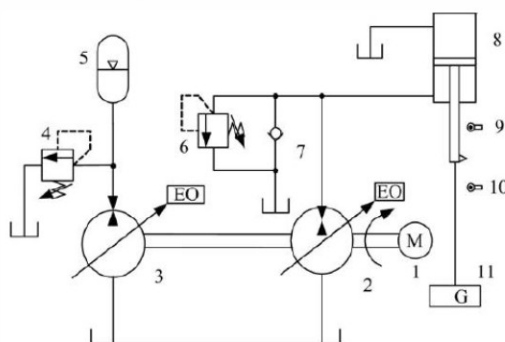
Hình 3 là nguyên lý hoạt động của hệ thống sử dụng quán tính bánh đà để thu hồi và tích lũy năng lượng. Là hình thức thu hồi năng lượng bằng cơ khí, năng lượng được tích lũy dưới dạng năng lượng quán tính của bánh đà (động năng) khi bánh đà chuyển động với vận tốc quay lớn.

Hình 4 là nguyên lý hoạt động của hệ thống sử dụng điện năng để thu hồi và tích lũy năng lượng. Hình thức thu hồi năng lượng này đem thế năng của xy lanh và phụ tải chuyển hóa thành điện năng. Năng lượng điện thu được có dạng hình sin hòa vào nguồn điện, đồng thời kết hợp với các bộ phận khác để tái sử dụng.

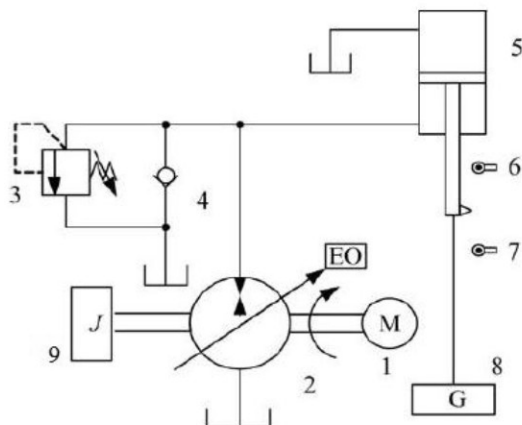
Trong 3 hình thức thu hồi năng lượng nói trên thì thu hồi năng lượng bằng bình tích áp có đặc điểm: giá thành rẻ, mật độ thu hồi năng lượng lớn, an toàn tin cậy,... và có triển vọng ứng dụng rộng rãi trong lĩnh vực kỹ thuật cơ khí; bài báo chủ yếu tập trung nghiên cứu về hình thức thu hồi này.



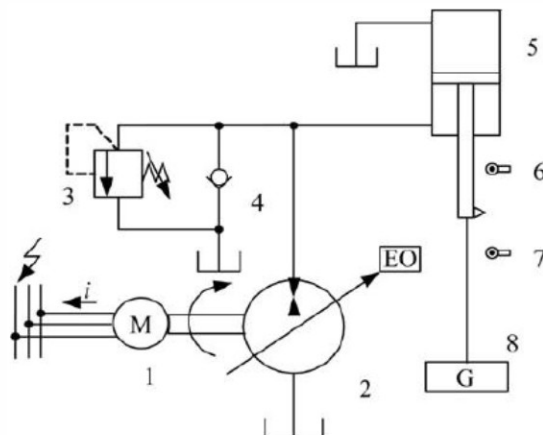
Hình 1. Sơ đồ nguyên lý làm việc của hệ thống thủy lực lưu lượng phối hợp điều chỉnh hai pha thu hồi năng lượng bằng bình tích áp
1-động cơ; 2-phần tử thứ cấp; 3-van an toàn; 4-thùng dầu; 5-van phân phối; 6-xi lanh; 7,8-giới hạn hành trình; 9-phụ tải



Hình 2. Sơ đồ nguyên lý làm việc của hệ thống thủy lực lưu lượng phối hợp điều chỉnh hai pha thu hồi năng lượng bằng bình tích áp
1-động cơ; 2,3-phần tử thứ cấp; 4,6-van an toàn; 5-bình tích áp; 7-thùng dầu; 8-xi lanh; 9,10-giới hạn hành trình; 11-phụ tải



Hình 3. Sơ đồ nguyên lý của hệ thống thủy lực lưu lượng phối hợp điều chỉnh hai pha thu hồi năng lượng bằng quán tính bánh đà
1-động cơ; 2-phần tử thứ cấp; 3-van an toàn; 4-thùng dầu; 5-xi lanh; 6, 7-giới hạn hành trình; 8-phụ tải; 9- bánh đà



Hình 4. Sơ đồ nguyên lý làm việc của hệ thống thủy lực lưu lượng phối hợp điều chỉnh hai pha thu hồi năng lượng bằng phát ra điện năng
1-động cơ; 2-phần tử thứ cấp; 3-van an toàn; 4-thùng dầu; 5-xi lanh; 6, 7-giới hạn hành trình; 8-phụ tải

