

Một phương pháp mới xác định thông số điện và cấu trúc hình học một máy biến áp lực dạng hộp đen ứng dụng chẩn đoán sự cố

Trần Ngọc Thạch¹, Nguyễn Thanh Phương¹, Nguyễn Trọng Huy², Phạm Đình Anh Khôi^{3,4}



Use your smartphone to scan this QR code and download this article

¹Khoa Cơ - Điện - Điện tử, Trường Đại học Công nghệ Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

²Công ty Thí nghiệm điện miền Nam, Tổng công ty Điện lực miền Nam, Việt Nam

³Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Bách khoa, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

⁴Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

Liên hệ

Phạm Đình Anh Khôi, Khoa Điện - Điện tử, Trường Đại học Bách khoa, Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

Đại học Quốc gia Thành phố Hồ Chí Minh, Việt Nam

Lịch sử

- Ngày nhận: 08-05-2020
- Ngày chấp nhận: 18-12-2020
- Ngày đăng: 31-12-2020

DOI: 10.32508/stdjet.v3i4.744



Bản quyền

© ĐHQG Tp.HCM. Đây là bài báo công bố mở được phát hành theo các điều khoản của the Creative Commons Attribution 4.0 International license.



TÓM TẮT

Trong các hệ thống điện truyền tải và phân phối trên thế giới và cả ở Việt Nam hiện nay, các máy biến áp lực đang vận hành thường có dạng "hộp đen", nghĩa là không có thông tin bên trong về cấu trúc hình học (về kiểu quấn cuộn dây, có thể bao gồm thêm các cấu trúc bổ sung) và thông số vật liệu (về các đặc tính dẫn điện, cách điện hay đặc tính từ)... Điều này gây khó khăn trong chẩn đoán sự cố dựa theo hướng phân tích mô hình vật lý, đặc biệt khi cần phân tích đánh giá tình trạng máy biến áp lực theo sự thay đổi các thông số điện trong mô hình mạch điện tương đương trước và sau khi nghi ngờ có sự cố.

Các nghiên cứu liên quan trong cộng đồng khoa học trên thế giới hiện nay chủ yếu vẫn dựa vào đối tượng thử nghiệm là các máy biến áp lực đang trong giai đoạn sản xuất để có thể tiếp cận các thông số cấu trúc - vật liệu. Bài báo này, kế thừa và phát triển các nghiên cứu trước đây, sẽ giới thiệu tổng hợp một phương pháp mới xác định các thông số điện trong mô hình mạch điện thông số phân bố và cấu trúc hình học cho một máy biến áp lực dạng hộp đen dựa trên kỹ thuật phân tích đáp ứng tần số; từ đó cho phép khảo sát ảnh hưởng của các thông số điện này lên đặc tuyến đáp ứng tần số mô phỏng, làm cơ sở cho các phân tích chẩn đoán sự cố về sau dựa trên mô hình vật lý.

Từ khoá: máy biến áp lực dạng hộp đen, mô hình tương đương thông số phân bố, phân tích đáp ứng tần số, thử nghiệm chẩn đoán

GIỚI THIỆU

Chẩn đoán sự cố và đánh giá tình trạng vận hành của máy biến áp lực (MBA) đã và đang là một trong những chủ đề đang được tập trung nghiên cứu trên phạm vi thế giới, vì MBA là thiết bị lớn, phức tạp, quan trọng và đắt tiền nhất trong hệ thống điện¹. Ngoài các phép thử nghiệm truyền thống như đo tỷ số biến, điện trở cuộn dây, tổn thất không tải, hệ số tổn thất và điện dung... đang được áp dụng tại các công ty thí nghiệm điện hiện nay, các phương pháp chẩn đoán nâng cao như đo phóng điện cục bộ, phân tích khí hòa tan trong dầu, phân tích đáp ứng tần số, phân tích đáp ứng điện môi... cũng đã được sử dụng^{1,2}. Tuy vậy, nếu xét trong bối cảnh cần xây dựng một mô hình vật lý cho các MBA đang vận hành dạng hộp đen để có thể nghiên cứu phân tích tình trạng hiện tại và xu thế tương lai liên quan đến các sự cố cơ-điện, thì đây gần như là một công việc khó khăn trong bối cảnh hiện nay.

Điểm hạn chế quan trọng đầu tiên là việc xác định các thông số điện trong các mô hình vật lý, tiêu biểu như *mô hình điện thông số phân bố*, ở vùng số trung bình và cao³ phục vụ chẩn đoán sự cố cơ-điện: công việc này chủ yếu dựa trên tính toán giải tích các MBA dạng hộp

trắng (hay hộp xám), tức đã có (hay xác định được) cấu trúc hình học và thông số vật liệu⁴⁻⁸ ... Hiện tại, đối với các MBA dạng hộp đen đang vận hành thì hầu như chưa có nghiên cứu liên quan nào giải quyết được một cách triệt để vấn đề này.

Kể đến, để tránh ảnh hưởng đến công tác vận hành của MBA, vốn mang tính chi phối rất nhiều đến vận hành lưới điện, việc thực hiện các thử nghiệm đo lường khảo sát trên MBA cần phải được thực hiện trong thời gian ngắn cho phép, khi dừng vận hành MBA để thí nghiệm định kỳ. Đây là điều cần phải chú ý để nghiên cứu mang tính khả thi trong thực tế ứng dụng.

Để khắc phục hai điểm hạn chế nêu trên trong xây dựng mô hình vật lý cho MBA dạng hộp đen, tác giả chính cùng với các đồng tác giả đã xây dựng và phát triển hướng nghiên cứu mới⁹⁻¹³ để xác định các giá trị điện cảm và điện dung trong mô hình điện thông số phân bố (MHPB) của MBA sử dụng các phép đo đáp ứng tần số đầu cực.

Cụ thể, đối với thông số điện cảm, nghiên cứu của Trần Ngọc Thạch và cộng sự (2015)⁹ đã tính toán giải tích các thông số điện cảm trong MHPB của một MBA 200 kVA, 10,4/0,46 kV Yy6 dạng hộp xám, sau đó áp dụng vào mô phỏng đáp ứng tần số cho MBA

Trích dẫn bài báo này: Thạch T N, Phương N T, Huy N T, Khôi P D A. Một phương pháp mới xác định thông số điện và cấu trúc hình học một máy biến áp lực dạng hộp đen ứng dụng chẩn đoán sự cố. *Sci. Tech. Dev. J. - Eng. Tech.*; 3(4):569-587.

thử nghiệm này trong vùng tần số trung bình từ 10 kHz đến 100 kHz để kiểm chứng hiệu quả so với kết quả mô phỏng sử dụng mô hình điện thông số tập trung¹⁰; dựa vào đó, nghiên cứu cũng của Trần Ngọc Thạch và cộng sự (2016)¹¹ đã đề xuất quy trình tính toán thông số điện cảm cho một MBA dạng hộp đen 6,5 MVA, 47/27,2 kV Yd5.

Đối với thông số điện dung, nghiên cứu của Trần Ngọc Thạch và cộng sự (2016)¹² đã đề xuất cách xác định thông số điện dung dọc cuộn dây cho MBA dạng hộp đen 6,5 MVA, 47/27,2 kV dựa trên MHPB áp dụng cho cuộn dây quấn kiểu đĩa. Nghiên cứu mở rộng tiếp theo của Trần Ngọc Thạch và cộng sự (2017)¹³ áp dụng và mở rộng các nghiên cứu^{11,12} cho MHPB của các kiểu cuộn dây quấn khác nhau (kiểu đĩa, kiểu lớp). Tuy vậy, điểm hạn chế của các nghiên cứu trên là kết quả mô phỏng các đáp ứng tần số vẫn chưa phản ánh đúng xu hướng với kết quả đo lường trong vùng tần số trung bình.

Hướng đến để xuất một phương pháp mới hoàn chỉnh nhằm xác định các thông số điện trong MHPB của một MBA dạng hộp đen, bài báo này sẽ phân tích chi tiết hơn quy trình xác định thông số điện cảm so với nghiên cứu của Trần Ngọc Thạch (2015)¹¹ và đề xuất khảo sát mới MHPB cho cuộn dây có thêm cuộn chắn trong quy trình xác định thông số điện dung dọc cuộn dây MBA so với nghiên cứu của Trần Ngọc Thạch và cộng sự (2016, 2017)^{12,13}, áp dụng vào một MBA dạng hộp đen 6,5 MVA, 47/27,2 kV dựa trên kỹ thuật phân tích đáp ứng tần số với các phép đo đầu cực MBA được thực hiện trong vùng tần số từ 20 Hz đến 2 MHz (801 điểm) sử dụng thiết bị đo Vector-Network Analyzer “FRAnalyzer” của hãng Omicron.

MÔ HÌNH ĐIỆN THÔNG SỐ PHÂN BỐ CỦA MBA VÀ KỸ THUẬT PHÂN TÍCH ĐÁP ỨNG TẦN SỐ

Mục này sẽ giới thiệu mô hình mạch điện thông số phân bố của MBA và kỹ thuật phân tích đáp ứng tần số làm cơ sở cho phương pháp đề xuất ở mục sau.

Mô hình mạch điện thông số phân bố MBA

MBA có nhiều mô hình mạch điện tương đương, được sử dụng thích hợp cho các mục đích khác nhau. Cụ thể, để phân tích hệ thống điện ba pha cân bằng ở tần số công nghiệp, MBA thường được thay thế bởi một tổng trở nối tiếp đặc trưng cho tổn hao trong mạch các cuộn dây (có thể kèm một tổng trở mắc rẽ biểu thị tổn hao lõi thép) trong sơ đồ một pha.

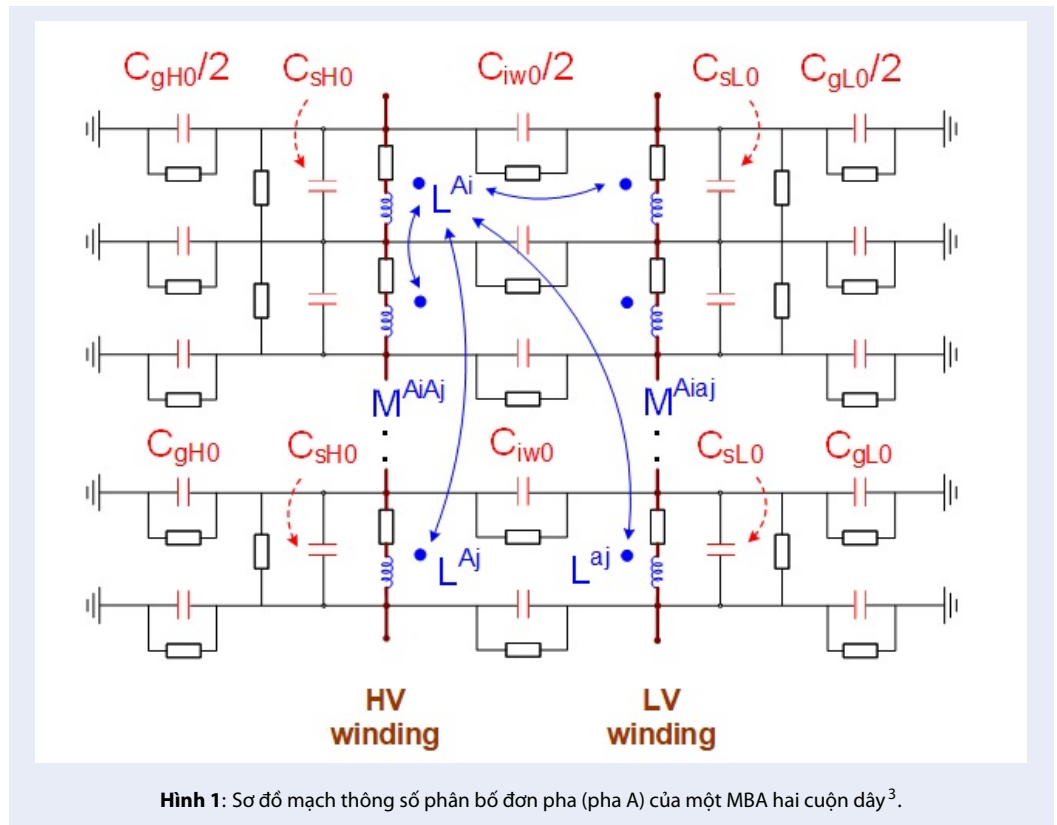
Trong nghiên cứu phân tích một cách tổng quát, bao gồm cả các chế độ bất đối xứng, các mô hình mạch điện ba pha cần phải được sử dụng: nếu phân tích

(quá độ, dòng từ hóa, cộng hưởng sắt từ...) ở vùng tần số thấp (trong khoảng vài chục, vài trăm Hz đến vài kHz tùy theo MBA), mô hình mạch điện thông số tập trung theo *nguyên lý đối ngẫu*¹⁴⁻¹⁶ thường được sử dụng; ở vùng tần số cao hơn (từ vài trăm Hz hay vài kHz trở đi) trong các phân tích quá độ hay phân tích đáp ứng tần số ứng dụng chẩn đoán sự cố cơ-điện trong cuộn dây và lõi thép MBA, mô hình mạch điện thông số phân bố cần phải được sử dụng^{3,5,6,17}. Hình 1 giới thiệu sơ đồ một pha của mô hình điện thông số phân bố (MHPB) tổng quát theo dạng mạch hình thang n phân đoạn cho một MBA hai cuộn dây được sử dụng trong các nghiên cứu gần đây đã đề cập. MHPB này có thể áp dụng cho mọi cấu trúc cuộn dây thông thường, phổ biến như cuộn dây kiểu đĩa (disc) hay kiểu lớp (layer). Đối với cấu trúc cuộn dây có thêm phần tử khác (màn chắn hay cuộn chắn) nhằm cải thiện khả năng phân bố điện áp quá độ không đều dọc theo cuộn dây, MHPB này sẽ cần phải hiệu chỉnh và sẽ được trình bày ở phần sau của bài báo.

