

GS.TS. LÃ VĂN ÚT

# NGẮN MẠCH TRONG HỆ THỐNG ĐIỆN



NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT

**TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA HÀ NỘI**  
**BỘ MÔN HỆ THỐNG ĐIỆN - KHOA ĐIỆN**

**GS TS LÃ VĂN ÚT**

# **NGẮN MẠCH TRONG HỆ THỐNG ĐIỆN**

*(Sách được dùng cho sinh viên Đại học Bách khoa Hà Nội  
và các trường Đại học khác)*

**Xuất bản lần thứ 3, có sửa chữa, bổ sung**



**NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT  
HÀ NỘI - 2007**

*Chịu trách nhiệm xuất bản:*  
*Biên tập:*

PGS. TS. TÔ ĐĂNG HẢI  
ĐĂNG DẬU, NGỌC KHUÊ

**NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT**  
**70 Trần Hưng Đạo, Hà Nội**

---

In 500 cuốn, khổ 16x24 cm tại Công ty Cổ phần In Hàng không.  
Quyết định xuất bản số: 75-2007/CXB/266-02/KHKT-21/8/07.  
In xong và nộp lưu chiểu tháng 9/2007

## MỤC LỤC

### Lời tựa

|                                                                                                  |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Chương 1. Khái niệm chung về ngắn mạch và dòng điện ngắn mạch trong hệ thống điện</b>         | <b>5</b>  |
| 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         |
| <b>Chương 2. Thiết lập sơ đồ tính toán ngắn mạch hệ thống điện</b>                               | <b>23</b> |
| 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        |
| <b>Chương ba. Tính toán ngắn mạch ba pha duy trì</b>                                             | <b>54</b> |
| 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        |
| <b>Chương 4. Quá trình quá độ điện từ và các thông số của máy phát điện khi ngắn mạch ba pha</b> | <b>71</b> |
| 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 tọa độ vuông góc             | 72        |
| 4.3 Các thành phần từ thông trong máy phát điện phân tích theo mô hình trong hệ tọa 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        |

|                                                                                                             |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>Chương 5. Tính toán dòng điện ngắn mạch quá độ</b>                                                       | <b>95</b>  |
| 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<br>theo thời gian quá độ                             | 114        |
| 5.5 Các ví dụ                                                                                               | 126        |
| <b>Chương 6. Ngắn mạch không đối xứng</b>                                                                   | <b>136</b> |
| 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 Quy tắc đẳng trị thứ tự thuận                                                                           | 158        |
| 6.6 Tính toán dòng điện ngắn mạch không đối xứng phân bố<br>trên các nhánh (phương pháp mở rộng sơ đồ)      | 166        |
| 6.7 Đặc điểm phân bố điện áp ngắn mạch không đối xứng                                                       | 168        |
| 6.8 Sự biến đổi của các dòng điện và điện áp thành phần đối<br>xứng qua máy biến áp                         | 169        |
| 6.9 So sánh dòng điện ngắn mạch các dạng khác nhau với<br>ngắn mạch ba pha (theo trị số tại điểm ngắn mạch) | 177        |
| 6.10 Sơ đồ thay thế phức hợp                                                                                | 179        |
| <b>Chương 7. Sự cố phức tạp</b>                                                                             | <b>184</b> |
| 7.1 Khái niệm chung                                                                                         | 184        |
| 7.2 Tính toán chế độ hệ thống lúc một hay hai pha bị đứt<br>(không đối xứng dọc)                            | 184        |
| 7.3 Tính toán chế độ sự cố phức tạp                                                                         | 188        |
| 7.4 Sơ đồ phức hợp của tình trạng sự cố phức tạp                                                            | 190        |
| <b>Phụ lục 1 Các đường cong tính toán ngắn mạch</b>                                                         | <b>196</b> |
| <b>Phụ lục 2 Hệ phương trình quá trình quá độ điện từ trong hệ tọa độ quay<br/>        vuông góc</b>        | <b>198</b> |
| <b>Phụ lục 3 Hệ phương trình trạng thái của mạng điện có nhiều cấp điện áp</b>                              | <b>208</b> |
| <b>Phụ lục 4 Tổng trở thứ tự không của đường dây tải điện</b>                                               | <b>214</b> |

## LỜI TỰA

Từ năm 1969 các sinh viên ngành Hệ thống điện vẫn dùng cuốn sách "Quá trình quá độ điện từ trong hệ thống điện", do thầy Nguyễn Phiệt biên soạn làm tài liệu tham khảo chính khi học môn "Ngắn mạch trong hệ thống điện". Sự tồn tại lâu dài như vậy của một cuốn sách phần nào đã thể hiện chất lượng chuyên môn cao của nó. Cuốn sách không những cung cấp cho sinh viên cơ sở phương pháp tính toán ngắn mạch mà còn có thể tham khảo thêm về lý thuyết phân tích quá trình quá độ điện từ trong hệ thống điện. Năm 1997 bộ môn Hệ Thống Điện cũng đã dịch và xuất bản quyển sách "Ngắn mạch trong hệ thống điện" của tác giả Richard Roeper (CHLB Đức) nhằm làm tài liệu tham khảo bổ sung cho sinh viên và kỹ sư ngành điện về lĩnh vực này (nguyên bản tiếng Anh: "Short-Circuit Currents in Three-Phase Systems").

Mặc dù có những tài liệu trên chúng tôi thấy vẫn cần biên soạn một tài liệu mới cho môn học "Ngắn mạch trong hệ thống điện" với những lý do sau:

- Có những phát triển mới về phương pháp tính ngắn mạch hệ thống điện theo hướng ứng dụng các phần mềm máy tính chuyên dụng.
- Tài liệu cần phải phù hợp hơn với cách đào tạo mới trong nhà trường: chặt chẽ, xúc tích, giúp sinh viên nắm bắt nhanh những vấn đề cốt lõi, đồng thời hiểu được bản chất lý thuyết của các vấn đề.

Tác giả chân thành cảm ơn tất cả các nhận xét góp ý của người đọc về nội dung cuốn sách. Mọi thư từ liên hệ với tác giả xin gửi về địa chỉ thư: Bộ môn Hệ Thống Điện, khoa Điện, Trường ĐHBK Hà Nội, Đường Đại Cồ Việt, Quận Hai Bà Trưng Hà Nội.

Telephone: (84-4) 8692009, E-mail : lavanut-htd@mail.hut.edu.vn.

Tác giả

Trong lần xuất bản thứ hai sách có bổ sung và sửa chữa. Các nội dung bổ sung chủ yếu nằm trong chương 4, nhằm làm rõ thêm một số chi tiết lý thuyết. Các sai sót biên soạn và ấn loát phát hiện trong lần xuất bản thứ nhất cũng đã được sửa chữa, loại bỏ.

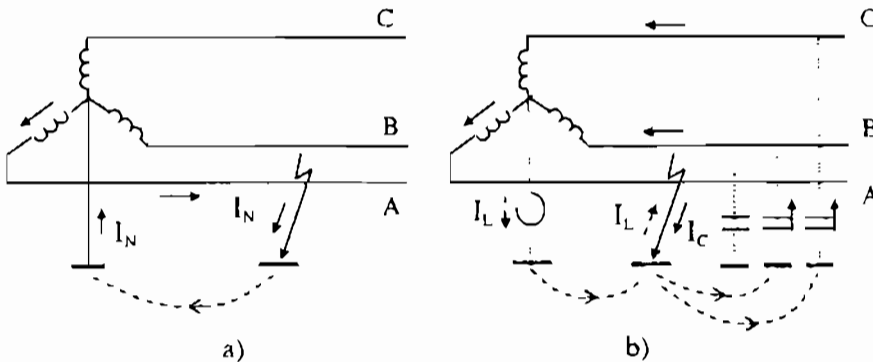
## Chương 1

# KHÁI NIỆM CHUNG VỀ NGẮN MẠCH VÀ DÒNG ĐIỆN NGẮN MẠCH TRONG HỆ THỐNG ĐIỆN

### 1.1 NHỮNG KHÁI NIỆM VÀ ĐỊNH NGHĨA CƠ BẢN

#### 1. Ngắn mạch và chạm đất một pha

**Ngắn mạch** trong hệ thống điện (HTĐ) chỉ hiện tượng các dây dẫn pha chạm nhau, chạm đất (trong HTĐ có trung điểm nối đất) hoặc chạm dây trung tính. Lúc xảy ra ngắn mạch tổng trở của hệ thống giảm đi (giống như mạch điện bị ngắn lại), dòng điện tăng lên đáng kể gọi là dòng điện ngắn mạch.



Hình 1.1 So sánh ngắn mạch và chạm đất một pha

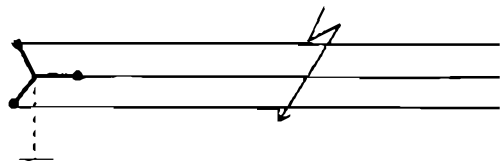
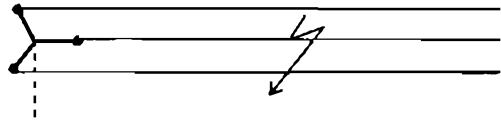
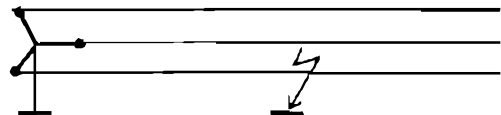
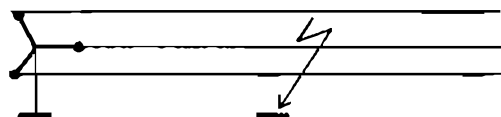
Trên hình 1.1,a biểu thị **ngắn mạch một pha** (chạm đất) trong mạng có trung tính nối đất trực tiếp. Cần phân biệt ngắn mạch một pha với hiện tượng **chạm đất một pha** trong mạng điện có trung tính không nối đất hoặc nối đất qua cuộn dây dập hồ quang (hình 1.1,b). Khi chạm đất một pha dòng điện tại nơi chạm đất chỉ xuất hiện rất bé, chạy qua các điện dung ký sinh của các đường dây để trở về điểm ngắn mạch. Về lý thuyết, nếu các dây dẫn cách điện lý tưởng (điện dẫn bằng 0) và không tồn tại các điện dung ký sinh và trung tính không nối đất thì dòng điện chạm đất bằng 0. Khi điện dung ký sinh tương đối lớn, dòng điện chạm đất một pha chạy qua điểm chạm đất có trị số đáng kể, có thể tạo ra hồ quang chạm chờn tại nơi tiếp xúc. Trong trường hợp này, ở một số trung điểm của mạng điện người ta lắp đặt thêm cuộn dây điện cảm (gọi là cuộn dập hồ quang). Cuộn dây tạo ra mạch vòng thứ 2 có dòng điện chạy qua điểm ngắn mạch, ngược chiều với dòng điện điện dung, do đó làm giảm (hoặc triệt tiêu hoàn toàn) dòng điện chạm đất tổng đi qua điểm tiếp xúc (dập tắt được hồ quang chạm chờn). Như vậy, nói chung chạm đất một pha trong mạng có trung tính không nối đất hoặc nối đất qua cuộn dập hồ quang chỉ làm xuất hiện dòng điện rất bé, không được kể là ngắn mạch.

Cũng cần nói thêm về tổng trở trung gian tại chỗ ngắn mạch, còn gọi là **tổng trở ngắn mạch**. Trị số của tổng trở ngắn mạch phụ thuộc vào độ tiếp xúc, mức độ xuất hiện của hồ quang, chất liệu của vật nối trung gian... rất khó xác định. Trường hợp nguy hiểm nhất (theo nghĩa làm dòng điện ngắn mạch lớn) là ngắn mạch qua tổng trở bằng không, được gọi là ngắn mạch trực tiếp. Khi nghiên cứu phương pháp tính toán ngắn mạch ta luôn giả thiết ngắn mạch trực tiếp.

## 2. Các dạng ngắn mạch

Có các dạng ngắn mạch sau (hình 1.2):

- Ngắn mạch ba pha, tức 3 pha chạm nhau, ký hiệu  $N^{(3)}$  ;
- Ngắn mạch hai pha, tức 2 pha chạm nhau, ký hiệu  $N^{(2)}$  ;
- Ngắn mạch một pha, tức 1 pha chạm đất hoặc chạm dây trung tính, ký hiệu  $N^{(1)}$  ;
- Ngắn mạch hai pha nối đất, tức 2 pha chạm nhau đồng thời chạm đất, ký hiệu  $N^{(1,1)}$

| Dạng ngắn mạch                                                                      | ký hiệu     | xác suất xảy ra |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------|
|    | $N^{(3)}$   | 5%              |
|    | $N^{(2)}$   | 10%             |
|  | $N^{(1)}$   | 65%             |
|  | $N^{(1,1)}$ | 20%             |

Hình 1.2 Các dạng ngắn mạch

Hai dạng ngắn mạch cuối chỉ tồn tại trong mạng điện có trung tính nối đất hoặc có dây trung tính. Trong các dạng ngắn mạch kể trên thì chỉ có ngắn mạch ba pha là **ngắn mạch đối xứng** vì sau khi ngắn mạch sơ đồ và thông số của mạng vẫn đối xứng. Các dạng ngắn mạch còn lại đều là **ngắn mạch không đối xứng**.

Khả năng xảy ra ngắn mạch theo các dạng kể trên trong mạng điện thực tế không giống nhau. Xác suất xảy ra lớn nhất đối với ngắn mạch 1 pha (65%), ít nhất đối với ngắn mạch 3 pha (5%). Ngắn mạch 3 pha tuy xảy ra ít nhưng lại được quan tâm nhiều nhất. Đó là vì ngắn mạch 3 pha thường nặng nề nhất, ảnh hưởng nhiều đến chế độ hệ thống.

Ngoài ra, còn do ngắn mạch 3 pha là loại ngắn mạch đơn giản nhất (có tính đối xứng), là dạng ngắn mạch cơ sở. Tính toán các dạng ngắn mạch khác đều dựa trên cơ sở đưa về cách tính ngắn mạch 3 pha.

### 3. Nguyên nhân và hậu quả ngắn mạch

#### a. Nguyên nhân của ngắn mạch

*Nguyên nhân* chung và chủ yếu của ngắn mạch là do cách điện bị hỏng. Lý do cách điện bị hỏng có thể là: bị già cỗi khi làm việc lâu ngày, chịu tác động cơ khí gây vỡ nát, bị tác động của nhiệt độ phá huỷ môi chất, xuất hiện điện trường mạnh làm phóng điện chọc thủng vỏ bọc... Những nguyên nhân tác động cơ khí có thể do con người (như đào đất, thả điều...), do loài vật (rắn bò, chim đậu...), hoặc gió bão làm gãy cây, đổ cột, dây dẫn chập nhau... Sét đánh gây phóng điện cũng là một nguyên nhân đáng kể gây ra hiện tượng ngắn mạch (tạo ra hồ quang dẫn điện giữa các dây dẫn). Ngắn mạch còn có thể do thao tác nhầm, ví dụ đóng điện sau sửa chữa quên tháo dây nối đất...

#### b. Hậu quả của ngắn mạch

Ngắn mạch là một loại sự cố nguy hiểm vì khi ngắn mạch dòng điện đột ngột tăng lên rất lớn, chạy trong các phần tử của HTĐ. Tác dụng của dòng điện ngắn mạch có thể gây ra:

- Phát nóng cục bộ rất nhanh, nhiệt độ lên cao, gây cháy nổ ;
- Sinh ra lực cơ khí lớn giữa các phần của thiết bị điện, làm biến dạng hoặc gãy vỡ các bộ phận (sứ đỡ, thanh dẫn...);
- Gây sụt áp lưới điện làm động cơ ngừng quay, ảnh hưởng đến năng suất làm việc của máy móc, thiết bị ;
- Gây ra mất ổn định HTĐ do các máy phát bị mất cân bằng công suất, quay theo những vận tốc khác nhau dẫn đến mất đồng bộ ;
- Tạo ra các thành phần dòng điện không đối xứng, gây nhiễu các đường dây thông tin ở gần;
- Nhiều phần của mạng điện bị cắt ra để loại trừ điểm ngắn mạch, làm gián đoạn cung cấp điện.

