

CHẾ TẠO MÁY BIẾN ÁP TẠO NGUỒN ĐIỆN 6 PHA

PHẠM ÁI QUỐC, PHẠM CÔNG DUY

Khoa Công nghệ Điện, Trường Đại học Công nghiệp Tp.HCM

Tác giả liên hệ: dph@iuh.edu.vn

DOIs: <https://www.doi.org/10.46242/jstiuh.v72i6.5061>

Tóm tắt. Ngày nay, với sự ra đời của động cơ đa pha (số pha cao hơn 3 pha), truyền động điện đa pha có nhiều ưu điểm đã được đề xuất và chấp nhận nhiều nơi trên thế giới. Tuy nhiên, hệ thống truyền động đa pha cần nguồn điện đa pha và thiết bị phát điện đa pha hầu như chưa được thương mại hóa trên thị trường. Với kỳ vọng các dự án nghiên cứu, thiết kế truyền tải điện và truyền động điện sáu pha sẽ được triển khai tại Khoa Công nghệ Điện, Trường Đại học Công nghiệp Tp.HCM, Việt Nam, chúng tôi đề xuất một giải pháp chế tạo máy biến áp tạo nguồn điện 6 pha với công suất 3 kVA. Máy biến áp sử dụng nguồn điện 3 pha có sẵn để phát ra điện xoay chiều 6 pha. Máy biến áp có mạch từ và dây quấn được thiết kế để phát ra nguồn điện 6 pha ít sóng hài. Nguồn điện không có sóng hài rất cần thiết để kiểm nghiệm các thiết kế chế tạo động cơ, hệ thống truyền động điện và truyền tải điện 6 pha.

Từ khóa. Máy biến áp 6 pha, hệ thống điện 6 pha, nhiều pha, máy biến áp, 3 pha đến 6 pha.

1 GIỚI THIỆU

Tính ưu việt của hệ thống điện nhiều pha so với hệ thống điện ba pha đã được chứng minh thông qua việc phát điện, truyền tải, phân phối và sử dụng điện. Tổng quát, hai kỹ thuật, cụ thể là bộ chuyển đổi công suất và máy biến áp thường được sử dụng để phát điện bằng cách sử dụng hệ thống nhiều pha từ hệ thống điện ba pha có sẵn. Việc tạo ra nguồn điện nhiều pha ở tần số cố định bằng cách sử dụng máy áp có những ưu điểm nhất định so với các bộ chuyển đổi công suất như độ tin cậy, hiệu quả chi phí, hiệu suất và độ méo sóng hài tổng thấp hơn, khả năng chịu lỗi tốt hơn và sóng hài thấp và giảm định mức công tắc nguồn [1-2].

Đặt biệt hệ thống điện 6 pha đã được nghiên cứu cho hệ thống truyền tải điện [3-8]. Công trình nghiên cứu của [3] là phân tích lỗi chung, thêm nữa phân tích lỗi không đối xứng [4], cũng như ước lượng sai số trong phân tích lỗi sử dụng chuyển vị mô hình [5], đề xuất phương pháp phân tích lỗi mới [6] và bảo vệ [7-8].

Với những nỗ lực cải tiến kỹ thuật, chuyển đổi hệ thống điện 3 thành 5 pha cũng được quan tâm [9-12]. Trong [9] đề xuất sự đổi mới sử dụng nối dây máy biến áp đặt biệt, nối dây Scott [10], phân tích so sánh các dạng nối dây khác nhau [11], thiết kế và mô hình [12].

Chuyển đổi hệ thống điện 3 thành 7 pha cũng được nghiên cứu [13-15]. Nghiên cứu máy biến áp 3 pha thành 7 pha [13], một hướng nghiên cứu về mô hình hóa và mô phỏng máy biến áp 3 pha thành 7 pha sử dụng tối ưu hóa bầy đàn và thuật toán di truyền để kiểm tra sai số điện áp của từng pha [14], mô hình và nghiên cứu thực nghiệm của phân bố công suất trong máy biến áp 7 pha dưới điều kiện lỗi [15].

Thêm nữa, sự chuyển đổi hệ thống điện 3 qua thành 6 pha cũng được nghiên cứu [16-18]. Tối thiểu điện áp chế độ chung (common-mode voltage) [16], tăng khả năng truyền tải công suất [17], máy biến áp 3 pha thành 6 pha được tiếp cận mô phỏng thời gian thực [18].

Bài báo phát triển từ [18] có những điều mới như sau:

(i) Đề xuất mạch điện tương đương của máy biến áp 6 pha dựa vào toán học và lý thuyết nối dây máy biến áp;

(ii) Chế tạo máy biến áp từ 3 pha sang 6 pha có công suất 3 kVA, 220 V;

(iii) Bài báo đã đề xuất một giải pháp đơn giản tạo nguồn điện 6 pha chất lượng cao với độ méo dạng hài tổng đạt các tiêu chuẩn IEC61000-3-2, EN50160 và IEEE519.

2 ĐIỆN 6 PHA

Gọi $a, b, c, d, e,$ và f là các pha của nguồn điện 6 pha, các pha lần lượt sẽ lệch nhau một góc $\frac{360^\circ}{6} = 60^\circ$.

