

# KHẢO SÁT VỀ DÒNG THỨ TỰ NGHỊCH

## Giới thiệu

Việc phân tích các thành phần thứ tự giữ một vai trò quan trọng trong việc phân tích các sự cố trên lưới và giải thích được một số hiện tượng trên hệ thống điện. Việc phân tích này quan trọng vì dòng điện thứ tự nghịch có thể gây ra hư hỏng trên rô-tô, mà những hư hỏng này rất có hại cho các thiết bị điện quay như động cơ và máy phát.

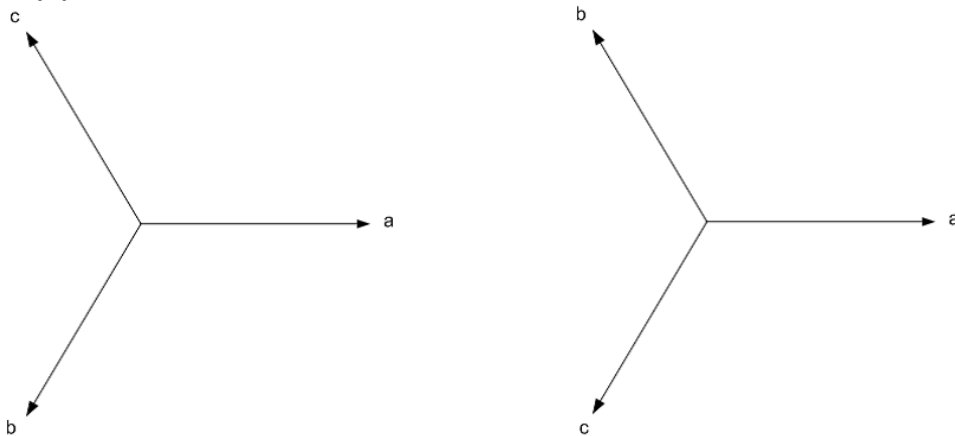
Bài viết *Tutorial of the Protection of Synchronous Generators* (95 TP 102) đăng trên *IEEE* có một tuyên bố rằng "tại thời điểm mất cân bằng, sẽ tạo ra dòng điện thứ tự nghịch. Dòng điện thành phần thứ tự nghịch này quay ngược chiều với chiều quay của rô-tô". Tuyên bố này chưa hoàn toàn chính xác. Các dòng điện thành phần thứ tự thuận, thứ tự nghịch và thứ tự không phối hợp tuyến tính với dòng điện pha; như vậy, véc-tơ của mỗi dòng điện thành phần sẽ quay cùng chiều với dòng điện pha. (Xem lời bàn của người dịch, trang cuối)

Thông thường góc pha được so với một véc-tơ chuẩn và chiều quay pha của vectơ thứ tự nghịch thường được bỏ qua. Trong bài viết *Standard for Synchrophasors for Power Systems*(C37.118-2005) của *IEEE*, góc pha tuyệt đối cũng bị bỏ qua. Có thể đánh giá là để làm rõ chiều của dòng điện thứ tự nghịch nhằm tránh những rối loạn điện thế trong máy đo đồng bộ pha.

Trước hết, trang này giới thiệu về nguyên lý của các thành phần thứ tự. Sau đó sẽ giải thích tất cả các thành phần đều quay cùng chiều với nhau. Trong máy điện quay, véc-tơ dòng điện thứ tự nghịch quay cùng chiều quay với rô-tô. Vấn đề là từ thông do dòng điện thứ tự nghịch tạo ra mới quay ngược chiều với rô-tô. Như vậy rô-tô sẽ cắt ngang từ thông này với tốc độ gấp đôi tốc độ đồng bộ và sinh ra dòng điện xoáy cảm ứng trên rô-tô với tần số gấp đôi tần số lưới.

### I. Góc quay pha

Trong một hệ thống điện, góc quay pha được xác định như là một phạm vi của hệ thống 3 pha cân bằng. Trên một hệ thống 3 pha cân bằng, các pha  $a$ ,  $b$ ,  $c$  có biên độ bằng nhau, và lệch pha với nhau  $120^\circ$ . Nếu pha  $a$  vượt trước pha  $b$   $120^\circ$  và pha  $b$  vượt trước pha  $c$   $120^\circ$ , thì hệ thống này có chiều quay  $abc$ . Nếu pha  $a$  trễ sau pha  $b$   $120^\circ$  và pha  $b$  trễ sau pha  $c$   $120^\circ$ , hệ thống này có chiều quay  $acb$ . Các véc-tơ chỉ thị chiều quay pha được vẽ trên hình 1.



Chiều quay pha *abc*

Chiều quay pha *acb*

**Hình 1.** Chiều quay pha

## II. Khái niệm về các thành phần thứ tự

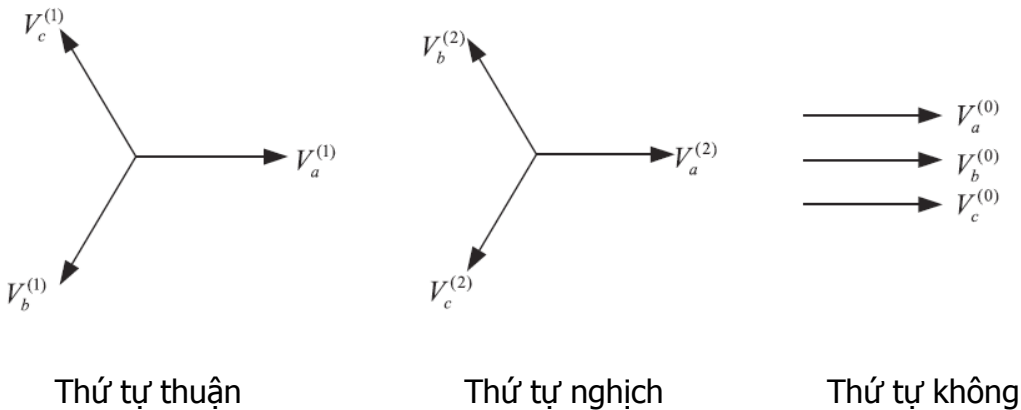
Các thành phần thứ tự, hay còn gọi là các thành phần đối xứng được C. L. Fortescue giới thiệu cách đây một thế kỷ. Trong phần này chúng ta sẽ xem xét nguyên lý của các thành phần thứ tự <sup>[1]</sup> <sup>[2]</sup>.

### 2.1 Định nghĩa các thành phần thứ tự

Trong phương pháp phân tích các thành phần đối xứng, các véc-tơ 3 pha không cân bằng ta định nghĩa

- Thành phần thứ tự thuận bao gồm 3 véc-tơ điện áp, ký hiệu là  $V_a^{(1)}, V_b^{(1)}, V_c^{(1)}$ , có biên độ bằng nhau, lệch nhau một góc  $120^\circ$ , và  $V_a^{(1)}$  vượt trước  $V_b^{(1)}$   $120^\circ$ ,  $V_b^{(1)}$  vượt trước  $V_c^{(1)}$   $120^\circ$ .
- Thành phần thứ tự nghịch bao gồm 3 véc-tơ điện áp ký hiệu là  $V_a^{(2)}, V_b^{(2)}, V_c^{(2)}$ , có biên độ bằng nhau, lệch nhau một góc  $120^\circ$ , và  $V_a^{(2)}$  chậm sau  $V_b^{(2)}$   $120^\circ$ ,  $V_b^{(2)}$  chậm sau  $V_c^{(2)}$   $120^\circ$ .
- Thành phần thứ tự không bao gồm 3 véc-tơ điện áp, ký hiệu là  $V_a^{(0)}, V_b^{(0)}, V_c^{(0)}$ , có biên độ bằng nhau và không lệch pha với nhau.

