

NGHIÊN CỨU THIẾT KẾ HỆ THỐNG TẠO ÁP SUẤT ĐỘT BIẾN ÁP DỤNG CHO KIỂM TRA RƠ LE ÁP LỰC LẮP TRÊN MÁY BIẾN ÁP CAO THẾ

RESEARCH AND DESIGN OF A SUDDEN PRESSURE RISE GENERATION SYSTEM
FOR TESTING RAPID PRESSURE RISE RELAY INSTALLED ON HIGH-VOLTAGE TRANSFORMERS

Nguyễn Trọng Khuyên^{1,*}

DOI: <http://doi.org/10.57001/huih5804.2024.118>

TÓM TẮT

Trong lĩnh vực truyền tải điện, rơ le áp lực được sử dụng để đảm bảo an toàn cho máy biến áp sử dụng trên các đường điện cao thế. Nghiên cứu này đưa ra một phương pháp tạo áp suất đột biến để kiểm tra chức năng hoạt động của rơ le áp lực. Bài báo trình bày thiết kế mô hình hệ thống tạo áp suất đột biến, xây dựng cơ sở lý thuyết, thuật toán điều khiển và tiến hành kiểm tra bằng thực nghiệm. Các kết quả thử nghiệm cho thấy hệ thống cho phép thay đổi áp suất theo đường đặc tuyến cho trước. Một số yếu tố ảnh hưởng đến kết quả thực tế cũng được trình bày trong bài báo. Kết quả nghiên cứu đã áp dụng trong việc chế tạo thành công hệ thống thử nghiệm kiểm tra rơ le áp lực. Hướng nghiên cứu tiếp theo có thể phát triển theo hướng tối ưu thuật toán có tính đến các yếu tố ảnh hưởng đến sai số điều khiển và tối ưu các tham số hệ thống để vẫn đảm bảo được chức năng tạo ra áp suất đột biến với chi phí rẻ nhất và chất lượng cao nhất.

Từ khóa: Hệ thống thủy lực, áp suất đột biến, rơ le áp lực, máy biến áp.

ABSTRACT

In the field of power transmission, rapid pressure rise relays are used to ensure the safety of transformers used on high voltage power lines. This study proposes a methodology to create surge pressure to test the functioning of the rapid pressure rise relay. This paper presents a model of a sudden pressure rise generation system, develops a theoretical basis, a control algorithm and conducts experimental testing. Test results show that the system allows pressure changes according to the given curve. Some factors affecting actual results are also presented in the article. The research results have been successfully applied in manufacturing a pressure relay testing system. Further research can be developed in the direction of optimizing the algorithm, taking into account factors affecting control errors and optimizing system parameters to ensure the function of generating surge pressure with cheapest cost and highest quality.

Keywords: Hydraulic system, sudden rise pressure, rapid pressure rise relay, transformers.

¹Viện Tự động hóa Kỹ thuật quân sự

*Email: nguyentk126@gmail.com

Ngày nhận bài: 15/11/2023

Ngày nhận bài sửa sau phản biện: 10/3/2024

Ngày chấp nhận đăng: 25/4/2024

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Máy biến áp trên các đường điện cao thế đóng một vai trò hết sức quan trọng trong việc đảm bảo truyền tải điện đi xa [1, 2]. Để đảm bảo an toàn cho đường điện và các máy biến áp, ngoài bình dầu phụ, rơ le áp lực được sử dụng để đưa ra các tín hiệu ngắt trong trường hợp có sự cố xảy ra liên quan tới dầu máy biến áp [3-5]. Trong trường hợp rơ le áp lực bị hỏng, khi có sự cố nhưng không có tín hiệu báo về sẽ dẫn đến hiện tượng máy biến áp bị cháy nổ, gây thiệt hại rất lớn về kinh tế, an toàn và mất nhiều thời gian để sửa chữa. Rơ le áp lực có nguyên lý hoạt động dựa trên sự thay đổi áp suất dầu bên trong máy biến áp. Khi áp suất dầu tăng gây ra do máy biến áp bị nóng, chập, cháy, đến một mức độ nhất định sẽ kích thích lên rơ le áp lực để đưa ra tín hiệu cảnh báo sớm và điều khiển đến hệ thống ngắt sự cố [6, 7]. Liên quan đến sự tăng áp suất dầu trong máy biến áp, một số nghiên cứu đã được thực hiện. Công trình của Chenguang Yan và các cộng sự nghiên cứu mô phỏng sự biến động tăng áp suất dầu bên trong máy biến áp gây ra bởi tia hồ quang điện [8]. Một nghiên cứu khác đưa ra phương pháp số để tính toán độ tăng áp do sự cố điện bên trong bốn máy biến áp dầu [9]. Ivan Xavier Lins và các cộng sự nghiên cứu thủy động lực học về dòng dầu bên trong rơ le bảo vệ máy biến áp, thực hiện mô phỏng bằng phương pháp CFD (Computational fluid dynamics) và tiến hành thực nghiệm để xác nhận [10]. Nghiên cứu của Yoshimasa Murakushi, Hiromasa Fukagawa, Takuji Uchiyama đi sâu vào phân tích và thực nghiệm để đánh giá cơ chế tăng áp suất và mối quan hệ giữa cơ chế tăng áp suất với năng lượng hồ quang [11].

