

CHẨN ĐOÁN MẠCH TỪ VÀ CÁC CUỘN DÂY CỦA MÁY BIẾN ÁP LỰC BẰNG KỸ THUẬT PHÂN TÍCH ĐÁP ỨNG TẦN SỐ QUÉT

DIAGNOSIS OF POWER TRANSFORMER MAGNETIC CORE AND WINDINGS FAILURE BY SWEEP FREQUENCY RESPONSE ANALYSIS

Đinh Thành Việt¹, Lê Hoài Sơn²

¹Đại học Đà Nẵng; dtvietbk@gmail.com

²Công ty Thí nghiệm Điện miền Trung; lehoaison.etc3@gmail.com

Tóm tắt - Bài báo trình bày phương pháp chẩn đoán tình trạng của máy biến áp lực bằng kỹ thuật phân tích đáp ứng tần số quét (SFRA). Kỹ thuật SFRA là một công cụ hiệu quả trong việc chẩn đoán tình trạng về phần cơ như cuộn dây, mạch từ của máy biến áp lực thông qua việc phát hiện sự biến dạng của cuộn dây và sự dịch chuyển của mạch từ. Việc chẩn đoán bao gồm phân tích đánh giá các hỏng hóc được thực hiện thông qua các giản đồ Bode. Nghiên cứu chẩn đoán phần mạch từ và cuộn dây của máy biến áp được thực hiện thử nghiệm cho một máy biến áp tự dùng có công suất 180 kVA, điện áp định mức 22/0,4 kV. Kết quả chẩn đoán từ kỹ thuật SFRA hoàn toàn phù hợp với kết quả kiểm tra máy biến áp trên thực tế, trong khi các phương pháp chẩn đoán truyền thống lại không thể phát hiện được. Kỹ thuật SFRA cần được nghiên cứu và phát triển mạnh mẽ hơn cho việc chẩn đoán máy biến áp.

Từ khóa - chẩn đoán; máy biến áp; cuộn dây; mạch từ; phân tích đáp ứng tần số quét.

1. Đặt vấn đề

Máy biến áp (MBA) luôn là một cấu trúc phức tạp và giữ vị trí rất quan trọng trong hệ thống điện. Chúng đóng vai trò là cầu nối chuyển tiếp dùng để biến đổi một hệ thống dòng điện xoay chiều ở điện áp này thành một hệ thống dòng điện xoay chiều ở điện áp khác với tần số không thay đổi. Sự hoạt động ổn định, tin cậy của MBA góp phần cho sự ổn định chung của toàn hệ thống. Bên cạnh đó MBA lực còn là một tài sản đắt tiền, đòi hỏi vốn đầu tư lớn trong một trạm biến áp (TBA), vì vậy những hư hỏng xảy ra ở MBA ngoài việc gây thiệt hại nặng về kinh tế, làm gián đoạn việc cung cấp điện gây ảnh hưởng nghiêm trọng đến các hoạt động sản xuất và đời sống sinh hoạt của người dân còn gây mất an toàn cho người vận hành, ảnh hưởng đến các trang thiết bị điện khác, làm giảm uy tín của ngành điện.

Để đảm bảo được độ tin cậy cao trong vận hành, điều quan trọng là cần tiến hành đánh giá tình trạng MBA lực một cách chính xác, kịp thời nhằm phát hiện sớm các khiếm khuyết cũng như các hư hỏng đã xảy ra bên trong máy. Trong số đó, các khiếm khuyết và hư hỏng về cơ ở MBA cụ thể là cuộn dây, mạch từ thường rất khó phát hiện và khó có thể đánh giá chính xác nếu chỉ đơn thuần dựa vào một số các thử nghiệm điện thông thường hiện nay.

