Những điểm cần ghi nhớ trong chương năm

1. Người ta xét riêng cách tính toán trị số ban đầu của dòng điện ngắn mạch chu kỳ (quá độ và siêu quá độ) và cách tính toán dòng điện ngắn mạch biến thiên theo thời gian. Để tính trị số ban đầu (biên độ hay trị số hiệu dụng) của dòng điện ngắn mạch chỉ cần dựa vào mô hình máy phát tại t = 0 sau ngắn mạch.

2. Về nguyên tắc để tính chính xác dòng điện ngắn mạch quá độ và siêu quá độ ban đầu cần mô hình mạch cho máy phát và mạng điện theo 2 trục vuông góc (dọc và ngang của hệ toạ độ quay). Dựa vào hệ phương trình mạch viết theo các trục để xác định các dòng điện thành phần. Sau đó tổng hợp lại để có trị số biên độ (hay hiệu dụng) của dòng điện ngắn mạch. Tuy nhiên, thực tế người ta hay áp dụng mô hình mạch gần đúng của máy phát theo các đại lượng tổng hợp (theo E'_q và $E''_{\sim}$) để tính toán dòng điện ngắn mạch quá độ. Phép tính đơn giản hơn trong khi sai số mắc phải không lớn.

3. Để tính dòng điện ngắn mạch biến thiên theo thời gian có thể áp dụng phương pháp giải tích hoặc phương pháp đường cong tính toán. Phương pháp giải tích cho phép áp dụng thuận tiện và chính xác khi tính dòng điện ngắn mạch ở thời gian ngắn ban đầu (dưới 0,5 giây) khi TĐK chưa có ảnh hưởng. Phương pháp đường cong tính toán có ý nghĩa vạn năng (tính được ở mọi thời điểm kể cả với t=0 và t=∞) nhưng có thể mắc sai số lớn nếu áp dụng không đúng.

4. Để đảm bảo kết quả phù hợp (sai số đủ nhỏ cho các ứng dụng) điều rất quan trọng khi áp dụng đường cong tính toán là phân nhóm máy phát thích hợp khi biến đổi đẳng trị sơ đồ tính toán. Cần đặc biệt lưu ý các lượng cơ bản đã mặc định trong phương pháp đường cong tính toán.

Chương 6

NGẮN MẠCH KHÔNG ĐỐI XỨNG

6.1 KHÁI NIỆM CHUNG

Ngắn mạch 3 pha là dạng duy nhất đối xứng xảy ra trong hệ thống điện, các dạng ngắn mạch còn lại đều là không đối xứng bởi vì tình trạng các pha khi đó không giống nhau. Ngắn mạch không đối xứng bao gồm :

- Ngắn mạch 1 pha ;
- Ngắn mạch 2 pha ;
- Ngắn mạch 2 pha chạp đất.

Khi ngắn mạch không đối xứng dòng điện và điện áp các pha khác nhau về trị số, góc lệch pha cũng không còn đối xứng (khác 120^0) . Do đó không thể tách riêng một pha để tính toán như đối với ngắn mạch ba pha.

Về nguyên tắc, để tính dòng điện và điện áp các pha khi xảy ra ngắn mạch không đối xứng có thể giải mạch với sơ đồ cả ba pha theo các phương pháp thông thường. Tuy nhiên cách tính toán như vậy rất phức tạp, hầu như không được áp dụng trong thực tế. Người ta áp dụng phổ biến hiện nay phương pháp các thành phần đối xứng. Thực chất của phương pháp này là phân tích để đưa các dạng ngắn mạch không đối xứng về ngắn mạch 3 pha đối xứng thành phần. Sau khi tính toán kết quả sẽ được tổng hợp lại.

Ngoài ngắn mạch không đối xứng, trong hệ thống điện còn có thể xảy ra các dạng sự cố không đối xứng khác:

- Lúc đứt dây 1 pha hoặc 2 pha mạng điện cũng trở thành không đối xứng. Lúc đó người ta gọi sự cố là *chế độ không đối xứng dọc*.
- Có thể xảy ra vừa ngắn mạch vừa đứt dây từng pha ở đồng thời nhiều chỗ khác nhau trong mạng điện. Khi đó người ta gọi hiện tượng xảy ra là *sự cố phức tạp*.

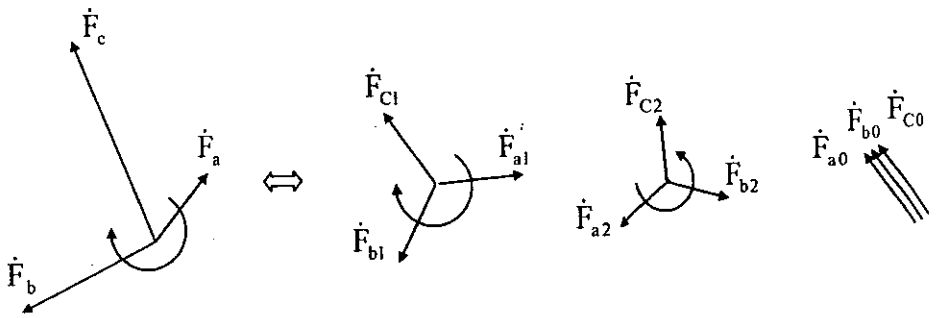
Về phương pháp tính toán, các chế độ không đối xứng có nhiều điểm chung, nhưng cũng không phải là hoàn toàn đồng nhất. Trong đó, ngắn mạch không đối xứng ở một vị trí là hiện tượng đơn giản nhất, có thể lấy làm cơ sở. Trong giáo trình này xét chủ yếu hiện tượng ngắn mạch không đối xứng tại một vị trí của sơ đồ.

6.2 CƠ SỞ PHƯƠNG PHÁP CÁC THÀNH PHẦN ĐỐI XỨNG

Phương pháp các thành phần đối xứng dựa trên cơ sở toán học về sự phân tích một hệ thống véc tơ 3 pha thành các hệ thống 3 pha thành phần. Để cho tổng quát, xét một hệ thống 3 véc tơ bất kỳ $\dot{F}_a, \dot{F}_b, \dot{F}_c$. Dễ chứng minh được rằng, chúng có thể phân tích duy nhất thành 3 hệ thống thành phần :

- Hệ thống thành phần thứ tự thuận : $\dot{F}_{a1}, \dot{F}_{b1}, \dot{F}_{c1}$;
- Hệ thống thành phần thứ tự nghịch : $\dot{F}_{a2}, \dot{F}_{b2}, \dot{F}_{c2}$;

- Hệ thống thành phần thứ tự không : $\dot{F}_{a0}, \dot{F}_{b0}, \dot{F}_{c0}$.



Hình 6.1

Ý nghĩa phân tích được thể hiện là :

$$\left.\begin{aligned} \dot{F}_a &= \dot{F}_{a1} + \dot{F}_{a2} + \dot{F}_{a0} \\ \dot{F}_b &= \dot{F}_{b1} + \dot{F}_{b2} + \dot{F}_{b0} \\ \dot{F}_C &= \dot{F}_{C1} + \dot{F}_{C2} + \dot{F}_{C0} \end{aligned}\right\} \qquad (6\text{-}1)$$

Hệ phương trình trên có 9 ẩn. Ta đưa về 3 ẩn bằng cách sử dụng số phức (còn gọi là toán tử quay) :

$$a = e^{j\frac{2\Pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

và viết lại như sau :

$$\left.\begin{aligned} \dot{F}_a &= \dot{F}_{a1} + \dot{F}_{a2} + \dot{F}_{a0} \\ \dot{F}_b &= a^2\dot{F}_{a1} + a\dot{F}_{a2} + \dot{F}_{a0} \\ \dot{F}_C &= a\dot{F}_{a1} + a^2\dot{F}_{a2} + \dot{F}_{a0} \end{aligned}\right\} \qquad (6\text{-}2)$$

Giải hệ phương trình (6-2) ta nhận được :

$$\left.\begin{aligned} \dot{F}_{a0} &= \frac{1}{3}(\dot{F}_a + \dot{F}_b + \dot{F}_C) \\ \dot{F}_{a1} &= \frac{1}{3}(\dot{F}_a + a\dot{F}_b + a^2\dot{F}_C) \\ \dot{F}_{a2} &= \frac{1}{3}(\dot{F}_a + a^2\dot{F}_b + a\dot{F}_C) \end{aligned}\right\} \qquad (6\text{-}3)$$

Hệ (6-3) chính là kết quả phân tích hệ thống 3 véc tơ không đối xứng ban đầu $\dot{F}_a, \dot{F}_b, \dot{F}_c$ bất kỳ thành các thành phần đối xứng. Các véctơ pha còn lại của hệ thống thành phần suy ra được theo các quan hệ góc pha :

$$\dot{F}_{a0} = \dot{F}_{b0} = \dot{F}_{C0}$$
$$\dot{F}_{b1} = a^2\dot{F}_{a1} \; ; \; \dot{F}_{C1} = a\dot{F}_{a1}$$
$$\dot{F}_{b2} = a\dot{F}_{a2} \; ; \; \dot{F}_{C2} = a^2\dot{F}_{a2}$$

Sau đây là một số khái niệm gắn liền với hệ thống 3 pha không đối xứng.

- Hệ thống ba pha được gọi là cân bằng nếu :

$$\dot{F}_a + \dot{F}_b + \dot{F}_C = 0$$

Người ta gọi hệ số không cân bằng là tỉ số :

$$k_0 = \frac{F_{a0}}{F_{a1}}$$

Như vậy nếu hệ thống 3 pha cân bằng thì $k_0 = 0$.
Hệ số không đối xứng được định nghĩa là :

$$k_2 = \frac{F_{a2}}{F_{a1}}$$

Hệ thống ba pha là đối xứng nếu $k_2 = 0$. Như vậy hệ thống thành phần thứ tự thuận chính là trường hợp riêng của hệ thống đối xứng và cân bằng. Hệ thống thứ tự không là hệ thống đối xứng nhưng không cân bằng.

Áp dụng lý thuyết phân tích vừa nêu cho hệ thống điện, các đại lượng ba pha như dòng điện, điện áp, sđđ sẽ có thể coi như bao gồm các hệ thống thành phần thứ tự thuận, thứ tự nghịch, thứ tự không. Vì mạch điện là tuyến tính nên có thể áp dụng phương pháp xếp chồng để tính toán đối với từng thành phần thứ tự. Kết quả được tổng hợp lại theo các quan hệ (6-1).

Một số tính chất của hệ thống đại lượng 3 pha của mạch điện :

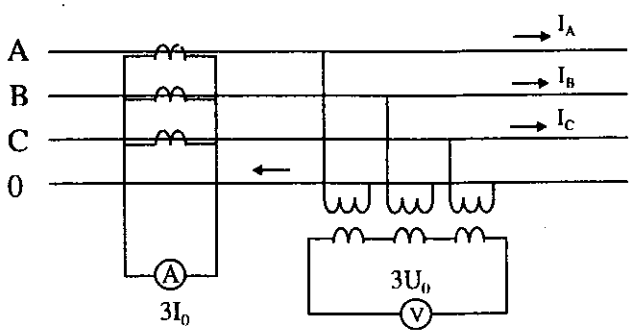
1. Hệ thống dòng điện dây trong hệ thống điện ba pha có trung điểm không nối đất (và không có dây trung tính) là hệ thống cân bằng, tức là không có thành phần thứ tự không. Đó là vì $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 3\dot{I}_0 = 0$.

2. Dòng điện từ trung điểm đi vào đất (hoặc dây trung tính) bằng 3 lần dòng điện thứ tự không.

3. Hệ thống điện áp dây là hệ thống cân bằng. Đó là vì :

$$\dot{U}_{AB} + \dot{U}_{BC} + \dot{U}_{CA} = 0$$

4. Ngoài ý nghĩa toán học, các thành phần thứ tự nghịch và thứ tự không còn mang ý nghĩa vật lý. Chẳng hạn có thể lọc được thành phần dòng điện và điện áp thứ tự không nhờ nối máy biến dòng và máy biến điện áp như hình 6.2.



Hình 6.2

6.3 ĐIỆN KHÁNG THỨ TỰ NGHỊCH VÀ THỨ TỰ KHÔNG

Tất cả các tổng trở đặc trưng cho các phần tử của mạng điện, vẫn thường áp dụng để tính toán chế độ làm việc bình thường của HTĐ (3 pha đối xứng) chính là tổng trở thứ tự thuận. Chúng đặc trưng cho phản ứng của mạch đối với dòng điện 3 pha đối xứng thứ tự thuận. Với hệ thống dòng điện thứ tự nghịch và thứ tự không, phản ứng của mạch bị khác đi. Trị số điện kháng không còn giống như với hệ thống dòng điện thứ tự thuận.

Nói chung có thể áp dụng các qui tắc sau để xem xét :

1. Các phần tử đứng yên (không chuyển động quay) điện kháng thứ tự nghịch bằng điện kháng thứ tự thuận. Điều này dễ nhận thấy, bởi vì khi không có chuyển động tương đối (quay) giữa các bộ phận thì từ trường sinh ra lúc cho hệ thống dòng điện thứ tự thuận hay thứ tự nghịch chạy qua các pha không có gì khác biệt. Thứ tự các pha chỉ mang tính qui ước: một pha bất kỳ A và 2 pha còn lại là B, C. Khi có chuyển động quay (máy phát, động cơ ...) thì nói chung $X_2 \neq X_1$, bởi chuyển động tương đối giữa các cuộn dây và từ trường quay không giống nhau tính theo thứ tự của các cuộn dây.

2. Các phần tử không có hỗ cảm giữa các pha thì $X_0 = X_1$, ngược lại $X_0 \neq X_1$. Có thể giải thích điều này bởi từ thông tổng hợp giữa các pha có hỗ cảm, khi có dòng điện thứ tự không (cùng góc pha) chạy qua thường lớn hơn nhiều khi dòng điện 3 pha là thứ tự thuận (lệch pha nhau 120°).

3. Trong mạch có điện dung thì cả thành phần tác dụng (điện trở) thứ tự không cũng khác với thứ tự thuận. Chẳng hạn, tổng trở của đường dây siêu cao áp do ảnh hưởng bởi điện dung các pha so với đất phần thực của tổng trở tương đương thay đổi đáng kể so với điện trở thứ tự thuận.

Hãy xét cụ thể hơn điện kháng của các phần tử.

1. Máy phát điện đồng bộ

Vì là phần tử có chuyển động quay nên $X_2 \neq X_1$. Để xác định X_2 bằng thực nghiệm người ta đặt các cuộn dây pha máy phát điện vào điện áp thứ tự nghịch. Khi đó dòng điện chạy trong các cuộn dây sẽ tạo ra từ trường quay với vận tốc là 2ω so với cuộn dây ro to. Tương quan dòng, áp sẽ cho phép xác định điện kháng X_2.

Khi không có số liệu thực nghiệm (cho trong lý lịch máy) có thể tính gần đúng:

- Với máy có cuộn cản:

$$X_2 \approx \frac{X''_d + X''_q}{2} \approx X''_d \ ;$$

- Với máy không cuộn cản:

$$X_2 \approx \sqrt{X'_d X_q} \approx 1{,}45\, X'_d \ .$$

Điện kháng thứ tự không $X_0 \neq X_1$, vì máy phát là phần tử có hỗ cảm. Khi cho dòng điện thứ tự không chạy vào các cuộn dây pha của máy phát điện (phải có dây trung tính), có thể xác định được X_0 bằng thực nghiệm. Trị số gần đúng:

$$X_0 = (0{,}15 \div o{,}6)\, X''_d \ .$$

Tuy nhiên rất ít khi phải xét đến điện kháng thứ tự không của máy phát vì trung tính của máy phát thường không nối đất và cũng không có dây trung tính. (khi đó có thể coi $X_0 = \infty$).

2. Phụ tải tổng hợp

Phụ tải tổng hợp có thể chứa các động cơ (phần tử có chuyển động quay) do đó, nói chung $X_2 \neq X_1$. Ngoài ra phụ tải tổng hợp còn có thể chứa cả phần mạng điện cung cấp, do đó trong tính toán ngắn mạch chỉ có thể lấy gần đúng trị số X_2. Trong hệ đơn vị tương đối (với lượng cơ bản là tổng công suất phụ tải và điện áp thanh cái cung cấp), khi nút tải tính ở cấp (6 ÷ 10) kV có thể lấy :

$$Z_2 = 0{,}18 + j0{,}24 \ \text{ hay } \ X_2 \approx 0{,}35 \ .$$

Với nút tải tính ở điện áp cao hơn (từ 35 kV trở lên) có thể lấy :

$$Z_2 = 0{,}18 + j0{,}35 \ \text{ hay } \ X_2 \approx 0{,}45 \ .$$

Cần chú ý là tổng trở thứ tự nghịch của phụ tải không phụ thuộc vào chế độ ngắn mạch (duy trì hay quá độ).

3. Kháng điện, tụ điện

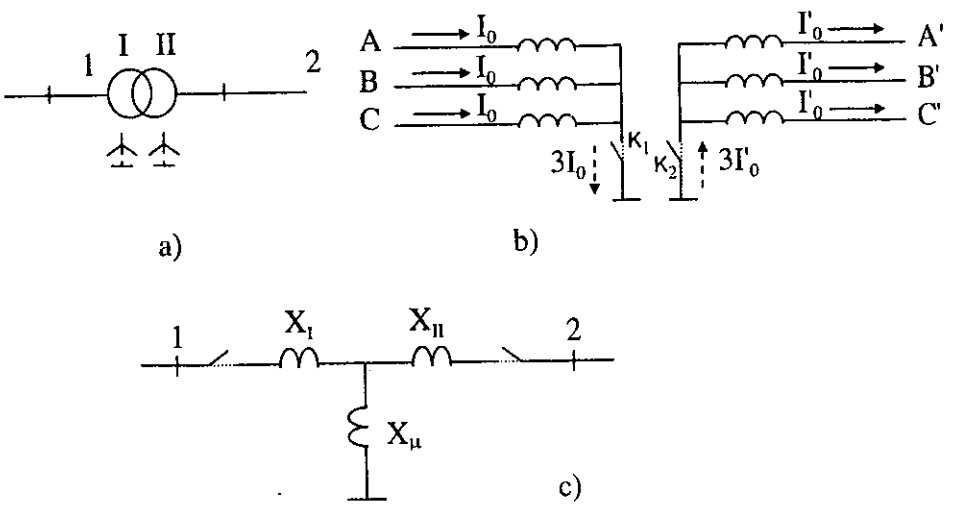
Kháng điện và tụ điện đều là các phần tử đứng yên, không có hỗ cảm giữa các pha, do đó có thể lấy $X_2 = X_1$; $X_0 = X_1$.

4. Máy biến áp

Máy biến áp là phần tử đứng yên nên $X_2 = X_1$.

Sơ đồ thay thế thứ tự nghịch và các thông số tính toán tương ứng của máy biến áp không có gì khác so với sơ đồ thứ tự thuận. Trong khi đó sơ đồ thứ tự không của các máy biến áp có sai khác đáng kể so với sơ đồ thứ tự thuận.

a. Xét trường hợp đơn giản nhất, máy biến áp hai cuộn dây, đấu sao cả sơ cấp lẫn thứ cấp (hình 6.3,a)

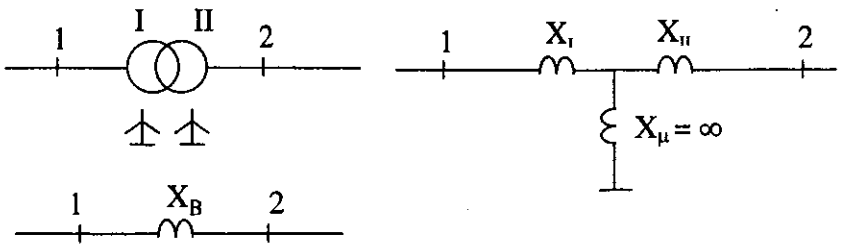


Hình 6.3

Dòng điện thứ tự không có chạy được qua các cuộn dây của máy biến áp hay không phụ thuộc hoàn toàn vào tình trạng của trung tính (nối đất hay không). Nếu các trung tính đều được nối đất (biểu thị bằng các khoá K_1 và K_2 đều đóng) thì dòng điện thứ tự không chạy qua máy biến áp hoàn toàn bình thường, gần giống như dòng điện thứ tự thuận (hình 6.3,b). Do đó sơ đồ thay thế cũng giống như sơ đồ thứ tự thuận (hình 6.3,c với K_1 và K_2 đóng). Có sự khác nhau chút ít ở một số trường hợp đối với trị số của điện kháng X_μ (điện kháng từ hoá). Khi máy biến áp gồm 3 máy biến áp một pha (độc lập) hoặc máy biến áp 3 pha 5 trụ, mạch từ làm việc với dòng điện thứ tự không không có gì khác so với dòng thứ tự thuận, lúc đó X_μ có trị số khá lớn. Thường có thể coi $X_\mu = \infty$ và sơ đồ thay thế máy biến áp có dạng rút gọn với $X_B = X_I + X_{II}$ và có trị số như đối với sơ đồ thứ tự thuận (hình 6.4)

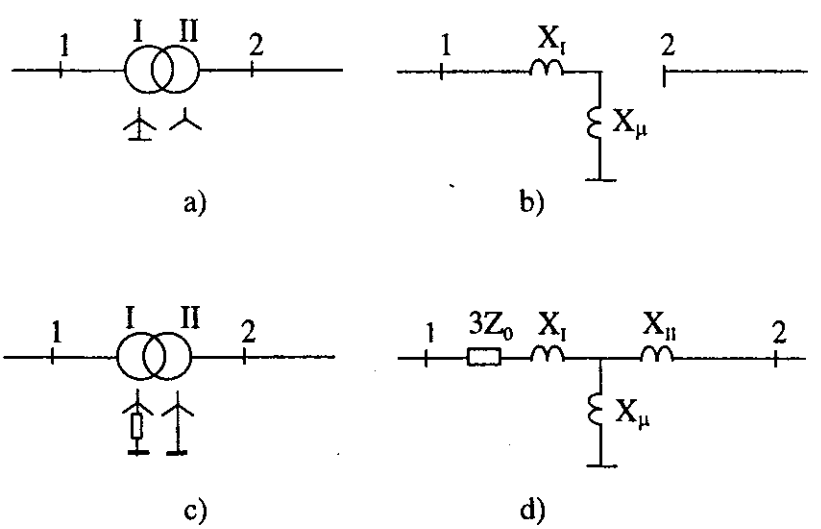
Với máy biến áp 3 pha 3 trụ từ thông thứ tự không của 3 cuộn dây cùng pha, không triệt tiêu nên phải khép mạch ra ngoài không khí, từ trở lớn hơn nên X_μ nhỏ. Thí nghiệm cho thấy $X_\mu = (0,3 \div 1)$. Do đó lúc tính chính xác không thể bỏ qua X_μ.

Khi trung tính của cuộn dây không được nối đất thì dòng điện thứ tự không sẽ hoàn toàn không suất hiện trong cuộn dây đó. Sơ đồ thay thế như trên (hình 6.3,c), tương ứng với K_1 hoặc K_2 mở (hoặc cả hai).



Hình 6.4

Nếu trung tính phía sơ cấp nối đất nhưng trung tính phía thứ cấp cách điện (K_1 đóng, K_2 mở) thì máy biến áp làm việc như ở trạng thái không tải. Dòng thứ tự không ở phía thứ cấp hoàn toàn không có, còn dòng điện phía sơ cấp chỉ là dòng không tải (chạy qua các điện kháng nối tiếp $X_1 + X_\mu$). Với máy biến áp 3 pha 3 trụ có thể dùng sơ đồ thứ tự không như trên hình 6.5,b. Các trường hợp khác, bỏ qua cả X_μ , nên sơ đồ trở thành nhánh cụt (bị đứt), thể hiện không có dòng điện nào chay qua.

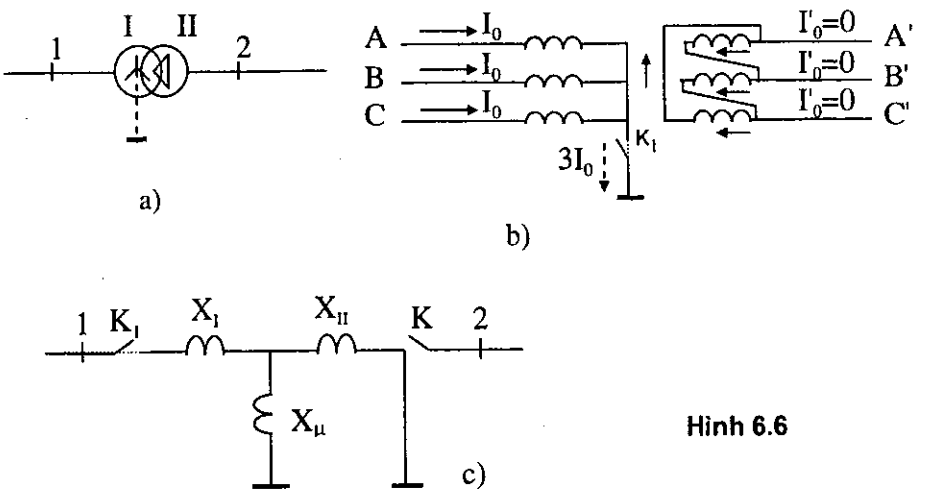


Hình 6.5

Nếu trung tính cuộn dây của máy biến áp không được cách điện hoàn toàn mà nối qua một tổng trở nào đó (hình 6.5,c) thì trong sơ đồ thay thế thứ tự không của

máy biến áp đó cần đưa tổng trở bằng $3Z_0$ vào vị trí tương ứng của các khoá K (hình 6.5,d). Sơ đồ tổng trở cần được nhân lên 3 lần bởi dòng điện chạy trong tổng trở này bằng $3I_0$. Khi tách sơ đồ thứ tự không theo từng pha để tính, dòng điện chạy qua tổng trở $3Z_0$ chỉ là I_0, nhưng điện áp rơi trên tổng trở vẫn tương đương. Không nên nhầm vị trí của X_μ với vị trí của Z_0. Với máy biến áp một pha hoặc ba pha năm trụ, $X_0 = \infty$ có thể bỏ qua nhưng $3Z_0$ vẫn phải đưa vào tính toán. Nếu trung tính 2 phía đều nối qua tổng trở thì cả 2 khoá K đều phải được thay bằng tổng trở tương ứng.

b. Trường hợp máy biến áp 2 cuộn dây đấu sao-tam giác

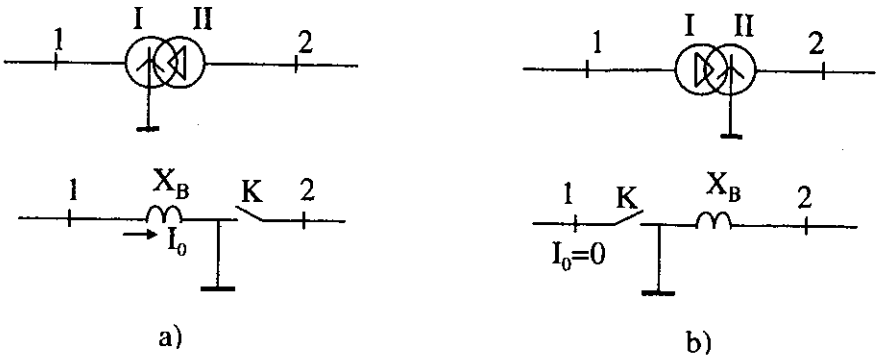


Hình 6.6

Nếu phía sơ cấp của máy biến áp nối sao với trung tính nối đất (K_1 đóng) thì dòng điện thứ tự không có thể chạy vào các cuộn dây này. Các cuộn dây pha phía thứ cấp (cuộn đấu tam giác) có từ thông cảm ứng sinh ra các dòng điện cùng pha cùng trị số với nhau nên chúng chạy khép trong mạch tam giác (hình 6.6, b). Theo định luật Kirchhof 1, mạch ngoài không có dòng điện. Máy biến áp làm việc như ở trạng thái ngắn mạch vì dòng điện thứ cấp chỉ chạy qua các điện kháng tản bản thân cuộn dây. Sơ đồ thay thế tương ứng sẽ giống như nối đất điện kháng thứ cấp (hình 6.6,c). Dòng thứ cấp không chạy qua mạch ngoài nên như có khoá K luôn mở.

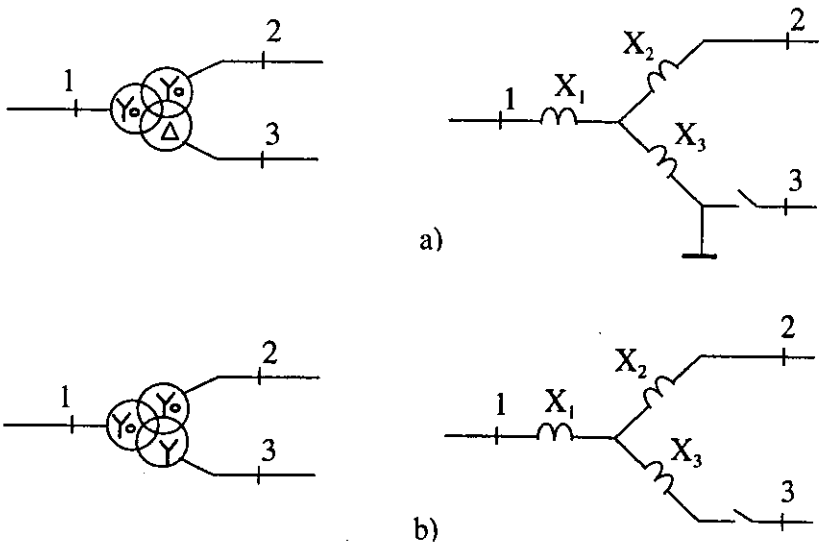
Trong trường hợp này luôn có thể bỏ qua được điện kháng X_μ , do nó nối song song với một điện kháng có trị số rất nhỏ X_{II}. Khi đó sơ đồ thay thế có dạng một điện kháng $X_B = X_I + X_{II}$ nối đất phía cuộn dây tam giác (hình 6.7,a,b). Dễ thấy rằng sơ đồ không phụ thuộc tương quan sơ cấp - thứ cấp đối với cuộn dây tam giác (hình 6.7)

Khi cuộn dây đấu tam giác đấu vào phía nguồn (sơ cấp) mạch điện sẽ bị hở ngay tại khoá K vì dòng thứ tự không không chạy được vào cuộn dây đấu tam giác. Trong trường hợp máy biến áp 2 cuộn dây đấu sao - tam giác khoá K luôn bị mở.

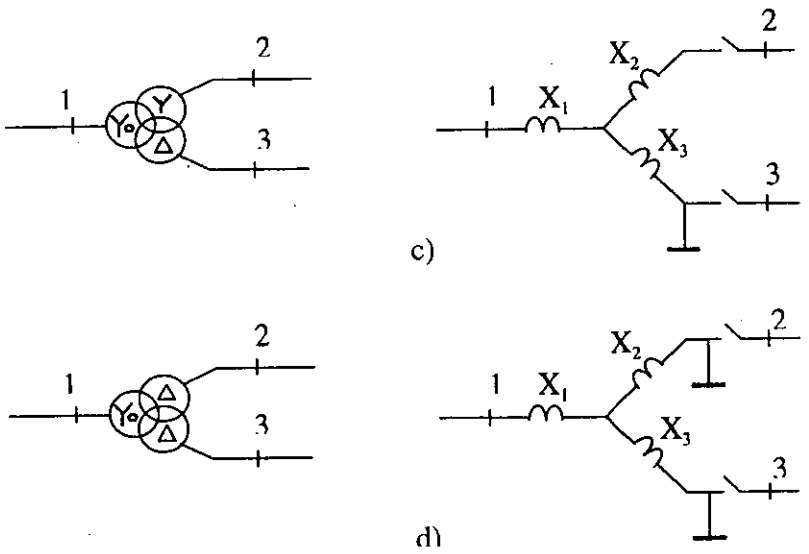


Hình 6.7

Từ các phân tích ở trên, ta có thể suy ra tương tự cho sơ đồ thay thế thứ tự không của các loại máy biến áp 3 cuộn dây. Khi có cuộn dây đấu tam giác, điện kháng từ hoá luôn có thể được bỏ qua (xem hình 6.8).



Hình 6.8
Một số kiểu đấu dây của máy biến áp ba cuộn dây và sơ đồ thay thế thứ tự không



Hình 6.8

5. Đường dây tải điện

Các đường dây tải điện trên không và dây cáp là phần tử không có chuyển động quay nên $X_2 = X_1$. Tuy nhiên giữa các pha có hỗ cảm nên nói chung $X_0 \neq X_1$. Điện kháng thứ tự không của đường dây phụ thuộc vào cấu tạo của dây dẫn, tiết diện dây, kích thước cột, số lộ và điện áp của đường dây. Để xác định điện kháng thứ tự không của đường dây tải điện có thể áp dụng các công thức tính toán kết hợp với đo đạc kiểm tra bằng thực nghiệm (xem phụ lục 4). Ở giai đoạn thiết kế hoặc trong các tính toán không đòi hỏi độ chính xác cao có thể lấy thông số X_0 theo các cấu trúc điển hình (xem bảng 6-1)

Bảng 6-1

Đặc tính đường dây	Tỷ số X_0/X_1
Đường dây đơn, không có dây chống sét	3,5
Đường dây đơn, có dây chống sét bằng thép	3,0
Đường dây đơn, có dây chống sét dẫn điện tốt	2,0
Đường dây kép, không có dây chống sét	5,5
Đường dây kép, có dây chống sét bằng thép	4,7
Đường dây kép, có dây chống sét dẫn điện tốt	3,0

Khi tính sơ bộ, với các đường dây trên không $U \leq 220$ kV có thể lấy

$$X_0 \approx 3X_1$$

Các đường dây cáp $R_0 \approx 10\,R_1$:

$$X_0 \approx (3{,}5 \div 4{,}6)X_1 \ .$$

Các đường dây siêu cao áp cần được tính toán riêng R_0, X_0 cho mỗi trường hợp.

Sở dĩ các đường dây cáp và đường dây trên không điện trở thứ tự không cũng lớn lên nhiều do ảnh hưởng rất mạnh của điện trở đất (vỏ cáp) và điện dung ký sinh.

