

ÁP DỤNG VÉCTƠ KHÔNG GIAN TRONG MÔ TẢ VÀ TÍNH TOÁN MẠCH ĐIỆN BA PHA

PGS. TS. Lê Công Thành¹, ThS. Nguyễn Thị Hiền¹, ThS. Võ Hồng Ngân¹

¹Trường đại học Công nghệ Đồng Nai

*Tác giả liên hệ: Lê Công Thành, th.lecong@gmail.com

THÔNG TIN CHUNG

Ngày nhận bài: 31/05/2023

Ngày nhận bài sửa: 14/07/2023

Ngày duyệt đăng: 21/09/2023

TỪ KHOA

Chuyển đổi phương thức;

Pha;

Pha không gian;

Hệ thống năng lượng.

TÓM TẮT

Nghiên cứu nhằm góp phần nâng cao hiệu lực và tính khái quát trong mô tả và tính toán hệ thống điện lực. Chuyển đổi modal được sử dụng để chuyển việc phân tích hệ thống có liên kết giữa các pha về phân tích những hệ thống một dây không liên kết. Áp dụng véctơ không gian cùng với chuyển đổi modal cho phép giải quyết vấn đề phân tích trong miền thời gian. Quan hệ toán học giữa véctơ modal, các thành phần đối xứng và véctơ không gian được làm rõ. Các phần tử chính của hệ thống điện cũng được mô tả trong môi trường véctơ không gian.

ABSTRACT

The study aims to improve the effectiveness and generalizability of the description and calculation of the power system. Modal conversion is used to convert the analysis of systems with phase interconnections to the analysis of unconnected single-wire systems. Using space phasors in combination with modal transformations allows the analysis of power systems in the time domain. The mathematical relations between the modal vector, the symmetry components and the space phasor are clarified. The main devices of the power system are also described in the space phasor environment.

1. GIỚI THIỆU

Lưới hệ thống điện ba pha là tổ hợp các phần cũng trở nên khó khăn.

ời hệ thống điện ba pha đối xứng thông qua một không đối xứng thì thường sử dụng các thành phần đối xứng để tính toán kỹ thuật.

ở biểu diễn phasor (giá trị phức hay vector pha) xác lập mạch điện ba pha vẫn thường sử dụng phương pháp điện áp nút và chỉ được thực hiện Cặp thông số modun- argument của mỗi phasor hoàn toàn xác định một đại lượng điện tương ứng ở tần số danh định. Việc xác định các giá trị tức xác lập và các hệ số tính toán kỹ thuật (cho trước

ả hai trường hợp tính toán vừa nêu đều dựa trên cơ

hoặc tra các tài liệu tính toán), ví dụ như hệ số xung kích cho tính toán ngắn mạch.

Để nghiên cứu, tính toán sâu hơn về quá độ của hệ thống điện, bên cạnh các chương trình chuyên dụng các phương pháp và công cụ tính số, thì vectơ không gian là một công cụ hỗ trợ cho việc các tác động của các giả thiết (hệ số) kỹ thuật.

Vai trò của các thành phần vectơ không gian trong khảo sát quá độ hoàn toàn tương ứng với vai trò của các thành phần đối xứng trong khảo sát xác lập. Các vectơ không gian này cho đến nay vẫn động điện.

2. PHÉP BIẾN ĐỔI PHƯƠNG THỨC

2.1. Ví dụ xem xét

tả đoạn đường dây 3 pha như Hình 1. Đoạn đường dây được giả thiết là đối xứng có các thành phần đ

i
ệ

n Phương trình mô tả đoạn đường dây có dạng

$$\text{ở} \quad L\dot{i}'_L + R\dot{i}_L = \Delta u_L \quad (1)$$

trong đó:

$$\text{đ} \quad L = \begin{bmatrix} L_t & L_h & L_h \\ L_h & L_t & L_h \\ L_h & L_h & L_t \end{bmatrix}; R = \begin{bmatrix} R_t & R_h & R_h \\ R_h & R_t & R_h \\ R_h & R_h & R_t \end{bmatrix}$$