Hình 2 thể hiện định nghĩa các thành phần bằng đồ họa.



**Hình 2.** Định nghĩa các véc-tơ thành phần

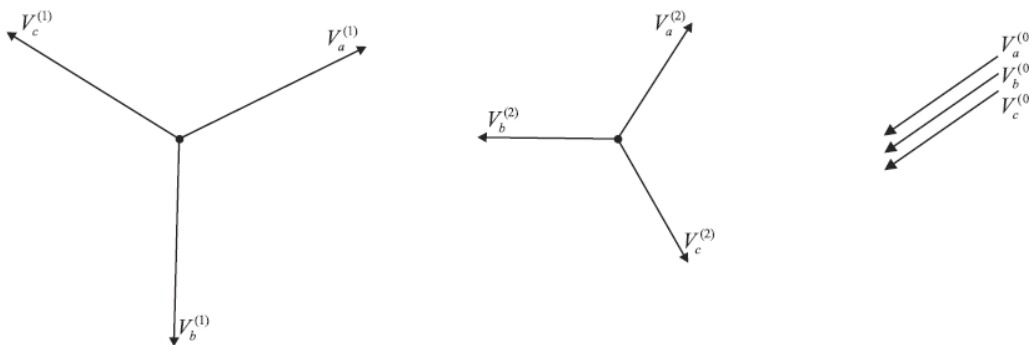
Trong một hệ thống có chiều quay pha *acb*, định nghĩa về thành phần thứ tự thuận và thứ tự nghịch sẽ hoán chuyển, nghĩa là:

- Thành phần thứ tự thuận bao gồm 3 véc-tơ điện áp, ký hiệu là  $V_a^{(1)}, V_b^{(1)}, V_c^{(1)}$ , có biên độ bằng nhau, lệch nhau một góc  $120^\circ$ , và  $V_a^{(1)}$  chậm sau  $V_b^{(1)}$   $120^\circ$ ,  $V_b^{(1)}$  chậm sau  $V_c^{(1)}$   $120^\circ$ .
- Thành phần thứ tự nghịch bao gồm 3 véc-tơ điện áp, ký hiệu là  $V_a^{(2)}, V_b^{(2)}, V_c^{(2)}$ , có biên độ bằng nhau, lệch nhau một góc  $120^\circ$ , và  $V_a^{(2)}$  vượt trước  $V_b^{(2)}$   $120^\circ$ ,  $V_b^{(2)}$  vượt trước  $V_c^{(2)}$   $120^\circ$ .

Định nghĩa của thành phần thứ tự không vẫn như cũ bất kể là hệ thống có góc quay pha là  $abc$  hay  $acb$ . Nếu không có chỉ định gì đặc biệt, một hệ thống mặc định là có chiều quay pha  $abc$ .

## 2.2 Tính toán các thành phần thứ tự trong hệ thống véc-tơ không cân bằng

Với những giới thiệu về các thành phần thứ tự, chúng ta thấy một hệ ba véc-tơ không cân bằng có thể được phân tích thành ba hệ véc-tơ thành phần cân bằng, nghĩa là thành phần thứ tự thuận, thành phần thứ tự nghịch, và thành phần thứ tự không. Hình 3 cho thấy 3 bộ véc-tơ thành phần cân bằng được phân tích từ 1 hệ véc-tơ 3 pha không cân bằng.



Thứ tự thuận

Thứ tự nghịch

Thứ tự không

**Hình 3.** Các véc-tơ thành phần thứ tự của một hệ 3 véc-tơ không cân bằng

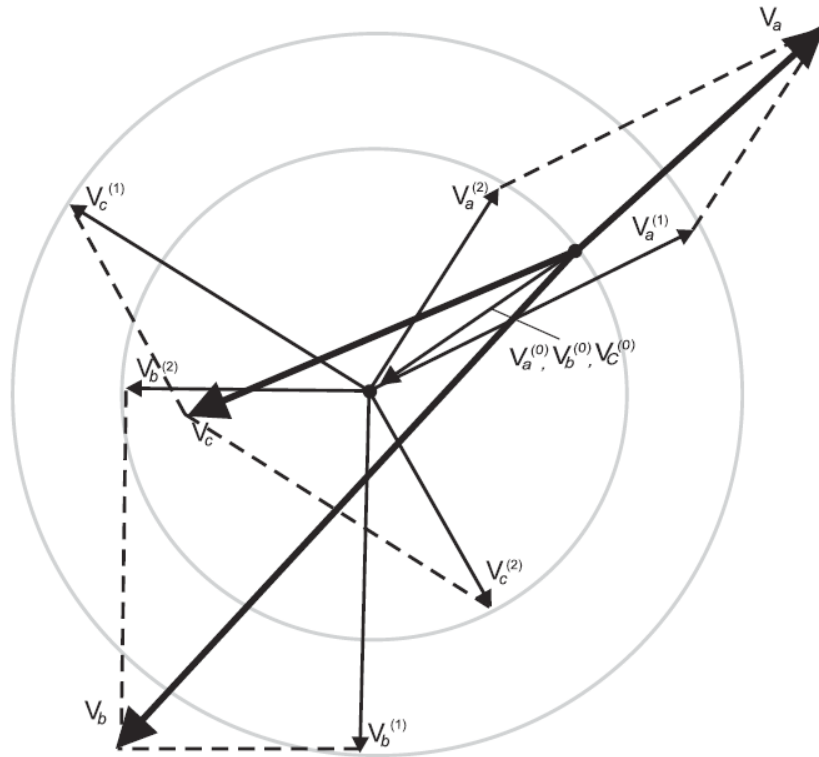
Chúng ta hãy lấy một ví dụ về bộ 3 véc-tơ không cân bằng  $V_a$ ,  $V_b$ , và  $V_c$ . Chúng ta biết mỗi véc-tơ là tổng của 3 véc-tơ thành phần thứ tự thuận, thứ tự nghịch và thứ tự không, nghĩa là ,

$$V_a = V_a^{(0)} + V_a^{(1)} + V_a^{(2)} \quad (1)$$

$$V_b = V_b^{(0)} + V_b^{(1)} + V_b^{(2)} \quad (2)$$

$$V_c = V_c^{(0)} + V_c^{(1)} + V_c^{(2)} \quad (3)$$

Hình 4 cho thấy tổng véc-tơ của các thành phần thứ tự cho mỗi pha.



**Hình 4.** Tổng véc tơ của các thành phần thứ tự khác nhau trên mỗi pha

Chúng ta biết rằng có đến 9 ẩn số trong hệ 3 phương trình từ (1) đến (3). Tuy nhiên chúng ta chỉ có 3 biến số độc lập. Chúng ta hãy chọn  $V_a^{(0)}$ ,  $V_a^{(1)}$ , và  $V_a^{(2)}$  là những biến số độc lập. Từ định nghĩa các thành phần thứ tự ta có:

$$V_b^{(0)}=V_a^{(0)}, V_c^{(0)}=V_a^{(0)} \quad (4)$$

Nếu ta định nghĩa một toán tử,

$$a=1<120^\circ \quad (5)$$

khi đó

$$a^2=1<240^\circ$$

Chúng ta có những phương trình sau từ định nghĩa của các thành phần thứ tự thuận và thứ tự nghịch,

$$V_b^{(1)}=a^2V_a^{(1)}, V_c^{(1)}=aV_a^{(1)} \quad (6)$$

$$V_b^{(2)}=aV_a^{(2)}, V_c^{(2)}=a^2V_a^{(2)} \quad (7)$$

Thay thế từ các phương trình (4), (6) và (7) vào các phương trình (2) và (3), hệ thogn61 các phương trình (1), (2) và (3) có thể viết,