6. Các sơ đồ tổng hợp thứ tự thuận, thứ tự nghịch và thứ tự không của mạng điện

Cũng như đối với sơ đồ thứ tự thuận, sơ đồ tổng hợp thứ tự nghịch và thứ tự không của toàn hệ thống điện gần như là sự ghép nối sơ đồ thay thế của các phần tử.

a) Sơ đồ thứ tự thuận

Sơ đồ thứ tự thuận được thiết lập cũng chính là sơ đồ tính toán ngắn mạch 3 pha, phụ thuộc vào chế độ ngắn mạch tính toán. Khi tính trị số ban đầu của dòng điện ngắn mạch chu kỳ (dòng điện quá độ) máy phát được thay thế bằng $E_{\sim}''$ và X''_d (theo phương pháp gần đúng), còn khi ngắn mạch duy trì thay bằng $E_{q\,gh}$ và X_d (hoặc U_{dm}). Các phần tử khác của mạng điện không có gì thay đổi so với khi tính toán ngắn mạch 3 pha. Điều đáng chú ý là điểm ngắn mạch của sơ đồ thứ tự thuận, trong tính ngắn mạch không đối xứng không nối với trung điểm của sơ đồ (là điểm nối trung điểm của các máy phát, phụ tải, máy biến áp ...) bởi vì điện áp thứ tự thuận tại điểm ngắn mạch khác không.

b) Sơ đồ thứ tự nghịch

Sơ đồ thứ tự nghịch, nói chung giống như đối với sơ đồ thứ tự thuận. Có các điểm cần chú ý sau :

- Các sđđ trong sơ đồ thứ tự nghịch đều bằng 0 (bởi các sđđ được coi là đối xứng trong tình trạng ngắn mạch).

- Điện kháng thứ tự nghịch của nguồn (máy phát) và phụ tải khác với điện kháng thứ tự thuận.

- Trị số điện kháng trên sơ đồ thứ tự nghịch không phụ thuộc vào chế độ ngắn mạch (quá độ hay duy trì).

Cũng như trong sơ đồ thứ tự thuận, trung điểm của sơ đồ không nối với điểm ngắn mạch. Đôi khi để khỏi nhầm lẫn người ta ký hiệu điện áp thứ tự nghịch nối vào điểm ngắn mạch.

c) Sơ đồ thứ tự không

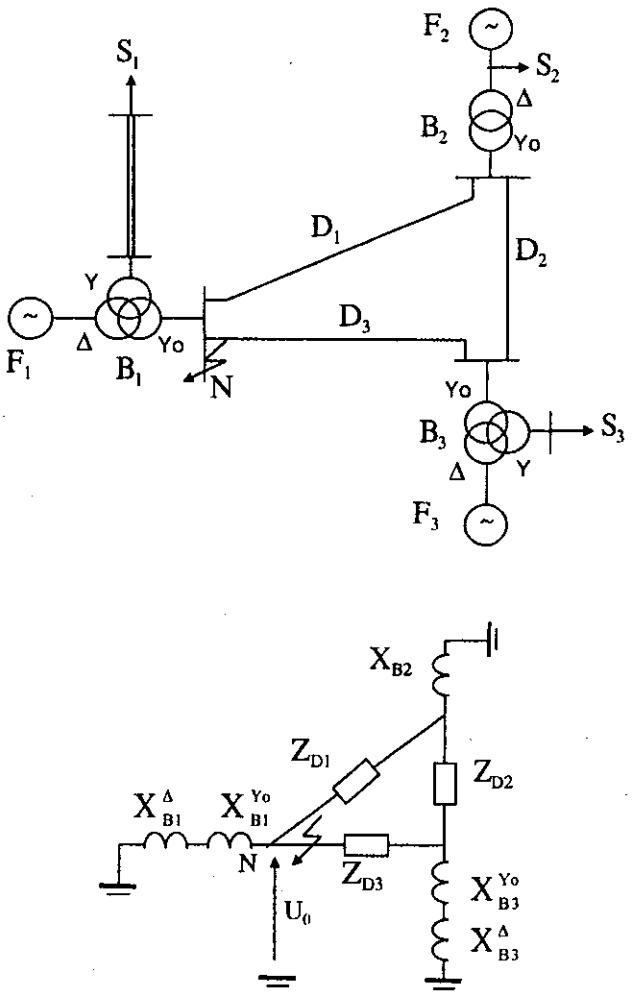
Sơ đồ thứ tự không thường khác hẳn với sơ đồ thứ tự thuận và thứ tự nghịch. Nhiều phần tử của mạng không cần đưa vào sơ đồ thứ tự không (khi biết rõ chúng không có dòng điện thứ tự không chạy qua). Sđđ nguồn trong sơ đồ thứ tự không cũng luôn luôn bằng không, và sơ đồ không phụ thuộc vào chế độ ngắn mạch (giống như đối với sơ đồ thứ tự nghịch).

Một điểm khác biệt nữa của sơ đồ thứ tự không (so với cả sơ đồ thứ tự thuận và thứ tự nghịch) là cần phải kể đến tổng trở của mạch trung tính (điện trở nối đất trung tính hoặc tổng trở bản thân dây trung tính). Các tổng trở này cần được nhân lên 3 lần trong sơ đồ thứ tự không. Đó là vì khi tách ra như sơ đồ 1 pha để tính toán, dòng điện thứ tự không chạy qua các phần tử này nhỏ hơn (chỉ bằng 1/3) trị số dòng điện thực chạy qua chúng. Cần tăng tổng trở mạch trung tính lên 3 lần để giữ nguyên điện áp, còn dòng điện sau khi tính toán sẽ phải nhân với 3.

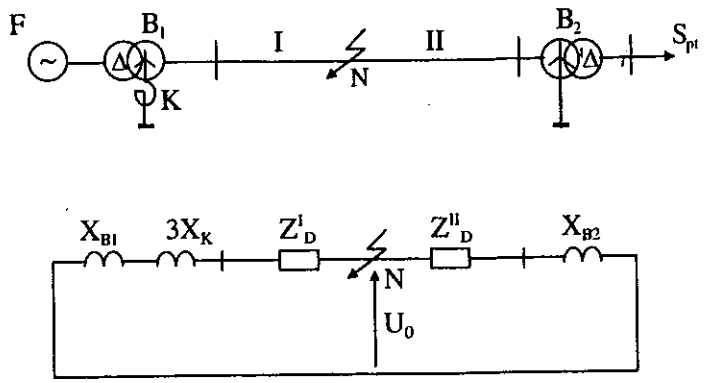
Ngoài ra, điện áp điểm trung tính của các phần tử trong sơ đồ thứ tự không, nói chung không bằng không (khi xét đến tổng trở các mạch trung tinh). Vì thế trung điểm của sơ đồ thứ tự không được coi là điểm trung tính của điện áp thứ tự không tại điểm ngắn mạch.

Về nguyên tắc, có thể thiết lập sơ đồ thứ tự không bằng cách ghép nối sơ đồ của từng phần tử như đối với sơ đồ thứ tự thuận (nghịch). Tuy nhiên số phần tử của sơ đồ thứ tự không thường ít hơn nhiều so với sơ đồ thứ tự thuận, nghịch. Đó là vì chỉ có nhứng phần tử nối liền đến điểm ngắn mạch mới tham gia vào sơ đồ . Do đó người ta thường thực hiện thiết lập sơ đồ thứ tự không theo cách sau đây. Xuất phát từ điểm ngắn mạch (coi là có điện áp U_0) đi về mọi hướng của sơ đồ. Mạch của sơ đồ theo một hướng nào đó sẽ kết thúc bằng một nhánh cụt nếu gặp cuộn dây đấu sao của máy biến áp có trung tính cách điện, hoặc sẽ kết thúc bằng nhánh nối đất nếu gặp cuộn dây đấu tam giác. Mọi phụ tải trong sơ đồ thứ tự không đều có thể bỏ qua vì trung điểm của các thiết bị dùng điện thường được cách điện. Nhánh đi đến phụ tải, ví thế cũng sẽ là nhánh cụt. Đôi khi nếu để ý thấy trong phần mạng bị ghép vào phụ tải tổng hợp có các cuộn dây máy biến áp đấu sao với trung tính nối đất, hoặc nối tam giác thì cần phải thay thế đúng theo tổng trở cuộn dây (không bỏ qua hoàn toàn được).

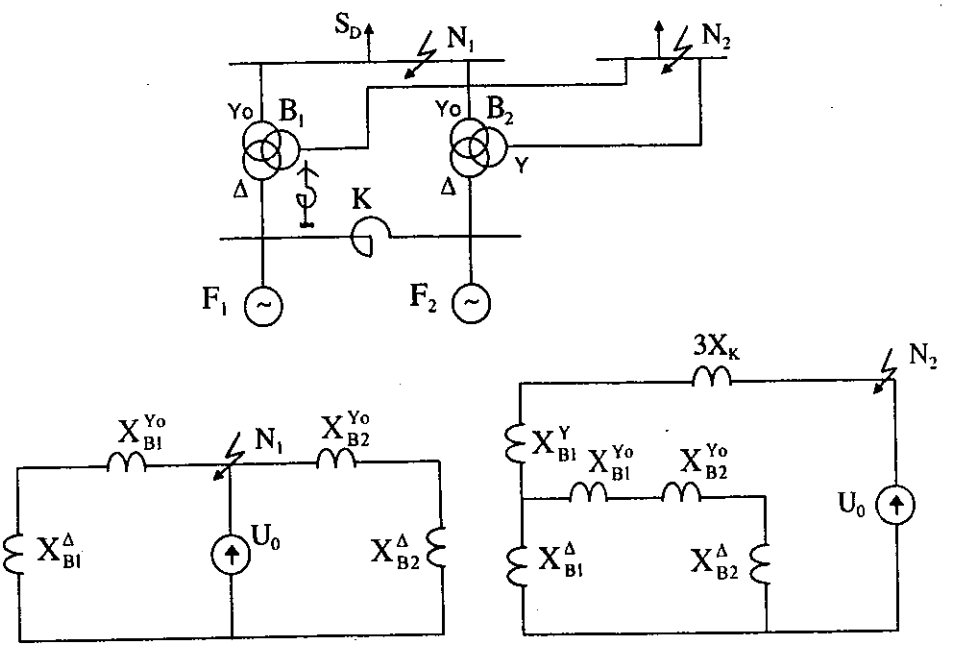
Trên hình 6.9 và 6.10 là một vài ví dụ về sơ đồ thứ tự không.



Hình 6.9 Ví dụ về sơ đồ thứ tự không của HTĐ phức tạp



a)



b)

Hình 6.10 Vài ví dụ khác

6.4 DÒNG ĐIỆN VÀ ĐIỆN ÁP TẠI ĐIỂM NGẮN MẠCH

1. Quy ước đối với sơ đồ

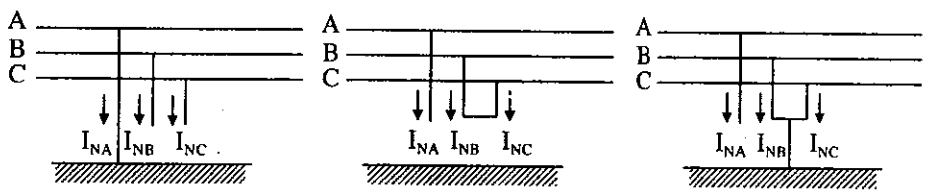
Khi ngắn mạch không đối xứng trạng thái các pha không giống nhau. Để thuận tiện cho việc tính toán, phân tích người ta đã đưa ra các qui ước chung đối với sơ đồ như sau :

a) Pha A là pha đặc biệt trong tình trạng ngắn mạch không đối xứng.

Với qui ước này, khi ngắn mạch một pha, cần ký hiệu pha A là pha bị ngắn mạch, còn khi ngắn mạch hai pha và hai pha nối nất, pha A phải là pha không bị ngắn mạch.

b) Dòng điện ngắn mạch tại chỗ ngắn mạch có chiều đi từ dây dẫn ra chỗ ngắn mạch, điện áp tính từ dây dẫn đến trung điểm của sơ đồ.

Sơ đồ hình 6.11 thể hiện quy ước về chiều của dòng điện tại chỗ ngắn mạch tương ứng với các dạng ngắn mạch không đối xứng. Theo quy ước này thì dòng điện ngắn mạch hai pha tại chỗ ngắn mạch $I_{NB} = - I_{NC}$. Các pha không bị ngắn mạch sẽ có dòng điện tại điểm ngắn mạch bằng 0.



Hình 6.11

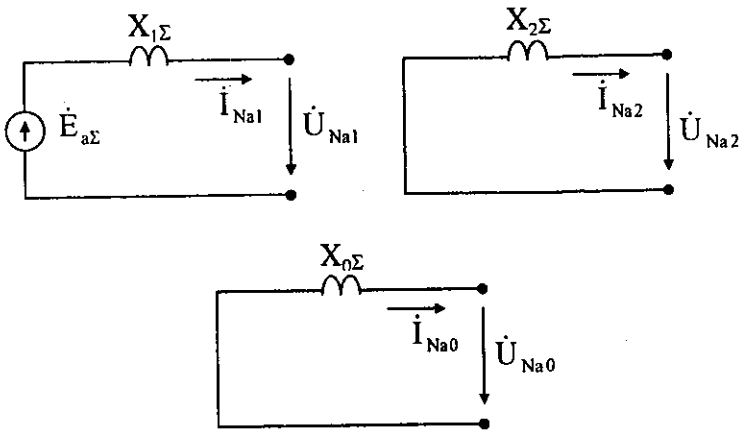
Ngoài ra, luôn quy ước rằng các sđđ thứ tự nghịch và thứ tự không của nguồn trong các sơ đồ thứ tự tương ứng của chúng đều bằng không (chỉ có nguồn sđđ thứ tự thuận).

2. Hệ phương trình cơ bản đối với dòng điện và điện áp tại điểm ngắn mạch

Để đơn giản ta xét sơ đồ HTĐ đã được biến đổi tối giản về dạng chỉ có một điện kháng tổng hợp nối với điểm ngắn mạch (cho cả 3 sơ đồ thuận, nghịch, không). Dễ viết được 3 phương trình theo định luật Kirchof II cho các sơ đồ (hình 6.12):

$$\begin{aligned} \dot{U}_{Na1} &= \dot{E}_{a\Sigma} - j\dot{I}_{Na1}X_{1\Sigma} \\ \dot{U}_{Na2} &= -j\dot{I}_{Na2}X_{2\Sigma} \\ \dot{U}_{Na0} &= -j\dot{I}_{Na0}X_{0\Sigma} \end{aligned} \qquad (6\text{-}4)$$

Khi xét đến đầy đủ điện trở của mạch hệ phương trình vẫn có dạng hoàn toàn tương tự, chỉ cần thay $jX_{1\Sigma}$, $jX_{2\Sigma}$, $jX_{0\Sigma}$ tương ứng bằng $Z_{1\Sigma}$, $Z_{2\Sigma}$, $Z_{0\Sigma}$.



Hình 6.12

Ba phương trình chứa 6 ẩn số là $\dot{I}_{Na1}, \dot{I}_{Na2}, \dot{I}_{Na0}$ và $\dot{U}_{Na1}, \dot{U}_{Na2}, \dot{U}_{Na0}$. Do đó còn cần bổ sung thêm 3 phương trình nữa. Các phương trình có thể thiết lập được theo trạng thái của điểm ngắn mạch (xem hình 6.11):

$N^{(1)}$	$N^{(2)}$	$N^{(1,1)}$
$\dot{I}_{Nb} = 0$	$\dot{I}_{Na} = 0$	$\dot{I}_{Na} = 0$
$\dot{I}_{NC} = 0$	$\dot{I}_{Nb} = -\dot{I}_{Nc}$	$\dot{U}_{Nb} = 0$
$\dot{U}_{Na} = 0$	$\dot{U}_{Nb} = \dot{U}_{Nc}$	$\dot{U}_{Nc} = 0$

Các phương trình trên được viết cho các đại lượng tổng hợp nên để ghép với (6-4) cần sử dụng quan hệ (6-2) chuyển về các thành phần thứ tự thuộc pha A. Với 6 phương trình 6 ẩn, có thể giải dễ dàng để nhận các dòng điện và điện áp thành phần pha A tại điểm ngắn mạch. Cũng sử dụng (6-2) ta có thể tìm ra dòng, áp toàn phần tại điểm ngắn mạch các pha.

3. Ngắn mạch 2 pha

Ta xét cụ thể một trường hợp, chẳng hạn ngắn mạch 2 pha. Hệ phương trình trạng thái điểm ngắn mạch như sau :

$$\begin{aligned} &\dot{I}_{Na} = 0 \ . \\ &\dot{I}_{Nb} = -\dot{I}_{Nc} \ ; \\ &\dot{U}_{Nb} = \dot{U}_{Nc} \ . \end{aligned} \qquad (6\text{-}5)$$

Xuất phát từ (6-4) và (6-5) dựa vào quan hệ (6-2) ta giải ra các đại lượng thành phần. Trước hết ta có :

$$\dot{I}_{Na0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_{Na} + \dot{I}_{Nb} + \dot{I}_{Nc}) = 0;$$

Do đó cũng có :

$$\dot{U}_{Na0} = 0 - j\dot{I}_{Na0} X_{0\Sigma} = 0 ;$$

Tiếp theo, ta có :

$$\dot{I}_{Na} = \dot{I}_{Na1} + \dot{I}_{Na2} + \dot{I}_{Na0} = 0;$$

mà $I_{Na0} = 0$, nên :

$$\dot{I}_{Na1} = -\dot{I}_{Na2} \quad ; \qquad (*)$$

Mặt khác , do $\dot{U}_{Nb} = \dot{U}_{Nc}$ nên có thể viết :

$$\dot{U}_{Na1} = \frac{1}{3}\left(\dot{U}_{Na} + a\dot{U}_{Nb} + a^2\dot{U}_{Nc}\right)$$

$$= \frac{1}{3}\left(\dot{U}_{Na} + (a + a^2)\dot{U}_{Nb}\right);$$

$$\dot{U}_{Na2} = \frac{1}{3}\left(\dot{U}_{Na} + a^2\dot{U}_{Nb} + a\dot{U}_{Nc}\right)$$

$$= \frac{1}{3}\left(\dot{U}_{Na} + (a^2 + a)\dot{U}_{Nb}\right).$$

Suy ra: $\dot{U}_{Na1} = \dot{U}_{Na2}$ (**)

Do có (**) , từ các phương trình cơ bản (6-4), viết được :

$$\dot{U}_{Na1} = \dot{E}_{a\Sigma} - j\dot{I}_{Na1} X_{1\Sigma} = -j\dot{I}_{Na2} X_{2\Sigma}.$$

Với (*) ta viết thành :

$$\dot{U}_{Na1} = \dot{E}_{a\Sigma} - j\dot{I}_{Na1} X_{1\Sigma} = +j\dot{I}_{Na1} X_{2\Sigma} .$$

Giải ra :

$$\dot{I}_{Na1} = \frac{\dot{E}_{a\Sigma}}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma})} .$$

Như vậy các thành phần còn lại cũng đã hoàn toàn xác định :

$$\dot{I}_{Na2} = -\dot{I}_{Na1}$$

$$\dot{U}_{Na1} = \dot{U}_{Na2} = j\dot{I}_{Na1} X_{2\Sigma}$$

Ta tính các đại lượng tổng hợp :

$$\dot{I}_{Na} = 0 \ ;$$

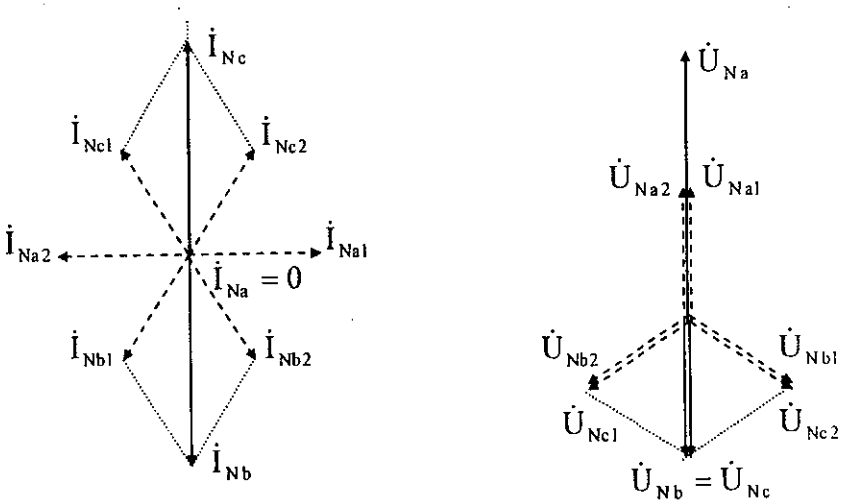
$$\dot{I}_{Nb} = \dot{I}_{Na0} + a^2\dot{I}_{Na1} + a\dot{I}_{Na2}$$
$$= (a^2 - a)\dot{I}_{Na1} = -j\sqrt{3}\,\dot{I}_{Na1};$$

$$\dot{I}_{NC} = \dot{I}_{Na0} + a\,\dot{I}_{Na1} + a^2\dot{I}_{Na2}$$
$$= (a - a^2)\dot{I}_{Na1} = j\sqrt{3}\,\dot{I}_{Na1} \ ;$$

$$\dot{U}_{Na} = \dot{U}_{Na0} + \dot{U}_{Na1} + \dot{U}_{Na2}$$
$$= 2\dot{U}_{Na1} = 2j\dot{I}_{Na1}X_{2\Sigma} \ .$$

$$\dot{U}_{Nb} = \dot{U}_{Na0} + a^2\dot{U}_{Na1} + a\dot{U}_{Na2}$$
$$= (a^2 + a)\dot{U}_{Na1} = -\dot{U}_{Na1}$$
$$= -j\dot{I}_{Na1}X_{2\Sigma} = \dot{U}_{NC}$$

Trên hình 6.13 thể hiện quan hệ giữa các thành phần dòng điện, điện áp các pha với đại lượng tổng bằng đồ thị véc tơ.



Hình 6.13

2. Ngắn mạch một pha

Các phương trình thể hiện trạng thái ngắn mạch :

$$\left.\begin{aligned} \dot{I}_{Nb} &= 0; \\ \dot{I}_{Nc} &= 0; \\ \dot{U}_{Na} &= 0. \end{aligned}\right\} \qquad (6\text{-}6)$$

Kết hợp với (6-4) ta giải được các thành phần dòng điện và điện áp pha A tại điểm ngắn mạch như sau.

Vì $\dot{I}_{Nb} = \dot{I}_{Nc} = 0$ nên theo (6-3) ta có ngay :

$$\dot{I}_{Na0} = \dot{I}_{Na1} = \dot{I}_{Na2} = \frac{1}{3}\dot{I}_{Na} .$$

Với điện áp $\dot{U}_{Na}$ ta có thể viết :

$$\dot{U}_{Na} = \dot{U}_{Na1} + \dot{U}_{Na1} + \dot{U}_{Na0} = 0 .$$

Từ các quan hệ trên, nếu cộng các phương trình cơ bản (6-4) lại với nhau ta có :

$$0 = \dot{E}_{a\Sigma} - j\dot{I}_{Na1}(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}) .$$

Suy ra :
$$\dot{I}_{Na1} = \frac{\dot{E}_{a\Sigma}}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})} .$$

Đó cũng chính là trị số của $\dot{I}_{Na2}$, $\dot{I}_{Na0}$. Các thành phần điện áp cũng hoàn toàn xác định bởi $\dot{I}_{Na1}$:

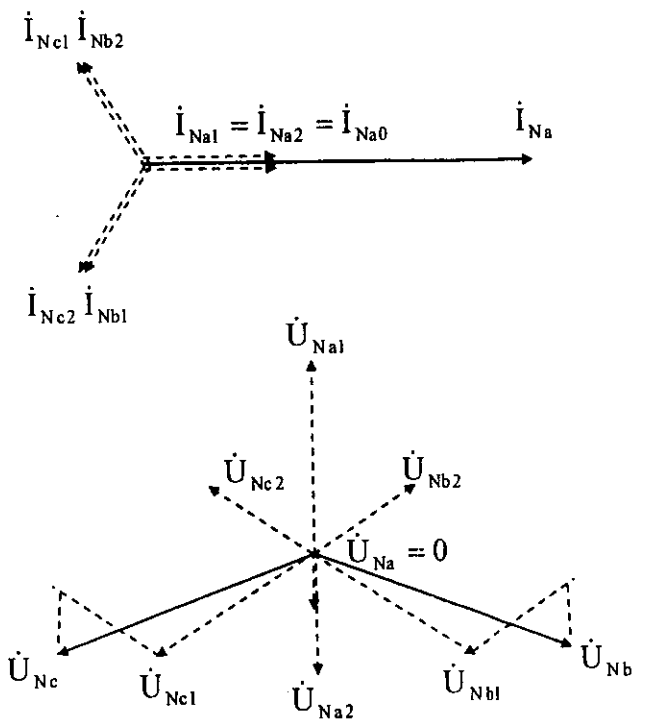
$$\dot{U}_{Na1} = \dot{E}_{a\Sigma} - j\dot{I}_{Na1}X_{1\Sigma} = j\dot{I}_{Na1}(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})$$
$$\dot{U}_{Na2} = -j\dot{I}_{Na2}X_{2\Sigma} = -j\dot{I}_{Na1}X_{2\Sigma}$$
$$\dot{U}_{Na0} = -j\dot{I}_{Na0}X_{0\Sigma} = -j\dot{I}_{Na1}X_{0\Sigma}$$

Các đại lượng tổng hợp, tính được theo $\dot{I}_{Na1}$:

$$\dot{I}_{Na} = 3\,\dot{I}_{Na1}$$
$$\dot{I}_{Nb} = \dot{I}_{NC} = 0$$
$$\dot{U}_{Na} = 0$$
$$\dot{U}_{Nb} = a^2\dot{U}_{Na1} + a\dot{U}_{Na2} + \dot{U}_{Na0}$$
$$= j\dot{I}_{Na1}[a^2(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}) - aX_{2\Sigma} - X_{0\Sigma}]$$
$$= j\dot{I}_{Na1}[(a^2 - a)X_{2\Sigma} + (a^2 - 1)X_{0\Sigma}]$$

$$\dot{U}_{NC} = a\dot{U}_{Na1} + a^2\dot{U}_{Na2} + \dot{U}_{Na0}$$
$$= j\dot{I}_{Na1}[a(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}) - a^2X_{2\Sigma} - X_{0\Sigma}]$$
$$= j\dot{I}_{Na1}[(a - a^2)X_{2\Sigma} + (a - 1)X_{0\Sigma}]$$

Đồ thị véc tơ thể hiện quan hệ giữa các thành phần dòng điện và điện áp các pha như trên hình 6-14.



Hình 6.14

3. Ngắn mạch 2 pha chập đất

Các phương trình trạng thái của điểm ngắn mạch :

$$\left.\begin{aligned} \dot{I}_{Na} &= 0\,; \\ \dot{U}_{Nb} &= 0\,; \\ \dot{U}_{Nc} &= 0\,. \end{aligned}\right\} \qquad (6\text{-}7)$$

Dòng điện và điện áp thành phần tại điểm ngắn mạch pha A cũng sẽ được giải trên cơ sở (6-4) và (6-7).

Trước hết từ quan hệ (6-3) có thể nhận ngay được các điện áp thành phần. Với :

$$\dot{U}_{Nb} = \dot{U}_{Nc} = 0 \ .$$

Ta có :

$$\dot{U}_{Na1} = \dot{U}_{Na2} = \dot{U}_{Na0} = \frac{1}{3}\dot{U}_{Na} \ .$$

Theo các phương trình cơ bản (6-4) ta tính được trị số các dòng điện thành phần theo các điện áp $\dot{U}_{Na1}, \dot{U}_{Na2}$ và $\dot{U}_{Na0}$. Ta có :

$$\left.\begin{aligned} \dot{I}_{Na1} &= \frac{\dot{E}_{a\Sigma} - \dot{U}_{Na1}}{j X_{1\Sigma}} \quad ; \\ \dot{I}_{Na2} &= -\frac{\dot{U}_{Na2}}{j X_{2\Sigma}} \quad ; \\ \dot{I}_{Na0} &= -\frac{\dot{U}_{Na0}}{j X_{0\Sigma}} \quad . \end{aligned}\right\} \qquad (6\text{-}8)$$

Cộng theo vế các phương trình trên và để ý rằng :

$$\dot{I}_{Na1} + \dot{I}_{Na2} + \dot{I}_{Na0} = \dot{I}_{Na} = 0$$

Ta có :

$$\frac{\dot{E}_{a\Sigma} - \dot{U}_{Na1}}{j X_{1\Sigma}} - \frac{\dot{U}_{Na2}}{j X_{2\Sigma}} - \frac{\dot{U}_{Na0}}{j X_{0\Sigma}} = 0 \ .$$

Thay $\dot{U}_{Na2}$ và $\dot{U}_{Na0}$ bằng $\dot{U}_{Na1}$ ta rút ra được :

$$\dot{U}_{Na1} = \frac{\dot{E}_{a\Sigma}}{X_{1\Sigma} + \dfrac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}} \cdot \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \qquad (6\text{-}9)$$

Thay $\dot{U}_{Na}$ vào biểu thức của $\dot{I}_{Na1}$ trong (6-7) ta có :

$$\dot{I}_{Na1} = \frac{\dot{E}_{a\Sigma}}{j\left(X_{1\Sigma} + \dfrac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}\right)} \qquad (6\text{-}10)$$

Kết hợp các biểu thức (6-9) và (6-10) ta có thể biểu diễn các điện áp ngắn mạch thành phần theo dòng điện $\dot{I}_{Na1}$:

$$\dot{U}_{Na1} = j\dot{I}_{Na1} \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} = \dot{U}_{Na2} = \dot{U}_{Na0} \ .$$

Sau đó theo (6-8) ta cũng có biểu thức của các dòng điện thành phần còn lại :

$$\dot{I}_{Na2} = -\frac{\dot{U}_{Na2}}{j X_{2\Sigma}} = -\dot{I}_{Na1}\frac{X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma}}$$

$$\dot{I}_{Na0} = -\frac{\dot{U}_{Na0}}{j X_{0\Sigma}} = -\dot{I}_{Na1}\frac{X_{2\Sigma}}{X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma}}$$

Các đại lượng tổng hợp tính được như sau :

$$\dot{I}_{Na} = 0$$

$$\dot{I}_{Nb} = a^2\dot{I}_{Na1} + a\dot{I}_{Na2} + \dot{I}_{Na0}$$

$$= \dot{I}_{Na1}\left[a^2 - \frac{X_{2\Sigma}+aX_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma}}\right]$$

$$\dot{I}_{Nc} = a\dot{I}_{Na1} + a^2\dot{I}_{Na2} + \dot{I}_{Na0}$$

$$= \dot{I}_{Na1}\left[a - \frac{X_{2\Sigma}+a^2X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma}}\right].$$

Trong các biểu thức trên có chứa toán tử quay a là phức số nên tính toán khá phức tạp. Trong thực tế người ta thường quan tâm đến trị tuyệt đối (biên độ hay trị số hiệu dụng). Có thể biến đổi để nhận được giá trị sau :

$$\left|a^2 - \frac{X_{2\Sigma}+aX_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma}}\right| = \left|a - \frac{X_{2\Sigma}+a^2X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma}}\right|$$

$$= \sqrt{3}\sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma}.X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma})^2}}$$

Như vậy về trị số tuyệt đối dòng điện ngắn mạch trong các pha B và C đều bằng nhau :

$$\left|\dot{I}_{Nb}\right| = \left|\dot{I}_{NC}\right| = \sqrt{3}\sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma}.X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma}+X_{0\Sigma})^2}}\ I_{Na1}\ .$$

Quan hệ giữa các đại lượng dòng điện và điện áp các pha tại điểm ngắn mạch được vẽ trên đồ thị véc tơ hình (6.15). So sánh với hình (6.14) ta thấy có sự đối ngẫu giữa dòng điện và điện áp trong 2 dạng ngắn mạch 1 pha và 2 pha chập đất.Có thể so sánh các quan hệ sau đây :

Ngắn mạch 1 pha

$$N^{(1)}$$

$$\dot{U}_{Na} = 0$$

$$\dot{I}_{Nb} = 0$$

$$\dot{I}_{NC} = 0$$

$$\dot{I}_{Na1} = \dot{I}_{Na2} = \dot{I}_{Na0}$$

$$\dot{I}_{Na} = 3\dot{I}_{Na1}$$

Ngắn mạch 2 pha chập đất

$$N^{(1,1)}$$

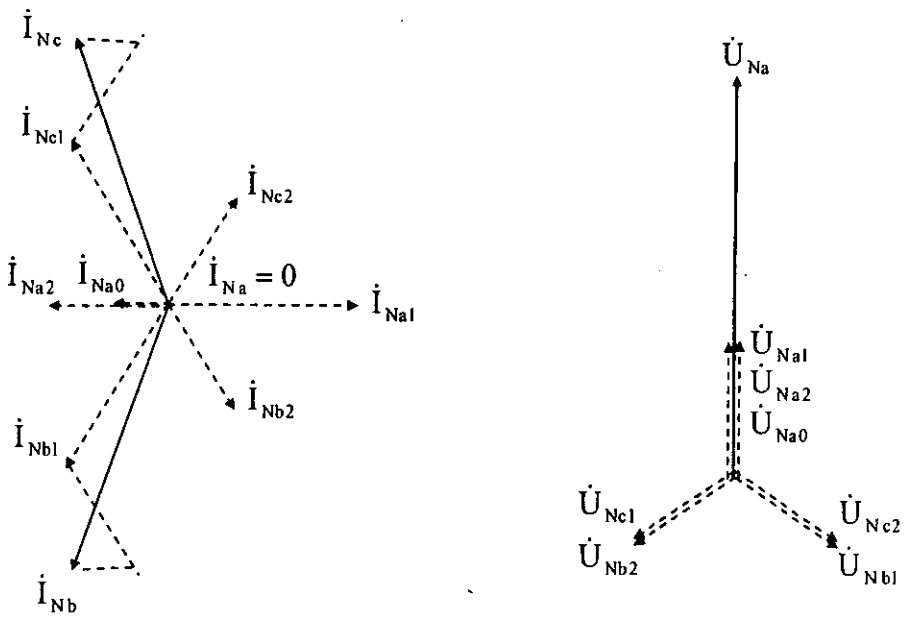
$$\dot{I}_{Na} = 0$$

$$\dot{U}_{Nb} = 0$$

$$\dot{U}_{NC} = 0$$

$$\dot{U}_{Na1} = \dot{U}_{Na2} = \dot{U}_{Na0}$$

$$\dot{U}_{Na} = 3\dot{U}_{Na1}$$



Hình 6.15

6.5 CÁC BƯỚC THỰC HIỆN TÍNH TOÁN DÒNG ĐIỆN NGẮN MẠCH KĐX TẠI ĐIỂM NGẮN MẠCH

Về nguyên tắc, để tính dòng điện ngắn mạch không đối xứng tại điểm ngắn mạch, sau khi biến đổi các sơ đồ thứ tự về dạng đơn giản nhất có thể áp dụng các phép tính như trên (mục 6-4) để nhận kết quả cụ thể. Tuy nhiên, trong thực tế có thể tính toán nhanh hơn dựa vào các nhận xét sau đây (xem bảng 6-2) :

Bảng 6-2

Ngắn mạch	Dòng ngắn mạch thứ tự thuận	Trị số dòng điện ngắn mạch tổng hợp ở các pha
$N^{(1)}$	$\dot{I}_{Na1} = \frac{\dot{E}_{a\Sigma}}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})}$	$I_{Na} = 3I_{Na1}$; $I_{Nb} = I_{NC} = 0$
$N^{(2)}$	$\dot{I}_{Na1} = \frac{\dot{E}_{a\Sigma}}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma})}$	$I_{Na} = 0$; $I_{Nb} = I_{NC} = \sqrt{3} I_{Na1}$
$N^{(1,1)}$	$\dot{I}_{Na1} = \frac{\dot{E}_{a\Sigma}}{j(X_{1\Sigma} + \frac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}})}$	$I_{Na} = 0$; $I_{Nb} = I_{NC} = \sqrt{3}\sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}\ I_{Na1}$

1. Dòng điện ngắn mạch thứ tự thuận của mọi dạng ngắn mạch đều có thể xác định theo biểu thức chung : $\dot{I}_{Na1}^{(n)} = \frac{\dot{E}_{a\Sigma}}{j(X_{1\Sigma} + X_{\Delta}^{(n)})}$;

Trong đó, $X_{\Delta}^{(n)}$ - là một điện kháng (gọi là điện kháng phụ của loại ngắn mạch n), với biểu thức hoàn toàn xác định theo dạng ngắn mạch (bảng 6-3) và được tính theo $X_{2\Sigma}$ và $X_{0\Sigma}$.