i

ệ

lần lượt là ma trận điện cảm và ma trận điện trở và

$$\text{h} \quad \dot{i}_L = \begin{bmatrix} i_{L1} \\ i_{L2} \\ i_{L3} \end{bmatrix}; \Delta u_L = \begin{bmatrix} \Delta u_{L1} \\ \Delta u_{L2} \\ \Delta u_{L3} \end{bmatrix} \quad (2)$$

c

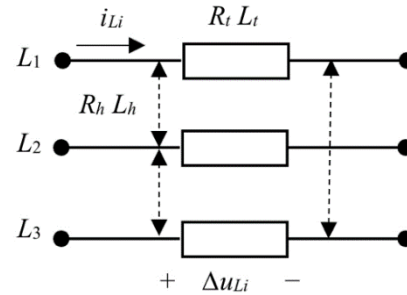
ả

m

v

à

lần lượt là ma trận dòng điện và ma trận điện áp của đoạn đường dây.



Hình 1. Đường dây ba pha

Rõ ràng là trong hệ thống xét, điện áp trên một pha không chỉ phụ thuộc vào dòng điện của chính pha đó mà còn phụ thuộc vào dòng điện của các pha còn lại.

2.2. Biến đổi phương thức

phương trình mô tả (1) các quan hệ liên kết giữa các pha gây khó khăn cho việc khảo sát, tính toán. Để tháo gỡ khó khăn này người ta áp dụng phép (1) về biểu diễn phân li theo các đại lượng modal (chỉ số m). Khi đó, các đại lượng modal này sẽ

ến đổi modal, các đại lượng điện ba pha của đường x_L sẽ được biểu diễn qua các đại lượng modal x_m tương ứng theo

$$x_L = T_m x_m \quad (3)$$

trong đó:

$$T_m = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

lần chuyển đổi xác định bởi phương trình (4) cũng ạn chuyển đổi.

$$x_m = T_m^{-1} x_L \quad (5)$$

Với mạch điện đề cập, sử dụng phương trình (3) để đưa phương trình (1) về biểu diễn qua các đại lượng modal

$$L T_m \dot{i}'_m + R T_m \dot{i}_m = T_m \Delta u_m \quad (6)$$

Nếu mạch điện ba pha ở chế độ xác lập điều hòa đại lượng cần tính. Trong trường hợp này, các thành phần đối xứng sẽ đóng vai trò đại lượng modal một cách hiệu quả.

Biến đổi modal lúc này có dạng

$$\underline{X}_L = \underline{T}_S \underline{X}_S \quad (17)$$

và biến đổi ngược

$$\underline{X}_S = \underline{T}_S^{-1} \underline{X}_L \quad (18)$$

Trường hợp này, ma trận chuyển đổi vẫn có dạng như phương trình (14) với các hệ số k đều bằng đơn vị.

$$\underline{T}_S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

Ma trận thành phần đối xứng có dạng

$$\underline{X}_S = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

Các thành phần đối xứng X_1 , X_2 và X_0 lần lượt là

$$\underline{X}_L = \underline{X}_{1L} + \underline{X}_{2L} + \underline{X}_{0L} \quad (21)$$

Hay ở dạng đầy đủ

$$\begin{bmatrix} X_{L1} \\ X_{L2} \\ X_{L3} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ \underline{a}^2 X_1 \\ \underline{a} X_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_2 \\ \underline{a} X_2 \\ \underline{a}^2 X_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_0 \\ X_0 \\ X_0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

Với đường dây ba pha trong ví dụ, áp dụng thành phần đối xứng cho phương trình (16), chú ý là các đại lượng điện trở của pha đối (số phức) và phép đạo hàm được thay bằng nhân với $j\omega$

$$j\omega \begin{bmatrix} L_1 & & \\ & L_2 & \\ & & L_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_1 & & \\ & R_2 & \\ & & R_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta U_0 \end{bmatrix} \quad (23)$$