Chọn pha a làm gốc

Phương trình điện áp của pha a như sau:

$$u_a = U_m \sin(\omega t - 0^\circ) \quad (1)$$

Phương trình điện áp của pha *b*:

$$u_b = U_m \sin(\omega t - 60^\circ) \quad (2)$$

Phương trình điện áp của pha *c*:

$$u_c = U_m \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (3)$$

Phương trình điện áp của pha *d*:

$$u_d = U_m \sin(\omega t - 180^\circ) \quad (4)$$

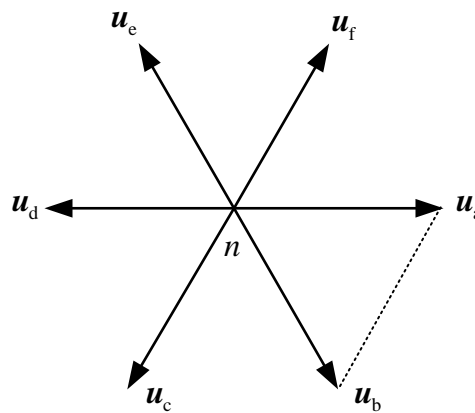
Phương trình điện áp của pha *e*:

$$u_e = U_m \sin(\omega t - 240^\circ) \quad (5)$$

Phương trình điện áp của pha *f*:

$$u_f = U_m \sin(\omega t - 300^\circ) \quad (6)$$

Trong đó U_m là biên độ điện áp



Hình 1. Giải đồ pha điện áp 6 pha cân bằng

Dựa vào (1)-(6), 6 vector điện áp pha của mỗi pha được xây dựng trên Hình 1 mà mỗi vector này lệch một góc pha 60° và cũng dựa vào Hình 1, trong tam giác đều abn có phương trình như sau:

$$U_{ab} = U_{an} = U_{bn}$$

Vậy điện áp dây bằng điện áp pha:

$$U_d = U_p \quad (7)$$

Và dòng điện dây bằng dòng điện pha:

$$I_a = I_{an}$$

Suy ra dòng điện dây I_d bằng dòng điện pha I_p :

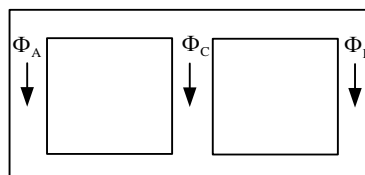
$$I_d = I_p \quad (8)$$

Công suất biểu kiến của máy biến áp được tính như sau:

$$S_{6p} = 6U_p I_p = 6U_d I_d \quad (9)$$

3 MÔ HÌNH MÁY BIẾN ÁP

Sử dụng lõi thép kiểu trụ với 3 trụ là A, C, B. Dòng điện ba pha trong ba cuộn dây sơ cấp tạo ra 3 từ thông Φ_A , Φ_C và Φ_B trên ba trụ A, C, B lệch nhau 120° như Hình 2 [19-20]:



Hình 2. Từ thông trong mạch từ [19-20]

Từ (1), (3), (5), ba cuộn dây thứ cấp N_{au} , N_{cw} , N_{ey} sẽ được bố trí trên ba trụ A, C, B để các từ thông

Φ_A , Φ_C và Φ_B tạo ra điện áp u_a , u_c và u_e [21-22]:

$$u_a = -N_{au} \frac{d\Phi_A}{dt}$$

$$u_c = -N_{cw} \frac{d\Phi_C}{dt}$$

$$u_e = -N_{ey} \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Từ (4) có:

$$u_d = U_m \sin(\omega t - 180^\circ) = -u_a \quad (10)$$

Cuộn dây thứ cấp N_{dx} được đặt trên trụ A để tạo ra điện áp u_d ngược pha điện áp u_a

Từ (6) có:

$$\begin{aligned} u_f &= U_m \sin(\omega t - 300^\circ) \\ &= U_m \sin\{(\omega t - 120^\circ) - 180^\circ\} \\ &= -u_c \end{aligned} \quad (11)$$

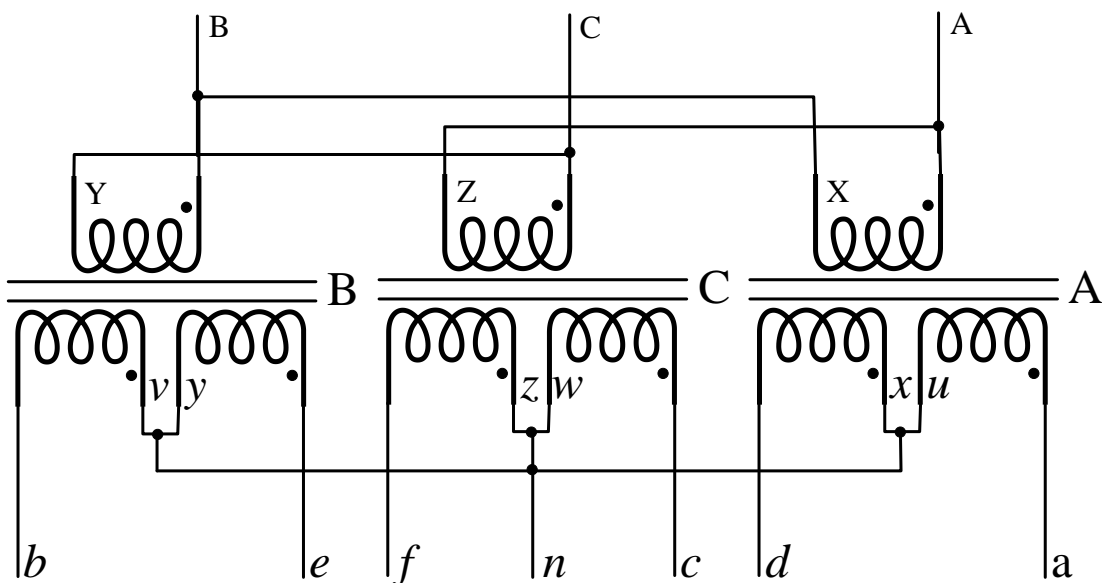
Cuộn dây thứ cấp N_{fz} được đặt trên trụ C để tạo ra điện áp u_f ngược pha với điện áp u_c .

