

KẾT HỢP PHƯƠNG PHÁP ĐƯỜNG DÂY DÀI VÀ BIẾN ĐỔI MODAL XÁC ĐỊNH ĐẶC TÍNH TẦN SỐ CỦA HỆ THỐNG DÂY DẪN NHIỀU SỢI PHỨC TẠP

COMBINATION OF TRANSMISSION LINE AND MODAL TRANSFORMATION METHODS
TO DETERMINE THE FREQUENCY CHARACTERISTICS OF A COMPLEX
MULTICONDUCTOR SYSTEM

Nguyễn Đức Quang¹, Trần Thanh Sơn¹, Đặng Quốc Vương²

¹Trường Đại học Điện lực, ²Trường Đại học Bách khoa Hà Nội

Ngày nhận bài: 03/2/2019, Ngày chấp nhận đăng: 28/3/2019, Phản biện: TS. Đặng Việt Hùng

Tóm tắt:

Tác động của điện từ trường tương hỗ đan chéo trong hệ thống đa dây dẫn luôn phức tạp. Hiện tượng nhiễu sóng điện từ trường lan truyền dọc đường dây sẽ gây ra hư hỏng trong cách điện của đường dây tại các tần số cộng hưởng. Do đó việc xác định chính xác các tần số cộng hưởng tương ứng với cấu hình thực tế của một hệ thống đường dây phức tạp giữ vai trò quan trọng trong thiết kế và vận hành. Bài báo giới thiệu một nghiên cứu xác định đặc tính tần số của hệ thống dây dẫn nhiều sợi bất kỳ dựa vào sự kết hợp phương pháp đường dây dài và biến đổi Modal. Phương pháp nghiên cứu được xây dựng trong môi trường Matlab/programming trước tiên được áp dụng tính toán với một cấu hình đường dây có sẵn kết quả đo để xác thực phương pháp. Sai số (<4%) chỉ ra tính tương thích giữa kết quả tính toán và kết quả đo. Sau đó, phương pháp nghiên cứu sẽ được áp dụng để xác định đặc tính tần số của một cấu hình dây dẫn nhiều sợi phức tạp được sử dụng trong thực tế.

Từ khóa:

Hệ thống đa dây dẫn, trường điện từ, đặc tính tần số, phương pháp đường dây dài, phương pháp biến đổi Modal.

Abstract:

The effect of reciprocally mutual electromagnetic fields in multi-conductor systems is always complicated. The phenomenon of electromagnetic interference (EMI) that propagates along the line will cause damage in the insulation of line at the resonant frequencies. Therefore, the precise determination of resonant frequencies corresponding to the actual complex configuration of a multi-conductor system plays an important role in design and operation. The paper introduces a study to determine the frequency characteristics of any multiconductor system based on a combination of transmission line and Modal transformation methods. The proposed approach which is built in Matlab/programming, is firstly applied to a simple system with available measure results. The error (<4%) indicates the compatibility between calculation method and measurement. After that, the studied approach will be applied to determine the frequency characteristics of a complex multi-conductor system used in practice.

Keywords:

Multiconductor, electromagnetic field, frequency characteristics, transmission line method, Modal transformation method.

1. ĐẶT VẤN ĐỀ

Hệ thống đa dây dẫn xuất hiện rất nhiều trong truyền tải, sự kết hợp chồng chéo giữa chúng về mặt điện và từ là vô cùng đa dạng. Sự kết hợp này có thể là giữa các pha, giữa các sợi dây dẫn cấu tạo nên một dây pha, hoặc giữa các sợi cấu tạo nên đai bảo vệ trong cáp điện với các dây pha.

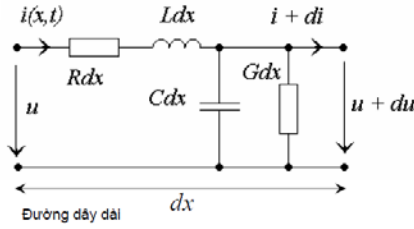
Tác động điện từ trường tương hỗ đan chéo giữa các dây dẫn luôn phức tạp. Sóng điện trường và sóng từ trường lan truyền trên đường dây luôn có mối quan hệ mật thiết với nhau (Transverse Electromagnetic - TEM). Đồng thời, sự đóng cắt của các thiết bị điện tử công suất trong các bộ chuyển mạch tĩnh có thể tạo ra hiện tượng nhiễu sóng điện từ trường (Electromagnetic Interference - EMI). Các sóng nhiễu cao tần này sẽ truyền dọc đường dây truyền tải và có thể gây ra các hư hỏng trong cách điện của đường dây [1-4]. Sự phân tích ảnh hưởng của điện từ trường tương hỗ lên hệ thống đường dây đòi hỏi cần xác định chính xác mô hình đặc tính của hệ thống nghiên cứu trong miền tần số. Tuy nhiên, việc mô phỏng và tính toán hệ thống dây dẫn nhiều sợi sẽ gặp nhiều khó khăn do luôn phụ thuộc vào nhiều tham số khác nhau [5, 6]. Trước tiên, các đặc tính của vật liệu, độ dày của cách điện và lớp giáp bảo vệ khó có dữ liệu chính xác trên thực tế. Đồng thời, các dây dẫn trong cáp sẽ có dạng xoắn ốc dọc theo chiều dài truyền tải. Do đó, để mô hình hóa hệ thống đa dây dẫn trong miền tần số một cách tối ưu, cần phải xét đến đặc tính truyền sóng điện từ trường dọc theo đường dây [3, 4, 7]. Hai hiện tượng đặc trưng của đường dây truyền tải trong miền tần số là hiệu ứng bề

mặt và hiệu ứng tác dụng lân cận phải được xác định một cách chi tiết khi xét đến ảnh hưởng của sóng điện từ trường lan truyền. Sự kết hợp đan xen trường điện từ trong hệ thống đa dây dẫn bất kỳ sẽ được mô hình hóa bằng các ma trận điện trở $[R]$, điện cảm $[L]$ và điện dung $[C]$ tương ứng [8, 9]. Bài báo giới thiệu phương pháp xác định tần số cộng hưởng của hệ thống dây dẫn nhiều sợi bất kỳ dựa vào sự kết hợp phương pháp đường dây dài và biến đổi Modal. Trước tiên bài báo áp dụng phương pháp nghiên cứu tính toán với một cấu hình cáp có sẵn kết quả đo để xác thực tính chính xác của mô hình. Sau đó, phương pháp nghiên cứu sẽ được áp dụng để xác định đặc tính tần số của một trường hợp dây dẫn nhiều sợi có cấu tạo phức tạp trong thực tế.

2. PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

2.1. Phương pháp đường dây dài

Phương pháp đường dây dài [10] là một phương pháp kinh điển để mô tả đường dây có kích thước lớn so với bước sóng lan truyền trong mạch. Đối với đường dây có kích thước nhỏ, có thể dùng mô hình thông số tập trung để biểu diễn. Tuy nhiên mô hình này sẽ không còn đúng với đường dây có chiều dài lớn, khi mà tại các điểm khác nhau trên cùng đường dây tại cùng một thời điểm, giá trị của dòng điện (hoặc điện áp) là khác nhau. Phương pháp đường dây dài sử dụng mô hình các thông số rải, coi như rải đều trên toàn bộ đường dây. Tại một điểm x trên đường dây ta xét một đoạn ngắn dx . Đoạn dx có thể được coi là một đường dây ngắn, có các thông số tập trung về một phần tử.



Hình 1. Mô hình một phần tử dx

Hai phương trình vi phân biểu diễn dòng và áp tại một vị trí bất kỳ trên đường dây:

$$\frac{dU(x)}{dx} = -\underline{Z} \cdot \underline{I}(x) \quad (1)$$

$$\frac{dI(x)}{dx} = -\underline{Y} \cdot \underline{U}(x) \quad (2)$$

Hai phương trình này cho phép xác định giá trị các dòng điện và các điện áp tại mọi điểm trên đường dây. Tuy nhiên việc giải hệ phương trình ma trận đối với một hệ thống đa dây dẫn bất kỳ là tương đối phức tạp. Phần tiếp theo của bài báo sẽ trình bày phương pháp biến đổi Modal để thực hiện việc giải thuật này.

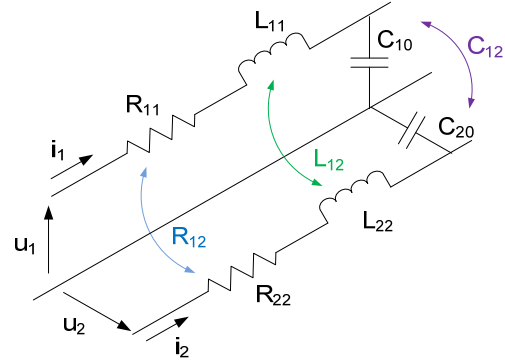
2.2. Phương pháp biến đổi Modal

Phương pháp biến đổi Modal sẽ đưa bài toán của hệ thống nghiên cứu từ n dây dẫn bất kỳ ban đầu về một tập hợp n bài toán nhỏ tương ứng với n dây dẫn đó và một dây dẫn làm mốc.

Xét trường hợp tổng quát, một hệ bao gồm n dây dẫn, điện áp và dòng điện trên mỗi dây tại vị trí bất kỳ được biểu diễn theo hai ma trận sau:

$$[\underline{U}(x)] = \begin{bmatrix} \underline{U}_1(x) \\ \underline{U}_2(x) \\ \dots \\ \underline{U}_n(x) \end{bmatrix} ; [\underline{I}(x)] = \begin{bmatrix} \underline{I}_1(x) \\ \underline{I}_2(x) \\ \dots \\ \underline{I}_n(x) \end{bmatrix}$$

Giữa các đường dây trong hệ thống luôn có quan hệ tương hỗ với nhau:



Hình 2. Mô hình biểu diễn mối quan hệ tương hỗ trong hệ thống hai dây dẫn

Phương trình ma trận của tổng trở và tổng dẫn lúc này:

$$[\underline{Z}] = [\underline{R}] + j\omega[\underline{L}] \quad (3)$$

$$[\underline{Y}] = [\underline{G}] + j\omega[\underline{C}] \quad (4)$$

Bài báo sẽ áp dụng phương pháp biến đổi Modal vào mô hình đường dây dài đã thành lập nhằm biến đổi các ma trận $[\underline{Z}]$ và $[\underline{Y}]$ về dạng ma trận đường chéo. Các điện áp $\underline{U}$ và dòng điện $\underline{I}$ được chuyển về dạng Modal tương ứng là $\underline{U}_m$, $\underline{I}_m$ bằng việc sử dụng các ma trận hệ số $[Q_u]$, $[Q_i]$. Các ma trận tổng trở $[\underline{Z}_m]$ và tổng dẫn $[\underline{Y}_m]$ lúc này sẽ trở thành ma trận đường chéo [2]:

$$[\underline{U}_m] = [Q_u]^{-1} \cdot [\underline{U}] \quad (5)$$

$$[\underline{I}_m] = [Q_i]^{-1} \cdot [\underline{I}] \quad (6)$$

$$[\underline{Z}_m] = [Q_u]^{-1} \cdot [\underline{Z}] \cdot [Q_i] \quad (7)$$

$$[\underline{Y}_m] = [Q_i]^{-1} \cdot [\underline{Y}] \cdot [Q_u] \quad (8)$$

Biến đổi tương đương hệ phương trình trên, tác giả thu được hai phương trình tổng quát để xác định các ma trận Q_u và Q_i :

$$([\underline{Z}].[\underline{Y}]).[Q_u] = [Q_u].([\underline{Z}_m].[\underline{Y}_m]) \quad (9)$$

$$([\underline{Y}].[\underline{Z}]).[Q_i] = [Q_i].([\underline{Y}_m].[\underline{Z}_m]) \quad (10)$$