Trong bài báo này, nhóm tác giả trình bày nghiên cứu thiết kế hệ thống mô phỏng quá trình tăng áp suất dầu bên trong máy biến áp. Cho phép tạo ra áp suất thay đổi theo các đường tuyến tính để từ đó có thể kiểm tra, so sánh và đánh giá chức năng hoạt động của rơ le áp lực. Trong thực tế, một số ứng dụng trong sản xuất sử dụng bơm thủy lực để gia áp. Tuy nhiên, để áp dụng cho bài toán tăng áp suất theo đường đặc tuyến thì việc sử dụng bơm thủy lực rất khó để thực hiện.

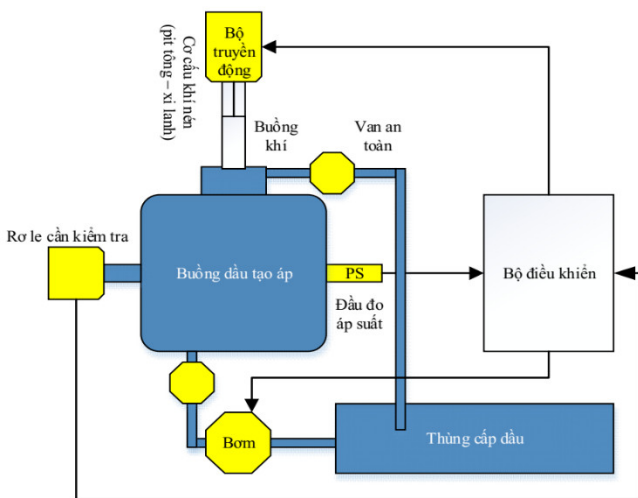
Một số bơm thủy lực hoạt động dựa trên sự thay đổi tần số dòng điện sinh ra bởi biến tần. Để thay đổi tốc độ bơm, từ đó thay đổi áp suất, cần thay đổi liên tục tần số dòng điện sinh ra từ biến tần, sự thay đổi liên tục tần số dòng điện của biến tần để điều khiển là không khả thi, có thể dẫn đến biến tần bị hỏng. Ngoài ra do tính chất của dầu máy biến áp cũng như các chất lỏng khác là hệ số nén rất lớn, khó bị nén, do đó cũng rất khó để điều khiển áp suất theo đường đặc tuyến bằng cách nén trực tiếp. Trước một số thách thức đặt ra, bài báo đề xuất thiết kế hệ thống kết hợp cơ cấu khí nén với cơ cấu thủy lực cùng với thuật toán điều khiển để điều khiển áp suất tăng theo đường đặc tuyến. Kết quả nghiên cứu được áp dụng thành công để xây dựng hệ thống kiểm tra rò rỉ áp lực cho Công ty Dịch vụ kỹ thuật truyền tải điện.

Trong khuôn khổ bài báo, nhóm tác giả trình bày thiết kế mô hình hệ thống, xây dựng cơ sở lý thuyết cho quá trình tạo áp suất đột biến và thuật toán điều khiển, đồng thời trình bày các kết quả thử nghiệm thực tế. Với phương án đề xuất, cho phép tăng áp suất dầu phù hợp với đường đặc tuyến đặt trước, đáp ứng được yêu cầu đặt ra cho bài toán kiểm tra rò rỉ áp lực.