Trong Hình 1:

- L^{Ai} và L^{Ai} : điện cảm tự thân của một phân đoạn cuộn dây cao áp và hạ áp tương ứng;
- M^{AiAj} và M^{Aiaj} : hồ cảm giữa hai phân đoạn cuộn dây cao áp – cao áp và cao áp – hạ áp tương ứng;
- C_{gH0} , C_{gLO} : điện dung đối với đất của từng phân đoạn cuộn cao áp và hạ áp tương ứng;
- C_{iw0} : điện dung giữa hai phân đoạn cuộn dây cao và hạ áp;
- C_{sH0} , C_{sLO} : điện dung dọc từng phân đoạn cuộn cao áp và hạ áp tương ứng.

Trong vùng tần số thấp, việc phân chia cuộn dây ra n phân đoạn trong Hình 1 thực ra không có nhiều ý nghĩa vì dòng điện chủ yếu chạy qua các điện cảm do $w \times L \ll 1/(w \times C)$; vì thế, MHPB có tác dụng tương đương như *mô hình mạch điện thông số tập trung* với các điện cảm phân đoạn có thể được quy về một giá trị tương đương tổng cộng. Tuy nhiên, khi tần số tăng dần, MHPB bắt đầu phát huy tác dụng khi các thành phần dung kháng trở nên nhỏ lại trong khi các thành phần cảm kháng tăng lên, làm dòng điện phân bố trong các mạch phân đoạn “cảm - dung” hình thành các dạng đa cộng hưởng. Số lượng phân đoạn cuộn dây vì vậy ảnh hưởng đến độ chính xác (và độ phức tạp) của giải pháp mô phỏng... Trong phân tích thực tế, MHPB hoàn tất cần phải bao gồm ba sơ đồ pha này, đầu nối theo tổ đầu dây thực tế của MBA.



Kỹ thuật phân tích đáp ứng tần số

Kỹ thuật phân tích đáp ứng tần số hiện tại đã được áp dụng phổ biến để chẩn đoán các sự cố cơ-điện cho cuộn dây và lõi thép MBA, được tiêu chuẩn hóa thông qua các tiêu chuẩn quốc tế của IEC¹⁸ và IEEE¹⁹. Theo các tiêu chuẩn này, các đáp ứng tần số (ĐƯTS), thực chất là dạng hàm truyền của các tín hiệu ngõ vào và ngõ ra đo trên đầu cực MBA trong dải tần số rộng (thông thường từ 20 Hz đến 2 MHz), thực hiện trước và sau khi nghi ngờ MBA có sự cố, được so sánh với nhau để đưa ra kết luận chẩn đoán. Do việc so sánh này còn phụ thuộc nhiều vào kinh nghiệm chuyên gia nên việc *mô phỏng* các ĐƯTS đo lường được khuyến khích thực hiện nhằm tìm hiểu ảnh hưởng của các thông số điện lên sự thay đổi của các ĐƯTS giữa các lần đo.

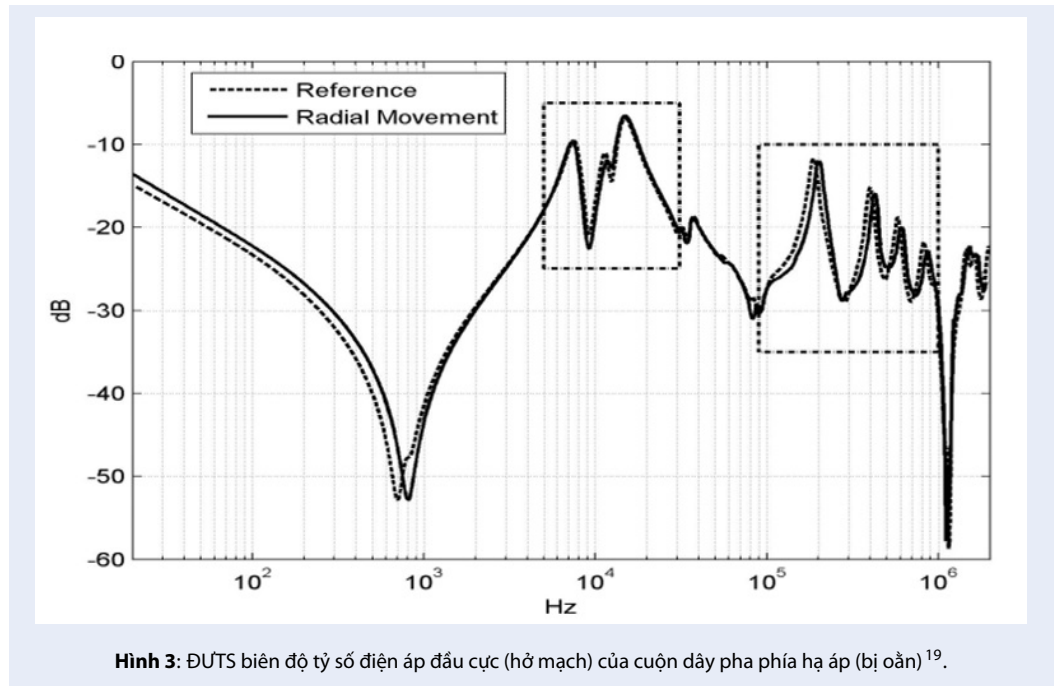
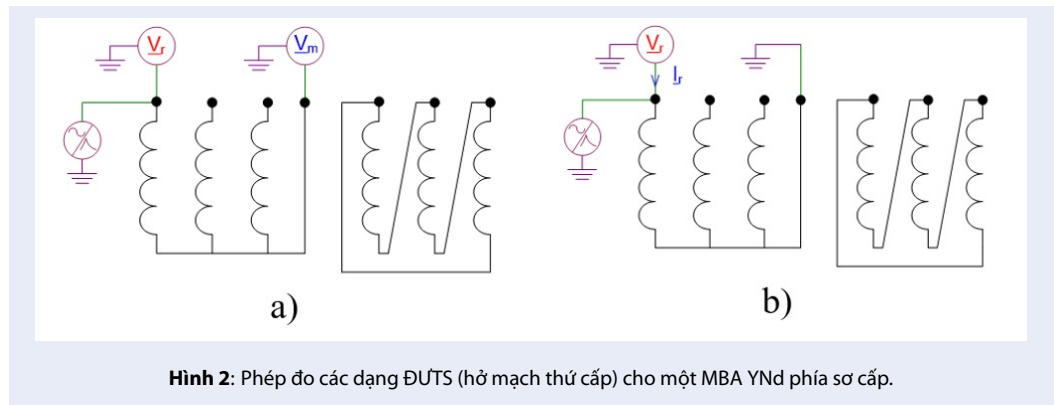
Hình 2 giới thiệu sơ đồ thực hiện phép đo 2 dạng ĐƯTS tiêu biểu: tỷ số điện áp đầu cực (a) và tổng trở đầu cực (b) cho một cuộn dây pha phía sơ cấp của một MBA hai cuộn dây có tổ đấu dây YNd.

Trong Hình 2, V_r là điện áp phức tham chiếu; V_m là điện áp phức đo lường còn I_r là dòng điện phức tham chiếu. Từ đó cho phép xác định được biên độ tỷ số điện áp $H_U = 20 \cdot \log_{10} |V_m/V_r|$ (dB) và biên độ tổng trở đầu cực $Z_{in} = |V_r/I_r|$ (Ω). Trong hai dạng

ĐƯTS này, đáp ứng tần số của biên độ tỷ số điện áp H_U thường được áp dụng để chẩn đoán sự cố, trong khi đáp ứng tần số của biên độ tổng trở đầu cực Z_{in} chưa được các tiêu chuẩn IEC¹⁸ và IEEE¹⁹ để cập áp dụng.

Hình 3 minh họa cách thức chẩn đoán sự cố cuộn dây hạ áp bị oằn bằng cách so sánh các ĐƯTS H_U giữa các đầu cực cuộn dây này trước và sau khi có sự cố theo hướng dẫn của tiêu chuẩn IEEE¹⁹. Theo đó, các độ lệch rất nhỏ nhưng đều giữa các ĐƯTS trong vùng tần số trung bình và cao (tương ứng là 5-30 kHz và 90-1000 kHz) sẽ được tham chiếu để phán đoán loại sự cố này đối với các MBA có cấu trúc tương tự.

Để có thể hiểu rõ hơn, liệu các sự thay đổi của ĐƯTS trong các vùng tần số có liên quan gì đến sự thay đổi các thông số điện của MBA trong MHPB và cũng như giới thiệu hướng nghiên cứu ứng dụng dạng ĐƯTS Z_{in} , nhóm tác giả đã thực hiện các nghiên cứu liên quan⁹⁻¹³ để từ đó phát triển một phương pháp tổng hợp xác định các thông số điện và cấu trúc hình học của cuộn dây cho một MBA dạng hộp đen, giới thiệu ở mục tiếp theo.



PHƯƠNG PHÁP MỚI XÁC ĐỊNH THÔNG SỐ ĐIỆN TRONG MHPB MBA

Mục này giới thiệu một phương pháp mới xác định các thông số điện chính trong MHPB và cấu trúc hình học MBA thử nghiệm dựa trên phân tích ĐUTS các tổng trở đầu cực (hở mạch, ngắn mạch) ở vùng tần số thấp và trung bình. Các thông số điện chính này bao gồm điện dung và điện cảm (tự thân và tương hỗ), ảnh hưởng trực tiếp đến các dạng cộng hưởng trên các ĐUTS. Các thông số phụ như điện trở và điện dẫn, biểu diễn tổn thất trong cách mạch điện-từ và hệ thống cách điện một cách tương ứng, có thể được xác định theo nguyên lý thử-sai bằng cách điều chỉnh giá trị trên mô hình sao cho các đỉnh cộng hưởng ĐUTS mô phỏng khớp nhất với giá trị đo vì chúng chỉ ảnh

hưởng đến biên độ ĐUTS tại các tần số cộng hưởng⁵.

Thông số điện cảm

Đầu tiên cần định có bao nhiêu thành phần điện cảm (tự thân và hỗ cảm) trong MHPB của một MBA ba pha hai cuộn dây. Nếu chỉ xét riêng MHPB một pha (ví dụ pha A ở Hình 1), sẽ có các thành phần L^{Ai} và L^{Aj} là điện cảm tự thân tương ứng của phân đoạn cuộn dây cao áp thứ i (dùng ký tự chữ hoa) và phân đoạn hạ áp thứ j (dùng ký tự chữ thường). Giữa các thành phần L^{Ai} và L^{Aj} ($i \neq j$) của cuộn dây cao áp sẽ có các hỗ cảm M^{AiAj} ; tương tự như thế cho cuộn dây hạ áp (L^{ai} , L^{aj} , M^{aiaj}).

Các thành phần L^{Ai} và L^{Aj} (cho cuộn cao áp) cũng như L^{ai} và L^{aj} (cho cuộn hạ áp) sẽ giống nhau vì các phân đoạn được chia đều về mặt hình học từ cấu trúc

cuộn dây. Riêng các hồ cảm M^{Aiaj} (và M^{aiaj}) sẽ khác nhau, ví dụ $M^{A1A2} \neq M^{A1A3}$, vì khoảng cách giữa các phân đoạn này là khác nhau áp dụng vào công thức giải tích⁷. Kết quả tính toán đối với một số MBA đã biết thông số hình học cho thấy, sự khác nhau này là không đáng kể. Do đó, để có thể tính toán khả thi cho các MBA dạng hộp đen, các hồ cảm này cần được giả thiết bằng nhau, nghĩa là $M^{A1A2} \approx M^{A1A3} \approx \dots \approx M^{A1An} \approx \dots \approx M^{AnAn} \approx M^{AA}$, và $L^A \approx M^{AA}$ (vì theo định nghĩa $L^A = M^{A1A1}$). Mặc dù vậy, khi thực hiện mô phỏng sau này, các hồ cảm này cần phải có các độ lệch được tinh chỉnh phù hợp để thể hiện đúng bản chất vật lý và có kết quả mô phỏng tốt.