Các giá trị Modal của tổng trở và tổng dẫn của đường dây được xác định dựa vào phương trình (7) và (8). Mỗi điện áp $\underline{U}_m$ tương ứng với duy nhất một dòng điện $\underline{I}_m$ và ngược lại bằng mối quan hệ (5) và (6). Kết quả thu được là một hệ gồm n hệ con độc lập tương ứng với đường dây nghiên cứu. Phương trình vi phân ma trận tổng quát của hệ thống lúc này có dạng:

$$\frac{d[\underline{U}_m(x)]}{dx} = -[\underline{Z}_m].[\underline{I}_m(x)] \quad (11)$$

$$\frac{d[\underline{I}_m(x)]}{dx} = -[\underline{Y}_m].[\underline{U}_m(x)] \quad (12)$$

Để tính toán được đặc tính của đường dây khi sóng chạy, ta cần xét đến ma trận truyền sóng. Ma trận truyền sóng $[\underline{A}_m]$ cho phép liên kết các đại lượng đầu vào và các đại lượng đầu ra, các đại lượng này bao gồm các dòng điện và điện áp sau biến đổi Modal. Với một hệ thống gồm n dây dẫn, ma trận truyền sóng $[\underline{A}_m]$ sẽ có kích thước $2n \times 2n$:

$$\underline{A}_m(l) = \begin{bmatrix} [\underline{A}_{m,1}]_{2 \times 2} & 0 & \dots & 0 & \dots & 0 \\ 0 & [\underline{A}_{m,2}]_{2 \times 2} & \dots & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & [\underline{A}_{m,k}]_{2 \times 2} & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & \dots & [\underline{A}_{m,n}]_{2 \times 2} \end{bmatrix}$$

Hình 3. Ma trận truyền sóng dạng tổng quát của hệ gồm n dây dẫn

Mỗi ma trận khối $[\underline{A}_{m,k}]_{2 \times 2}$ trong ma trận truyền sóng tổng quát chính là ma trận truyền sóng của dây dẫn thứ k trong hệ thống đa dây dẫn ban đầu.

$$\underline{A}_{m,k}(l) = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_{m,k}l) & -\underline{Z}_{c,k} \sinh(\gamma_{m,k}l) \\ -\underline{Y}_{c,k} \sinh(\gamma_{m,k}l) & \cosh(\gamma_{m,k}l) \end{bmatrix} \quad (13)$$

Trong đó:

k là bậc của dạng thức tính toán, tương ứng với dây dẫn thứ k trong hệ thống n dây dẫn nghiên cứu;

$\underline{Y}_{c,k} = \frac{1}{\underline{Z}_{c,k}}$ là tổng dẫn đặc trưng của

đường dây nghiên cứu, được xác định bằng cách lấy nghịch đảo tổng trở sóng $\underline{Z}_{c,k}$ của dây dẫn thứ k ;

$\underline{Z}_{c,k} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{m,k,k}}{\underline{Y}_{m,k,k}}}$ với $\underline{Z}_{m,k,k}, \underline{Y}_{m,k,k}$: là các

đại lượng tương ứng với các phần trên đường chéo chính tương ứng với dây dẫn thứ k trong ma trận tổng trở và tổng dẫn dưới dạng Modal $\underline{Z}_m$ và $\underline{Y}_m$

Hằng số truyền sóng, $\gamma_{m,k} = \sqrt{\underline{Z}_{m,k,k} \cdot \underline{Y}_{m,k,k}}$

Sau khi tính toán hệ thống đường dây dài trong môi trường Modal, kết quả thu được cần chuyển về dạng ban đầu $[\underline{A}(l)]$. Việc chuyển trạng thái này được thực hiện bằng ma trận biến đổi $[Q_{ui}]$ bằng cách kết hợp hai ma trận $[Q_u]$ và $[Q_i]$. Ma trận biến đổi sẽ có dạng tổng quát như sau:

	1	2	...	k	...	n	
$Q_{ui} =$	$[Q_{ui1}]_{2 \times 2}$	0	...	0	...	0	Mode 1 2 ... k ... n
	0	$[Q_{ui2}]_{2 \times 2}$	...	0	...	0	
	...	...	...	...	...	...	
	0	0	...	$[Q_{uik}]_{2 \times 2}$	...	0	
	...	...	...	...	...	...	
	0	0	...	0	...	$[Q_{uin}]_{2 \times 2}$	
	...	...	...	...	...	...	

Hình 4. Ma trận chuyển trạng thái dạng tổng quát của hệ thống gồm n dây dẫn

Ma trận chuyển trạng thái dạng tổng quát của hệ thống nghiên cứu sẽ bao gồm n ma

trận khối $[Q_{ui,k}]_{2 \times 2}$ được đặt trên đường chéo chính tương ứng với dây dẫn thứ k , có dạng:

$$[Q_{ui,k}] = \begin{bmatrix} Q_{u,k,k} & 0 \\ 0 & Q_{i,k,k} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Trong đó $Q_{u,k,k}$ và $Q_{i,k,k}$ lần lượt là các phần tử đường chéo bậc k tương ứng với dây dẫn thứ k trong các ma trận Q_u và Q_i . Nhờ đó, ma trận truyền sóng $[A(l)]$ của hệ ban đầu cần giải sẽ được xác định theo phương trình:

$$[A(l)] = [Q_{ui}] \cdot [A_m(l)] \cdot [Q_{ui}^{-1}] \quad (15)$$

Ma trận $[A(l)]$ cho phép xác định các đại lượng dòng điện và điện áp tại vị trí bất kỳ trên hệ thống đường dây nghiên cứu. Các đại lượng này phụ thuộc vào cấu hình, tính chất truyền sóng trên đường dây và các đại lượng điện đầu vào tại phía đầu đường dây. Tuy nhiên, các đại lượng điện đầu vào không phải lúc nào cũng lý tưởng và mô hình luôn phụ thuộc vào tải thực tế đặt ở phía cuối đường dây. Do đó, để tính toán một cách chính xác tác động lên hệ thống đa dây dẫn nghiên cứu cần phải tính đến sự kết nối phía đầu vào và đầu ra của hệ thống với nguồn và tải. Vì vậy, ma trận liên kết sẽ được đưa vào mô hình tính toán.