Từ (2) có:

$$\begin{aligned} u_b &= U_m \sin(\omega t - 60^\circ) \\ &= U_m \sin\{(\omega t - 60^\circ) - 360^\circ\} \\ &= U_m \sin\{(\omega t - 240^\circ) - 180^\circ\} \\ &= -u_e \end{aligned} \quad (12)$$

Cuộn dây thứ cấp N_{bv} được đặt trên trụ B để tạo ra điện áp u_b ngược pha với điện áp u_e .

Dựa vào chứng minh trên, mô hình máy biến áp được xác như Hình 3. Trong đó sơ cấp nối Δ và thứ cấp nối Y.



Hình 3. Mô hình máy biến áp 6 pha

4 TÍNH TOÁN

Máy biến áp có công suất $S_{6\phi} = 3 \text{ kVA}$ và điện áp $U_d = 220 \text{ V}$

Tiết diện tính toán của lõi thép [21]:

$$\begin{aligned} A_t &= 1,423 \cdot k_{hd} \cdot \frac{\sqrt{\frac{1}{3} S_{6\phi}}}{B_m} \\ &= 1,423 \cdot 0,85 \cdot \frac{\sqrt{\frac{1}{3} \cdot 3000}}{1,2} \\ &= 31,87 \approx 32 \text{ (cm}^2\text{)} \end{aligned} \quad (13)$$

Trong đó:

$k_{hd} = 0,85$ là hệ số hình dáng lõi thép và $B_m = 1,2 \text{ T}$ là từ cảm cực đại

Số vòng/vôn n_v [21]:

$$\begin{aligned} n_v &= \frac{1}{4,44 \cdot f \cdot B_m \cdot A_t} \\ &= \frac{1}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,2 \cdot 32 \cdot 10^{-4}} \\ &\approx 1,17 \text{ (vòng/vôn)} \end{aligned} \quad (14)$$

Số vòng dây quấn sơ cấp N_1 :

$$N_{AX} = N_{BY} = N_{CZ} = N_1 \quad (15)$$

Trong đó N_{AX} , N_{BY} và N_{CZ} là số vòng dây quấn sơ cấp của pha A , B và C tương ứng.

Và

$$N_1 = U_{AX} \cdot n_v = 380 \cdot 1,17 = 444,6 \approx 444 \text{ (vòng)} \quad (16)$$

Điện áp thứ cấp lúc không tải U_{20} :

$$U_{au0} = U_{bv0} = U_{cw0} = U_{dx0} = U_{ey0} = U_{fz0} = U_{20} \quad (17)$$

Trong đó U_{au0} , U_{bv0} , U_{cw0} , U_{dx0} , U_{ey0} và U_{fz0} là điện áp thứ cấp không tải của pha a , b , c , d , e và f tương ứng.

Và

$$U_{20} = U_{au} \cdot C_h = 220 \cdot 1,05 = 231 \text{ (V)} \quad (18)$$

Trong đó $C_h = 5 \%$ là hệ số giảm áp

Số vòng dây quấn thứ cấp N_2 :

$$N_{au} = N_{bv} = N_{cw} = N_{dx} = N_{ey} = N_{fz} = N_2 \quad (19)$$

Trong đó N_{au} , N_{bv} , N_{dx} , N_{ey} và N_{fz} là số vòng dây quấn thứ cấp của pha a , b , c , d , e và f tương ứng.

Và

$$N_2 = U_{au0} \cdot n_v = 231 \cdot 1,17 = 270,27 \approx 270 \text{ (vòng)}$$

Dòng điện thứ cấp I_2 :

$$I_{au} = I_{bv} = I_{cw} = I_{dx} = I_{ey} = I_{fz} = I_2 \quad (20)$$

Trong đó I_{au} , I_{bv} , I_{cw} , I_{dx} , I_{ey} và I_{fz} là dòng điện qua dây quấn thứ cấp của pha a , b , c , d , e và f tương ứng.