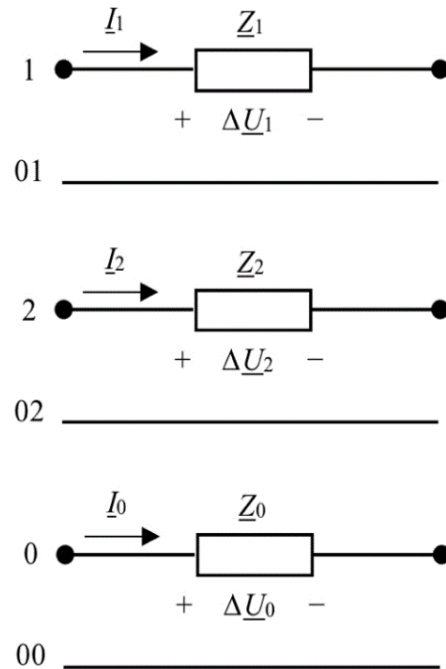
Với $Z_i = R_i + j\omega L_i$; $i = 1, 2, 0$, phương trình (23) trở thành quan hệ quen thuộc

$$\begin{bmatrix} Z_1 & & \\ & Z_2 & \\ & & Z_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \\ \Delta U_0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

hay dưới dạng gọn hơn

$$\underline{Z}_S \underline{I}_S = \underline{\Delta U}_S \quad (25)$$

ạch điện thay thế với các thành phần đối xứng được



Hình 3. Mạch điện thay thế với các thành phần đối xứng cho đường dây ba pha

2.3. Vectơ không gian

$$\underline{x}_L = \underline{T}_K \underline{x}_K \quad (26)$$

hay ở dạng chi tiết

K (chỉ số K kí hiệu cho vector không gian) và giá

$$\begin{bmatrix} x_{L1} \\ x_{L2} \\ x_{L3} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \underline{a}^2 & \underline{a} & 1 \\ \underline{a} & \underline{a}^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{x}_K \\ \underline{x}_K^* \\ x_0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

trong đó:

$$\underline{x}_L = \begin{bmatrix} x_{L1} \\ x_{L2} \\ x_{L3} \end{bmatrix}; \underline{x}_K = \begin{bmatrix} \underline{x}_K \\ \underline{x}_K^* \\ x_0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

Các đại lượng modal lúc này là thành phần vector không gian \underline{x}_K , thành phần vector không gian phức liên hợp \underline{x}_K^* và thành phần hệ thống không (zero) kép x_0 .

Phép biến đổi ngược với mô tả ở phương trình (26)

$$\underline{x}_K = \underline{T}_K^{-1} \underline{x}_L \quad (29)$$

ạch điện ví dụ sẽ được mô tả thông qua các véctơ

$$\underline{L}_m \underline{i}'_K + \underline{R}_m \underline{i}_K = \underline{\Delta u}_K \quad (30)$$

Hay ở dạng chi tiết

$$\begin{bmatrix} L_1 & & \\ & L_2 & \\ & & L_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{i}'_K \\ \underline{i}'_K^* \\ \underline{i}'_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_1 & & \\ & R_2 & \\ & & R_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{i}_K \\ \underline{i}_K^* \\ \underline{i}_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{\Delta u}_K \\ \underline{\Delta u}_K^* \\ \underline{\Delta u}_h \end{bmatrix} \quad (31)$$

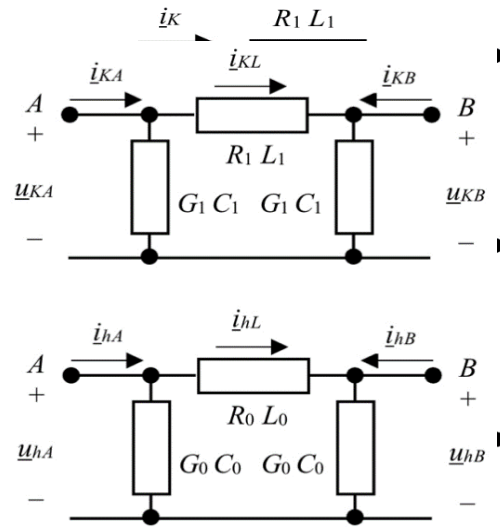
Mạch điện được chuyển về biểu diễn phân ly như Hình 4.