2.3 Sự khác biệt chủ yếu giữa hệ thống lưu lượng phối hợp điều chỉnh hai pha và hệ thống áp lực phối hợp điều chỉnh hai pha

Hệ thống lưu lượng phối hợp điều chỉnh hai pha so với hệ thống áp lực phối hợp điều chỉnh hai pha có ưu điểm lớn nhất là có khả năng thực hiện việc thu hồi và tái sử dụng năng lượng của hệ thống, nhưng có nhược điểm là cấu tạo phức tạp, giá thành cao. Hệ thống lưu lượng phối hợp và áp lực phối hợp điều chỉnh hai pha có đặc điểm khác nhau chủ yếu ở các đặc điểm dưới đây:

- Hệ thống áp lực phối hợp vốn có ưu điểm giống với hệ thống mạng lưới điện, có thể mắc song song với nhiều phụ tải có tính chất khác nhau, đồng thời cũng có thể thực hiện việc điều khiển các phụ tải khác nhau với các quy luật khác. Nhưng đối với đơn phụ tải hoặc với nhiều phụ tải có tính chất giống nhau dùng hệ thống áp lực phối hợp phức tạp và có giá thành cao hơn hệ thống lưu lượng phối hợp.

- Đối với hệ thống mà phần tử chấp hành có lưu lượng cố định (xy lanh thủy lực và bơm có lưu lượng cố định), trong hệ thống lưu lượng phối hợp có thể mắc trực tiếp [11]; còn trong hệ thống áp lực phối hợp phải thông qua máy biến áp thủy lực thì mới thực hiện được biến đổi tải và biến đổi tốc độ, như giải thích trong Hình 5.

- Trong hệ thống đẳng áp liên kết với bình tích áp để thực hiện quá trình thu hồi năng lượng còn tồn tại những vấn đề sau:

+ Trong quá trình thu hồi năng lượng bình tích áp gây ra sự thay đổi áp lực, sự thay đổi áp lực này có thể làm nảy sinh trong hệ thống đẳng áp hiện tượng xung kích làm ảnh hưởng không tốt đến các phụ tải mắc song song khác trong hệ thống. Đặc biệt trong hệ thống mà phụ tải thu hồi năng lượng lớn đột ngột sẽ sinh ra hiện tượng áp lực chấn động lớn (không ổn định) ảnh hưởng rất lớn đến hệ thống.

+ Cùng với sự phát triển của công nghệ thủy lực thì áp lực làm việc của hệ thống thủy lực ngày càng lớn, dẫn đến yêu cầu áp lực làm việc của bình tích áp để thu hồi năng lượng ngày càng cao, làm cho khả năng thực hiện việc thu hồi năng lượng ngày càng khó, dẫn đến khó đạt được hiệu quả thu hồi và tái sử dụng năng lượng của hệ thống.

Trong hệ thống lưu lượng phối hợp điều chỉnh hai pha vì sử dụng bình tích áp làm phần tử thu hồi năng lượng ở nhánh độc lập làm cho áp lực thay đổi nội tại trong bình tích áp và áp lực do sự biến đổi của phụ tải trong hệ thống không có liên hệ với nhau, nên không tồn tại các vấn đề nêu trên. Còn so sánh với hệ thống truyền động thủy tĩnh đẳng áp điều chỉnh hai pha, hệ thống lưu lượng phối hợp điều chỉnh hai pha càng dễ dàng thực hiện điều khiển phụ tải đơn và phụ tải không biến đổi lưu lượng, dẫn đến có thể thực hiện một cách thuận lợi việc thu hồi và tái sử dụng thế năng của hệ thống. Từ đó cho thấy hệ thống lưu lượng phối hợp điều chỉnh hai pha là sự phát triển mở rộng và bổ sung cho công nghệ truyền động điều chỉnh hai pha [10].



3. Mô hình thực nghiệm và kết quả

3.1 Mục tiêu nghiên cứu thực nghiệm

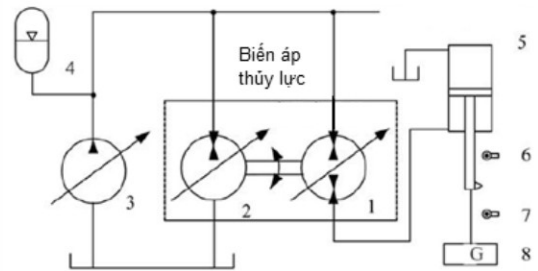
Bài nghiên cứu thực nghiệm được tiến hành tại phòng thí nghiệm kỹ thuật và công nghệ truyền động thủy khí, học viện cơ khí và tự động hóa, Trường Đại học Đông Bắc Trung Quốc, với mục tiêu kiểm chứng đánh giá hệ thống truyền động thủy tĩnh lưu lượng phối hợp điều chỉnh hai pha về hiệu quả tiết kiệm năng lượng cũng như là cải thiện các điều kiện làm việc ảnh hưởng đến quá trình làm việc ổn định, tuổi thọ cũng như sự bền lâu của động cơ cơ.