Từ (8) và (9):

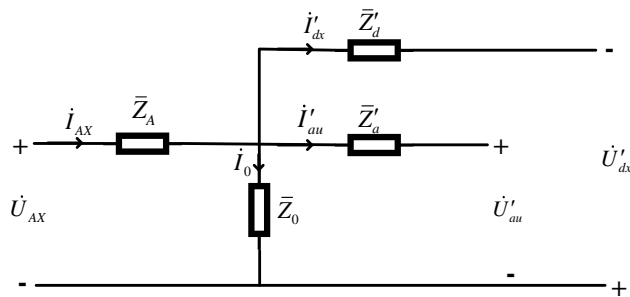
$$I_2 = \frac{S_{\text{dm6}\phi}}{6.U_{\text{p6}\phi}} = \frac{3000}{6.220} = 2,27 \approx 2,3 \text{ (A)} \quad (21)$$

Tiết diện dây quấn thứ cấp s_2 :

$$s_2 = \frac{I_2}{J} = \frac{2,3}{5} = 0,46 \text{ (mm}^2\text{)} \quad (22)$$

Đường kính dây quấn thứ cấp d_2 :

$$d_2 = \sqrt{\frac{4.s_2}{\pi}} = \sqrt{\frac{4.0,46}{3,14}} \approx 0,76 \text{ (mm)} \quad (23)$$



Hình 4. Mạch điện tương đương của máy biến áp 6 pha đề xuất

Từ Hình 4:

$$\dot{U}_{AX} - \dot{I}_{AX} \bar{Z}_A = \dot{I}'_{au} \bar{Z}'_a + \dot{U}'_{au} \quad (24)$$

$$\dot{U}_{AX} - \dot{I}_{AX} \bar{Z}_A = \dot{I}'_{dx} \bar{Z}'_d - \dot{U}'_{dx} \quad (25)$$

$$\dot{I}'_{au} \bar{Z}'_a + \dot{U}'_{au} = \dot{I}'_{dx} \bar{Z}'_d - \dot{U}'_{dx} \quad (26)$$

$$\dot{U}'_{au} + \dot{U}'_{dx} = \dot{I}'_{dx} \bar{Z}'_d - \dot{I}'_{au} \bar{Z}'_a \quad (27)$$

Trong đó \dot{U}_{AX} , \dot{I}_{AX} và \bar{Z}_A là vector điện áp, vector dòng điện và tổng trở dây quấn sơ cấp của pha A tương ứng; \dot{U}'_{au} , \dot{I}'_{au} và \bar{Z}'_a là vector điện áp, vector dòng điện và tổng trở dây quấn thứ cấp quy đổi về phía sơ cấp của pha a tương ứng; \dot{U}'_{dx} , \dot{I}'_{dx} và \bar{Z}'_d là vector điện áp, vector dòng điện và tổng trở dây quấn thứ cấp quy đổi về phía sơ cấp của pha d tương ứng.

Từ (10) suy ra:

$$\bar{Z}'_d (\dot{I}'_{dx} - \dot{I}'_{au}) = 0 \quad (28)$$

Và

$$\dot{I}'_{au} = \dot{I}'_{dx} \quad (29)$$

Nếu bỏ qua I_0 rất bé thì

$$\begin{aligned} \dot{I}_{AX} &\approx \dot{I}'_{au} + \dot{I}'_{dx} \\ \dot{I}_{AX} &\approx 2\dot{I}'_{au} \end{aligned}$$

Suy ra

$$I_{AX} \approx 2 \frac{I'_{au}}{N_1} = 2 \cdot \frac{2,3}{444} = 2,8 \text{ (A)}$$

Vậy dòng điện sơ cấp:

$$I_{AX} = I_{BY} = I_{CZ} = I_1 = 2,8 \text{ (A)}$$

Tiết diện dây quấn sơ cấp s_1 :

$$s_1 = \frac{I_1}{J} = \frac{2,8}{5} = 0,56 \text{ (mm}^2\text{)}$$

Đường kính dây quấn thứ cấp d_1 :

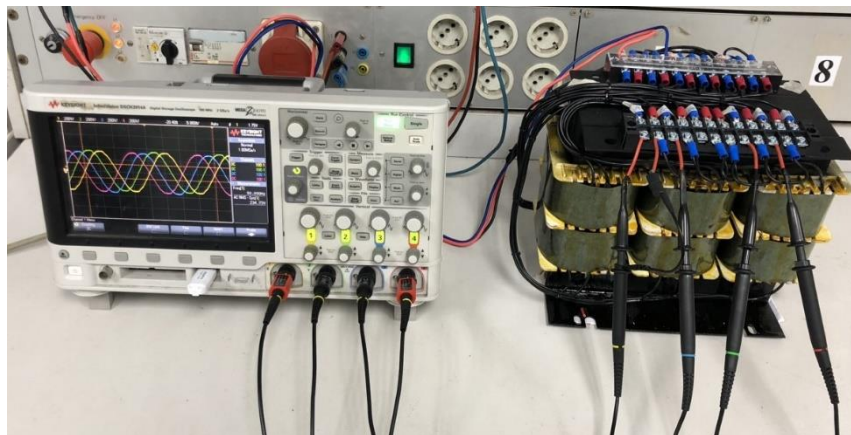
$$d_1 = \sqrt{\frac{4s_1}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 0,56}{3,14}} \approx 0,85 \text{ (mm)}$$