Từ biểu thức tính I_{Na1} có thể rút ra quy tắc sau (gọi là tuy tắc đẳng trị thứ tự thuận):

"Dòng điện thứ tự thuận của một dạng ngắn mạch không đối xứng bất kỳ đều có thể tính được như dòng điện ngắn mạch 3 pha ở sơ đồ thứ tự thuận nhưng tại điểm xa hơn một điện kháng $X_{\Delta}^{(n)}$. *Trị số của điện kháng* $X_{\Delta}^{(n)}$ *phụ thuộc vào trị số điện kháng tổng hợp của các sơ đồ thứ tự nghịch và thứ tự không, với biểu thức hoàn toàn xác định tuỳ thuộc dạng ngắn mạch n".* Với qui tắc đẳng trị thứ tự thuận ta có thể áp dụng mọi phương pháp tính toán ngắn mạch 3 pha để tính dòng điện thứ tự thuận tại điểm ngắn mạch, kể cả phương pháp đường cong tính toán.

2. Trị số của dòng điện ngắn mạch tổng hợp tại các pha có dòng điện ngắn mạch tỉ lệ với trị số của thành phần thứ tự thuận theo hệ số $m^{(n)}$:

$$I_N^{(n)} = m^{(n)} I_{Na1} \quad .$$

Hệ số tỉ lệ $m^{(n)}$ cũng có biểu thức hoàn toàn xác định phụ thuộc vào dạng ngắn mạch n (bảng 6-4).

Bảng 6-3

Dạng ngắn mạch	n	$X_{\Delta}^{(n)}$	$m^{(n)}$
$N^{(1)}$	1	$X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}$	3
$N^{(2)}$	2	$X_{2\Sigma}$	$\sqrt{3}$
$N^{(1,1)}$	1,1	$X_{2\Sigma} // X_{0\Sigma}$	$\sqrt{3}\sqrt{1-\frac{X_{2\Sigma} \times X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}$
$N^{(3)}$	3	0	1

Quy tắc đẳng trị thứ tự thuận cùng với các tính chất của dòng điện ngắn mạch vừa nêu đã cho phép suy ra cách tính đơn giản dòng điện ngắn mạch không đối xứng tại điểm ngắn mạch. Các bước thực hiện như sau :

1. Thiết lập sơ đồ thay thế tính toán các thứ tự thuận, nghịch, không của hệ thống điện, từ đó xác định các điện kháng tổng hợp $X_{2\Sigma}$ và $X_{0\Sigma}$ và điện kháng phụ $X_{\Delta}^{(n)}$. Cần chú ý rằng các điện kháng $X_{2\Sigma}$ và $X_{0\Sigma}$ được xác định giống như các tổng trở đầu vào của các sơ đồ (thứ tự nghịch, thứ tự không) nhìn từ điểm ngắn mạch. Mạch điện không nguồn (vì các sđđ thứ tự nghịch và thứ tự không bằng 0) nên luôn luôn tìm được $X_{2\Sigma}$ và $X_{0\Sigma}$ như điện kháng đẳng trị của toàn bộ sơ đồ.

2. Dựa vào sơ đồ thứ tự thuận và điện kháng phụ $X_{\Delta}^{(n)}$ (nối vào điểm ngắn mạch) xác định dòng điện ngắn mạch thứ tự thuận $I_{Nal}^{(n)}$ tại điểm ngắn mạch. Cách tính toán trong bước này hoàn toàn giống như đối với ngắn mạch 3 pha đối xứng, kể cả việc dùng phương pháp đường cong tính toán.

3. Tính dòng điện và điện áp ngắn mạch không đối xứng tại điểm ngắn mạch.

Ở bước này, nếu chỉ quan tâm đến trị số của dòng điện ngắn mạch (không cần tính góc pha) thì có thể áp dụng quan hệ :

$$I_N^{(n)} = m^{(n)} I_{Nal}^{(n)} \qquad (6\text{-}11)$$

Trị số dòng điện tính được theo biểu thức trên được hiểu là trị số hiệu dụng của dòng điện ngắn mạch không đối xứng tổng tại các pha bị ngắn mạch.

- Với ngắn mạch 1 pha - dòng điện ngắn mạch pha A chạy vào điểm ngắn mạch.
- Với ngắn mạch 2 pha và 2 pha nối đất - dòng điện ngắn mạch chạy trong pha B và pha C đi qua điểm ngắn mạch (chúng luôn có trị số bằng nhau).

Để xác định cả góc pha cho các dòng điện ngắn mạch cần phải dựa vào các đồ thị véc tơ (hình 6.13, 6.14, 6.15). Để xác định điện áp tại điểm ngắn mạch, trước tiên cần tính điện áp thứ tự thuận :

$$\dot{U}_{Nal}^{(n)} = jX_{\Delta}^{(n)} \dot{I}_{Nal}^{(n)}$$

Sau đó cũng dựa vào các đồ thị véc tơ để tìm điện áp ngắn mạch tổng các pha.

**** Chú ý khi xét đến điện trở của mạch:***

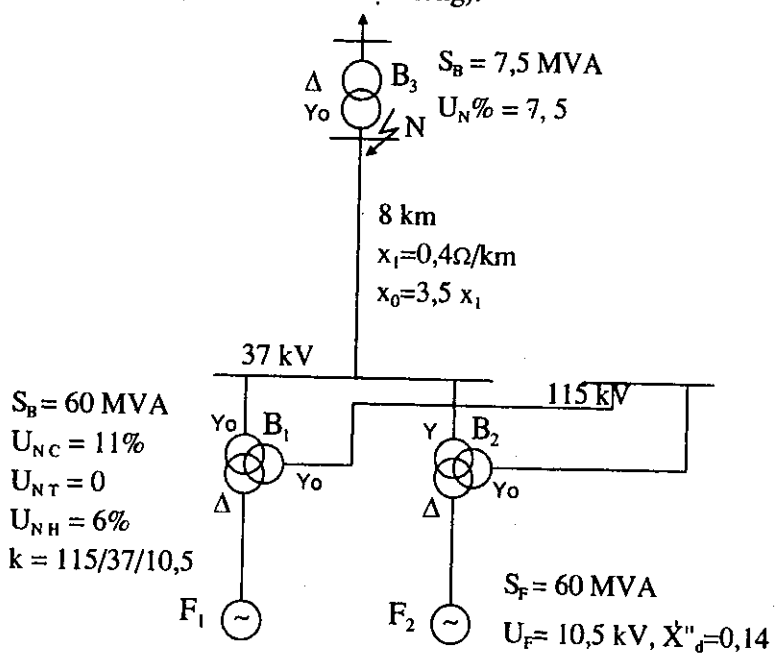
Các kết quả tính toán nhận được trong phần trên xuất phát từ sơ đồ bỏ qua điện trở tác dụng của mạch. Khi xét đến đầy đủ các thông số, các biểu thức nhận được vẫn hoàn toàn tương tự, chỉ cần thay các điện kháng $jX_{1\Sigma}$, $jX_{2\Sigma}$, $jX_{0\Sigma}$ tương ứng bằng các tổng trở $Z_{1\Sigma}$, $Z_{2\Sigma}$, $Z_{0\Sigma}$. Có thể tóm tắt một số biểu thức tính toán chính như bảng sau :

Dạng ngắn mạch	Dòng điện ngắn mạch thành phần	Trị số dòng điện và điện áp tổng hợp ở các pha
$N^{(1)}$	$\dot{I}_{Na1} = \dfrac{\dot{E}_{a\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}$ $\dot{I}_{Na2} = \dot{I}_{Na0} = \dot{I}_{Na1}$	$\dot{I}_{Na} = 3\dot{I}_{Na1};\ \dot{I}_{Nb} = \dot{I}_{NC} = 0$ $\dot{U}_{Na} = 0;$ $\dot{U}_{Nb} = \dot{I}_{Na1}[(a^2 - a)Z_{2\Sigma} + (a^2 - 1)Z_{0\Sigma}]$ $\dot{U}_{NC} = \dot{I}_{Na1}[(a - a^2)Z_{2\Sigma} + (a - 1)Z_{0\Sigma}]$
$N^{(2)}$	$\dot{I}_{Na1} = \dfrac{\dot{E}_{a\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + Z_{2\Sigma}}$ $\dot{I}_{Na2} = -\dot{I}_{Na1};\ \dot{I}_{Na0} = 0$	$\dot{I}_{Na} = 0;\ \dot{I}_{Nab} = -j\sqrt{3}\dot{I}_{Na1};\ \dot{I}_{NaC} = j\sqrt{3}\dot{I}_{Na1}$ $\dot{U}_{Na} = 2\dot{I}_{Na1}Z_{2\Sigma};$ $\dot{U}_{Nb} = \dot{U}_{NC} = -\dot{I}_{Na1}Z_{2\Sigma};$
$N^{(1,1)}$	$\dot{I}_{Na1} = \dfrac{\dot{E}_{a\Sigma}}{Z_{1\Sigma} + \dfrac{Z_{2\Sigma}Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}})}$ $\dot{I}_{Na2} = -\dot{I}_{Na1}\dfrac{Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}$ $\dot{I}_{Na0} = -\dot{I}_{Na1}\dfrac{Z_{2\Sigma}}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}$	$\dot{I}_{Na} = 0\ ;$ $\dot{I}_{Nb} = \dot{I}_{Na1}\left[a^2 - \dfrac{Z_{2\Sigma} + aZ_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}\right];$ $\dot{I}_{Nc} = \dot{I}_{Na1}\left[a - \dfrac{Z_{2\Sigma} + a^2Z_{0\Sigma}}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma}}\right].$ $I_{Nb} = I_{NC} = \sqrt{3}\sqrt{1 - \dfrac{Z_{2\Sigma}Z_{0\Sigma}}{(Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma})^2}}\ I_{Na1}$ $\dot{U}_{Na} = 3\dot{U}_{Na1};\ \dot{U}_{Nb} = \dot{U}_{NC} = 0$
$\dot{U}_{Na1} = \dot{E}_{a\Sigma} - \dot{I}_{Na1}.Z_{1\Sigma} = \dot{I}_{Na1}.Z_{\Delta}\ ;$ $\dot{U}_{Na2} = -\dot{I}_{Na2}.Z_{2\Sigma};$ $\dot{U}_{Na0} = -\dot{I}_{Na0}.Z_{20}$ (đúng với mọi dạng ngắn mạch)		

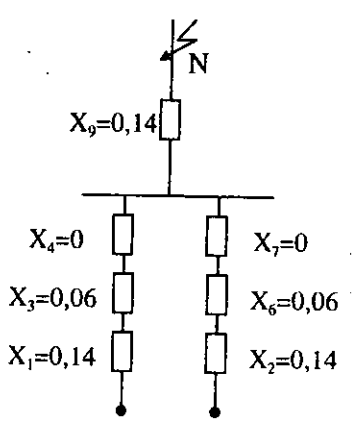
Ví dụ 6.1 Cho ngắn mạch 2 pha nối đất tại điểm N của sơ đồ hình 6.16,a. Xác định dòng điện trong các pha sự cố tại điểm ngắn mạch và dòng điện đi vào dây trung

Ví dụ 6.1 Cho ngắn mạch 2 pha nối đất tại điểm N của sơ đồ hình 6.16,a. Xác định dòng điện trong các pha sự cố tại điểm ngắn mạch và dòng điện đi vào dây trung tính nối đất của các máy biến áp sau 0,7 giây. Các số liệu đã được ghi trực tiếp trên sơ đồ. Cả 2 máy phát đều có TĐK.

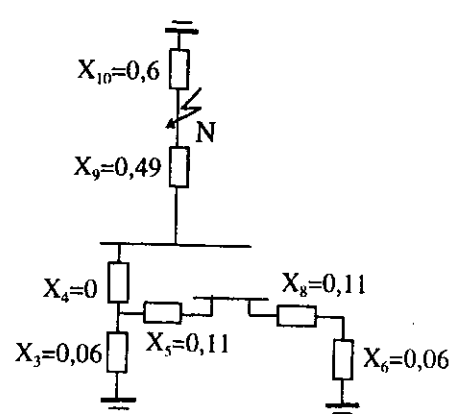
Giải : Sơ đồ thay thế thứ tự thuận (nghịch) vẽ được như trên hình 6.16,b , thứ tự không trên hình 6.16,c , trong đó các điện kháng được tính trong hệ đơn vị tương đối với S_{cb} = 60 MVA, $U_{cb} = U_{tb}$. Do tính đối xứng của sơ đồ thứ tự thuận trên sơ đồ đã bỏ qua nhánh cân bằng gồm các điện kháng cuộn cao áp cuả máy biến áp (tương ứng với ký hiệu X_5 và X_8 trên sơ đồ thứ tự không).



a)



b)



c)

Hình 6.16

Ta tiến hành biến đổi làm đơn giản sơ đồ. Với sơ đồ thứ tự thuận, có ngay:

$$X_{1\Sigma} = X_{2\Sigma} = \frac{0,14 + 0,06}{2} + 0,14 = 0,24 .$$

Với sơ đồ thứ tự không cần tính:

$$X_{11} = X_3//(X_5+X_8+X_6) = 0,06//(0,06+0,11+0,11) = 0,05$$

$$X_{12} = X_{11}+X_9 = 0,05+0,49 = 0,54$$

$$X_{0\Sigma} = X_{12} // X_{10} = 0,54 // 0,6 = 0,28.$$

Tính điện kháng phụ :

$$X_{\Delta}^{(1,1)} = X_{2\Sigma} // X_{0\Sigma} = 0,24 // 0,28 = 0,13 .$$

Để áp dụng phương pháp đường cong tính toán ta xác định :

$$X_{tt}^{(1,1)} = (X_{1\Sigma} + X_{\Delta}^{(1,1)}) = 0,24 + 0,13 = 0,37$$

$$X_{tt}^{(1,1)} = (X_{1\Sigma} + X_{\Delta}^{(1,1)})\frac{S_{dm\Sigma}}{S_{cb}}$$

$$= (0,24 + 0,13)\frac{2 \times 60}{60} = 0,74 .$$

Theo đường cong tính toán của máy phát điện tua bin hơi , tương ứng với t = 0,7 tra được $I_{Nal\ tt} = 1,16$.

Để tính dòng điện có tên ta xác định:

$$I_{dm\Sigma} = \frac{S_{dm\Sigma}}{\sqrt{3}\,U_{tb}} = \frac{120}{\sqrt{3} \times 37} = 1,87\,kA .$$

Như vậy dòng điện thứ tự thuận có trị số: $I_{Nal} = 1,16 . 1,87 = 2,17$ kA .

Để tính dòng điện ngắn mạch tổng hợp tại các pha bị ngắn mạch ta xác định hệ số $m^{(1,1)}$. Với dạng ngắn mạch 2 pha nối đất ta có:

$$m^{(1,1)} = \sqrt{3}\sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}$$

$$= \sqrt{3}\sqrt{1 - \frac{0,24 \times 0,28}{(0,24 + 0,28)^2}} = 1,51 .$$

Như vậy dòng điện ngắn mạch tổng trong các pha có sự cố (pha B và C) đều có trị số là:

$$I_N^{(1,1)} = m^{(1,1)} . I_{Nal} = 1,51 . 2,17 = 3,28\ kA .$$

Dòng điện ngắn mạch trong đất tại chỗ ngắn mạch :

$$I_d = 3I_{Na0} = 3I_{Na1} \times \frac{X_{2\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}$$

$$= 3 \times 2{,}17 \times \frac{0{,}24}{0{,}24 + 0{,}28} = 3{,}02 \text{ kA}.$$

Dòng điện chạy vào đất cũng chính bằng tổng dòng điện chạy qua trung tính của các máy biến áp B1, B_2 và B_3 (hình 6.16,c). Theo tương quan giữa các điện kháng ta tính được:

- dòng điện chạy trong trung tính máy biến áp B_3 :

$I_{d3} = I_d \,.\, X_{12}/(X_{12}+X_{10}) = 3{,}02.\ 0{,}54/(0{,}54+0{,}6) = 1{,}43$ kA ;

- dòng điện đi trong trung tính cuộn trung B_1 :

$I_{d1,2} = I_d - I_{d3} = 3{,}02 - 1{,}43 = 1{,}59$ kA ;

Dòng điện này sẽ chạy sang cuộn hạ và cuộn cao vị cuộn hạ đấu tam giác và mạch cuộn cao nối liền sang B2. Giả sử cần tính thêm dòng điện chạy trong trung tính cuộn cao của B_2 . Ta thấy nó bằng dòng thứ tự không chạy trong cuộn cao B_1. Dòng này nếu tính ở cấp điện áp 37 kV thì sẽ có trị số tính theo công thức:

$$I_{d2} = I_{d1,2} \,.\, X_3 / (X_3+X_5+X_8+X_6)$$

$$= 1{,}59 \,.\, 0{,}06 / (0{,}06+0{,}11+0{,}11+0{,}06) = 0{,}28 \text{ kA}.$$

Tính ở điện áp 115 kV ta có :

$$I_{d2\,(115kV)} = 0{,}28 \,.\, (37 / 115) = 0{,}09 \text{ kA}.$$

Ví dụ 6-2 . Cho sơ đồ hệ thống điện hình 6.17,a, tìm dòng điện trong các pha sự cố tại chỗ ngắn mạch sau 0,2 giây. Giả thiết ngắn mạch xảy ra tại điểm N với các dạng sau:

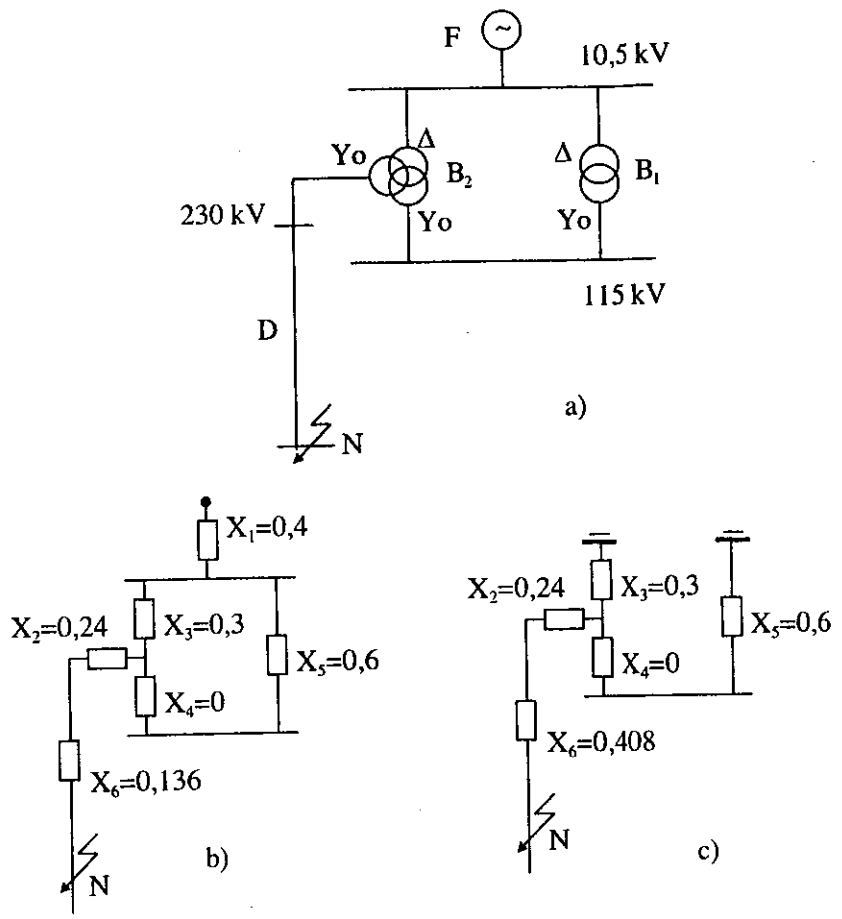
a) hai pha ; b) một pha ; hai pha nối đất .

Lúc xảy ra ngắn mạch hai pha nối đất cần tìm thêm dòng điện trong dây trung tính của máy biến áp B_1.

Số liệu của các phần tử sơ đồ được cho như sau:

- Máy phát thuỷ điện: S_{dm} = 180 MVA; U_{dm} = 10,5 kV; $X''_d = X_2 = 0{,}4$, có TĐK.
- Máy biến áp B_1 : S_{dm} = 31,5 MVA; k = 115/10,5; $U_N\% = 10{,}5$;
- Máy biến áp B_2 : S_{dm} = 60 MVA; k = 230/115/10,5; $U_N\%_{C\text{-}T} = 8$; $U_N\%_{C\text{-}H} = 18$; $U_N\%_{T\text{-}H} = 10$;
- Đường dây l = 100 km; $x_1 = 0{,}4$ ôm/km; $x_0 = 3\ x_1$;

Giải : Trên hình 6.17,b và 6.17,c vẽ sơ đồ thay thế thứ tự thuận (nghịch) và thứ tự không. Các điện kháng ghi trên sơ đồ được tính từ các số liệu đã cho với lượng cơ bản chọn là : $S_{cb} = 180$ MVA, $U_{cb} = U_{tb}$.



Hình 6.17

Trước tiên tính điện kháng tổng hợp của các sơ đồ đối với điểm ngắn mạch N.

Với sơ đồ thứ tự thuận, nghịch (giống nhau vì cho $X''_d = X_2$):

$$X_{1\Sigma} = X_{2\Sigma} = 0,136 + 0,24 + (0,3//0,6) + 0,4 = 0,976 .$$

Theo sơ đồ thứ tự không ta có:

$$X_{0\Sigma} = 0,408 + 0,24 + (0,3//0,6) = 0,848 .$$

a) Trường hợp ngắn mạch hai pha

Điện kháng phụ tại điểm N : $X_{\Delta}^{(2)} = X_{2\Sigma} = 0,976$. Hệ số tỉ lệ $m^{(2)} = \sqrt{3}$.
Vì đã chọn $S_{cb} = S_{dm\Sigma}$ nên ta có ngay điện kháng tính toán :

$$X_{tt}^{(2)} = X_{1\Sigma} + X_{\Delta}^{(2)} = 0,976 + 0,976 = 1,952 .$$

$$I_{dm\Sigma} = \frac{S_{dm\Sigma}}{\sqrt{3}\,U_{tb}} = \frac{180}{\sqrt{3}\times 230} = 0,452 \text{ kA} .$$

Từ đường cong tính toán của máy phát tuabin nước , với t = 0,2 giây ta tra được dòng điện tính toán thứ tự thuận: $I^{(2)}_{Nal} = 0,51$. Từ đó tính được dòng điện tổng tại chỗ ngắn mạch (trên các pha có sự cố):

$$I_N^{(2)} = m^{(2)}.I_{Nal}^{(2)}.I_{dm\Sigma} = \sqrt{3}\times 0,51\times 0,452 = 0,4 \text{ kA}.$$

b) Trường hợp ngắn mạch một pha

Điện kháng phụ sẽ là : $X_{\Delta}^{(1)} = X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma} = 0,976 + 0,848 = 1,824$. Hệ số : $m^{(1)} = 3$.
Điện kháng tính toán : $X_{tt}^{(1)} = X_{1\Sigma} + X_{\Delta}^{(1)} = 1,824 + 0,976 = 2,8$.

Dòng điện thứ tự thuận tại chỗ ngắn mạch tra được theo đường cong:

$I_{Nal}^{(1)} = 0,36.$

Dòng điện ngắn mạch 1 pha trong pha sự cố (pha A):

$$I_N^{(1)} = m^{(1)} . I_{Nal}^{(1)} I_{d\Sigma} = 3 . 0,36 . 0,452 = 0,488 \text{ kA} .$$

c) Trường hợp ngắn mạch hai pha nối đất

Điện kháng phụ : $X_{\Delta}^{(1,1)} = X_{2\Sigma} // X_{0\Sigma} = 0,976 // 0,848 = 0,435$.
Hệ số tỉ lệ :

$$m^{(1,1)} = \sqrt{3}\sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}$$

$$= \sqrt{3}\sqrt{1 - \frac{0,976\times 0,848}{(0,976 + 0,848)^2}} = 1,51 .$$

Điện kháng tính toán :

$$X_{tt}^{(1,1)} = X_{1\Sigma} + X_{\Delta}^{(1,1)} = 0,976 + 0,453 = 1,429 .$$

Dòng điện thứ tự thuận tại điểm ngắn mạch tra theo đường cong:

$I_{Nal}^{(1,1)} = 0,71$.

Dòng điện ngắn mạch hai pha nối đất tại điểm ngắn mạch:

$$I_N^{(1,1)} = m^{(1,1)}. I_{Na}^{(1,1)}. I_{dm\Sigma} = 0,71 . 1,51 . 0,452 = 0,485 \text{ kA} .$$

Dòng điện thứ tự không đi trên đường dây tính trong đơn vị tương đối:

$$I_{0D} = I_{Na0} = I_{Nal}\frac{X_{2\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} = 0,71\times\frac{0,976}{0,976 + 0,848} = 0,38 .$$

Dòng điện thứ tự không đi vào máy biến áp B_1:

$$I_{0B1} = I_{0D} \frac{X_3}{X_3 + X_6} = 0{,}38 \times \frac{0{,}3}{0{,}3 + 0{,}6} = 0{,}127.$$

Dòng điện chạy qua dây trung tính của máy biến áp B_1, tính trong đơn vị có tên :

$$I_{0B1(kA)} = 3I_{0B1} I_{dm\Sigma} = 3 \times 0{,}127 \times \frac{180}{\sqrt{3} \times 115} = 0{,}344 \text{ kA} .$$

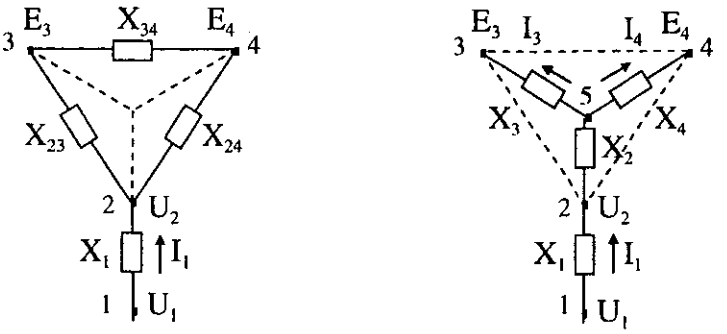
Trong các ví dụ trên, khi áp dụng phương pháp đường cong tính toán đều sử dụng một biến đổi, đó là vì có thêm điện kháng phụ $X_\Delta^{(n)}$ các máy phát trong hầu hết các trường hợp đều có thể coi là ở xa điểm ngắn mạch xấp xỉ nhau. Đây cũng là đặc điểm chung (thuận lợi) để áp dụng đường cong tính toán đối với ngắn mạch không đối xứng. Đương nhiên khi có thanh cái hệ thống vẫn phải áp dụng ít nhất là 2 biến đổi vì hệ thống cần được tính riêng không dùng đường cong (như khi tính ngắn mạch 3 pha).

6.6 TÍNH TOÁN DÒNG ĐIỆN NGẮN MẠCH KHÔNG ĐỐI XỨNG PHÂN BỐ TRÊN CÁC NHÁNH (phương pháp mở rộng sơ đồ)

Sau khi tính được dòng điện và điện áp ngắn mạch tổng tại điểm ngắn mạch (theo quy tắc đẳng trị thứ tự thuận) có thể tính được dòng điện ngắn mạch phân bố trên các nhánh theo thuật toán mở rộng sơ đồ. Nếu thực hiện bằng chương trình máy tính thì đó chính là quá trình ngược của phép loại trừ Gauss xác định điện áp các nút và sau đó tìm dòng nhánh (xem chương 4). Khi thực hiện tính toán bằng tay, để tính toán dòng điện ngắn mạch phân bố trên các nhánh có thể dựa vào các sơ đồ trung gian trong quá trình biến đổi rút gọn (trước đó) để tính đồng thời điện áp và dòng điện của sơ đồ. Cần thực hiện theo thứ tự ngược: mở rộng dần sơ đồ.

Nếu quá trình rút gọn là phép biến đổi song song các nhánh thì quá trình tính ngược thực chất là phép tìm các dòng nhánh khi cho trước dòng tổng. Chẳng hạn quá trình tìm dòng điện thứ tự không phân bố đã thực hiện đối với sơ đồ hình 6.16,c (ví dụ 6-1). Dựa vào sơ đồ biến đổi gần cuối cùng (nhánh X_{10} song song với nhánh X_{12}) biết dòng điện ngắn mạch tổng ta tìm được I_{10} (dòng chạy vào B_3) và I_{12} (dòng chạy vào đường dây về phía các máy biến áp B_1 và B_2) . Dòng điện I_{12} cũng chính là dòng điện chạy qua X_9 và X_{11} vì X_{12} gồm 2 phần tử nối tiếp, đồng thời là dòng điện tổng của 2 nhánh song song $X_3//(X_5+X_8+X_6)$. Dễ dàng tìm được dòng điện chạy trên nhánh X_3 (đi qua trung tính máy biến áp B_3)...

Khi phép biến đổi là sao-tam giác hoặc sao lưới, cần kết hợp tính điện áp nút. Chẳng hạn, ở một bước nào đó đã tìm được dòng điện chạy trên nhánh X_1 (đồng thời có thể biết được điện áp 2 đầu nhánh). Nối tiếp là sơ đồ tam giác nhận được do kết quả phép biến đổi hình sao trước đó. Ta cần tìm dòng nhánh của sơ đồ hình sao ban đầu (hình 6.18).



Hình 6.18

Trong trường hợp này bao giờ cũng có một nhánh hình sao nối liền với nhánh X_1 có dòng áp đã biết. Do đó tính được điện áp tâm hình sao:

$$\dot{U}_5 = \dot{U}_2 + j\dot{I}_2X_2 = \dot{U}_2 + j\dot{I}_1X_2.$$

Cuối cùng tính được dòng điện của tất cả các nhánh còn lại. Với sơ đồ sao-lưới cách tính cũng như vậy. Cần lưu ý các điểm sau khi thực hiện tính toán dòng điện ngắn mạch không đối xứng phân bố trên các nhánh:

- Cần tìm dòng điện phân bố theo từng thành phần, trên từng sơ đồ thứ tự tương ứng (không phân bố theo dòng và áp tổng hợp). Trước khi tính toán cần xác định dòng điện và điện áp ngắn mạch thành phần tại điểm ngắn mạch cả về trị số lẫn góc pha. Chú ý, lấy góc pha của dòng điện và điện áp thành phần thứ tự thuận, pha A, tại điểm ngắn mạch làm chuẩn. Các góc pha này phụ thuộc góc pha của sđđ nguồn và đặc trưng của sơ đồ thứ tư thuận.

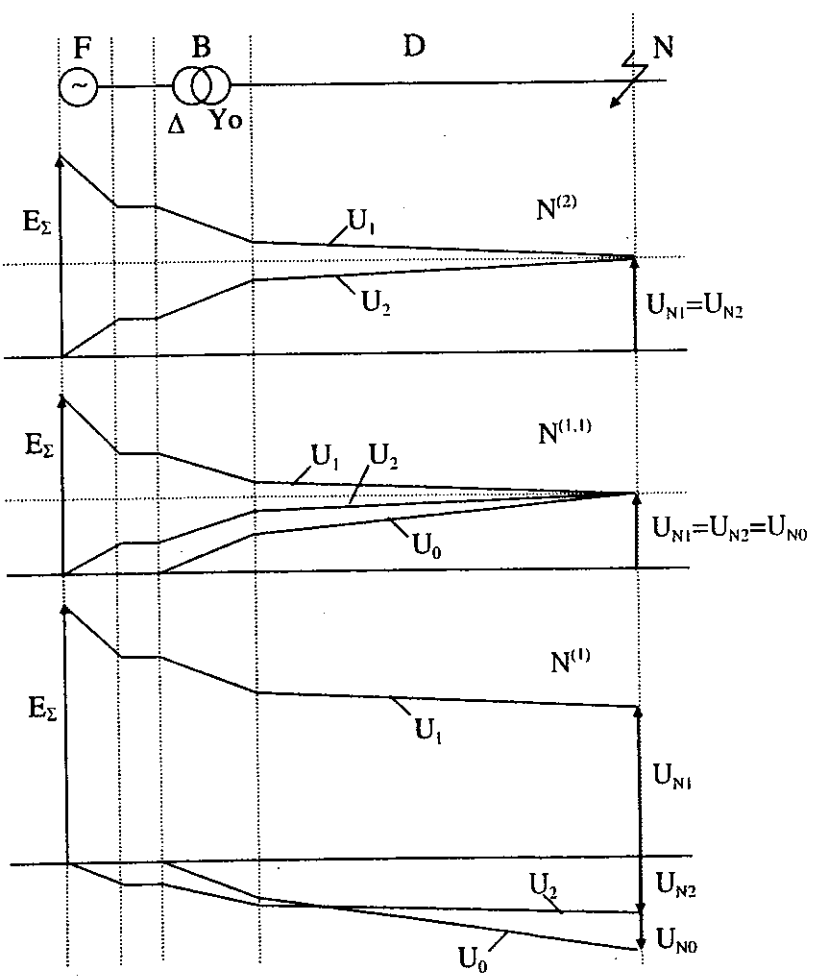
- Trị số điện áp ngắn mạch tại các nút trên sơ đồ thứ tự thuận cao nhất tại nguồn và giảm dần về điểm ngắn mạch. Điện áp thứ tự thuận tại điểm ngắn mạch khác không (bằng điện áp trên $X_\Delta^{(n)}$). Trị số điện áp ngắn mạch thành phần thứ tự nghịch và thứ tự không phân bố tương ứng trên các sơ đồ của chúng cao nhất tại điểm ngắn mạch, giảm dần về phía nguồn và các trung tính nối đất (xa dần điểm ngắn mạch). (xem mục 6.6).