2. THIẾT KẾ VÀ ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG

2.1. Thiết kế mô hình hệ thống

Hệ thống tạo áp suất đột biến (hbao gồm các thành phần chính: Thùng cấp dầu, buồng dầu tạo áp, cơ cấu buồng khí dạng pít tông - xi lanh, bộ truyền động, bơm dầu, van an toàn, cảm biến áp suất, bộ điều khiển. Thùng cấp dầu cấp dầu đến buồng tạo áp thông qua bơm thủy lực. Thiết bị kiểm tra được lắp trên buồng tạo áp. Sau khi buồng tạo áp đẩy dầu, van an toàn được khóa lại để đảm bảo buồng tạo áp lúc này kín, thể tích dầu bên trong nó là không đổi. Bộ truyền động làm dịch chuyển xi lanh, từ đó thay đổi buồng khí bên trong thân xi lanh. Bộ điều khiển có chức năng điều khiển hoạt động của toàn bộ hệ thống, bao gồm điều khiển cơ cấu truyền động, bơm thủy lực, đọc và ghi lưu các số liệu từ cảm biến áp suất, xử lý và cho ra kết quả.



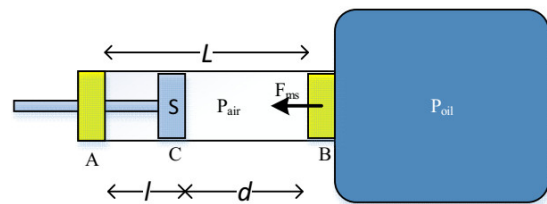
Hình 1. Mô hình hệ thống tạo áp suất đột biến

Trong giới hạn của bài báo, nhóm tác giả tập trung đi sâu nghiên cứu cơ sở lý thuyết, thuật toán điều khiển và tiến

hành thực nghiệm để thu được áp suất đột biến theo đường đặc tuyến. Để tạo áp suất đột biến theo đường đặc tuyến, pít tông di chuyển lên xuống làm thay đổi thể tích buồng khí. Khi buồng khí kín, áp suất trong buồng sẽ tỉ lệ nghịch với thể tích. Áp suất tăng lên khi thể tích buồng khí giảm và ngược lại. Áp suất này được truyền vào buồng tạo áp. Theo tính chất thủy lực, áp suất truyền vào sẽ là như nhau tại mọi điểm trong chất lỏng. Áp suất này chính là áp suất biến thiên tác dụng lên rò rỉ áp lực.

2.2. Cơ sở lý thuyết

Nguyên lý để tạo áp suất đột biến được thể hiện trên hình 2.



Hình 2. Nguyên lý tạo áp suất đột biến

Xi lanh được giới hạn bởi hai mặt đáy tại vị trí A và B, mặt đáy tại vị trí A được cố định với thành xi lanh, trong khi đó mặt đáy tại B có thể trượt, với lực ma sát F_{ms} , nó được giữ cân bằng tại vị trí B bởi cân bằng lực gây ra bởi áp suất khí, áp suất dầu và lực ma sát. Buồng khí được giới hạn bởi pít tông C, với mặt đáy B. Gọi S là tiết diện, P_{air} là áp suất khí trong buồng xi lanh, P_{oil} là áp suất dầu trong buồng tạo áp. Xét tại vị trí điểm B, theo tính chất cân bằng lực:

$$SP_{oil} = SP_{air} - F_{ms} \tag{1}$$

Suy ra:

$$P_{oil} = P_{air} - F_{ms}/S = P_{air} - P_{ms} \tag{2}$$

Trong đó, $P_{ms} = F_{ms}/S$ - áp suất gây ra bởi lực ma sát. Thường áp suất này rất nhỏ so với áp suất khí.

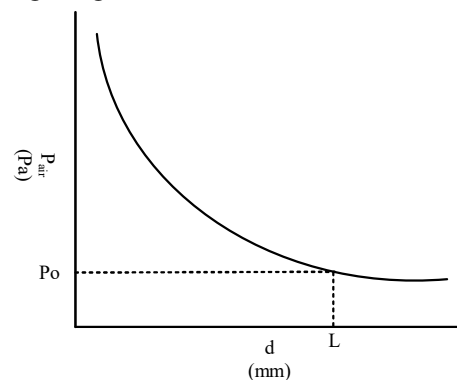
Mặt khác, gọi P_0 là áp suất khí khi pít tông ở vị trí A, Theo định luật Boyle-Mariotte, ta có biểu thức gần đúng:

$$P_0 V_0 = P_0 (LS) = P_{air} (dS) \tag{3}$$

Suy ra:

$$P_{air} = P_0 L / d \tag{4}$$

Đồ thị phụ thuộc của áp suất vào độ dài d được biểu diễn bằng đường đẳng nhiệt:



Hình 3. Đồ thị phụ thuộc áp suất vào

Bằng cách giảm chiều dài d , áp suất khí trong buồng khí tăng lên, do đó áp suất dầu cũng tăng lên theo biểu thức (2). Cho $d \rightarrow 0 \Rightarrow P_{air} \rightarrow \infty \Rightarrow P_{oil} \rightarrow \infty$. Như vậy theo lý thuyết, với nguyên lý này có thể tăng áp suất dầu đến vô hạn miễn là công suất cơ bộ truyền động cho xi lanh đủ lớn để thực hiện nén khí dưới áp suất cao. Tuy nhiên trên thực tế, ở áp suất rất cao, định luật Boyle-Mariotte không còn đúng, dưới áp suất cao, khí có thể hóa lỏng.

Giả sử ta có đường đặc tuyến mô tả bởi hàm theo thời gian. $P_{oil} = P(t)$. Rời rạc hóa thời gian bằng tập hợp các điểm $\{t_1, t_2, \dots, t_k\}$. Trong đó $t_k = kdt$, với dt là đơn vị mẫu thời gian. Khi đó, đường đặc tuyến áp suất dầu được mô tả bởi tập hợp các điểm $\{P_1, P_2, \dots, P_k\}$, trong đó $P_k = P(t_k)$. Áp suất khí suy ra từ biểu thức (2). Lúc này ta có thể rời rạc hóa áp suất khí bởi tập hợp $\{p_1, p_2, \dots, p_k\}$, trong đó:

$$p_k = P_k + P_{ms} \tag{5}$$

Từ biểu thức (4) suy ra chiều dài buồng khí lúc này xác định bởi biểu thức:

$$d_k = P_oL / p_k \tag{6}$$

Độ dịch chuyển của pít tông so với vị trí ban đầu:

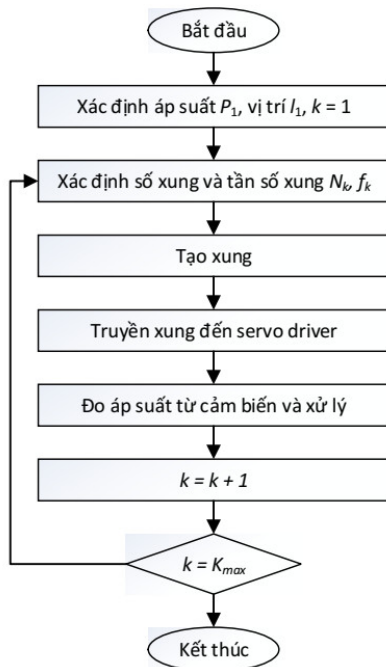
$$l_k = L - d_k = L - P_oL / p_k \tag{7}$$

Tốc độ dịch chuyển của pít tông lúc này xác định bởi:

$$v_k = (l_{k+1} - l_k) / dt = (d_k - d_{k+1}) / dt \tag{8}$$

Như vậy, để thu được đường đặc trưng áp suất dầu, cần thiết phải điều khiển pít tông theo cả vị trí và tốc độ, tuân theo đường đặc trưng mô tả bởi tập hợp các điểm $\{l_1, l_2, \dots, l_k\}$.

2.3. Thuật toán điều khiển



Hình 4. Lưu đồ thuật toán điều khiển

Bộ truyền động sử dụng động cơ servo và cơ cấu truyền động vít me để chuyển đổi từ chuyển động quay của động cơ sang chuyển động tịnh tiến làm dịch xi lanh. Gọi h là bước

ren của vít me. N là số xung encoder tương ứng một vòng quay. Khi đó, số xung cần thiết để dịch pít tông từ vị trí l_k đến vị trí l_{k+1} : $N_k = N(l_{k+1} - l_k) / h$, tần số xung lúc này được xác định bởi biểu thức: $f_k = N_k / dt = N(l_{k+1} - l_k) / hdt$. Giá trị $f_k < 0$ tương ứng với trường hợp động cơ quay theo chiều ngược lại. Lưu đồ thuật toán được biểu diễn trên hình 4.

Một số yếu tố ảnh hưởng đến đường đặc tuyến thu được:

- Sai lệch trong định luật Boyle-Mariotte giữa khí lý tưởng và khí thường.