Như vậy, đối với các phân đoạn cuộn dây pha, ví dụ xét pha A, sẽ có các phần tử tự cảm L^A và hồ cảm M^{AA} (cho cuộn dây cao áp), L^a và M^{aa} (cho cuộn dây hạ áp) và M^{Aa} giữa hai phân đoạn hai cuộn dây. Mở rộng ra, đối với ba pha, sẽ có 15 phần tử điện cảm (tự thân và hồ cảm), trong đó, chỉ có 10 giá trị khác nhau khi MBA ở trạng thái bình thường do các giá trị hai pha ngoài cùng (pha A và pha C) là giống nhau vì đối xứng qua mạch từ lõi thép MBA.

Ngoài ra, đối với mạch ba pha, còn có các hồ cảm giữa hai phân đoạn các cuộn dây khác pha giữa các phía cao áp (A, B và C) và hạ áp (a, b và c). Tổng cộng sẽ có 36 giá trị hồ cảm giữa các phân đoạn cuộn dây (xem Hình 4, bên trên), trong đó, chỉ có 12 giá trị khác nhau do tính đối xứng giữa các phân đoạn (xem Hình 4, bên dưới). Các điện cảm này có giá trị hằng số trong vùng tần số thấp và giảm dần khi tần số tăng dần do từ thông có xu hướng phân bố tản ra bề mặt lõi thép^{4,7}. Nghiên cứu của Trần Ngọc Thạch và cộng sự (2016)¹¹ đã giới thiệu quy trình xác định 12 giá trị điện cảm ở các vùng tần số thấp và trung bình, được phân thành ba loại chính sau: i) điện cảm tự thân từng phân đoạn các cuộn dây pha và hồ cảm giữa các phân đoạn trên cùng cuộn dây pha ($L^A = M^{AA} = M^{CC} = L^C$, $L^B = M^{BB}$, và $L^a = M^{aa} = M^{cc} = L^c$, $L^b = M^{bb}$), ii) hồ cảm giữa hai phân đoạn hai cuộn dây pha khác nhau (M^{AB} , M^{AC} và M^{Ab} , M^{Ac}) và iii) hồ cảm giữa hai phân đoạn của cuộn dây cao và hạ áp cùng pha ($M^{Aa} = M^{Cc}$ và M^{Bb}). Quy trình này đã được giới thiệu ngắn gọn trong¹¹ và vì thế được trình bày chi tiết lại ở Phụ lục I.

Áp dụng quy trình để xuất vào MHPB $n = 8$ phân đoạn của MBA thử nghiệm ở vùng tần số thấp (20 Hz đến 3 kHz), kết quả tính toán điện cảm các cuộn dây pha được trình bày trong Bảng 1; trong đó, các giá trị âm là các hồ cảm giữa các phân đoạn cuộn dây hai pha, nhận được do các dòng từ thông qua chúng ngược chiều nhau sinh ra các điện áp cảm ứng âm.

Để chứng minh phương pháp đề xuất không phụ thuộc vào tổ đấu dây, Hình 5 giới thiệu các kết quả mô phỏng tổng trở đầu cực hồ mạch pha A cuộn cao

áp trong MHPB với các giá trị điện cảm tính toán trên trong 3 trường hợp: MBA đơn pha, MBA 3 pha đấu nối theo Yy6 và Yd5. Sự giống nhau của các tổng trở đo lường và mô phỏng trong vùng tần số thấp “LF” (20 Hz đến 3 kHz) trong Hình 5 cho phép khẳng định phương pháp tính toán đề xuất không phụ thuộc vào tổ đấu dây MBA. Kết quả mô phỏng cho thấy các giá trị hằng số của các điện cảm trong Bảng 1 vẫn áp dụng được trong vùng tần số thấp và trung bình, từ 20 Hz đến 10 kHz.

Trong vùng tần số trung bình từ 10 kHz trở đi, các điện cảm giảm nhanh để các kết quả mô phỏng (cho MBA Yd5) phù hợp với kết quả đo lường, đặc biệt tại các tần số cộng hưởng trong dải từ 10 kHz đến khoảng 100 kHz (xem Hình 5). Trị số các điện cảm này vì thế sẽ được xác định và trình bày ở Bảng 2. Trong Bảng 2, các khoảng chia tần số (10-17 kHz, 17-28 kHz, 28-40 kHz) chủ yếu phục vụ khảo sát mô phỏng cho vùng tần số trung bình, thể hiện sự thay đổi đáng kể giá trị điện cảm theo tần số... Ở tần số cao từ 100 kHz trở đi, các điện cảm ký sinh khác từ MBA thử nghiệm, cáp đo, hệ thống nối đất... bắt đầu có ảnh hưởng đến kết quả đo, trong khi điện cảm các phân đoạn cuộn dây đã giảm nhiều, và vì vậy, không cần thiết phải phân vùng tần số và tính chính xác các giá trị điện cảm để phục vụ khảo sát.

Thông số điện dung

Trong Hình 1, điện dung trong MHPB của các MBA hai cuộn dây bao gồm: điện dung đối với đất của từng phân đoạn cuộn cao áp và hạ áp (C_{gH0} , C_{gL0}), điện dung giữa 2 phân đoạn hai cuộn dây cao và hạ áp (C_{iw0}), điện dung dọc từng phân đoạn cuộn cao áp và hạ áp (C_{sH0} , C_{sL0}). Trong thực tế, các điện dung C_{gH0} , C_{gL0} và C_{iw0} có thể được xác định thông qua phép đo điện dung và tổn hao điện môi ba pha trong MBA²⁰ hay dựa trên phân tích phép đo tổng trở dung đầu cực²¹ trong khi các điện dung dọc C_{sH0} , C_{sL0} hiện nay chỉ có thể xác định thông qua phương pháp tính toán giải tích khi cấu trúc hình học – vật liệu của cuộn dây đã được biết trước (tức MBA dạng hộp trắng hay xám)^{5,6,8,17,22}.

Do nguyên lý xác định các điện dung giữa cuộn dây đối với đất (C_{gH0} , C_{gL0}) và điện dung giữa hai cuộn dây (C_{iw0}) đã được trình bày trong các nghiên cứu^{12,20}, kết quả tính toán các điện dung này trong MHPB $n = 8$ phân đoạn của MBA thử nghiệm được giới thiệu lại ở Phụ lục II... Đối với việc xác định thông số điện dung dọc vốn phụ thuộc vào cấu trúc cuộn dây, nghiên cứu của Trần Ngọc Thạch và cộng sự (2016, 2017)^{12,13} chỉ phân tích MHPB cho cuộn dây kiểu đĩa và kiểu lớp. Do kết quả mô phỏng đáp ứng

	A	B	C	a	b	c
A	AA	AB	AC	Aa	Ab	Ac
B	BA	BB	BC	Ba	Bb	Bc
C	CA	CB	CC	Ca	Cb	Cc
a	aA	aB	aC	aa	ab	ac
b	bA	bB	bC	ba	bb	bc
c	cA	cB	cC	ca	cb	cc

AA	BB	aa	bb
AB	Bb	ab	
AC		ac	
Aa			
Ab			
Ac			

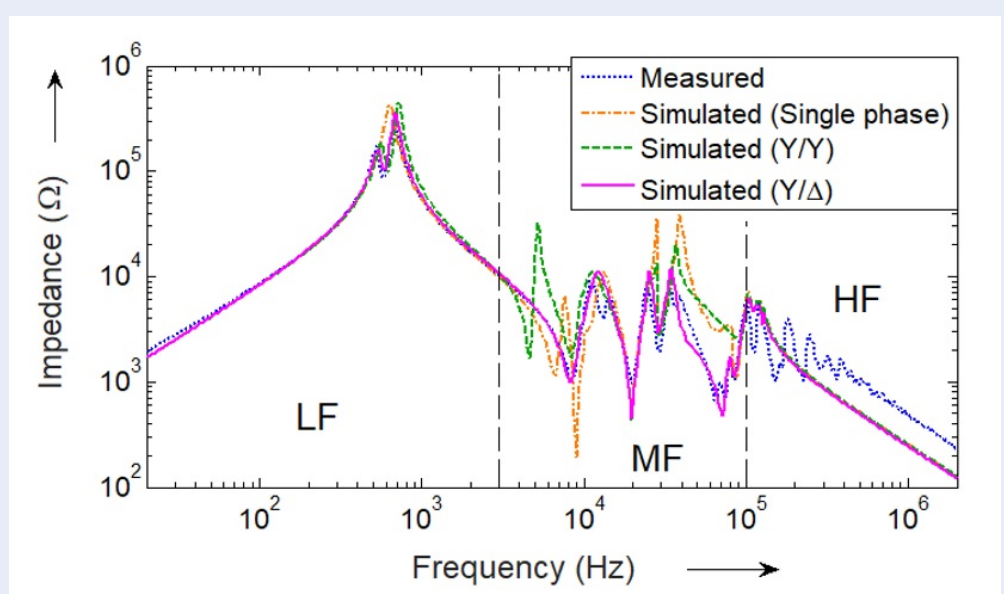
Hình 4: Ma trận các thông số hồ cảm tổng quát giữa các phân đoạn cuộn dây pha (hình trên) và thông số hồ cảm rút gọn cần xác định (hình dưới).

Bảng 1: Điện cảm tự thân và tương hỗ MHPB 8 phân đoạn

Cuộn dây cao áp (mH)	Cuộn dây cao áp – hạ áp (mH)	Cuộn dây hạ áp (mH)
$L^A = 214.4$	$M^{Aa} = 215.5$	$L^a = 218.6$
$L^B = 295.9$	$M^{Bb} = 299.2$	$L^b = 304.4$
$M^{AB} = -146.0$	$M^{Ab} = -146.3$	$M^{ab} = -146.7$
$M^{AC} = -67.3$	$M^{Ac} = -67.5$	$M^{ac} = -67.6$

Bảng 2: Điện cảm theo tần số trong MHPB 8 phân đoạn

(mH)	20 Hz -10 kHz	10 kHz -17 kHz	17 kHz -28 kHz	28 kHz -40 kHz	40 kHz -2 MHz
L^A	214.4	203.7	64.3	21.4	21.4
L^B	295.9	281.2	88.8	29.6	29.6
M^{AB}	-146.0	-138.7	-43.8	-14.6	-14.6
M^{AC}	-67.3	-63.9	-20.2	-6.7	-6.7
M^{Aa}	215.5	204.7	64.7	21.6	21.6
M^{Bb}	299.2	284.2	89.8	29.9	29.9
M^{Ab}	-146.3	-139.0	-43.9	-14.6	-14.6
M^{Ac}	-67.5	-64.1	-20.3	-6.8	-6.8
L^{aa}	218.6	207.7	65.6	21.9	21.9
L^{bb}	304.4	289.2	91.3	30.4	30.4
M^{ab}	-146.7	-139.4	-44.0	-14.7	-14.7
M^{ac}	-67.6	-64.2	-20.3	-6.8	-6.8



Hình 5: Các tổng trở đầu cực hở mạch pha A phía cao áp khi MBA mô phỏng có cấu hình các tổ đấu dây khác nhau.

tần số chưa đủ tốt ở vùng tần số trung bình (từ 10 kHz đến 100 kHz), tức chưa phản ánh được xu hướng thay đổi theo tần số so với các kết quả đo lường, nên bài báo này sẽ mở rộng phạm vi khảo sát MHPB cho đa dạng các kiểu cuộn dây hơn, qua đó nhận dạng được kiểu cuộn dây quấn thích hợp cho MBA thử nghiệm, đồng nghĩa với những kết quả mô phỏng tốt hơn ở vùng tần số trung bình.