### 4. Mục đích tính toán ngắn mạch

Tính toán dòng điện ngắn mạch nhằm các mục đích sau:

- Lựa chọn các trang thiết bị điện phù hợp, chịu được dòng điện trong thời gian tồn tại ngắn mạch.
- Tính toán hiệu chỉnh các thiết bị bảo vệ rơ-le, tự động cắt phần tử bị sự cố ngắn mạch ra khỏi hệ thống.
- Lựa chọn sơ đồ thích hợp làm giảm dòng điện ngắn mạch.
- Lựa chọn thiết bị hạn chế dòng điện ngắn mạch (như kháng điện, máy biến áp nhiều cuộn dây...).

- Nghiên cứu các hiện tượng khác về chế độ hệ thống như quá trình quá độ (QTQĐ) điện cơ (phân tích ổn định), QTQĐ điện từ (phân tích hiện tượng cộng hưởng, quá điện áp...).

Những bài toán liên quan đến tính toán dòng điện ngắn mạch:

- Lựa chọn sơ đồ mạng cung cấp điện, nhà máy điện;
- Lựa chọn thiết bị điện và dây dẫn;
- Thiết kế, chỉnh định bảo vệ rơle ;
- Tính toán quá điện áp trong HTĐ;
- Tính toán nối đất ;
- Tính toán ảnh hưởng nhiễu các đường dây thông tin;
- Nghiên cứu ổn định hệ thống.

## 1.1 DÒNG ĐIỆN NGẮN MẠCH, ĐỘ LỚN VÀ SỰ BIẾN THIÊN THEO THỜI GIAN

### I. Ngắn mạch với nguồn áp không đổi (ngắn mạch xa nguồn)

#### 1. Quá trình quá độ khi ngắn mạch 3 pha mạng điện đơn giản

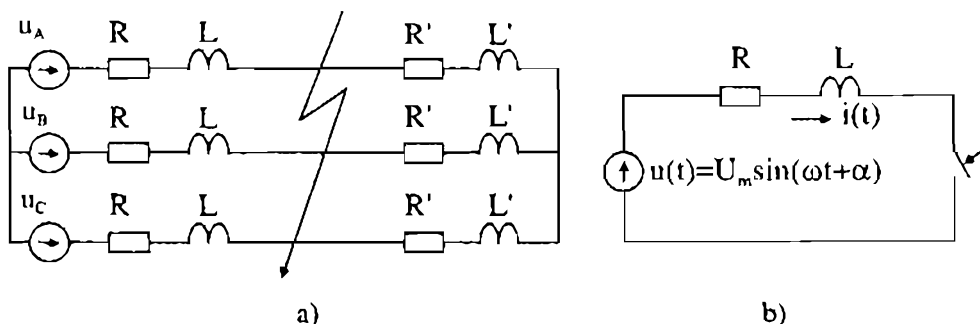
Xét mạch điện đơn giản như hình 1.3. Các nguồn áp có dạng sau :

$$u_A = U_m \sin(\omega t + \alpha) ;$$

$$u_B = U_m \sin(\omega t + \alpha - 120^\circ) ;$$

$$u_C = U_m \sin(\omega t + \alpha + 120^\circ) ;$$

Thời điểm  $t = 0$  tương ứng với lúc xảy ra ngắn mạch.



Hình 1.3 Ngắn mạch 3 pha trong mạng điện đơn giản

Các thông số  $R, L$  đặc trưng cho phần mạch từ điểm ngắn mạch đến nguồn (điện trở và điện cảm dây dẫn), còn  $R', L'$  đặc trưng cho phụ tải các pha. Quá trình quá độ diễn ra phía phụ tải rất đơn giản, dòng điện nhỏ tắt dần vì không có nguồn cung cấp. Ta quan tâm đến phần mạch phía nguồn. Vì mạch là 3 pha đối xứng nên có thể tách riêng từng pha để nghiên cứu. Chẳng hạn xét mạch pha A (hình 1.3,b) với :

$$u(t) = U_m \sin(\omega t + \alpha) ;$$

Phương trình cân bằng áp ở chế độ quá độ :

$$u = Ri + L \frac{di}{dt}.$$

Giải ra ta có :

$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_N) + C e^{-\frac{R}{L}t} \\ &= i_{CK}(t) + i_a(t) \end{aligned}$$

Trong đó :  $Z = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}$  - là tổng trở của phần mạch phía nguồn (đến điểm ngắn mạch) ;

$$\varphi_N = \arctg\left(\frac{\omega L}{R}\right) - \text{góc pha của tổng trở ;}$$

$C$  - hằng số tích phân cần xác định từ điều kiện đầu của mạch.

Có thể coi dòng điện  $i(t)$  gồm 2 thành phần. Thành phần chu kỳ  $i_{CK}(t)$ , phụ thuộc nguồn (còn gọi là thành phần dòng điện cưỡng bức) và thành phần tự do  $i_a(t)$ .

$$i_{CK}(t) = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_N) = I_{CKm} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_N) ;$$

$$i_a(t) = C e^{-\frac{R}{L}t} = i_{a0} e^{-\frac{t}{T_a}}.$$

Hằng số thời gian  $T_a = L/R$  đặc trưng cho tốc độ suy giảm của thành phần dòng điện tự do.

Để xác định hằng số tích phân  $C$  (cũng chính là giá trị ban đầu của thành phần tự do  $i_{a0}$ ) cần dựa vào điều kiện đầu của mạch. Tại thời điểm  $t = 0$ , theo tính chất của mạch điện có điện cảm dòng điện (toàn phần) không đột biến:  $i(0) = i_0$ .

Trong đó  $i_0$  là trị số dòng điện toàn phần trong mạch trước khi xảy ra ngắn mạch (chế độ xác lập trước sự cố). Ta có biểu thức tính dòng điện trước khi xảy ra ngắn mạch :

$$\begin{aligned} i(t) &= \frac{U_m}{Z'} \sin(\omega t + \alpha - \varphi) \\ &= I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi). \end{aligned}$$

với :

$$Z' = \sqrt{(R + R')^2 + (\omega L + \omega L')^2} ;$$

$$\varphi = \arctg \frac{\omega(L + L')}{R + R'}.$$

Tại  $t = 0$ , theo điều kiện đầu :

$$i(0) = i_{CK}(0) + i_a(0) = i_0 ;$$

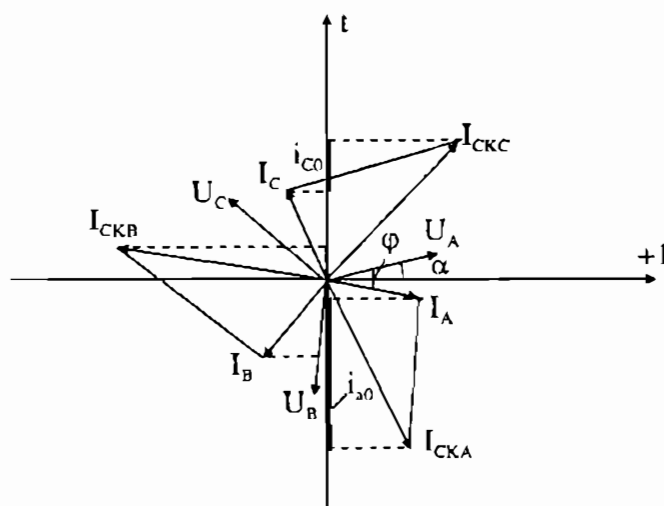
$$I_{CKm} \sin(\alpha - \varphi_N) + C = I_m \sin(\alpha - \varphi) ;$$

Suy ra:  $C = I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{CKm} \sin(\alpha - \varphi_N) = i_{20}$ .

Như vậy biểu thức đủ của thành phần tự do có thể viết được:

$$i_a(t) = C e^{-\frac{R}{L}t} = [I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{CKm} \sin(\alpha - \varphi_N)] e^{-\frac{R}{L}t}$$

Trên hình 1.4 vẽ quan hệ véc-tơ giữa các thành phần dòng điện tại thời điểm  $t=0$ .



**Hình 1.4** Quan hệ thành phần của dòng điện ngắn mạch ban đầu

Trên hình vẽ, trị số ban đầu của thành phần tự do được biểu thị như là hình chiếu (trên trục  $t$ ) của véc-tơ hiệu:  $I_m - I_{CKm}$ . Để nhận thấy một số đặc điểm sau đây:

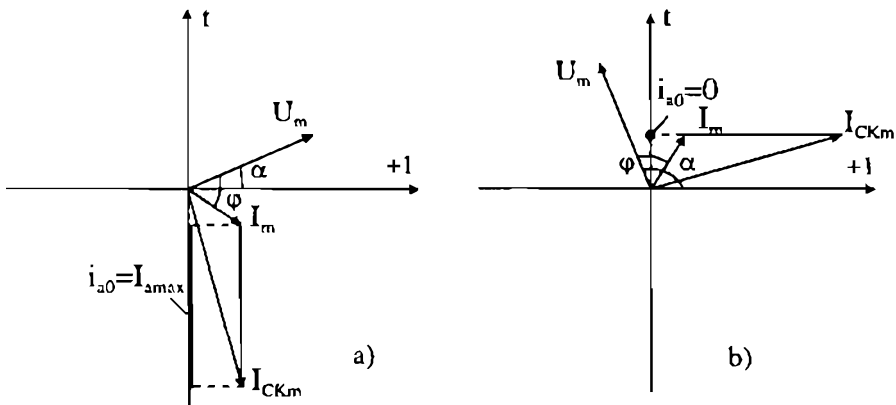
- Trị số ban đầu của thành phần tự do phụ thuộc vào góc pha đầu  $\alpha$ , nghĩa là phụ thuộc vào thời điểm xảy ra ngắn mạch. Tồn tại trị số góc pha  $\alpha$  để  $i_{a0} = 0$  (triệt tiêu) và một góc pha để  $|i_{a0}| = I_{amax}$  (cực đại). Trên hình 1.5 vẽ các trường hợp  $i_{a0}=0$  và  $|i_{a0}| = I_{amax}$ .

- Trị số ban đầu của thành phần tự do cực đại  $I_{amax}$  phụ thuộc vào tính chất của phụ tải trước khi xảy ra ngắn mạch. Trị số này nhận được lớn nhất khi tải có tính chất điện dung (hình 1.6). Nếu trước khi xảy ra ngắn mạch mạng điện làm việc không tải thì từ biểu thức của  $i_a(t)$  dễ nhận thấy khi  $\alpha - \varphi_N = -90^\circ$  trị số ban đầu của nó có trị số cực đại. Hơn nữa,  $|i_{a0}| = I_{amax} = I_{CKm}$ .

Vì điện trở của mạch khi sự cố có trị số rất nhỏ (không có phụ tải) do đó  $\varphi_N \approx 90^\circ$ . Khi đó thành phần tự do có trị số lớn nhất ứng với lúc:

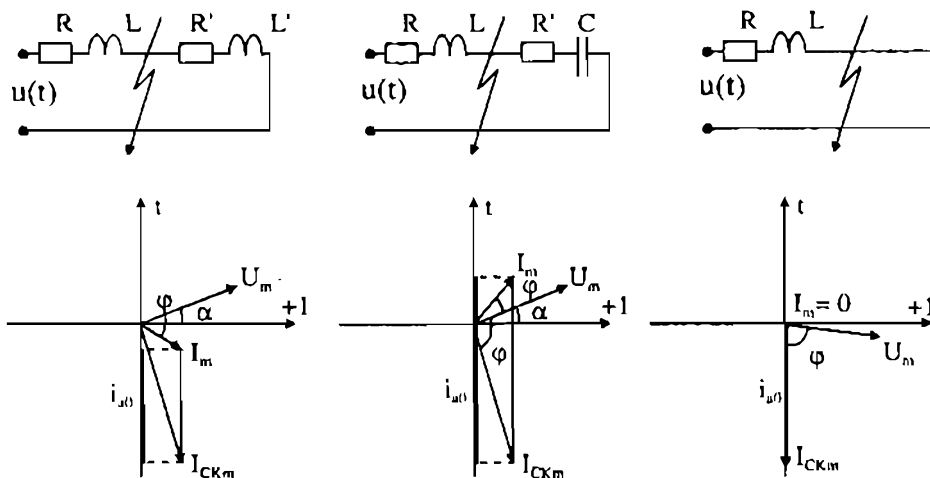
$$\alpha = -90^\circ + \varphi_N \approx 0.$$

Nghĩa là ngắn mạch vào thời điểm điện áp nguồn  $u$  xấp xỉ đi qua trị số 0.



Hình 1.5 Thành phần tự do xuất hiện lớn nhất (a) và nhỏ nhất (b)

Về lý thuyết, thành phần tự do có khả năng xuất hiện lớn nhất khi phụ tải điện dung. Tiếp theo là trường hợp không tải. Phụ tải điện cảm ứng với khả năng xuất hiện  $I_{a_{max}}$  có trị số nhỏ hơn cả (hình 1.6). Tuy nhiên, trị số tính toán cho  $i_{a0}$  lớn nhất lại được lấy ứng với trường hợp không tải trước khi ngắn mạch. Lý do là trong thực tế rất ít khi phụ tải có tính điện dung. Trường hợp không tải hay gặp hơn. Ngoài ra, trong trường hợp không tải còn biết được  $|i_{a0}| = I_{a_{max}} = I_{CKm}$ .



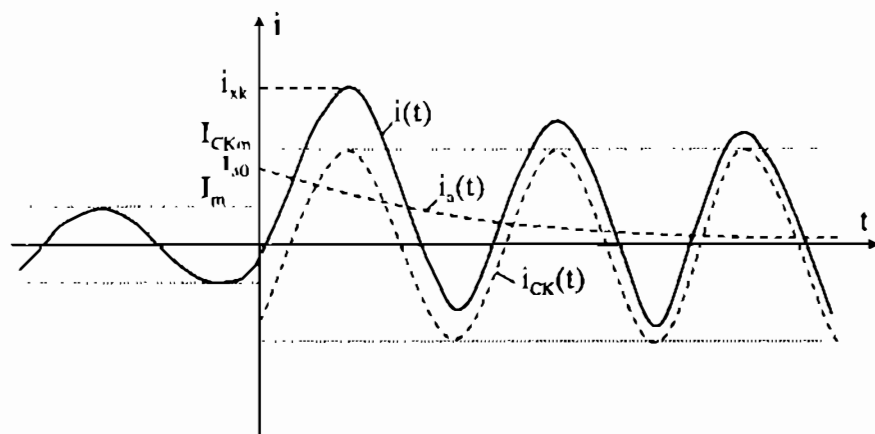
Hình 1.6 Ảnh hưởng của phụ tải đến thành phần tự do

- Trong cùng một tình huống ngắn mạch thành phần dòng điện tự do xuất hiện trên các pha không giống nhau. Chúng không đồng thời triệt tiêu hoặc cùng đạt trị số cực đại (hình 1.4).

Các nhận xét trên rất có ý nghĩa trong các tính toán ứng dụng dòng điện ngắn mạch. Cần chú ý đến một số kết luận chính sau :

- Có thể tính toán dòng điện ngắn mạch theo 2 thành phần: thành phần chu kỳ (hay nói đúng hơn là thành phần xoay chiều) và thành phần tự do (một chiều).
- Thành phần dòng điện chu kỳ hoàn toàn xác định bởi sơ đồ mạch và sức điện động nguồn sau thời điểm xảy ra ngắn mạch.
- Thành phần dòng điện tự do mang đặc tính ngẫu nhiên, phụ thuộc rất nhiều yếu tố không biết trước được: trạng thái mạch tại thời điểm trước khi xảy ra sự cố, tính chất phụ tải, thời điểm xảy ra ngắn mạch (tương ứng với góc pha đầu  $\alpha$  bằng bao nhiêu tại  $t = 0$ )...
- Thành phần tự do xuất hiện mang tính ngẫu nhiên, nhưng có thể biết được dạng hàm biến thiên (tắt dần theo hàm mũ với hằng số thời gian  $T_a = L/R$ ), trị số lớn nhất ở thời điểm đầu trong trường hợp xuất hiện cực đại có thể lấy  $i_{a0} = I_{CK,m}$  (bằng biên độ của thành phần chu kỳ).