Ma trận liên kết

Hệ thống đường dây dài đa dây dẫn luôn được đặt trong điều kiện ràng buộc về điện khác nhau: các dòng điện và các điện áp tại nguồn đầu đường dây và tại tải cuối đường dây. Hơn nữa, các dây dẫn này có thể được kết nối với nguồn và tải theo những cách khác nhau: hở mạch, ngắn mạch, đầy tải,... Ma trận liên kết $[A(l)]$ mô tả đặc tính truyền sóng của hệ thống

đường dây dài nghiên cứu, đặc tính này không chỉ phụ thuộc vào cấu hình và vật liệu của đường dây mà còn phụ thuộc vào điều kiện kết nối thực tế ở phía đầu vào và đầu ra của đường dây.

Gọi $[\underline{X}^{in}]$ và $[\underline{X}^{out}]$ lần lượt là vector bao gồm các đại lượng điện (dòng điện và điện thế) của hệ thống ở phía đầu và phía cuối đường dây nghiên cứu. Mô tả cụ thể của hai vector này có dạng:

$$[\underline{X}^{in}] = \begin{bmatrix} \underline{V}_1^{in} \\ \underline{I}_1^{in} \\ \vdots \\ \underline{V}_n^{in} \\ \underline{I}_n^{in} \end{bmatrix} \quad \text{và} \quad [\underline{X}^{out}] = \begin{bmatrix} \underline{V}_1^{out} \\ \underline{I}_1^{out} \\ \vdots \\ \underline{V}_n^{out} \\ \underline{I}_n^{out} \end{bmatrix}$$

Gọi $[\underline{S}^{in}]$ và $[\underline{S}^{out}]$ lần lượt là vector điều kiện ràng buộc ở phía đầu (nguồn) và phía cuối (tải) của đường dây. Các vector tương ứng và có kích thước ma trận tương tự như các vector $[\underline{X}]$, đều là các ma trận có kích cỡ $2n$ với hệ thống n dây dẫn tổng quát.

Gọi $[\underline{C}^{in}]$ và $[\underline{C}^{out}]$ lần lượt là vector liên kết mô tả tính chất kết nối ở phía đầu và phía cuối của đường dây. Hai ma trận này kết hợp với các ma trận nguồn $[\underline{S}^{in}]$, $[\underline{S}^{out}]$ và ma trận đại lượng điện $[\underline{X}^{in}]$, $[\underline{X}^{out}]$ tạo thành hai phương trình tương ứng ở phía đầu và phía cuối đường dây như sau:

$$[\underline{C}^{in}]_{2n \times 2n} \cdot [\underline{X}^{in}]_{2n \times 1} = [\underline{S}^{in}]_{2n \times 1} \quad (16)$$

$$[\underline{C}^{out}]_{2n \times 2n} \cdot [\underline{X}^{out}]_{2n \times 1} = [\underline{S}^{out}]_{2n \times 1} \quad (17)$$

Các ma trận liên kết sẽ bao gồm các giá trị hằng số (0, 1, -1) tùy thuộc vào tính chất kết nối của dây dẫn thứ k tương ứng là: không kết nối (chỉ số 0); có kết nối và dòng chạy theo chiều quy ước (chỉ số 1); có kết nối và dòng chạy ngược chiều quy ước (chỉ số -1).

2.3. Giải hệ phương trình tổng quát

Ma trận truyền sóng liên kết giữa đại lượng đầu vào và đầu ra được biểu diễn theo phương trình:

$$[\underline{X}^{out}] = [\underline{A}][\underline{X}^{in}] \quad (18)$$

Từ các phương trình ma trận (16), (17) và (18), phương trình cần giải thu được:

$$\begin{pmatrix} [C^{in}] \\ [C^{out}].[A] \end{pmatrix} \cdot [\underline{X}^{in}] = \begin{pmatrix} [\underline{S}^{in}] \\ [\underline{S}^{out}] \end{pmatrix} \quad (19)$$

Để đơn giản trong tính toán, ta đặt ma trận bên trái $\begin{pmatrix} [C^{in}] \\ [C^{out}].[A] \end{pmatrix} = [B]$, phương trình trên trở thành:

$$[B] \cdot [\underline{X}^{in}] = [\underline{S}] \quad (20)$$

Việc giải phương trình trên khó khăn trong việc ma trận $[B]$ không phải ma trận vuông. Để đưa ma trận này về dạng vuông và đối xứng hóa hệ thống, ma trận chuyển vị $[B]^t$ sẽ được sử dụng. Phương trình cần giải lúc này trở thành:

$$[\underline{X}^{in}] = ([B]^t \cdot [B])^{-1} [B]^t [\underline{S}] \quad (21)$$

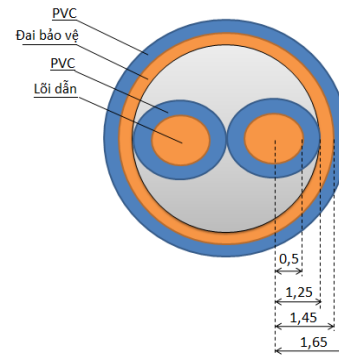
Giải phương trình tổng quát trên, ta thu được $[\underline{X}^{in}]$ qua đó xác định được giá trị tổng trở và tần số cộng hưởng của đường dây. Phương pháp nghiên cứu được tác giả thực hiện thông qua công cụ là phần mềm Matlab/Programing. Phần tiếp theo

của bài báo sẽ trình bày chi tiết áp dụng phương pháp tính toán trong những trường hợp có kết quả đo để xác thực tính chính xác của nội dung nghiên cứu.