Nguyên lý khảo sát ảnh hưởng của điện dung dọc cuộn dây

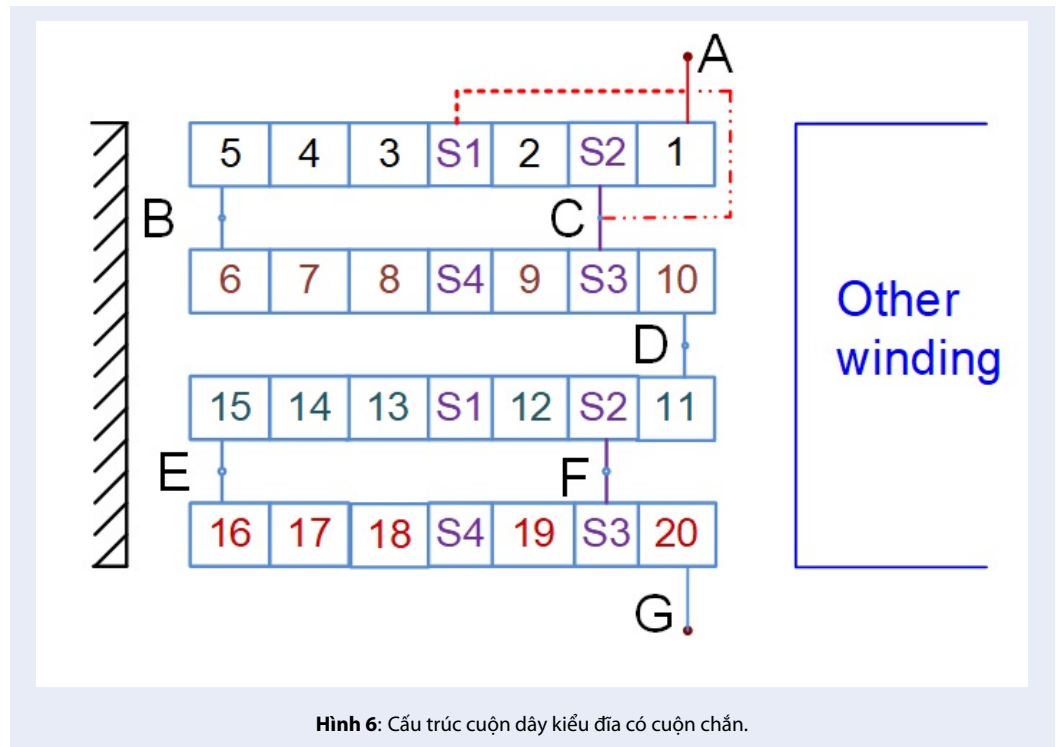
Khác với các điện dung C_{gH0} , C_{gL0} và C_{iw0} trong MHPB ở Hình 1 vốn có thể được xác định từ phép đo điện dung và tổn hao điện môi ở đầu cực MBA, điện dung dọc C_{sH0} và C_{sL0} là không thể xác định được dựa trên đo lường, bởi vì trong phép đo này, các đầu cực cuộn dây cần phải đấu tắt để đo các giá trị điện dung tổng cộng²¹ nên các thành phần điện dung dọc cũng đã bị nối tắt và không tham gia vào mạch đo (có thể giải thích dựa trên Hình 1). Như vậy làm sao có thể xác định các điện dung này cho MBA dạng hộp đen?

Đầu tiên, cần phải xác định được ảnh hưởng của các điện dung dọc này đối với hiệu ứng điện dung tổng cộng (gồm tất cả các điện dung của MBA) bằng cách mô phỏng lại các ĐƯTS tổng trở đầu cực đã đo, sử dụng MHPB của MBA nhưng **bỏ qua các điện dung dọc**. Xét trong vùng tần số mà tổng trở đo và mô phỏng mang tính thuần dung, nếu biên độ các tổng

trở mô phỏng và đo lường lệch đáng kể, thì điện dung dọc các cuộn dây mới có ảnh hưởng đáng kể so với các điện dung khác nên mới cần xác định; trường hợp ngược lại thì không cần. Điều này cũng phù hợp trong thực tế khi các cuộn dây kiểu đĩa xoắn xen kẽ (interleaved disc) hay cuộn dây kiểu lớp (layer) có điện dung dọc khá lớn, còn cuộn dây kiểu đĩa thường (ordinary disc) có điện dung dọc khá nhỏ so với điện dung đối với đất. Các kết quả mô phỏng giới thiệu ở phần sau sẽ làm rõ nhận định này, tuy nhiên trước mắt cần giải thích về cấu trúc (kiểu) các cuộn dây trong MBA, vì cấu trúc cuộn dây có ảnh hưởng nhất định đến tác dụng của các điện dung dọc.

Cấu trúc cuộn dây trong MBA

Đối với các MBA phân phối kiểu lõi (core type) công suất nhỏ, cuộn dây quấn kiểu đĩa (disc), xoắn ốc (helical) và cuộn dây kiểu lớp (layer) được sử dụng tương đương phổ biến. Đối với các MBA trung gian và truyền tải có công suất và cấp điện áp cao hơn, cuộn dây kiểu đĩa vẫn thường được sử dụng. Cuộn dây kiểu đĩa ban đầu được chế tạo theo kiểu đĩa thường (ordinary disc) có điện dung dọc tổng cộng khá nhỏ (so với điện dung đối với đất) do các đĩa, và do đó các điện dung dọc tương đương của chúng, ghép nối tiếp nhau dọc cuộn dây, làm phân bố điện áp quá độ rất lớn ở đĩa gần đầu cực, qua đó dễ xảy ra các sự cố cách điện ở vị trí này²³. Để giảm phân bố quá điện áp quá độ này, nghĩa là cần tăng giá trị điện dung dọc, cuộn dây hoặc được quấn



Hình 6: Cấu trúc cuộn dây kiểu đĩa có cuộn chắn.

theo kiểu lớp, kiểu đĩa “multi-start”, kiểu đĩa xen kẽ hoặc kiểu đĩa thường nhưng có bổ sung thêm màn chắn hay cuộn chắn (shield coil)²²⁻²⁴. Hình 6 minh họa cuộn dây kiểu đĩa thường (20 vòng dây) có thêm cuộn chắn (04 vòng S1-S4) với 03 cấu hình: i) cuộn chắn “thả trôi” (floating) không đấu nối, ii) đầu cuộn chắn nối đầu cao áp (S1 nối A), iii) giữa cuộn chắn nối đầu cao áp (C nối A)^{22,25,26}. Cấu trúc các kiểu cuộn dây khác có thể tham khảo trong các tài liệu vừa nêu.

Sơ đồ mạch điện thông số phân bố đối với cấu trúc cuộn dây có phần tử bổ sung

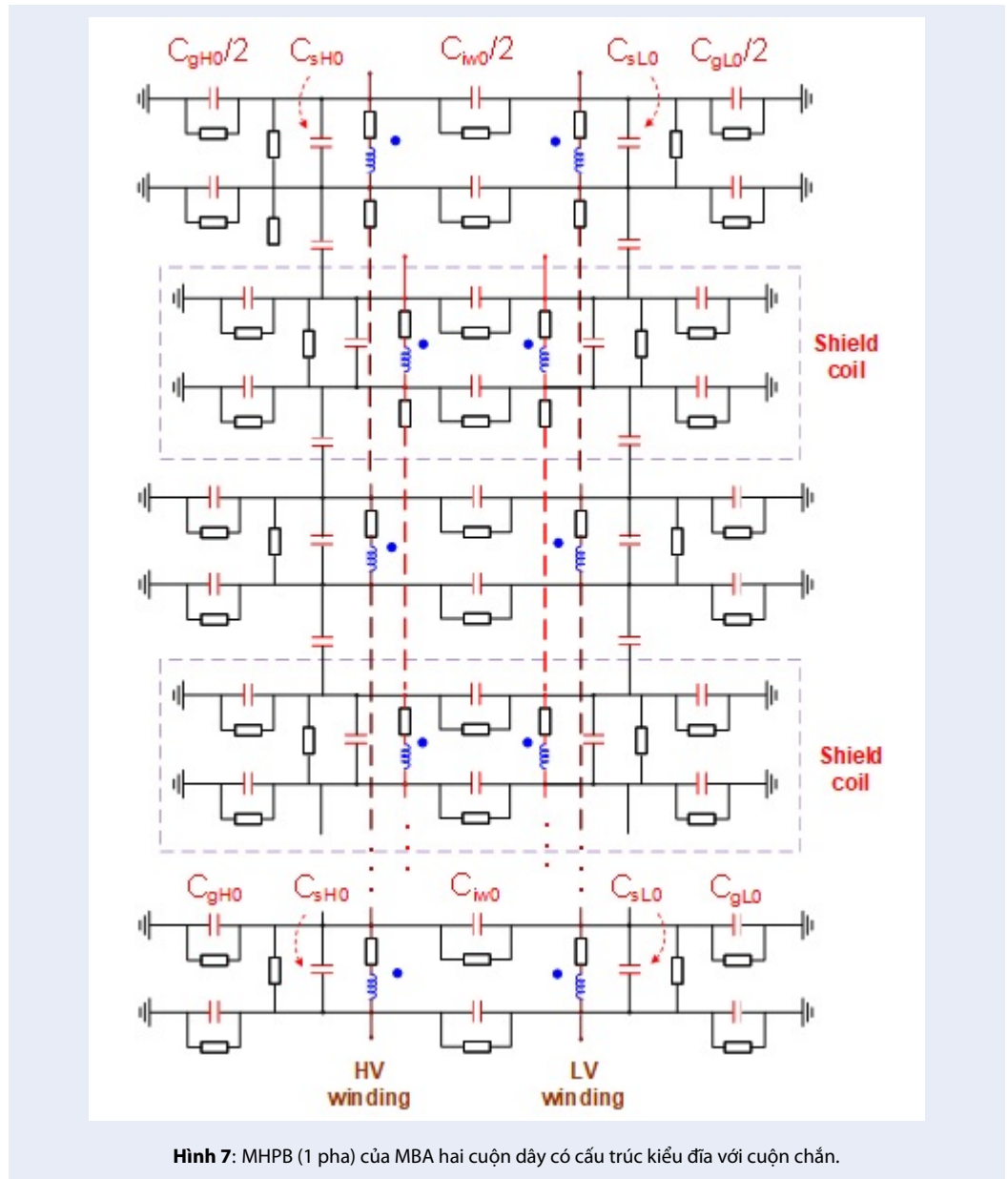
Như đã đề cập, MHPB ở Hình 1 có thể áp dụng cho các kiểu quấn dây khác nhau nhưng không có các phần tử khác thêm vào như màn chắn hay cuộn chắn. Khi đó, sự khác nhau của cấu trúc cuộn dây sẽ được biểu diễn bởi sự khác nhau về giá trị của các thông số mạch điện (chủ yếu bao gồm các điện cảm và các điện dung). Trong trường hợp có thêm cuộn chắn theo Hình 6, cuộn dây sẽ có MHPB điều chỉnh như Hình 7 để biểu diễn tương đương về mặt vật lý cho sự thay đổi này. MHPB cuộn dây có bổ sung màn chắn xin tham khảo trong²³.

KẾT QUẢ

Đầu tiên, để khảo sát liệu điện dung dọc các cuộn dây cao áp và hạ áp có ảnh hưởng đáng kể đến hiệu ứng điện dung tổng cộng, Hình 8 giới thiệu kết quả

đo ĐƯTS tổng trở đầu cực pha A cuộn cao áp và các kết quả mô phỏng sử dụng phần mềm thương mại cho MHPB tổng quát 8 phân đoạn (Hình 1) khi có và không có xét đến các điện dung dọc (Cs). Tại vùng tần số thuần dung lân cận 3 kHz (góc pha tổng trở gần -90°), độ lệch đáng kể giữa các ĐƯTS đo lường và mô phỏng (khi không xét các điện dung dọc) cho phép kết luận chắc chắn rằng điện dung dọc các cuộn dây có ảnh hưởng đáng kể đến hiệu ứng dung *tổng cộng* (do xét trong vùng tần số thấp “LF”). Độ lệch này còn ảnh hưởng đến các cộng hưởng ở vùng tần số thấp hơn; chỉ khi các điện dung dọc có giá trị thích hợp, và MHPB thích hợp được sử dụng cho mô phỏng mới khử được độ lệch này và các độ lệch khác trong vùng tần số cao hơn.