Như vậy, về phương diện phương pháp tính việc xác định thành phần chu kỳ của dòng điện ngắn mạch có ý nghĩa quan trọng hơn.



Hình 1.7 Trị số xung kích của dòng điện ngắn mạch toàn phần

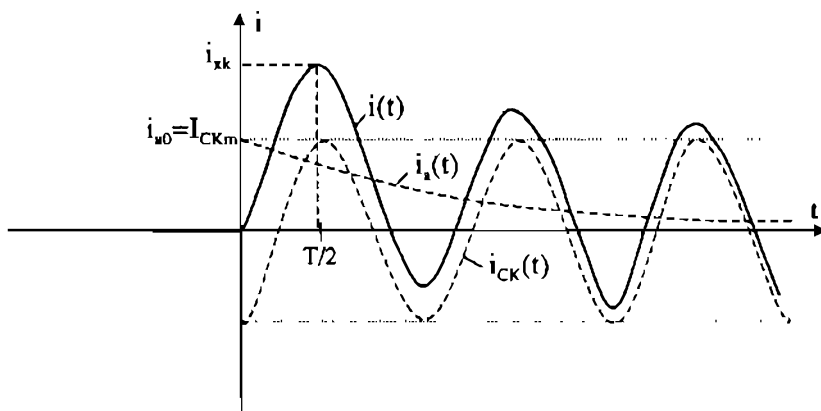
## 2. Dòng điện ngắn mạch xung kích

Dựa vào biểu thức của các dòng điện ngắn mạch thành phần có thể dễ dàng biểu diễn được dạng biến thiên của dòng điện ngắn mạch toàn phần theo thời gian (hình 1.7). Trong trường hợp đang xét nguồn áp có biên độ không đổi nên biên độ của thành phần chu kỳ dòng điện ngắn mạch cũng không đổi. Thành phần tự do,

trong trường hợp chung xuất hiện với trị số đầu  $i_{a0} \neq 0$ . Từ hình 1.7, có thể nhận thấy các đặc điểm sau:

- Dòng điện ngắn mạch toàn phần có dạng dao động xoay chiều, nhưng không đối xứng qua trục hoành. Thành phần tự do xuất hiện là nguyên nhân làm cho dòng điện ngắn mạch biến thiên không đối xứng.
- Luôn luôn tồn tại một giá trị cực đại đối với trị số tức thời dòng điện ngắn mạch gọi là trị số xung kích của dòng điện ngắn mạch (ký hiệu là  $i_{xk}$ ) hay gọi tắt là dòng điện ngắn mạch xung kích.

Để thấy, dòng điện ngắn mạch xung kích cũng xuất hiện gắn liền với sự tồn tại của thành phần dòng điện tự do. Khi thành phần tự do xuất hiện cực đại thì dòng điện ngắn mạch xung kích cũng sẽ có giá trị lớn nhất. Hình 1.8 thể hiện tương quan của dòng điện ngắn mạch xung kích với biên độ của thành phần chu kỳ trong trường hợp xuất hiện lớn nhất. Như đã phân tích trong phần trên thành phần dòng điện tự do được coi là xuất hiện lớn nhất ứng với trường hợp mạng điện làm việc không tải trước khi xảy ra ngắn mạch và thời điểm ngắn mạch diễn ra lúc góc pha của điện áp nguồn  $\alpha \approx 0$ . Khi đó  $|i_{a0}| = I_{CKm}$ .



Hình 1.8 Trường hợp xuất hiện lớn nhất của dòng điện ngắn mạch xung kích

Hình vẽ cho thấy trị số xung kích xuất hiện ở chu kỳ đầu, vào thời điểm gần với trị số  $t = T/2$  (trong đó  $T$  là chu kỳ của dòng điện tần số công nghiệp).

Hãy xác định trị số của  $i_{xk}$  ứng với trường hợp thành phần tự do xuất hiện lớn nhất.

Ta có:  $i_{a0} = i_{amax} = I_{CKm}$  (ngắn mạch lúc mạch không tải).

Vì  $i_{xk}$  xảy ra khi  $t = T/2 = 0,01$  giây nên:

$$\begin{aligned} i_{xk} &= i_{CK}(0,01) + i_{a0} e^{-\frac{0,01}{T_a}} \\ &= I_{CKm} + I_{CKm} e^{-\frac{0,01}{T_a}} = I_{CKm} \left( 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}} \right) \end{aligned}$$

Người ta đặt hệ số :  $k_{xk} = 1 + e^{-\frac{0,01}{T_a}}$  , gọi là hệ số xung kích .

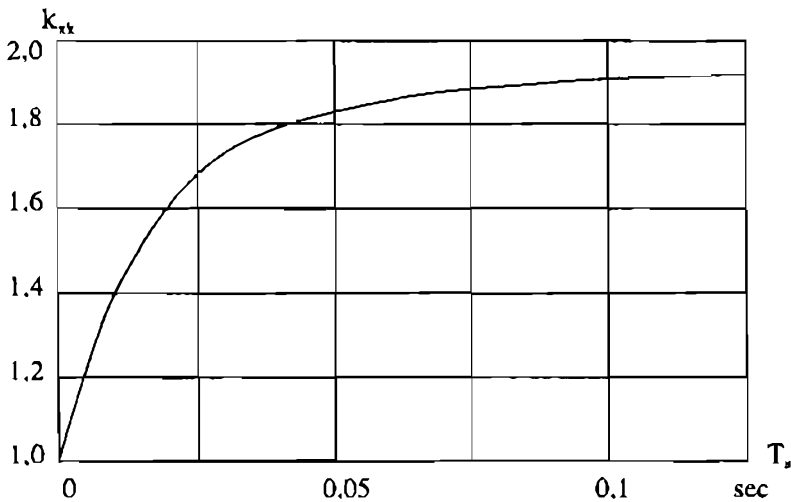
Khi đó :  $i_{xk} = k_{xk} \cdot I_{c'Knt} = \sqrt{2} \cdot k_{xk} \cdot I_{c'K}$

Như vậy  $i_{xk}$  phụ thuộc vào hằng số thời gian tắt dần  $T_a$ .

Tuỳ theo giá trị của  $T_a$  hệ số xung kích nằm trong phạm vi :

$$1 \leq k_{xk} \leq 2$$

Dòng điện ngắn mạch xung kích lớn nhất ứng với lúc  $k_{xk} = 2$  khi  $R = 0$ , tức  $T_a = \infty$ , mạch có tính chất thuần cảm. Với  $L = 0$  (mạch thuần trở) hệ số  $k_{xk} = 1$ . Quan hệ giữa  $k_{xk}$  với hằng số  $T_a$  của mạch có dạng như trên hình 1.9.



Hình 1.9 Hệ số xung kích phụ thuộc  $T_a$

Khi biết rõ điện trở và điện kháng của mạch có thể tính được  $T_a = X/\omega R$  và áp dụng công thức đã biết để tính hệ số xung kích. Trong các tính toán thực dụng, có thể chấp nhận các trị số gần đúng sau để tính toán dòng điện ngắn mạch xung kích:

- Ngắn mạch xa nguồn trong mạng điện điện áp trên 1000 V, lấy  $k_{xk} = 1,8$ .
- Ngắn mạch gần nguồn (trên các mạch cung cấp trực tiếp từ đầu cực máy phát), lấy  $k_{xk} = 1,9$ .
- Ngắn mạch phía thứ cấp các máy biến áp giảm áp công suất nhỏ ( $\leq 1000$  KVA) lấy  $k_{xk} = 1,3$  ;

Trị số xung kích của dòng điện ngắn mạch rất cần được quan tâm khi tính toán kiểm tra tác dụng lực của của dòng điện lên các trang thiết bị lúc sự cố.

### 3. Trị số hiệu dụng của dòng điện ngắn mạch toàn phần.

Trị số hiệu dụng của dòng điện ngắn mạch toàn phần tại một thời điểm  $t$  nào đó được định nghĩa như sau :

$$I_t = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} i_N^2 dt} .$$

Với  $T$  là chu kỳ thời gian của dòng điện xoay chiều. Trong trường hợp chung dạng hàm của dòng điện ngắn mạch toàn phần  $i_N$  khá phức tạp. Để tính chính xác theo công thức trên cần phân tích hàm  $i_N$  thành chuỗi vô hạn các thành phần chu kỳ. Một cách gần đúng người ta coi  $i_N$  chỉ có 2 thành phần: thành phần bậc 0 với biên độ không đổi (một chiều) bằng  $i_a(t)$ , nghĩa là bằng trị số của thành phần tự do tại  $t$ , và thành phần bậc 1 (tần số cơ bản) chính là  $i_{CK}$ , biên độ là  $I_{CKm}$ . Khi đó, theo công thức chung tính trị số hiệu dụng của hàm chu kỳ (nhiều thành phần) ta có :

$$I_t = \sqrt{I_{CK}^2 + I_{a1}^2}$$

Trong đó:

$$I_{CK} = \frac{I_{CKm}}{\sqrt{2}} \text{ là trị số hiệu dụng của thành phần dòng điện ngắn mạch}$$

chu kỳ ;

$$I_{a1} = i_a(t) \text{ là trị số hiệu dụng của thành phần bậc 0, lấy bằng trị số của thành phần tự do } i_a(t) \text{ tại thời điểm tính toán } t.$$

Trị số  $I_{a1}$  có thể xác định được theo biểu thức của thành phần dòng điện tự do (ứng với lúc xuất hiện lớn nhất) :

$$I_{a1} = i_a(t) = i_{a0} e^{-\frac{t}{T_a}} = I_{CKm} e^{-\frac{t}{T_a}} ;$$

Trong trường hợp điện áp nguồn thay đổi, biên độ của thành phần chu kỳ cũng biến thiên theo thời gian. Khi đó công thức tính toán vẫn không có gì thay đổi, tuy nhiên cần lấy trị số hiệu dụng của thành phần chu kỳ ứng với thời điểm tính toán  $t$ :

$$I_t = \sqrt{I_{CK1}^2 + I_{a1}^2} ;$$

Người ta cũng quan tâm đến trị số hiệu dụng lớn nhất của dòng điện ngắn mạch. Trị số này ứng với chu kỳ đầu tiên của dòng điện ngắn mạch, nghĩa là cần tính trị số hiệu dụng tại  $t = T/2 = 0,01 \text{ sec}$ .

$$\begin{aligned} \text{Ta có } i_{xk} &= I_{CKm} + i_a(0,01) , \\ \text{do đó : } I_{a1} &= i_a(0,01) = i_{xk} - I_{CKm} \\ &= (k_{xk} - 1) I_{CKm} \\ &= (k_{xk} - 1) \sqrt{2} I_{CK} \end{aligned}$$

Thay  $I_{a1}$  vào biểu thức chung tính trị số hiệu dụng  $I_t$  ta nhận được biểu thức của trị số hiệu dụng lớn nhất:

$$\begin{aligned} I_{xk} &= \sqrt{I_{CK}^2 + [(k_{xk} - 1) \sqrt{2} I_{CK}]^2} \\ &= I_{CK} \sqrt{1 + 2(k_{xk} - 1)^2} \end{aligned}$$

Người ta cũng ký hiệu trị số này là  $I_{\text{ck}}$  để có thể hiểu là trị số hiệu dụng xung kích của dòng điện ngắn mạch. Do  $1 \leq k_{\text{ck}} \leq 2$  ta có:

$$1 \leq \frac{I_{\text{ck}}}{I_{\text{CK}}} \leq \sqrt{3}$$

Đó chính là phạm vi thay đổi của trị số hiệu dụng cực đại dòng điện ngắn mạch toàn phần.

Trị số hiệu dụng cực đại của dòng điện ngắn mạch toàn phần có ý nghĩa ứng dụng quan trọng trong tính toán kiểm tra phát nóng thiết bị điện và dây dẫn lúc sự cố.

#### 4. Công suất ngắn mạch.

Người ta định nghĩa công suất ngắn mạch là :

$$S_{Nt} = \sqrt{3} U_{\text{tb}} \cdot I_{Nt}$$

Trong đó :

$U_{\text{tb}}$  - điện áp (đây) trung bình của phần mạng điện có dòng điện ngắn mạch trước khi xảy ra ngắn mạch.

$I_{Nt}$  - trị số hiệu dụng của dòng điện ngắn mạch tính tại thời điểm  $t$ .

Công suất ngắn mạch mang các ý nghĩa sau đây:

- Khi tính công suất theo công thức trên cho *dòng điện ngắn mạch chạy qua máy cắt* ta sẽ nhận được trị số công suất lớn nhất có thể sinh ra giữa 2 cực tiếp điểm của máy cắt. (Bởi vì ở cuối quá trình cắt, điện áp giáng trên hồ quang xấp xỉ bằng  $U_{\text{tb}}$ ). Máy cắt cần được chế tạo sao cho :

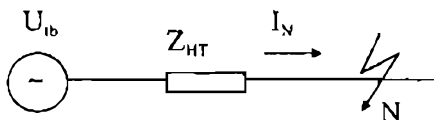
$$S_{\text{cst}} \geq S_{Nt} \quad ,$$

trong đó  $t$  là thời điểm cắt của máy cắt.

- Khi tính công suất ngắn mạch cho dòng điện ngắn mạch tổng tại điểm ngắn mạch, trị số công suất tính được sẽ là công suất (biểu kiến) tổng của hệ thống ở trạng thái ngắn mạch. Thật vậy nếu điểm ngắn mạch xa nguồn thì có thể coi điện áp các nguồn được giữ không đổi xấp xỉ điện áp trung bình làm việc của mạng điện. Đẳng trị hệ thống thành tổng trở  $Z_{\text{HT}}$  ta dễ thấy công suất ngắn mạch cũng chính là công suất toàn hệ thống sinh ra trong trạng thái ngắn mạch (hình vẽ). Hơn nữa :

$$S_N = \sqrt{3} U_{\text{tb}} I_N = \frac{U_{\text{TB}}^2}{Z_{\text{HT}}} \quad .$$

Như vậy khi cho công suất ngắn mạch tính tại một điểm nào đó (coi là xảy ra ngắn mạch 3 pha) ta có thể xác định được tổng trở đẳng trị của toàn mạng điện, từ điểm ngắn mạch đến các nguồn:



$$Z_{\text{HT}} = \frac{U_{\text{TB}}^2}{S_N}$$

## II. Ngắn mạch ở gần máy phát điện đồng bộ đang vận hành

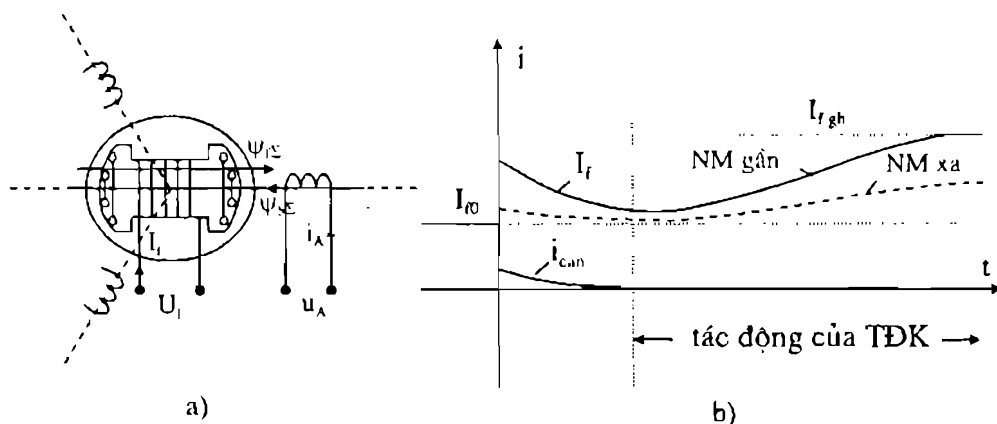
Khi điểm ngắn mạch xảy ra ở gần dòng điện ngắn mạch tăng lên khá lớn bên trong máy phát, quá trình quá độ diễn ra phức tạp hơn (so với nguồn áp không đổi) với các lý do chính sau :

- Ảnh hưởng hỗ cảm giữa stato và roto của dòng điện ngắn mạch làm biến thiên dòng điện kích từ và dòng điện trong các cuộn dây roto của máy phát. Các dòng điện này gây ảnh hưởng ngược trở lại, làm thay đổi sdd máy phát ở giai đoạn đầu của quá trình quá độ.
- Tác động của thiết bị tự động điều chỉnh kích từ (TĐK) làm thay đổi dòng điện kích từ ở giai đoạn sau của quá trình quá độ.