3. KIỂM ĐỊNH PHƯƠNG PHÁP NGHIÊN CỨU

Để xác thực phương pháp nghiên cứu, bài báo sẽ áp dụng phương pháp được trình bày ở phần trên khi tính toán một trường hợp đơn giản, cấp hai lõi có đai bảo vệ, đã có kết quả đo để so sánh với kết quả tính toán theo phương pháp đề xuất.

3.1. Cấu hình nghiên cứu



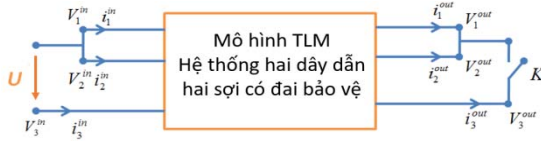
Hình 5. Cấu hình cáp hai lõi có đai bảo vệ (đơn vị mm)

Cáp nghiên cứu có cấu hình cụ thể gồm hai lõi dẫn tiết diện hình tròn, bán kính 0,5 mm và một lớp đai bảo vệ có độ dày 0,2 mm. Vật liệu sử dụng cho lõi dẫn và đai bảo vệ là đồng kỹ thuật điện, có độ dẫn điện $\sigma = 45,94 \text{ MS/m}$. Bọc xung quanh lõi dẫn và đai là các lớp cách điện PVC có bán kính và độ dày biểu diễn chi tiết như hình 5.

3.2. Áp dụng phương pháp nghiên cứu

Phương pháp nghiên cứu được đề xuất ở phần 2 sẽ được áp dụng tính toán cấu hình cáp với chiều dài 10 m ở chế độ hở mạch

(OC) và chế độ ngắn mạch (SC).



Hình 6. Cáp hai lõi có đại bảo vệ khi ngắn mạch và hở mạch cuối đường dây

Trên hình 6, chỉ số 1, 2, 3 lần lượt tương ứng với dây dẫn số 1, số 2 và đại bảo vệ. Trạng thái khóa K biểu diễn hai trường hợp nghiên cứu: K đóng/mở tương ứng trường hợp ngắn mạch/hở mạch phía cuối đường dây.

Vì hệ thống nghiên cứu gồm 03 miền dẫn nên sẽ tương ứng với 12 đại lượng điện bao gồm các điện thế và dòng điện ở đầu vào: $(\underline{V}_1, \underline{V}_2, \underline{V}_3, \underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_3)^{in}$ và ở đầu ra: $(\underline{V}_1, \underline{V}_2, \underline{V}_3, \underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_3)^{out}$. Tuy nhiên, vì nguồn áp đặt vào hai dây dẫn và đại bảo vệ được coi là mốc điện thế nên các giá trị $(\underline{V}_1, \underline{V}_2, \underline{V}_3)^{in}$ được coi là các hằng số đã biết. Do đó, hệ phương trình cần giải lúc này còn 9 ẩn nên bài toán lúc này đòi hỏi cần tìm thêm 9 phương trình. Sáu phương trình sẽ thu được từ mô hình đường dây dài của đường dây và ba phương trình còn lại được xác định nhờ mối liên kết nối đầu ra với tải tùy theo điều kiện cụ thể của trường hợp nghiên cứu.

Các đại lượng đầu vào và đầu ra được biểu diễn như sau:

$$[\underline{X}^{in}] = \begin{bmatrix} \underline{V}_1^{in} \\ \underline{I}_1^{in} \\ \underline{V}_2^{in} \\ \underline{I}_2^{in} \\ \underline{V}_3^{in} \\ \underline{I}_3^{in} \end{bmatrix}; [\underline{X}^{out}] = \begin{bmatrix} \underline{V}_1^{out} \\ \underline{I}_1^{out} \\ \underline{V}_2^{out} \\ \underline{I}_2^{out} \\ \underline{V}_3^{out} \\ \underline{I}_3^{out} \end{bmatrix}$$

Hai vector này được liên kết bởi ma trận truyền sóng $[\underline{A}]_{6 \times 6}$, ma trận này sẽ được xác định theo phương pháp ở chương trình (15) để rút ra phương trình ma trận cần giải là:

$$\begin{bmatrix} \underline{V}_1^{out} \\ \underline{I}_1^{out} \\ \underline{V}_2^{out} \\ \underline{I}_2^{out} \\ \underline{V}_3^{out} \\ \underline{I}_3^{out} \end{bmatrix} = [\underline{A}]_{6 \times 6} \cdot \begin{bmatrix} \underline{V}_1^{in} \\ \underline{I}_1^{in} \\ \underline{V}_2^{in} \\ \underline{I}_2^{in} \\ \underline{V}_3^{in} \\ \underline{I}_3^{in} \end{bmatrix} \quad (22)$$

Ràng buộc đầu vào:

Các điều kiện biên ràng buộc biểu diễn các đại lượng điện đặt vào hệ thống nghiên cứu phía đầu nguồn, cụ thể là:

$$\begin{cases} \underline{V}_1^{in} = \underline{V}_2^{in} = \underline{U} \\ \underline{V}_3^{in} = 0 \end{cases} \quad (23)$$

Ma trận kết nối đầu vào $[\underline{C}^{in}]$ biểu diễn điều kiện kết nối tương ứng với ràng buộc trên, cụ thể là:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{V}_1^{in} \\ \underline{I}_1^{in} \\ \underline{V}_2^{in} \\ \underline{I}_2^{in} \\ \underline{V}_3^{in} \\ \underline{I}_3^{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{U} \\ 0 \\ \underline{U} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

Ba giá trị dòng điện sẽ phụ thuộc vào công suất thực tế ở đầu nguồn.