$$V_a = V_a^{(0)} + V_a^{(1)} + V_a^{(2)} \quad (8)$$

$$V_b = V_a^{(0)} + a^2 V_a^{(1)} + a V_a^{(2)} \quad (9)$$

$$V_c = V_a^{(0)} + a V_a^{(1)} + a^2 V_a^{(2)} \quad (10)$$

Bây giờ chúng ta có 3 ẩn số  $V_a^{(0)}$ ,  $V_a^{(1)}$ ,  $V_a^{(2)}$  với 3 phương trình. Giải hệ phương trình tuyến tính này chúng ta được

$$V_a^{(0)} = 1/3(V_a + V_b + V_c) \quad (11)$$

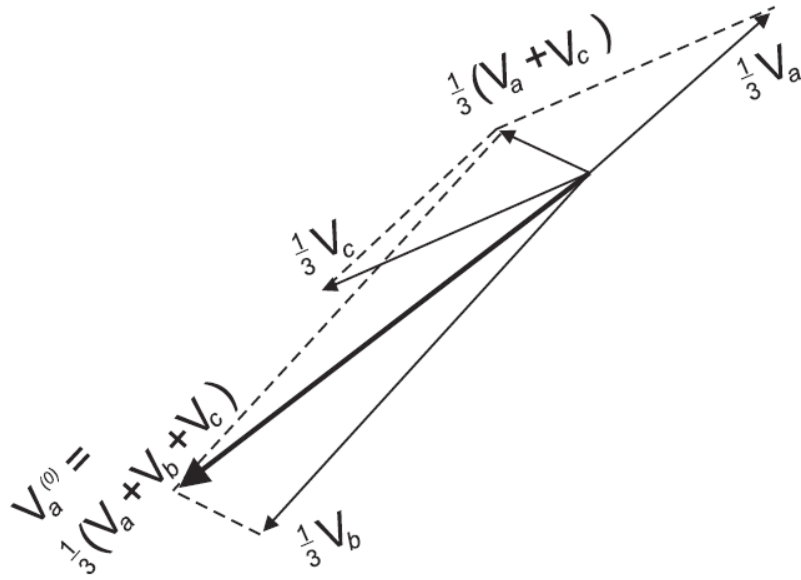
$$V_a^{(1)} = 1/3(V_a + a V_b + a^2 V_c) \quad (12)$$

$$V_a^{(2)} = 1/3(V_a + a^2 V_b + a V_c) \quad (13)$$

Lấy một ví dụ hệ thống 3 pha không cân bằng với điện áp giữa pha và đất là  $V_a = 53 < 43.5^\circ$ ,  $V_b = 107 < 229.5^\circ$  và  $V_c = 67 < 205.5^\circ$ . Thay các giá trị này và giá trị của phương trình (5) vào các phương trình từ (11)~(13), chúng ta có được  $V_a^{(0)} = 39.17 < -141.15^\circ$ ,  $V_a^{(1)} = 56.95 < 29.36^\circ$  và  $V_a^{(2)} = 38.35 < 59.76^\circ$ .

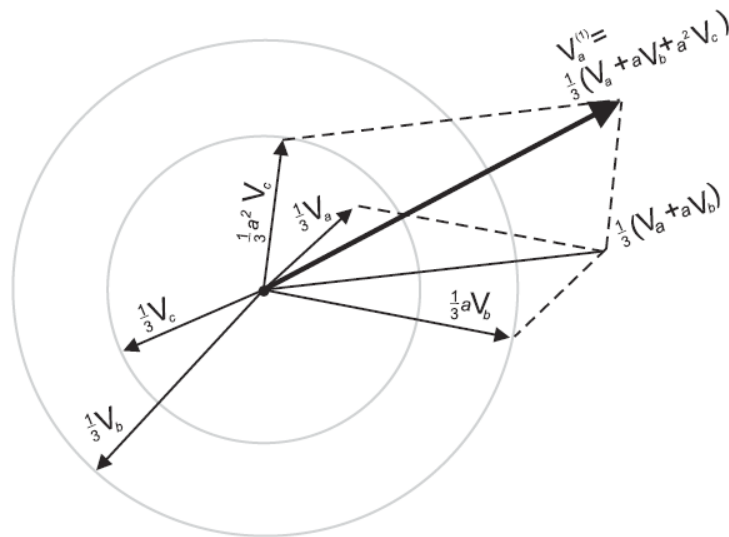
Các phương trình (11), (12) và (13) không chỉ cho chúng ta cách tính toán các thành phần bằng phương pháp toán học, mà còn cho ta phương pháp đồ họa để tính nó. Thành phần điện áp thứ tự không bằng 1/3 của tổng ba vec tơ không cân bằng.

Từ phương trình (11), thành phần thứ tự không bằng 1/3 tổng của 3 véc-tơ 3 pha. Hình 5 biểu thị kết quả tính toán của thành phần thứ tự không pha a.



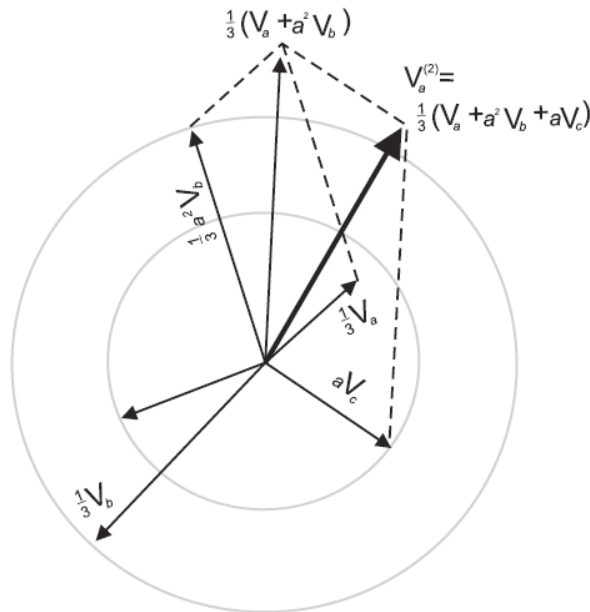
**Figure 5.** Derivation of pha a zero sequece component

Phương trình (12) thể hiện phương pháp vẽ thành phần thứ tự thuận của pha a. Toán tử  $a$  nhân với một véc-tơ tương đương với quay véc-tơ đó  $120^\circ$  ngược chiều kim đồng hồ. Toán tử  $a^2$  nhân với một véc-tơ tương đương với quay véc-tơ đó  $240^\circ$  ngược chiều kim đồng hồ, hoặc  $120^\circ$  theo chiều kim đồng hồ. Để có được thành phần thứ tự thuận của pha  $a$ ,  $V_b$  cần xoay đi  $120^\circ$  ngược chiều kim đồng hồ, và  $V_c$  cần quay đi  $120^\circ$  theo chiều kim đồng hồ. Sau đó, các véc-tơ đã xoay đi đó và  $V_a$  cộng lại với nhau và chia cho 3. Hình 6 hiển thị cách vẽ thành phần thứ tự thuận của pha  $a$ .



**Hình 6.** Cách vẽ thành phần thứ tự thuận của pha a

Tương tự, để vẽ thành phần thứ tự nghịch của pha a,  $V_b$  cần xoay đi  $120^\circ$  theo chiều kim đồng hồ và  $V_c$  cần xoay đi  $120^\circ$  ngược chiều kim đồng hồ. Sau đó, véc-tơ đã xoay đó và véc-tơ  $V_a$  sẽ được cộng với nhau, rồi chia 3. Hình 7 hiển thị cách vẽ thành phần thứ tự nghịch của pha a.