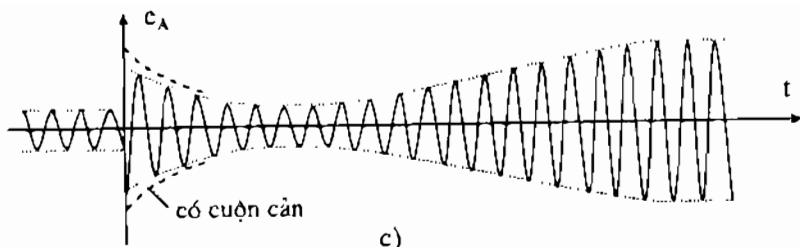
Do các tác động này biên độ sdd máy phát bị biến thiên theo thời gian (không còn là nguồn áp với biên độ không đổi nữa). Khi ngắn mạch ở xa ảnh hưởng này nhỏ nên có thể bỏ qua. Hãy xét kỹ hơn ảnh hưởng của các tác động này.

### 1. Sự thay đổi của dòng điện kích từ do ảnh hưởng của hỗ cảm.

Sau thời điểm xảy ra ngắn mạch, thành phần chu kỳ của dòng điện ngắn mạch (chạy trong các cuộn dây pha của stato) có biên độ tăng lên đột ngột. Từ thông tổng của các dòng điện này quay cùng tốc độ với roto (còn gọi là từ thông phản ứng phần ứng) xuyên qua các vòng dây của cuộn kích từ nằm trên roto, ngược chiều với từ thông kích từ. Theo nguyên lý bảo toàn từ thông của cuộn dây điện cảm khép kín, trong cuộn dây roto phải xuất hiện thành phần dòng điện tự do một chiều làm tăng đột ngột thành phần dòng điện kích từ (để chống lại sự giảm từ thông tổng gây ra bởi phản ứng phần ứng ngược chiều). Sức điện động đồng bộ của máy phát được sinh ra tỉ lệ với dòng điện kích từ (hay nói đúng hơn, tỉ lệ với từ thông tổng sinh ra bởi các cuộn dây có dòng điện trên roto) do đó cũng có biên độ tăng đột ngột.



Hình 1.10 Biến thiên của dòng kích từ và sdd trong máy phát điện đồng bộ

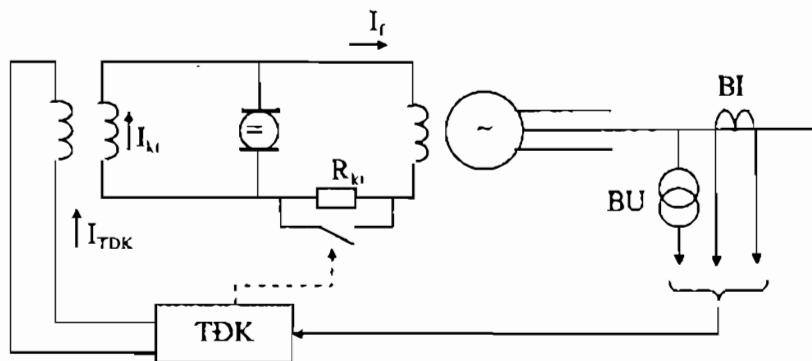


Thành phần dòng điện tự do xuất hiện trong cuộn dây kích từ tắt dần do tổn hao trên điện trở dây quấn nên nó chỉ có ảnh hưởng ở giai đoạn đầu của quá trình quá độ (hình 1.10).

Kết quả là ở giai đoạn đầu của quá trình quá độ biên độ  $s_{dd}$  đồng bộ máy phát đột ngột tăng lên sau đó lại giảm đi. Cũng cần chú ý là, ngoài cuộn kích từ, trên roto còn có các cuộn cản. Đó là các cuộn dây ngắn mạch khép kín đặt trên mặt lõi thép cực từ (nhằm triệt tiêu ảnh hưởng của các thành phần dòng điện tần số cao xuất hiện ở phía stato vào cuộn dây kích từ). Chúng cũng là các cuộn điện cảm khép kín nên có thành phần tự do xuất hiện tương tự như trong cuộn dây kích từ. Do ảnh hưởng từ thông của các dòng điện này biên độ  $s_{dd}$  máy phát tăng thêm nhiều hơn ở giai đoạn đầu của quá trình quá độ (hình 1.10).

## 2- Sự biến thiên của dòng điện kích từ do ảnh hưởng của TĐK

Các máy phát điện đều được trang bị thiết bị tự động điều chỉnh kích từ (gọi tắt là TĐK). Trong chế độ làm việc bình thường TĐK làm nhiệm vụ giữ điện áp đầu cực máy phát trong phạm vi cho phép, gần trị số định mức bằng cách thay đổi dòng điện kích từ. Khi điện áp giảm (do phụ tải tăng) dòng điện kích từ được tăng lên và ngược lại. Ở chế độ ngắn mạch gần, điện áp đầu cực máy phát có thể giảm nhiều (xuống dưới 70%  $U_{dm}$ ) để tăng cường điện áp, bộ phận TĐK đưa tín hiệu đến nối tắt điện trở kích từ, khi đó dòng điện trong cuộn dây roto tăng mạnh (gần với hàm mũ) còn gọi là tác động kích thích cưỡng bức, hay kích thích cường hành. Dòng điện kích từ tăng lên do kích thích cưỡng bức có thể đạt đến giới hạn khi ngắn mạch rất gần, nhưng cũng có thể chưa tới giới hạn khi ngắn mạch xa, điện áp đầu cực máy phát đạt trị số định mức trước khi đến giới hạn điều chỉnh (xem hình 1.10).



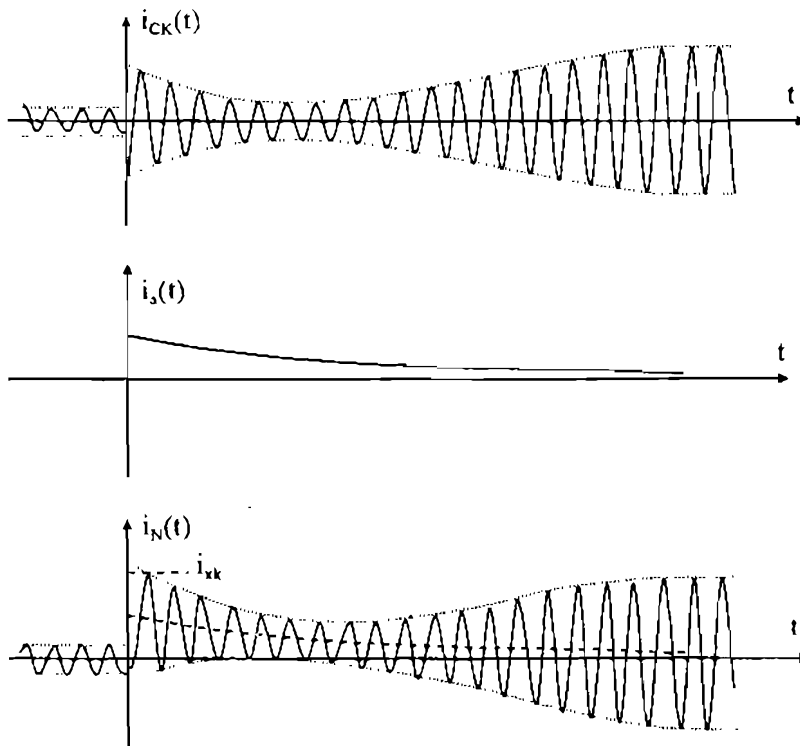
Hình 1.11 Nguyên lý hoạt động của TĐK

Hình 1.11 vẽ nguyên lý cấu tạo của TĐK các máy phát điện đồng bộ. Để đơn giản, vẽ sơ đồ hệ thống kích thích dùng máy phát điện một chiều. Tuy nhiên, hiện nay do công suất máy phát đồng bộ rất lớn người ta đã áp dụng những hệ thống kích thích hiện đại hơn, như hệ thống kích thích dùng máy phát xoay chiều tần số cao chỉnh lưu, hệ thống kích thích bằng thyristor công suất lớn ... Tuy nhiên, nguyên lý làm việc vẫn hoàn toàn tương tự.

Với các ảnh hưởng nêu trên (do ảnh hưởng hồ cảm và do TĐK) dòng điện kích từ trong cuộn dây roto của máy phát có diễn biến phức tạp (hình 1.10,b). Kết quả là biên độ sdd đồng bộ máy phát bị thay đổi mạnh trong quá trình quá độ. Khi kể đến tác động của cuộn cản, sdd máy phát tăng nhiều hơn ở giai đoạn đầu (xem hình 1.10,c)

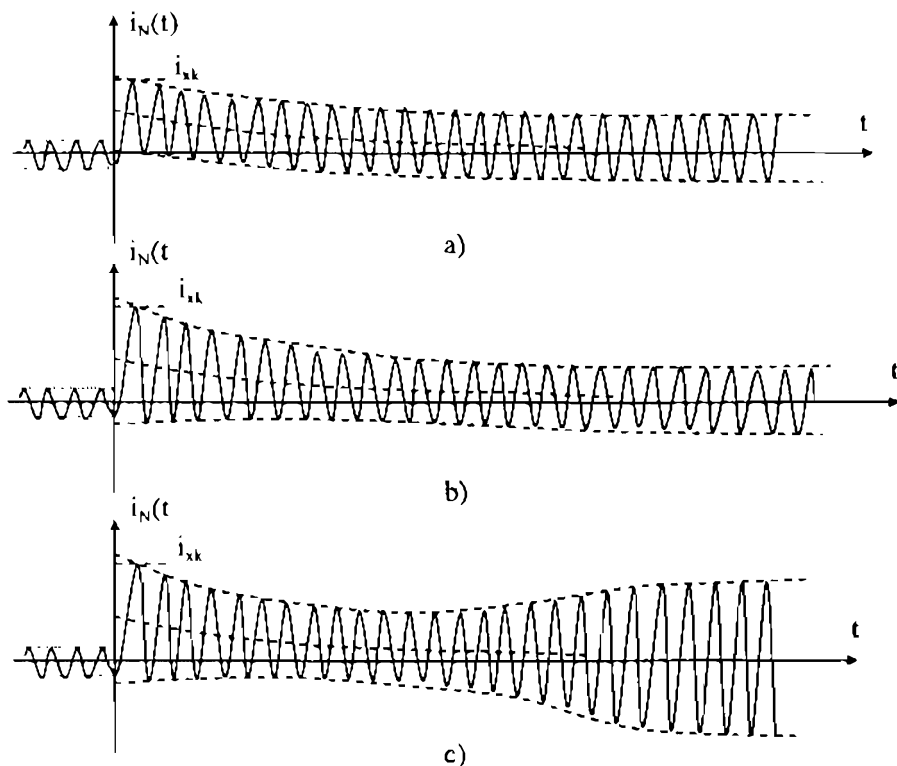
### 3- Sự biến thiên của dòng điện ngắn mạch (phía stato máy phát)

Trên hình 1.12 vẽ sự biến thiên của dòng điện ngắn mạch trong quá trình quá độ. Thành phần chu kỳ phụ thuộc nguồn nên có dạng tương tự sức điện động của máy phát.



Hình 1.12 Dạng đặc trưng của dòng điện ngắn mạch

Thành phần tự do tắt dần theo hằng số thời gian của mạch stato  $T_s$ . Trong trường hợp ngắn mạch gần nguồn thành phần này thường biến thiên chậm hơn nhiều so với ngắn mạch xa vì tỉ số  $L/R$  lớn. Dòng điện tổng hợp có diễn biến phức tạp và cũng không đối xứng qua trục hoành (hình 1.12).



Hình 1.12 Dạng đặc trưng của dòng điện ngắn mạch trong các trường hợp khác nhau

- a) nguồn áp không đổi; b) máy phát không có TĐK;  
 c) máy phát có TĐK

### III. Nội dung thực hiện tính toán ngắn mạch

Các phân tích nêu trên xuất phát từ sơ đồ đơn giản nhất của mạch điện xoay chiều ba pha, tuy nhiên các đặc tính chung của dòng điện ngắn mạch có thể mở rộng cho HTĐ phức tạp. Nói chung, dòng điện ngắn mạch toàn phần có diễn biến phức tạp theo thời gian, đặc biệt đối với hệ thống điện nhiều máy phát. Trong bối

cảnh đó các tính toán phân tích chế độ ngắn mạch trong HTĐ được thực hiện theo hai hướng chính sau :

a) Phân tích diễn biến đầy đủ QTQĐ điện từ trong HTĐ từ sau thời điểm ngắn mạch, nghĩa là tính toán trị số tức thời của dòng điện và điện áp ngắn mạch. Trong QTQĐ còn có thể có những tác động tiếp theo như cắt các phân tử sự cố, tự động đóng trở lại đường dây... Mục đích của các tính toán này là khảo sát các hiện tượng quá điện áp, cộng hưởng điện từ, đánh giá khả năng dập tắt hồ quang máy cắt...

Thực chất của phương pháp tính trong trường hợp này là giải hệ phương trình vi phân mô tả trạng thái quá độ của mạng điện 3 pha phức tạp. Trị số tức thời của dòng điện và điện áp cần khảo sát được tính ra ở những điểm rời rạc của thời gian (bởi chủ yếu là theo phương pháp tích phân số). Tồn tại những chương trình máy tính chuyên dụng để tính toán QTQĐ điện từ đối với HTĐ (ElectroMagnetic Transients Program - EMTP). Các yếu tố ngẫu nhiên, bất định (như thời điểm ngắn mạch, tác động đóng cắt không đồng đều các tiếp điểm máy cắt...) được xét đến bằng cách giả thiết nhiều lần hoặc lấy mẫu tình huống theo số ngẫu nhiên.

b) Một hướng nghiên cứu tính toán khác chế độ ngắn mạch trong HTĐ là xác định các trị số đặc trưng cần thiết của dòng điện ngắn mạch. Ví dụ, tính toán biên độ của thành phần chu kỳ biến thiên theo thời gian, tính trị số dòng điện ngắn mạch xung kích, xác định trị số hiệu dụng dòng điện ngắn mạch toàn phần ở giai đoạn đầu QTQĐ... Các đặc trưng này đủ thoả mãn đa số các ứng dụng thực tế trong thiết kế và vận hành HTĐ.

Thực hiện tính toán ngắn mạch theo hướng thứ hai nêu trên chính là đối tượng nghiên cứu của giáo trình này. Có thể thấy ngay rằng các phương pháp tính toán ngắn mạch (theo hướng thứ hai) chủ yếu tập trung vào xác định thành phần chu kỳ với sự biến thiên biên độ của nó theo thời gian. Thành phần tự do chỉ được xét đến riêng khi cần thiết.

Cũng cần nói thêm là, chính mục đích ứng dụng và ý nghĩa thực tế của các đại lượng tính toán quyết định việc lựa chọn phương pháp tính. Chẳng hạn, các thiết bị bảo vệ rơle tác động theo tín hiệu dòng điện (bảo vệ quá dòng) nhận tín hiệu dòng điện sự cố ở thứ cấp các máy biến dòng chỉ là thành phần chu kỳ dòng điện ngắn mạch. Khi đó dòng điện tính toán chính xác không thể xét đến dòng điện tự do. Ngược lại, khi kiểm tra khả năng chịu nhiệt của các thiết bị điện thì thành phần tự do có tác động đáng kể, không thể bỏ qua trong tính toán (cần xác định trị số hiệu dụng của dòng điện ngắn mạch toàn phần trong suốt thời gian tồn tại ngắn mạch). Lúc kiểm tra lực điện động, dòng điện ngắn mạch xung kích lại có ý nghĩa quyết định hơn. Khi đó theo công thức tính toán, chỉ cần xác định biên độ ban đầu của thành phần chu kỳ  $I_{CKm}$  và hệ số xung kích, không cần tính đầy đủ thành phần tự do.