Hình 4. Mạch điện thay thế với véctơ không gian cho đường dây ba pha

3. MÔ TẢ CÁC PHẦN TỬ CHÍNH CỦA HỆ THỐNG ĐIỆN NHỜ VÉCTƠ KHÔNG GIAN

3.1. Đường dây ba pha

Đường dây điện lực thường được biểu diễn bằng các kết hợp các phần tử đường dây mang tính điện cảm và các phần tử đường dây mang tính điện dung trong sơ đồ hình T hoặc hình Π tùy mục đích sử dụng.



Hình 5. Mạch điện thay thế hình Π với véctơ không gian cho đường dây

Sơ đồ hình Π được trình bày ở Hình 5 (Kundur, 1994; Oswald, 2009).

Phương trình Kirchhoff dòng viết cho nút A

$$\begin{bmatrix} \underline{i}_{KA} \\ \underline{i}_{KA}^* \\ \underline{i}_{hA} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1 & & \\ & G_2 & \\ & & G_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{u}_{KA} \\ \underline{u}_{KA}^* \\ \underline{u}_{hA} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 & & \\ & C_2 & \\ & & C_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{u}'_{KA} \\ \underline{u}'_{KA}^* \\ \underline{u}'_{hA} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{i}_{KL} \\ \underline{i}_{KL}^* \\ \underline{i}_{hL} \end{bmatrix} \quad (32)$$

Tương tự ta viết được phương trình Kirchhoff dòng cho nút B

$$\begin{bmatrix} \underline{i}_{KB} \\ \underline{i}_{KB}^* \\ \underline{i}_{hB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_1 & & \\ & G_2 & \\ & & G_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{u}_{KB} \\ \underline{u}_{KB}^* \\ \underline{u}_{hB} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_1 & & \\ & C_2 & \\ & & C_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{u}'_{KB} \\ \underline{u}'_{KB}^* \\ \underline{u}'_{hB} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \underline{i}_{KL} \\ \underline{i}_{KL}^* \\ \underline{i}_{hL} \end{bmatrix} \quad (33)$$

Phương trình (32) và (33) có thể viết ở dạng gọn hơn

$$\begin{bmatrix} \underline{i}_{KA} \\ \underline{i}_{KB} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{G}_K & \\ & \underline{G}_K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{u}_{KA} \\ \underline{u}_{KB} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{C}_K & \\ & \underline{C}_K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{u}'_{KA} \\ \underline{u}'_{KB} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{i}_{KL} \\ -\underline{i}_{KL} \end{bmatrix} \quad (34)$$

Phương trình viết cho dòng điện qua phần tử dọc của đường dây

$$\underline{i}'_{KL} = -\mathbf{L}_K^{-1} \mathbf{R}_K \underline{i}_{KL} + \mathbf{L}_K^{-1} (\underline{u}_{KA} - \underline{u}_{KB}) \quad (35)$$

Trong các phương trình trên đã sử dụng các kí hiệu

$$\mathbf{G}_K = \begin{bmatrix} G_1 & & \\ & G_2 & \\ & & G_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_t + 3G_h & & \\ & G_t + 3G_h & \\ & & G_h \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$\mathbf{C}_K = \begin{bmatrix} C_1 & & \\ & C_2 & \\ & & C_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_t + 3C_h & & \\ & C_t + 3C_h & \\ & & C_h \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$\mathbf{R}_K = \begin{bmatrix} R_1 & & \\ & R_2 & \\ & & R_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_t - R_h & & \\ & R_L - R_h & \\ & & R_t + 2R_h \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$\mathbf{L}_K = \begin{bmatrix} L_1 & & \\ & L_2 & \\ & & L_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_t - L_h & & \\ & L_t - L_h & \\ & & L_t + 2L_h \end{bmatrix} \quad (39)$$

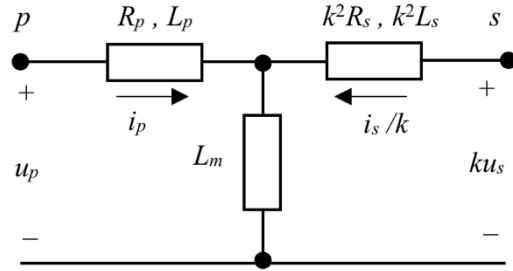
ành R_t, R_h, L_t và L_h được giải thích ở hình 1. Các ành G_t, G_h, C_t và C_h là các thông số điện dẫn và điện dung giữa các dây pha với đất (chỉ số t) và với nhau (chỉ số h).