Sau đó, nhằm phân tích chi tiết cấu trúc cuộn dây nào trong MBA hộp đen thử nghiệm là thích hợp, các kiểu quấn dây khác nhau giới thiệu trong bài báo này đã được khảo sát mô phỏng sử dụng các sơ đồ mạch tương ứng: MHPB tổng quát ở Hình 1 dùng để mô phỏng cấu trúc cuộn dây các kiểu đĩa thường và quấn xen kẽ, kiểu lớp^{12,13}; MHPB ở Hình 7 cho cuộn dây kiểu đĩa thường có cuộn chắn; các MHPB khác (không minh họa trong bài báo này do giới hạn về không gian trình bày) cho cuộn dây kiểu đĩa dạng “multi-start” và có màn chắn. Hình 9 so sánh kết quả đo ĐƯTS biên độ tổng trở đầu cực pha A cuộn cao áp và các kết quả mô phỏng sử dụng các MHPB (8 phân



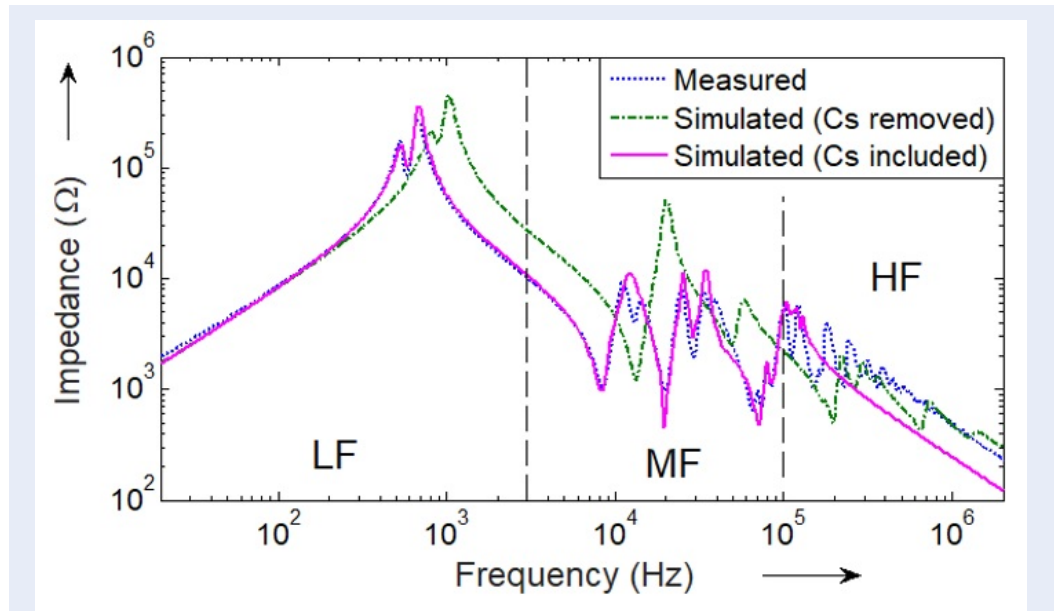
Hình 7: MHPB (1 pha) của MBA hai cuộn dây có cấu trúc kiểu đĩa với cuộn chắn.

đoạn) tương ứng với cuộn dây kiểu đĩa dạng multi-start, kiểu lớp và kiểu đĩa có cuộn chắn (cấu hình “đầu cuộn chắn S1 nối đầu cao áp A”). Kết quả so sánh ở vùng tần số trung bình “MF” từ 3 kHz đến gần 100 kHz cho thấy nhiều khả năng MBA thử nghiệm có cấu trúc cuộn dây kiểu đĩa thường có cuộn chắn.

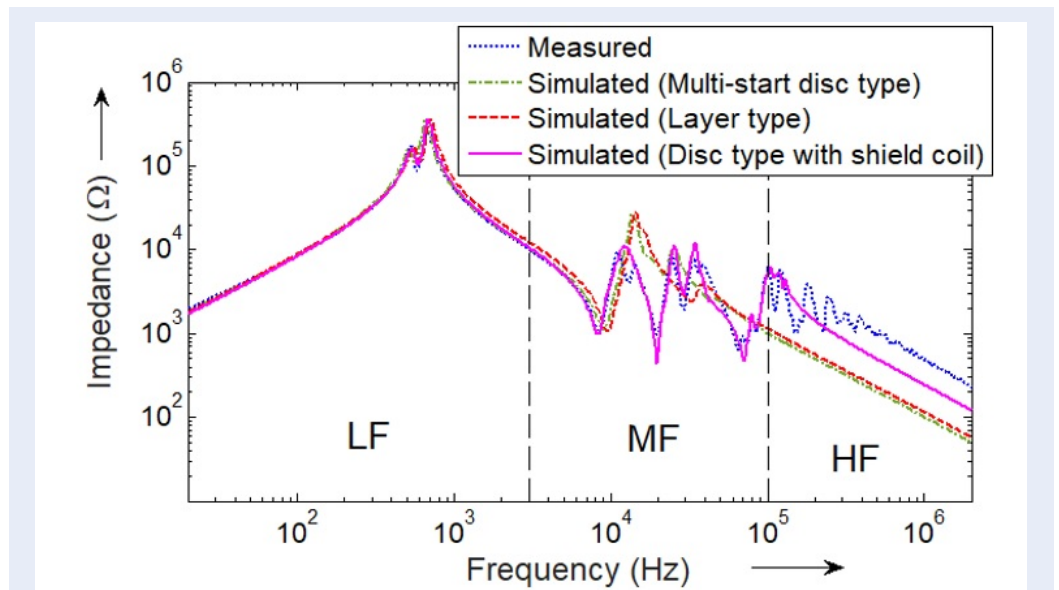
Kế tiếp, để xác định cấu hình nào là phù hợp nhất đối với cấu trúc cuộn dây này, Hình 10 giới thiệu kết quả đo ĐUTS tổng trở đầu cực pha A cuộn cao áp và các kết quả mô phỏng tương ứng. Kết quả so sánh trong vùng tần số trung bình cho thấy cuộn dây kiểu đĩa có cuộn chắn với cấu hình “đầu cuộn chắn (S1) nối đầu cao áp (A)” là phù hợp nhất. Khi đó, giá trị các điện

dung dọc nhận được như sau: $C_{sH0} = C_{sL0} = 145.0$ pF (phần đoạn cuộn chính) và $C_{sH} = C_{sL} = 235.6$ pF (toàn bộ cuộn chắn).

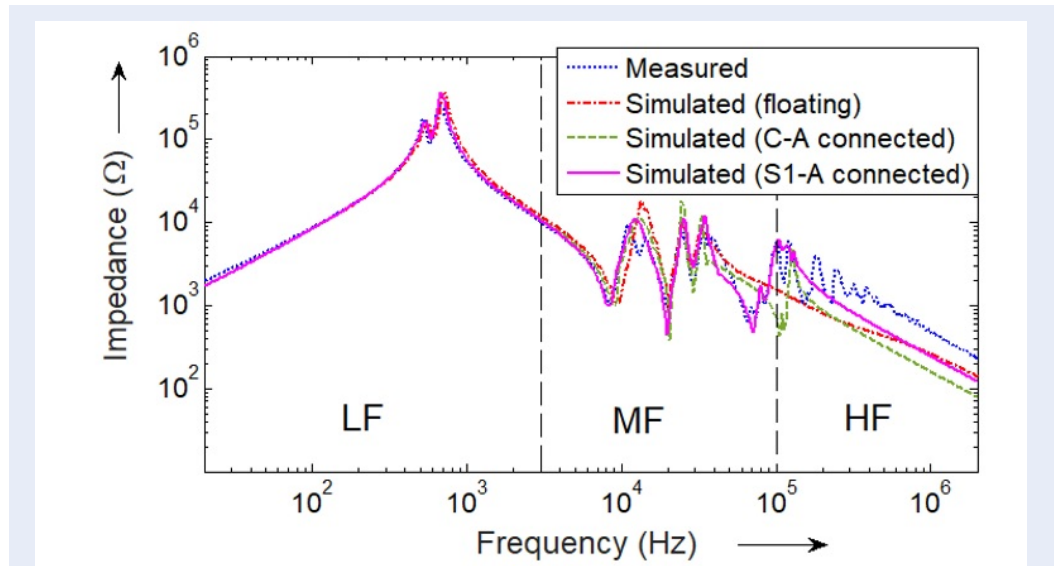
Các kết quả mô phỏng ĐUTS biên độ tỷ số điện áp cũng cho kết luận tương tự như đối với trường hợp khảo sát ĐUTS biên độ tổng trở đầu cực đã trình bày: Hình 11 so sánh kết quả đo lường và mô phỏng ĐUTS biên độ tỷ số điện áp cuộn dây pha A phía cao áp với cấu trúc kiểu đĩa thường có cuộn chắn khi có và không có xét đến các điện dung dọc (C_s) như đã phân tích. Hình 10 và Hình 11 cho thấy sự khác nhau về dạng đồ thị và sự phù hợp giữa các kết quả đo lường và mô phỏng; nhưng điều này là logic khi sơ đồ đo lường và



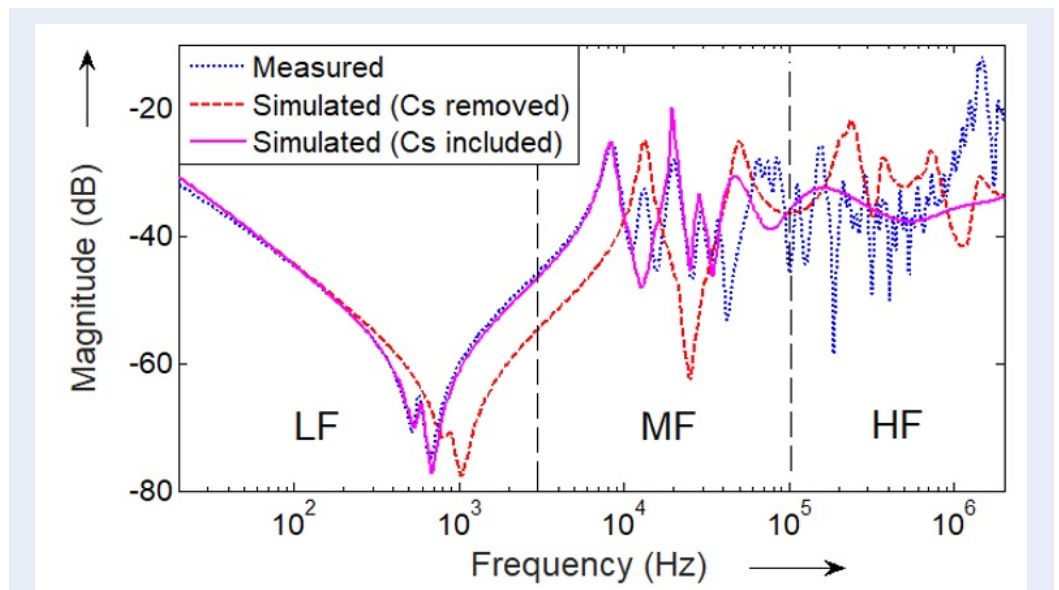
Hình 8: So sánh ĐUTS tổng trở đầu cực đo lường và mô phỏng khi có và không có xét đến điện dung dọc.



Hình 9: So sánh ĐUTS tổng trở đầu cực đo lường và mô phỏng với các cấu trúc cuộn dây khác nhau.



Hình 10: So sánh ĐUTS tổng trở đầu cực đo lường và mô phỏng với các cấu hình cuộn dây có cuộn chắn khác nhau.



Hình 11: So sánh ĐUTS biên độ tỷ số điện áp đo lường và mô phỏng khi có và không có xét điện dung dọc các cuộn dây có cuộn chắn.

mô phỏng của 2 dạng ĐUTS này là khác nhau (xem Hình 2). Trong mô phỏng cũng đã có sự điều chỉnh về giá trị của các điện cảm, điện trở và điện dẫn khi tần số thay đổi để có sự phù hợp nhất giữa kết quả mô phỏng và đo lường.

THẢO LUẬN

Do kết quả khảo sát cho thấy cấu trúc cuộn dây trong MBA thử nghiệm nhiều khả năng bao gồm cuộn dây chính có cuộn dây chần cho mỗi pha, điện cảm (và điện trở) của cuộn chần cũng cần phải được xác định. Các tác giả nhận thấy trong quá trình mô phỏng, điện cảm cuộn chần ảnh hưởng đáng kể đến biên độ các ĐUTS tổng trở đầu cực và tỷ số điện áp trong vùng tần số trung bình, góp phần làm các kết quả mô phỏng có xu thế gần giống với các kết quả đo lường hơn so với khi không có cuộn chần, đặc biệt tại các tần số cộng hưởng. Dựa vào đó, giá trị điện cảm cuộn chần được xác định theo nguyên lý thử-sai và giới thiệu ở Bảng 3. Lưu ý rằng điện cảm của cuộn chần không có ảnh hưởng ở tần số thấp vì đầu cuộn chần chỉ kết nối đến một điểm của cuộn dây chính, không tạo mạch khép kín nên không có dòng điện chạy qua trong vùng tần số này.

ẢNH HƯỞNG CÁC THÔNG SỐ ĐIỆN TRONG MHPB VÀ SỐ PHÂN ĐOẠN MÔ HÌNH LÊN ĐẶC TÍNH ĐUTS

Các thông số điện trong MHPB của MBA thử nghiệm vừa được xác định sẽ là nguồn thông tin quan trọng để khảo sát sự thay đổi định lượng biên độ các đặc tính ĐUTS dựa trên mô phỏng nhằm phục vụ mục tiêu chẩn đoán sự cố cho các MBA khác hiện đang vận hành trên lưới điện. Bên cạnh đó, MHPB với số phân đoạn khác nhau cũng có những ảnh hưởng nhất định đến kết quả mô phỏng.