## **Những điểm cần ghi nhớ trong chương một**

1. Ngắn mạch là trạng thái sự cố nặng nề trong hệ thống điện. Hầu hết các bài toán thiết kế và vận hành hệ thống điện đòi hỏi phải tính toán phân tích dòng điện ngắn mạch.

2. Có các dạng ngắn mạch khác nhau, nói chung khi xảy ra chúng đều gây nên dòng điện lớn trong các bộ phận của hệ thống điện. Cần phân biệt ngắn mạch một pha với chạm đất một pha. Khi chạm đất một pha chỉ có dòng điện nhỏ chạy qua điểm ngắn mạch.
3. Từ sau thời điểm xảy ra ngắn mạch, trong hệ thống điện diễn ra quá trình quá độ điện từ. Dòng điện ngắn mạch có dạng xoay chiều không đối xứng, độ lớn diễn biến phức tạp theo thời gian. Có thể coi dòng điện ngắn mạch gồm hai thành phần: thành phần chu kỳ (xoay chiều) có biên độ biến thiên theo thời gian và thành phần tự do (một chiều) tắt dần theo quy luật hàm mũ.
4. Thành phần chu kỳ hoàn toàn xác định bởi sđđ nguồn, trạng thái mạch sau khi xảy ra sự cố. Do sđđ nguồn thay đổi nên biên độ của thành phần chu kỳ cũng biến thiên theo thời gian. Thành phần tự do xuất hiện mang đặc trưng ngẫu nhiên phụ thuộc nhiều yếu tố bất định, chỉ có thể xác định theo trường hợp riêng: xuất hiện lớn nhất, diễn hình ...

## Chương 2

# THIẾT LẬP SƠ ĐỒ TÍNH TOÁN NGẮN MẠCH HỆ THỐNG ĐIỆN

### 2.1 NHỮNG GIẢ THIẾT CƠ BẢN

Để thiết lập sơ đồ và tiến hành tính toán ngắn mạch cần có những giả thiết đơn giản hoá. Những giả thiết này làm giảm đáng kể khối lượng tính toán trong khi vẫn đảm bảo độ chính xác cần thiết cho các ứng dụng thực tế. Mỗi nội dung tính toán thường có những giả thiết riêng. Sau đây là những giả thiết cơ bản liên quan đến bước thiết lập sơ đồ thay thế khi tính toán ngắn mạch.

#### 1. Tần số hệ thống không thay đổi.

Thực tế sau khi xảy ra ngắn mạch công suất của các máy phát thay đổi đột ngột. Sự thay đổi này dẫn đến mất cân bằng mô men quay (giữa mô men phát động của tua-bin và mô men hãm điện từ của máy phát), tốc độ quay bị thay đổi trong quá trình quá độ. Tuy nhiên ngắn mạch được tính toán ở giai đoạn đầu nên sự biến thiên tốc độ còn chưa đáng kể. Giả thiết tần số hệ thống không đổi không mắc sai số nhiều, đồng thời làm đơn giản đáng kể phép tính, ví dụ các điện kháng sẽ có trị số không đổi.

#### 2. Bỏ qua bão hoà từ.

Bình thường lõi thép của nhiều thiết bị điện làm việc ở trạng thái gần bão hoà. Trong trạng thái ngắn mạch mức độ bão hoà từ có thể tăng cao hơn ở một số phần tử. Tuy nhiên để đơn giản vẫn coi mạch từ không bão hoà, khi đó điện cảm của phần tử là hằng số và mạch điện là tuyến tính. Thực tế cho thấy sai số mắc phải không nhiều, bởi số phần tử mang lõi thép chỉ chiếm số lượng ít trong hệ thống điện, ở tình trạng ngắn mạch điện áp đặt vào cuộn dây ít khi bị tăng cao.

#### 3. Thay phụ tải bằng tổng trở hằng.

Thực tế phụ tải xác định bởi đặc tính tiêu thụ công suất. Khi thay thế bằng tổng trở hằng đặc tính công suất không hoàn toàn phù hợp. Tuy nhiên sai số mắc phải nằm trong phạm vi cho phép.

#### 4. Bỏ qua các lượng nhỏ trong thông số của một số phần tử.

Giả thiết này được áp dụng tùy theo bài toán và mục đích phân tích ngắn mạch. Nói chung trong các bài toán thiết kế, đòi hỏi độ chính xác không cao có thể áp dụng:

- Bỏ qua dung dẫn của các đường dây điện áp thấp.
- Bỏ qua mạch không tải của các máy biến áp.
- Bỏ qua điện trở của cuộn dây máy phát điện, máy biến áp và cả điện trở đường dây trong nhiều trường hợp.

#### 5. Hệ thống sức điện động ba pha của nguồn là đối xứng.

Khi ngắn mạch không đối xứng phản ứng phản ứng các pha lên từ trường quay không hoàn toàn giống nhau. Tuy nhiên, từ trường vẫn được giả thiết quay đều với tốc độ không đổi. Khi đó sđd 3 pha luôn đối xứng. Thực tế hệ số không đối xứng của các sđd không đáng kể.

## 2.2 HỆ ĐƠN VỊ TƯƠNG ĐỐI

### 1. Trị số tương đối

Khi tính toán ngắn mạch cũng như thực hiện nhiều tính toán khác đối với hệ thống điện người ta hay sử dụng hệ đơn vị tương đối. Sử dụng hệ đơn vị tương đối, trong nhiều trường hợp làm đơn giản được phép tính, ít nhầm lẫn hơn so với dùng đơn vị có tên.

Trị số tương đối của một đại lượng được hiểu là tỉ số giữa trị số của đại lượng đó trong hệ đơn vị có tên với một lượng cơ bản đã chọn tính trong cùng đơn vị.

Trong hệ thống điện có bốn đại lượng cơ bản là điện áp, dòng điện, công suất và tổng trở, do đó cần có 4 lượng cơ bản cho chúng để xác định trị số tương đối. Ta có

$$U_{*(cb)} = \frac{U}{U_{cb}}; \quad E_{*(cb)} = \frac{E}{U_{cb}}; \quad I_{*(cb)} = \frac{I}{I_{cb}}; \quad S_{*(cb)} = \frac{S}{S_{cb}};$$

$$Z_{*(cb)} = \frac{Z}{Z_{cb}}; \quad R_{*(cb)} = \frac{R}{Z_{cb}}; \quad X_{*(cb)} = \frac{X}{Z_{cb}}.$$

Ở đây  $U_{cb}$ ,  $I_{cb}$ ,  $S_{cb}$ ,  $Z_{cb}$  là các lượng cơ bản, còn  $U$ ,  $E$ ,  $I$ ,  $S$ ,  $X$ ,  $R$ ,  $Z$  là các đại lượng có tên cần chuyển sang trị số tương đối. Các ký hiệu có đánh dấu "\*" biểu thị tính trong hệ đơn vị tương đối, chữ viết trong ngoặc (trong trường hợp này là cb) để chỉ rõ tên của hệ cơ bản chọn.

Cần chú ý rằng 4 đại lượng cơ bản trong hệ thống điện có quan hệ chặt chẽ với nhau. Có 2 biểu thức quan hệ cần đảm bảo :

$$S_{cb} = \sqrt{3} U_{cb} I_{cb}$$

$$Z_{cb} = \frac{U_{cb}}{\sqrt{3} I_{cb}}$$

Do đó chỉ có quyền chọn tùy ý 2 lượng cơ bản, 2 lượng còn lại phải xác định từ các quan hệ trên.

Thường người ta hay chọn trước các lượng  $U_{cb}$  và  $S_{cb}$ . Khi đó cần tính:

$$I_{cb} = \frac{S_{cb}}{\sqrt{3} U_{cb}}$$

$$Z_{cb} = \frac{U_{cb}^2}{S_{cb}}$$

Ví dụ : điện áp một nút nào đó đo được trong hệ đơn vị có tên là  $U = 235,5 \text{ kV}$ , dòng điện trong một nhánh  $I = 730 \text{ A}$  cần đổi sang hệ đơn vị tương đối. Giả sử các lượng cơ bản đã chọn là :  $S_{cb} = 500 \text{ MVA}$ ,  $U_{cb} = 220 \text{ kV}$ .

Ta có :

$$U_{*(cb)} = \frac{U}{U_{cb}} = \frac{235,5}{220} = 1,07$$

$$I_{*(cb)} = \frac{I}{I_{cb}} = \frac{I\sqrt{3}U_{cb}}{S_{cb}} = \frac{0,73 \cdot \sqrt{3} \cdot 220}{500} = 0,556$$

Nên để ý rằng khi thay số tính toán theo các công thức nêu trên, điện áp tính bằng kV, dòng điện tính bằng kA, công suất bằng MVA, còn tổng trở tính bằng  $\Omega$  thì kết quả luôn luôn phù hợp.

Khi đã chọn các lượng cơ bản  $S_{cb}$ ,  $U_{cb}$  ta có thể áp dụng ngay các công thức sau để tính các đại lượng trong hệ đơn vị tương đối :

$$I_{*(cb)} = I \cdot \frac{\sqrt{3}U_{cb}}{S_{cb}}$$

$$X_{*(cb)} = X \cdot \frac{S_{cb}}{U_{cb}^2}$$

$$R_{*(cb)} = R \cdot \frac{S_{cb}}{U_{cb}^2}$$

$$Z_{*(cb)} = Z \cdot \frac{S_{cb}}{U_{cb}^2}$$

Tất nhiên có thể tính trước  $I_{cb}$ ,  $Z_{cb}$  sau đó tính trị số tương đối của dòng điện và tổng trở. Các lượng cơ bản được chọn với trị số tùy ý không ảnh hưởng gì đến kết quả cuối cùng. Tuy nhiên người ta thường chú ý chọn sao cho phép tính phải thực hiện ít nhất (ví dụ trùng với nhiều lượng cần tính) và trị số tương đối nhận được nằm trong phạm vi dễ biểu diễn (thường từ 0,01 đến 10,0).

Sau khi thực hiện các phép tính trong hệ đơn vị tương đối có thể cần đổi ngược lại sang hệ đơn vị có tên. Khi đó chỉ cần áp dụng công thức chuyển ngược. Ta có:

$$U = U_{*(cb)} \cdot U_{cb}$$

$$E = E_{*(cb)} \cdot U_{cb}$$

$$I = I_{*(cb)} \cdot I_{cb} = I_{*(cb)} \cdot \frac{S_{cb}}{\sqrt{3}U_{cb}}$$

$$Z = Z_{*(cb)} \cdot Z_{cb} = Z_{*(cb)} \cdot \frac{U_{cb}^2}{S_{cb}}$$

## 2. Đổi hệ cơ bản

Gặp nhiều trường hợp trị số tương đối được cho theo nhiều hệ cơ bản khác nhau. Khi đó trước khi thực hiện tính toán cần đổi về cùng một hệ cơ bản chọn.

Ví dụ, điện kháng của máy phát điện tra được trong các sổ tay kỹ thuật  $X_d'' = 0,375$ ,  $X_d = 1,2$ ,  $X_q = 0,8$ ; Điện áp ngắn mạch của máy biến áp được cho là  $U_N\% = 10,5$ . Trong trường hợp này cần phải hiểu các trị số trên là trị số tương đối trong hệ đơn vị cơ bản mà các lượng cơ bản chọn là  $S_{dm}$  và  $U_{dm}$  của máy phát và máy biến áp. Chẳng hạn, có thể viết như sau :

$$X_d'' = X_{d''(dm)}'' = X_{d(\Omega)}'' \cdot \frac{S_{dm}}{U_{dm}^2}$$

$$X_d = X_{d(\Omega)} \cdot \frac{S_{dm}}{U_{dm}^2}$$

trong đó :  $S_{dm}$  và  $U_{dm}$  là công suất và điện áp định mức của máy phát điện đang xét. Tương tự có thể viết :

$$U_N\% = \frac{U_N(\text{kV})}{U_{dm}(\text{kV})} \cdot 100$$

chính là trị số tương đối của điện áp ngắn mạch tính bằng phần trăm điện áp định mức máy biến áp. Trước khi tính toán cần chuyển các lượng trên sang cùng hệ cơ bản chọn. Ví dụ cần chuyển  $X_d''$  sang hệ đơn vị tương đối, với  $S_{cb}$  và  $U_{cb}$  đã chọn. Ta có :

$$X_{d(\Omega)}'' = X_d'' \cdot \frac{U_{dm}^2}{S_{dm}} ;$$

Do đó:

$$X_{d(cb)}'' = X_{d(\Omega)}'' \cdot \frac{S_{cb}}{U_{cb}^2} = X_d'' \left( \frac{U_{dm}}{U_{cb}} \right)^2 \cdot \frac{S_{cb}}{S_{dm}}$$

Một cách tương tự ta có công thức chuyển hệ đơn vị tương đối cho các đại lượng còn lại :

$$U_{*(cb)} = U_{*(dm)} \cdot \frac{U_{dm}}{U_{cb}}$$

$$E_{*(cb)} = E_{*(dm)} \cdot \frac{U_{dm}}{U_{cb}}$$

$$I_{*(cb)} = I_{*(dm)} \cdot \frac{I_{dm}}{I_{cb}} = I_{*(dm)} \cdot \frac{S_{dm}}{S_{cb}} \cdot \frac{U_{cb}}{U_{dm}}$$

$$S_{*(cb)} = S_{*(dm)} \cdot \frac{S_{dm}}{S_{cb}}$$

$$Z_{*(cb)} = Z_{*(dm)} \cdot \left( \frac{U_{dm}}{U_{cb}} \right)^2 \cdot \frac{S_{cb}}{S_{dm}}$$

Vì  $S_{dm}$  và  $U_{dm}$  của các thiết bị là khác nhau nên việc chuyển về hệ đơn vị cơ bản chọn luôn luôn cần thiết.

Một số điểm cần chú ý khác :

- Khi biểu diễn trong hệ đơn vị tương đối, điện áp dây và điện áp pha có trị số bằng nhau. Cũng tương tự công suất ba pha và công suất một pha có cùng trị số. Đó là vì theo định nghĩa  $U_{cb}$  và  $S_{cb}$  là điện áp dây và công suất ba pha, còn :

$$U_{cb\text{ pha}} = \frac{U_{cb}}{\sqrt{3}} ;$$

$$S_{cb\text{ pha}} = \frac{1}{3} S_{cb} ;$$

- Nhiều đại lượng vật lý khác nhau nhưng biểu diễn trong hệ đơn vị tương đối luôn luôn có trị số bằng nhau. Người ta có thể viết là bằng nhau và sử dụng thay thế được cho nhau trong các công thức. Chẳng hạn, với giả thiết tần số hệ thống luôn không đổi và bằng trị số định mức, nên nếu mặc định  $\omega_{cb} = \omega_{dm}$  thì  $\omega = 1$  (ở mọi nơi trong tính toán ngắn mạch), do đó :  $X = \omega L$  có thể viết thành  $X = \omega L = L$ .

Tương tự :  $E = \omega \psi = \psi$  ;

$$\psi = L \cdot I = X \cdot I .$$

### 3. Hệ đơn vị tương đối trong tính toán mạng điện có nhiều cấp điện áp

Khi tính toán mạch điện có máy biến áp, để thiết lập sơ đồ tính toán cần qui đổi các thông số mạch điện về cùng một cấp điện áp, cấp điện áp được chọn để qui đổi về gọi là cấp điện áp cơ sở. Nếu tính toán được thực hiện trong hệ có tên ta có các công thức qui đổi quen thuộc sau đây :

$$E^0 = k_1 k_2 \dots k_n E$$

$$U^0 = k_1 k_2 \dots k_n U$$

$$I^0 = \frac{1}{k_1 k_2 \dots k_n} I$$

$$X^0 = (k_1 k_2 \dots k_n)^2 X$$

trong đó

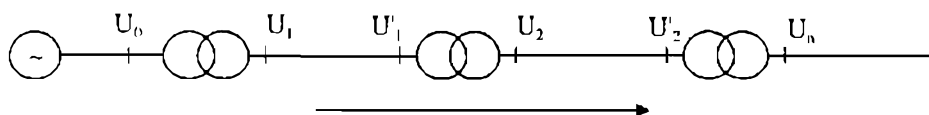
$E, U, I, X$  - là thông số của đoạn xét

$E^0, U^0, I^0, X^0$  - là thông số sau khi đã qui đổi về cấp cơ sở (cấp 0).