Hệ phương trình (34) (35) mô tả đường dây điện lực với vectơ không gian theo sơ đồ thay thế

Sơ đồ hình T và sơ đồ hình II có giá trị sử dụng tương đương nhau. Các phần tử của hai sơ đồ cũng mô tả chính xác hơn, có thể sử dụng sơ đồ xâu chuỗi nhiều sơ đồ hình T hoặc II. Tuy nhiên, có thể sử dụng sơ đồ hình II cho hầu hết các trường

3.2. Máy biến áp ba pha

Sau khi loại bỏ phần tử máy biến áp lý tưởng, thì mạch điện thay thế một pha cho máy biến áp hai cuộn dây được biểu diễn ở Hình 6 (Kundur,



1994).

Hình 6. Mạch điện thay thế hình T sau khi đã loại bỏ máy biến áp lý tưởng

ẽ thì R_p, L_p và R_s, L_s lần lượt là điện trở và điện cảm, điện áp sơ và thứ cấp được ký hiệu bằng các (điện cảm chính) là L_m và tỉ số vòng dây sơ cấp và thứ cấp là k . ết phương trình cho điện áp sơ cấp và thứ cấp ta được

$$\begin{bmatrix} L_p + L_m & L_m \\ L_m & k^2(L_s + L_m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_p \\ i'_s/k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_p & 0 \\ 0 & k^2 R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_p \\ i_s/k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_p \\ k u_s \end{bmatrix} \quad (40)$$

ời máy biến áp ba pha hai cuộn dây, phương trình (40) vẫn có hiệu lực chỉ khác là quy mô sẽ được mở rộng thành 6 phương trình đơn.

Tiếp tục áp dụng chuyển đổi modal, có thể đưa phương trình (40) về dạng vectơ không gian.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{L}_{Kp} & \mathbf{L}_{Km} \\ \mathbf{L}_{Km} & k^2 \mathbf{L}_{Ks} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{i}'_{Kp} \\ \underline{i}'_{Ks}/k \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{R}_{Kp} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & k^2 \mathbf{R}_{Ks} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{i}_{Kp} \\ \underline{i}_{Ks}/k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{u}_{Kp} \\ k \underline{u}_{Ks} \end{bmatrix} \quad (41)$$

Trong đó

$$\mathbf{L}_{Kp} = \begin{bmatrix} L_{1p} & & \\ & L_{2p} & \\ & & L_{0p} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{L}_{Km} = \begin{bmatrix} L_{1m} & & \\ & L_{2m} & \\ & & L_{0m} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_{Kp} = \begin{bmatrix} R_{1p} & & \\ & R_{2p} & \\ & & R_{0p} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{R}_{Ks} = \begin{bmatrix} R_{1s} & & \\ & R_{2s} & \\ & & R_{0s} \end{bmatrix}$$