- Khi chạy qua các máy biến áp góc pha của các thành phần dòng điện và điện áp thứ tự thay đổi theo các hướng không giống nhau (dòng thứ tự thuận quay ngược với dòng thứ tự nghịch) do đó tương quan trị số của dòng điện và điện áp ngắn mạch tổng hợp ở 2 phía máy biến áp có thể khác hẳn nhau. Cần chú ý đến tổ đấu dây của các máy biến áp để thay đổi góc lệch pha cho phù hợp khi tiến hành tính toán phân bố dòng điện và điện áp các thành phần (xem mục 6.8).

- Dòng điện và điện áp tổng hợp phân bố trên các nhánh, điện áp phân bố trên các nút cần được tính là tổng vectơ (hay phức số) các dòng điện thành phần. Khi thiết lập sơ đồ tính toán cho từng thành phần thứ tự cần có cách ký hiệu thuận lợi để có thể xác định được các nhánh và các nút tương ứng trên cả 3 sơ đồ (đặc biệt với sơ đồ thứ tự không).

6.7 ĐẶC ĐIỂM PHÂN BỐ ĐIỆN ÁP NGẮN MẠCH KHÔNG ĐỐI XỨNG

Như trên đã nói, trong tình trạng ngắn mạch không đối xứng sức điện động của các nguồn vẫn được coi là đối xứng. Nói khác đi, chỉ có các nguồn sức điện động thứ tự thuận trong sơ đồ thứ tự thuận. Trong sơ đồ thứ tự nghịch và thứ tự không các nguồn điện bị nối tắt vào trung tính (không có sđđ). Bù lại tại điểm ngắn mạch, điện áp ngắn mạch luôn khác không (bằng điện áp trên điện kháng phụ) do đó vẫn có dòng điện phân bố. Tuy nhiên, do đặc điểm trên trị số điện áp tại điểm ngắn mạch ở sơ đồ thứ tự ngịch và không sẽ có trị số cao nhất. Càng xa điểm ngắn mạch điện áp các nút của sơ đồ thứ tự nghịch và thứ tự không càng có trị số nhỏ. Trên hình 6.19 minh hoạ sự phân bố này.



Hình 6.19

6.8 SỰ BIẾN ĐỔI CỦA CÁC DÒNG ĐIỆN VÀ ĐIỆN ÁP THÀNH PHẦN ĐỐI XỨNG QUA MÁY BIẾN ÁP

Qua máy biến áp, các thành phần đối xứng của dòng điện và điện áp không những biến đổi về độ lớn (theo tỉ số biến áp) mà còn thay đổi góc pha theo tổ đấu dây. Điều đáng chú ý là chúng thay đổi góc pha theo những chiều không giống nhau. Để dễ phân tích ta quy ước xét máy biến áp lý tưởng (không tổn hao) và ký hiệu các đại lượng phía cao áp I là A, B, C, phía hạ áp II là a, b, c. Theo định nghĩa tỉ số biến đổi của máy biến áp là tỉ số giữa các vòng dây hay với máy biến áp lý tưởng, là tỉ số biên độ của các điện áp hai phía:

$$k = \frac{W_I}{W_{II}} = \frac{U_{A1}}{U_{a1}} = \frac{U_{A2}}{U_{A2}} = \frac{U_{A0}}{U_{a0}}$$

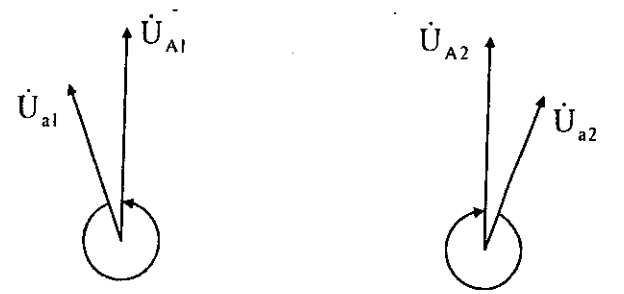
Trong đó ký hiệu :

W_I, W_{II} - số vòng cuộn dây cao áp và hạ áp

U_{A1}, U_{A2} , U_{A0}- trị số điện áp phía cao áp (thứ tự thuận, nghịch, không)

U_{a1}, U_{a2} - trị số điện áp phía hạ áp (thứ tự thuận, nghịch, không).

Về góc pha, điện áp trên cùng một pha phía cao áp và hạ áp và lệch nhau một góc phụ thuộc vào tổ đấu dây và tuỳ theo thành phần thứ tự điện áp. Trên hình 6.20 thể hiện sự biến đổi pha qua máy biến áp có tổ đấu dây Y/Δ -11 (N=11).



$\gamma = 11.30° = 30N$ $\qquad$ $\gamma = -11.30° = -30N$

Hình 6.20

1. Sự biến đổi của thành phần thứ tự thuận

Bây giờ ta sử dụng ký hiệu phức số để biểu diễn tỉ số biến áp. Giả sử máy biến áp có tổ đấu dây N. (Chẳng hạn với Y/Δ -11 thì N = 11). Khi đó với thành phần thứ tự thuận ta có thể viết:

$$\dot{K}_1 = \frac{\dot{U}_{A1}}{\dot{U}_{a1}} = ke^{j\gamma} = ke^{j30°N}$$

Giả sử sơ cấp là cao áp thứ cấp là hạ áp, nghĩa là qua máy biến áp, sang phía hạ áp ta nhận được điện áp thứ tự thuận:

$$\dot{U}_{a1} = \frac{\dot{U}_{A1}}{\dot{K}_1} = \frac{1}{k}\dot{U}_{A1}\, e^{-j30^\circ N}$$

Để tìm biểu thức dòng điện thứ cấp ta xuất phát từ quan hệ bảo toàn công suất phức qua máy biến áp:

$$\dot{S} = \dot{U}_{A1}\hat{I}_{A1} = \dot{U}_{a1}\hat{I}_{a1} \ .$$

Suy ra :

$$\hat{I}_{a1} = \frac{\dot{U}_{A1}}{\dot{U}_{a1}}\hat{I}_{A1} = \dot{K}_1\hat{I}_{A1} \ ;$$

Hay :

$$\dot{I}_{a1} = \hat{K}_1\dot{I}_{A1} = k\dot{I}_{A1}\, e^{-j30^\circ N} \ ;$$

Như vậy cả vectơ dòng điện và vectơ điện áp thứ tự thuận phía thứ cấp máy biến áp đều bị xoay cùng chiều kim đồng hồ một góc 30°.N (tiến N giờ), so với vectơ sơ cấp cùng pha.

Trường hợp riêng (hay gặp) máy biến áp có tổ đấu dây Y/Δ -11 :

$$\dot{U}_{a1} = \frac{1}{k}\dot{U}_{A1}\, e^{-j330^\circ} = \frac{1}{k}\dot{U}_{A1}\, e^{j30^\circ}$$

$$= \frac{1}{k}\dot{U}_{A1}\left(\frac{\sqrt{3}}{2} + j\frac{1}{2}\right) \approx \frac{1}{k}\dot{U}_{A1}(0{,}866 + j0{,}5)$$

$$\dot{I}_{a1} = k\dot{I}_{A1}\, e^{-j330^\circ} = k\dot{I}_{A1}\, e^{j30^\circ}$$

$$\approx k\dot{I}_{A1}(0{,}866 + j0{,}5) \ .$$

Ở đây cũng cần để ý rằng, nếu tính trong hệ đơn vị tương đối thì qua máy biến áp độ lớn dòng điện và điện áp không đổi, chỉ cần chú ý đến góc pha. Đó là vì các đại lượng cơ bản của dòng, áp ở hai phía máy biến áp có quan hệ:

$$U_{cb\,(hạ)} = \frac{1}{k}U_{cb\,(cao)} \ ; \qquad I_{cb\,(hạ)} = k\, I_{cb\,(cao)} \ ;.$$

2. Sự biến đổi của thành phần thứ tự nghịch

Tỉ số biến áp phức của thành phần thứ tự nghịch:

$$\dot{K}_2 = \frac{\dot{U}_{A2}}{\dot{U}_{a2}} = ke^{j\gamma} = ke^{-j30^\circ N} \ .$$

Bằng cách phân tích tương tự như đối với thành phần thứ tự thuận ta có:

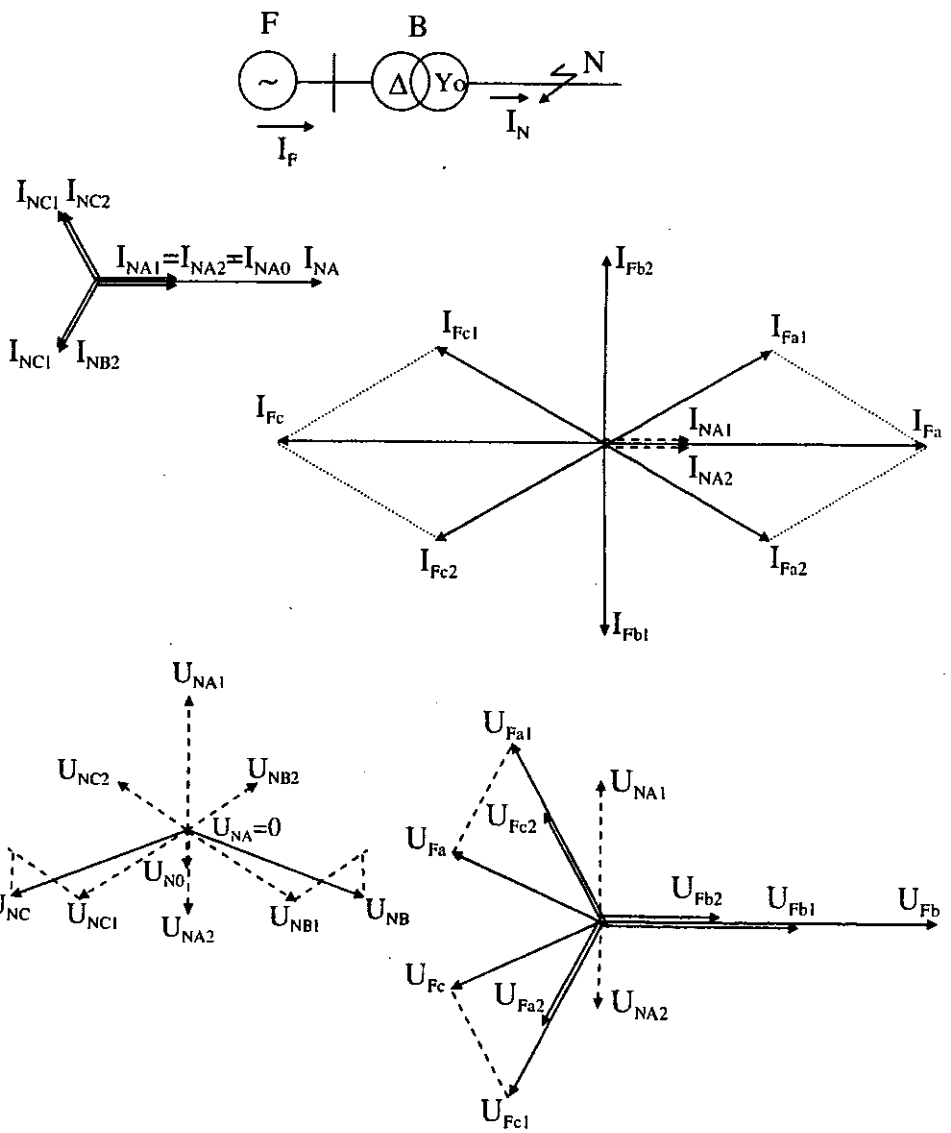
$$\dot{U}_{a2} = \frac{\dot{U}_{A2}}{\dot{K}_2} = \frac{1}{k}\dot{U}_{A2}\, e^{j30^\circ N} \ ;$$

$$\dot{I}_{a2} = \hat{K}_2\dot{I}_{A2} = k\dot{I}_{A2}\, e^{j30^\circ N} \ ;$$

Các vectơ đều quay ngược chiều kim đồng hồ so với véctơ sơ cấp một góc là N30° (lùi N giờ). Với máy biến áp đấu Y/Δ -11 ta có :

$$\dot{U}_{a2} = \frac{1}{k}\dot{U}_{A2}\, e^{j330^\circ} = \frac{1}{k}\dot{U}_{A2}\, e^{-j30^\circ} = \frac{1}{k}\dot{U}_{A2}\left(\frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2}\right);$$

$$\dot{I}_{a2} = k\dot{I}_{A2}\, e^{j330^\circ} = k\dot{I}_{A2}\, e^{-j30^\circ} = k\dot{I}_{A2}\left(\frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2}\right).$$



Hình 6.21

3. Biến đổi của thành phần thứ tự không

Nói chung, thành phần điện áp và dòng điện thứ tự không chỉ chạy qua được máy biến áp trong trường hợp tổ đấu dây Yo/Yo - 12. Các các trường hợp còn lại hoặc là không tồn tại (ngay ở sơ cấp) hoặc không qua được thứ cấp máy biến áp. Chính vì thế khi tính toán cần quan tâm chủ yếu là có dòng điện thứ tự không hay không. Nếu có, đó là trường hợp tổ đấu dây Yo/Yo , sẽ có góc pha như nhau. Trường hợp dòng điện thứ tự không chạy quẩn trong cuộn tam giác điện áp thứ tự không triệt tiêu ở thứ cấp, nên cũng ít khi phải xét.

Hình 6.21 minh hoạ sự biến đổi các thành phần dòng điện và vectơ tổng hợp ở hai phía máy biến áp nối Y/Δ -11 . Thành phần thứ tự không không qua được máy biến áp (chỉ chạy quẩn bên trong) nên tại đầu máy phát không có thành phần dòng điện và điện áp thứ tự không. Trường hợp đang xét là ngắn mạch một pha. Có thể nhận thấy rằng, do sự biến đổi góc pha nên phía máy phát không phải chỉ có dòng điện pha a (pha bị ngắn mạch) mà còn có dòng ngắn mạch ở pha c (lớn cùng trị số !).

Ví dụ 8-3. Cho sơ đồ và số liệu của ví dụ 8-2. Tính dòng điện ngắn mạch phân bố trên các nhánh khi ngắn mạch 2 pha chập đất tại điểm N. Vẽ đồ thị véctơ cho dòng điện và điện áp đầu cực máy phát điện. Sơ đồ đấu dây của máy biến áp B_1 là Yo/Yo/Δ-12/11, của máy biến áp B_2 là Yo/Δ-11.

Giải: Theo kết quả tính toán của ví dụ 8-2, dòng điện thứ tự thuận pha A tại chỗ ngắn mạch:

$$I_{NA1}^{(1,1)} = 0,71 \qquad \text{(đơn vị tương đối)}$$

Vì có thể chọn tuỳ ý góc pha của một pha (làm chuẩn) nên thuận tiện nhất ta chọn góc pha của dòng điện ngắn mạch thứ tự thuận pha A tại chỗ ngắn mạch bằng 0. (Khi đó góc pha của sđđ $E_{a\Sigma}$ phải phụ thuộc theo). Ta ký hiệu bằng phức số cho dòng điện này : $\dot{I}_{NA(1)} = 0,71$. (Chỉ số trong ngoặc biểu thị thứ tự pha).

Điện áp thứ tự thuận pha A tại điểm ngắn mạch tính được:

$$\dot{U}_{NA(1)} = j\dot{I}_{NA(1)} . X_{\Delta}^{(1,1)} = j0,71 \times 0,435 = j0,316 .$$

Sức điện động đẳng trị của nguồn pha A tính được theo công thức:

$$\dot{E}_{A\Sigma} = \dot{U}_{NA(1)} + j\dot{I}_{NA(1)} X_{1\Sigma}$$

$$= j0,316 + j0,71 \times 0,976 = j1,01 .$$

Dòng điện thứ tự nghịch pha A tại chỗ ngắn mạch:

$$\dot{I}_{NA(2)} = -\dot{I}_{NA(1)} \frac{X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}$$

$$= -0,71 \times \frac{0,848}{0,976 + 0,848} = -0,33 .$$

Ta cũng có : $\dot{U}_{NA(2)} = \dot{U}_{NA(1)} = j\,0,316$.

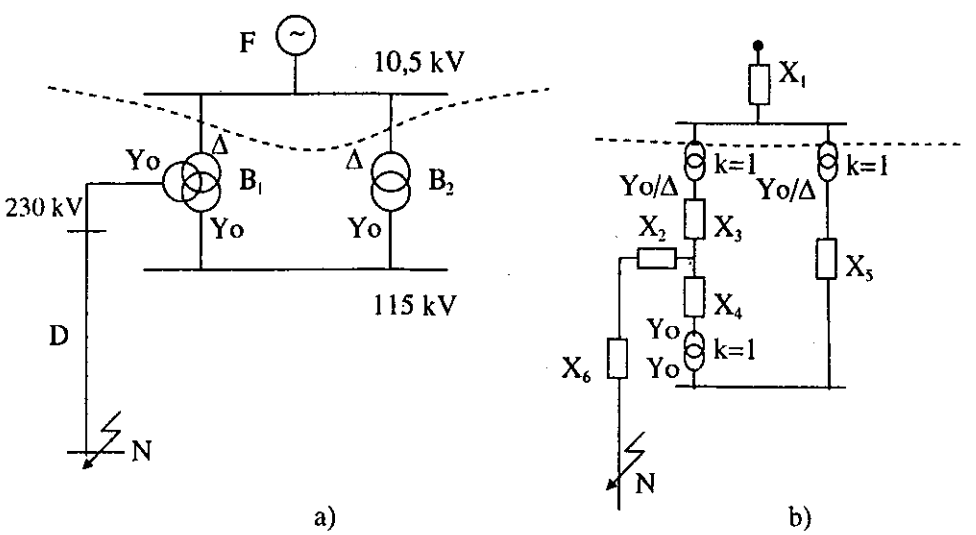
Thành phần thứ tự không tại điểm ngắn mạch (kể đến góc pha):

$$\dot{I}_{NA(0)} = -\dot{I}_{NA(1)} \frac{X_{2\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}$$

$$= -0,71 \times \frac{0,976}{0,976 + 0,848} = -0,38 \ .$$

Điện áp : $\dot{U}_{NA(0)} = \dot{U}_{NA(1)} = j0,316$.

Để tiến hành tính toán dòng điện ngắn mạch phân bố trên các sơ đồ thứ tự được thuận lợi, ta cần chú ý đến ảnh hưởng nói chung của tổ đấu dây máy biến áp đến phân bố dòng, áp trong mạng điện. Thực ra, khi tính toán ngắn mạch ba pha, kể cả tính toán chế độ xác lập của hệ thống điện, tổ đấu dây máy biến áp luôn có ảnh hưởng làm thay đổi góc pha (giữa các phần của mạng điện). Chẳng hạn, điện áp tất cả các nút của phần mạng điện nối vào phía cuộn tam giác của máy biến áp đấu Yo/Δ-11 đều sẽ bị tăng góc lệch pha lên 30° so với khi không có máy biến áp hoặc máy biến áp nối Yo/Yo-12. Nhưng vì ảnh hưởng là như nhau đối với toàn bộ phần mạng nên lại có thể bỏ qua, coi như các máy biến áp đều đấu sao-sao. Trị số biên độ và tương quan dòng áp trong từng phần không có gì thay đổi. Khi đó tính trong hệ đơn vị tương đối có thể bỏ qua hoàn toàn ký hiệu máy biến áp lý tưởng (mà đúng ra phải xét đến biến đổi góc pha). Chỉ khi cần thiết mới phải kể đến. Tương tự như thế khi tính dòng, áp phân bố trong sơ đồ thứ tự thuận (nghịch). Trước tiên, tính phân bố dòng áp trong hệ đơn vị tương đối, bỏ qua ảnh hưởng làm lệch góc pha của các máy biến áp (cũng có thể tính trong hệ đơn vị có tên nhưng phức tạp hơn). Sau đó, " hiệu chỉnh" góc lệch pha cho tất cả dòng điện và điện áp trên phần mạng liên kết qua máy biến áp có ảnh hưởng đến góc lệch. Cuối cùng đổi sang đơn vị có tên và xác định trị số dòng, áp tổng hợp (cộng ba thành phần). Cũng có thể cộng các thành phần theo trị số tương đối trước khi chuyển sang đơn vị có tên.



Hình 6.22

Trong ví dụ trên ta có thể chia mạng điện chỉ làm 2 phần qua các máy biến áp nối sao-tam giác vì chỉ có các máy biến áp này làm ảnh hưởng đến góc lệch pha. Phần nối qua cuộn sao-sao không cần tách riêng (hình 6.22). Nói chung trong mạng điện phức tạp ta luôn tìm được các lát cắt qua các máy biến áp làm lệch góc pha theo cùng một hướng, bởi các máy biến áp làm việc song song phải được chọn cùng tổ đấu dây.

Ta tiến hành tính dòng điện ngắn mạch phân bố trên từng sơ đồ thứ tự trong hệ đơn vị tương đối, bỏ qua ảnh hưởng đến góc lệch của các máy biến áp.

Với sơ đồ thứ tự thuận ta có:

$$\dot{I}_{1(1)} = \dot{I}_{2(1)} = \dot{I}_{6(1)} = \dot{I}_{NA(1)} = 0,71 .$$

$$\dot{I}_{3(1)} = \dot{I}_{2(1)} \times \frac{X_4 + X_5}{X_3 + X_4 + X_5} = 0,71 \times \frac{0,6}{0,3+0,6} = 0,473.$$

$$\dot{I}_{4(1)} = \dot{I}_{5(1)} = \dot{I}_{2(1)} - \dot{I}_{3(1)} = 0,71 - 0,473 = 0,237$$

Dòng điện thứ tự nghịch :

$$\dot{I}_{1(2)} = \dot{I}_{2(2)} = \dot{I}_{6(2)} = \dot{I}_{NA(2)} = -0,33 ;$$

$$\dot{I}_{3(2)} = \dot{I}_{2(2)} \times \frac{X_4 + X_5}{X_3 + X_4 + X_5} = -0,33 \times \frac{0,6}{0,3+0,6} = -0,22 ;$$

$$\dot{I}_{4(2)} = \dot{I}_{5(2)} = \dot{I}_2 - \dot{I}_3 = -0,33 + 0,22 = -0,11 .$$

Với sơ đồ thứ tự không :

$$\dot{I}_{2(0)} = \dot{I}_{6(0)} = \dot{I}_{NA(0)} = -0,38 .$$

$$\dot{I}_{3(0)} = \dot{I}_{2(0)} \times \frac{X_4 + X_5}{X_3 + X_4 + X_5} = -0,38 \times \frac{0,6}{0,3+0,6} = -0,253 .$$

$$\dot{I}_{4(0)} = \dot{I}_{5(0)} = \dot{I}_{2(0)} - \dot{I}_{3(0)} = -0,38 + 0,253 = -0,127.$$

Tính toán dòng điện ngắn mạch tổng hợp trên các phần tử được thực hiện bằng cách cộng 3 dòng điện phức thành phần trên từng nhánh với nhau, có chú ý đến hiệu chỉnh góc pha. Kết quả nhận được sẽ là các dòng điện phức tổng hợp của pha A trong tình trạng ngắn mạch. Cũng có thể tính toán đồng thời cả điện áp các nút khi quan tâm. Để tính dòng, áp trên pha B và pha C cần áp dụng đồ thị vectơ hoặc chuyển đổi phức số:

$$\dot{I}_b = a^2 \dot{I}_{a1} + a\dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} ;$$

$$\dot{I}_c = a\dot{I}_{a1} + a^2 \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} .$$

Việc tính toán dòng điện tổng hợp có thể thự hiện cho mọi nhánh, mọi nút (thường với khi giải bằng chương trình) hoặc từng phần. Trong ví dụ này ta cũng chỉ xét chi tiết quá trình tính dòng điện trên nhánh máy phát (nhánh 1).

Trên nhánh máy phát chỉ có thành phần thứ tự thuận $\dot{I}_{1(1)}$ và thứ tự nghịch $\dot{I}_{1(2)}$. Khi chưa hiệu chỉnh góc pha, có thể hiểu các dòng điện thành phần $\dot{I}_{1(1)}$ và $\dot{I}_{1(2)}$ như là ở phía sơ cấp các máy biến áp nối Yo/Δ-11 (hình 6.22,b). Do đó để thuận tiện, ta ký hiệu lại:

- thành phần thứ tự thuận pha A: $\dot{I}_{FA1} = \dot{I}_{1(1)} = 0,71$
- thành phần thứ tự nghịch pha A: $\dot{I}_{FA2} = \dot{I}_{1(2)} = -0,33$

Tính ở phí thứ cấp (hiệu chỉnh lại góc pha nhưng vẫn trong trị số tương đối):

$$\dot{I}_{Fa1} = 0,71 \times e^{j30^\circ} = 0,71 \times (0,866 + j0,5)$$

$$\dot{I}_{Fa2} = -0,33 \times e^{-j30^\circ} = -0,\times(0,866 - j0,5)$$

Dòng điện tổng hợp trong máy phát điện:

$$\dot{I}_{Fa} = \dot{I}_{Fa1} + \dot{I}_{Fa2} = 0,71(0,866 + j0,5) - 0,33(0,866 - j0,5) = 0,33 + j0,52$$

Trị số tuyệt đối (hiệu dụng):

$$I_{Fa} = \sqrt{0,33^2 + 0,52^2} = 0,615$$

Để tính trong đơn vị có tên ta xác định dòng điện cơ bản ở cấp điện áp máy phát:

$$I_{cb} = \frac{S_{cb}}{\sqrt{3}\, U_{tb}} = \frac{180}{\sqrt{3} \times 10,5} = 9,9\,kA$$

Dòng điện ngắn mạch chạy trong pha a của máy phát :

$$I_{Fa\,(kA)} = I_{Fa}\, I_{cb} = 0,615 \,.\, 9,9 = 6,1\ kA$$

Áp dụng toán tử quay $a = e^{j120^\circ}$ có thể tính được dòng điện các pha b và c. Ta có:

$$\dot{I}_{Fb} = a^2 \dot{I}_{Fa1} + a \dot{I}_{Fa2} = 0,71.e^{j30^\circ}.e^{-j120^\circ} - 0,33.e^{-j30^\circ}.e^{j120^\circ}$$

$$= 0,71e^{-j90^\circ} - 0,33e^{j90^\circ} = -j1,04$$

Trị số tuyệt đối: $I_{Fb} = 1,04$; $I_{Fb\,(kA)} = 1,04 \,.\, 9,9 = 10,3$ kA .

$$\dot{I}_{Fc} = a \dot{I}_{Fa1} + a^2 \dot{I}_{Fa2} = 0,71.e^{j30^\circ}.e^{j120^\circ} - 0,33.e^{-j30^\circ}.e^{-j120^\circ}$$

$$= 0,71e^{-j150^\circ} - 0,33e^{-j150^\circ} = -0,33 + j\,0,52$$

(đối xứng với $\dot{I}_{Fa}$ qua trục ảo)

Về trị số tuyệt đối: $I_{Fc} = I_{Fa} = 0,615$; $I_{Fc\,(kA)} = 6,1$ kA .

Giả sử cần tính điện áp đầu cực máy phát ta làm như sau. Khi chưa hiệu chỉnh ta tính bình thường :

$$\dot{U}_{FA1} = \dot{E}_{A\Sigma} - j\dot{I}_{FA1}X_1$$
$$= j1,01 - j0,71 \times 0,4 = j0,726$$

$$\dot{U}_{FA2} = -j\dot{I}_{FA2}X_1 = j0,33 \times 0,4 = j0,126$$

Chuyển sang phía thứ cấp (hiệu chỉnh góc pha):

$$\dot{U}_{Fa1} = \dot{U}_{FA1}\, e^{j30^\circ} = j0,726(0,866 + j0,5)$$
$$\dot{U}_{Fa2} = \dot{U}_{FA2}\, e^{-j30^\circ} = j0,126(0,866 - j0,5)$$

Điện áp đầu cực máy phát trên pha A:

$$\dot{U}_{Fa} = \dot{U}_{Fa1} + \dot{U}_{Fa2} = j0,726(0,866 + j0,5) + j0,126(0,866 - j0,5)$$
$$= -0,3 + j0,74$$

Về trị tuyệt đối: $U_{Fa} = \sqrt{0,3^2 + 0,74^2} = 0,8$.

Trong hệ đơn vị có tên:

$$U_{Fa(kV)} = U_{Fa}.U_{cb(pha)} = 0,8 \times \frac{10,5}{\sqrt{3}} = 4,88 \text{ kV}.$$

Ta cũng tính được cho các pha B và C :

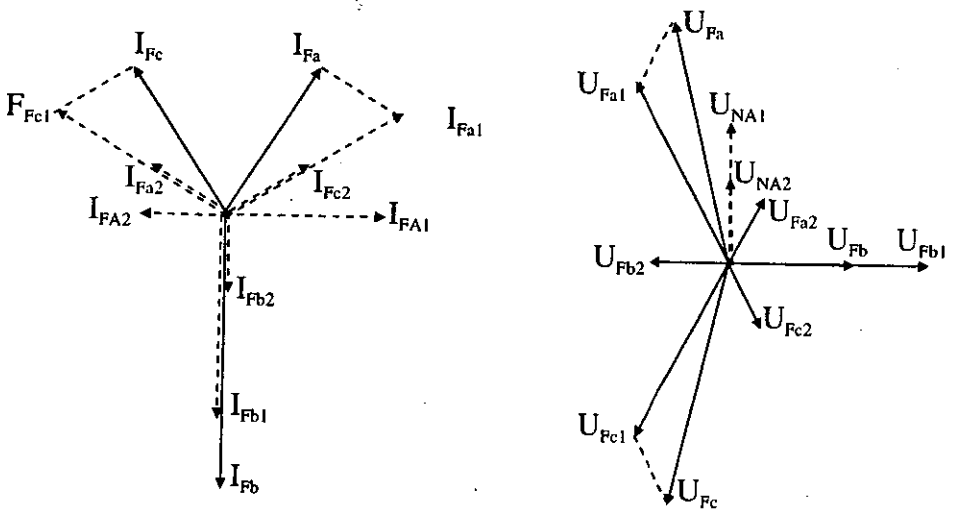
$$\dot{U}_{Fb} = a^2\,\dot{U}_{Fa1} + a\,\dot{U}_{Fa2} = j0,726.e^{j30^\circ}.e^{-j120^\circ} + j0,126.e^{-j30^\circ}.e^{j120^\circ}$$
$$= j(0,726e^{-j90^\circ} + 0,126e^{j90^\circ}) = 0,6$$
$$\dot{U}_{Fc} = a\,\dot{U}_{Fa1} + a^2\,\dot{U}_{Fa2} = j0,726.e^{j30^\circ}.e^{j120^\circ} + j0,126.e^{-j30^\circ}.e^{-j120^\circ}$$
$$= -0,3 - j0,74$$

Về trị tuyệt đối trong hệ đơn vị có tên:

$$U_{Fb(kV)} = 0,6 \times \frac{10,5}{\sqrt{3}} = 3,66 \text{ kV}$$

$$U_{Fc\,(kV)} = U_{Fa\,(kV)} = 4,88 \text{ kV} .$$

Trên hình 6.22 là quan hệ vectơ các thành phần dòng điện chạy trong máy phát.



Hình 6.22

6.9 SO SÁNH DÒNG ĐIỆN NGẮN MẠCH CÁC DẠNG KHÁC NHAU VỚI NGẮN MẠCH BA PHA (theo trị số tại điểm ngắn mạch)

Khi ngắn mạch xảy ra tại một điểm nào đó có thể đặt bài toán tìm tỉ số giữa dòng điện ngắn mạch tại điểm ngắn mạch các dạng ngắn mạch khác nhau với dòng điện ngắn mạch ba pha cũng tại điểm đó. Hơn nữa giới hạn của các tỉ số này là bao nhiêu.

Trước hết ta so sánh các điện kháng phụ. Theo các biểu thức trong bảng 6-2, ta có:

$$X_{\Delta}^{(1)} > X_{\Delta}^{(2)} > X_{\Delta}^{(1,1)} > X_{\Delta}^{(3)} = 0.$$

Do đó dòng điện thứ tự thuận :

$$I_{NA1}^{(1)} < I_{NA1}^{(2)} < I_{NA1}^{(1,1)} < I_{NA1}^{(3)} = 0$$

còn điện áp thứ tự thuận:

$$U_{NA1}^{(1)} > U_{NA1}^{(2)} > U_{NA1}^{(1,1)} > U_{NA1}^{(3)} = 0$$

Các hằng số thời gian :

$$T_d'^{(1)} > T_d'^{(2)} > T_d'^{(1,1)} > T_d'^{(3)} = 0,$$

do các điện kháng phụ làm tăng tổng trở mạch ngoài.

Tương quan về hằng số thời gian cho thấy, khi xảy ra ngắn mạch tại cùng một điểm thì dòng điện quá độ tự do của ngắn mạch 3 pha sẽ tắt nhanh nhất (nhanh hơn mọi dạng ngắn mạch không đối xứng), chậm nhất đối với ngắn mạch một pha.

Để so sánh độ lớn dòng điện ngắn mạch tổng hợp các dạng ngắn mạch khác nhauvới ngắn mạch 3 pha ta xác định tỉ số:

$$K_{(n-3)} = \frac{I_N^{(n)}}{I_N^{(3)}} = \frac{m^{(n)} I_{Nal}^{(n)}}{I_N^{(3)}} = \frac{m^{(n)} X_{1\Sigma}}{X_{1\Sigma} + X_\Delta^{(n)}} .$$

a) Ngắn mạch một pha

Theo bảng (6-4) ta có $m^{(1)} = 3$, $X_\Delta^{(1)} = X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}$.