Các phương pháp thử nghiệm chẩn đoán truyền thống liên quan đến mạch từ và cuộn dây hiện nay như phép đo điện trở cuộn dây bằng nguồn một chiều; Phép đo dòng điện từ hóa; Phép đo tỉ số biến hay phép đo ngắn mạch đều cho thấy ưu điểm và nhược điểm riêng của từng phương pháp. Ưu điểm của từng phương pháp là dễ thực hiện và mỗi phương pháp đều hướng tới từng đối tượng cụ thể và được đánh giá dựa theo từng tiêu chuẩn riêng biệt. Tuy nhiên các phương pháp nêu trên còn tồn tại chung một nhược điểm là

Abstract - This paper presents a method of power transformer diagnosis by sweep frequency response analysis (SFRA). SFRA is an effective tool to diagnose power transformer mechanical failure in magnetic core and windings by detecting windings distortion and magnetic core displacement. Diganosis includes failure analysis and assessment via Bode diagrams. A case study of power transformer magnetic core and windings diagnosis has been implemented for an auxiliary power transformer of 180 kVA, nominal voltage 22/0,4 kV. Diagnosis result by SFRA showed the same result with the opening checking of power transformer in practice, while it was not detected with traditional diagnosis methods. SFRA should be investigated and developed more strongly for power transformer diagnosis.

Key words - diagnosis; power transformer; winding; magnetic core; sweep frequency response analysis (SFRA).

nếu có sự thay đổi rất nhỏ cũng như những thay đổi này xuất phát từ sự dịch chuyển của cuộn dây và sự biến dạng của mạch từ thì các phương pháp truyền thống trên tỏ ra không hiệu quả trong việc đánh giá chất lượng các đối tượng này.

Một khi MBA bị hư hỏng, thậm chí chỉ là hư hỏng rất nhỏ thì khả năng chịu sự cố hoặc ngắn mạch đã bị giảm đi rất nhiều, điều đó dẫn đến việc cần có một chẩn đoán hiệu quả những hư hỏng đó. Việc kiểm tra trực quan là rất tốn kém và không phải lúc nào cũng có thể mang lại kết quả mong muốn hoặc một kết luận chính xác. Nếu như một kiểm tra thực tế được tiến hành, dầu phải được rút ra và các phép kiểm tra được thực hiện trong một không gian rất hạn chế. Hơn nữa rất khó để có thể quan sát hết cuộn dây bằng mắt thường, nên những hư hỏng nhỏ sẽ khó phát hiện hơn là những hư hỏng do sự dịch chuyển cả khối. Vì vậy cần có một phương pháp để xác định đúng các hư hỏng.

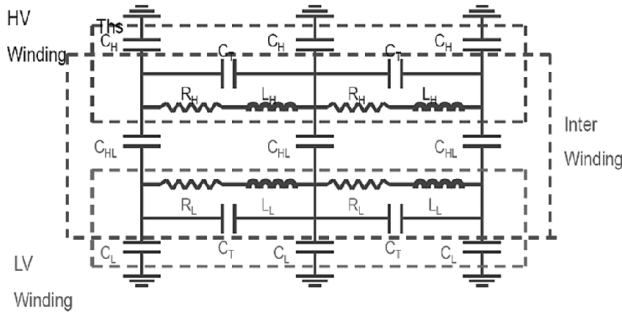
Phân tích đáp ứng tần số quét (Sweep Frequency Response Analysis - SFRA) là một công cụ mạnh giúp phát hiện và chẩn đoán tình trạng về cơ của các MBA lực mới hoặc các MBA đang vận hành thông qua việc phát hiện sự biến dạng của cuộn dây và sự dịch chuyển của mạch từ. Trong bài báo sẽ nghiên cứu các trường hợp chẩn đoán phần cơ của MBA trên thực tế và chứng minh tính hiệu quả của kỹ thuật này.

2. Phương pháp phân tích đáp ứng tần số quét SFRA

Máy biến áp được xem là một mạng lưới phức hợp bao gồm các phần tử R, L, C [1]. Các phần tử R, L, C này là điện trở của cuộn dây đồng, điện cảm của các cuộn dây và điện dung các lớp cách điện giữa các bồi dây, giữa các cuộn dây với nhau, giữa cuộn dây và lõi thép, giữa lõi thép và vỏ thùng, giữa thùng máy và cuộn dây, v.v. Tuy nhiên, có thể sử dụng một mạch đẳng trị được đơn giản hóa với các phần

từ R, L, C đã được gộp lại như minh họa ở Hình 1 để giải thích nguyên lý của kỹ thuật phân tích đáp ứng tần số [4–7].