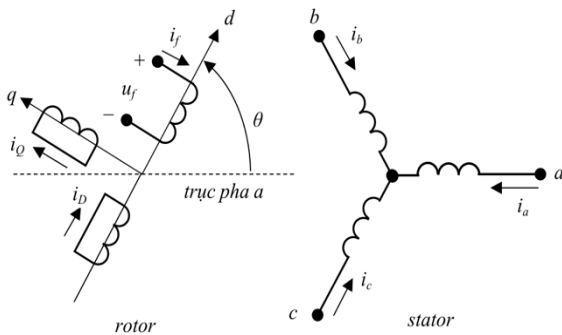
$$\begin{aligned} \underline{\dot{i}}_{Kp} &= \begin{bmatrix} \dot{i}_{Kp} \\ \dot{i}_{Kq} \\ \dot{i}_{hp} \end{bmatrix}; \underline{\dot{i}}_{Kp} = \begin{bmatrix} \dot{i}_{Ks} \\ \dot{i}_{Ks}^* \\ \dot{i}_{hs} \end{bmatrix} \\ \underline{u}_{Kp} &= \begin{bmatrix} u_{Kp} \\ u_{Kq} \\ u_{hp} \end{bmatrix}; \underline{u}_{Kp} = \begin{bmatrix} u_{Ks} \\ u_{Ks}^* \\ u_{hs} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (42)$$

Mô hình theo phương trình (41) lập cho các đại lượng của các cuộn dây. Mô hình máy biến áp ba pha cần thiết lập cho các đại lượng đầu cực, tức là còn phải xét yếu tố tổ đấu dây. Cách thức trực tiếp thường được sử dụng là bổ sung thêm ma trận tổ nối dây \underline{K}_n vào mô hình cơ sở theo phương trình (41) (Oswald, 2009).

3.3. Máy điện đồng bộ

Máy điện đồng bộ đã được nghiên cứu và mô hình hóa một từ rất sớm theo hướng vectơ không gian (Park, 1929, 1933).

Hệ trục $dq0$ cho máy điện đồng bộ được thiết lập như trong Hình 7.



Hình 7. Các mạch điện cuộn dây và hệ trục tham chiếu của máy điện đồng bộ

Mô hình của máy điện đồng bộ với các đại lượng tương đối định mức trong hệ $dq0$ có dạng (Kundur, 1994).

Phương trình điện áp stator

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_1 & & \\ & R_1 & \\ & & R_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & -\omega_r & 0 \\ \omega_r & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \end{bmatrix} \quad (43)$$

Phương trình điện áp rotor

$$\begin{bmatrix} u_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_f & & \\ & R_D & \\ & & R_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} \quad (44)$$

Phương trình từ thông móc vòng stator

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & & \\ & L_q & \\ & & L_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{ad} & L_{ad} & 0 \\ 0 & 0 & L_{aq} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (45)$$

Phương trình từ thông móc vòng rotor

$$\begin{bmatrix} \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_f & L_{fd} & 0 \\ L_{fd} & L_D & 0 \\ 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{ad} & 0 & 0 \\ L_{ad} & 0 & 0 \\ 0 & L_{aq} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (46)$$

Mô men điện từ

$$T_e = \psi_d i_q - \psi_q i_d \quad (47)$$

Phương trình chuyển động

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -K_D & 0 \\ \omega_0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta\omega_r \\ \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} (T_M - T_e)/2H \\ 0 \end{bmatrix} \quad (48)$$

Chú ý rằng các đại lượng đề cập ở mô hình mô tả ở các phương trình từ (43) đến (48) đều là các đại lượng tương đối định mức. Các điện cảm tương đối được quy đổi để bảo đảm tính thuận nghịch và tính thống nhất trên một trục. Chẳng hạn:

- Hồ cảm giữa stator và cuộn kích thích cũng bằng hồ cảm giữa cuộn kích thích và stator (thuận nghịch);

- Hồ cảm giữa stator và cuộn kích thích cũng bằng hồ cảm giữa stator và cuộn dọc trục (thống nhất trên mỗi trục).

- Điện cảm dọc/ngang trục $L_d; L_q$ bao gồm hồ cảm dọc/ngang trục $L_{ad}; L_{aq}$ và điện cảm tản (hai trục như nhau).

Trong các phương trình từ (43) đến (48) cần thiết phải khử các đại lượng khó tiếp cận để biểu diễn chỉ bằng các đại lượng đầu cực. Các dòng điện trong các mạch rotor sẽ được khử khỏi hệ phương trình mô tả để được phương trình điện áp stator

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d'' & & \\ & L_q'' & \\ & & L_0 \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_a & -\omega_r L_q'' & 0 \\ \omega_r L_d'' & R_a & 0 \\ 0 & 0 & R_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_d'' \\ u_q'' \\ 0 \end{bmatrix} \quad (49)$$

Trong đó: $L_d''; L_q''$ – Điện cảm siêu quá độ dọc và ngang trục; $u_d''; u_q''$ – điện áp siêu quá độ dọc và ngang trục.