- Độ đáp ứng của cơ cấu truyền động. Bằng cách chọn động cơ servo có công suất vượt trội so với tải, có thể nâng cao tính đáp ứng của hệ truyền động, từ đó tăng độ chính xác của đường đặc tuyến.

- Lựa chọn thời gian lấy mẫu dt . Thời gian lấy mẫu dt càng nhỏ thì đường đặc tuyến thu được càng ít sai lệch so với đường đặc tuyến cần đạt. Tuy nhiên tần số lấy mẫu dt cần phải lớn hơn thời gian đáp ứng của cơ cấu truyền động.

3. KẾT QUẢ VÀ BÌNH LUẬN

Các kết quả nghiên cứu được kiểm nghiệm thực tế, hình 5 mô tả hệ thống tạo áp suất đột biến đã được chế tạo dựa trên mô hình đề xuất. Các tham số hệ thống được chỉ ra trong bảng 1.

Bảng 1. Các tham số hệ thống

Kí hiệu	Mô tả	Giá trị
L	Chiều dài buồng xi lanh	200mm
S	Tiết diện trong buồng xi lanh	1256mm ²
Po	Áp suất ban đầu	1atm
N	Số xung encoder/vòng	1000 xung/vòng
h	Bước ren vít me	8mm/bước
dt	Chu kỳ lấy mẫu	0,1s
F _{ms}	Áp suất tương đương gây ra bởi lực ma sát (rất nhỏ so với áp suất khí)	0atm/s



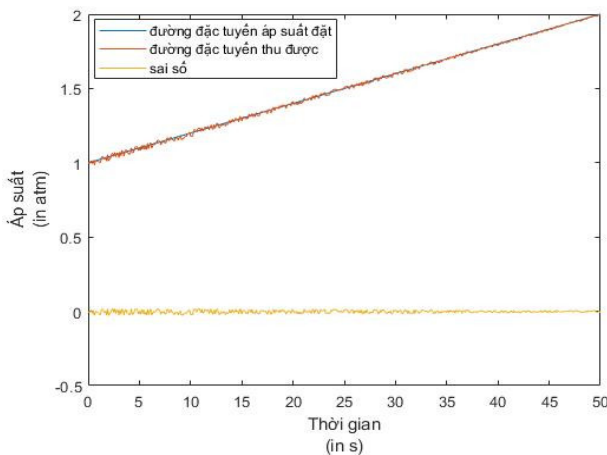
Hình 5. Hệ thống tạo áp suất đột biến để kiểm tra rò rỉ áp lực chế tạo

Trường hợp đường đặc tuyến đặt có độ dốc 0,02atm/s, thời gian lấy mẫu $\Delta t = 0,1s$, $P_1 = P_0 = 1,0atm$, $P_{max} = 2atm$. Kết quả thực nghiệm được thể hiện trên bảng 2.

Bảng 2. Kết quả thử nghiệm với độ dốc đường đặc tuyến 0,02atm/s

t (s)	P_k (atm)	P_{k-do} (atm)	$E = P_{k-do} - P_k$ (atm)
0	1,0000	1,0000	0,0
0,1	1,0020	0,9941	-0,0079
0,2	1,0040	1,0051	0,0011
0,3	1,0060	1,0137	0,0077
.....
49,8	1,9960	1,9981	0,0021
49,9	1,9980	1,9949	-0,0031
50,0	2,0000	1,9918	-0,0082

Sai số trung bình bình phương $E_{RMS} = 0,0105atm$. Đồ thị so sánh đường đặc tuyến thu được với đường đặc tuyến cho trước được mô tả trên hình 6. Có thể thấy đường đặc tuyến thu được bởi phương pháp điều khiển bám sát với đường đặc tuyến đặt.