Ảnh hưởng của thông số điện

Hình 12 và Hình 13 tương ứng giới thiệu minh họa sự thay đổi ĐUTS tổng trở đầu cực pha A phía cao áp của MBA thử nghiệm dựa trên kết quả mô phỏng MHPB 8 phân đoạn theo sự thay đổi của điện cảm các phân đoạn cuộn dây chính và điện dung của cuộn dây này so với đất. Kết quả cho thấy, trong Hình 12, điện cảm có ảnh hưởng rõ nét trong các vùng tần số “cảm”, nghĩa là trong các khoảng tương ứng AB và CD với giá trị biên độ tổng trở tăng dần; trong khi ở Hình 13, điện dung cuộn dây đối với đất có ảnh hưởng đáng kể trong các vùng tần số “dung”, nghĩa là trong các khoảng BC, EF và GH với giá trị biên độ tổng trở giảm dần... Việc khảo sát ảnh hưởng các thông số điện khác vì thế cũng dễ dàng được thực hiện (nhưng không trình bày do

hạn chế về không gian); qua đó dễ dàng xây dựng quy luật biến đổi ĐUTS theo các thông số điện phục vụ chẩn đoán sự cố về sau.

Ảnh hưởng của số phân đoạn cuộn dây trong MHPB

Số phân đoạn cuộn dây trong mô hình khảo sát sẽ ảnh hưởng đến độ chính xác kết quả mô phỏng trong các vùng tần số nhất định và độ phức tạp của giải pháp mô hình mô phỏng. Khi tăng số phân đoạn n lên, mô hình mạch điện sẽ phức tạp hơn, số lượng các phần tử hồ cảm tăng lên nhanh chóng (có thể lên đến 4560 phần tử đối với trường hợp $n = 16$). Đối với một phần mềm mô phỏng thương mại điển hình hiện nay, việc xây dựng mô Hình 16 phân đoạn cho một MBA ba pha sẽ tốn thời gian gấp bốn lần so với mô hình 8 phân đoạn. Để minh họa, Hình 14 giới thiệu kết quả mô phỏng ĐUTS tổng trở đầu cực cuộn dây cao áp pha A của MBA thử nghiệm với số phân đoạn $n = 8$ và 16.

Theo Hình 14, trong trường hợp số phân đoạn $n = 16$, kết quả mô phỏng ở vùng tần số trung bình xuất hiện thêm đỉnh cộng hưởng trong dãy tần số lân cận 10 kHz và 100 kHz, bám sát đặc tuyến đo lường hơn so với trường hợp $n = 8$. Như vậy, việc tăng số phân đoạn của mô hình sẽ giúp cải thiện kết quả mô phỏng ĐUTS, nhưng đồng thời cũng sẽ làm mô hình mạch điện trở nên phức tạp hơn.

KẾT LUẬN

Bài báo đã đề xuất một phương pháp mới hoàn thiện để xác định các thông số điện trong mô hình điện thông số phân bố và cấu trúc hình học của một máy biến áp lực hai cuộn dây dạng hộp đen; từ đó, cho phép phân tích các đáp ứng tần số đo lường trên các máy biến áp lực dạng hộp đen đang vận hành trên lưới điện truyền tải và phân phối dựa trên mô hình vật lý nhằm mục tiêu nâng cao chất lượng chẩn đoán sự cố cơ-điện.

Theo phương pháp đề xuất, số lượng các phép đo đáp ứng tần số cần thiết chỉ bao gồm các tổng trở đầu cực máy biến áp lực với thời gian thực hiện ngắn, qua đó có thể rút ngắn thời gian thí nghiệm MBA trong khi lại nhận được nhiều thông tin quan trọng liên quan đến các thông số điện và ảnh hưởng của chúng lên kết quả đo.

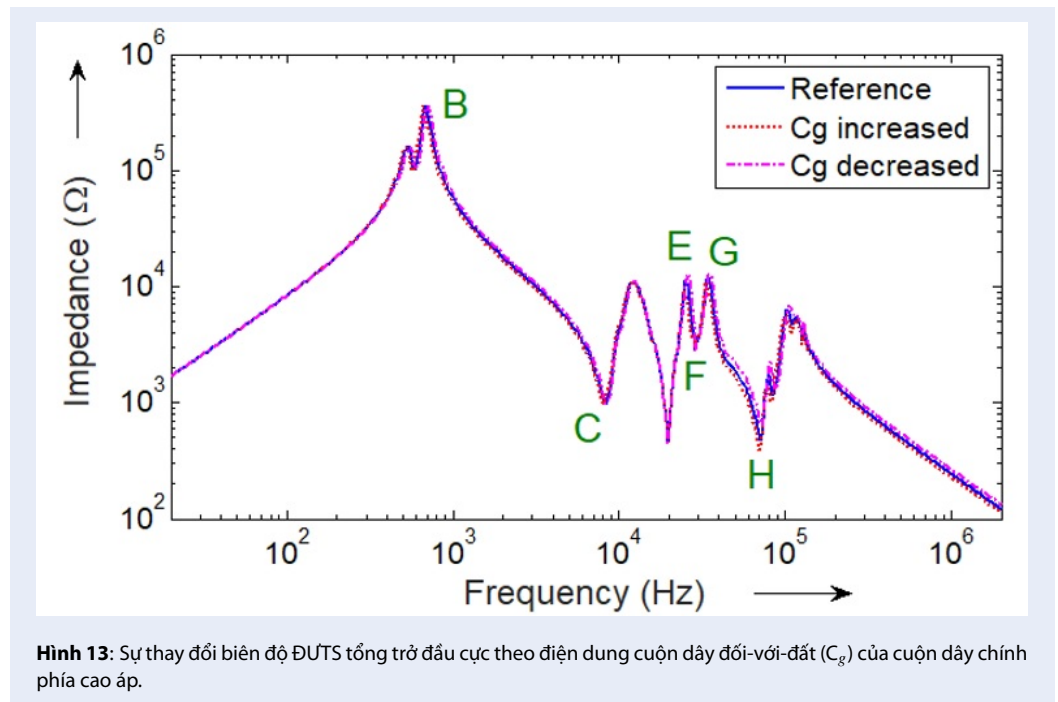
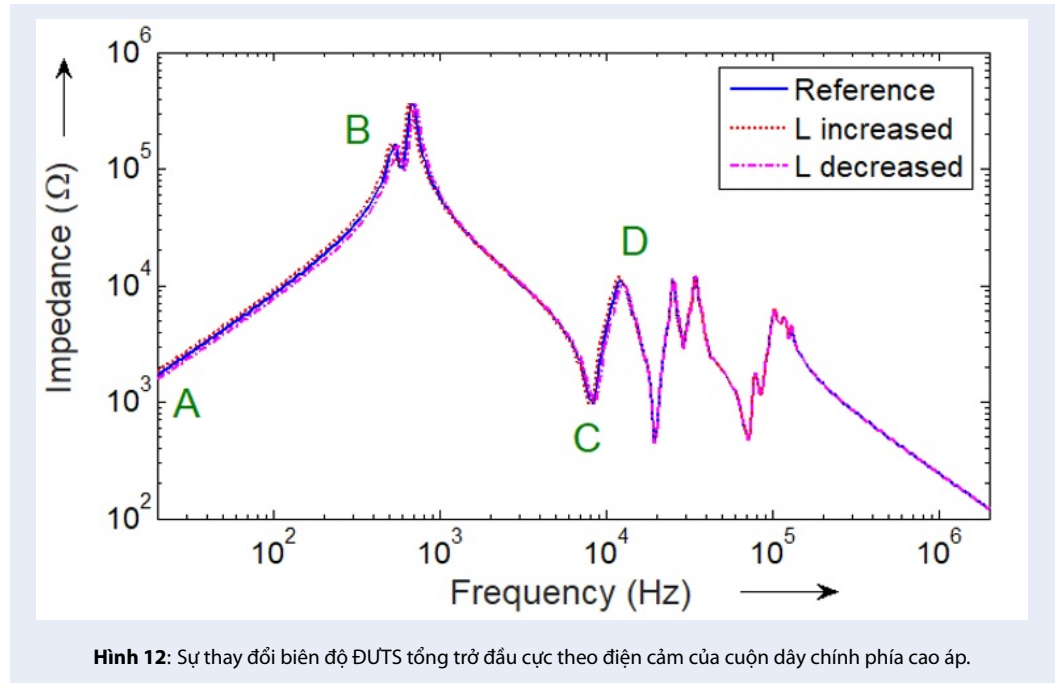
PHỤ LỤC I

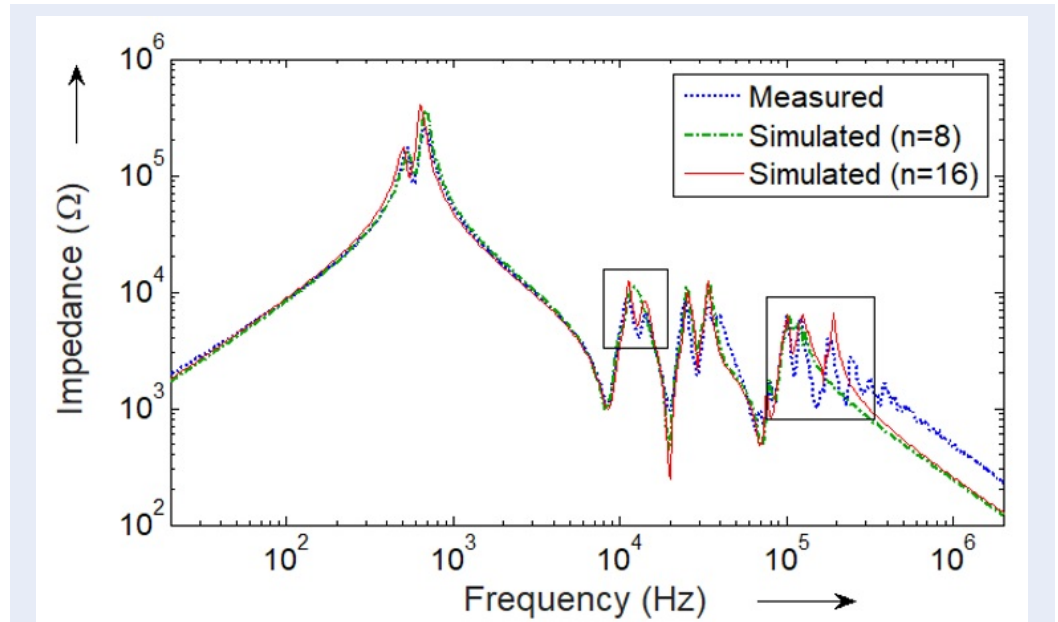
A. Điện cảm tự thân phân đoạn các cuộn dây pha và hồ cảm giữa các phân đoạn trên cùng cuộn dây pha

Để xác định điện cảm (tự thân và tương hỗ) của các phân đoạn trên cùng cuộn dây pha (gồm $L^A = M^{AA} =$

Bảng 3: Điện cảm cuộn chắn trong MHPB 8 phân đoạn

(mH)	20 Hz - 10 kHz	10 kHz - 17 kHz	17 kHz - 28 kHz	28 kHz - 40 kHz	40 kHz - 2 MHz
Cao áp	21.4	10.2	10.2	7.7	1.6
Hạ áp	21.4	12.9	12.9	5.4	1.6





Hình 14: So sánh các ĐUTS tổng trở đầu cực cuộn dây cao áp pha A với số phân đoạn $n = 8$ và 16 .

$M^{CC} = L^C$, $L^B = M^{BB}$, và $L^a = M^{aa} = M^{cc} = L^c$, $L^b = M^{bb}$ ở tần số thấp, Hình 15 giới thiệu phép đo tổng trở đầu cực hở mạch một cuộn dây pha điển hình phía cao áp (pha A) của MBA thử nghiệm để làm cơ sở xác định; vì trong phép đo này, chỉ có cuộn dây pha A phía cao áp được cấp nguồn trong khi cuộn dây pha A phía hạ áp và các cuộn dây pha khác hở mạch nên không có ảnh hưởng hồ cảm từ chúng. Tại điểm tần số 100 Hz đối với MBA thử nghiệm, tổng trở đầu cực hở mạch của cuộn dây mang tính thuần cảm do góc pha $\approx 90^\circ$, vì gần như dòng điện chỉ chạy qua các điện cảm tự thân và hồ cảm của các phân đoạn cuộn dây mà không qua các điện dung (xem Hình 1).