Điện kháng tổng hợp $X_{2\Sigma}$ và $X_{0\Sigma}$ có thể rất bé khi ngắn mạch ngay gần máy phát, nếu trung điểm của nó trực tiếp nối đất thì có thể coi là $X_\Delta^{(1)} \to 0$. Khi đó theo biểu thức trên $K_{(1-3)} \to m^{(n)} = 3$. Ngược lại khi trung tính không nối đất $X_\Delta^{(1)} \to \infty$ và $K_{(1-3)} = 0$. Tóm lại, trị số của $K_{(1-3)}$ nằm trong giới hạn sau:

$$0 \le K_{(1-3)} \le 3 .$$

Tuy nhiên phụ thuộc vị trí của điểm ngắn mạch thực tế $K_{(1-3)}$ không vượt quá 2,5. Nếu ngắn mạch xa có thể coi $X_{2\Sigma} = X_{1\Sigma}$. Khi đó :

$$0 \le K_{(1-3)} \le 1,5 .$$

b) Ngắn mạch hai pha

Trường hợp này $m^{(2)} = \sqrt{3}$, $X_\Delta^{(2)} = X_{2\Sigma}$. Trị số của $X_{2\Sigma}$ có thể thay đổi từ 0 (khi ngắn mạch gần cực máy phát) đến $X_{1\Sigma}$ (ngắn mạch xa). Do đó :

$$\frac{\sqrt{3}}{2} < K_{(2-3)} < \sqrt{3} .$$

Thực tế nó vào khoảng $0,9 < K_{(2-3)} < 1,6$.

c) Ngắn mạch hai pha chập đất

Ta có :

$$m^{(1,1)} = \sqrt{3}\sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}} \quad \text{và} \quad X_\Delta^{(1,1)} = \frac{X_{2\Sigma} \times X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} .$$

Giá trị bé nhất của $X_\Delta^{(1,1)}$ xảy ra vào lúc hoặc $X_{2\Sigma} = 0$ hoặc $X_{0\Sigma} = 0$; Trong hai trường hợp đó đều có $m^{(1,1)} = \sqrt{3}$, $X_\Delta^{(1,1)} = 0$, do đó theo biểu thức ta có :

$$K_{(1,1-3)} \to \sqrt{3} .$$

Giá trị lớn nhất $X_\Delta^{(1,1)} = X_{2\Sigma}$ xảy ra vào lúc $X_{0\Sigma} = \infty$ (khi trung tính không nối đất). Thực ra đó chính là trường hợp riêng, ngắn mạch hai pha chập đất trở thành ngắn mạch hai pha thông thường. Phụ thuộc vào $X_{2\Sigma}$ ta có:

$$\frac{\sqrt{3}}{2} < K_{(1,1-3)} < \sqrt{3}$$

Kết hợp lại ta cũng có giới hạn giống như khi ngắn mạch 2 pha. Tuy nhiên do sự có mặt của $X_{0\Sigma}$ trị số của $X_{\Delta}^{(1,1)}$ thường nhận các giá trị nhỏ hơn $X_{\Delta}^{(2)}$ và K(1,1-3) thiên về phía lớn gần với giá trị $\sqrt{3}$ trong khi ngắn mạch 2 pha không chập đất thiên về trị số nhỏ.

Từ các phân tích trên có thể thấy rằng các trường hợp ngắn mạch không đối xứng có khả năng có trị số dòng điện ngắn mạch lớn hơn ngắn mạch 3 pha. Về lý thuyết có thể gấp 3 lần dòng điện ngắn mạch 3 pha (trong trường hợp ngắn mạch một pha).Tuy nhiên xác xuất xảy ra thấp, nhất là với ngắn mạch 2 pha. Có khả năng xảy ra cao và có trị số khá lớn là trường hợp ngắn mạch một pha.

6.10 SƠ ĐỒ THAY THẾ PHỨC HỢP

Dựa vào quan hệ giữa các đại lượng dòng, áp tại điểm ngắn mạch người ta đưa ra quy tắc kết nối giữa 3 sơ đồ thứ tự thuận, thứ tự nghịch và thứ tự không thành một sơ đồ phức hợp. Sơ đồ đảm bảo đúng trạng thái phân bố của dòng điện và điện áp thành phần trên từng bộ phận sơ đồ, trong khi trạng thái toàn mạch điện là thống nhất. Ta có các quan hệ sau cho dòng và áp tại điểm ngắn mạch của từng dạng ngắn mạch:

- Ngắn mạch một pha:

$$\dot{I}_{Na1}^{(1)} = \dot{I}_{Na2}^{(1)} = \dot{I}_{Na0}^{(1)};$$

$$\dot{U}_{Na1}^{(1)} = -(\dot{U}_{Na2}^{(1)} + \dot{U}_{Na0}^{(1)}) \quad ;$$

- Ngắn mạch hai pha:

$$\dot{I}_{Na1}^{(2)} = -\dot{I}_{Na2}^{(2)} \quad ;$$

$$\dot{U}_{Na1}^{(1)} = -\dot{U}_{Na2}^{(1)};$$

- Ngắn mạch hai pha chập pha:

$$\dot{I}_{Na1}^{(1,1)} = -(\dot{I}_{Na2}^{(1,1)} + \dot{I}_{Na0}^{(1,1)}) \; ;$$

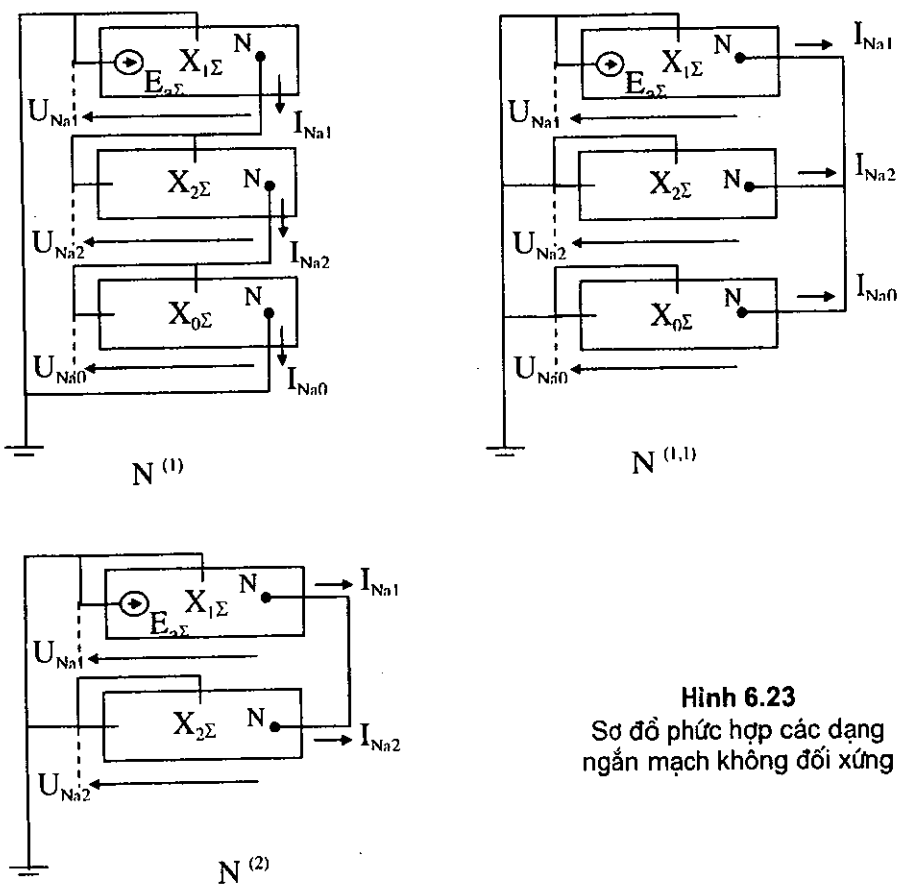
$$\dot{U}_{Na1}^{(1,1)} = \dot{U}_{Na2}^{(1,1)} = \dot{U}_{Na0}^{(1,1)} \; ;$$

Dựa vào các quan hệ này ta có thể kiểm tra tính phù hợp của các sơ đồ ghép nối phức hợp hình 6.23. Trên sơ đồ phực hợp cho mỗi loại ngắn mạch (hình 6.23), hình chữ nhật biểu thị chung cho sơ đồ thứ tự thành phần (gồm nhiều nhánh nhiều nút). Trên đó còn có đường nối biểu thị trung điểm của sơ đồ (nối liền trung điểm các nguồn, máy biến áp và phụ tải). Điểm ngắn mạch nằm ở một nơi nào đó trên sơ đồ có đánh dấu bằng chữ N. Sơ đồ thứ tự thuận có nguồn, các sơ đồ còn lại không có nguồn.

Dựa vào quy tắc kết nối trên ta có thể thiết lập sơ đồ phức hợp cho mọi hệ thống điện có sơ đồ phức tạp, ứng với mỗi trạng thái ngắn mạch không đối xứng. Trên

hình 6.24 và 6.25 là các ví dụ thiết lập sơ đồ phức hợp đối với một số hệ thống điện cụ thể.

Sơ đồ phức hợp có ý nghĩa ứng dụng rất lớn. Rõ ràng có thể sử dụng sơ đồ phức hợp để tính toán ngay (không cần qua bước tính trị số dòng áp tạo điểm ngắn mạch) các dòng điện và điện áp ngắn mạch thành phần, đồng thời trên cả 3 sơ đồ thứ tự (thuận , nghịch, không). Cộng các thành phần tương ứng ta được trị số dòng, áp tổng hợp phân bố trên mọi nhánh mọi nút. Đây chính là cách thực hiện trong đa số các chương trình tính ngắn mạch (đối xứng và không đối xứng). Ngoài ra sơ đồ phức hợp còn được ứng dụng để tạo ra các mô hình (vật lý) phân tích dòng điện ngắn mạch không đối xứng.



Hình 6.23
Sơ đồ phức hợp các dạng ngắn mạch không đối xứng

Có một số điểm đáng chú ý như sau:

- Trung điểm của sơ đồ thứ tự không không phải bao giờ cũng trùng với trung điểm của các thiết bị hệ thống. Khi xét đến tổng trở nối đất và của dây trung tính cần phải hiểu trung điểm của sơ đồ thứ tự không là điểm có điện áp bằng 0 tại vị trí ngắn mạch (trung tính của vectơ điện áp ba pha tại điểm ngắn mạch).

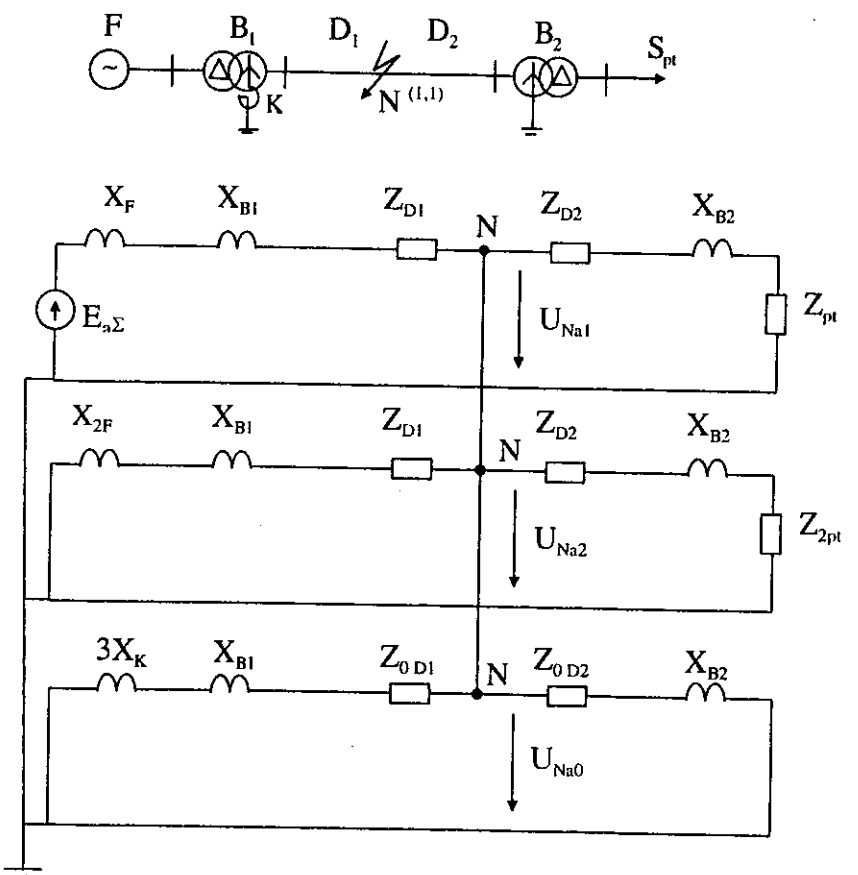
Các điện áp thứ tự thành phần (cả môđun, góc pha) phải là trị số điện áp so với trung điểm của từng sơ đồ thứ tự tương ứng. Tuy nhiên kết quả giải mạch theo sơ đồ phức hợp lại là điện áp so với trung điểm chung của toàn sơ đồ. Do đó sau khi có kết quả cần hiệu chỉnh lại. Ví dụ, với ngắn mạch một pha điện áp thứ tự nghịch của mỗi nút đều cần được hiệu chỉnh như sau :

$$\dot{U}'^{(1)}_{a2} = \dot{U}^{(1)}_{a2} - U^{(1)}_{Na1} .$$

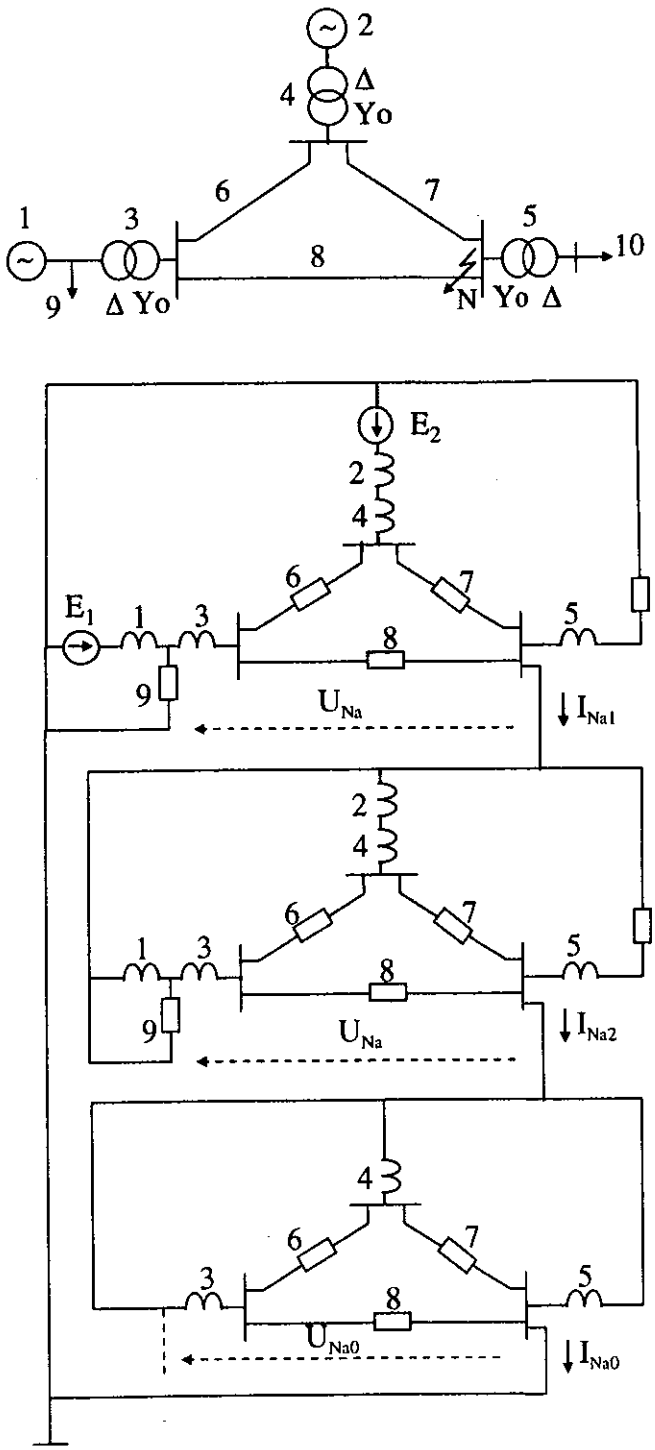
Điện áp thứ tự không:

$$\dot{U}'^{(1)}_{a0} = \dot{U}^{(1)}_{a0} - (\dot{U}^{(1)}_{Na2} + U^{(1)}_{Na1}) .$$

Điện áp thứ tự thuận không cần hiệu chỉnh vì trung điểm của nó chập chung với trung điểm toàn sơ đồ.



Hình 6.24


2
4
Δ
Yo
6
7
1
3
5
10
8
9
Δ Yo
N
Yo Δ
E2
2
4
6
7
E1
1
3
5
10
8
9
UNa
INa1
2
4
6
7
1
3
5
10
8
9
UNa
INa2
4
6
7
3
5
8
UNa0
INa0

Hình 6.25

Những điểm cần ghi nhớ trong chương sáu

1. Phương pháp các thành phần đối xứng là cơ sở của phương pháp tính toán ngắn mạch không đối xứng. Theo phương pháp này hệ thống các đại lượng 3 pha (sđđ, điện áp, dòng điện) được phân tích thành 3 thành phần thứ tự: thuận, nghịch và không. Mỗi thành phần gây ra phản ứng khác nhau đối với mạch điện do đó các sơ đồ tính toán nói chung khác nhau, cần được thiết lập riêng. Sơ đồ thứ tự không thường khác nhiều so với sơ đồ thứ tự thuận, nghịch và phụ thuộc nhiều vào chế độ trung tính cũng như sơ đồ đấu dây các máy biến áp.
2. Tồn tại quy tắc đẳng trị thứ tự thuận cho phép đưa cách tính toán ngắn mạch không đối xứng về cách tính toán ngắn mạch 3 pha đối xứng. Nhờ quy tắc này có thể tính ngay được trị số dòng điện ngắn mạch tại điểm ngắn mạch (trong các pha có dòng ngắn mạch khác 0) thông qua trị số của thành phần thứ tự thuận (tính như ngắn mạch 3 pha).
3. Dòng điện ngắn mạch phân bố trên các nhánh (trị số tổng hợp có xét đến cả góc pha) có thể xác định được theo phương pháp biến đổi mở rộng sơ đồ hoặc sơ đồ phức hợp ứng với dạng ngắn mạch tính toán.
4. Sự thay đổi góc pha do ảnh hưởng của các máy biến áp đối với các dòng, áp thành phần thứ tự (thuận, nghịch, không) không giống nhau. Khi tổng hợp dòng điện phân bố trên các nhánh theo phương pháp mở rông sơ đồ cần phải hiệu chỉnh các góc pha cho phù hợp.

Chương 7

SỰ CỐ PHỨC TẠP

7.1 KHÁI NIỆM CHUNG

Sự cố phức tạp trong chương này được hiểu là tình huống của hệ thống điện bị đồng thời vừa ngắn mạch vừa đứt dây. Vị trí ngắn mạch và đứt dây có thể tồn tại ở những vị trí khác nhau trong mạng điện.

Trong thực tế xác xuất xảy ra sự cố phức tạp thường rất thấp, tuy nhiên chúng có thể tạo ra các điều kiện bất lợi, nguy hiểm rất đáng quan tâm. Chẳng hạn, ngắn mạch có kèm đứt dây làm cho bảo vệ rơ le tác động không nhậy, kém chọn lọc. Hiện tượng đứt dây một pha không tạo ra dòng điện lớn nhưng lại có thể làm xuất hiện thành phần dòng điện thứ tự nghịch đáng kể chạy trong máy phát và các thiết bị dùng điện. Tình trạng này nếu không có tính toán trước, hệ thống có thể vẫn vận hành kéo dài gây hậu quả nghiêm trọng. Ngược lại, nếu hệ số không đối xứng nằm trong phạm vi cho phép thì tình trạng đứt dây một pha lại có thể để tồn tại trong thời gian tác động của các phượng tiện tự động hoặc xử lý sự cố (kéo dài đến 30 phút). Khi đó hệ thống vận hành vẫn bình thường, giảm nhẹ được những thiệt hại không đáng có (so với cắt ngay cả 3 pha, đưa phần tử bị sự cố ra khỏi hệ thống). Hệ thống có trung điểm không nối đất, bị chạm đất 2 điểm trên 2 pha khác nhau ở những vị trí khác nhau, gần giống như ngắn mạch 2 pha $N^{(2)}$ nhưng tính toán phức tạp hơn (theo phương pháp của sự cố phức tạp). Trong chương này chỉ xét tóm tắt những nguyên tắc cơ bản nhất tính toán, phân tích sự cố phức tạp.

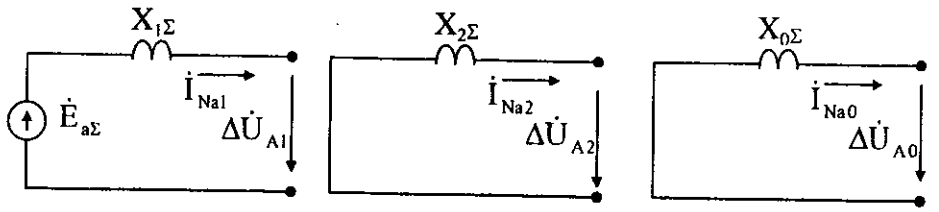
7.2 TÍNH TOÁN CHẾ ĐỘ HỆ THỐNG LÚC MỘT HAY HAI PHA BỊ ĐỨT (không đối xứng dọc)

Có thể coi trạng thái đứt dây pha như là đặt nối tiếp vào mạch tại vị trí bị đứt một hiệu điện áp $\Delta\dot{U}$ sao cho dòng trong pha bị đứt bằng 0 Pha không bị đứt tương ứng với $\Delta\dot{U}=0$. Như vậy mạch điện trở thành không đối xứng do sự không đối xứng của dòng và áp tại nơi sự cố. Ta có thể giải bài toán theo phương pháp các thành phần đối xứng.

1. Hệ phương trình cơ bản

Giả thiết có thể đẳng trị mạch thành sơ đồ tối giản, nhìn từ vị trí đứt dây về các phía của sơ đồ. Nói khác đi, tính tổng trở đầu vào của toàn bộ sơ đồ nhìn từ 2 cực của vị trí sự cố. Với 3 thành phần thứ tự ta có các sơ đồ đẳng trị như trên hình 7-1.

Rõ ràng chỉ có sơ đồ thứ tự thuận có nguồn, còn sơ đồ thứ tự nghịch, thứ tự không không có nguồn.



Hình 7.1

Tương tự chế độ ngắn mạch ta thiết lập được hệ phương trình cơ bản (gồm 3 phương trình cho các đại lượng thành phần pha A).

$$\begin{aligned}\Delta\dot{U}_{A1} &= \dot{E}_{A\Sigma} - j\dot{I}_{A1}X_{1\Sigma}\\ \Delta\dot{U}_{A2} &= 0 - j\dot{I}_{A2}X_{2\Sigma}\\ \Delta\dot{U}_{A0} &= 0 - j\dot{I}_{A0}X_{0\Sigma}\end{aligned} \qquad (7\text{-}1)$$

2. Điều kiện về trạng thái sự cố

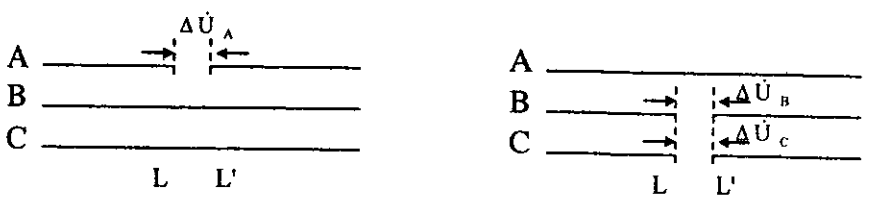
Hệ 3 phương trình (7-1) có 6 ẩn số nên để giải được cần bổ sung thêm 3 phương trình. Đó chính là các phương trình thể hiện trạng thái của mạch bị sự cố.

- Đứt dây một pha (pha A là pha đặc biệt : bị đứt dây):

$$\begin{aligned}\Delta\dot{U}_B &= 0\,;\\ \Delta\dot{U}_C &= 0\,;\\ \dot{I}_A &= 0\,.\end{aligned} \qquad (7\text{-}2)$$

- Đứt dây hai pha (pha A là pha đặc biệt : không bị đứt dây):

$$\begin{aligned}\dot{I}_B &= 0\,;\\ \dot{I}_C &= 0\,;\\ \Delta\dot{U}_A &= 0\,.\end{aligned} \qquad (7\text{-}3)$$



Hình 7.2

So sánh với hệ phương trình trạng thái ngắn mạch hai pha và một pha ta thấy có sự tương ứng hoàn toàn (xem mục 6.4). Như vậy ta có thể áp dụng cách tính giống hệt như đối với ngắn mạch hai pha và một pha, kể cả áp dụng sơ đồ phức hợp.

Điểm đáng chú ý khi so sánh các biểu thức tính toán ngắn mạch với đứt dây là các trị số điện kháng tổng hợp. Với cùng sơ đồ, nói chung các trị số $X_{1\Sigma}$, $X_{2\Sigma}$, $X_{0\Sigma}$ không giống nhau khi xét ngắn mạch và đứt dây tại cùng vị trí. Đó là vì khi đứt dây điện kháng tổng hợp cần được tính như tổng trở đầu vào nhìn từ cửa với 2 cực là các điểm bị đứt (tách về 2 phía). Với trạng thái ngắn mạch, điện kháng tổng hợp cũng là tổng trở đầu vào của toàn mạch nhưng cửa vào là điểm ngắn mạch và trung điểm sơ đồ. Cũng vậy, sức điện động tổng hợp nói chung cũng không giống nhau trong 2 trường hợp. Hơn nữa, xác định sức điện động tổng hợp cho tính toán đứt dây đôi khi khá phức tạp. (Nếu áp dụng phương pháp sơ đồ phức hợp thì không nhất thiết phải tính).

3. Sơ đồ phức hợp trạng thái đứt dây

a. Một pha bị đứt

Dựa vào hệ phương trình cơ bản và các điều kiện về trạng thái sự cố ta có các kết quả sau cho đứt dây một pha (tương tự ngắn mạch 2 pha chạm đất):

$$\dot{I}_{a1} = \frac{\dot{E}_{a\Sigma}}{j\left(X_{1\Sigma} + \frac{X_{2\Sigma}X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}\right)}$$

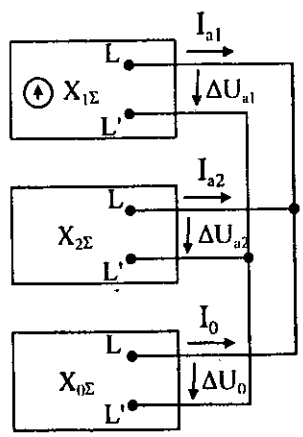
$$\dot{I}_{a2} = -\dot{I}_{a1}\frac{X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}$$

$$\dot{I}_{a0} = -\dot{I}_{a1}\frac{X_{2\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}$$

$$\left|\dot{I}_b\right| = \left|\dot{I}_C\right| = \sqrt{3}\sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma}.X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}\, I_{a1}$$

$$\dot{I}_a = 0.$$

$$\Delta\dot{U}_{a1} = \dot{E}_{a\Sigma} - j\dot{I}_{a1}X_{1\Sigma} = \Delta\dot{U}_{a2} = \Delta\dot{U}_{a0}$$



Hình 7.3

Các quan hệ trên cho phép đưa ra sơ đồ phức hợp như trên hình 7.3. Dễ thấy, trị số dòng điện tại các pha không bị đứt bằng nhau và tỉ lệ với thành phần thứ tự thuận qua hệ số tỉ lệ:

$$m = \sqrt{3}\sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma}.X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}\,.$$

Còn điện kháng phụ: $X^{(1)}_{\Delta} = X_{2\Sigma} // X_{0\Sigma}$, giống như ngắn mạch 2 pha chạm đất.

Như vậy có thể tính được ngay trị số dòng điện tại các pha không bị đứt sau khi biết thành phần thứ tự thuận. Tuy nhiên, khi tính toán đứt dây, người ta thường quan tâm nhiều hơn đến dòng điện thành phần. Ví dụ, tính toán kiểm tra thành phần thứ tự nghịch xuất hiện trong các máy phát và động cơ, không được vượt quá một tỉ lệ cho phép.

b. Hai pha bị đứt

Biểu thức tính toán cho dòng và áp thành phần tại vị trí đứt dây có thể nhận được như sau:

$$\dot{I}_{a1} = \frac{\dot{E}_{a\Sigma}}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})}$$

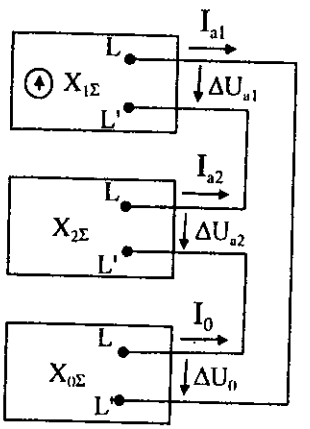
$$\dot{I}_{a0} = \dot{I}_{a2} = \dot{I}_{a1}; \quad \dot{I}_a = 3\dot{I}_{a1};$$

$$\Delta\dot{U}_{a1} = \dot{E}_{a\Sigma} - j\dot{I}_{a1}X_{1\Sigma} = j\dot{I}_{a1}(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma});$$

$$\Delta\dot{U}_{a2} = -j\dot{I}_{a1}.X_{2\Sigma};$$

$$\Delta\dot{U}_0 = -j\dot{I}_{a1}.X_{0\Sigma}.$$

$$\Delta\dot{U}_{a1} + \Delta\dot{U}_{a2} + \Delta\dot{U}_0 = 0.$$



Hình 7.4

Các quan hệ trên tương ứng với sơ đồ phức hợp trên hình 7.4. Biểu thức điện kháng phụ trong trường hợp này giống như ngắn mạch 1 pha:

$$X^{(1,1)}_{\Delta} = X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}, \text{ hệ số m = 3.}$$

Ví dụ 7.1. Cho sơ đồ HTĐ hình 7.5,a , hãy xác xác định dòng điện các pha của đường dây khi có một pha bị đứt. Điện kháng các phần tử cho trong hệ đơn vị tương đối, ghi trên sơ đồ phức hợp hình hình 7.5,b.

Giải: Tính các điện kháng tổng hợp (như tổng trở đầu vào nhìn từ vị trí đứt dây):

$$X_{1\Sigma} = 0,15 + 0,20 + 1,20 + 0,25 + 0,20 = 2,0.$$

$$X_{2\Sigma} = 0,15 + 0,20 + 0,35 + 0,25 + 0,20 = 1,15.$$

$$X_{0\Sigma} = 0,57 + 0,20 + 0,20 = 0,97.$$

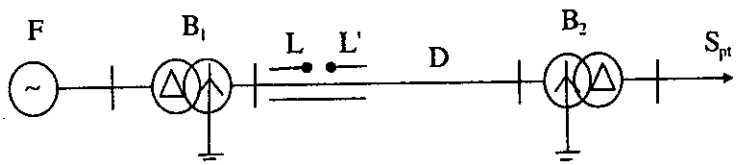
Điện kháng phụ:

$$X^{(1)}_{\Delta} = X_{2\Sigma} // X_{0\Sigma} = 1,15//0,97 = 0,526.$$

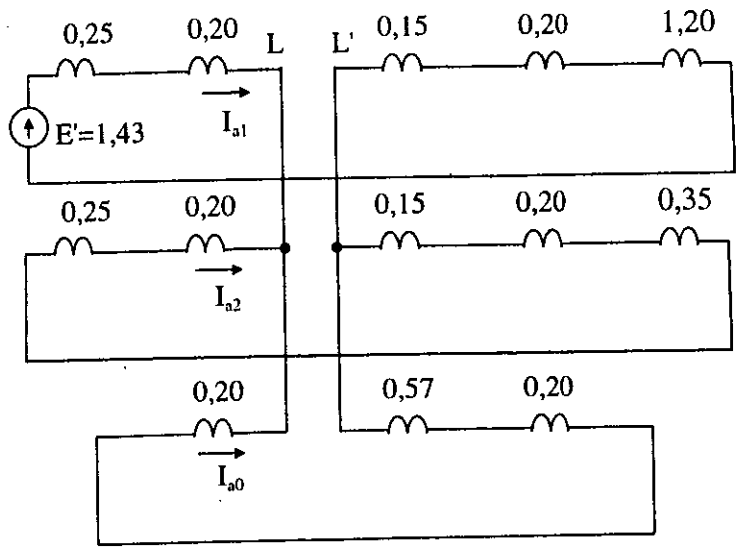
Trị số dòng điện thứ tự thuận:

$$\dot{I}_{a1} = \frac{\dot{E}_{a\Sigma}}{j\left(X_{1\Sigma} + X_{\Delta}^{(1)}\right)} = \frac{j1,43}{j(2,0+0,526)} = 0,565$$

Chú ý, ở đây chọn góc pha dòng thứ tự thuận bằng 0, trong mạch thuần kháng sđđ có góc pha vượt trước 90°.



a)



b)

Hình 7.5

$$I_{a2} = -0,565\frac{0,97}{0,97+1,15} = -0,258;$$

$$I_{a0} = -0,565\frac{1,15}{0,97+1,15} = -0,307.$$

Trị số dòng điện trên các pha không bị đứt của đương f dây tính được theo hệ số tỉ lệ m:

$$I_B = I_C = m.I_{a1} = \sqrt{3}\sqrt{1-\frac{1,15.0,97}{(1,15+0,97)^2}}.0565 = 0,85;$$

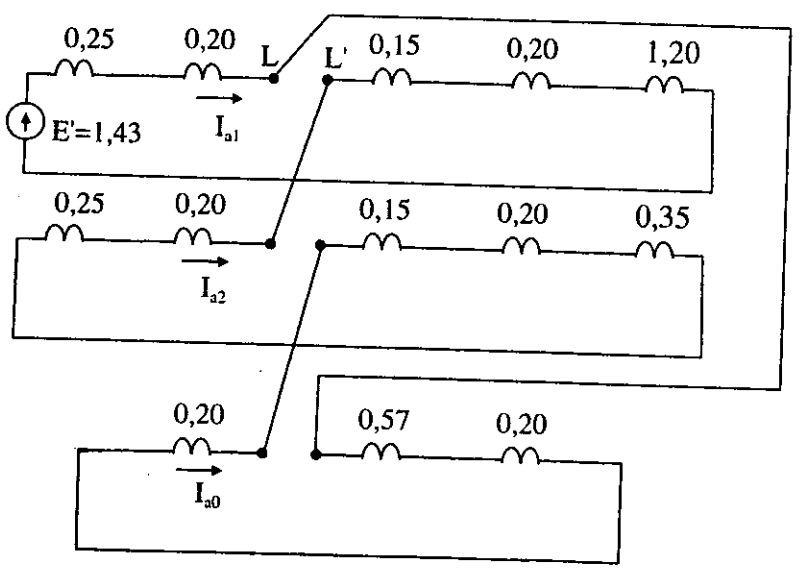
Có thể tính được dòng điện pha trong chế độ làm việc bình thường:

$$I = \frac{1,43}{0,25+0,20+0,15+0,20+1,2} = 0,715$$

Như vậy khi đứt 1 pha dòng điện trong các pha còn lại tăng lên (19%).