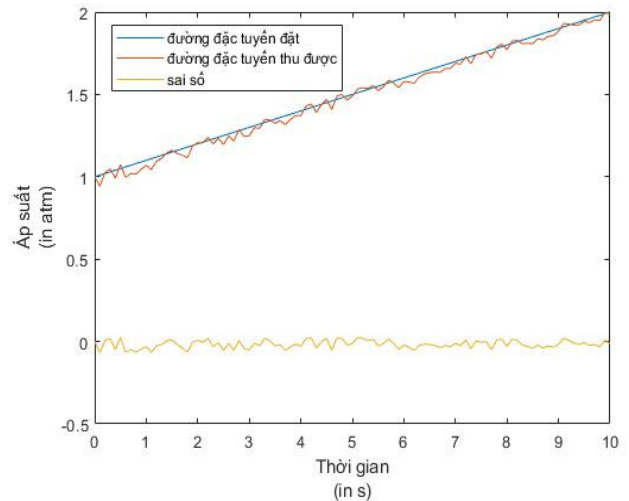
Hình 6. Đồ thị so sánh đặc tuyến thu được với đặc tuyến cho trước (độ dốc 0,02atm/s)

Trong trường hợp đường đặc tuyến có độ dốc 0,1atm/s, thời gian lấy mẫu $\Delta t = 0,1s$; $P_1 = P_0 = 1,0atm$; $P_{max} = 2atm$. Kết quả thực nghiệm được thể hiện trên bảng 3.

Bảng 3. Kết quả thử nghiệm với độ dốc đường đặc tuyến 0,1atm/s

t (s)	P_k (atm)	P_{k-do} (atm)	$E = P_{k-do} - P_k$ (atm)
0	1,0000	1,0000	0
0,1	1,0100	0,9428	-0,0672
0,2	1,0200	1,0262	0,0062
0,3	1,0300	1,0490	0,0190
....
9,8	1,9800	1,9486	-0,0314
9,9	1,9900	1,9984	0,0084
10,0	2,0000	1,9865	-0,0135

Sai số trung bình bình phương $E_{RMS} = 0,0301atm$. Đồ thị so sánh đường đặc tuyến thu được với đường đặc tuyến cho trước được mô tả trên hình 7.



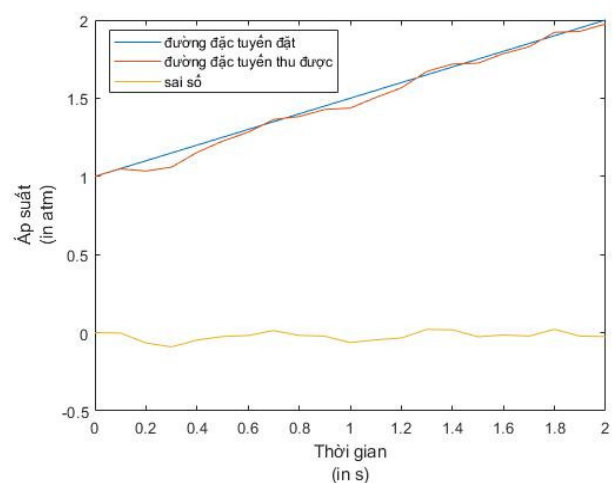
Hình 7. Đồ thị so sánh đặc tuyến thu được với đặc tuyến cho trước (độ dốc 0,1atm/s)

Với đường đặc tuyến đặt có độ dốc bằng 0,5 atm/s, thời gian lấy mẫu $\Delta t = 0,1s$; $P_1 = P_0 = 1,0atm$; $P_{max} = 2atm$. Kết quả thực nghiệm được thể hiện trên bảng 4.

Bảng 4. Kết quả thử nghiệm với độ dốc 0,5atm/s

t (s)	P_k (atm)	P_{k-do} (atm)	$E = P_{k-do} - P_k$ (atm)
0	1,0000	1,0000	0
0,1	1,0500	1,0480	-0,0020
0,2	1,1000	1,0341	-0,0659
0,3	1,1500	1,0592	-0,0908
....
1,8	1,9000	1,9216	0,0216
1,9	1,9500	1,9280	-0,0220
2,0	2,0000	1,9753	-0,0247

Sai số trung bình bình phương $E_{RMS} = 0,0371atm$. Đồ thị so sánh đường đặc tuyến thu được với đường đặc tuyến đã cho như thể hiện trên hình 8.



Hình 8. Đồ thị so sánh đặc tuyến thu được với đặc tuyến cho trước (với độ dốc 0,5atm/s)

Có thể thấy với độ dốc đường đặc tuyến nhỏ, áp suất điều khiển bám rất tốt so với đường đặc tuyến đã cho. Điều này thể hiện bởi sai số trung bình bình phương nhỏ. Khi độ dốc tăng dần, sai số trung bình bình phương tăng lên, đường áp suất thu được có xu hướng dao động mạnh hơn quanh đường đặc tuyến. Điều này có thể giải thích bởi khi tăng độ dốc, pít tông dịch chuyển nhanh hơn, điều này có thể gây tăng tính nhiễu động của không khí trong buồng xi lanh, giá trị đo trả về bởi cảm biến áp suất vì thế giao động mạnh hơn.