**Figure 7.** Derivation of pha a negative sequence component

Với các véc-tơ thành phần thứ tự  $V_a^{(0)}$ ,  $V_a^{(1)}$ , và  $V_a^{(2)}$ , với pha b và pha c có thể tính toán dễ dàng bằng các phương trình (4), (6), và (7).

### 2.3 Chiều quay của các thành phần thứ tự

Trong máy điện quay, như các máy phát và động cơ, chiều quay pha của điện áp và dòng điện so với rô-to không phụ thuộc vào hệ thống có cân bằng hay không. Trong trường hợp bình thường, hệ thống cân bằng hoặc gần cân bằng, thành phần thứ tự thuận sẽ chiếm ưu thế. Khi hệ thống bị mất cân bằng, sẽ có dấu hiệu xuất hiện các thành phần thứ tự nghịch và / hoặc thứ tự không. Bài viết *Tutorial of the Protection of Synchronous Generators (95 TP 102)* của *IEEE* có một đoạn sau đây trong chương "Bảo vệ mất cân bằng": "trong điều kiện mất cân bằng, sẽ sinh ra dòng điện thứ tự nghịch. Dòng điện thành phần thứ tự nghịch này quay ngược chiều với rô-to. Từ trường của dòng điện này khi nhìn từ rô-to sẽ có tần số gấp đôi tần số đồng bộ do chiều quay ngược kết hợp với chiều của rô-to" [3]. Phát biểu này sẽ làm cho người đọc nhầm lẫn rằng dòng điện thành phần thứ tự thuận quay cùng chiều với rô-to và dòng điện thành phần thứ tự nghịch quay ngược chiều với rô-to. (Xem lời bàn của người dịch, trang cuối)

Tuy nhiên, từ hình 4, cho thấy thành phần thứ tự nghịch không thể quay ngược chiều với thành phần thứ tự thuận hoặc thành phần thứ tự không. Từ các phương trình (11)~(13), tất cả các thành phần này quan hệ bậc nhất với các véc-tơ dòng điện pha. Điều này nói lên rằng các dòng điện thành phần thứ tự thuận, thứ tự nghịch và thứ tự không đều quay cùng chiều với hệ thống véc-tơ 3 pha. (Xem lời bàn của người dịch, trang cuối)

Nhưng mọi người đều biết rằng dòng điện thành phần thứ tự nghịch có thể gây ra phát nóng nhanh chóng và gay nhiều tác hại cho rô-tô. Để hiểu rõ hơn nữa điều này, chúng ta cần hiểu về mối liên hệ giữa dòng điện và từ trường trong máy điện.

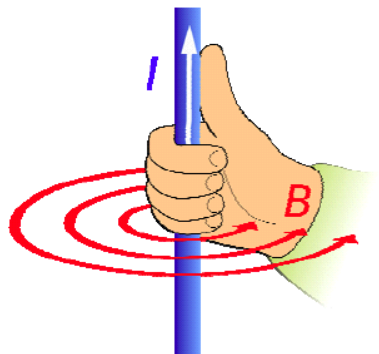
### III. Phân tích từ trường trong máy điện quay

Khi dòng điện chảy qua một dây dẫn, nó tạo ra từ trường. Cường độ từ trường tỉ lệ với cường độ dòng điện. Quan hệ giữa từ trường và dòng điện được cho bởi

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (14)$$

Trong đó  $\mu$  là độ dẫn từ của vật liệu. Vì  $\mu$  là một hằng số vô hướng, nên véc-tơ  $\vec{B}$  trùng phương với véc-tơ  $\vec{H}$ . Chiều của véc-tơ  $\vec{B}$  hoặc  $\vec{H}$  được xác định bởi quy tắc vặn nút chai hoặc quy tắc nắm bàn tay phải (Right Hand Grip Rule). Trong hình 8, dòng điện  $I$  chảy qua dây dẫn theo chiều chỉ bởi mũi tên trắng tạo ra một từ trường  $\vec{B}$  xung quanh dây dẫn theo chiều của mũi tên đỏ. Quan hệ giữa dòng điện  $I$  và cường độ từ trường  $\vec{B}$  tại một điểm cách xa dây dẫn một khoảng cách  $r$  bằng

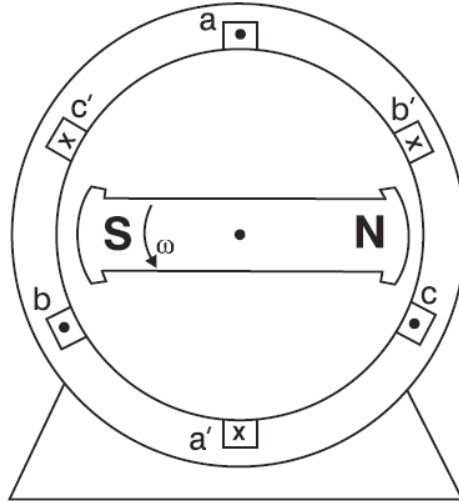
$$B = \frac{\mu}{2\pi r} \quad (15)$$



**Hình 8.** Quy tắc nắm bàn tay phải (từ Wikipedia)

Chúng ta hãy xét một máy điện đơn giản 3 pha 2 cực. Sta-to của máy có các bộ cuộn dây, đặt lệch nhau  $120^\circ$  trong không gian, như vẽ trên hình 9.





**Hình 9.** Dây quấn của máy điện đơn giản 3 pha, 2 cực

Trong hình 9, mỗi vòng tròn trong mỗi rãnh đại diện cho một phần của dây quấn sta-to. Dấu chấm có ý nghĩa dòng điện đi ra khỏi và dấu chữ thập có ý nghĩa dòng điện đi vào trasng giấy. Pha  $a$ ,  $b$ , và  $c$  có các dây quấn  $aa'$ ,  $bb'$  và  $cc'$  tương ứng.

Khi ba pha không cân bằng, dòng điện không cân bằng sẽ được phân tích thành các dòng điện thành phần 3 pha cân bằng, nghĩa là các thành phần thứ tự không, thứ tự thuận và thứ tự nghịch. Chúng ta sẽ nghiên cứu từ trường của các thành phần này trong các chương sau. Trong các chương từ 3.1 ~ 3.3, Chúng ta sẽ nghiên cứu từ trường của các thành phần tại tâm của rô-to. Trong chương 3.4, chúng ta sẽ nghiên cứu từ trường tạo ra do các dòng điện thành phần ở các điểm khác với tâm trục của rô-to.

### 3.1 Từ trường tạo ra do dòng điện thứ tự không

Các dòng điện thứ tự không, theo như đã định nghĩa có độ lớn và góc lệch bằng với nhau, và được biểu diễn bởi

$$\begin{aligned} i_{0aa'} &= I_0 \sin(\omega t) \\ i_{0bb'} &= I_0 \sin(\omega t) \\ i_{0cc'} &= I_0 \sin(\omega t) \end{aligned} \quad (16)$$

Sử dụng quy tắc nắm bàn tay phải, chiều của các véc-tơ từ trường sinh ra được vẽ trên hình 10. Để tính toán toán học, véc-tơ mật độ từ trường là

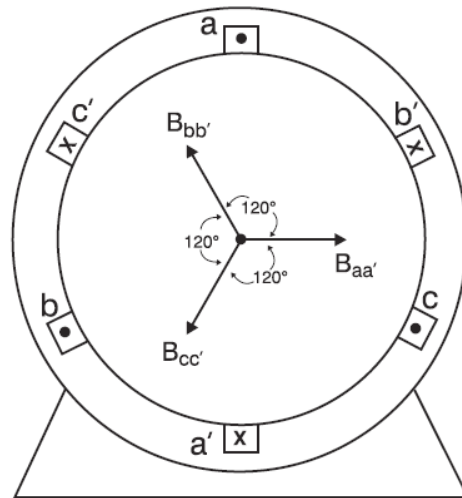
$$\vec{B}_{0aa'} = B_0 \sin(\omega t) \angle 0^\circ = \sin(\omega t) \quad (17)$$

$$\vec{B}_{0bb'} = B_0 \sin(\omega t) \angle 120^\circ = \sin(\omega t) e^{j120^\circ} \quad (18)$$

$$\vec{B}_{occ'} = B_0 \sin(\omega t) \angle -120^\circ = \sin(\omega t) e^{-j120^\circ} \quad (19)$$

Trong đó  $B_0 = \frac{\mu}{2\pi r} I_0$ ,  $r$  là bán kính của sta-to.