$k_i$  - tỉ số của máy biến áp tính theo một hướng từ điện áp

cơ sở về cấp tiếp theo :

$$k_1 = \frac{U_0}{U_1} ; k_2 = \frac{U_1}{U_2} ; \dots k_n = \frac{U_{n-1}}{U_n}$$



Hình 2.1 Mạng điện nhiều cấp điện áp

Khi tính trong hệ đơn vị tương đối, phép qui đổi được thực hiện đối với các lượng cơ bản. Cũng như khi tính trong hệ đơn vị có tên, phép qui đổi cần đảm bảo nguyên lý bảo toàn công suất, do đó công suất cơ bản  $S_{cb}$  phải được chọn duy nhất cho toàn mạng. Điện áp cơ bản chỉ được chọn tùy ý cho một cấp nào đó gọi là cấp cơ sở, điện áp cơ bản của các cấp còn lại cần phải quy đổi, ví dụ gọi  $U_{cb}^{(0)}$  là lượng cơ bản chọn cho cấp điện áp cơ sở (ký hiệu bằng chỉ số 0) thì điện áp cơ bản của một cấp  $i$  bất kỳ cần tính đối theo biểu thức sau :

$$U_{cb}^{(i)} = \frac{1}{k_1 k_2 \dots k_i} U_{cb}^{(0)} ;$$

trong đó  $k_1, k_2, \dots, k_i$  cũng được tính theo chiều từ cấp điện áp cơ sở sang các cấp tiếp theo :

$$k_i = \frac{U_{i-1}'}{U_i} .$$

Sau khi có  $S_{cb}$  và  $U_{cb}^{(i)}$  có thể tính được các lượng cơ bản cho dòng điện  $I_{cb}^{(i)}$  và tổng trở  $Z_{cb}^{(i)}$  theo các công thức quen biết :

$$I_{cb}^{(i)} = \frac{S_{cb}}{\sqrt{3}U_{cb}^{(i)}}$$

$$Z_{cb}^{(i)} = \frac{(U_{cb}^{(i)})^2}{S_{cb}}$$

Cần chú ý rằng trong tính toán gần đúng có thể lấy xấp xỉ tỉ số biến áp như là tỉ số giữa 2 điện áp trung bình ở 2 phía biến áp. Thực chất là coi  $U_i \approx U_i' = U_{ib}$ . Khi đó :

$$k_i = \frac{U_{ib}^{(i-1)}}{U_{ib}^{(i)}} ;$$

Điện áp trung bình của một số mạng điện thường được dùng như sau :

|              |     |      |    |    |     |     |     |
|--------------|-----|------|----|----|-----|-----|-----|
| $U_{dm}(kV)$ | 6   | 10   | 35 | 66 | 110 | 220 | 500 |
| $U_{ib}(kV)$ | 6,3 | 10,5 | 37 | 69 | 115 | 230 | 525 |

Trong trường hợp này áp dụng công thức tính điện áp cơ bản cho cấp điện áp thứ  $i$  ta có :

$$U_{cb}^{(i)} = \frac{1}{k_1 k_2 \dots k_i} U_{cb}^{(0)}$$

$$= \frac{1}{\frac{U_{ib}^{(0)}}{U_{ib}^{(1)}} \cdot \frac{U_{ib}^{(1)}}{U_{ib}^{(2)}} \dots \frac{U_{ib}^{(i-1)}}{U_{ib}^{(i)}}} U_{ib}^{(0)} = U_{ib}^{(i)}$$

Nghĩa là điện áp cơ bản của cấp nào bằng chính điện áp trung bình của cấp ấy.

Ta cũng có :

$$I_{cb}^{(1)} = \frac{S_{cb}}{\sqrt{3} U_{tb}^{(1)}}$$

$$Z_{cb}^{(1)} = \frac{(U_{tb}^{(1)})^2}{S_{cb}}$$

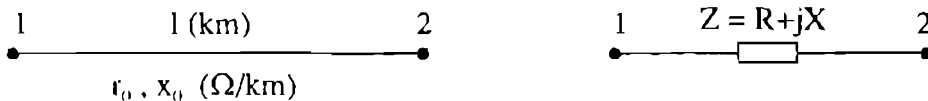
Sau khi có các lượng cơ bản, việc tính các trị số tương đối sẽ được tiến hành theo các công thức thông thường (như một cấp điện áp). Nói chung, cần chú ý sử dụng đúng điện áp cơ bản của cấp đang tính toán. Các thông số tính trong hệ đơn vị tương đối đã tự động qui đổi sơ đồ về cùng một cấp điện áp, do đó các ký hiệu máy biến áp lý tưởng cần được bỏ qua.

## 2.3 SƠ ĐỒ THAY THẾ VÀ THÔNG SỐ TÍNH TOÁN CỦA CÁC PHẦN TỬ TRONG HỆ THỐNG ĐIỆN.

### 1. Đường dây tải điện

Sơ đồ thay thế của các đường dây tải điện được thiết lập tùy thuộc cấp điện áp và cấu trúc dây dẫn (cáp hay đường dây trên không).

*a- Các đường dây trên không điện áp dưới 35 kV.*



Hình 2.2

Mỗi đoạn đường dây có thể thay thế bằng 1 tổng trở. Trong trường hợp này diện tích ký sinh của đường dây đã được bỏ qua đồng thời coi đường dây như một phần tử có thông số tập trung.

Trong hệ đơn vị có tên, có thể xác định :

$$R = r_0 l \quad (\Omega) ;$$

$$X = x_0 l \quad (\Omega) ;$$

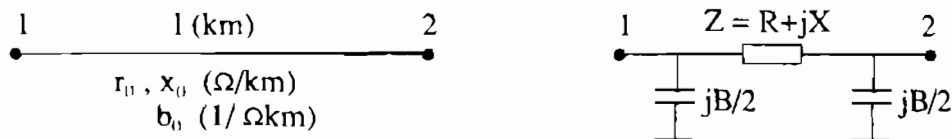
$$Z = R + jX \quad (\Omega) .$$

Trong hệ đơn vị tương đối :

$$Z_{cb} = Z \frac{S_{cb}}{U_{cb}^2} = (r_0 + jx_0) l \frac{S_{cb}}{U_{cb}^2}$$

$U_{cb}$  cần lấy đúng theo cấp điện áp của mạng có đường dây đang xét.

b. Các đường dây cáp và đường dây trên không  $66 \text{ kV} < U_{dm} \leq 330 \text{ kV}$



Hình 2.3

Trong hệ đơn vị cổ tên :

$$\begin{aligned} Z &= (r_0 + j x_0)l & (\Omega) \\ B &= b_0 l = \omega C_0 l & (1/\Omega) \end{aligned}$$

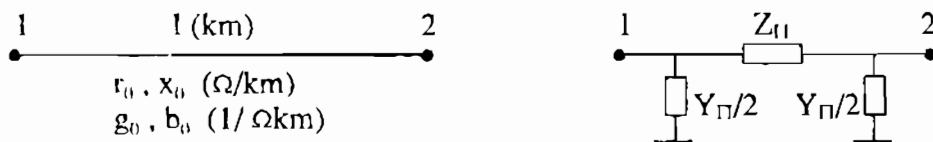
Khi tính trong hệ đơn vị tương đối :

$$\begin{aligned} Z_{(cb)} &= (r_0 + j x_0)l \cdot \frac{S_{cb}}{U_{cb}^2} \\ B_{(cb)} &= b_0 l \cdot \frac{U_{cb}^2}{S_{cb}} \end{aligned}$$

c- Đường dây siêu cao áp ( $U \geq 400 \text{ kV}$ )

Các đường dây siêu cao áp thường là các đường dây dài tải điện đi xa hoặc liên kết giữa các hệ thống. Trong chế độ xác lập (kể cả trạng thái ngắn mạch) các đường dây siêu cao áp vẫn được mô tả theo sơ đồ mạch điện có thông số tập trung. Tuy nhiên các thông số của sơ đồ cần được xác định theo điều kiện tương đương với mô hình đường dây có thông số rải. Có hai cách mô hình đường dây siêu cao áp.

a. Mô hình theo sơ đồ hình  $\Pi$



Hình 2.4

Phương trình xuất phát của chế độ xác lập đối với đường dây dài có thông số rải có dạng sau (viết dưới dạng ma trận) :

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & Z_c \sinh \gamma l \\ Y_c \sinh \gamma l & \cosh \gamma l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix}$$

Trong đó :

$Z_c, Y_c$  là các tổng trở sóng và tổng dẫn sóng :

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}} ; Y_c = \sqrt{\frac{Y_0}{Z_0}}$$

$\gamma$  - tốc độ lan truyền sóng :

$$\gamma = \sqrt{Z_0 Y_0}$$

với  $Z_0 = r_0 + jx_0$  - tổng trở dọc của đường dây tính trên 1 đơn vị dài;  
 $Y_0 = g_0 + jb_0$  - tổng dẫn ngang của đường dây tính cho 1 đơn vị dài.

Bây giờ nếu ký hiệu :

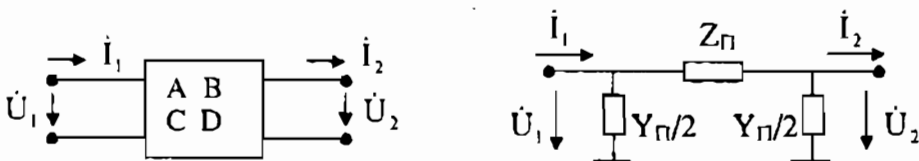
$$Z = r_0 l ; Y = Y_0 l \quad \text{thì} \quad \gamma l = \sqrt{ZY}$$

ta có thể viết lại phương trình của đường dây dài ở dạng sau :

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \sqrt{ZY} & \sqrt{\frac{Z}{Y}} \sinh \sqrt{ZY} \\ \sqrt{\frac{Y}{Z}} \sinh \sqrt{ZY} & \cosh \sqrt{ZY} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix}$$

Đây cũng là cách viết phương trình của mạng hai cửa dạng hỗn hợp tương đương của đường dây dài. Mặt khác theo lý thuyết về mạng hai cửa, luôn luôn có thể tương đương hoá mỗi mạng hai cửa bằng một sơ đồ hình  $\Pi$  hoặc hình T.



Hình 2.5

Với sơ đồ hình  $\Pi$  ta có công thức tính :

$$Z_\Pi = B = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \sinh \sqrt{ZY} = Z \frac{\sinh \sqrt{ZY}}{\sqrt{ZY}} ;$$

$$\frac{Y_\Pi}{2} = \frac{A-1}{B} = \frac{Y \tanh(\sqrt{ZY}/2)}{\sqrt{ZY}/2} .$$

Đó chính là các công thức cho phép tính chính xác thông số của sơ đồ hình  $\Pi$  tương đương của mỗi đường dây dài điện áp siêu cao (đúng cho mọi chiều dài l).

Cần chú ý là ở đây,  $Z_{\Pi} \neq Z$  và  $Y_{\Pi} \neq Y$  (với  $Z$  và  $Y$  tính như đối với các đường dây ngắn).

Công thức cho thấy sự sai khác sẽ càng nhỏ khi khoảng cách đường dây càng ngắn. Thật vậy, khi  $l$  nhỏ thì góc  $\gamma l = l\sqrt{Z_0 Y_0} = \sqrt{ZY}$  cũng có trị số nhỏ, lúc ấy:

$$\frac{\sinh \sqrt{ZY}}{\sqrt{ZY}} \approx 1 ; \quad \frac{\tanh\left(\frac{\sqrt{ZY}}{2}\right)}{\left(\frac{\sqrt{ZY}}{2}\right)} \approx 1. \text{ Do đó: } Z_{\Pi} \approx Z; Y_{\Pi} \approx Y.$$

Các số liệu thực tế tính toán cho thấy khi  $l = 100$  km thì sai số khoảng 0,2 % nhưng khi  $l = 500$  km thì sai số gần 5 %. Sai số sẽ tăng nhanh theo chiều dài  $l$  (xấp xỉ tỉ lệ với bình phương khoảng cách).

Khi tính trong hệ đơn vị tương đối ta có :

$$Z_{\Pi(cb)} = Z_{\Pi} \cdot \frac{S_{cb}}{U_{cb}^2} ; \quad Y_{\Pi(cb)} = Y_{\Pi} \cdot \frac{U_{cb}^2}{S_{cb}}.$$

Nhược điểm của cách mô hình này (bằng một sơ đồ hình  $\Pi$ ) là công thức tính thông số khá phức tạp. Vì thế, trong thực hành người ta hay áp dụng các công thức gần đúng để xác định  $Z_{\Pi}$  và  $Y_{\Pi}$ .

Khai triển chuỗi công thức các hệ số mạng 4 cực ở trên, ta có :

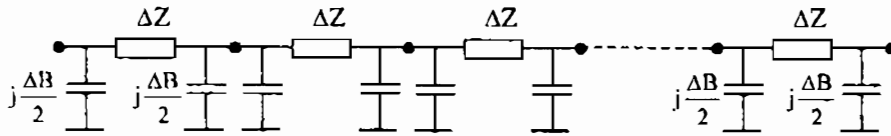
$$\begin{aligned} A &= 1 + \frac{YZ}{2} + \frac{Y^2 Z^2}{24} + \frac{Y^3 Z^3}{720} + \dots \approx 1 + \frac{YZ}{2} ; \\ B &= Z \left( 1 + \frac{YZ}{6} + \frac{Y^2 Z^2}{120} + \frac{Y^3 Z^3}{5040} + \dots \right) \approx Z \left( 1 + \frac{YZ}{6} \right) ; \\ C &= Y \left( 1 + \frac{YZ}{6} + \frac{Y^2 Z^2}{120} + \frac{Y^3 Z^3}{5040} + \dots \right) \approx Y \left( 1 + \frac{YZ}{6} \right) ; \end{aligned}$$

Thay vào công thức tính  $Z_{\Pi}$  và  $Y_{\Pi}$  sẽ nhận được :

$$\begin{aligned} Z_{\Pi} &\approx Z \left( 1 + \frac{YZ}{6} \right) ; \\ Y_{\Pi} &\approx \frac{Y}{\left( 1 + \frac{YZ}{6} \right)} \end{aligned}$$

Thông thường khi tính toán ngắn mạch có thể bỏ qua  $g_0$  của ĐДСА vì chúng ít ảnh hưởng đến kết quả.

b- Mô hình đường dây dài bằng một chuỗi các mắt xích hình  $\Pi$



Hình 2.6

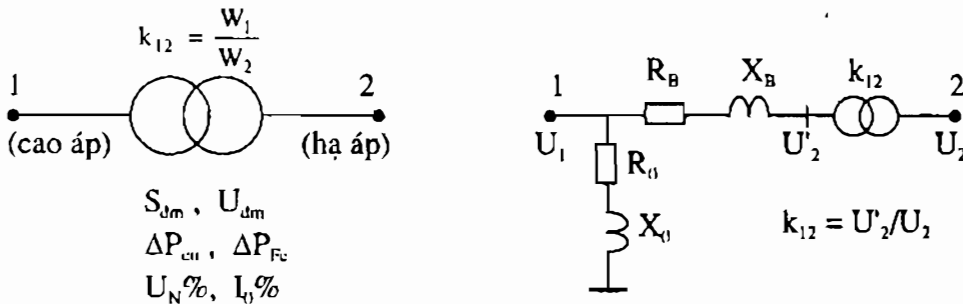
Như đã nhận xét ở trên, khi chiều dài của đoạn đường dây siêu cao áp không lớn lắm ( $l < 100$  km), sai số mắc phải khi áp dụng các công thức của đường dây ngắn cho mô hình một mắt xích hình  $\Pi$  đối với cả đoạn đường dây cũng không lớn ( $< 0,2\%$ ). Lợi dụng tính chất này người ta mô hình các đường dây dài điện áp siêu cao bằng một chuỗi các mắt xích hình  $\Pi$ . Nói chung mỗi mắt xích cần đảm bảo  $\Delta l \leq 100$  km.