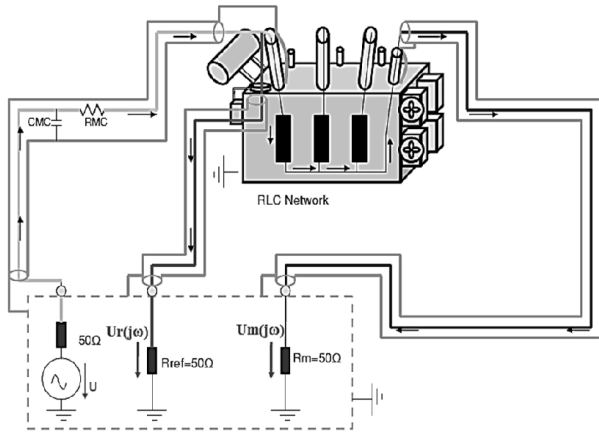
Bất kỳ dạng hư hỏng về mặt vật lý nào đối với MBA đều dẫn đến những thay đổi của mạng lưới RLC này. Những thay đổi này là điều cần quan tâm và sử dụng kỹ thuật đáp ứng tần số để làm nổi bật (tương tự như khuếch đại hay phóng to) những thay đổi nhỏ của mạng lưới RLC, từ đó đánh giá chính xác tình trạng cuộn dây và mạch từ bên trong MBA.



Hình 1. Mạch đẳng trị được đơn giản hóa của MBA với các phần tử RLC

2.1. Cơ sở kỹ thuật SFRA

Mục tiêu chính của phương pháp SFRA là xác định tổng trở của một mẫu thử nghiệm phản ứng như thế nào khi đặt một điện áp có biên độ thấp và tần số thay đổi trong một phạm vi nhất định [4]. Tổng trở này là một mạng lưới của các thành phần điện trở, điện cảm và điện dung. Đặc tính phản ứng của một mẫu thử nghiệm phụ thuộc các thành phần nêu trên và nhạy cảm với sự thay đổi của tần số.



Hình 2. Sơ đồ phép thử SFRA

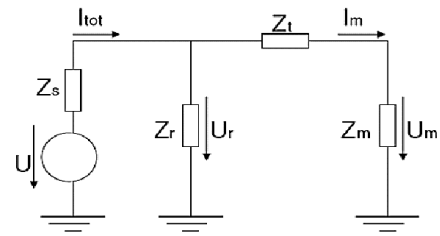
Như minh họa ở Hình 2, phương pháp SFRA sử dụng một tín hiệu điện áp thấp U hình sin với tần số thay đổi ở một đầu của cuộn dây và từ điểm này đo được một tín hiệu điện áp tham chiếu $U_r(j\omega)$, đồng thời tín hiệu đáp ứng $U_m(j\omega)$ tại đầu kia của cuộn dây cũng được đo. Sự chênh lệch giữa tín hiệu điện áp tham chiếu $U_r(j\omega)$ và tín hiệu điện áp đáp ứng $U_m(j\omega)$ về góc pha và biên độ hình thành nên hàm truyền $H(j\omega)$ được tính theo công thức:

$$H(j\omega) = \frac{U_m}{U_r} \quad (1)$$

Sơ đồ MBA ở Hình 2 được mô hình hóa như ở Hình 3.