Do các dây quấn  $aa'$ ,  $bb'$  và  $cc'$  lệch nhau  $120^\circ$ , chiều của các từ trường sinh ra do dòng điện thứ tự không được vẽ trong hình 10. Tổng các từ trường sinh ra do dòng điện thứ tự không bằng với tổng của từ trường của mỗi dòng điện thứ tự không của từng pha sinh ra. Vì dòng điện thứ tự không của các pha  $a$ ,  $b$  và  $c$  chính xác bằng nhau, nên các từ trường sinh ra sẽ cân bằng và tổng từ trường được sinh ra từ dòng điện thứ tự không sẽ bằng 0.



**Hình 10.** Hình 10: chiều của từ trường sinh ra do các dòng điện  
Để tính toán, ta có

$$\begin{aligned} \vec{B}_0 &= \vec{B}_{0aa'} + \vec{B}_{0bb'} + \vec{B}_{0cc'} \\ &= B_0 \sin(\omega t) + B_0 \sin(\omega t) e^{j120^\circ} + B_0 \sin(\omega t) e^{-j120^\circ} \\ &= B_0 \sin(\omega t) (1 + e^{j120^\circ} + e^{-j120^\circ}) \\ &= 0 \end{aligned} \quad (20)$$

Chúng tỏ rằng không có từ trường được sinh ra trên rô-to do dòng điện thứ tự không trên sta-to.

### 3.2 Từ trường sinh ra do dòng điện thứ tự thuận

Các thành phần thứ tự thuận, như định nghĩa có thể diễn tả:

$$\begin{aligned} I_{1aa'} &= I_1 \sin(\omega t) \\ I_{1bb'} &= I_1 \sin(\omega t - 120^\circ) \\ I_{1cc'} &= I_1 \sin(\omega t + 120^\circ) \end{aligned} \quad (21)$$

Chúng ta tiếp tục giả định rằng chiều của dòng điện không thay đổi, chiều của véc-tơ từ thông sẽ giữ như trong hình 10. Với dòng thứ tự thuận, vì trị số tức thời của dòng điện mỗi pha không bằng nhau, như vậy từ thông tổng sẽ khác 0. Tương tự như trường hợp dòng điện thứ tự không, từ thông phát sinh từ dòng điện thứ tự thuận có thể được biểu thị như sau

$$\vec{B}_{1aa'} = B_1 \sin(\omega t) < 0^\circ = B_1 \sin(\omega t) \quad (22)$$

$$\vec{B}_{1bb'} = B_1 \sin(\omega t - 120^\circ) < 120^\circ = B_1 \sin(\omega t - 120^\circ) e^{j120^\circ} \quad (23)$$

$$\vec{B}_{1cc'} = B_1 \sin(\omega t + 120^\circ) < -120^\circ = B_1 \sin(\omega t + 120^\circ) e^{-j120^\circ} \quad (24)$$

Trong đó  $B_1 = \frac{\mu}{2\pi r} I_1$ ,  $r$  là bán kính của sta-to.

Tổng của 3 véc-tơ từ thông là

$$\begin{aligned} \vec{B}_1 &= \vec{B}_{1aa'} + \vec{B}_{1bb'} + \vec{B}_{1cc'} \\ &= B_1 \sin(\omega t) + B_1 (\sin(\omega t - 120^\circ) e^{j120^\circ} + B_1 (\sin(\omega t + 120^\circ) e^{-j120^\circ}) \\ &= B_1 \sin(\omega t) + B_1 (\sin(\omega t) \cos 120^\circ - \cos(\omega t) \sin 120^\circ) e^{j120^\circ} + \\ &\quad B_1 (\sin(\omega t) \cos 120^\circ + \cos(\omega t) \sin 120^\circ) e^{-j120^\circ} \\ &= B_1 \sin(\omega t) + B_1 \sin(\omega t) \cos 120^\circ (e^{j120^\circ} + e^{-j120^\circ}) - B_1 \cos(\omega t) \sin 120^\circ (e^{j120^\circ} - e^{-j120^\circ}) \\ &= B_1 \sin(\omega t) + B_1 \sin(\omega t) \cos 120^\circ (2 \cos(120^\circ)) - B_1 \cos(\omega t) \sin 120^\circ (2j \sin(120^\circ)) \\ &= \frac{3}{2} B_1 (\sin(\omega t) - j \cos(\omega t)) = \frac{3}{2} B_1 (-j^2 \sin(\omega) - j(\cos(\omega t))) \\ &= -j \frac{3}{2} B_1 (\cos(\omega) + j \sin(\omega)) \end{aligned}$$

$$= -j \frac{3}{2} B_1 e^{j\omega t} \quad (25)$$

Từ phương trình (25), ta thấy biên độ của từ thông sinh ra do các dòng điện thứ tự thuận không đổi. Ngoài ra véc tơ từ thông này sẽ quay ngược chiều kim đồng hồ với tốc độ góc là  $\omega$ . Hình 11 (a), (b), (c) và (d) biểu diễn từ thông tổng được sinh ra do dòng thứ tự thuận ở các thời điểm tương ứng với  $\omega t = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  và  $270^\circ$ . Trong hình 9 ta thấy rô-to của máy cũng quay ngược chiều kim đồng hồ với tốc độ góc cũng bằng  $\omega$ . Vì không có tốc độ tương đối giữa từ trường quay và rô-to, nên không có dòng điện xóáy sinh ra trên thân rô-to. Điều này cho thấy dòng điện 3 pha cân bằng hoặc dòng điện thứ tự thuận sẽ không gây ra các vấn đề phát nóng trên phần lõi của rô-to.

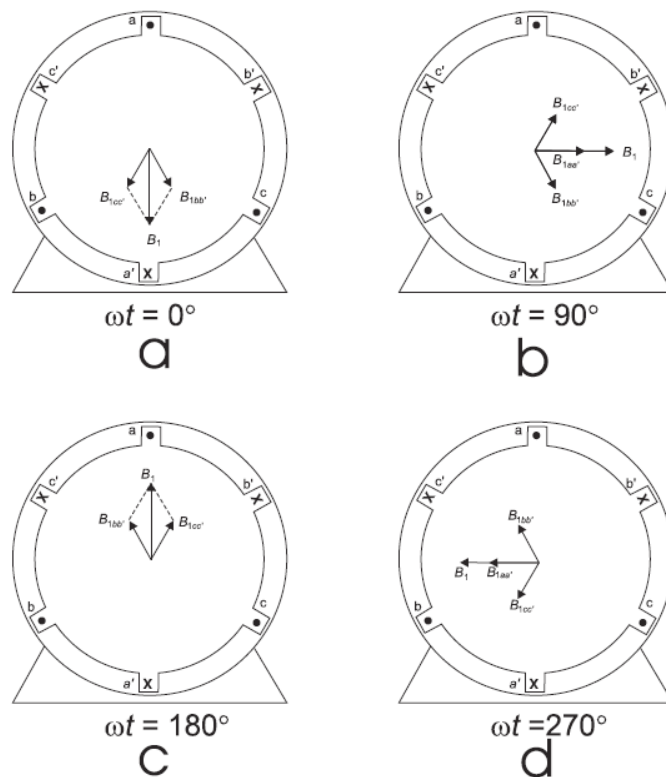


Figure 11. Flux induced by positive sequence currents rotates anticlockwise

### 3.3 Từ thông sinh ra do dòng điện thứ tự nghịch

Với các dòng điện thành phần thứ tự nghịch, việc phân tích cũng tương tự với việc phân tích dòng điện thành phần thứ tự thuận. 3 dòng điện thành phần thứ tự nghịch được biểu diễn:

$$\begin{aligned} I_{2aa'} &= I_2 \sin(\omega t) \\ I_{2bb'} &= I_2 \sin(\omega t + 120^\circ) \\ I_{2cc'} &= I_2 \sin(\omega t - 120^\circ) \end{aligned} \quad (26)$$

Chiều của từ thông phát sinh do dòng điện thứ tự nghịch sẽ tương tự như trong trường hợp thứ tự không và thứ tự thuận, như vẽ trên hình 10. Các phương trình toán học:

$$\dot{B}_{2aa'} = B_2 \sin(\omega t) \quad (27)$$

$$\dot{B}_{2bb'} = B_2 \sin(\omega t + 120^\circ) e^{j120^\circ} \quad (28)$$

$$\dot{B}_{2cc'} = B_2 \sin(\omega t - 120^\circ) e^{-j120^\circ} \quad (29)$$

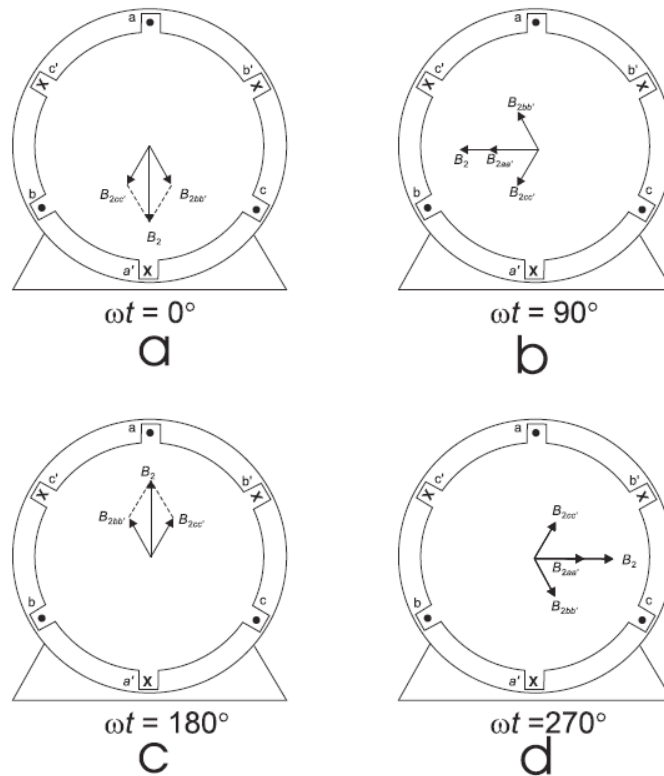
Trong đó  $B_2 = \frac{\mu}{2\pi r} I_2$ ,  $r$  là bán kính của sta-to.  
 Tổng của 3 véc-tơ từ thông là

$$\begin{aligned} \dot{B}_2 &= \dot{B}_{2aa'} + \dot{B}_{2bb'} + \dot{B}_{2cc'} \\ &= B_2 \sin(\omega t) + B_2 (\sin(\omega t + 120^\circ) e^{j120^\circ} + \sin(\omega t - 120^\circ) e^{-j120^\circ}) \\ &= B_2 \sin(\omega t) + B_2 (\sin(\omega t) \cos 120^\circ + \cos(\omega t) \sin 120^\circ) e^{j120^\circ} + \\ &\quad B_2 (\sin(\omega t) \cos 120^\circ - \cos(\omega t) \sin 120^\circ) e^{-j120^\circ} \\ &= B_2 \sin(\omega t) + B_2 \sin(\omega t) \cos 120^\circ (e^{j120^\circ} + e^{-j120^\circ}) + B_2 \cos(\omega t) \sin 120^\circ (e^{j120^\circ} - e^{-j120^\circ}) \\ &= B_2 \sin(\omega t) + B_2 \sin(\omega t) \cos 120^\circ (2 \cos(120^\circ)) - B_2 \cos(\omega t) \sin 120^\circ (2j \sin(120^\circ)) \\ &= \frac{3}{2} B_2 (\sin(\omega t) + j \cos(\omega t)) \\ &= -j \frac{3}{2} B_2 (\cos(\omega t) + j \sin(\omega t)) \end{aligned}$$

$$= -j \frac{3}{2} B_2 e^{-j\omega t} \quad (30)$$

Từ phương trình (30), chúng ta thấy véc-tơ từ trường được phát sinh từ dòng điện thứ tự nghịch sẽ quay theo chiều kim đồng hồ với tốc độ góc là  $\omega$ . Hình 12 (a), (b), (c) và (d) cho thấy từ thông tổng phát sinh từ dòng điện thành phần thứ tự nghịch tại các thời điểm tương ứng với  $\omega t = 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$  và  $270^\circ$ . Do rô-to quay ngược chiều kim đồng hồ với tốc độ góc  $\omega$ , véc-tơ từ thông sẽ quay với tốc độ góc là  $2\omega$  theo chiều kim đồng hồ so với rô-to.

Dòng điện cảm ứng tại trục rô-to sẽ có tần số gấp đôi. Dòng điện cảm ứng này sẽ gây nóng rô-to nhanh chóng và có thể gây ra hư hỏng cách điện và / hoặc các vấn đề cơ học...



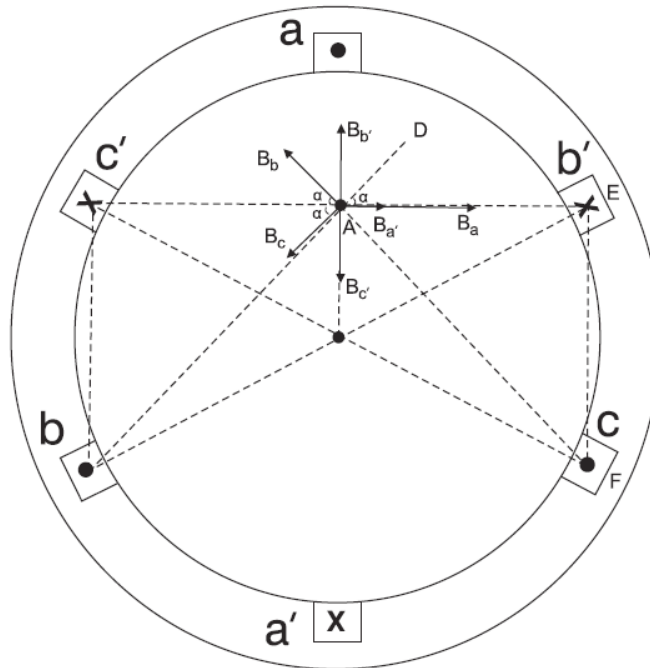
**Hình 12.** Từ thông phát sinh do dòng điện thứ tự nghịch quay theo chiều kim đồng hồ

### 3.4 Từ thông tại một điểm thông thường trên rô-to

Chúng ta đã phân tích từ thông tại tâm rô-to center. Kết luận về từ thông phát sinh tại tâm của rô-to có thể không suy rộng được đúng với bất kỳ điểm nào trên thân rô-to. Việc tính toán toán học cho từ thông này rất phức tạp, và một phương trình thông dụng không thể bao quát hết những mối liên hệ giữa từ thông phát sinh và các

dòng điện thành phần thứ tự trên cuộn dây sta-to sinh ra nó. Trong phần này, chúng ta thử phân tích toán học và xác định giá trị từ thông phát sinh tại một điểm nằm giữa đường từ tâm trục đến cuộn dây sta-to do dòng điện pha  $a$  sinh ra.