Ưu điểm chính của phương pháp này là có thể tính các thông số sơ đồ theo công thức đơn giản:  $\Delta Z = (r_0 + jx_0) \Delta l$ ;  $\Delta B = jb_0 \Delta l$ ;

Tuy nhiên nhược điểm của phương pháp này là số nút, số nhánh của sơ đồ tăng lên đáng kể.

## 2. Các máy biến áp

a- Máy biến áp 2 cuộn dây



Hình 2.7

Trong hệ đơn vị có tên mỗi máy biến áp 2 cuộn dây được thay thế bằng một sơ đồ hình  $\Gamma$  (hoặc T) có máy biến áp lý tưởng nối giữa 2 cấp điện áp. Về nguyên tắc, sơ đồ hình  $\Gamma$  có thể nằm ở phía điện áp bất kỳ của máy biến áp lý tưởng. Tuy nhiên để thuận lợi cho tính toán các thông số của hình  $\Gamma$  thường được tính ở phía điện áp cao (do các thông số định mức được cho trong lý lịch máy ứng với phía điện áp cao). Các công thức quen biết (xem trong giáo trình mạng điện) cũng đã được thiết lập theo quy ước này. Chẳng hạn, điện kháng dọc:

$$X_B = \frac{U_N \%}{100} \cdot \frac{U_{dm}^2}{S_{dm}} \quad (\Omega) .$$

Theo công thức trên trị số điện kháng được tính trong hệ đơn vị có tên ứng với phía điện áp cao của máy biến áp. Tương tự các thông số khác của sơ đồ máy biến áp cũng tính ở phía điện áp cao (trong hệ đơn vị có tên):

$$R_B = \Delta P_{cu} \cdot \left( \frac{U_{dm}}{S_{dm}} \right)^2$$

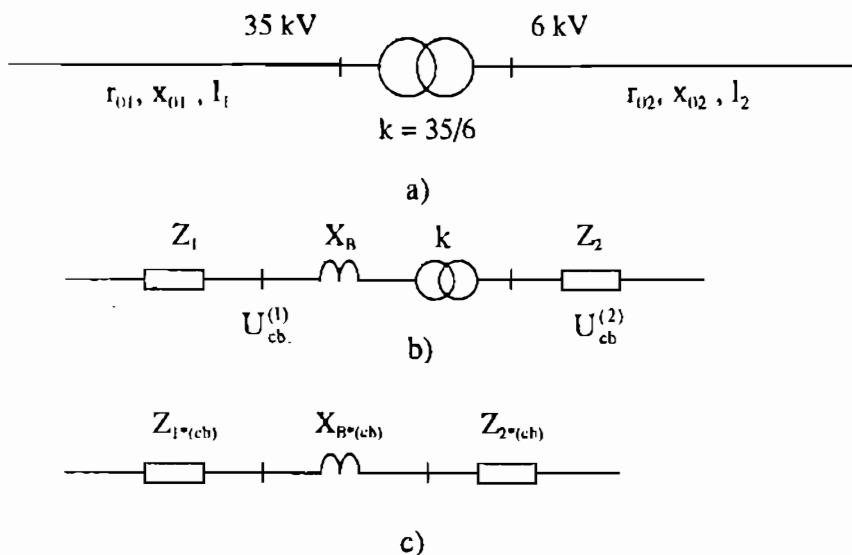
$$X_0 = \frac{U_{dm}^2}{\Delta Q_{Fe}}$$

$$Z_0 = \frac{100}{I_0 \%} \cdot \frac{U_{dm}^2}{S_{dm}}$$

$$R_0 = \sqrt{Z_0^2 - X_0^2}$$

Trong tính toán ngắn mạch các thông số ứng với tổn hao máy biến áp ( $R_B$ ,  $R_{cu}$ ,  $X_0$ ) thường được bỏ qua vì chúng có ảnh hưởng nhỏ đến dòng điện ngắn mạch. Khi đó, sơ đồ chỉ còn một điện kháng  $X_B$  và máy biến áp lý tưởng (hình 2.8,b).

Như đã biết khi mạng có nhiều cấp điện áp, để tính toán luôn phải quy đổi các thông số sơ đồ về một cấp điện áp. Bước quy đổi này thường được thực hiện ngay lúc áp dụng công thức tính toán. Chính vì vậy máy biến áp lý tưởng ít khi được vẽ vào sơ đồ. Hãy lấy ví dụ đơn giản nhất, sơ đồ mạng điện hình 2.8,a. Bỏ qua tổn hao trong máy biến áp và dung dẫn các đường dây ta có sơ đồ thay thế ban đầu như trên hình 2.8,b.



Hình 2.8

Thông số đường dây tính ứng với từng cấp điện áp của mạng:

$$Z_1 = (r_{01} + j x_{01}) I_1 ; \quad Z_2 = (r_{02} + j x_{02}) I_2 .$$

Thông số máy biến áp tính trong hệ đơn vị có tên (phía điện áp cao) :

$$X_B = \frac{U_N \%}{100} \cdot \frac{U_{dm}^2}{S_{dm}} ;$$

Sau khi quy đổi về một cấp điện áp sơ đồ sẽ có dạng hình 2.8,c. Trị số các thông số phụ thuộc vào hệ đơn vị tính và cấp điện áp cơ sở.

Nếu tính trong hệ đơn vị có tên, quy đổi về điện áp cao (35 kV), chỉ cần quy đổi  $Z_2$  thành  $Z'_2$ :

$$Z'_2 = (r_{02} + j x_{02}) I_2 k^2 ;$$

Nếu tính trong hệ đơn vị có tên nhưng quy đổi về phía hạ áp (6 kV), cần quy đổi  $Z_1$  và  $X_B$  :

$$Z'_1 = (r_{01} + j x_{01}) I_1 / k^2 ;$$

$$X'_B = \frac{U_N \%}{100} \cdot \frac{U_{dm}^2}{S_{dm}} \cdot \frac{1}{k^2} .$$

Khi tính trong hệ đơn vị tương đối ta có :

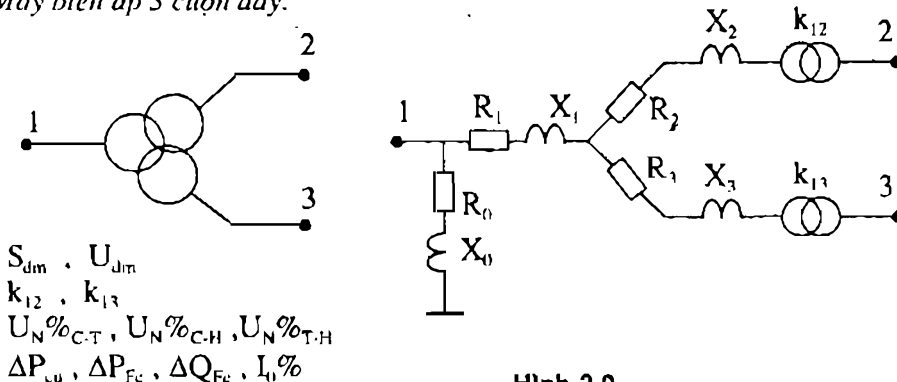
$$Z_{1*(cb)} = (r_{01} + j x_{01}) I_1 \frac{S_{cb}}{(U_{cb}^{(1)})^2} ;$$

$$Z_{2*(cb)} = (r_{02} + j x_{02}) I_2 \frac{S_{cb}}{(U_{cb}^{(2)})^2} ;$$

$$X_{B(cb)} = \frac{U_N \%}{100} \cdot \frac{U_{dm}^2}{S_{dm}} \cdot \frac{S_{cb}}{(U_{cb}^{(1)})^2} = \frac{U_N \%}{100} \cdot \left( \frac{U_{dm}}{U_{cb}^{(1)}} \right)^2 \cdot \frac{S_{cb}}{S_{dm}} .$$

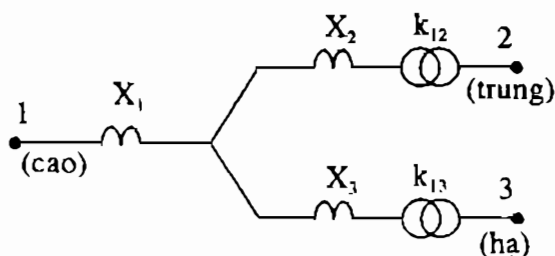
Cần để ý rằng, khi tính trong hệ đơn vị tương đối không sử dụng đến hệ số biến áp  $k$  là vì nó đã được xét đến khi xác định điện áp cơ bản  $U_{cb}^{(1)}$  và  $U_{cb}^{(2)}$ . Hơn nữa, sau khi tính các thông số trong hệ đơn vị tương đối sơ đồ đã mặc nhiên ở cùng một cấp điện áp nên cũng không cần sử dụng đến bước thiết lập sơ đồ hình 2.8,b. Tuy nhiên, để xác định rõ thông số nằm ở cấp điện áp nào, về nguyên tắc phải thiết lập sơ đồ hình 2.8,b, đặc biệt là các máy biến áp.

b. Máy biến áp 3 cuộn dây.



Hình 2.9

Khi bỏ qua tổn hao sơ đồ thay thế có dạng đơn giản như hình 2.10. Để ý rằng các thông số  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  đều được xác định ở phía điện áp cao.



Hình 2.10

Để tính trị số các điện kháng, trước hết cần xác định điện áp ngắn mạch đối với mỗi cuộn dây.

$$U_N\%_C = (U_N\%_{C-T} + U_N\%_{C-H} - U_N\%_{T-H})/2 ;$$

$$U_N\%_T = (U_N\%_{C-T} + U_N\%_{T-H} - U_N\%_{C-H})/2 ;$$

$$U_N\%_H = (U_N\%_{C-H} + U_N\%_{T-H} - U_N\%_{C-T})/2 .$$

Sau đó áp dụng các công thức tương tự như máy biến áp 2 cuộn dây (đơn vị có tên và đơn vị tương đối):

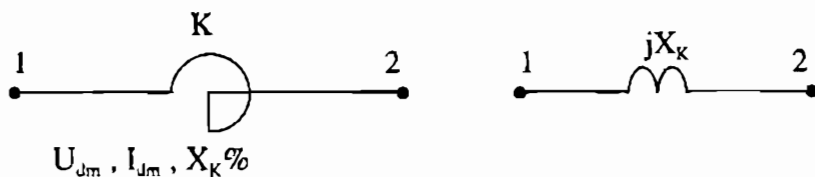
$$X_C = \frac{U_N\%_C}{100} \cdot \frac{U_{dm}^2}{S_{dm}} ; \quad X_{C(cb)} = \frac{U_N\%_C}{100} \cdot \frac{U_{dm}^2}{S_{dm}} \cdot \frac{S_{cb}}{U_{cb(C)}^2}$$

$$X_T = \frac{U_N\%_T}{100} \cdot \frac{U_{dm}^2}{S_{dm}} ; \quad X_{T(cb)} = \frac{U_N\%_T}{100} \cdot \frac{U_{dm}^2}{S_{dm}} \cdot \frac{S_{cb}}{U_{cb(C)}^2}$$

$$X_H = \frac{U_N\%_H}{100} \cdot \frac{U_{dm}^2}{S_{dm}} ; \quad X_{H(cb)} = \frac{U_N\%_H}{100} \cdot \frac{U_{dm}^2}{S_{dm}} \cdot \frac{S_{cb}}{U_{cb(C)}^2}$$

### 3- Kháng điện và tụ điện.

#### a- Kháng điện phân đoạn



Hình 2.11

Cho  $X_K\%$ ,  $I_{dm}$ ,  $U_{dm}$ . Theo định nghĩa :

$$X_K \% = X_K (\Omega) \cdot \frac{\sqrt{3} I_{dm}}{U_{dm}} \cdot 100$$

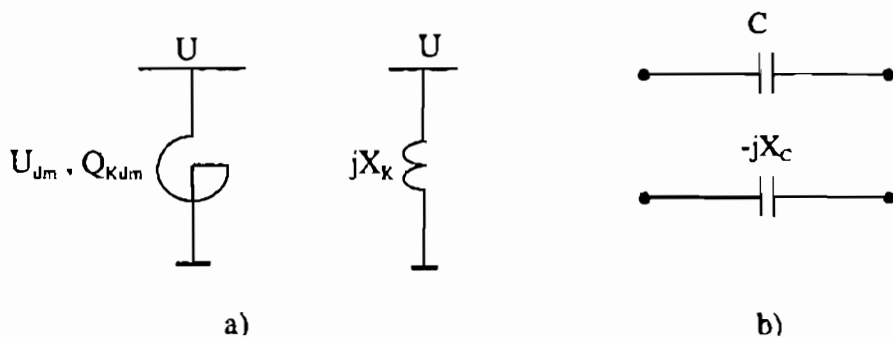
suy ra :

$$X_K (\Omega) = \frac{X_K \%}{100} \cdot \frac{U_{dm}}{\sqrt{3} I_{dm}} ;$$

Trong hệ đơn vị tương đối :

$$\begin{aligned} X_{K(cb)} &= \frac{X_K \%}{100} \cdot \frac{U_{dm}}{\sqrt{3} I_{dm}} \cdot \frac{\sqrt{3} I_{cb}}{U_{cb}} \\ &= \frac{X_K \%}{100} \cdot \frac{U_{dm}}{U_{cb}} \cdot \frac{I_{cb}}{I_{dm}} \end{aligned}$$

b- Kháng bù ngang :



Hình 2.12 Thay thế kháng bù ngang (a)  
và tụ bù dọc (b)

Đối với kháng điện bù ngang thường được cho  $U_{dm}$ ,  $Q_{Kdm}$ . Trong hệ đơn vị có tên tính được:

$$X_K (\Omega) = \frac{U_{dm}^2}{Q_{Kdm}}$$

chuyển sang hệ tương đối:

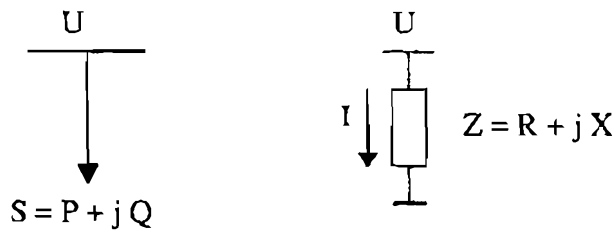
$$X_{K(cb)} = \frac{U_{dm}^2}{Q_{Kdm}} \cdot \frac{S_{cb}}{U_{cb}^2}$$

c - Tự bù dọc :

Đối với tự bù dọc, thông số cho trước là điện kháng  $X_c$  trong đơn vị ôm. Đó đó sơ đồ thay thế chỉ đơn giản như một tụ điện. Khi tính trong hệ đơn vị tương đối:

$$X_{\bullet c(cb)} = X_c \cdot \frac{S_{cb}}{U_{cb}^2}$$

#### 4. Phụ tải điện



Hình 2.13

Phụ tải được thay thế bằng tổng trở cố định sao cho khi điện áp thanh cái bằng U thì công suất tiêu thụ trên tổng trở bằng  $S = P + jQ$ . Theo công thức tính công suất phức trên một nhánh tổng trở ta có :

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \sqrt{3} \dot{U} \hat{I} = \sqrt{3} \dot{U} \frac{\hat{U}}{\hat{Z} \sqrt{3}} = \frac{U^2}{\hat{Z}} \\ \hat{Z} &= R - jX = \frac{U^2}{\dot{S}} = \frac{U^2}{S^2} (P - jQ) \\ &= \frac{U^2}{S} (\cos \varphi - j \sin \varphi) \end{aligned}$$

Suy ra :

$$\begin{aligned} R &= \frac{U^2}{S^2} P = \frac{U^2}{S} \cos \varphi \\ X &= \frac{U^2}{S^2} Q = \frac{U^2}{S} \sin \varphi \end{aligned}$$

Trong hệ đơn vị tương đối cơ bản:

$$\begin{aligned} R_{\bullet c(cb)} &= P \frac{U^2}{S^2} \frac{S_{cb}}{U_{cb}^2} ; \\ X_{\bullet c(cb)} &= Q \frac{U^2}{S^2} \frac{S_{cb}}{U_{cb}^2} . \end{aligned}$$

Khi không có số liệu của phụ tải đang làm việc người ta sử dụng công suất định mức của phụ tải để tính toán. Khi đó nếu tính trong hệ tương đối định mức của phụ tải, nghĩa là  $S_{ch} = S_{dm}$ ,  $U_{ch} = U_{dm}$ , ta có :

$$R_{*(dm)} = \frac{P}{S} = \cos \varphi$$

$$X_{*(dm)} = \frac{Q}{S} = \sin \varphi$$

$$Z_{*(dm)} = \cos \varphi + j \sin \varphi$$

Có một số điểm cần lưu ý khi mô hình phụ tải:

- Cách mô hình phụ tải nêu trên còn gọi là mô hình tĩnh, nó chỉ đúng khi phụ tải ở trạng thái gần với CĐXL, ví dụ chế độ ngắn mạch duy trì, phụ tải xa điểm ngắn mạch... Trong chế độ quá độ cần sử dụng các mô hình và các tính toán khác.
- Phụ tải thực chất bao gồm các thiết bị dùng điện khác nhau. Mô hình trên là cách mô tả gần đúng cho phụ tải tổng hợp (ứng với công suất tổng tại một nút hệ thống, như thanh cái các trạm 6-110 kV). Trong trường hợp phụ tải cá biệt: động cơ lớn, lò điện, thiết bị điện phân... cần mô hình phụ tải theo đặc trưng của thiết bị cụ thể.
- Nói chung trong CĐXL phụ tải có tỉ lệ lớn công suất tác dụng, tuy nhiên trong tính toán gần đúng người ta vẫn cho phép mô tả phụ tải bằng phần tử thuần kháng nhằm đơn giản phép tính (khi tất cả các phần tử khác đã thay thế thuần kháng). Sai số mắc phải cũng sẽ không lớn nếu thay thế hợp lý.