5 KẾT QUẢ

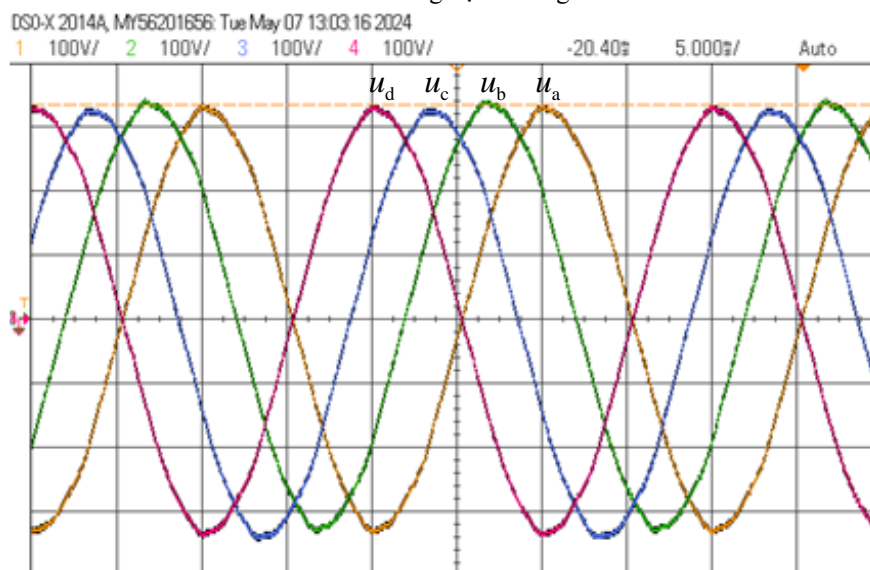
Để chứng minh máy biến áp đề xuất, hai kiểm chứng sẽ được thực hiện như phía dưới [23-25].

5.1 Đánh giá chất lượng nguồn điện 6 pha

Mục đích của thực nghiệm này là để kiểm chứng góc lệch pha của các vector điện áp thứ cấp và độ méo sóng hài tổng (THD) của điện áp dây thứ cấp được chỉ ra tại Hình 7. Để thực hiện thực nghiệm này, máy biến áp có dây quấn sơ cấp nối Δ được cấp điện từ nguồn điện lưới 3 pha và trong khi đó dây quấn thứ cấp nối Y. Do giới hạn của thiết bị đo chỉ có 4 kênh nên điện áp của dây quấn thứ cấp sẽ được đo 2 lần như Hình 6a mà chỉ ra 4 tín hiệu điện áp của các pha a, b, c và d và Hình 6b chỉ ra 4 tín hiệu điện áp a, d, e và f . Dựa vào Hình 6, tổng hợp lại, các tín hiệu điện áp tức thời của 6 pha thứ cấp lệch góc 60° đã nói trong Phần 2.

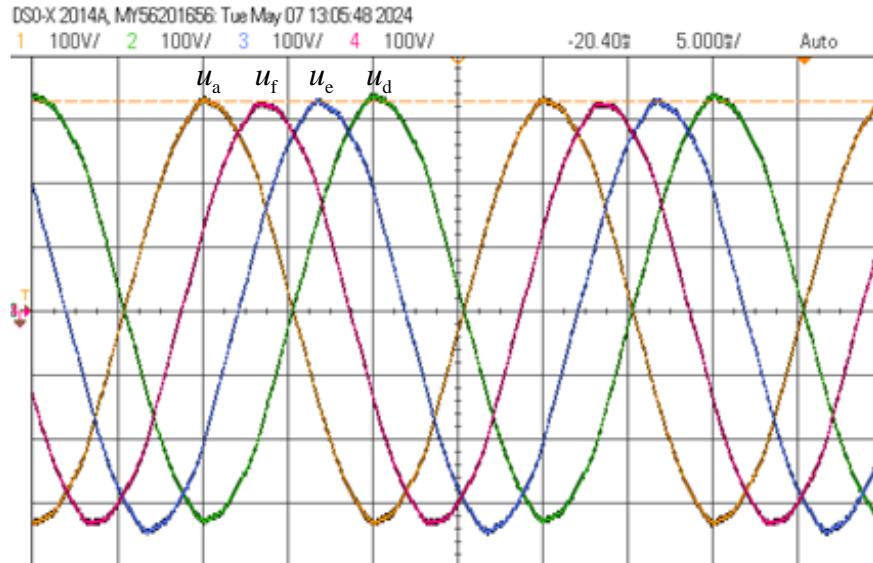


Hình 5. Thí nghiệm không tải

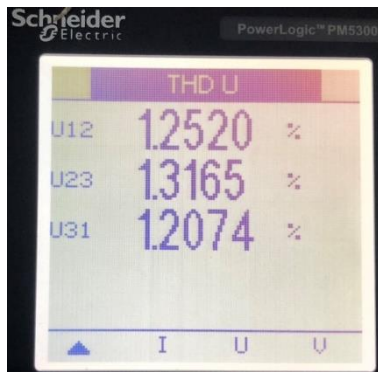


(a) Điện áp thứ cấp của pha a, b, c và d.