Ví dụ 7.2. Vẫn sơ đồ hệ thống như trên hình 7.5,a xác định dòng điện trong pha A khi pha B và pha C bị đứt.

Sơ đồ phức hợp sẽ như trên hình 7.6.



Hình 7.6

Trong ví dụ 7.1 đã xác định được các điện kháng tổng hợp:

$X_{1\Sigma} = 2,0$; $X_{2\Sigma} = 1,15$; $X_{0\Sigma} = 0,97$.

Tính điện kháng phụ: $X_\Delta = X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma} = 1,15 + 0,97 = 2,12$.

Dòng điện thành phần :

$$I_{a1} = I_{a2} = I_{a0} = \frac{1,43}{2,0+2,12} = 0,35.$$

Dòng tổng hợp trên pha A (pha không bị đứt): $I_a = 3.\ 0{,}35 = 1{,}05$, tăng lên đáng kể so với lúc làm việc bình thường (tăng 47%).

4. Dùng nguyên lý xếp chồng để tính toán đứt dây

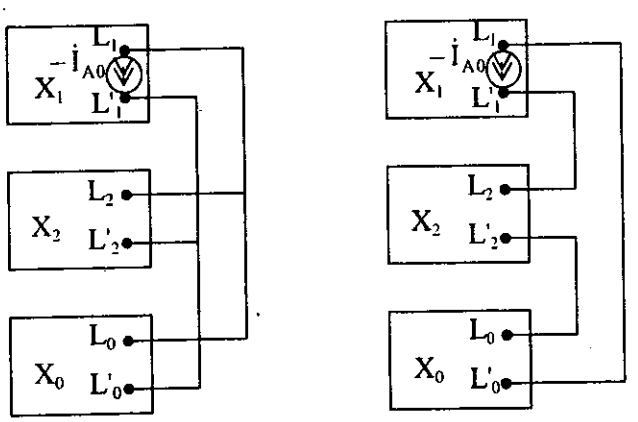
Với sự cố đứt dây người ta hay áp dụng nguyên lý xếp chồng để tính toán. Trạng thái đứt dây có thể được coi là kết quả xếp chồng của 2 trạng thái:

- Trạng thái hoạt động bình thường của nguồn (các máy phát) với các nguồn áp xuất hiện phụ thêm tại chỗ đứt dây bằng 0. Thực chất là CĐXL trước sự cố.

- Trạng thái mọi nguồn máy phát bằng 0 nhưng tồn tại hiệu điện áp tại điểm sự cố. Trạng thái này còn gọi là trạng thái riêng sự cố.

Dễ thấy rằng có thể thay tương đương nguồn áp phụ thêm đặt vào vị trí đứt dây bằng nguồn dòng, cùng trị số với dòng pha trước khi sự cố nhưng ngược chiều (để chế độ tổng hợp có dòng trong pha đứt dây bằng 0). Khi đó trị số nguồn dòng luôn luôn đã biết (bằng dòng xác lập trước sự cố nhưng ngược dấu).

Chế độ trước khi bị đứt dây đã biết hoặc tính được (CĐXL trước sự cố), còn giải mạch theo chế độ riêng sự cố khá đơn giản bởi các mạch của sơ đồ thứ tự đều không nguồn, dễ dàng đẳng trị thành một tổng trở đẳng trị. Nói riêng cũng áp dụng được sơ đồ phức hợp để tính toán dòng áp phân bố cho chế độ riêng sự cố. Hình 7.7 mô tả sơ đồ phức hợp trạng thái riêng sự cố khi đứt dây một pha và đứt dây 2 pha. Sơ đồ nhận được từ sơ đồ phức hợp đầy đủ (hình 7.3 và 7.4) bằng cách bỏ nguồn sđđ trong sơ đồ thứ tự thuận và thay thế nguồn áp tại chỗ đứt dây bằng nguồn dòng.



Hình 7.7 Sơ đồ phức hợp
trạng thái riêng sự cố.
a. Đứt dây 1 pha; b) Đứt dây 2 pha

Chú ý là, kết quả tính toán nhận được từ sơ đồ phức hợp là chế độ riêng sự cố pha A (các thành phần thứ tự thuận, nghịch, không) . Đại lượng của các pha còn lại cần được suy ra dựa vào chiều quay vec tơ của các thành phần thứ tự. Dòng điện tổng hợp tại chỗ sự cố đứt dây sẽ bao gồm 4 thành phần:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{A0} + \dot{I}_{sc\,A1} + \dot{I}_{sc\,A2} + \dot{I}_{sc\,A0}$$
$$\dot{I}_B = \dot{I}_{B0} + a^2\dot{I}_{sc\,A1} + a\dot{I}_{sc\,A2} + \dot{I}_{sc\,A0}$$
$$\dot{I}_C = \dot{I}_{C0} + a\dot{I}_{sc\,A1} + a^2\dot{I}_{sc\,A2} + \dot{I}_{sc\,A0}$$

Ở đây kí hiệu I_{A0}, I_{B0}, I_{C0} là trị số dòng điện các pha ở chế độ làm việc bình thường, trước khi xảy ra sự cố đứt dây.

Ví dụ 7.3 Cho sơ đồ hệ thống điện hình 7-8,a. Hãy xác định và vẽ đồ thị vectơ dòng điện của hai pha không bị đứt (đứt một pha trên một lộ đường dây). Biết dòng điện các pha trên mỗi lộ đường dây trước khi xảy ra sự cố là 305 A.

Máy phát điện: 250 MVA; 13,8 kV; $X'_d = 0,29$; $X_2 = 0,36$

Máy biến áp B_1 (hai cuộn dây): 240 MVA; k=248/13,8 ; $U_N\% = 9$

Máy biến áp B_2 (tự ngẫu): 200 MVA; k=209/121/11.

$U_{N\,C\text{-}T} = 9\%$; $U_{N\,C\text{-}H} = 35\%$; $U_{N\,T\text{-}H} = 20\%$

Đường dây: l = 175 km ; $x_1 = 0,41$ ôm/km ; $x_0 = 0,35x1$ (tính cho một lộ). Hỗ cảm thứ tự không giữa 2 lộ : $x_{\text{I-II}\,0} = 0,82$ ôm/km.

Hệ thống: công suất vô cùng lớn, điện áp thanh cái không đổi 110 kV.

Giải: Vì đã cho chế độ trước sự cố nên thuận lợi nhất ta áp dụng phương pháp xếp chồng. Sơ đồ phức hợp của chế độ riêng sự cố như trên hình 7-8,b. Sơ đồ này nhận được trên cơ sở thiết lập sơ đồ phức hợp chế độ đứt dây một pha, cho các nguồn sđđ bằng 0 và đặt nguồn dòng vào chỗ đứt dây.

Theo các số liệu đã cho áp dụng các công thức quen biết ta tính được thông số của các phần tử, ghi trực tiếp trên sơ đồ. Chú ý rằng hai lộ của đường dây chạy cạnh nhau hỗ cảm thứ tự không khá lớn. Trong trường hợp này có kể đến, ta có thể tính cho toàn bộ chiều dài 2 lộ : $X_{\text{I-II}\,0} = 0,82 \cdot 175 = 143,5$ ôm. Các số liệu tính trong hệ đơn vị có tên quy về cấp 220 kV, ghi trên sơ đồ hình 7.8,b.

Theo số liệu ghi trên sơ đồ, tính được các điện kháng tổng hợp:

$$X_{1\Sigma} = 117,8 \text{ ôm}; X_{2\Sigma} = 119,8 \text{ ôm}; X_{1\Sigma} = 177,3 \text{ ôm}$$

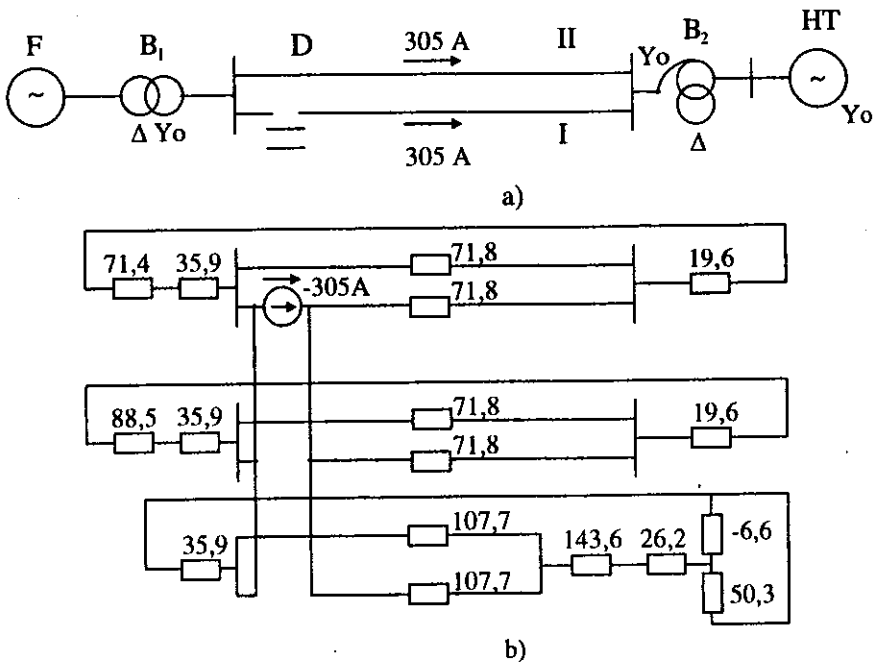
Mạch chính (có nguồn dòng chạy qua) có điện kháng tổng hợp:

$$X = 117,8//119,8//177,3 = 44,5 \text{ ôm}.$$

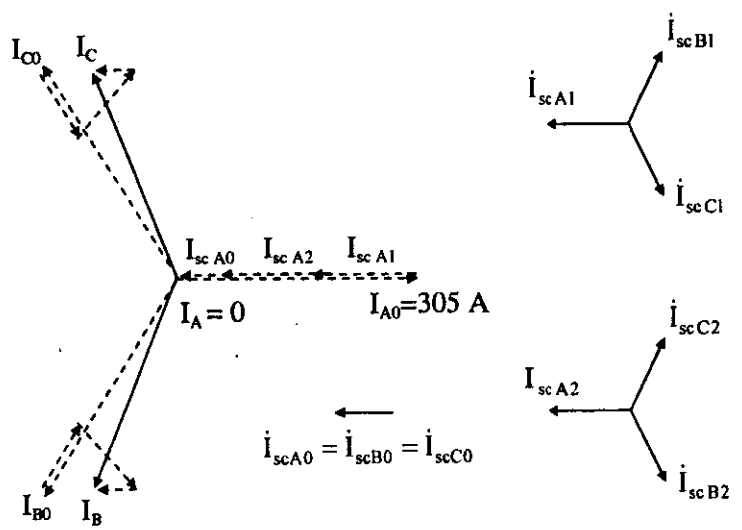
Theo quy tắc phân bố dòng điện cho các nhánh song song ta dễ dàng tìm được dòng điện trên mọi nhánh của sơ đồ phức hợp. Nói riêng tại chỗ đứt dây ta có:

$$\dot{I}_{sc\,A1} = -305 \times \frac{44,5}{117,8} = -115\,A$$
$$\dot{I}_{sc\,A2} = -305 \times \frac{44,5}{119,3} = -113\,A$$
$$\dot{I}_{sc\,A0} = -305 \times \frac{44,5}{177,3} = -77\,A \quad .$$

Sử dụng đồ thị vectơ hoặc biểu thức phức số ta tính được dòng điện tổng hợp, tương tự như khi tính ngắn mạch hai pha. Trên hình 7.9 là kết quả đồ thị vectơ dòng điện trên các pha tại chỗ sự cố (lộ I).



Hình 7.8



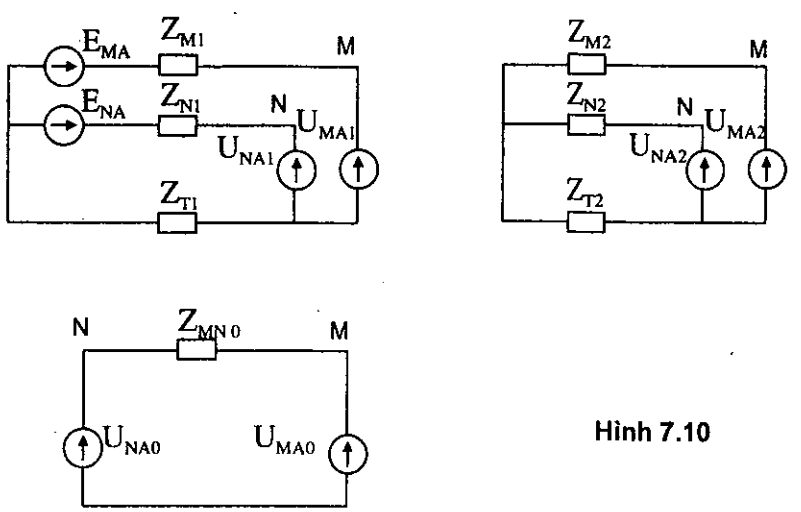
Hình 7.9

7.3 TÍNH TOÁN CHẾ ĐỘ SỰ CỐ PHỨC TẠP

Một sự cố không đối xứng bất kỳ (hiểu là một vị trí bị ngắn mạch hay đứt dây) theo phương pháp các thành phần đối xứng cần biểu thị bằng 6 ẩn số : 3 thành phần điện áp và 3 thành phần dòng điện tại chỗ sự cố. Mỗi vị trí sự cố ta luôn luôn viết được 3 phương trình trạng thái (còn gọi là các điều kiện bờ). Các phương trình còn lại cần được thiết lập theo quan hệ dòng áp trên 3 sơ đồ thứ tự. Trong trường hợp sự cố đơn, đó chính là 3 phương trình cơ bản.

Đối với sự cố phức tạp (2 vị trí trở lên) hệ phương trình cơ bản có nhiều biến số (ngay cả khi đã rút gọn) cần thiết lập theo các định luật Kirchhof và định luật Ohm. Ngoài ra, cũng như trường hợp đơn giản (một điểm sự cố) nếu chỉ dựa vào các hệ phương trình mạch thì chưa đủ số phương trình để giải. Đó là vì mỗi nút (nhánh) sự cố chứa 2 biến đều chưa biết (dòng và áp), sẽ thiếu một phương trình. Ba sơ đồ sẽ thiếu 3 phương trình. Nếu có n điểm sự cố sẽ thiếu 3n phương trình. May thay, cũng có đúng 3n phương trình điều kiện bờ ứng với n điểm sự cố. Đương nhiên còn cần dựa vào toán tử quay để chuyển đổi từ đại lượng tổng hợp sang thành phần và ngược lại để có đúng các biến thích hợp mới giải được (như đã làm với các dạng ngắn mạch đơn).

Để minh hoạ cụ thể ta xét trường hợp sự cố chạm đất kép xảy ra tại 2 vị trí trong hệ thống điện có trung tính cách điện với đất. Tại M chập đất pha B còn tại N chập đất pha C. Giả thiết sơ đồ sau biến đổi có dạng như trên hình 7-10 .



Hình 7.10

Ta có các phương trình trạng thái mạch đối với các sơ đồ thứ tự:

- Thứ tự thuận:

$$\dot{U}_{MA1} = \dot{E}_{MA} - \dot{I}_{MA1}(Z_{M1} + Z_{T1}) - \dot{I}_{NA1}Z_{T1}$$
$$\dot{U}_{NA1} = \dot{E}_{NA} - \dot{I}_{NA1}Z_{T1} - \dot{I}_{NA1}(Z_{N1} + Z_{T1}) \quad (7\text{-}4)$$

- Thứ tự nghịch:

$$\dot{U}_{MA2} = -\dot{I}_{MA2}(Z_{M2} + Z_{T2}) - \dot{I}_{NA2}Z_{T2}$$
$$\dot{U}_{NA2} = -\dot{I}_{NA2}Z_{T2} - \dot{I}_{NA2}(Z_{N2} + Z_{T2}) \quad (7\text{-}5)$$

- Thứ tự không:

$$\dot{U}_{NA0} - \dot{U}_{MA0} = \dot{I}_{MA0}Z_{MN0} \quad (7\text{-}6)$$

Các điều kiện bờ ứng với chạm đất một pha cho 2 vị trí (pha B tại M, pha C tại N):

$$\dot{I}_{MA} = 0\,;\ \dot{I}_{MC} = 0\,;\ \dot{U}_{MB} = 0\ ;\quad \text{(chập đất tại M)}$$
$$\dot{I}_{NA} = 0\,;\ \dot{I}_{NB} = 0\,;\ \dot{U}_{NC} = 0\ ;\quad \text{(chập đất tại N)}$$

Khi trung tính không nối đất ta còn có điều kiện phụ : $\dot{I}_{MB} = -\dot{I}_{NC}$.

Lấy pha đặc biệt làm gốc (pha A: pha không có sự cố) chuyển các điều kiện bờ về các biến thành phần, ta có:

$$\dot{I}_{MA} = \dot{I}_{MA1} + \dot{I}_{MA2} + \dot{I}_{MA0} = 0\,;$$
$$\dot{I}_{MC} = \dot{I}_{MC1} + \dot{I}_{MC2} + \dot{I}_{MC0} = a\dot{I}_{MA1} + a^2\dot{I}_{MA2} + \dot{I}_{MA0} = 0\,; \quad (7\text{-}7)$$

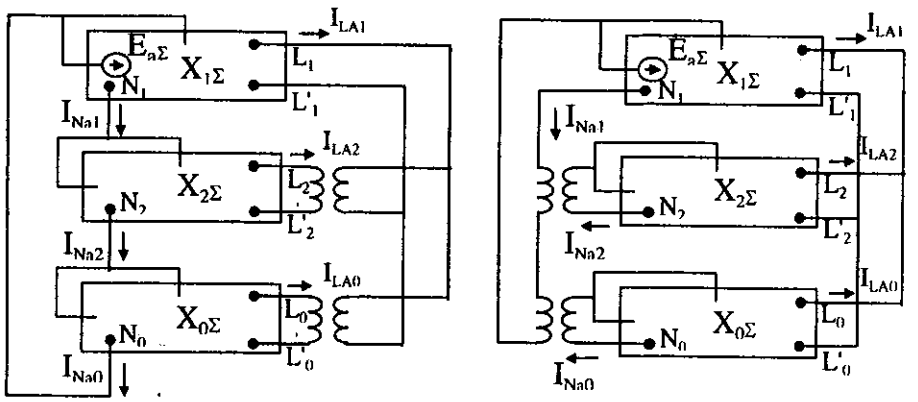
$$\dot{U}_{MB} = \dot{U}_{MB1} + \dot{U}_{MB2} + \dot{U}_{MB0} = a^2\dot{U}_{MA1} + a\dot{U}_{MA2} + \dot{U}_{MA0} = 0\,;$$
$$\dot{I}_{NA} = \dot{I}_{NA1} + \dot{I}_{NA2} + \dot{I}_{NA0} = 0\,;$$
$$\dot{I}_{NB} = \dot{I}_{NB1} + \dot{I}_{NB2} + \dot{I}_{NB0} = a^2\dot{I}_{NA1} + a\dot{I}_{NA2} + \dot{I}_{NA0} = 0\,; \quad (7\text{-}7)$$
$$\dot{U}_{NC} = \dot{U}_{NC1} + \dot{U}_{NC2} + \dot{U}_{NC0} = a\dot{U}_{NA1} + a^2\dot{U}_{NA2} + \dot{U}_{NA0} = 0\,;$$
$$\dot{I}_{MB} = a^2\dot{I}_{MA1} + a\dot{I}_{MA2} + \dot{I}_{MA0} = -a\dot{I}_{NA1} - a^2\dot{I}_{NA2} - \dot{I}_{NA0} = -\dot{I}_{NC}$$

Kết hợp (7-4), (7-5), (7-6) và (7-7) ta giải ra được mọi trị số dòng, áp thành phần, sau đó tổng hợp thành các đại lượng pha.

7.4 SƠ ĐỒ PHỨC HỢP CỦA TÌNH TRẠNG SỰ CỐ PHỨC TẠP

Sơ đồ phức hợp là một công cụ hết sức hiệu quả để nghiên cứu ngắn mạch không đối xứng. Sơ đồ là kết quả ghép nối các sơ đồ thành phần (thuận, nghịch, không) qua điểm ngắn mạch. Điều kiện ghép nối chính là quan hệ dòng áp giữa 3 thành phần. Nếu trước và sau khi ghép nối quan hệ vẫn không thay đổi thì sơ đồ là tương đương, có thể áp dụng để giải mạch.

Đối với sự cố phức tạp, tiếc rằng cách thực hiện đơn giản như trên lại không thoả mãn (chỉ thoả mãn cho một điểm sự cố nào đó). Muốn ghép nối được cần đưa thêm vào sơ đồ các máy biến áp lý tưởng tỉ số 1:1. Trên hình 7-11 minh hoạ 2 phương án ghép nối để tạo ra sơ đồ phức hợp của trường hợp ngắn mạch một pha (tại N) kèm đứt dây một pha (tại L). Chọn một sự cố ghép nối trực tiếp về điện (giống như sự cố đơn), sự cố tiếp theo ghép nối qua máy biến áp lý tưởng. Cách ghép nối này luôn thoả mãn bởi quan hệ ghép nối chỉ ảnh hưởng cục bộ đúng vị trí sự cố.



Hình 7.11

Cả hai phương án sơ đồ phức hợp trên đều thỏa mãn các điều kiện tại điểm sự cố. Thật vậy, với máy biến áp có tỉ số 1:1 , ở cả 2 sơ đồ ta đều có:

$$\dot{I}_{NA1} = \dot{I}_{NA2} = \dot{I}_{NA0}$$

$$\dot{U}_{NA1} + \dot{U}_{NA2} + \dot{U}_{NA0} = 0$$

chính là điều kiện ngắn mạch một pha tại điểm N.

$$\Delta\dot{U}_{LA1} = \Delta\dot{U}_{LA2} = \Delta\dot{U}_{LA0}$$

$$\dot{I}_{LA1} + \dot{I}_{LA2} + \dot{I}_{LA0} = 0$$

chính là điều kiện đứt dây một pha tại điểm L.

Khi thực hiện tính toán bằng chương trình việc có thêm máy biến áp lý tưởng không có gì khó khăn (xem phụ lục). Chỉ khi sử dụng mô hình vật lý máy biến áp đặt thêm có thể gây sai số nhiều (vì không phải lý tưởng).

Những điểm cần ghi nhớ trong chương bẩy

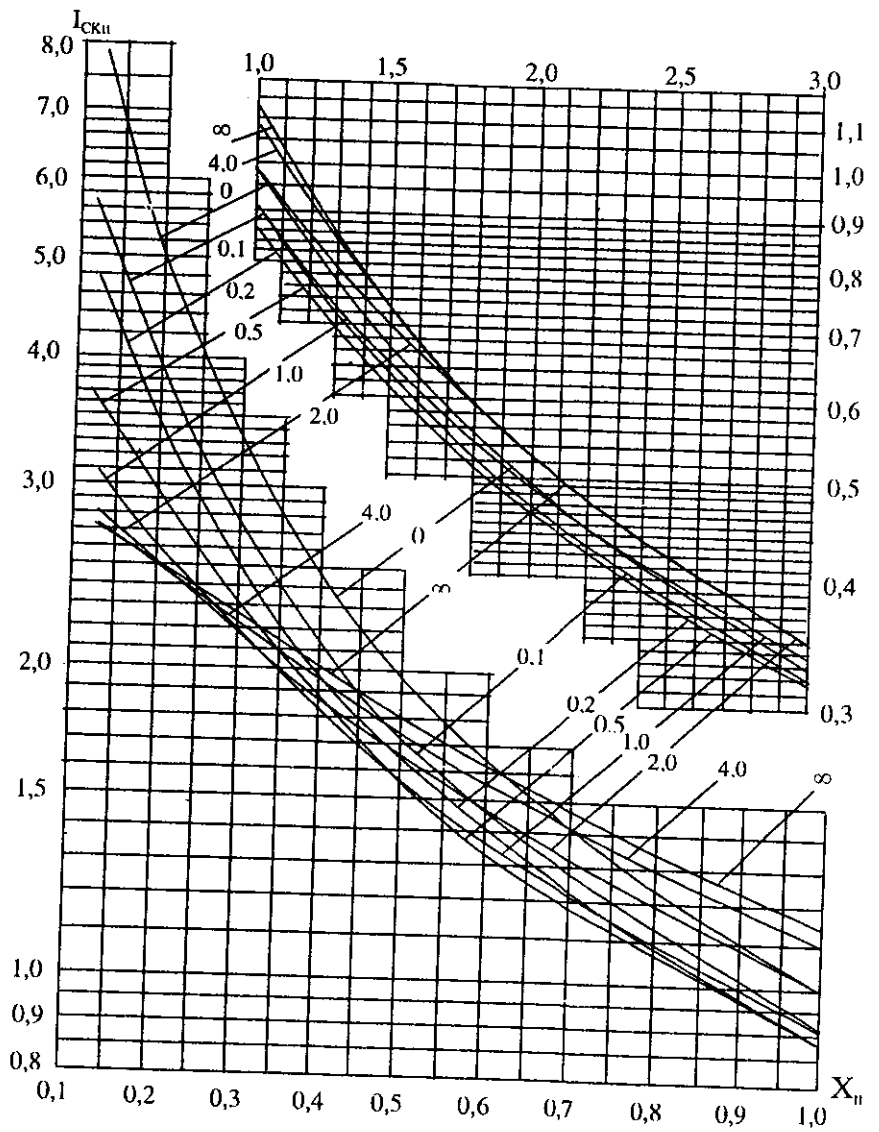
1. Sự cố phức tạp bao gồm cả ngắn mạch và đứt dây, điểm sự cố có thể tồn tại đồng thời ở nhiều vị trí khác nhau trong mạng điện.

2. Để tính toán sự cố đứt dây một hoặc hai pha (ở một vị trí) có thể áp dụng phương pháp hoàn toàn tương tự với ngắn mạch hai pha hoặc một pha. Cần xác định điện kháng tổng hợp cho các sơ đồ thứ tự trong trường hợp này như tổng trở đầu vào của toàn mạch nhìn từ 2 cực của vị trí đứt dây.

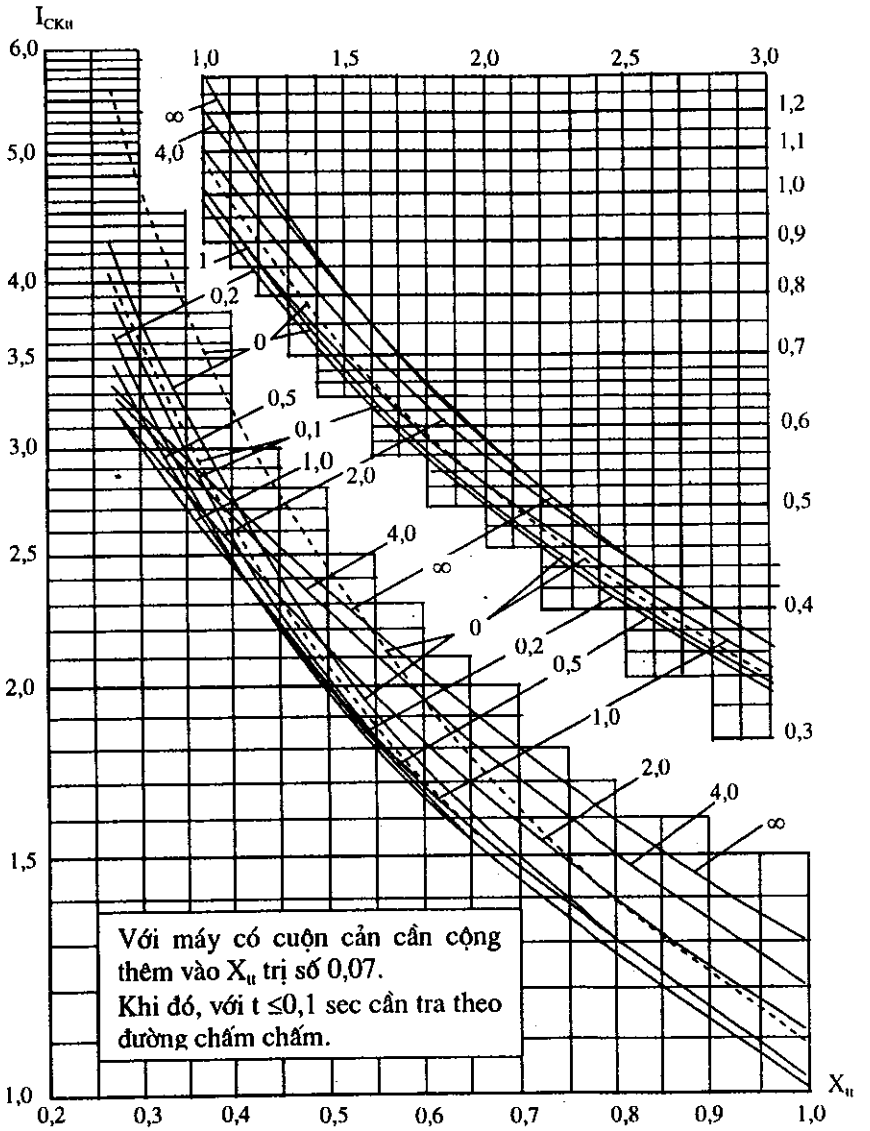
3. Dựa vào các điều kiện bờ tại điểm sự cố và sơ đồ các thành phần thứ tự có thể thành lập đủ số phương trình trạng thái mạch để giải bài toán sự cố phức tạp theo phương pháp các thành phần đối xứng. Phương pháp sơ đồ phức hợp cũng được ứng dụng rất hiệu quả để mô phỏng sự cố phức tạp trong hệ thống điện. Tuy nhiên trong các sơ đồ này cần đưa thêm vào các máy biến áp lý tưởng tỉ số 1:1. Giải mạch sẽ phức tạp hơn.

Phụ lục 1

CÁC ĐƯỜNG CONG TÍNH TOÁN NGẮN MẠCH



Hình PL1.1 Đường cong tính toán của máy phát điện tua-bin hơi tiêu chuẩn, có TĐK



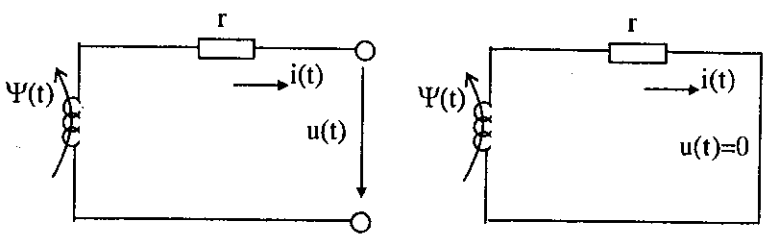
Hình PL1.2 Đường cong tính toán của máy phát điện tua-bin nước tiêu chuẩn, có TĐK

Phụ lục 2

HỆ PHƯƠNG TRÌNH QUÁ TRÌNH QUÁ ĐỘ ĐIỆN TỪ MÁY ĐIỆN ĐỒNG BỘ TRONG HỆ TOẠ ĐỘ QUAY VUÔNG GÓC

1. Phương trình vi phân quá trình quá độ điện từ trong các cuộn dây của máy điện đồng bộ

Giả thiết máy phát nối với hệ thống, điện áp đầu cực 3 pha đã biết u_A, u_B, u_C . Xét trường hợp chung, roto chuyển động quay với vận tốc góc $\omega(t)$ thay đổi. Góc lệch giữa trục dọc của roto so với trục pha A trên phần tĩnh là γ.



a) b)

Hình PL2.1

a) Hệ phương trình trong hệ toạ độ pha

Phương trình vi phân QTQĐ điện từ trong mỗi cuộn dây pha (tương ứng với sơ đồ hình PL3-1,a) có dạng sau:

$$u_A = -d\Psi_A/dt - r\,i_A$$
$$u_B = -d\Psi_B/dt - r\,i_B$$
$$u_C = -d\Psi_C/dt - r\,i_C \quad .$$

trong đó Ψ_A, Ψ_B, Ψ_C - từ thông móc vòng toàn phần với các cuộn dây pha của stato ;

i_A, i_B, i_C - dòng điện trong các cuộn dây pha của stato ;

r - điện trở cuộn dây pha của stato .

Trên roto trong trường hợp chung có thể bao gồm cuộn dây kích từ (nối với nguồn một chiều), cuộn cản dọc trục và cuộn cản ngang trục (khép kín như sơ đồ hình PL2-2,b). Các phương trình QTQĐ tương ứng với mỗi cuộn dây:

$$u_f = d\Psi_f/dt + r_f\,i_f \quad \text{(cuộn dây roto)}$$
$$0 = d\Psi_D/dt + r_D\,i_D \quad \text{(cuộn cản dọc trục)}$$
$$0 = d\Psi_Q/dt + r_Q\,i_Q \quad \text{(cuộn cản ngang trục)}$$

trong đó, u_f - điện áp kích từ ;
Ψ_f , Ψ_D , Ψ_Q , i_f , i_D , i_Q - các từ thông móc vòng và dòng điện trong các cuộn dây kích từ, cuộn cản dọc trục và cuộn cản ngang trục ;
r_f , r_D , r_Q - điện trở các cuộn dây trên roto .