Khảo sát trường hợp đơn giản nhất là giả thiết MBA có tổ đấu dây sao-sao (Y-y) trước. Khi đó, chỉ có ảnh hưởng hồ cảm giữa các phân đoạn trên cuộn dây pha đang thực hiện phép đo mà thôi. Nếu gọi V_{oc}^A và I_{oc}^A tương ứng là trị hiệu dụng điện áp đặt và dòng điện trên cuộn dây pha A trong phép đo tổng trở đầu cực hở mạch, ta có quan hệ dòng-áp như sau:

$$V_{oc}^A = I_{oc}^A \times n \times X^A + I_{oc}^A \times n \times (n-1) \times X^{AA} \quad (1)$$

với $X^A = \omega \times L^A$ và $X^{AA} = \omega \times M^{AA}$ tương ứng là điện kháng đầu cực tự thân và tương hỗ giữa hai phân đoạn ở tần số thấp.

Trong biểu thức (1), thành phần thứ nhất gây ra bởi điện cảm tự thân của n phân đoạn còn thành phần thứ hai gây ra bởi ảnh hưởng hồ cảm của $(n-1)$ phân đoạn (lên từng phân đoạn còn lại). Nếu đặt $X_{oc}^A \approx |Z_{oc}^A| = V_{oc}^A / I_{oc}^A$ là điện kháng đầu cực hở mạch

của cuộn dây pha A, từ (1) ta có $X_A = X_{oc}^A / n^2$, từ đó nhận được:

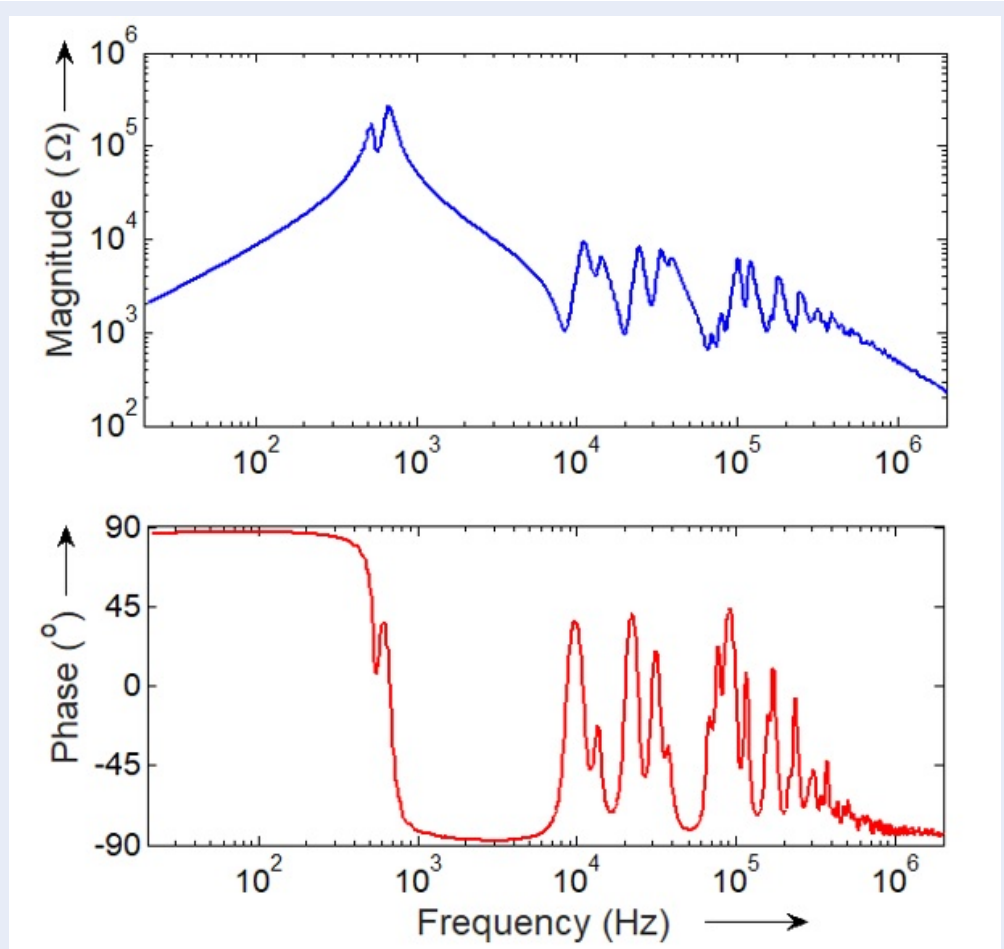
$$L^A \approx M^{AA} = \frac{X_{oc}^A}{n^2 \omega} \quad (2)$$

Theo cách thức tương tự, điện cảm (tự thân và tương hỗ) của các phân đoạn cuộn dây pha B và C cũng sẽ được xác định.

Nếu tổ đấu dây MBA thay đổi, ví dụ như Y-d5 đối với MBA thử nghiệm, sẽ có dòng thứ cấp chạy trong ba cuộn dây pha đầu tam giác và do đó sẽ có ảnh hưởng hồ cảm từ cuộn dây hạ áp. Tuy vậy, các kết quả mô phỏng đã cho phép kết luận, biểu thức (2) cũng có thể được áp dụng khi mà các hồ cảm M^{Aa} (dương) khử ảnh hưởng của các hồ cảm M^{Ab} và M^{Ac} (âm) trong khi dòng phía thứ cấp lại không đáng kể chạy trong cuộn dây tam giác phía hạ áp.

B. Hồ cảm giữa hai phân đoạn hai cuộn dây pha khác nhau

Bước kế tiếp là xác định hồ cảm giữa hai phân đoạn thuộc hai cuộn dây khác pha (M^{AB} , M^{AC} và M^{Ab} , M^{Ac}) ở tần số thấp. Đối với cuộn dây cao áp đấu sao, có thể dựa vào kỹ thuật “cân bằng từ” (magnetic balance test) được thực hiện hoặc dựa vào phép đo hoặc giải pháp mô phỏng sử dụng mô hình mạch thông số tập trung dựa trên nguyên lý đối ngẫu²⁰. Theo nguyên lý phép đo, hai đầu cực, ví dụ của cuộn cao áp pha A, được cấp nguồn AC khi các đầu cực khác để hở mạch. Khi đó, các tỷ số giữa điện áp cảm ứng tại các đầu cực



Hình 15: ĐUTS biên độ (hình trên) và góc pha (hình dưới) tổng trở đầu cực hở mạch của cuộn dây pha A phía cao áp.

khác, pha B (hay C), và điện áp cấp tại đầu cực cuộn dây pha A sẽ là các hệ số để tính các hồ cảm M^{AB} (và M^{AC}) từ L^A , tức là:

$$M^{AB} = -k_u^{AB} L^A \quad (3)$$

Trong biểu thức (3), hệ số có dấu trừ biểu thị hồ cảm âm do các dòng từ thông chạy qua các cuộn dây pha ngược chiều nhau. Ảnh hưởng của hồ cảm từ phía cuộn dây hạ áp đấu tam giác trong MBA thử nghiệm có thể bỏ qua do hiệu ứng khử hồ cảm như đã đề cập. Khi các hồ cảm M^{AB} (và M^{AC}) đã được xác định, có thể tính các hồ cảm M^{Ab} (và M^{Ac}) dựa trên các tỷ số vòng dây hai cuộn dây cao và hạ áp, nghĩa là $M^{Ab} = N_b/N_B \times M^{AB}$ với N_b và N_B tương ứng là số vòng dây các cuộn dây pha phía hạ áp và cao áp của pha B.

C. Hồ cảm giữa các phân đoạn hai cuộn dây cao và hạ áp cùng pha

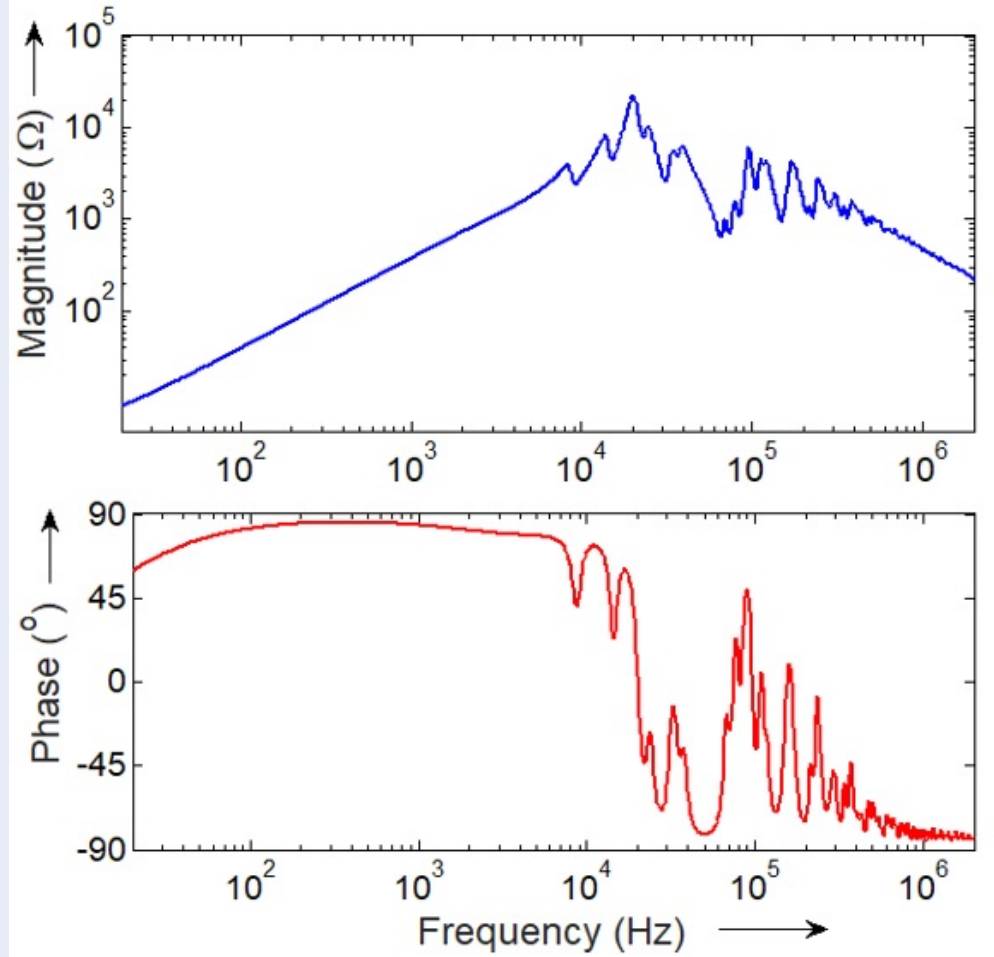
Hồ cảm giữa hai phân đoạn của cuộn dây cao và hạ áp cùng pha ($M^{Aa} = M^{Cc}$ và M^{Bb}) ở tần số thấp được phân tích dựa vào phép đo tổng trở đầu cực ngắn mạch, minh họa ở Hình 16.

Trong các phép đo tổng trở đầu cực ngắn mạch, xét minh họa pha A: cuộn dây pha A phía cao áp được cấp nguồn trong khi cuộn dây pha này phía hạ áp đầu ngắn mạch. Đối với MBA đầu Y-y, nhận được quan hệ dòng-áp như sau:

$$V_{sc}^A = I_{sc}^A \times n^2 \times X^A + I_{sc}^a \times n^2 \times X^{Aa} \quad (4)$$

Trong đó:

- V_{sc}^A , I_{sc}^A và I_{sc}^a lần lượt là trị hiệu dụng của điện áp nguồn cấp, dòng điện ngắn mạch trên cuộn dây pha cao áp và hạ áp pha A;
- X^{Aa} là điện kháng tương hỗ hai phân đoạn cuộn dây cao và hạ áp ở tần số thấp (tính



Hình 16: ĐUTS biên độ (hình trên) và góc pha (hình dưới) tổng trở đầu cực ngắn mạch của cuộn dây pha A phía cao áp.

toán tại 400 Hz đối với MBA thử nghiệm, khi đó tổng trở đầu cực ngắn mạch thuần cảm, xem Hình 16).

Trong biểu thức (4), thành phần thứ nhất gây ra bởi các điện cảm (tự thân và tương hỗ) cuộn dây pha phía cao áp (xem biểu thức 1); thành phần thứ hai do các điện cảm tương hỗ giữa hai cuộn dây pha bởi có dòng ngắn mạch trong cuộn dây pha phía hạ áp.

Do dòng I_{sc}^a tỷ lệ với I_{sc}^A theo tỷ số dòng $k_i = I_{sc}^a / I_{sc}^A \approx I_{dm}^a / I_{dm}^A$ và đặt $X_{sc}^A \approx Z_{sc}^A = U_{sc}^A / I_{sc}^A$ là điện kháng ngắn mạch của cuộn dây pha A nên:

$$X^{Aa} = (X^A - X_{sc}^A / n^2) / k_i \quad (5)$$

Trong trường hợp MBA thử nghiệm có các cuộn dây pha hạ áp đấu tam giác, sẽ có thêm dòng điện ngắn mạch chạy trong các pha khác (I_{sc}^b và I_{sc}^c). Tuy nhiên, kết quả mô phỏng cho thấy các dòng điện này nhỏ hơn rất nhiều so với dòng điện chạy trong pha

bị ngắn mạch (do tổng trở ngắn mạch nhỏ hơn), dẫn đến có thể áp dụng (5) để xác định M_{Aa} , M_{Bb} và M_{Cc} cho các MBA có tổ đấu dây Y-y lẫn Y-d.