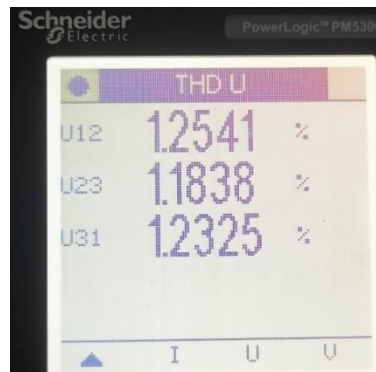
CHẾ TẠO MÁY BIẾN ÁP TẠO NGUỒN ĐIỆN 6 PHA



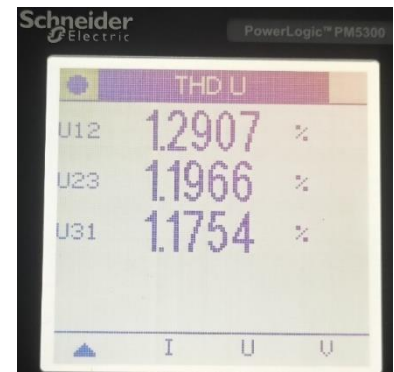
(b) Điện áp thứ cấp của pha a, d, e và f.
Hình 6. Tín hiệu điện áp thứ cấp



(a) THD của u_{AB} , u_{BC} và u_{CA}



(b) THD của u_{ab} , u_{bc} và u_{ca}



(c) THD của u_{de} , u_{ef} và u_{fd}

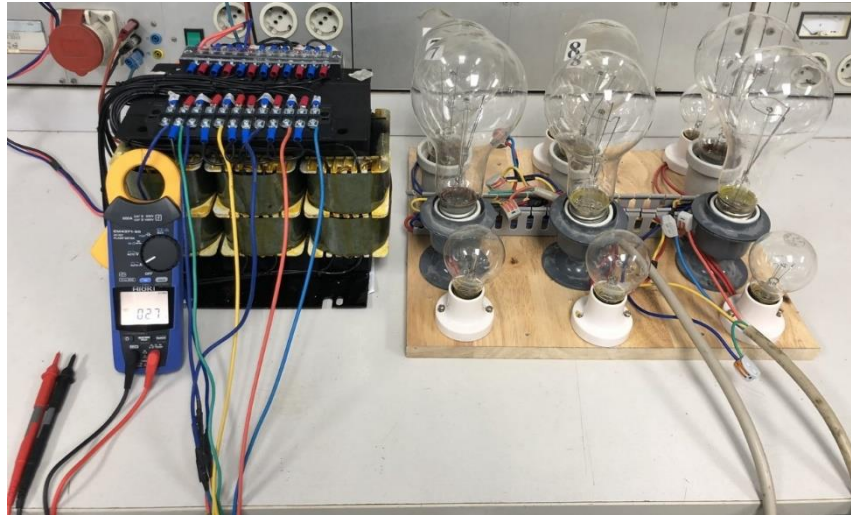
Hình 7. THD của điện áp dây sơ cấp và thứ cấp

Bảng 1 THD của điện áp dây sơ cấp và thứ cấp

Sơ cấp	THD (%)	Thứ cấp	THD (%)
u_{AB}	1,2520	u_{ab}	1,2541
u_{BC}	1,3165	u_{bc}	1,1838
u_{CA}	1,2074	u_{ca}	1,2325
		u_{de}	1,2907
		u_{ef}	1,1966
		u_{fd}	1,1754
Trung bình	1,2587	Trung bình	1,2222

5.2 Kiểm tra công suất nguồn điện 6 pha

Máy biến áp được cấp điện từ nguồn điện lưới 3 pha và thứ cấp kết nối với tải 6 pha mà mỗi pha với 2 bóng đèn (500 W của công ty Long Life và 60 W của công ty Điện Quang) nối song song như Hình 8. Máy biến áp vận hành liên tục trong 4 giờ với hệ số mang tải 1,1. Điện áp và dòng điện hiệu dụng của mỗi pha được đo bởi Hioki CM4371-50, kết quả được liệt kê trong Bảng 2 với sai số điện áp được tính theo công thức ở phụ lục B. Kết quả thực nghiệm xác định công suất nguồn điện 6 pha đo được 3030,60 W.



Hình 8. Máy biến áp với tải

Bảng 2 Điện áp và dòng điện hiệu dụng đo lường của mỗi pha

Pha	Pha a	Pha b	Pha c	Pha d	Pha e	Pha f
Điện áp hiệu dụng pha	209,3 V	213,0 V	209,8 V	209,0 V	213,4 V	208,2 V
Sai số điện áp	4,86 %	3,18 %	4,63 %	5,00 %	3,00 %	5,36 %
Dòng điện hiệu dụng pha	2,43 A	2,34 A	2,40 A	2,41 A	2,47 A	2,35 A
Công suất pha	508,60 W	498,42 W	503,52 W	503,69 W	527,10 W	489,27 W
Công suất 6 pha	3030,60 W					

6 KẾT LUẬN

Thay vì thiết kế Inverter (thi công phần cứng chỉnh lưu DC rồi nghịch lưu thành 6 pha, viết phần mềm) cần nhiều thời gian và kinh phí để tạo nguồn điện 6 pha; Bài báo đã đề xuất một giải pháp đơn giản, chế tạo được Máy biến áp nối trực tiếp động cơ 6 pha vào nguồn điện xoay chiều.