Quan hệ giữa Ψ và i :

$$\Psi_A = L_A i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C + M_{Af} i_f + M_{AD} i_D + M_{AQ} i_Q ;$$
$$\Psi_B = M_{BA} i_A + L_B i_B + M_{BC} i_C + M_{Bf} i_f + M_{BD} i_D + M_{BQ} i_Q ;$$
$$\Psi_A = M_{CA} i_A + M_{CB} i_B + L_C i_C + M_{Cf} i_f + M_{CD} i_D + M_{CQ} i_Q ;$$
$$\Psi_f = M_{fA} i_A + M_{fB} i_B + M_{fC} i_C + L_f i_f + M_{fD} i_D ;$$
$$\Psi_D = M_{DA} i_A + M_{DB} i_B + M_{DC} i_C + M_{Df} i_f + L_D i_D ;$$
$$\Psi_Q = M_{QA} i_A + M_{QB} i_B + M_{QC} i_C + L_Q i_Q .$$

Các cuộn dây vuông góc với nhau có hỗ cảm bằng 0. Các phương trình trên tạo thành một hệ đủ xác định QTQĐ trong các cuộn dây của máy phát. Tuy nhiên, giải hệ là một việc hết sức phức tạp bởi trong trường hợp chung, các hệ số tự cảm và hỗ cảm đều là những hàm phi tuyến (kể đến bão hoà từ) và phụ thuộc góc quay, biến thiên theo thời gian. Ví dụ hỗ cảm giữa các cuộn dây pha và cuộn kích từ :

$$M_{Af} = M_f \cos \gamma ;$$
$$M_{Bf} = M_f \cos (\gamma - 120^\circ) ;$$
$$M_{Cf} = M_f \cos (\gamma + 120^\circ) ;$$

Ở đây M_f là trị số hỗ cảm cực đại giữa cuộn dây kích từ và cuộn dây pha, tương ứng với lúc chúng cùng trục với nhau. Đối với máy phát điện cực ẩn khe hở không khí giữa roto và stato có thể coi là đều. Khi roto chuyển động, mạch từ không thay đổi nên có thể coi hệ số tự cảm là hằng số. Đối với máy phát điện cực lồi, hệ số tự cảm các cuộn dây cũng thay đổi theo thời gian. Ví dụ đối với cuộn dây pha A :

$$L_A = L + L' \cos 2\gamma .$$

hỗ cảm giữa 2 cuộn dây trên cùng phần tĩnh :

$$M_{AB} = M + M' \cos 2(\gamma + 120^\circ) .$$

trong đó, L, M, L', M' là những hằng số nếu bỏ qua bão hoà từ.
Phép biến đổi sang hệ toạ độ quay vuông góc nhằm đưa các phương trình trên về dạng các phương trình vi phân có hệ số hằng. Phép biến đổi được thực hiện lần đầu tiên bởi các nhà bác học Park (Mỹ) và Gorev (Nga), nên hệ phương trình nhận được còn được gọi hệ phương trình Gorev - Park.

b) Hệ phương trình trong hệ toạ độ quay.

Thực chất của việc chuyển hệ phương trình QTQĐ sang hệ toạ độ quay là phép biến đổi toán học chặt chẽ, nhằm đưa hệ phương trình vi phân về dạng tuyến tính hệ số hằng. Để cho gọn, ta viết lại hệ phương trình đã viết trong hệ toạ độ pha về dạng ma trận :

$$[u_s] = -[R_s][i_s] - \frac{d}{dt}[\Psi_s] \qquad (A)$$

$$[u_r] = [R_r][i_r] + \frac{d}{dt}[\Psi_r] \qquad (B) \qquad \text{(PL2-1)}$$

$$[\Psi_S] = [M_s][i_s] + [M_{sr}][i_r] \qquad (C)$$

$$[\Psi_r] = [M_{rs}][i_s] + [M_r][i_r] \qquad (D)$$

Trong cách viết trên, các đại lượng thuộc stato được phân biệt bằng chỉ số s còn các đại lượng thuộc roto bằng r . Cụ thể như sau :

$$u_S = \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} \quad ; \quad i_S = \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} \quad ; \quad \Psi_S = \begin{bmatrix} \Psi_A \\ \Psi_B \\ \Psi_C \end{bmatrix}$$

$$u_r = \begin{bmatrix} u_f \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad ; \quad i_r = \begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad ; \quad \Psi_r = \begin{bmatrix} \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix}$$

$$R_S = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \quad ; \quad M_S = \begin{bmatrix} L_A & M_{AB} & M_{AC} \\ M_{AB} & L_B & M_{BC} \\ M_{AC} & M_{BC} & L_C \end{bmatrix}$$

$$R_r = \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 0 & R_D & 0 \\ 0 & 0 & R_Q \end{bmatrix} \quad ; \quad M_r = \begin{bmatrix} L_f & M_{fD} & 0 \\ M_{fD} & L_D & 0 \\ 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix}$$

$$M_{Sr} = \begin{bmatrix} \mathrm{M_{Af}} & \mathrm{M_{AD}} & \mathrm{M_{AQ}} \\ \mathrm{M_{Bf}} & \mathrm{M_{BD}} & \mathrm{M_{BQ}} \\ \mathrm{M_{Cf}} & \mathrm{M_{CD}} & \mathrm{M_{CQ}} \end{bmatrix} = M_{rS}$$

Tuỳ theo cấu tạo cực từ các ma trận điện cảm có biểu thức cụ thể khác nhau. Với máy phát cực ẩn :

$$M_S = \begin{bmatrix} L & -M & -M \\ -M & L & -M \\ -M & -M & L \end{bmatrix}$$

$$M_{Sr} = \begin{bmatrix} M_f \cos\gamma & M_D \cos\gamma & M_Q \sin\gamma \\ M_f \cos(\gamma - 120^0) & M_D \cos(\gamma - 120^0) & M_Q \sin(\gamma - 120^0) \\ M_f \cos(\gamma - 120^0) & M_D \cos(\gamma - 120^0) & M_Q \sin(\gamma - 120^0) \end{bmatrix}$$

Để chuyển hệ phương trình về dạng mới đơn giản hơn Park và Gorev đã sử dụng một ma trận biến đổi. Ma trận như sau :

$$[A] = 2/3 \begin{bmatrix} \cos\gamma & \cos(\gamma\text{-}120^o) & \cos(\gamma\text{+}120^o) \\ \sin\gamma & \sin(\gamma\text{-}120^o) & \sin(\gamma\text{+}120^o) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}$$

ma trận nghịch đảo của nó :

$$[A]^{-1} = \begin{bmatrix} \cos\gamma & \sin\gamma & 1 \\ \cos(\gamma\text{-}120^o) & \sin(\gamma\text{-}120^o) & 1 \\ \cos(\gamma\text{+}120^o) & \sin(\gamma\text{+}120^o) & 1 \end{bmatrix}$$

Các biến mới được ký hiệu và định nghĩa như sau :

$$[u'_s] = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = [A]\,[u_s]$$

$$[i'_s] = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = [A]\,[i_s]$$

$$[\Psi'_s] = \begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_0 \end{bmatrix} = [A]\,[\Psi_s]$$

Ở dạng khai triển, ví dụ đối với dòng stato, có thể viết :

$$\begin{aligned} i_d &= 2/3\,[i_A \cos\gamma + i_B \cos(\gamma\text{-}120^o) + i_C \cos(\gamma\text{+}120^o)] \\ i_q &= 2/3\,[i_A \sin\gamma + i_B \sin(\gamma\text{-}120^o) + i_C \sin(\gamma\text{+}120^o)] \\ i_0 &= 1/3\,(i_A + i_B + i_C) \end{aligned} \qquad \text{(PL 2-2)}$$

Để nhận được các biến ban đầu cần thực hiện phép biến đổi ngược, nhờ ma trận $[A]^{-1}$:

$$\begin{aligned} i_A &= i_d \cos\gamma + i_q \sin\gamma + i_0 \\ i_B &= i_d \cos(\gamma-120°) + i_q \sin(\gamma-120°) + i_0 \\ i_C &= i_d \cos(\gamma+120°) + i_q \sin(\gamma+120°) + i_0 \end{aligned} \qquad \text{(PL 2-3)}$$

Bây giờ đem nhân trái cả 2 vế các phương trình ma trận (A) và (C) với ma trận [A] rồi thực hiện biến đổi ta có hệ phương trình viết theo các biiến mới :

$$[u'_s] = -[R'_s][i'_s] - d/dt\,[\Psi'_s] + \begin{bmatrix} -\Psi_q \\ \Psi_d \\ 0 \end{bmatrix} d\gamma/dt \qquad (A')$$

$$[u'_r] = [R_r][i_r] + d/dt\,[\Psi'_r] \qquad (B')$$

$$[\Psi'_s] = [M'_s][i'_s] + [M'_{sr}][i_r] \qquad (C')$$

$$[\Psi'_r] = [M'_{rs}][i'_s] + [M_r][i_r] \qquad (D')$$

Trong đó :

$$\begin{aligned} [R'_s] &= [A][R_s][A]^{-1} \\ [M'_s] &= [A][M_s][A]^{-1} \\ [M'_{sr}] &= [A][M_{sr}] \\ [M'_{rs}] &= [M_{rs}][A]^{-1} \end{aligned}$$

Biểu thức cụ thể có dạng sau :

$$[R'_s] = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix}$$

$$[M'_s] = \begin{bmatrix} L+M+{}^3/_2L' & 0 & 0 \\ 0 & L+M-{}^3/_2L' & 0 \\ 0 & 0 & L-2M \end{bmatrix}$$

$$[M'_{sr}] = \begin{bmatrix} M_f & M_D & 0 \\ 0 & 0 & M_Q \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$[M'_{rs}] = 3/2 \begin{bmatrix} M_f & 0 & 0 \\ M_D & 0 & 0 \\ 0 & M_Q & 0 \end{bmatrix}$$

Như vậy mọi hệ số của ma trận tổng trở sau biến đổi đều là hằng số. Với máy phát điện cực ẩn còn có L' = 0. Có thể viết lại dưới dạng khai triển các phương trình từ (A') đến (D') như sau (chú ý rằng $d\gamma/dt = \omega$) :

$$
\begin{aligned}
u_d &= -Ri_d - d\Psi_d/dt - \omega\Psi_q \\
u_q &= -Ri_q - d\Psi_q/dt + \omega\Psi_d \\
u_0 &= -Ri_0 - d\Psi_0/dt \\
u_f &= R_f i_f + d\Psi_f/dt \qquad\qquad (PL2\text{-}4) \\
0 &= R_D i_D + d\Psi_D/dt \\
0 &= R_Q i_Q + d\Psi_Q/dt \\
\Psi_d &= (L + M + {}^3/_2 L')\, i_d + M_f i_f + M_D i_D \\
\Psi_q &= (L + M - {}^3/_2 L')\, i_q + M_Q i_Q \\
\Psi_0 &= (L - 2M)\, i_0 \\
\Psi_f &= L_f i_f + {}^3/_2 M_f i_d + M_{fD} i_D \\
\Psi_D &= L_D i_D + {}^3/_2 M_D i_d + M_{fD} i_f \\
\Psi_Q &= L_Q i_Q + {}^3/_2 M_Q i_q
\end{aligned}
$$

Hệ phương trình trên được gọi là hệ phương trình Gorev - Park .

Có một vài điểm đáng chú ý trong cách biến đổi để nhận được hệ phương trình. Các phương trình (C') và (D') có thể nhận được bằng thực hiện phép tính ma trận:

$$
\begin{aligned}
[A]\,[\Psi_s] &= [A]\,[M_s]\,[A]^{-1}\,[A]\,[i_s] + [A]\,[M_{sr}]\,[i_r] \;; \\
[\Psi'_r] &= [M_{rs}]\,[A]^{-1}\,[A]\,[i_s] + [M_r]\,[i_r] \;.
\end{aligned}
$$

Phương trình (B) tuy không nhân với ma trận (A) nhưng để nhận được (B') cần sử dụng biểu thức $[\Psi'_r]$ tính theo các biến mới. Phương trình (A') nhận được bằng các phép biến đổi sau :

$$
[A]\,[u_s] = -[A]\,[R_s]\,[A]^{-1}\,[A]\,[i_s] - [A]\,d/dt[\Psi_s] \;; \qquad (*)
$$

Số hạng cuối cùng biến đổi được dựa trên biểu thức đạo hàm tích (đúng với cả ma trận):

$$
d/dt\,([A]\,[\Psi_s]) = d/dt[A].\,[\Psi_s] + [A].d/dt[\Psi_s] \;.
$$

suy ra

$$
\begin{aligned}
-[A].d/dt[\Psi_s] &= -d/dt\,([A]\,[\Psi_s]) + d/dt[A].\,[\Psi_s] \\
&= -d/dt[\Psi'_s] + d/dt[A].\,[\Psi_s] \;.
\end{aligned}
$$

Mặt khác từ biểu thức của ma trận [A] ta tính được:

$$
d/dt[A] = 2/3 \;.\; d\gamma/dt \begin{bmatrix} -\sin\gamma & -\sin(\gamma-120^\circ) & -\sin(\gamma+120^\circ) \\ \cos\gamma & \cos(\gamma-120^\circ) & \cos(\gamma+120^\circ) \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}
$$

nhân với ma trận $[\Psi_s]$ và thay $d\gamma/dt = \omega$ ta nhận được :

$$d/dt[A].[\Psi_s] = \omega \begin{bmatrix} -\Psi q \\ \Psi d \\ 0 \end{bmatrix} , \qquad \text{(PL 2-5)}$$

thay vào phương trình (*) và viết theo biến mới sẽ nhận được (A').
Có thể thấy rằng, nhờ biểu diễn qua các biến mới có thể mô tả đầy đủ QTQĐ trong máy phát đồng bộ bằng hệ phương trình vi phân tuyến tính hệ số hằng. Các hệ số xuất hiện trong phương trình đều hoàn toàn xác định theo kết cấu của máy điện. Để thuận tiện sử dụng, đồng thời dễ xác định bằng đo đạc thực nghiệm người ta đưa vào các khái niệm điện cảm và điện kháng theo trục dọc và trục ngang của máy phát. Ví dụ, từ các phương trình trên ta có :

$L_d = L + M + {}^3/_2 L'$; $L_q = L + M - {}^3/_2 L'$; L_f ; L_D ; L_Q ;

$M_{df} = {}^3/_2 M_f$; $M_{dD} = {}^3/_2 M_D$; $M_{qQ} = {}^3/_2 M_Q$; M_{fD}.

Tương ứng là các điện kháng X_d, X_q, X_f, X_D, X_Q, X_{df}, X_{dD}, X_{qQ}, X_{fD} . Trong hệ đơn vị tương đối có thể viết $X = L$ vì $\omega = 1$.

Hệ phương trình vi phân PL2-2 là cơ sở để phân tích QTQĐ điện từ trong các máy điện quay. Ở giai đoạn đầu của QTQĐ sau ngắn mạch, tần số góc $\omega \approx \omega_0$, các điện kháng có trị số hằng. Với hệ thống điện đơn giản thường có thể dựa vào phương pháp biến đổi toán tử để tìm lời giải giải tích. Đối với hệ thống điện phức tạp có thể giải hệ bằng các phương pháp tích phân số (EMTP).

2. Phương trình chuyển động quay roto của các máy phát

Để xét đến sự biến thiên tốc độ quay $\omega(t) = d\gamma(t)/dt$ (khi QTQĐ kéo dài) cần phải mô tả chuyển động cơ học của roto máy phát. Quy luật chuyển động (sự thay đổi góc $\gamma(t)$ theo thời gian) phụ thuộc vào tương quan các mô-men chuyển động.

Trong trường hợp chung chuyển động quay roto của mỗi máy phát điện đồng bộ có thể viết như sau :

$$J\, d^2\gamma/dt^2 = M_T - M_E \ .$$

Trong đó

M_T , M_E - các mômen quay của tua bin và máy phát ;

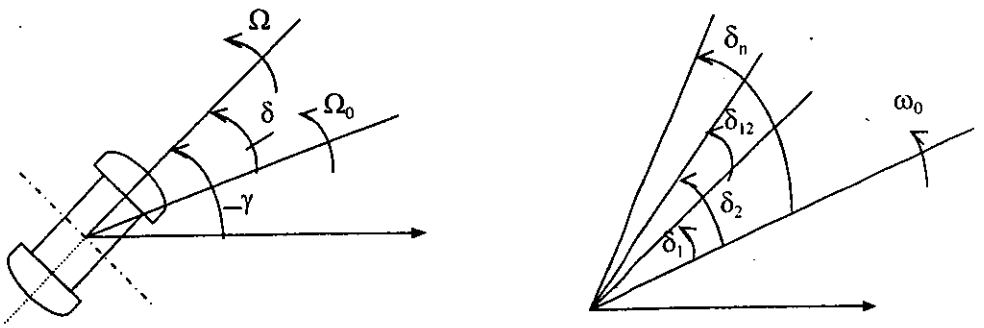
J - mômen quán tính roto của tổ máy (tuabin và máy phát) ;

γ - góc quay của roto máy phát .

Mô men quán tính J phụ thuộc cấu tạo và khối lượng phần quay. Khi roto là một hình trụ tròn đồng nhất, dường kính D (bán kính R), trọng lượng tổng là G, có thể tính được :

$J = GD^2/4$ hay GR^2 kg. m^2,

Với vật thể phức tạp cần xác định J bằng thực nghiệm và cho bởi nhà chế tạo. Nhiều sổ tay kỹ thuật ghi trị số GD^2 , khi đó cần phải hiểu là 4 lần trị số J.



Hình PL2.2

Góc quay γ là góc giữa trục gắn liền với roto và một trục đứng yên (gắn với stato). Trong QTQĐ tính từ một thời điểm t = 0 , γ(t) là một hàm của thời gian và tăng dần vì roto quay theo 1 chiều. Thông thường người ta quan tâm đến chuyển động tương đối của roto, so với một trục quay đồng bộ. Trục đồng bộ là trục quay với tốc độ không đổi Ω_0 bằng tốc độ quay roto ở chế độ định mức (cũng là tốc độ của từ trường quay stato ở CĐXL). Nếu coi ở t = 0 trục tính toán trên roto và trục đồng bộ trùng nhau thì góc lệch tương đối được tính là:

$$\delta = \gamma(t) - \Omega_0 t \quad .$$

Khi đó $\gamma = \delta + \Omega_0 t$, thay vào phương trình chuyển động, ta có thể viết :

$$J\, d^2\delta/dt^2 = M_T - M_E \quad . \qquad \text{(PL 2-6)}$$

Phương trình dạng (PL 2-6) được gọi là phương trình chuyển động tương đối roto của máy phát. Góc δ cũng là hàm của thời gian, thay đổi theo tốc độ quay. Gọi tốc độ quay của máy phát trong QTQĐ là $\Omega(t) = d\gamma(t)/dt$, ta có tốc độ thay đổi góc lệch tương đối $d\delta/dt = \Omega - \Omega_0$. Như vậy khi máy phát quay bằng tốc độ đồng bộ góc lệch δ không thay đổi.

Khi ứng dụng vào tính toán thực tế phương trình (PL 2-6) còn được biến đổi về nhiều dạng khác nhau tuỳ theo sự tiện lợi sử dụng. Trước hết là cách biểu diễn sử dụng hằng số thời gian quán tính (inertia constant) T_J hoặc H thay cho momen quán tính J. Hãy biến đổi (PL2-3) bằng cách nhân và chia vế trái với $2S_{CB}\Omega_0^2$:

$$\frac{J\Omega_0^2}{2S_{CB}} \frac{2S_{CB}}{\Omega_0^2} \frac{d^2\delta}{dt^2} = M_T - M_E \;;$$

Với ký hiệu hằng số quán tính $H = J\Omega_o^2/2S_{CB}$ ta có phương trình dạng :

$$\frac{2H}{\Omega_0^2} S_{CB} \frac{d^2\delta}{dt^2} = M_T - M_E \ ;$$

Về ý nghĩa, trị số H chính là động năng tích luỹ trong phần quay roto (tuabin và máy phát) khi tốc độ quay đạt trị số định mức, tính trong lượng công suất cơ bản S_{CB} . Đơn vị tính của H là sec nhưng thường được viết rõ là MWs / MVA. Trong lý lịch máy nếu H được cho thì nó được tính với công suất cơ bản được tính bằng P_{dm} của tổ máy.
Hằng số quán tính T_J là $J\Omega_o^2 / S_{CB}$, do đó $T_J = 2H$ và phương trình :

$$\frac{T_J}{\Omega_0^2} S_{CB} \frac{d^2\delta}{dt^2} = M_T - M_E \ ;$$

T_J , GD^2 được dùng trong các tài liệu của các nước thuộc Liên xô cũ và một số nước châu Âu. Các nước Tây Âu thường dùng H . Úc, Nhật Bản hay sử dụng trực tiếp J hoặc GR^2 . Dễ dàng có thể chuyển đổi qua lại giữa các đại lượng, chú ý rằng tốc độ góc có thể tính từ số vòng quay trong 1 phút : $\Omega_0 = 2\pi n/60$ 1/sec ;
n - tốc độ quay định mức (vòng/phút) .

Chẳng hạn, có thể tính T_J theo trị số GD^2 :

$$T_J = \frac{2{,}74(GD^2)n^2}{10^6 S_{CB}} \text{ sec} \ ;$$

Trong công thức : S_{CB} tính bằng MVA , GD^2 tính bằng tấn. m^2 , n - bằng vòng/phút.
Tốc độ biến thiên của góc lệch tương đối dδ/dt trong QTQĐ có trị số nhỏ hơn rất nhiều so với tốc độ Ω_0 , do đó có thể coi xấp xỉ :

$$\Omega = \Omega_0 + d\delta/dt \approx \Omega_0 \ .$$

công suất $$P = \Omega M \approx \Omega_0 M \ .$$

Kết quả có thể áp dụng cách tính gần đúng theo công suất :

$$\frac{T_J}{\Omega_0} S_{CB} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_T - P_E \ ; \qquad \text{(PL2-7)}$$

Người ta còn đưa vào khái niệm *góc độ hình học và góc độ điện*. Góc tính như phần trên đều là các góc độ hình học. Sự phân biệt ra góc độ điện xuất phát từ cấu tạo nhiều đôi cực của máy phát đồng bộ (máy phát thuỷ điện). Khi số đôi cực nhiều hơn 1 (m_p>1) thì roto quay 1 vòng, ứng với 360°h (độ hình học) thì các đại lượng điện đã biến thiên m_p360°đ (độ điện). Góc độ điện là chung cho toàn hệ thống nên được lấy làm chuẩn, các máy phát có số đôi cực khác nhau được quy về cùng tính theo góc độ điện. Khi đó để viết phương trình chuyển động cơ học theo góc độ điện lại cần phải chuyển đổi. Để ý rằng tốc độ quay tính theo góc độ điện lớn hơn tính theo góc độ hình học m_p lần. Nếu ký hiệu tốc độ góc quay của máy phát, tính theo góc độ điện là ω, còn tính theo

độ hình học là Ω thì $\Omega = \omega/m_p$. Ở tốc độ quay đồng bộ $\Omega_0 = \omega_0/m_p$. Khi đó phương trình chuyển động (4.2) cần phải viết là (với δ tính theo góc độ điện):

$$\frac{T_J}{\varpi_0} S_{CB} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_T - P_E \ ;$$

Trong các phương trình trên, các công suất P vẫn được tính trong hệ đơn vị có tên. Nếu tính công suất trong hệ đơn vị tương đối, phương trình có dạng đơn giản hơn :

$$\frac{T_J}{\varpi_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_T - P_E \ ;$$

Đôi khi để tiện lợi trong cách viết người ta còn tính T_J bằng đơn vị radian, nghĩa là : $T_J\,(rad) = \omega_0 T_J(s)$. Khi đó phương trình chuyển động có dạng gọn nhất :

$$T_J\, d^2\delta/dt^2 = P_T - P_E \ .$$

Kể đến lực cản masát hoặc mô men cản điện từ tỉ lệ với tốc độ quay, cần phải thêm vào phương trình thành phần tỉ lệ với tốc độ chuyển động $d\delta/dt$:

$$T_J\, d^2\delta/dt^2 + k_D.d\delta/dt = P_T - P_E \ . \qquad \text{(PL2-8)}$$

Hệ số cản k_D có dấu dương, tương đương với thêm mômen âm (cản) nằm bên vế phải. Khi trong hệ thống điện có nhiều máy phát điện, ở chế độ quá độ các roto chuyển động theo những tốc độ khác nhau. Dạng chung của phương trình chuyển động tương đối (so với trục quay đồng bộ) không có gì thay đổi. Trên hình PL2-2,b thể hiện cách biểu diễn mỗi góc lệch tương đối δ_i so với trục đồng bộ. Người ta còn ký hiệu góc lệch tương đối giữa máy phát i và máy phát j là $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$. Khi đó mỗi góc lệch δ_i , theo nghĩa nào đó lại được gọi là góc lệch tuyệt đối. Ngoài ra, để phương trình có dạng chuẩn Cô-si (bậc nhất với các đạo hàm nằm bên tái) người ta sử dụng tốc độ chuyển động thương đối $s = d\delta/dt = \omega - \omega_0$. Khi đó hệ phương trình chuyển động tương đối roto các máy phát trong hệ thống phức tạp có dạng:

$$\frac{d\delta_i}{dt} = s_i \ ;$$

$$\frac{ds_i}{dt} = \frac{T_{Ji}}{\omega_0}\left(P_{Ti} - P_{Ei}\right) \ ; \qquad \text{(PL2-9)}$$

$$i = 1, 2, ..., n$$

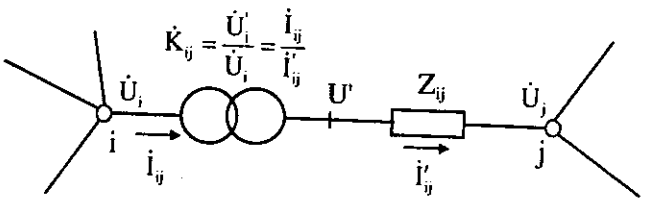
Công suất P_{Ei} của các máy phát xác định bởi QTQĐ điện từ bên trong máy phát và hệ phương trình trạng thái của mạng điện. Như vậy khi nghiên cứu QTQĐ kéo dài (phân tích ổn định hệ thống) cần phân tích kết hợp các phương trình QTQĐ điện từ (PL2-2) với (PL2-4) hoặc (PL2-5).

Phụ lục 3

HỆ PHƯƠNG TRÌNH TRẠNG THÁI CỦA MẠNG ĐIỆN CÓ NHIỀU CẤP ĐIỆN ÁP

1. Nhánh tổng quát và sơ đồ tính toán lưới điện

Lưới điện hiện đại thường bao gồm nhiều cấp điện áp, cấu trúc phức tạp (hình tia, mạch vòng) được cung cấp từ nhiều nguồn. Tỉ số biến áp của các máy biến áp có thể nhận các giá trị tuỳ ý (theo đầu phân áp vận hành). Khi đó, về nguyên tắc không thể quy đổi mạch điện về một cấp điện áp, bởi giữa hai phần mạng điện cấp điện áp khác nhau không tồn tại một hệ số biến áp duy nhất. Để thiết lập hệ phương trình trạng thái của lưới điện xét đến từng hệ số biến áp người ta áp dụng khái niệm nhánh tổng quát (hình PL3-1).



Hình PL3.1

Mỗi nhánh bao gồm một tổng trở Z_{ij} nối nối tiếp với một máy biến áp lý tưởng (không tổn hao) có hệ số biến áp phức $\dot{K}_{ij}$. Về mô đun (trị số K), hệ số biến áp bằng tỉ số giữa các vòng dây của máy biến áp thực (phụ thuộc đầu phân áp lựa chọn lúc vận hành), khi nối trong mạch sẽ bằng tỉ số mô đun điện áp 2 phía (vì máy biến áp lý tưởng):

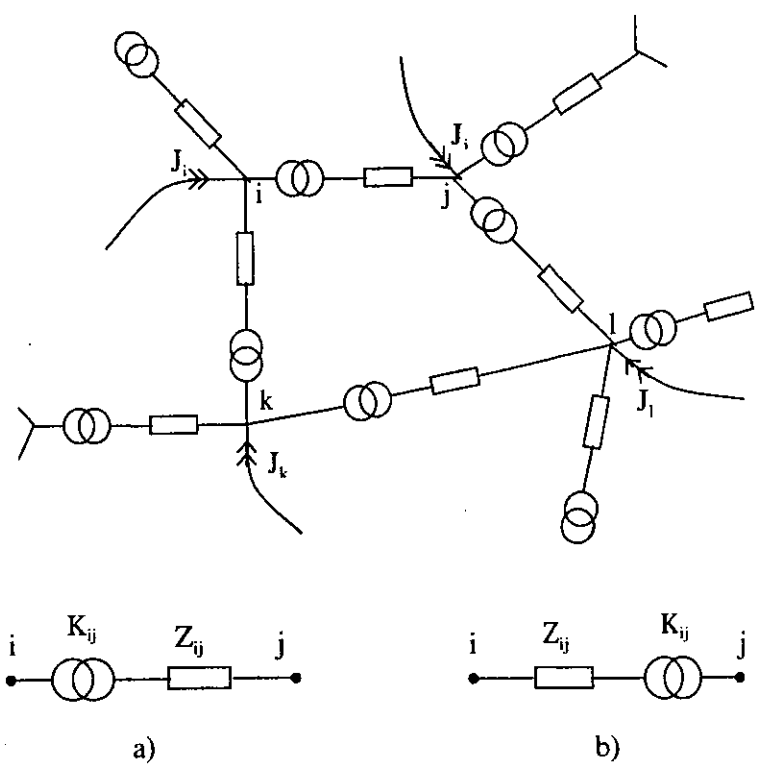
$$\dot{K}_{ij} = \dot{U}'_i / \dot{U}_i \ ,$$

còn cóc pha phụ thuộc vào tổ đấu dây của máy biến áp.

Khi đó mọi sơ đồ tính toán đều có thể coi như bao gồm toàn các nhánh tổng quát. Nhánh bình thường sẽ tương ứng với nhánh có tỉ số biến áp bằng 1. Ngoài ra, tại các nút của sơ đồ còn có các nguồn (biểu diễn bằng dòng điện bên trong J hoặc điện áp đầu cực U). Trên hình PL3-2 thể hiện một phần mạng điện của sơ đồ tính toán tổng quát. Dễ nhận thấy rằng, trong trường hợp chung sơ đồ mang tính chất của graph có hướng. Vị trí tương đối của máy biến áp lý tưởng và tổng trở Z phân biệt ra hai hướng khác nhau của mỗi nhánh. Gọi nút đầu của nhánh là i nút cuối là j thì sơ đồ a) có máy biến

áp lý tưởng nối trực tiếp với nút đầu i, còn sơ đồ b) máy biến áp lý tưởng nối với i thông qua tổng trở Z.

Sự khác biệt chủ yếu của sơ đồ trên so với sơ đồ mạch thông thường là sự có mặt các máy biến áp lý tưởng trong mọi nhánh. Hệ số biến áp là một thông số của nhánh nên có thể nhận giá trị bất kỳ. Như vậy số cấp điện áp của sơ đồ là không hạn chế, trong khi đối với mỗi máy biến áp có thể xét chính xác hệ số biến áp cả về mô đun và góc lệch pha.



a) b)

Hình PL3.2

2. Hệ phương trình cân bằng dòng nút

Giả thiết sơ đồ gồm toàn các nhánh tổng quát với N+1 nút (kể cả nút đất). Nút đất có số thứ tự là 0. Xét nút i gồm các nhánh nối với i qua máy biến áp lý tưởng. Nguồn dòng (từ máy phát) bơm vào nút, ký hiệu là J_i (hình PL3-2).

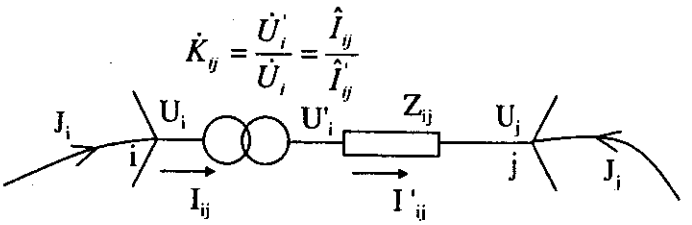
Cần chú ý rằng cách giả thiết như trên là tổng quát cho các sơ đồ mạng điện. Với nút nguồn, J_i có thể tính qua công suất và điện áp nút:

$$\dot{J}_i = \frac{\hat{S}_i}{\hat{U}_i} \ ;$$

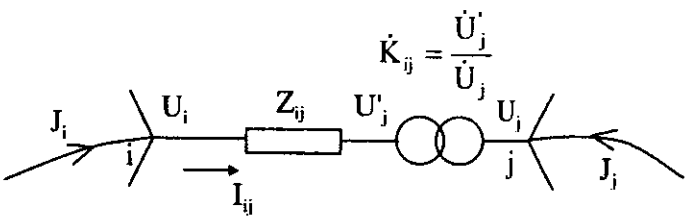
trong đó $\hat{S}$, $\hat{U}$ là trị số liên hợp của công suất và điện áp nút.

Với nút tải: $$\dot{J}_i = -\frac{\hat{S}_i}{\hat{U}_i} \ ;$$

Với nút trung gian $J_i = 0$ (nút không nguồn và tải).



a)



b)

Hình PL3.3

Phương trình cân bằng dòng đối với nút i theo định luật Kiếc-khốp I có thể viết:

$$\sum_{\substack{j=0 \\ j\neq i}}^{N} \dot{I}_{ij} = \dot{J}_i \ ;$$

chuyển sang tính với dòng I'_{ij} qua hệ số biến áp K_{ij}

$$\sum_{\substack{j=0 \\ j\neq i}}^{N} \hat{K}_{ij}\dot{I}'_{ij} = \dot{J}_i \ ;$$

áp dụng định luật Ôm cho các nhánh:

$$\sum_{\substack{j=0\\ j\neq i}}^{N} \hat{K}_{ij} \frac{\dot{U}'_i - \dot{U}_j}{Z_{ij}} = \dot{J}_i$$

hay

$$\sum_{\substack{j=0\\ j\neq i}}^{N} \hat{K}_{ij} \frac{\dot{K}_{ij}\dot{U}_i - \dot{U}_j}{Z_{ij}} = \dot{J}_i$$

$$\sum_{\substack{j=0\\ j\neq i}}^{N} \frac{K^2_{ij}}{Z_{ij}} \dot{U}_i - \sum_{\substack{j=0\\ j\neq i}}^{N} \frac{\hat{K}_{ij}}{Z_{ij}} \dot{U}_j = \dot{J}_i$$

Đặt: $Y_{ij} = \sum_{\substack{j=0\\ j\neq i}}^{N} \frac{\dot{K}^2_{ij}}{Z_{ij}}$ - tổng dẫn riêng nút i .