3.2 Quy trình và kết quả thực nghiệm

Hình 6 giới thiệu hệ thống thiết bị thí nghiệm dùng để thử nghiệm tính năng của hệ thống truyền động thủy tĩnh lưu lượng phối hợp điều chỉnh hai pha có sơ đồ nguyên lý làm việc ở Hình 2. Các thành phần chính gồm trạm thủy lực, trang bị phụ tải, hệ thống dẫn động phụ tải, hệ thống bình tích áp thu hồi năng lượng và hệ thống điều khiển điện thủy lực.

Thí nghiệm với điều kiện phụ tải 1 tấn và áp lực ban đầu của bình tích áp là 6MPa. Đầu tiên liên kết bình tích áp và phần tử số 3, điều chỉnh thể tích riêng (danh nghĩa) phần tử số 3 về 0, tương ứng với việc bình tích áp trong hệ thống thu hồi năng lượng không làm việc; chỉ sử dụng động cơ điện dẫn động phụ tải. Khi này đo được công suất động cơ điện dùng để dẫn động phụ tải trong quá trình nâng là $P_u = 4.72$ kW, còn khi phụ tải hạ xuống là $P_d = 3.60$ kW.

Khi cho bình tích áp làm việc, điều chỉnh thể tích riêng khi nâng phụ tải của phần tử số 2 và 3 lần lượt là D_{1u}, D_{2u} ; cũng như khi hạ phụ tải của phần tử số 2 và 3 D_{1d}, D_{2d} . Trong các điều kiện thí nghiệm khác nhau (giá trị của thể tích riêng $D_{1u}, D_{2u}, D_{1d}, D_{2d}$ thay đổi) sẽ thu được đồ thị áp lực dầu của bình tích áp như Hình 7. Tương ứng với các đồ thị áp lực các tham số và giá trị thí nghiệm thu được cho trong Bảng 1. Trong bảng 1 P_u và P_d lần lượt là công suất tiêu hao của động cơ điện khi nâng và hạ phụ tải.

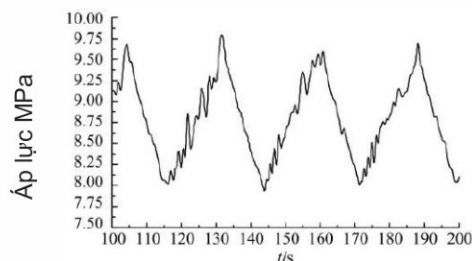


Hình 5. Sơ đồ nguyên lý máy biến áp thủy lực truyền thống liên kết với xy lanh thủy lực.

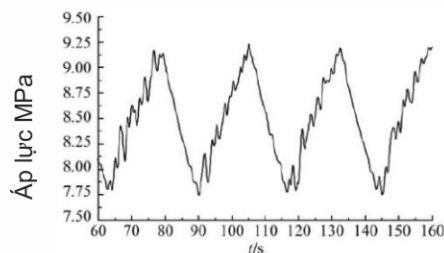
1, 2-phần tử thứ cấp; 3- bơm thủy lực; 4-bình tích áp; 5-xi lanh; 6, 7-giới hạn hành trình; 8-phụ tải



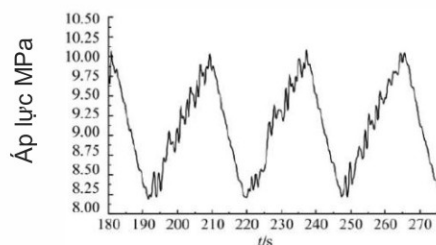
Hình 6. Sơ đồ hệ thống thiết bị thí nghiệm thử nghiệm tính năng của hệ thống truyền động thủy tĩnh lưu lượng phối hợp điều chỉnh hai pha



Thời gian (s)
a



Thời gian (s)
b



Thời gian (s)
c

Bảng 1. Kết quả thí nghiệm thu được

Tham số	Hình 7(a)	Hình 7(b)	Hình 7(c)	Bình tích áp không làm việc
p_{amin}/MPa	8.0	7.8	8.2	
p_{amax}/MPa	9.6	9.1	10.0	
P_u/kW	3.80	3.85	3.6	4,72
P_d/kW	3.85	3.85	3.85	3,6

Hình 7. Đồ thị áp lực bình tích áp khi thay đổi thể tích riêng của các phần tử thứ cấp số 2 và 3