Nhóm tác giả đã kiểm nghiệm máy biến áp đạt công suất 3 kVA. Thực nghiệm đo độ méo hài tại thứ cấp của Máy biến áp đạt độ méo sóng hài tổng 1,22 % tại thời điểm nguồn điện cung cấp cho Máy biến áp có độ méo sóng hài tổng 1,26; Máy biến áp đã đạt độ méo sóng hài tổng vượt xa các tiêu chuẩn IEC61000-3-2; EN50160 và IEEE519. Kiểm tra điện áp thứ cấp Máy biến áp có điện áp đầy tải 209 V và sai số điện áp 5 % đạt tiêu chuẩn TCVN5770-1993.

Nhóm nghiên cứu chưa điều chỉnh đạt tối ưu các tham số, hệ số ước tính bộ dây quấn 6 pha khi tham khảo dữ liệu của các Cty sản xuất máy biến áp 3 pha để sai số điện áp của Máy biến áp đạt tiêu chuẩn cao hơn. Mặc dù dòng điện không tải phần trăm 2 % cho thấy lõi thép có chất lượng tốt nhưng Nhóm nghiên cứu chưa chọn được lõi thép có hình dạng lý tưởng để điện áp 6 pha cân bằng hơn.

PHỤ LỤC A

Bảng A1 Dòng điện đo lường không tải của sơ cấp

Pha	A	B	C
Dòng điện pha	0,1 A	0,1 A	0,1 A

Bảng A2 Điện áp dây đo lường không tải của thứ cấp

Điểm đo	ab	bc	cd	de	ef	fa
Điện áp dây	236 V	237 V	238 V	237 V	236 V	237 V

Dòng điện không tải phần trăm được tính bởi phương trình:

$$I_0 \% = \frac{I_x}{\sqrt{3} \cdot I_1} 100 = \frac{0,1}{\sqrt{3} \cdot 2,8} 100 = 2\% \quad (\text{A.1})$$

Trong đó $I_1 = 2,8 \text{ A}$; I_x là dòng điện pha đo lường và $x = A, B, C$

PHỤ LỤC B

Sai số điện áp được tính bởi phương trình:

$$\Delta U_2 \% = \frac{U_r - U_x}{U_r} 100 = \frac{220 - 209}{220} 100 = 5\% \quad (\text{B.1})$$

Trong đó $U_r = 220 \text{ V}$; U_x là điện áp pha hiệu dụng đo lường và $x = a, b, c, d, e, f$

LỜI CẢM ƠN

Chúng tôi cũng xin cảm ơn các nhà khoa học đã phản biện, góp ý để chúng tôi hoàn thiện hơn bài viết của mình. Nhóm tác giả cảm ơn Trường Đại học Công nghiệp Tp.HCM đã hỗ trợ tài chính với mã số 23.1CND03.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] M. Tabrez, P. K. Sadhu, M. S. H. Lipu, A. Iqbal, M. A. Husain, and S. Ansari, "Power Conversion Techniques Using Multi-Phase Transformer: Configurations, Applications, Issues and Recommendations", *Machines*, vol.10, no. 1, 2022, doi: 10.3390/machines10010013.
- [2] S. N. Tewari, G. K. Singh, and A. B. Saroor, "Multiphase power transmission research-a survey", *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 24, no. 3, pp. 207–215, 1992, doi: 10.1016/0378-7796(92)90006-M.
- [3] N.B. Bhatt, S.S. Venkata, W.C. Guyker, and W.H. Booth, "Six-phase (multi-phase) power transmission systems: Fault analysis", *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. 96, no. 3, pp. 758 – 767, May 1977, doi: 10.1109/T-PAS.1977.32389.
- [4] E.H. Badawy, M.K. El-Sherbiny, A.A. Ibrahim, and M.S. Farghaly, "A method of analyzing unsymmetrical faults on six-phase power systems", *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 6, no. 3, pp.1139-1145, 1991, doi: 10.1109/61.85859.
- [5] A.K. Mishra, A. Chandrasekaran, S.S. Venkata, "Estimation of errors in the fault analysis of six phase transmission lines using transposed models", *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol.10, no.3, pp.1401-1407, 1995, doi: 10.1109/61.400922.
- [6] S.O. Faried, T.S. Sidhu, "A new method for fault analysis of six-phase transmission systems", *Electr. Power Syst. Res.*, vol.53, no.3, pp.157, 2000, doi: 10.1016/S0378-7796(99)00057-7.
- [7] L. Kishore, D. Kumaraswamy, and S. Gaddam, "A Novel External Trip-Logic Protection Scheme for Six-Phase Transmission System", *IETE Journal of Research*, pp.1, 2023, doi: 10.1080/03772063.2023.2227589.
- [8] T. R. Althi, E. Koley, S. Ghosh, and S. K. Shukla, "Six Phase Transmission Line Protection Using Bat Algorithm Tuned Stacked Sparse Autoencoder", *Electr. Power Compon. Syst.*, vol. 51, no. 2, 2023, doi: 10.1080/15325008.2022.2163519.
- [9] A. Iqbal, S. Moinuddin, M. R. Khan, S. M. Ahmed, and H. Abu-Rub, "A novel three-phase to five-phase transformation using a special transformer connection," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 25, no. 3, pp. 1637–1644, Jul. 2010, doi: 10.1109/TPWRD.2010.2042307.
- [10] A.S. Abdel-Khalik, Z. Shafik, A. Elserougi, S. Ahmed, A. Massoud, "A static three-phase to five-phase transformer based on Scott connection", *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 110, pp.84, 2014, doi: 10.1016/j.epsr.2014.01.007.
- [11] E. Mohammad, F. Khan, H. Bassel, Atif Iqbal, and Ahmed Riyaz, "Comparative analysis of three-phase to five-phase transformer connections", *Aust. J. Electr. Electron. Eng.*, vol.14, no.1-2, pp.20, 2017, doi: 10.1080/1448837X.2018.1437678.
- [12] A. Khelafi, A. Djebli, O. Touhami, and R. Ibtouen, "Design and modelling of three-to-five phase three-limbed transformer", *IET Electr. Power Appl.*, vol.17, no.5, pp. 670, 2023, doi: 10.1049/elp2.12292.
- [13] S. Moinuddin, A. Iqbal, H. Abu-Rub, M. R. Khan, and S. M. Ahmed, "Three-phase to seven-phase power converting transformer", *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 27, no. 3, pp. 757–766, Sep. 2012, doi: 10.1109/TEC.2012.2201483.
- [14] M. Tabrez, A. Iqbal, P. K. Sadhu, M. A. Husain, F. I. Bakhsh, S. P. Singh, "Equivalent circuit modelling of a three-phase to seven-phase transformer using PSO and GA", *J. Intell. Fuzzy Syst.*, pp.1, 2021, doi: 10.3233/JIFS-189741.
- [15] M. A. Husain, M. Tabrez, F. I. Bakhsh, A. Nat, and F. M. Mahmood, "Simulation and experimental study of power flow in a seven-phase transformer under fault conditions", *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 16, no. 23, pp. 4806, 2022, doi: 10.1049/gtd2.12644.
- [16] M. A. Waghmare, B. S. Umre, M. V. Aware, A. Kumar, S. A. Yerka, "Common-mode voltage minimization in three-phase to six-phase indirect matrix converter using virtual vector synthesization", *EEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 58, no. 4, pp. 4848 - 4858, 12 April 2022, doi: 10.1109/TIA.2022.3166456.