Từ Hình 3 dễ dàng chứng minh được:

$$\frac{U_m}{U_r} = \frac{Z_m}{Z_m + Z_t} \quad (2)$$



Hình 3. Mô hình hóa MBA trong thử nghiệm SFRA

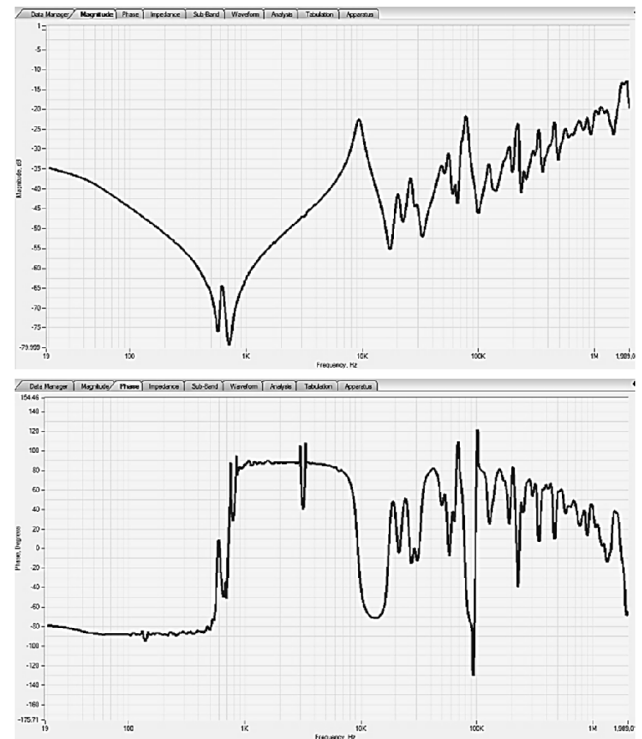
Từ công thức (1) và (2) có thể thấy được rằng hàm truyền $H(j\omega)$ chỉ phụ thuộc tổng trở Z_m của thiết bị đo lường tín hiệu đáp ứng và Z_t là tổng trở của MBA. Tổng trở Z_m của thiết bị đo lường tín hiệu đáp ứng trong kỹ thuật SFRA thường chọn là giá trị điện trở R_m [4–7]. Với việc chọn giá trị điện trở R_m này thì quá trình phân tích sẽ trở nên đơn giản hơn và hàm truyền $H(j\omega)$ chỉ còn phụ thuộc vào sự thay đổi của giá trị tổng trở của MBA Z_t .

Để có thể biểu diễn được hàm truyền $H(j\omega)$ một cách trực quan và chính xác nhất, giản đồ Bode được sử dụng trong kỹ thuật phân tích đáp ứng tần số quét SFRA.

Giản đồ Bode (Hình 4) gồm hai đồ thị: Đồ thị logarit biên độ của hàm truyền và góc pha theo logarit tần số (một đơn vị theo cơ số mũ ở trục hoành gọi là một decade).

$$\text{Biên độ: } A(\text{dB}) = 20 \cdot \log_{10} (H(j\omega)) \quad (3)$$

$$\text{Pha: } A(\varphi) = \tan^{-1} (H(j\omega))$$

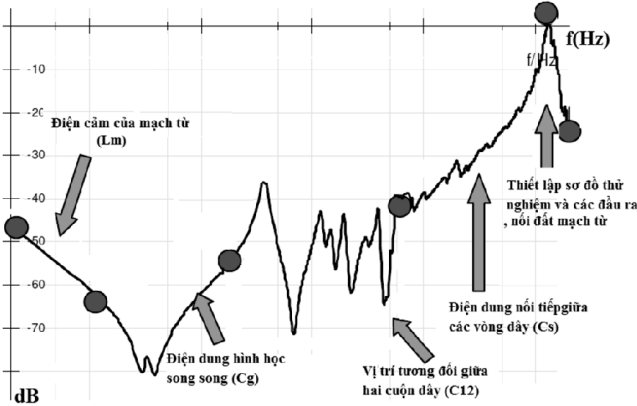


Hình 4. Giản đồ Bode Biên độ - Góc pha

2.2. Phân tích đáp ứng tần số quét

Đáp ứng SFRA của MBA phụ thuộc nhiều vào thiết kế cuộn dây, số lượng cuộn dây trong MBA, cách kết nối sao hay tam giác, ... Trong bài báo trình bày đáp ứng SFRA của MBA có hai cuộn dây có kết cấu đầu sao-tam giác ($Y_N-\Delta$) và thực hiện thử nghiệm ở cuộn cao Y_N trong trạng thái cuộn hạ Δ hở mạch.