Ràng buộc đầu ra:

Vì phía đầu ra của hệ thống nghiên cứu kết nối với tải, không phải nguồn nên ma trận nguồn phía cuối đường dây $[\underline{S}^{out}]$ phải bằng không. Hai ma trận kết nối được

thành lập tương ứng với hai trạng thái đóng/mở của khóa K.

Khi cuối đường dây nối ngắn mạch (K đóng), tổng ba dòng điện đầu ra sẽ bằng 0 và tất cả điện thế đầu ra sẽ cùng giá trị. Do vậy, ma trận kết nối của trường hợp này là:

$$\begin{cases} \underline{V}_1^{out} = \underline{V}_2^{out} = \underline{V}_3^{out} \\ \underline{I}_1^{out} + \underline{I}_2^{out} + \underline{I}_3^{out} = 0 \end{cases} \quad (25)$$

Do đó:

$$\underline{C}^{out} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (26)$$

Khi hở mạch cuối đường dây (K mở), tổng dòng điện ra trên hai dây dẫn bằng 0 và dòng điện ra ở giáp bảo vệ cũng bằng 0. Điện thế đầu ra của hai dây dẫn là như nhau. Ma trận kết nối của trường hợp này:

$$\begin{cases} \underline{I}_1^{out} + \underline{I}_2^{out} = 0 \\ \underline{V}_1^{out} = \underline{V}_2^{out} \\ \underline{I}_3^{out} = 0 \end{cases} \quad (27)$$

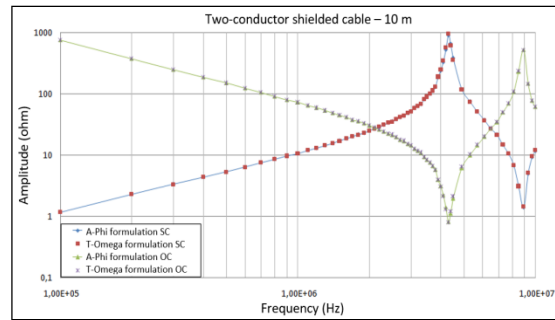
Do đó:

$$\underline{C}^{out} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

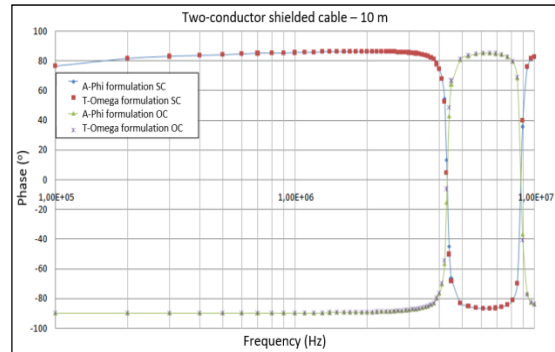
Phương trình tương ứng phía đầu ra của đường dây nghiên cứu lúc này:

$$\begin{bmatrix} \underline{C}^{out} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{V}_1^{out} \\ \underline{I}_1^{out} \\ \underline{V}_2^{out} \\ \underline{I}_2^{out} \\ \underline{V}_3^{out} \\ \underline{I}_3^{out} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{S}^{out} \end{bmatrix} \quad (29)$$

Giải hệ phương trình tổng quát, tổng trở thực tế biến đổi theo hàm tần số của hệ thống nghiên cứu sẽ được xác định.



Hình 7. Tổng trở tính toán trong trường hợp ngắn mạch và hở mạch hệ thống tại đầu ra



Hình 8. Góc pha tính toán trong trường hợp ngắn mạch và hở mạch hệ thống tại đầu ra

Ta nhận thấy tần số cộng hưởng thu được từ cả hai công thức $A-\varphi$ và $T-\Omega$ là rất tương đồng. Giá trị này khi so sánh với giá trị đo thu được [3], sai số chênh lệch dưới 4% giúp xác thực tính chính xác của phương pháp tính toán.

Bảng 1. So sánh kết quả tính toán và đo đặc tần số cộng hưởng

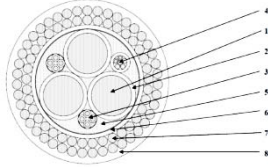
	Ngắn mạch		Hở mạch	
f (MHz)	f ₀₁	f ₀₂	f ₀₁	f ₀₂
A – φ	4,37	8,83	4,37	8,83
T – Ω	4,37	8,83	4,37	8,83
Đo đặc [3]	4,40	9,14	4,40	8,85
Sai số %	0,68	3,39	0,68	0,22

4. KẾT QUẢ NGHIÊN CỨU

4.1. Cấu hình cáp ba pha

Bài báo sẽ áp dụng phương pháp tính toán để nghiên cứu một cáp ba pha có cấu hình phức tạp trong thực tế.

Mỗi pha được cấu tạo từ 61 sợi dây đồng không bọc cách điện và một lớp bán dẫn cùng một lớp cách nhiệt XLPE được bọc quanh. Phía bên ngoài là lớp mút, đai bảo vệ bằng thép và ngoài cùng là lớp vỏ bảo vệ tác động vật lý.