Trong Bảng 1 có thể thấy, với ba tổ hợp số liệu thu được, trong quá trình nâng tải công suất trung bình của động cơ P_u khi bình tích áp không làm việc lớn hơn công suất trung bình của động cơ khi bình tích áp có làm việc. Điều này chứng minh bình tích áp đã thực hiện quá trình thu hồi và tái sử dụng thế năng của hệ thống làm giảm công suất động cơ trang bị để dẫn động hệ thống. Với Hình 7(b) có thể thấy thông qua điều chỉnh thích hợp các tham số của phần tử thứ cấp 2 và 3 có thể làm cho công suất của động cơ dẫn động trong quá trình nâng và hạ phụ tải tương đương nhau. Điều này có tác dụng rất tốt đến quá trình làm việc ổn định, tuổi thọ cũng như sự làm việc bền lâu của động cơ. Trong Hình 7(c) cho thấy công suất động cơ khi dẫn động nâng phụ tải và khi làm việc không tải là xấp xỉ bằng nhau. Điều này chứng minh công suất dẫn động phụ tải chủ yếu do bình tích áp cung cấp. Từ đó có thể thấy thông qua điều chỉnh các tham số của phần tử thứ cấp có thể thực hiện quá trình phối hợp một cách hợp lý động cơ điện, bình tích áp và phụ tải để đạt được hiệu quả tiết kiệm công suất tối đa cho động cơ điện dẫn động hệ thống.



4. Kết luận

Bài báo đề cập đến hệ thống truyền động thủy tĩnh lưu lượng phối hợp điều chỉnh hai pha và các kết quả thu được từ thực nghiệm trên hệ thống tại phòng thí nghiệm chỉ ra rằng, hệ thống truyền động thủy tĩnh lưu lượng phối hợp điều chỉnh hai pha kết hợp được ưu điểm của công nghệ điều chỉnh hai pha và hệ thống lưu lượng phối hợp. Công trình nghiên cứu góp phần phát triển và mở rộng công nghệ điều chỉnh hai pha, phát huy được ưu thế của công nghệ điều chỉnh hai pha về mặt điều khiển và tiết kiệm năng lượng. Kết quả thí nghiệm cũng chứng minh, thông qua điều chỉnh thể tích riêng của phần tử thứ cấp có thể phối hợp một cách hợp lý động cơ điện, bình tích áp và phụ tải để đạt được điều kiện làm việc lý tưởng về công suất, từ đó có thể cải thiện được các điều kiện làm việc của động cơ nhằm tăng tuổi thọ, sự làm việc ổn định và độ bền lâu của động cơ.

Tài liệu tham khảo

- Jiang Ji-hai, Zhao Chun-tao (2001), "Hydrostatic transmission technique with secondary regulation", *China Mechanical Engineering*, 12(5): 497-500.
- Dong Hong-lin, Jiang Ji-hai, Wu Sheng-lin (2003), "Research on the optimum conditions and energy recuperating of hydraulic accumulators in series to hydraulic transformer", *China Mechanical Engineering*, 14(3): 192-194.
- Vael Geroges, Achten Peter, Potma Jeroen (2003), "Cylinder control with the floating cup hydraulic transformer", *The Eighth Scandinavian International Conference on Fluid Power*, SICFP03, Tampere, 2003.

4. Ouyang Xiao-ping (2005), *Study of hydraulic transformer*, Doctoral Dissertation, Hangzhou: College of Mechanical and Energy Engineering, Zhejiang University.
5. Jiang Ji-hai, Lu Hong-ying, Zhou Rui-yan, et al (2006), "Development of hydraulic transformer in constant pressure rail system", *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, (5): 869-874.
6. Nikolaus H (1982), "Dynamik Sekundärgeregelter Hydroeinheiten am eingeprägten Drucknetz", *O+P ölhydraulik und Pneumatik*, 26(2): 74-82.
7. BackéW, Kögl Ch (1993), "Secondary controlled motors in speed and torque control", *The Second International Symposium on Fluid Power*, JHPS, Tokyo.
8. Shang Tong-lin (2004), *Improving performance of an energy efficient hydraulic circuit*, Doctoral Dissertation, Saskatoon, Saskatchewan, University of Saskatchewan.
9. Vael G E M, Achten P A J, Fu Z (2000). "The innas hydraulic transformer the key to the hydrostatic common pressure rail", *SAE Paper*, 01-2561.
10. Achten P A J, Fu Z, Vael G E M (1997), "Transforming future hydraulics: a new design of a hydraulic transformer", *The Fifth Scandinavian International Conference on Fluid Power*, SICFP97, Linköping University, Sweden.
11. Pham Van Minh (2015), *Research of a new type of hydraulic pumping Unit System for Energy saving mechanism*, Doctoral Dissertation, Liaoning: School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University.