Trên đường đặc tính của các đáp ứng thu được dựa trên kỹ thuật quét tần số (Hình 5), sau khi phân tích có thể nhận thấy được những vùng có những thay đổi cần quan tâm dựa trên dải tần số từ thấp đến cao:



Hình 5. Các miền tần số đặc trưng trong kỹ thuật phân tích đồ thị SFRA

- Dải B1 (từ 20Hz-200Hz): ở dải tần số này điện cảm của mạch từ L_m chiếm ưu thế, cũng vì tần số thấp nên thành phần điện dung chưa ảnh hưởng đến đáp ứng.

- Dải B2 (từ 200-2kHz): ở dải tần số này điện dung hình học song song C_g ảnh hưởng cao đến đáp ứng, điện dung C_g đặc trưng cho điện dung hình học giữa cuộn cao so với đất cũng như cuộn hạ so với mạch từ.

- Dải B3 (từ 2kHz-20kHz): mô tả đặc tính tương tác hình học giữa các cuộn dây, trong dải tần số này điện dung hình học giữa cuộn cao và cuộn hạ C_{12} xác định đặc tính của đáp ứng, dải tần số này nhạy cảm với sự biến dạng khối giữa các cuộn dây với nhau.

- Dải B4 (từ 20kHz-1MHz): ở dải tần số này biểu hiện đặc trưng nhất là đáp ứng của thành phần điện dung, đó là sự tham gia của thành phần phần điện dung nối tiếp giữa các vòng dây của cuộn dây C_s , trong dải này đặc biệt nhạy cảm với các biến dạng của bản thân cấu trúc cuộn dây.

- Dải B5 (>1MHz): thành phần chủ yếu tham gia vào đáp ứng ở dải tần số này chính là điện trở của cuộn dây, điện trở lúc này phụ thuộc chủ vào hai yếu tố: điện trở tiếp xúc giữa đầu ra của cuộn dây và ti sứ, điện trở tiếp xúc của các kẹp của đầu dây đo và ti sứ. Bên cạnh đó nếu có các vấn đề liên quan đến nối đất mạch từ thì sự thay đổi cũng sẽ xuất hiện ở dải tần số này.

Qua việc so sánh với số liệu xuất xưởng, với các MBA cùng loại (từ cùng một nhà sản xuất) hay giữa các pha trong cùng một MBA có thể kết luận chính xác tình trạng của mạch từ và cuộn dây của MBA lực thông qua sự thay đổi đến từ các dải tần số đặc trưng từ việc phân tích sự sai khác trong đồ thị đáp ứng tần số quét SFRA.

3. Kết quả ứng dụng kỹ thuật SFRA đánh giá chất lượng máy biến áp lực trên lưới điện khu vực miền Trung và Tây Nguyên

Kỹ thuật SFRA đã được ứng dụng để đánh giá chất lượng cuộn dây và mạch từ của máy biến áp tự dòng 22kV do Công ty Thiết bị Điện Đông Anh, Hà Nội sản xuất với các thông số kỹ thuật như sau:

Bảng 1. Thông số kỹ thuật MBA được đánh giá theo phương pháp SFRA

Kiểu	BAD 180-23/04	Nhà chế tạo	EEMC
Công suất định mức (kVA)	180		
Điện áp (kV)	Cuộn cao : 23 ± (2x2,5%)	Cuộn hạ : 0,4	
Dòng điện định mức(A)	Cuộn cao: 4,52	Cuộn hạ: 260	
Điện áp ngắn mạch (%)	4,18		
Tổ đấu dây	Y ₀ /Δ-11	Loại MBA	Dầu

Thực hiện đánh giá chất lượng mạch từ và cuộn dây của máy biến áp nêu trên thông qua các thử nghiệm truyền thống [2], [3] và kết quả như sau:

Bảng 2. Kết quả phép đo tỉ số biến

Nấc	Tỉ số biến				
	Cuộn dây 23 kV/Cuộn dây 0,4 kV				
	K_{dm}	AB/ab	BC/bc	CA/ca	$\Delta K_{Umax} (\%)$
1	60,377	60,404	60,398	60,410	0,05
2	58,939	58,967	58,967	58,978	0,07
3	57,502	57,527	57,527	57,542	0,07
4	56,064	56,099	56,094	56,117	0,09
5	54,627	54,661	54,659	54,677	0,09

Bảng 3. Kết quả phép đo ngắn mạch ở nấc phân áp định mức

Đối tượng	U đo (V)	Kết quả đo			
		I (A)			$U_K (\%)$
C - H	250	$I_{AB} = 1,01$	$I_{BC} = 1,02$	$I_{CA} = 1,02$	4,18

Bảng 4. Kết quả phép đo dòng điện không tải

U đo (V)	$I_{d0} (A)$		
	ab	bc	ca
231	5,75	3,51	5,98

Bảng 5. Phép đo điện trở một chiều

Điện trở một chiều			
a. Cuộn dây 23 kV (Ω)			
AN	BN	CN	$\Delta R (\%)$
47,49	47,46	47,60	0,29
46,26	46,20	46,34	0,30
45,02	44,96	45,11	0,33
43,77	43,71	43,85	0,32
42,53	42,47	42,61	0,33
b. Cuộn dây 0,4 kV (m Ω)			
ab	bc	ca	$\Delta R (\%)$
5,291	5,286	5,372	1,62

So sánh với các tiêu chuẩn thử nghiệm và kinh nghiệm từ các thử nghiệm truyền, có các nhận xét sau:

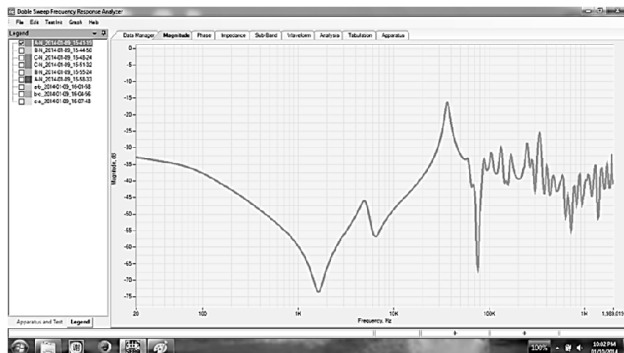
- Điện áp ngắn mạch không lệch quá $\pm 10\%$ số liệu ghi trên nhãn máy (số liệu thí nghiệm 4,18%, số liệu ghi trên nhãn máy 4,18%);

- Tỉ số biến ở các pha không lệch quá 0,5% so với tỉ số biến định mức khi so sánh trong cùng một nấc phân áp;

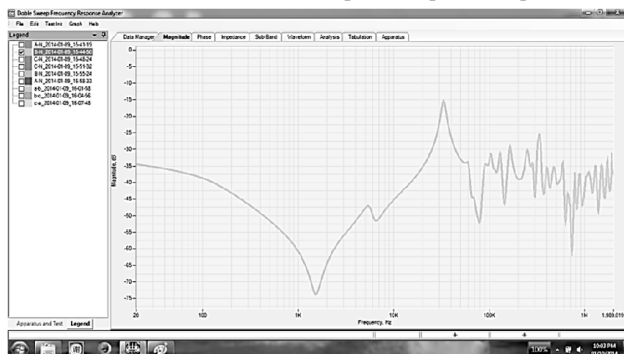
- Dòng điện không tải theo kinh nghiệm:

$I_{0A} = I_{0C} = (1,2 \div 1,5) I_{0B}$.