Tăng dần thời gian lấy mẫu: $dt = 0,1s$; $dt = 0,2s$; $dt = 0,4s$; $dt = 0,8s$; $dt = 1,6s$, độ dốc $0,2atm/s$, độ sai lệch của đường đặc tuyến thu được và đường đặc tuyến đặt có xu hướng tăng lên. Điều này được thể hiện thông qua sai số RMS tăng lên (bảng 5).

Bảng 5. Sai số RMS ứng với thời gian lấy mẫu khác nhau

dt (s)	Sai số RMS
0,1	0,0324
0,2	0,0340
0,4	0,0459
0,8	0,0452
1,6	0,0646

4. KẾT LUẬN

Bài báo đã giới thiệu về một phương pháp tạo áp suất đột biến từ việc xây dựng mô hình, phát triển cơ sở lý thuyết đến tiến hành thực nghiệm. Nghiên cứu cũng trình bày một số yếu tố ảnh hưởng đến đường đặc tuyến, từ đó có thể đưa ra các phương án khắc phục để nâng cao chất lượng điều khiển. Kết quả thực nghiệm cho thấy phương án đưa ra là khả thi trong việc điều khiển áp suất thay đổi theo đường đặc tuyến cho trước. Các nghiên cứu tiếp theo có thể phát triển theo hướng lựa chọn tối ưu các thông số hệ thống, thuật toán điều khiển, tối ưu lại kích thước hệ thống để vẫn đảm bảo đạt được kết quả mong muốn với chi phí sản xuất và vận hành nhỏ nhất.

LỜI CẢM ƠN

Tác giả xin gửi lời cảm ơn đến Công ty Dịch vụ kỹ thuật truyền tải điện đã hỗ trợ phương tiện và cơ sở vật chất cho nghiên cứu này. Tác giả cũng xin gửi lời cảm ơn đến TS. Vũ Hải Hà, ThS. Cao Đăng Minh đã tư vấn, hỗ trợ kỹ thuật cho nghiên cứu.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

[1]. James H. Harlow, *Electric Power Transformer Engineering*. CRC Press, 2004.
 [2]. E.R. Ronan, S.D. Sudhoff, S.F. Glover, D.L. Galloway, "A power electronic-based distribution transformer," *IEEE Transactions on Power Delivery*, 17, 2, 2002.
 [3]. A. J. Bartlett, et al., *IEEE Guide for Protective Relay Applications to Power transformers*. IEEE, 1967.
 [4]. R. Crellin, D. Lukach, P. Carroll, et al., "Sudden Pressure Protection for Transformers," *Substation Protection Subcommittee of the Power System Relaying Committee of the IEEE Power and Energy Society*, 2014.

[5]. R.L. Bean, H.L. Cole, "A Sudden Gas Pressure Relay for Transformer Protection," *IEEE Press reprint of AIEE Trans. Part III*, 72, 480- 483, 1953.
 [6]. IEEE C37.91-2021, *IEEE Guide for Protecting Power Transformers*. IEEE, 2021.
 [7]. Leonard L. Grigsby, *The electric power engineering handbook: Power system stability and control*. CRC Press, 2012.
 [8]. Chenguang Yan, et al., "Research on Oil Pressure Rise and Fluctuation Due to Arcing Faults Inside Transformers," *IEEE Transactions on Power Delivery*, 38, 2, 1483 – 1492, 2023.
 [9]. Gerardo Tamez, Luis Payan, Lazaro Amador, "A more accurate numerical method to calculate pressure rise due to internal electrical faults in oil-filled power transformer tanks," *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting*, 2018.
 [10]. Ivan Xavier Lins, et al., "Hydrodynamic study of the oil flow in a protective relay coupled to a power transformer: CFD simulation and experimental validation," *Engineering Failure Analysis*, 128, 2021.
 [11]. Yoshimasa Murakushi, Hiromasa Fukagawa, Takuji Uchiyama, "Transient Oil Pressure Rise at EHV Pipe-Type Cable Faults," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, PAS-91, 4, 1339 – 1345, 1972.

AUTHOR INFORMATION

Nguyen Trong Khuyen

Control, Automation in Production and Improvement of Technology Institute, Vietnam