Để chuyển hệ phương trình mô tả máy điện đồng bộ từ hệ trục $dq0$ sang vectơ không gian trong hệ tọa độ quay ta chú ý đến quan hệ

$$\begin{bmatrix} x_K \\ x_K^* \\ x_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & j & 0 \\ 1 & -j & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_0 \end{bmatrix} \quad (50)$$

Nếu có thể bỏ qua được sự khác biệt giữa điện kháng siêu quá độ dọc trục và ngang trục ta thu được biểu diễn dạng vectơ không gian trên hệ quay rotor (Oswald, 2009).

$$\begin{bmatrix} u_K \\ u_K^* \\ u_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d'' & & \\ & L_q'' & \\ & & L_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_K \\ \dot{i}_K^* \\ \dot{i}_h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_a + j\omega_r L_d'' & 0 & 0 \\ 0 & R_a - j\omega_r L_d'' & 0 \\ 0 & 0 & R_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_K \\ \dot{i}_K^* \\ \dot{i}_h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_K'' \\ u_K''^* \\ 0 \end{bmatrix} \quad (51)$$

Để dàng chuyển mô hình sang biểu diễn trên hệ stator (kí hiệu bằng chỉ số s) (Oswald, 2009).

$$\begin{bmatrix} \underline{u}_s \\ \underline{u}_s^* \\ u_h \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d'' & & \\ & L_q'' & \\ & & L_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_s' \\ \dot{i}_s'^* \\ \dot{i}_h' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_a & 0 \\ 0 & 0 & R_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_K \\ \dot{i}_K^* \\ \dot{i}_h \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \underline{u}_s'' \\ \underline{u}_s''^* \\ 0 \end{bmatrix} \quad (52)$$

4. KẾT LUẬN VÀ THẢO LUẬN

Biến đổi modal vốn ban đầu chỉ dùng trong lĩnh vực điều khiển. Ngày nay với sự phát triển mạnh mẽ của kỹ thuật tính toán, biến đổi modal cũng được ứng dụng hiệu quả để mô hình hóa và tính toán phân li cho nhiều hệ thống kỹ thuật khác.

Vectơ không gian, có cùng cơ sở toán học với các thành phần đối xứng đều là những trường hợp đặc biệt của đại lượng modal. Do vậy, áp dụng vectơ không gian một mặt sẽ cho phép tiếp thu hầu hết ưu điểm của phương pháp các thành phần đối xứng quen thuộc, mặt khác lại mở rộng được hiệu lực khảo sát sang cả miền thời gian.

Áp dụng vectơ không gian cho hệ thống điện không quá phức tạp (1-2 máy, ít phần tử, thông số tập trung) cho khả năng:

- Mô tả hệ thống điện một cách khái quát hơn, gọn gàng hơn so với mô tả tức thời;
- Khảo sát, đánh giá tác động của các giả thiết, các hệ số tính toán khi phân tích quá độ hệ thống điện;
- Tạo kết quả đối sánh cho kết quả tính bằng phần mềm chuyên dụng hoặc/và các công cụ tính toán số;
- Hỗ trợ cho công tác nghiên cứu và đào tạo trong các trường đại học theo hướng chuyên sâu về hệ thống điện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

- Kundur, P. (1994). *Power system stability and control*. NY, McGraw-Hill, Inc.
- Oswald, B. R. (2009). *Berechnung von Drehstromnetzen*. Wiesbaden, Vieweg+Teubner.
- Park, R. H. (1929) Two-reaction theory of

synchronous machines, part I. *AIEE Trans., part I, Vol. 48, 716-730.*

Park, R. H. (1933) Two-reaction theory of synchronous machines, part II. *AIEE Trans., part II, Vol. 52, 352-355.*