- [17] S. Shen, B. Cao, P. Crossley, Z. Wang, X. Ding, “Transformation of a three-phase double-circuit overhead transmission line into a six-phase feeder to increase power transfer capability”, *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 16, no. 23, pp. 4663, 2022, doi: 10.1049/gtd2.12545.
- [18] A. Iqbal, G. K. Singh, “Three-phase to six-phase (asymmetrical double star) transformer”, *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 37, no.5, pp. 4481-4484, 2022, doi: 10.1109/TPWRD.2022.3181847.
- [19] D. M. Shah, P. T. Feghali, B. Poulin, R. D. Vecchio, and R. Ahuja, “Transformer design principles: with applications to core-form power transformers”, second edition, 31 January 2017, CRC Press.
- [20] R. D. Vecchio, R. M. D. Vecchio, B. Poulin, P. Feghali, D. Shah, R. Ahuja, “Transformer design principles”, 3rd Edition, August 18, 2017.
- [21] X. M. López-Fernández, H. B. Ertan, J. Turowski, “Transformers: analysis, design, and measurement”, 1st Edition, September 23, 2019, CRC Press.
- [22] K.R.M. Nair, “Power and Distribution Transformers”, 1st Edition, February 12, 2021, CRC Press.
- [23] C57.105-2019, IEEE Guide for Application of Transformer Connections in Three-Phase Electrical Systems.
- [24] IEEE 389-2020, IEEE Recommended Practice for Testing Transformers and Inductors for Electronics Applications.
- [25] IEEE Std C57.12.70-2021, IEEE Standard for Standard Terminal Markings and Connections for Distribution and Power Transformers.

MANUFACTURING OF A TRANSFORMER FOR CONVERTING 3-PHASE TO 6-PHASE ELECTRIC POWER SOURCE

PHAM AI QUOC, PHAM CONG DUY*

Faculty of Electrical Engineering Technology, Industrial University of Ho Chi Minh City

Corresponding author: dph@iuh.edu.vn

Abstract. Nowadays, due to its advantages such as better fault-tolerant performance, improved system reliability, better efficiency, lower power per phase, lower torque oscillation with better torque density, multiphase AC machine (with the phase-number is higher than 3) has been widely accepted and adopted for electric drive applications. However, multi-phase machine applications required to be powered from multiphase power source or drive system. Unfortunately, multi-phase power supply or drive system still has not been offered in commercial market. Thus, a 3-kVA transformer with a novel winding arrangement to have the ability to convert conventional 3-phase power supply input to 6-phase power source output for multiphase machine application has been investigated and manufactured at the Faculty of Electrical Engineering Technology, IUH, Vietnam. Testing on the transformer shows that it could supply a 6-phase output power with low high-order harmonics. Therefore, the multiphase transformer prototype is essential for testing multiphase machine application.

Keywords. 6-phase transformer, 3-phase, multiphase, transformer, 3-phase to 6-phase.

Ngày gửi bài: 09/5/2024

Ngày chấp nhận đăng: 07/8/2024