No	Description	Material	Thickness (mm)	Diameter (mm)
1	Conductor 300mm ²	Copper, cable class 2 with longitudinal sealing	61 wires	20.8
2	Insulation	PRS XLPE	2.0	25.0
3	Assembly of 4 conductors 4mm ²	Copper, cable class 2 Insulation PRS XLPE	7 wires 0.7	2.55 4.01
4	Optical fibers	8 monomode fibers G652		
5	Jams	Polypropylen ropes		
6	Inner sheath	Sheath PEBD	2.2	59.9
7	Armor double layer	Galvanized steel wires	Diameter 5.0	79.9
8	Outer sheath	Sheath PEBD	3.2	86.3

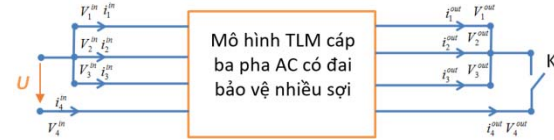
Hình 9. Cấu hình cáp ba pha nghiên cứu

4.2. Kết quả tính toán

Cấu hình kết nối của hệ thống nghiên cứu được biểu diễn theo mô hình ở hình 10 với tình trạng của khóa K tương ứng với trường hợp ngắn mạch và hở mạch đầu ra.

Trong đó, các chỉ số 1, 2 và 3 tương ứng

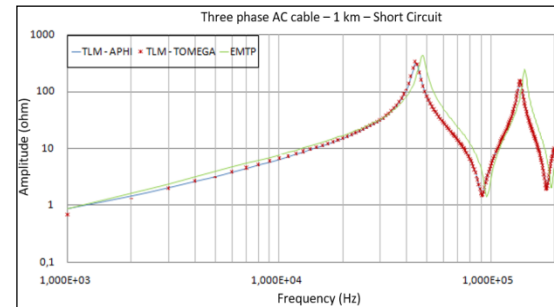
với ba lõi dẫn của ba pha và chỉ số 4 tương ứng với lớp giáp của cáp. Do vậy, bài toán sẽ có 16 đại lượng điện cần được xác định, đó là các giá trị dòng điện và điện áp trên từng lõi dẫn ở hai đầu đường dây, cụ thể là: ($\underline{V}_1, \underline{V}_2, \underline{V}_3, \underline{V}_4, \underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_3, \underline{I}_4$)ⁱⁿ và ($\underline{V}_1, \underline{V}_2, \underline{V}_3, \underline{V}_4, \underline{I}_1, \underline{I}_2, \underline{I}_3, \underline{I}_4$)ⁱⁿ.



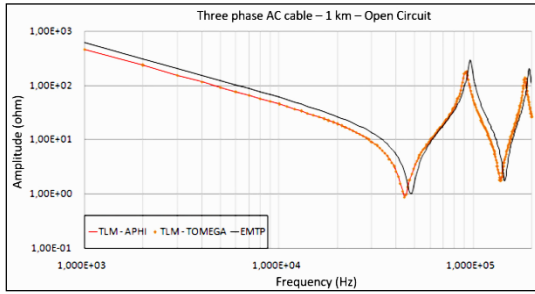
Hình 10. Sơ đồ kết nối của cáp ba pha nghiên cứu

Đối với phần nguồn, điện áp vào được đặt ở ba pha còn giáp bảo vệ được nối đất nên các điện thế ($\underline{V}_1, \underline{V}_2, \underline{V}_3, \underline{V}_4$)ⁱⁿ đã được xác định, vì vậy bài toán còn 12 ẩn cần tìm. Tám ẩn sẽ thu được nhờ vào tám phương trình đặc trưng đường dây dài của hệ thống và bốn phương trình còn lại được xác định nhờ vào điều kiện kết nối của hệ thống.

Bài báo sẽ áp dụng phương pháp nghiên cứu đã trình bày ở phần 2 để xác định tổng trở biến thiên và tần số cộng hưởng của hệ thống nghiên cứu. Vì cấu hình cáp ba pha có đai bảo vệ đang nghiên cứu chưa có công bố về kết quả đo tần số cộng hưởng nên bài báo sẽ so sánh kết quả tính toán theo phương pháp nghiên cứu với phương pháp thu được khi tính toán bằng phần mềm EMTP (hình 11, 12).



Hình 11. Tổng trở của cáp ba pha AC nghiên cứu khi ngắn mạch đầu ra



Hình 12. Tổng trở của cáp ba pha AC nghiên cứu khi hở mạch đầu ra

Kết quả thu được theo phương pháp nghiên cứu khi so sánh với với kết quả tính từ phần mềm thương mại EMTP có sai số chấp nhận được. Ưu điểm của phương pháp đề xuất là có thể tính toán với một hệ thống phức tạp bất kỳ trong khi phần mềm EMTP chỉ có thể tính toán với hệ thống đối xứng cố định.

Bảng 2. So sánh kết quả thu được từ phương pháp nghiên cứu và phần mềm EMTP - cáp ba pha có đai bảo vệ

	Ngắn mạch		Hở mạch	
f (MHz)	f_{01}	f_{02}	f_{01}	f_{02}
A – φ	44	91	44	91
T – Ω	44	91	44	91
EMTP	48	96	48	96
Sai số %	8,33	5,21	8,33	5,21

Kết quả thu được từ phương pháp nghiên cứu và thu được khi tính toán từ phần mềm EMTP có sai số lớn nhất là 8,33%. Sai số này lớn hơn giá trị trong trường hợp tính toán với cáp hai lõi và so sánh với kết quả đo đạc (4%). Điều này có thể giải thích là do cấu hình của cáp ba pha với đai bảo vệ từ 61 sợi dây dẫn (hình 9) phức tạp hơn nhiều cấu hình đơn giản của

cáp hai lõi có đai bảo vệ đã xét ở ví dụ trước (hình 5). Điều này dẫn đến việc mô phỏng tính toán sẽ xuất hiện những sai số nhất định.

5. KẾT LUẬN

Bài báo đã giới thiệu nghiên cứu xác định đặc tính tần số của một hệ đa dây dẫn dựa trên sự kết hợp của hai phương pháp đường dây dài và biến đổi Modal. Phương pháp nghiên cứu được thực hiện trên Matlab/programming và đã được áp dụng tính toán với một cấu hình cụ thể có sẵn kết quả đo để xác thực phương pháp. Sự chênh lệch <4% trong kết quả so sánh giúp kiểm định tốt phương pháp đề xuất.