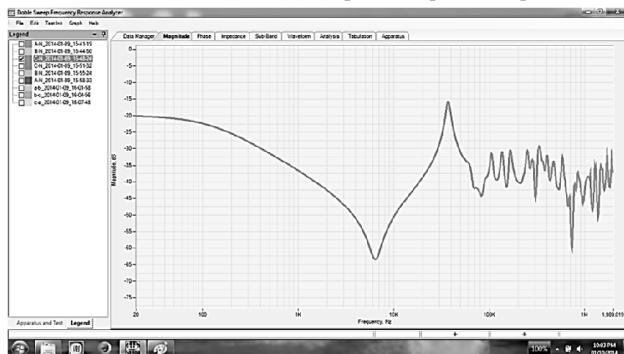
Với các tiêu chuẩn của các hạng mục thử nghiệm truyền thống có thể thấy MBA trên hoàn toàn đạt tiêu chuẩn kỹ thuật và không phát hiện được các khuyết tật nhỏ liên quan đến mạch từ và cuộn dây. Tuy nhiên qua thử nghiệm SFRA sẽ nhận thấy các khuyết tật này, ví dụ MBA trên mạch từ đã có sự thay đổi. Quá trình nhận dạng khuyết tật thông qua kỹ thuật SFRA được thực hiện với các kết quả đo lường và phân tích đánh giá cụ thể như sau:



Hình 6. SFRA được thực hiện với pha AN, phía hạ áp hồ mạch



Hình 7. SFRA được thực hiện với pha BN, phía hạ áp hồ mạch



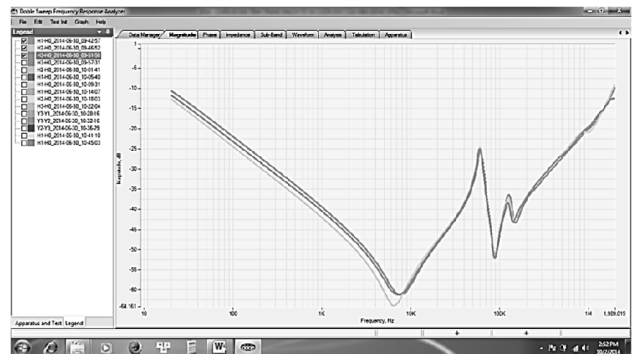
Hình 8. SFRA được thực hiện với pha CN, phía hạ áp hồ mạch



Hình 9. SFRA được thực hiện với các pha AN, BN, CN, phía hạ áp nối ngắn mạch



Hình 10. SFRA được so sánh giữa các pha với nhau



Hình 11. SFRA được thực hiện với mô hình MBA có cấu trúc tương tự tại phòng thí nghiệm

Trong thử nghiệm chẩn đoán mạch từ và cuộn dây của MBA lực bằng kỹ thuật phân tích SFRA có 3 phương pháp để xác định sự sai lệch đó là:

- So sánh với số liệu xuất xưởng;
- So sánh với các máy biến áp cùng loại (cùng kiểu và cùng một nhà sản xuất);
- So sánh giữa các pha với nhau.

Khó khăn khi chẩn đoán tình trạng mạch từ và cuộn dây của máy biến áp tự dòng 22kV nói trên là không có số liệu xuất xưởng vì vậy phương pháp so sánh giữa các pha với nhau được thực hiện để chẩn đoán tình trạng của máy biến áp. Căn cứ theo tiêu chuẩn IEC FRA 60076-18 [5] và hướng dẫn thử nghiệm IEEE FRA C57-149 [6] có thể kết luận như sau:

- Từ Hình 9 (thử nghiệm SFRA được thực hiện trong trạng thái ngắn mạch cuộn hạ tức là bỏ qua ảnh hưởng của mạch từ), đáp ứng có sự tương đồng đáng kể, độ phù kín lên nhau của đồ thị đáp ứng SFRA 3 pha trùng khít lên nhau, chứng tỏ cuộn dây của máy biến áp trên không bị khiếm khuyết.