$Y_{ij} = -\frac{\hat{K}_{ij}}{Z_{ij}}$ - tổng dẫn tương hỗ nhánh ij .

Ta có :

$$Y_{ii}\dot{U}_i + \sum_{\substack{j=0\\ j\neq i}}^{N} Y_{ij}\dot{U}_j = \dot{J}_i \quad .$$

Nếu xét nút i nối với các nhánh nối gián tiếp với máy biến áp lý tưởng như trên hình PL3-3,b ta có:

$$\sum_{\substack{j=0\\ j\neq i}}^{N} \dot{I}_{ij} = \dot{J}_i$$

$$\sum_{\substack{j=0\\ j\neq i}}^{N} \frac{\dot{U}_i - \dot{U}'_j}{Z_{ij}} = \dot{J}_i$$

$$\sum_{\substack{j=0\\ j\neq i}}^{N} \frac{\dot{U}_i - \dot{K}_{ij}\dot{U}_j}{Z_{ij}} = \dot{J}_i$$

$$\sum_{\substack{j=0\\ j\neq i}}^{N} \frac{1}{Z_{ij}} \dot{U}_i - \sum_{\substack{j=0\\ j\neq i}}^{N} \frac{\dot{K}_{ij}}{Z_{ij}} \dot{U}_j = \dot{J}_i$$

Nếu đặt :

$$Y_{ii} = \sum_{\substack{j=0 \\ j\neq i}}^{N} \frac{1}{Z_{ij}} \; ; \; Y_{ij} = -\frac{\dot{K}_{ij}}{Z_{ij}}$$

ta cũng nhận được phương trình cân bằng dòng dạng tương tự trường hợp trên:

$$Y_{ii}\dot{U}_i + \sum_{\substack{j=0 \\ j\neq i}}^{N} Y_{ij}\dot{U}_j = \dot{J}_i \; ;$$

Có sự khác nhau ở biểu thức tính tổng dẫn riêng Y_{ii} và dấu của tổng dẫn tương hỗ Y_{ij}. Dễ nhận thấy rằng khi nút có số nhánh nối là bất kỳ, phương trình cân bằng dòng vẫn không có gì thay đổi. Chỉ chú ý rằng biểu thức tính tổng dẫn riêng có dạng:

$$Y_{ii} = \sum_{k} \frac{\dot{K}^2_{ij}}{Z_{ij}} + \sum_{l} \frac{1}{Z_{ij}} \; ;$$

Trong biểu thức này, tổng đầu tính cho k nhánh có máy biến áp lý tưởng nối trực tiếp với i , còn tổng thứ 2 tương ứng với l nhánh có máy biến áp lý tưởng nối gián tiếp với i.
Ở dạng khai triển hệ phương trình có dạng:

$$\left.\begin{aligned} &Y_{11}\dot{U}_1 + Y_{12}\dot{U}_2 + ... + Y_{1N}\dot{U}_N = \dot{J}_1 \\ &Y_{21}\dot{U}_1 + Y_{22}\dot{U}_2 + ... + Y_{2N}\dot{U}_N = \dot{J}_2 \\ &\cdots\cdots \\ &Y_{N1}\dot{U}_1 + Y_{N2}\dot{U}_2 + ... + Y_{NN}\dot{U}_N = \dot{J}_N \end{aligned}\right\} \qquad \text{(PL3-1)}$$

Phương trình của nút đất (i=0) được bỏ qua với giả thiết $U_0 = 0$. Đó là phương trình hệ quả của các phương trình còn lại.

3. Hệ phương trình cân bằng công suất nút

Nhân hai vế của (PL3-1) với trị số liên hợp của điện áp nút tương ứng sẽ nhận được hệ phương trình sau:

$$\left.\begin{aligned} &Y_{11}U_1^2 + Y_{12}\dot{U}_2\hat{U}_1 + ... + Y_{1N}\dot{U}_N\hat{U}_1 = P_1 - jQ_1 \; ; \\ &Y_{21}\dot{U}_1^2 + Y_{22}U_2^2 + ... + Y_{2N}\dot{U}_N\hat{U}_2 = P_2 - jQ_2 \; ; \\ &\cdots\cdots \\ &Y_{N1}\dot{U}_1^2 + Y_{N2}\dot{U}_2\hat{U}_N + ... + Y_{NN}\dot{U}_N^2 = P_N - jQ_N \; ; \end{aligned}\right\} \qquad \text{(PL3-2)}$$

Hay viết gọn:

$$Y_{ii}\dot{U}_i^2 + \sum_{\substack{j=1 \\ j\neq i}}^{N} Y_{ij}\dot{U}_i\hat{U}_j = P_i - jQ_i \qquad ; \quad i=1,2,...N$$

Vế phải phương trình được viết theo nút nguồn, nếu là nút tải cần đổi dấu lại thành ($-P_i+jQ_i$) , nút trung gian có vế phải triệt tiêu.
Khi phân tích CĐXL có thể sử dụng PL3-2 hoặc PL3-3. Khi phân tích ngắn mạch cần dùng hệ phương trình cân bằng dòng nút PL3-2 vì trong chế độ sự cố công suất nút không còn giữ được cân bằng.

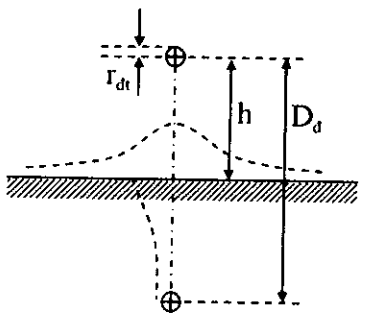
Phụ lục 4

TỔNG TRỞ THỨ TỰ KHÔNG CỦA ĐƯỜNG DÂY TẢI ĐIỆN

1. Đường dây tải điện trên không

a) Mạch dây dẫn-đất

Tính toán điện kháng thứ tự không của đường dây là một nội dung tương đối phức tạp. Đó là vì điện kháng của chúng liên quan đến sự phân bố của dòng điện trong đất, các kết cấu hình học của cột và dây dẫn. Thường chỉ có thể tính gần đúng và kiểm tra lại (sau khi xây dựng) bằng đo đạc, thực nghiệm.



Hình PL4.1 Vị trí ảnh của mạch dây dẫn-đất, phân bố dòng điện trong đất.

Trước hết xét trường hợp đơn giản nhất: đường dây tải điện xoay chiều một dây, mạch điện trở về qua đất (còn gọi tắt là mạch "dây dẫn-đất"). Dòng điện đi trong đất có mật độ phân bố không đều, tập trung phía dưới đường dây. Theo lý thuyết trường điện từ, một mạch dây dẫn-đất có thể thay thế tương đương bằng hai dây dẫn song song (một dây dẫn giả, còn gọi là ảnh của dây dẫn thật). Khi điện dẫn đất bằng vô cùng thì khoảng cách giữa 2 dây dẫn là $Đ_d = 2$ h (2 lần chiều cao cột). Khi điện dẫn hữu hạn khoảng cách này xa hơn. Có thể tính gần đúng $Đ_d$, phụ thuộc điện dẫn λ của đất theo công thức:

$$Đ_d = \frac{2{,}085}{\sqrt{f.\lambda.10^{-9}}}.10^{-3} \quad , \quad m \qquad \text{(PL4-1)}$$

Tính sẵn trị số $Đ_d$ theo một số giá trị λ ta có bảng sau:

Môi trường	λ (1/ôm.cm)	$Đ_d$, m
Đất khô	10^{-5}	3000
Đất ướt	10^{-4}	935
Nước biển	10^{-2}	94

Khi không có số liệu, thường lấy trung bình $Đ_d = 1000$ m.
Theo công thức tính điện kháng của 2 dây dẫn song song, ở tần số f = 50 hez ta có:

$$X_L = 0{,}145 \lg\frac{D_d}{r_{dt}} \text{ , ôm/km} \qquad \text{(PL4-2)}$$

trong đó, r_{dt} là bán kính đẳng trị của dây dẫn, tính theo bán kính thực r của nó, có hiệu chỉnh theo cấu trúc dây và ảnh hưởng từ của vật liệu. Cụ thể:

- dây dẫn tròn, vật liệu đồng nhất không sắt từ $r_{dt} = 0{,}779\ r$;
- dây dẫn đồng vặn xoắn: $r_{dt} = (0{,}724 - 0{,}771)\ r$;
- dây nhôm và nhôm lõi thép: $r_{dt} = 0{,}95r$;

Việc hiệu chỉnh bán kính dây dẫn thực chất là chỉ xét đến phần dây dẫn bên trong (trừ hiệu ứng mặt ngoài). Khi dây dẫn mỗi pha được phân nhỏ thành các sợi đặt song song (gọi là dây dẫn có phân pha) thì r_{dt} được tính theo kích thước hình học giữa các dây dẫn phân nhỏ. Chẳng hạn, khi một pha được phân thành n dây dẫn nhỏ, bố trí đối xứng xung quanh vòng tròn thì r_{dt} tỉ lệ với trung bình nhân của các khoảng cách :

$$r_{dt} = \sqrt[n]{r_{dt0}.d_1 d_2 ... d_{n-1}} \quad .$$

trong đó: r_{dt0} - bán kính đẳng trị của một sợi;
$d_1, d_2, ..., d_{n-1}$ - các khoảng cách giữa một sợi dây dẫn đến n-1 dây dẫn còn lại (khi bố trí đối xứng).

Điện trở của mạch dây dẫn đất tính được theo công thức: $r_L = r_D + r_d$. Trong đó, r_D - điện trở của dây dẫn; r_d - điện trở đất (ảnh hưởng đến dòng điện trở về). Có thể tính gần đúng : $r_d = \pi^2 f.10^{-4}$, ôm/km .

b) Đường dây 3 pha một lộ

Ta có thể suy ra điện kháng thứ tự không từ cách tính điện kháng thứ tự thuận (nghịch). Chẳng hạn, khi cho ba dòng điện thứ tự thuận trị số 1A chạy vào ba pha, với :

$$\dot{I}_A = 1;\ \dot{I}_B = a^2\ ;\ \dot{I}_C = a.$$

điện áp rơi trên dây dẫn pha A cũng chính bằng trị số điện kháng thứ tự thuận. Như vậy, dựa vào góc pha dòng điện và các hỗ cảm ta có:

$$X_1 = X_L + a^2 X_\mu + a X_\mu = .X_L + (a^2 + a)X_\mu = X_L - X_\mu ;$$

X_L - điện kháng ứng với tự cảm pha A (tính theo PL4-2);
X_μ.- điện kháng hỗ cảm pha B, pha C với pha A.

Bằng cách phân tích từ trường các pha có thể tính được (theo giáo trình KTĐ):

$$X_1 = 0{,}145 \lg\frac{D_{tb}}{r_{dt}} \text{ , ôm/km .}$$

Trong đó D_{tb} là trung bình nhân 3 khoảng cách giữa các dây dẫn pha.
Từ đó tính được điện kháng hỗ cảm:

$$X_\mu = X_L - X_1 = 0{,}145 \lg \frac{D_d}{r_{dt}} - 0{,}145 \lg \frac{D_{tb}}{r_{dt}}$$

$$= 0{,}145 \lg \frac{D_d}{D_{tb}} \ , \ \Omega/\text{km} \ .$$

Trong đó $D_{tb} = \sqrt[3]{d_{ab}\, d_{ac}\, d_{ca}}$;

Bây giờ giả thiết cho vào 3 pha đường dây hệ thống dòng điện thứ tự không, các pha dòng điện như nhau nên ta có:

$$X_0 = X_L + X_\mu + X_\mu = X_L + 2X_\mu.$$

Do đó tính được:

$$X_0 = 0{,}145 \lg \frac{D_d}{r_{dt}} + 2 \times 0{,}145 \lg \frac{D_d}{D_{tb}}$$

$$= 0{,}435 \lg \frac{D_d}{R_{tb}} \ ; \qquad \text{(PL4-3,a)}$$

Trong đó, $R_{tb} = \sqrt{r_{dt} D_{tb}^2}$ - là bán kính trung bình nhân của 3 dây dẫn pha.

Tương tự, ta tính điện trở thứ tự không:

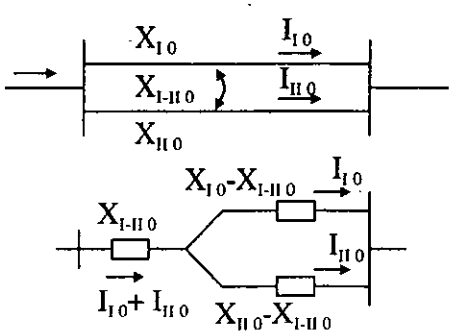
$$r_0 = r_L + 2\, r_\mu \ = r_D + 3\, r_d \ \approx \ r_D + 0{,}15 \text{ ôm/km} \ . \quad \text{(PL4-3,b)}$$

c) Đường dây ba pha kép (hai lộ)

Điện kháng thứ tự không của đường dây 3 pha kép lớn hơn đường dây đơn. Đó là do có thêm hỗ cảm của các dây dẫn pha thuộc lộ thứ hai. Gọi $X_{I\text{-}II\,0}$ là điện kháng hỗ cảm của cả lộ II đến dây dẫn bất kỳ của lộ I. Có thể tính được:

$$X_{I\text{-}II0} = 0{,}435 \lg \frac{D_d}{D_{I\text{-}II}} \ , \text{ôm/km;} \qquad \text{(PL4-4)}$$

trong đó : $D_{I\text{-}II} = \sqrt[9]{d_{aa'}\, d_{ab'}\, d_{ac'}\, d_{ba'}\, d_{bb'}\, d_{bc'}\, d_{ca'}\, d_{cb'}\, d_{cc'}}$ - là khoảng cách trung bình nhân giữa các dây dẫn lộ I và các dây dẫn lộ II.



Hình PL4.2 Sơ đồ đẳng trị đường dây lộ kép

Điện trở hỗ cảm giữa 2 lộ: $r_{I\text{-}II\,0} = 3\,r_d \approx 0{,}15$ ôm/km ;

(điện trở dây dẫn không tham gia vào mạch hỗ cảm).

Để đưa sơ đồ mạch song song có hỗ cảm về dạng không hỗ cảm tương đương (xem lý thuyết mạch) người ta biến đổi như sau.

Biến đổi biểu thức điện áp rơi trên lộ I:

$$\Delta\dot{U}_0^I = \dot{I}_{I0} jX_{I0} + \dot{I}_{II0}\, jX_{I\text{-}II0} = \dot{I}_{I0}\, j\,(X_{I0} - X_{I\text{-}II0}) + (\dot{I}_{I0} + \dot{I}_{II0})\, jX_{I\text{-}II0};$$

và trên lộ II :

$$\Delta\dot{U}_0^{II} = \dot{I}_{II0} jX_{II0} + \dot{I}_{I0}\, jX_{I\text{-}II0} = \dot{I}_{II0}\, j\,(X_{II0} - X_{I\text{-}II0}) + (\dot{I}_{I0} + \dot{I}_{II0})\, jX_{I\text{-}II0}.$$

Các biểu thức tương ứng với sơ đồ điện kháng $X_{I\text{-}II\,0}$ nối tiếp với mạch song song hai điện kháng: $(X_{I0}+X_{I\text{-}II0})$ và $(X_{II0}-X_{I\text{-}II0})$ như trên hình PL4-2.

Điện kháng thứ tự không của cả hai lộ tính được theo sơ đồ:

$$X_0^{dt} = X_{I\text{-}II0} + \frac{(X_{I0} - X_{I\text{-}II0})(X_{II0} - X_{I\text{-}II0})}{(X_{I0} - X_{I\text{-}II0}) + (X_{II0} - X_{I\text{-}II0})}\ ; \qquad \text{(PL4-5)}$$

Khi hai lộ hoàn toàn giống nhau ta có:

$$X_0^{dt} = X_{I\text{-}II0} + 0{,}5(X_0 - X_{I\text{-}II0}) = 0{,}5(X_0 + X_{I\text{-}II0}).$$

d) Đường dây ba pha đơn (một lộ) có dây chống sét

Dây chống sét thường được đặt trên đỉnh cột, nối đất tại nhiều điểm tạo thành những mạch vòng kín nên có ảnh hưởng hỗ cảm đến các dòng điện ở gần. Khi các dây dẫn pha của đường dây có dòng điện thứ tự thuận (nghịch) từ trường tổng 3 dây xấp xỉ không, nên hầu như không có hỗ cảm với dây chống sét. Với hệ thống dòng điện thứ tự không, ngược lại từ trường tổng cộng rất lớn có thể móc vòng qua dây chống sét. Ảnh hưởng hỗ cảm này sẽ làm giảm điện kháng thứ tự không. Mức độ ảnh hưởng phụ thuộc vào điện trở đất và điện trở bản thân dây dẫn chống sét. Giả thiết dây chống sét tạo thành những mạch vòng kín với đất như hình PL4-3. Ngoài ra, ảnh hưởng hỗ cảm của từng dây dẫn đến dây chống sét độc lập nhau, xếp chồng tạo thành dòng điên I_S trên dây chống sét. Mỗi dây dẫn tạo nên một phần dòng điện trên dây chống sét như nhau: $I_{s0} = I_s / 3$.

Với giả thiết này, ta có thể coi mạch vòng dây chống sét như gồm 3 mạch song song (tổng trở lớn gấp 3 lần), mỗi mạch đều có hỗ cảm với mạch vòng dây dẫn-đất các pha của đường dây. Khi đó các công thức tính tổng trở thứ tự không có thể suy ra được như trường hợp 2 mạch 3 pha song song (của đường dây lộ kép). Ta ký hiệu r_0, X_0 là điện trở và điện kháng của đường dây 3 pha trên nhưng chưa có dây chống sét. Trị số của chúng sẽ tính được theo công thức (PL4-2). Tương tự điện trở và điện kháng thứ tự không của một mạch dây chống sét (tách riêng) tính được (theo PL4-3):

$$X_{S0} = 3X_S = 0{,}435 \lg\frac{D_d}{r_{ds}}\ ;$$

trong đó, r_{ds} - bán kính đẳng trị của dây chống sét.

$$r_{0S} = 3(r_0 + r_d) \approx 3\, r_S + 0{,}15 \quad (\text{ôm/km}).$$

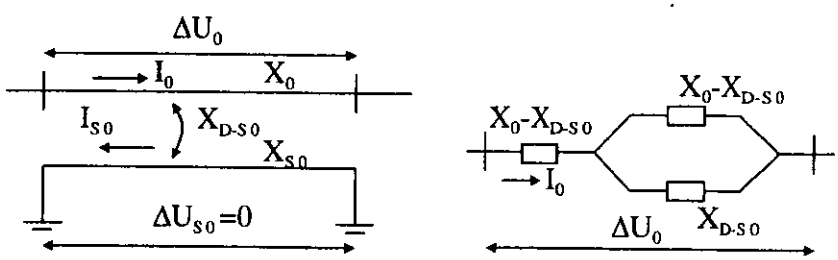
Tương tự 2 lộ đường dây mạch kép ta tính được điện trở và điện kháng hỗ cảm giữa dây chống sét (tách thành 3 dây):

$$X_{D\text{-}S0} = 0{,}435 \lg \frac{D_d}{D_{D\text{-}S}} \ , \text{ôm/km} \ ;$$

trong đó, $D_{D\text{-}s} = \sqrt[3]{d_{as}\, d_{bs}\, d_{cs}}$ - khoảng cách trung bình nhân giữa các dây dẫn và dây chống sét.

Điện trở hỗ cảm : $r_{D\text{-}s0} = 3\, r_d = 0{,}15$ ôm/km ;

Sơ đồ tương đương của của đường dây 3 pha có dây chống sét (đối với dòng điện thứ tự không) giống như đường dây lộ kép được vẽ trên hình PL4-3,a , trong đó có một lộ bị nối khép kín qua đất chính là dây chống sét tách 3.



a) b)

Hình PL4.3

Từ sơ đồ hình PL4-3,a ta có:

- trên mạch dây dẫn:

$$\Delta \dot{U}_0 = jX_0 \dot{I}_0 - jX_{D\text{-}S0} \dot{I}_{S0} \ ;$$

- trên mạch dây chống sét:

$$\Delta \dot{U}_{S0} = jX_{S0} \dot{I}_{S0} - jX_{D\text{-}S0} \dot{I}_0 = 0$$

Suy ra :

$$\Delta \dot{U}_0 = j\dot{I}_0 \left(X_0 - \frac{X^2_{D\text{-}S0}}{X_{S0}}\right).$$

Ta nhận được điện kháng thứ tự không của đường dây có dây chống sét :

$$X_0^{(s)} = X_0 - \frac{X^2_{D\text{-}S0}}{X_{S0}} \ .$$

Như vậy sự có mặt của đường dây chống sét làm giảm điện kháng thứ tự không (so với khi không có). Biểu thức điện kháng còn cho phép thiết lập sơ đồ thứ tự không tương đương của đường dây có dây chống sét như trên hình PL4-3,b.

Khi cần tính điện trở thứ tự không của đường dây có dây chông sét người ta làm như sau. Biểu thức của tổng trở thứ thự không được coi là :

$$Z_0^{(s)} = Z_0 - \frac{Z_{D-S0}^2}{Z_{S0}} \ ;$$

Từ đó tính điện trở thứ tự không như là phần thực của $Z_0^{(s)}$.

e) Đường dây lộ kép (hai lộ) có dây chống sét

Để tìm điện klháng thứ tự không trong trường hợp nafy ta dùng sơ đồ hình PL4-4,a. Cũng xuất phát từ biểu thức điện áp rơi trên dây dẫn và dây chống sét, ta có:

- trên lộ I :

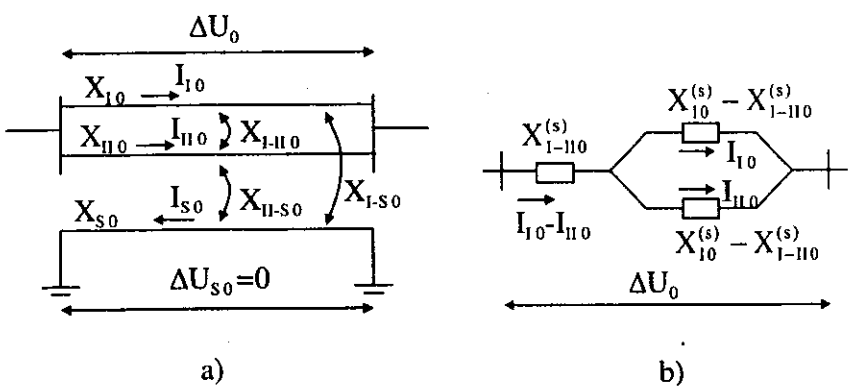
$$\Delta\dot{U}_0 = \dot{I}_{I0} jX_{I0} + \dot{I}_{II0} jX_{I-II0} - \dot{I}_{S0} jX_{I-S0} \ ;$$

- trên lộ II :

$$\Delta\dot{U}_0 = \dot{I}_{II0} jX_{II0} + \dot{I}_{I0} jX_{I-II0} - \dot{I}_{S0} jX_{II-S0} \ ;$$

- trên dây chống sét :

$$\Delta\dot{U}_{S0} = \dot{I}_{S0} jX_{S0} - \dot{I}_{I0} jX_{I-S0} - \dot{I}_{II0} jX_{II-S0} = 0.$$



Hình PL4.4

Từ các biểu thức trên ta có :

$$\Delta\dot{U} = \dot{I}_{I0}\, jX_{I0}^{(s)} + \dot{I}_{II0}\, jX_{I-II0}^{(s)} \ ;$$

$$\Delta\dot{U} = \dot{I}_{II0}\, jX_{II0}^{(s)} + \dot{I}_{I0}\, jX_{I-II0}^{(s)} \ .$$

Trong đó:

$X_{I0}^{(s)} = X_{I0} - \dfrac{X_{I-S0}^2}{X_{S0}}$ - điện kháng thứ tự không của lộ I, sét đến ảnh hưởng dây chống sét ;

$X_{II0}^{(s)} = X_{II0} - \dfrac{X_{II-S0}^2}{X_{S0}}$ - điện kháng thứ tự không của lộ II, sét đến ảnh hưởng dây chống sét ;

$X_{I-II0}^{(s)} = X_{I-II0} - \dfrac{X_{I-S0}.X_{II-S0}}{X_{S0}}$ - điện kháng hỗ cảm thứ tự không giữa lộ I và lộ II, kể đến ảnh hưởng của dây chống sét.

Dựa vào các biểu thức điện kháng trên và sơ đồ hình PL4-4,b dễ dàng tìm được điện kháng tương đương của cả 2 lộ đường dây có dây chống sét. Trường hợp 2 lộ hoàn toàn giống nhau ($X_{I0} = X_{II0} = X_0$) và dây chống sét bố trí đối xứng (có thể coi $X_{I-S0} = X_{II-S0} = X_{D-S0}$) ta có:

$$X_0^{(s)} = 0{,}5(X_0 + X_{I-II0}) - \frac{X_{D-S0}^2}{X_{S0}}.$$

So sánh với đường dây lộ kép không dây chống sét trong biểu thức điện kháng có thêm số hạng cuối cùng (dấu âm) nên trị số sẽ nhỏ hơn. Khi sét đến điện trở biểu thức cũng có dạng tương tự:

$$Z_0^{(s)} = 0{,}5(Z_0 + Z_{I-II0}) - \frac{Z_{D-S0}^2}{Z_{S0}},$$

với các ký hiệu tổng trở tương ứng như các điện kháng kể trên.

2. Đường dây cáp

Về nguyên tắc, khi xác định tổng trở thứ tự không của cáp vẫn có thể áp dụng các công thức giống như đối với đường dây trên không. Đó là vì cáp được đặt nông trên mặt đất phân bố dòng điện trong đất vẫn giống như ở đường dây trên không. Vỏ cáp, về phương diện ảnh hưởng điện từ cũng có thể coi giống như dây chống sét ở đường dây trên không. Tuy nhiên, có những điểm rất khác biệt:

- Điện trở nối đất vỏ cáp phụ thuộc cách đặt cáp và rất khó xác định. Thường người ta tính cho 2 trường hợp giới hạn. Trường hợp vỏ cáp tiếp đất tốt (điện trở nối đất rất bé) dòng điện đi chủ yếu vào đất, vỏ cáp hầu như không có dòng điện, điện kháng thứ tự không cực đại (như không có dây chống sét). Trường hợp điện trở nối đất vỏ cáp lớn (tiếp đất kém), dòng điện đi chủ yếu trong vỏ cáp : điện kháng thứ tự không sẽ cực tiểu vì hỗ cảm lớn.

- Từ thông tản của vỏ cáp rất bé (có thể coi bằng không), do đó: X_{v0}- $X_{D\text{-}v0} = 0$, trong đó X_{v0} - điện kháng thứ tự không của vỏ cáp còn $X_{D\text{-}v0}$ - điện kháng hỗ cảm giữa lõi và vỏ cáp.
- Nói chung không thể bỏ qua điện trở vỏ cáp vì trị số của nó khá lớn.

Cụ thể ta có các biểu thức tính như sau:
Điện kháng thứ tự không của cáp có vỏ bằng chất không dẫn điện (tính như đường dây lộ đơn không có dây chống sét):

$$X_0' = 0{,}435 \lg \frac{D_d}{R_{tb}} \quad ;$$

Trong đó D_d tính như với đường dây trên không;

$R_{tb} = \sqrt[3]{r_{dt} d^2}$ - bán kính trung bình hình học của 3 lõi dây dẫn.

r_{dt} - bán kính đẳng trị của dây dẫn lõi cáp.

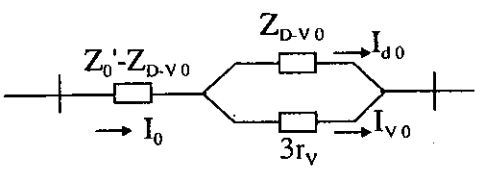
d - khoảng cách giữa các tâm của dây dẫn lõi cáp.

Để tính cho trường hợp chung, ta cần tính điện kháng hỗ cảm giữa vỏ và lõi cáp:

$$X_{D\text{-}V0} = 0{,}435 \lg \frac{D_d}{D_{D\text{-}v}} = 0{,}435 \lg \frac{2.D_d}{r_{tr} + r_{ng}} \quad , \text{ôm/km} ;$$

Trong đó : $D_{D\text{-}v} = (r_{tr} + r_{ng})/2$ - bán kính trung bình của vỏ cáp;

r_{tr} , r_{ng} - bán kính trong và bán kính ngoài của vỏ cáp;



Hình PL4.5

Sơ đồ tính toán tổng trở thứ tự không của cáp thể hiện trên hình PL4-5. Dựa vào đó có thể tính được tổng trở thứ tự không đẳng trị của đường dây cáp trong trường hợp chung. Chú ý các ký hiệu trên sơ đồ:

$Z_0' = R_0' + jX_0' = (r_D + 3r_d) + jX_0'$ - tổng trở thứ tự không của cáp, coi vỏ không dẫn điện.

$Z_{D\text{-}v0} = 3r_d + jX_{D\text{-}v0}$ - tổng trở hỗ cảm giữa vỏ và lõi cáp;

r_D - điện trở dây dẫn lõi cáp;

r_d - điện trở nối đất đường dây;

r_v - điện trở vỏ cáp;

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. **Nguyễn Phiệt.** Quá trình quá độ điện từ trong hệ thống điện.
   ĐHBK xuất bản. Hà nội, 1969.

2. **Lã Văn Út, Trần Tấn Vinh.** Tính toán dòng điện ngắn mạch trong hệ thống điện xét đến đặc tính phi tuyến của các Varistor.
   Tạp chí Khoa học & Công nghệ, No-17, 1998.

3. **Lã Văn Út.** Hệ thống tải điện 500 kV Bắc Trung Nam. Tập III: Tính toán ngắn mạch. Tài liệu tính toán phục vụ thiết kế kỹ thuật ĐDSCA 500 kV Bắc Trung Nam. Bộ môn Hệ Thống Điện, 1992.

4. **Richard Roeper.** Short-Circuit-Currents in Three-phase Systems.
   Siemens Aktiengesellschaft. John Wiley and Sons. 1985.
   (bản dịch tiếng Việt: Ngắn mạch trong hệ thống điện.
   NXB Khoa học & Kỹ thuật. 1996).

5. **Arrillaga J., Arnold C.P.** Computer Analysis of Power Systems.
   John Wiley and Sons. Singapore, 1990.

6. **Ульянов С. А.** Короткие замыкания в электрических системах.
   Мир. Москва. 1982.

MỤC LỤC

Lời tựa

Chương 1. **Khái niệm chung về ngắn mạch và dòng điện ngắn mạch trong hệ thống điện** 5

1.1 Những khái niệm và định nghĩa cơ bản 5
1.2 Dòng điện ngắn mạch, độ lớn và sự biến thiên theo thời gian 8

Chương 2. **Thiết lập sơ đồ tính toán ngắn mạch hệ thống điện** 23

2.1 Những giả thiết cơ bản 23
2.2 Hệ đơn vị tương đối 24
2.3 Sơ đồ thay thế và thông số tính toán của các phần tử trong hệ thống điện 29
2.4 Biến đổi đẳng trị sơ đồ 47

Chương 3. **Tính toán ngắn mạch ba pha duy trì** 54

3.1 Khái niệm chung 54
3.2 Máy phát điện trong trạng thái ngắn mạch duy trì 55
3.3 Tính toán dòng điện ngắn mạch duy trì khi máy phát không có TĐK 57
3.4 Tính dòng điện ngắn mạch duy trì xét đến ảnh hưởng của TĐK 58
3.5 Ảnh hưởng của phụ tải đến dòng điện ngắn mạch ba pha duy trì 63

Chương 4. **Quá trình quá độ điện từ và các thông số của máy phát điện khi ngắn mạch ba pha** 71

4.1 Vấn đề tính toán dòng điện ngắn mạch quá độ 71
4.2 Quá trình quá độ điện từ trong máy phát điện, phân tích theo hệ toạ độ vuông góc 72
4.3 Các thành phần từ thông trong máy phát điện phân tích theo mô hình trong hệ toạ độ vuông góc 78
4.4 Các sức điện động và điện kháng của máy phát điện đồng bộ 80
4.5 Sự biến thiên của sđđ và điện kháng máy phát điện trong thời gian quá độ sau ngắn mạch 90

Chương 5. **Tính toán dòng điện ngắn mạch quá độ** 95

5.1 Các trường hợp tính toán 95
5.2 Tính trị số ban đầu của dòng điện ngắn mạch chu kỳ 96
5.3 Tính toán dòng điện ngắn mạch bằng các chương trình máy tính 108
5.4 Tính toán dòng điện ngắn mạch tại thời điểm bất kỳ theo thời gian quá độ 114
5.5 Các ví dụ 126

Chương 6. **Ngắn mạch không đối xứng** 136

6.1 Khái niệm chung 136
6.2 Cơ sở phương pháp các thành phần đối xứng 136
6.3 Điện kháng thứ tự nghịch và thứ tự không 139
6.4 Dòng điện và điện áp tại điểm ngắn mạch 150
6.5 Các bước thực hiện tính toán dòng điện ngắn mạch KĐX tại điểm ngắn mạch 158
6.6 Tính toán dòng điện ngắn mạch không đối xứng phân bố trên các nhánh (phương pháp mở rộng sơ đồ) 167
6.7 Đặc điểm phân bố điện áp ngắn mạch không đối xứng 169
6.8 Sự biến đổi của các dòng điện và điện áp thành phần đối xứng qua máy biến áp 170
6.9 So sánh dòng điện ngắn mạch các dạng khác nhau với ngắn mạch ba pha (theo trị số tại điểm ngắn mạch) 178
6.10 Sơ đồ thay thế phức hợp 180

Chương 7. **Sự cố phức tạp** 185

7.1 Khái niệm chung 185
7.2 Tính toán chế độ hệ thống lúc một hay hai pha bị đứt (không đối xứng dọc) 185
7.3 Tính toán chế độ sự cố phức tạp 194
7.4 Sơ đồ phức hợp của tình trạng sự cố phức tạp 195

Phụ lục 1 Các đường cong tính toán ngắn mạch 198
Phụ lục 2 Hệ phương trình quá trình quá độ điện từ trong hệ toạ độ quay vuông góc 200
Phụ lục 3 Hệ phương trình trạng thái của mạng điện có nhiều cấp điện áp 210
Phụ lục 4 Tổng trở thứ tự không của đường dây tải điện 216