Trong hình 13, điểm  $A$  nằm ở  $1/2$  khoảng cách giữa tâm rô-to và dây quấn pha  $a$ . 6 véc-tơ từ thông mô tả trên hình 13 theo quy luật nắm bàn tay phải. Vì  $\angle DAE + \angle EAC = 90^\circ$  và  $\angle ACE + \angle EAC = 90^\circ$ , ta có  $\alpha = \angle ECA$ .



**Hình 13.** Từ thông phát sinh ở khoảng giữa tâm trục và dây dẫn pha  $a$ . Với một số phân tích hình học và lượng giác, ta được

$$\begin{aligned} \cos \alpha &= \frac{2}{7} \sqrt{7} \\ \sin \alpha &= \frac{1}{7} \sqrt{21} \end{aligned} \quad (31)$$

Quan hệ giữa dòng điện và từ thông phát sinh được cho trong phương trình (15). Vì chúng ta chỉ quan tâm đến việc so sánh tác động của các dòng điện thành phần thứ tự, nên hệ số  $\mu/2\pi$  được bỏ qua, và chúng ta đơn giản sử dụng  $B=I/r$  trong việc phân tích dưới đây.

Các thành phần  $x$  và  $y$  của các véc-tơ từ thông phát sinh bởi dòng điện thành phần mỗi pha sẽ được biểu thị dưới đây,

$$B_{ax}=2\sin(\omega t) \quad (32)$$

$$B_{ay}=0 \quad (33)$$

$$B_{apx} = \frac{2}{3} \sin(\omega t) \quad (34)$$

$$B_{apy}=0 \quad (35)$$

$$B_{bx} = -\frac{2}{\sqrt{7}} \sin(\omega t - \theta) \cos \alpha \quad (36)$$

$$B_{by} = -\frac{2}{\sqrt{7}} \sin(\omega t - \theta) \sin \alpha \quad (37)$$

$$B_{bpx}=0 \quad (38)$$

$$B_{bpy} = \frac{2}{3} \sin(\omega t - \theta) \quad (39)$$

$$B_{cx} = -\frac{2}{\sqrt{7}} \sin(\omega t + \theta) \cos \alpha \quad (40)$$

$$B_{cy} = -\frac{2}{\sqrt{7}} \sin(\omega t + \theta) \sin \alpha \quad (41)$$

$$B_{cpx}=0 \quad (42)$$

$$B_{cpy} = -\frac{2}{3} \sin(\omega t + \theta) \quad (43)$$

Các phương trình trên đúng với các dòng điện thành phần thứ tự không, thứ tự thuận và thứ tự nghịch với các giá trị  $\theta$  xác định, nghĩa là,

$\theta=0^\circ$ , cho thành phần thứ tự không

$\theta=120^\circ$ , cho thành phần thứ tự thuận (44)

$\theta=-120^\circ$ , cho thành phần thứ tự nghịch



Với các thành phần từ thông phát sinh từ mỗi dòng điện thành phần thứ tự trên dây quấn sta-to, chúng ta kết hợp các thành phần c và y của từ thông của các từ thông thành phần tại điểm A,

$$\begin{aligned}
 B_x &= B_{ax} + B_{apx} + B_{bx} + B_{bpx} + B_{cx} + B_{cpx} \\
 &= 2\sin(\omega t) + \frac{2}{3} \left( \sin(\omega t) - \frac{2}{\sqrt{7}} \sin(\omega t)\cos\alpha - \frac{2}{\sqrt{7}} \sin(\omega t + \theta)\cos\alpha \right) \\
 &= \frac{8}{3} \sin(\omega t) - \frac{2}{\sqrt{7}} \sin(\omega t - \theta) + \sin(\omega t + \theta) \cos\alpha \\
 &= \frac{8}{3} \sin(\omega t) - \frac{4}{\sqrt{7}} \sin(\omega t) \cos\theta \cos\alpha \\
 &= \left( \frac{8}{3} - \frac{4}{\sqrt{7}} \cos\theta \cos\alpha \right) \sin(\omega t)
 \end{aligned} \tag{45}$$

$$\begin{aligned}
 B_y &= B_{ay} + B_{apy} + B_{by} + B_{bpy} + B_{cy} + B_{cpy} \\
 &= \frac{2}{\sqrt{7}} \sin(\omega t - \theta) \sin\alpha + \frac{2}{\sqrt{3}} \sin(\omega t - \theta) - \frac{2}{\sqrt{7}} \sin(\omega t + \theta) \sin\alpha - \frac{2}{\sqrt{3}} \sin(\omega t + \theta) \\
 &= \frac{2}{\sqrt{7}} \sin\alpha (\sin(\omega t - \theta) - \sin(\omega t + \theta)) + \frac{2}{\sqrt{3}} (\sin(\omega t - \theta) - \sin(\omega t + \theta)) \\
 &= \frac{4}{\sqrt{7}} \sin\alpha \sin\theta \cos(\omega t) - \frac{4}{\sqrt{3}} \sin\theta \cos(\omega t) \\
 &= \left( \frac{4}{\sqrt{7}} - \frac{4}{\sqrt{3}} \right) \sin\alpha \sin\theta \cos(\omega t)
 \end{aligned} \tag{46}$$

$$\begin{aligned}
 \vec{B} &= B_x + jB_y \\
 &= \left( \frac{8}{3} - \frac{4}{\sqrt{7}} \cos\theta \cos\alpha \right) \sin(\omega t) + j \left[ \left( \frac{4}{\sqrt{7}} - \frac{4}{\sqrt{3}} \right) \sin\alpha \sin\theta \cos(\omega t) \right]
 \end{aligned} \tag{47}$$

Thay thế phương trình (31) và (44) vào phương trình (47) và thực hiện một số thao tác toán học, chúng ta có các véc-tơ từ thông phát sinh từ các dòng điện dòng điện thành phần thứ tự không, thứ tự thuận và thứ tự nghịch tương ứng trong các phương trình (48), (49) và (50).

$$\vec{B}_1 = 3.2381\sin(\omega t) - j2.8571\cos(\omega t) = j3.2381e^{j\omega t} + j0.381\cos(\omega t) \quad (48)$$

$$\vec{B}_2 = 3.2381\sin(\omega t) + j2.8571\cos(\omega t) = j3.2381e^{j\omega t} - j0.381\cos\omega t \quad (49)$$

$$\vec{B}_0 = 1.5238\sin(\omega t) \quad (50)$$

Từ những phương trình trên, chúng ta thấy các véc-tơ từ thông tại điểm A không quay với tốc độ góc cố định  $\omega$ . Chúng ta cũng thấy rằng  $-j\beta.2381e^{j\omega t}$  là một thành phần chủ yếu của  $\vec{B}_1$  và  $\beta.2381e^{j\omega t}$  là một thành phần chủ yếu của  $\vec{B}_2$ . Điều này nói lên từ thông phát sinh do dòng điện thứ tự thuận quay cùng chiều quay với rô-to và từ thông phát sinh do dòng điện thứ tự nghịch quay ngược chiều quay với rô-to. Sử dụng các phương trình từ (48)~(50), chúng ta có thể tính toán từ thông ở bất kỳ thời điểm  $\omega t$  nào cho mỗi dòng điện thành phần. Bảng 1 liệt kê các từ thông phát sinh từ các dòng điện thành phần thứ tự thuận, thứ tự nghịch và thứ tự không tại các thời điểm  $\omega t$  khác nhau. Lưu ý rằng biên độ của từ thông chỉ là quan hệ mang ý nghĩa tương đối, giả sử rằng mỗi dòng điện thành phần đều có biên độ bằng nhau.