- Từ Hình 10: ở dải tần số <100kHz đồ thị đáp ứng từ pha C có sự khác biệt rất lớn so với pha A và pha B. Sự khác nhau này bao gồm điểm xuất phát của đồ thị đáp ứng cũng như sự khác nhau ở các điểm cộng hưởng, pha C có điểm xuất phát thấp hơn (20dB) trong khi pha A và pha B cao hơn (35dB), điều này cho thấy điện kháng của mạch từ pha C đã có sự thay đổi đáng kể hay nói chính xác hơn mạch từ đã bị ngắn mạch vài lá thép hoặc mạch từ đã bị chạm đất nhiều điểm. Khiếm khuyết này sẽ không thể nào được phát hiện nếu đơn thuần chỉ thực hiện các thử nghiệm truyền thống.

Sau khi có kết luận từ phép phân tích bằng kỹ thuật SFRA, MBA tự dòng 22kV đã được rút dầu để công nhân Công ty Cơ điện miền Trung thăm dò nhằm tìm ra điểm

ngắn mạch. Kết quả mạch từ ở pha C đã bị chạm đất vài điểm nên làm cho điện kháng của mạch từ thay đổi và sự thay đổi này đã được tìm thấy bằng kỹ thuật SFRA, trong khi các phương pháp truyền thống không phát hiện được.

4. Kết luận

Bài báo đã trình bày kỹ thuật chẩn đoán tình trạng mạch từ và cuộn dây máy biến áp lực bằng kỹ thuật phân tích đáp ứng tần số quét (SFRA), kỹ thuật SFRA qua thực tiễn áp dụng đã chứng tỏ là một công cụ chẩn đoán rất hiệu quả và bổ khuyết cho các phương pháp chẩn đoán MBA truyền thống. Ưu điểm của phương pháp này là nếu không có cơ sở dữ liệu thì vẫn có thể đưa ra một quyết định chính xác vì có thể sử dụng sự so sánh với đáp ứng ở các pha khác của cùng MBA cũng như so sánh đồ thị đáp ứng với các MBA cùng loại hoặc cùng một nhà sản xuất.

Với khả năng phát hiện sự dịch chuyển cuộn dây của kỹ thuật này, có thể nhấn mạnh rằng các kết quả thu được từ kỹ thuật SFRA có khả năng cho phép đánh giá chi tiết và hiệu quả. Điều này giúp cho MBA có thể được đưa vào vận hành trở lại một cách nhanh chóng, tránh được việc kiểm tra bên trong máy với chi phí rất tốn kém, cũng như

giảm được thời gian mất điện. Việc kết hợp sử dụng SFRA với các công cụ chẩn đoán khác có thể giúp đánh giá toàn diện tình trạng của MBA, tránh được những hậu quả tai hại do việc nhận định sai dẫn đến sự cố nghiêm trọng hoặc gây lãng phí nguồn lực và tổn kém về các chi phí xử lý.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Trần Văn Chính, Nguyễn Hồng Anh, Bùi Tấn Lợi, Võ Quang Sơn, *Giáo trình Máy điện 1*, Bộ môn Điện Công nghiệp, Khoa Điện, Trường Đại học Bách khoa, Đại học Đà Nẵng.
- [2] Phan xường Cao thế, “*Quy trình thí nghiệm máy biến áp lực*”, Công ty Thí nghiệm Điện miền Trung, Đà Nẵng, 2004.
- [3] Tổng công ty điện lực Việt Nam, “*Quy trình vận hành và sửa chữa Máy biến áp*”, Tổng Công ty Điện lực Việt Nam - Hà Nội, 1998.
- [4] Sharin AB Ghani, Mohd Hambali Roslan, Musa Yusup Lada & Mohd Shahril Ahmad Khair, “*Understanding SFRA Results Using Transformer Model with Simulated Faults*”.
- [5] IEC 60076-18, “*Power transformers –Part 18: Measurement of frequency response*”.
- [6] IEEE Std C57.149™-2012, “*IEEE Guide for the Application and Interpretation of Frequency Response Analysis for Oil Immersed Transformers*”, 2012.
- [7] Doble Engineering Company USA, “*Experience with sweep frequency response analysis (SFRA) measurements*”.

(BBT nhận bài: 23/11/2014, phản biện xong: 08/12/2014)