Sau đó, các tác giả đã áp dụng phương pháp nghiên cứu để xây dựng mô hình tính toán tần số cộng hưởng của một cấu hình đường dây thực tế trong công nghiệp - cáp ba pha có đai bảo vệ nhiều sợi. Kết quả tính toán được so sánh với kết quả thu được khi sử dụng một phần mềm thương mại EMTP.

Mô hình - phương pháp tính toán hệ thống đa dây dẫn mang đến hai ý nghĩa nghiên cứu ứng dụng quan trọng: Thứ nhất, xây dựng được ma trận kết nối giữa phần tử (hệ thống đa dây dẫn nghiên cứu) và các nguồn đầu vào và đầu ra để giải một bài toán với các kết nối cụ thể bên ngoài dưới dạng ma trận; Thứ hai, dựa vào bộ thông số ma trận tính toán và phương pháp biến đổi đề xuất, có thể xác định được mô hình truyền sóng để xác định chính xác tần số cộng hưởng trên đường dây.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- [1] Joseph A. Edminnister, "Theory and Problems of Electromagnetics", Schaum's outline series McGraw-Hill, 1993.
- [2] N. Ida, J.P.A. Bastos, "Electromagnetics and Calculation of Fields", Springer-Verlag New York, 1999.

- [3] Y. Weens, N. Idir, R. Bausiere and J.J. Franchaud, "Modeling and simulation of unshielded and shielded energy cables in frequency and time domains", IEEE Transactions on Magnetics, Volume: 42, Issue: 7, p. 1876 - 1882, 2006.
- [4] H. De Gersem, A. Muetze, "Finite-Element supported transmission line models for calculating high frequency effects in machine windings", IEEE Transactions on Magnetics, Volume: 48, Issue: 2, p. 787-790, 2012.
- [5] Fabio Tossani, Fabio Napolitano, Alberto Borghetti, "New Integral Formulas for the Elements of the Transient Ground Resistance Matrix of Multiconductor Lines", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Volume: 59, Issue: 1, p 193-198, 2015.
- [6] Yan-zhao Xie, Jun Guo, Flavio G. Canavero, "Analytic Iterative Solution of Electromagnetic Pulse Coupling to Multiconductor Transmission Lines", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Volume: 55, Issue: 3, p 451-466, 2013.
- [7] Gaspard Lugrin, Sergey Tkachenko, Farhad Rachidi, Marcos Rubinstein, Rachid Cherkaoui, "High-Frequency Electromagnetic Coupling to Multiconductor Transmission Lines of Finite Length", IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, Volume: 57, Issue: 6, p 1714-1723, 2015.
- [8] Nguyen Duc Quang, "Study of electromagnetic behavior in multiconductor system by finite element method", EPU Journal of Science and Technology for Energy, Volume: 13, Issue: 3, 2017.
- [9] Nguyen Duc Quang, Tran Thanh Son, Dang Thu Huyen, Pham Manh Hai, Tran Anh Tung, "Electrostatic and Capacitive Analysis in Multiconductor System by Finite Element and Balance Energy Method: Application in 500kV Transmission Line North-South of Vietnam", The 18th International Conference on Environment and Electrical Engineering, June 2018, Palermo, Italy.
- [10] Robert A. Chipman, "Theory and problems of transmission lines", McGraw-Hill Book Company, 1968.

Giới thiệu tác giả:



Tác giả Nguyễn Đức Quang tốt nghiệp Trường Đại học Bách Khoa Hà Nội chuyên ngành hệ thống điện năm 2007; nhận bằng Thạc sĩ tại Trường Đại học Lille 1 năm 2009 và bằng Tiến sĩ chuyên ngành kỹ thuật điện tại Trường Đại học quốc gia Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Metiers Paristech, Cộng hòa Pháp năm 2013. Tác giả hiện là giảng viên Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực.

Lĩnh vực nghiên cứu: các phương pháp số trong nghiên cứu máy điện và hệ thống điện, tác động của trường điện từ tương hỗ, các nguồn năng lượng tái tạo.



Tác giả Trần Thanh Sơn tốt nghiệp Trường Đại học Bách khoa Hà Nội chuyên ngành hệ thống điện năm 2004; nhận bằng Thạc sĩ chuyên ngành kỹ thuật điện tại Trường Đại học Bách khoa Grenoble, Cộng hòa Pháp năm 2005; nhận bằng Tiến sĩ chuyên ngành kỹ thuật điện tại Trường Đại học Joseph Fourier, Cộng hòa Pháp năm 2008. Hiện nay tác giả là Trưởng Khoa Kỹ thuật điện, Trường Đại học Điện lực.

Lĩnh vực nghiên cứu: ứng dụng phương pháp số trong tính toán, mô phỏng trường điện từ, các bài toán tối ưu hóa trong hệ thống điện, lưới điện thông minh.



Tác giả Đặng Quốc Vương tốt nghiệp đại học và nhận bằng Thạc sĩ chuyên ngành kỹ thuật điện tại Trường Đại học Bách khoa Hà Nội vào năm 2002 và 2007; nhận bằng Tiến sĩ chuyên ngành kỹ thuật điện tại Trường Đại học Liege, Vương quốc Bỉ năm 2013. Hiện nay tác giả là giảng viên, Giám đốc Trung tâm Đào tạo thực hành kỹ thuật điện, Viện Điện, Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

Lĩnh vực nghiên cứu: mô hình hóa hệ thống điện từ sử dụng mô hình các bài toán nhỏ, ứng dụng phương pháp số tính toán ảnh hưởng của điện từ trường đến thiết bị điều khiển trong hệ thống điện.