**Bảng I.** Véc-tơ từ thông phát sinh tại các góc khác nhau

$\omega t$	Thứ tự thuận		Thứ tự nghịch		Thứ tự không	
	$ B1 $	$ B1 $ góc	$ B2 $	$ B2 $ góc	$ B0 $	$ B0 $ góc
0°	2.86	270.00°	2.86	90.00°	0.00	0°
30°	2.96	303.20°	2.96	56.80°	0.76	0°
60°	3.15	333.00°	3.15	27.00°	1.32	0°
90°	3.24	0.00°	3.24	0.00°	1.52	0°
120°	3.14	27.00°	3.14	333.00°	1.32	0°
150°	2.96	56.80°	2.96	303.20°	0.76	0°
180°	2.86	90.00°	2.86	270.00°	0.00	180°
210°	2.96	123.20°	2.96	236.80°	0.76	180°
240°	3.15	153.00°	3.15	207.00°	1.32	180°
270°	3.24	180.00°	3.24	180.00°	1.52	180°
300°	3.15	207.00°	3.15	153.00°	1.32	180°
330°	2.96	236.80°	2.96	123.20°	0.76	180°

Bảng I chứng minh rằng từ thông tại một điểm thông thường bên trong rô-to không hoàn chính xác với từ thông ở tâm trục rô-to. Tuy nhiên cũng có thể cho ta thấy từ thông phát sinh do dòng điện thành phần thứ tự thuận về cơ bản là quay cùng chiều với chiều quay của rô-to và từ thông phát sinh từ dòng điện thành phần thứ tự nghịch về cơ bản sẽ quay ngược chiều với chiều quay của rô-to. Vì dòng điện cảm ứng là do sự thay đổi của từ thông, nên dòng điện cảm ứng của từ thông được tạo ra do dòng điện thứ tự nghịch sinh ra trên rô-to sẽ cao hơn rất nhiều so với dòng điện do từ thông phát sinh từ dòng điện thứ tự thuận.

Từ việc phân tích từ thông ở tâm rô-to, chúng ta đã chỉ ra các dòng điện thành phần thứ tự đã gây nên những đáp ứng khác nhau như thế nào. Dòng điện thành phần thứ tự không không phát sinh ra từ trường tại tâm rô-to. Dòng điện thứ tự thuận phát sinh ra từ trường quay đồng hành với rô-to và không tạo ra dòng điện cảm ứng nào trên rô-to. Dòng điện thành phần thứ tự nghịch phát sinh ra từ thông quay cùng tốc độ nhưng ngược chiều với chiều quay trên. Sự thay đổi của từ thông trên rô-to cảm ứng

trên rô-to dòng điện cảm ứng lớn và có thể gây nhiều ảnh hưởng có hại đến máy phát hoặc động cơ.

Ở những điểm thông thường khác trên thân rô-to, việc phân tích từ thông sẽ phức tạp hơn nhiều và vượt quá phạm vi của bài viết này. Nhưng trong việc nghiên cứu tại một điểm ở khoảng giữa tâm trục và dây quấn sta-to, chúng ta có thể nói từ thông do dòng điện thứ tự nghịch sinh ra sẽ quay ngược chiều với chiều quay của rô-to. Dòng điện thứ tự nghịch sẽ tạo ra nhiều hư hỏng trên rô-to so với các dòng điện thành phần khác.

#### **IV. Kết luận**

Các véc tơ thành phần thứ tự liên kết tuyến tính với véc-tơ dòng điện ba pha. Chúng quay cùng chiều với dòng điện ba pha. Khi máy điện vận hành ở trạng thái không cân bằng dòng điện thứ tự nghịch sẽ có tác hại nặng nhất. Dòng điện thành phần thứ tự nghịch tạo ra từ trường quay cùng chiều quay với rô-to và cảm ứng ra dòng điện rất ít trên rô-to. Dòng điện thành phần thứ tự nghịch sinh ra từ trường quay ngược với chiều quay của rô-to. Sự thay đổi từ thông rất nhiều trên rô-to ứng với dòng điện thành phần thứ tự nghịch tạo nên các điểm phát nóng gây hại nhiều cho máy phát và động cơ.

#### **Tài liệu tham khảo**

[1] John Grainger, William Stevenson, *Power System Analysis*, McGraw-Hill, Inc, 1994.

[2] Mike Basler, Arjun Godhwani, Pranesh Rao, Jeff Burnworth, *Excitation Control Systems*, Basler Electric, 2009.

[3] IEEE Power Engineering Society, IEEE Tutorial on the *Protection of Synchronous Generators*, 95 TP 102.

Nguồn: định từ bài viết :

#### **A REVIEW OF NEGATIVE SEQUENCE CURRENT**

Tác giả:

*John Wang, Basler Electric Company, Highland IL 62249*

*Randy Hamilton, Basler Electric Company, Highland IL 62249*

Dịch bởi PQT.

#### **Lời bàn của người dịch:**

Sau khi đọc kỹ bài viết này, ta có nhận xét sau:

1. Bài viết phân tích các thành phần của dòng điện - điện áp 3 pha rất hay, chỉ dùng những công thức số phức và công thức lượng giác cơ bản. Rất ít tài liệu nào phân tích kỹ như tài liệu này.

2. Bài viết đánh giá một số bài viết khác là chưa chính xác, vì các bài viết trên nói rằng

*...trong điều kiện mất cân bằng, sẽ sinh ra dòng điện thứ tự nghịch. Dòng điện thành phần thứ tự nghịch này quay ngược chiều với rô-to. Từ trường của dòng điện này khi nhìn từ rô-to sẽ có tần số gấp đôi tần số đồng bộ do chiều quay ngược kết hợp với chiều của rô-to...*

Từ đó, bài viết khẳng định

*Phát biểu này sẽ làm cho người đọc nhầm lẫn rằng dòng điện thành phần thứ tự thuận quay cùng chiều với rô-to và dòng điện thành phần thứ tự nghịch quay ngược chiều với rô-to.*

*Tuy nhiên, từ hình 4, cho thấy thành phần thứ tự nghịch không thể quay ngược chiều với thành phần thứ tự thuận hoặc thành phần thứ tự không. Từ các phương trình (11)~(13), tất cả các thành phần này quan hệ bậc nhất với các véc-tơ dòng điện pha. Điều này nói lên rằng các dòng điện thành phần thứ tự thuận, thứ tự nghịch và thứ tự không đều quay cùng chiều với hệ thống véc-tơ 3 pha.*

Điều này, theo ý kiến chủ quan của người dịch, cả bài viết khác và bài viết này đều không đúng, vì dòng điện không quay theo rô-to hay ngược chiều rô-to. Quy ước véc-tơ quay, là quy ước theo một chiều cố định (theo chiều dương, ngược chiều kim đồng hồ). Và véc-tơ quay chỉ quay trong hệ tọa độ Đề-Các thôi, chứ không quay trong không gian của máy điện. Chỉ có từ trường do dòng điện sinh ra mới quay.