D. Ảnh hưởng của kiểu đấu nối cuộn dây và tần số

Các bước trên có thể được áp dụng để tính toán điện cảm (tự thân và tương hỗ) cho các cuộn dây pha phía hạ áp ở tần số thấp. Kết quả tính toán cho thấy, các giá trị M^{Aa} , M^{Bb} , M^{Cc} tính toán độc lập từ các phép đo các cuộn dây pha phía hạ áp có kết quả tương tự như khi phân tích các phép đo các cuộn dây phía cao áp. Điều này chứng tỏ việc đấu nối tam giác giữa các cuộn dây pha là không có ảnh hưởng đáng kể do hiệu ứng khử hồ cảm và vì vậy, phương pháp đề xuất có tính ứng dụng thực tiễn đối với các tổ đấu dây khác nhau của MBA.

Tiếp theo, cần phải xác định giá trị các điện cảm (tự thân và tương hỗ) ở vùng tần số trung bình bởi vì điện cảm giảm theo tần số. Giải pháp đơn giản nhất là dựa trên mô phỏng theo nguyên lý thử-sai: bằng cách điều chỉnh tất cả giá trị các điện cảm với một hệ số (nhỏ hơn 1) sao cho kết quả mô phỏng ĐUTS gần giống nhất với kết quả đo lường ở vùng tần số này.

PHỤ LỤC II

Điện dung giữa cuộn dây đối với đất và giữa hai cuộn dây

Các điện dung giữa từng phân đoạn cuộn dây đối với đất (C_{gH0} , C_{gL0}) và giữa hai cuộn dây (C_{iw0}) trong MHPB tỷ lệ tương ứng với giá trị các điện dung tổng ba pha đo lường (C_{HG} , C_{LG} , C_{HL}) bởi hệ số 3 và số phân đoạn n . Từ kết quả đo lường cho MBA thử nghiệm để cập trong ^{12,21}, Bảng 4 giới thiệu giá trị các điện dung C_{gH0} , C_{gL0} và C_{iw0} tính toán cho MHPB $n = 8$ phân đoạn.

Trong Bảng 4, có thể thấy giá trị điện dung C_{gL0} ít thay đổi theo tần số (độ lệch 1,6 % giữa 50 Hz và 1 kHz); điều này chứng tỏ tổ hợp cách điện giấy – dầu giữa cuộn hạ áp và lõi thép có hằng số điện môi ít thay đổi theo tần số. Trong khi đó, giá trị C_{gH0} và C_{iw0} thay đổi lớn hơn (tương ứng 4,0 % và 5,8 %) khi tần số tăng từ 50 Hz đến 1 kHz, biểu thị sự phụ thuộc vào tần số của hằng số điện môi của các tổ hợp cách điện tương ứng. Mặc dù vậy, xu thế biến thiên không lớn đối với tần số của các hằng số điện môi và điện dung trong các MBA tương tự ²⁴ cho phép khảo sát các giá trị điện dung là hằng số trong giải pháp mô phỏng thực hiện trong nghiên cứu này.

DANH MỤC TỪ VIẾT TẮT

ĐUTS: Đáp ứng tần số
 HF: High frequency
 LF: Low frequency
 MBA: Máy biến áp lực
 MF: Medium frequency
 MHPB: Mô hình điện thông số phân bố

XUNG ĐỘT LỢI ÍCH

Nhóm tác giả xin cam đoan rằng không có bất kỳ xung đột lợi ích nào trong công bố bài báo.

ĐÓNG GÓP CỦA TÁC GIẢ

Trần Ngọc Thạch xây dựng cơ sở - phương pháp nghiên cứu và viết bài.

Nguyễn Trọng Huy thực hiện mô phỏng.

Nguyễn Thanh Phương và Phạm Đình Anh Khôi phân biện cơ sở - phương pháp nghiên cứu và kiểm tra lại bài viết.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Fofana I. Power transformer diagnostics, monitoring and design features. Energies, MDPI. 2018; Available from: <https://doi.org/10.3390/en11123248>.
2. Diagnostic testing and monitoring of power transformers, Omicron brochure. 2019;
3. Pham DAK, Pham TMT, Borsi H, Gockenbach E. A new diagnostic method to support standard FRA assessments for diagnostics of transformer winding mechanical failures. IEEE Elec. Ins. Mag. 2014;30(2):34–41. Available from: <https://doi.org/10.1109/MEI.2014.6749571>.
4. Abeywickrama N, Serdyuk YV, Gubanski SM. High-frequency modeling of power transformers for use in frequency response analysis. IEEE Trans Pow Del. 2008;23(4):2042–2049. Available from: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2008.917896>.
5. Wang Z, Li J, Sofian DM. Interpretation of transformer FRA responses-Part I: Influence of winding structure. IEEE Trans Pow Del. 2009;24(2):703–710. Available from: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2014485>.
6. Sofian DM, Wang Z, Li J. Interpretation of transformer FRA responses-Part II: Influence of transformer structure. IEEE Trans Pow Del. 2010;25(4):2582–2589. Available from: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2050342>.
7. Wilcox DJ, Hurley WG, Conlon M. Calculation of self and mutual impedances between sections of transformer windings. IEE Proc. 1989;136(5):308–314. Available from: <https://doi.org/10.1049/ip-c.1989.0041>.
8. Paranik S, Satish L. Estimation of series capacitance for a three-phase transformer winding from its measured frequency response. IEEE Trans Pow Del. 2013;28(4):2437–2444. Available from: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2013.2260772>.
9. Tran NT, Nguyen TP, Pham DAK. Investigation of core parameters on analytical inductances in a distributed circuit for Frequency Response Analysis of power transformers; Proc. of the 9th South East Asian Technical University Consortium Symposium (SEATUC). 2015;p. 399–402.
10. Tran NT, Nguyen TP, Ho DL, Pham TMT, Pham DAK. Attempts in extending a new method to improve performance of Frequency Response Analysis. 19th Inter. Symp. on High-vol. Eng. (ISH). 2015;
11. Tran NT, Nguyen TP, Ho DL, Pham TMT, Pham DAK. Inductances in a physical distributed circuit of a black-box power transformer for Frequency Response Analysis at medium frequencies. IEEE IntConf on High-vol Eng and Appl. 2016; Available from: <https://doi.org/10.1109/ICHVE.2016.7800667>.
12. Tran NT, Nguyen TP, Ho DL, Pham TMT, Pham DAK. Capacitances in a physical distributed circuit of a black-box power transformer for Frequency Response Analysis at medium frequencies. IEEE Int.Conf. on High-vol. Eng. and Appl. 2016; Available from: <https://doi.org/10.1109/ICHVE.2016.7800666>.
13. Tran NT, Nguyen TP, Ho DL, Nguyen BK, Pham DAK. Distributed circuit of a black-box power transformer for simulation based frequency response analysis. 20th Inter. Symp. on High-vol. Eng. (ISH). 2017; Available from: <https://doi.org/10.1109/ICHVE.2016.7800667>.
14. Mork BA, Gonzalez F, Ishchenko D, Stuehm DL, Mitra J. Hybrid transformer model for transient simulation - Part I: Development and Parameters. IEEE Trans. Pow. Del. 2007;22(1):248–255. Available from: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.883000>.
15. Høidalen HK, Mork BA, Gonzalez F, Ishchenko D, Chiesa N. Implementation and verification of the hybrid transformer model in ATPDraw. Electr. Power Sys. Research, Elsevier B.V. 2008;79:454–459. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.09.003>.
16. Chiesa N, Mork BA, Høidalen HK. Transformer model for inrush current calculations: simulations, measurements and sensitivity analysis. IEEE Trans Pow Del. 2010;25(4):2599–2607. Available from: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2010.2045518>.

Bảng 4: Điện dung tính toán từ phép đo (MHPB 8 phân đoạn)

Điện dung	Tần số 50 Hz (pF)	Tần số 1 kHz (pF)
C_{gH0}	81.9	78.6
C_{gL0}	275.8	271.4
C_{iv0}	335.8	316.3

17. Rahimpour E, Christian J, Feser K, Mohseni H. Transfer function method to diagnose axial displacement and radial deformation of transformer windings. *IEEE Trans. Pow. Del.* 2003;18(2):493–505. Available from: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2003.809692>.
18. IEC Standard 60076-18: Power transformers - Part 18: Measurement of frequency response. 2012;.
19. IEEE Guide for the application and interpretation of Requency Response Analysis for Oil-immersed transformers. *IEEE Standard C57149*. 2012;.
20. CP TD1 Reference Manual, Omicron electronics. 2007;.
21. Pham DAK, Pham TMT, Borsi H, Gockenbach E. A new method for purposes of failure diagnostics and FRA interpretation applicable to power transformers. *IEEE Trans. Dielec. Elec. Ins.* 2013;20(6):2026–2034. Available from: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2013.6678850>.
22. Vecchio RMD. Transformer design principles with applications to core-form power transformers. 2nd ed., CRC Press. 2010;.
23. Su CQ. Electromagnetic transients in transformer and rotating machine windings. Information Science Reference, IGI Global. 2013; Available from: <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-1921-0>.
24. Ekanayake C. Diagnosis of moisture in transformer insulation - application of frequency domain spectroscopy. Dissertation thesis, Chalmers university of technology. 2006;.
25. i Bagheri M, Vakilian M, Hekmati A, Heidarzadeh R. Influence of electrostatic shielding of disc winding on increasing the series capacitance in transformer. *IEEE Lausanne Power Tech. 2007*; Available from: <https://doi.org/10.1109/PCT.2007.4538586>.
26. Bagheri M, Phung BT, Naderi MS. Impulse voltage distribution and frequency response of intershield windings. *IEEE Elec. Ins. Mag.* 2016;32(5):32–40. Available from: <https://doi.org/10.1109/MEI.2016.7552374>.

A new method in determination of electrical parameters and geometrical structure of a power transformer applicable to failure diagnosis

Tran Ngoc Thach¹, Nguyen Thanh Phuong¹, Nguyen Trong Huy², Pham Dinh Anh Khoi^{3,4}



Use your smartphone to scan this QR code and download this article

ABSTRACT

In transmission and distribution networks throughout the world and in Vietnam nowadays, power transformers that are operating in the networks often are in black-box condition, i.e. there is no internal information available in terms of geometrical structure and material parameters. Geometrical structure of power transformers includes mainly winding structure and additional parts such as a static end ring or a would-in shield coil, if any whereas main materials in power transformers consists of conductive, insulating and magnetic materials... This makes difficulties in faults diagnosis that is based on the approach of physical modeling in general and the so-called electrical equivalent-circuit based modeling in particular since the physical approach requires internal information of power transformers for calculating electrical parameters. In case the electrical equivalent-circuit approach is used, the diagnosis is then conducted based on the change of values of electrical parameters in the circuit before and after an alarm or a suspicious fault that happens when power transformers are in operation.

Relevant international investigations conducted recently have mainly focused on test objects as power transformers in grey- or white-box condition, i.e. during manufacturing phase, since they have available geometrical structure and material properties. To show a possibility that black-box power transformers could be investigated in a physical manner, this article introduces a new method in determining electrical parameters and geometrical structure applied on a black-box power transformer. The research is based on the Frequency Response Analysis technique and has developed recent relevant investigations of the authors. This enables investigations of the value change of electrical equivalent parameters of this transformer on its simulated frequency responses for the purpose of physical fault diagnosis of power transformers later on.

Key words: black-box power transformers, distributed-parameter equivalent circuit, frequency response analysis, diagnostic testing

¹Ho Chi Minh City University of Technology (HUTECH), Vietnam

²Electrical Testing Company, Southern Power Corporation, Vietnam

³Ho Chi Minh City University of Technology (HCMUT), Ho Chi Minh City, Vietnam

⁴Vietnam National University, Ho Chi Minh City, Vietnam

History

- Received: 8-5-2020
- Accepted: 18-12-2020
- Published: 31-12-2020

DOI :10.32508/stdjet.v3i4.744



Copyright

© VNU-HCM Press. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International license.



Cite this article : Thach T N, Phuong N T, Huy N T, Khoi P D A. **A new method in determination of electrical parameters and geometrical structure of a power transformer applicable to failure diagnosis.** *Sci. Tech. Dev. J. – Engineering and Technology*; 3(4):569-587.