Khi lấy xấp xỉ phụ tải thuần kháng bằng riêng phần ảo (bỏ qua hoàn toàn R):  $X_{pi} = X$ ; hoặc bằng mô đun tổng trở toàn phần (coi góc pha bằng 90°):

$$X_{pi} = Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

sai số mắc phải đều tương đối lớn. Cần lấy cao hơn một ít theo trị số sau (xem giải thích trong chương 3):

$$X_{pi} = 1,2 Z, \text{ hay } X_{pi*(dm)} = 1,2.$$

Trong hệ đơn vị tương đối định mức phụ tải có trị số bằng 1,2 là do đã coi  $\cos \varphi = 0,8$  và  $\sin \varphi = 0,6$  (khi đó  $Z=1$ ).

## 5. Điện kháng hệ thống

Rất thường gặp các tính toán ngắn mạch, trong đó các kết quả cần quan tâm chỉ giới hạn trong một phần lưới điện, có khi chỉ trong phạm vi lưới thuộc một trạm biến áp khu vực. Rõ ràng khi đó mong muốn có được một sơ đồ đẳng trị đơn giản nhất cho phần hệ thống phía trên. Chẳng hạn ở dạng một tổng trở hay một điện kháng đẳng trị (gọi là điện kháng hệ thống). Điện kháng này có thể nhận được theo cách đơn giản hơn, không cần biến đổi đẳng trị sơ đồ (phần lưới phía trên).

Như đã biết, từ biểu thức công suất ngắn mạch có thể xác định:

$$X_{HT}(\Omega) = \frac{U_{tb}^2}{S_N} ;$$

$U_{tb}$  - điện áp trung bình làm việc của phần lưới chứa thanh cái bị ngắn mạch.

Hãy xét biểu thức tính điện kháng hệ thống trong hệ đơn vị tương đối cơ bản tùy chọn với  $S_{cb}$  và  $U_{cb} = U_{tb}$ . Trong trường hợp này lấy  $U_{cb}$  bằng điện áp trung bình làm việc của phần lưới chứa thanh cái là hoàn toàn hợp lý (bởi đang thực hiện các tính toán gần đúng). Ta có:

$$X_{HT*(cb)} = \frac{U_{tb}^2}{S_N} \frac{S_{cb}}{U_{cb}^2} = \frac{S_{cb}}{S_N} ;$$

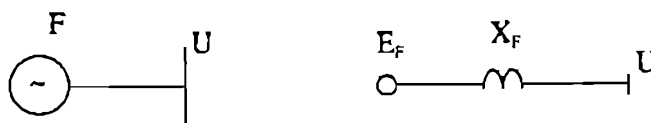
Nguồn sdd đẳng trị của hệ thống có thể lấy là  $E_{HT} = 1$ , bởi trong hệ đơn vị có tên:

$$E_{HT} \approx U_{tb} \approx U_{cb}.$$

Có trường hợp người ta cho trước điện kháng ngắn mạch tương đối của hệ thống  $X_N$  và công suất hệ thống  $S_{HT}$ . Khi đó có thể hiểu  $X_N$  là điện kháng đẳng trị của hệ thống tính đến điểm ngắn mạch trên thanh cái trạm. Trường hợp này  $X_N$  thường nhận được nhờ các tính toán ngắn mạch trước đó và đổi về lượng cơ bản là công suất tổng hệ thống. Từ ý nghĩa đó ta có công thức tính:

$$X_{HT*(cb)} = X_N \frac{S_{cb}}{S_{HT}} ;$$

## 6. Các máy phát điện

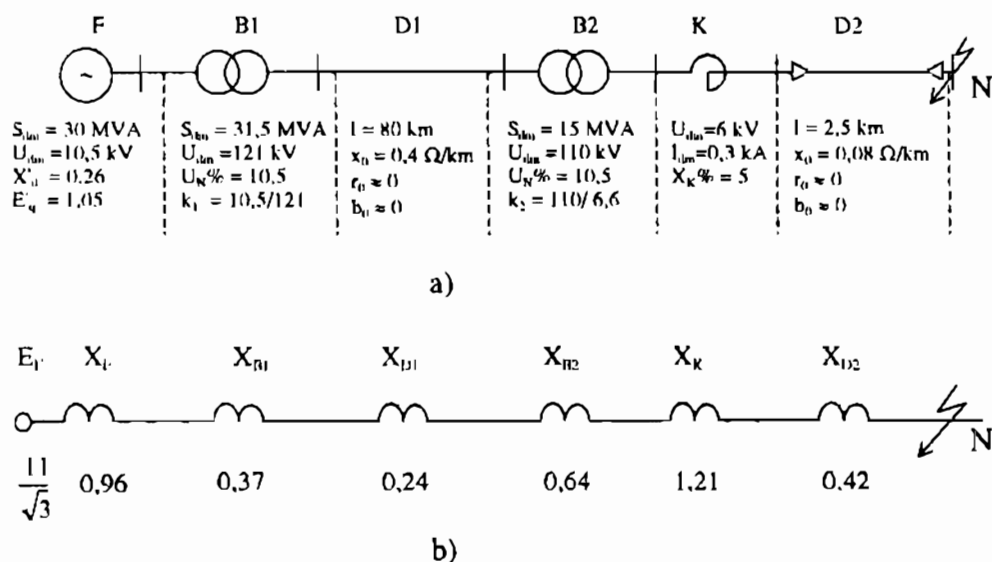


Hình 2.14

Máy phát điện được đề cập đến sau cùng mặc dù là phần tử quan trọng nhất trong tính toán ngắn mạch. Đó là vì không thể nói đơn giản đây dù ngay được sơ đồ thay thế của các máy phát điện. Khi thay thế trên sơ đồ tính toán, máy phát có thể được biểu thị bằng một nguồn sdd  $E_F$  nối tiếp với một điện kháng  $X_F$  (hình 2.14). Tuy nhiên,  $E_F$  và  $X_F$  nhận giá trị nào, còn phụ thuộc vào trạng thái máy phát khi ngắn mạch và thời điểm khảo sát. Các nội dung này sẽ được xét đến cụ thể trong các chương sau.

Khi đưa ra các ví dụ tính toán trong chương này sdd và điện kháng máy phát được cho trước trị số, là lấy theo các trường hợp tính toán thường gặp. (Sinh viên chưa cần tìm hiểu ngay).

**Ví dụ 2.1** Cho sơ đồ hệ thống như trên hình 2.3,a. Hãy vẽ sơ đồ thay thế, xác định trị số của các phần tử trên sơ đồ và tính dòng điện ngắn mạch tại điểm N.



**Hình 2.15** Sơ đồ hệ thống (a) và sơ đồ thay thế tính toán (b) của ví dụ 2.1

Việc tính toán được tiến hành trong hệ đơn vị có tên và đơn vị tương đối. Khi sử dụng hệ đơn vị tương đối sẽ được áp dụng cả 2 cách tính : tính chính xác và tính gần đúng.

*a- Tính chính xác trong hệ đơn vị có tên.*

Chọn cấp điện áp cơ sở là 10,5 kV (của điện áp máy phát). Các thông số được tính qui đổi về cấp này, kết quả ghi trực tiếp vào sơ đồ hình 2.3,b.

Sức điện động của máy phát điện đổi về trị số có tên :

$$E_q' (\text{kV}) = E_q' U_{dm} = 1,05 \cdot 10,5 = 11 \text{ kV}.$$

Tính với sơ đồ 1 pha nên cần xác định trị số sdd pha:

$$E_q' = \frac{11}{\sqrt{3}}, \text{ kV}.$$

Điện kháng máy phát :

$$X_F = X_d' \cdot \frac{U_{dm}^2}{S_{dm}} = 0,26 \cdot \frac{10,5^2}{30} = 0,96 \Omega.$$

Điện kháng máy biến áp B<sub>1</sub> (qui đổi về cấp cơ sở) :

$$X_{B1} = \frac{U_N \%}{100} \cdot \frac{U_{dm}^2}{S_{dm}} \cdot k_1^2$$

$$= \frac{10,5}{100} \cdot \frac{121^2}{31,5} \cdot \left( \frac{10,5}{121} \right)^2 = 0,37 \, \Omega$$

Điện kháng đường dây  $D_1$  ( qui đổi qua  $B_1$ ) :

$$X_{D1} = x_0 \cdot l \cdot k_1^2 = 0,4 \cdot 80 \cdot \left( \frac{10,5}{121} \right)^2 = 0,24 \, \Omega$$

Điện kháng máy biến áp  $B_2$  (qui đổi qua  $B_1$ ) :

$$X_{B2} = \frac{U_N \%}{100} \cdot \frac{U_{dm}^2}{S_{dm}} \cdot k_1^2$$

$$= \frac{10,5}{100} \cdot \frac{110^2}{15} \cdot \left( \frac{10,5}{121} \right)^2 = 0,64 \, \Omega$$

Điện kháng của kháng điện (qui đổi qua  $B_2, B_1$ ) :

$$X_K = \frac{X_K \%}{100} \cdot \frac{U_{dm}}{\sqrt{3}} \cdot k_1^2 \cdot k_2^2$$

$$= \frac{5}{100} \cdot \frac{6}{\sqrt{3} \cdot 0,3} \cdot \left( \frac{10,5}{121} \right)^2 \cdot \left( \frac{110}{6,6} \right)^2 = 1,21 \, \Omega$$

Điện kháng đường dây cáp  $D_2$  (qui đổi qua  $B_2, B_1$ ) :

$$X_{D2} = x_0 \cdot l \cdot k_2^2 \cdot k_1^2 = 0,08 \cdot 2,5 \cdot \left( \frac{110}{6,6} \right)^2 \cdot \left( \frac{10,5}{121} \right)^2 = 0,42 \, \Omega$$

Để xác định dòng điện ngắn mạch, cần tính điện kháng tổng hợp của mạch :

$$X_{\Sigma} = X_F + X_{B1} + X_{D1} + X_{B2} + X_K + X_{D2}$$

$$= 0,96 + 0,37 + 0,24 + 0,64 + 1,21 + 0,42 = 3,84 \, \Omega$$

Dòng điện ngắn mạch :

$$I_N = \frac{E_F}{X_{\Sigma}} = \frac{11}{\sqrt{3} \cdot 3,84} = 1,65 \, \text{kA}$$

Cần chú ý rằng, sơ đồ tính toán được qui về cấp cơ sở là cấp điện áp máy phát, nên trị số dòng điện ngắn mạch vừa xác định được là dòng điện chạy trong máy phát. Để tính dòng điện ngắn mạch tại điểm N, cần qui đổi dòng điện qua  $B_1$  và  $B_2$  :

$$I_{N(6kV)} = I_N \cdot k_1 \cdot k_2$$

$$= 1,65 \cdot \frac{10,5}{121} \cdot \frac{110}{6,6} = 2,4 \, \text{kA}$$

Đây cũng là trị số dòng điện chạy qua kháng điện và cuộn hạ áp của máy biến áp  $B_2$ . Dòng điện chạy trên đường dây  $D_1$  (và cuộn cao áp các máy biến áp  $B_1$  và  $B_2$ ) cần xác định là :

$$I_{N(110kV)} = I_N k_1$$

$$= 1,65 \cdot \frac{10,5}{121} = 0,143 \text{ kA}$$

b. *Tính chính xác trong hệ đơn vị tương đối.*

Khi tính trong hệ đơn vị tương đối sơ đồ thay thế vẫn hoàn toàn giống như trên hình 2.3b chỉ cần tính lại trị số các phần tử của sơ đồ.

Giả sử chọn :  $S_{cb} = 100 \text{ MVA}$ ,  $U_{cbl} = 10,5 \text{ kV}$ .

Điện áp cơ bản đã chọn ứng với cấp điện áp máy phát, được coi là cấp cơ sở (I).

Điện áp cơ bản của các cấp còn lại cần phải được tính ra từ  $U_{cbl}$ . Theo công thức qui đổi ta có :

$$U_{cblI} = \frac{1}{k_1} U_{cbl}$$

$$= \frac{1}{10,5/121} \cdot 10,5 = 121 \text{ kV}$$

$$U_{cblII} = \frac{1}{k_1 k_2} U_{cbl} = \frac{1}{k_2} U_{cblI}$$

$$= \frac{1}{110/6,6} \cdot 121 = 7,26 \text{ kV}.$$

Ta cũng tính được dòng điện cơ bản trên các đoạn :

$$I_{cbl} = \frac{S_{cb}}{\sqrt{3} U_{cbl}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 5,5 \text{ kA}$$

$$I_{cblI} = \frac{S_{cb}}{\sqrt{3} U_{cblI}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 121} = 0,48 \text{ kA}$$

$$I_{cblII} = \frac{S_{cb}}{\sqrt{3} U_{cblII}} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot 7,26} = 7,95 \text{ kA}$$

Áp dụng các công thức tính toán, ta xác định trị số các phần tử trên sơ đồ trong hệ tương đối đã chọn.

Sức điện động máy phát :

$$E_F = E_q' \frac{U_{dm}}{U_{cbl}} = 1,05 \frac{10,5}{10,5} = 1,05.$$

Điện kháng máy phát :

$$X_F = X_d' \cdot \frac{U_{dm}^2}{S_{dm}} \cdot \frac{S_{cb}}{U_{cbl}^2} = 0,26 \cdot \frac{10,5^2}{30} \cdot \frac{100}{10,5^2} = 0,87.$$

Điện kháng máy biến áp  $B_1$  :

$$X_{B1} = \frac{U_N \%}{100} \cdot \frac{U_{dm}^2}{S_{dm}} \cdot \frac{S_{cb}}{U_{cbII}^2} =$$

$$= \frac{10,5}{100} \cdot \frac{121^2}{31,5} \cdot \frac{100}{121^2} = 0,33 .$$

Điện kháng đường dây  $D_1$ :

$$X_{D1} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_{cb}}{U_{cbII}^2} = 0,4 \cdot 80 \cdot \frac{100}{121^2} = 0,22 .$$

Điện kháng máy biến áp  $B_2$ :

$$X_{B2} = \frac{U_N \%}{100} \cdot \frac{U_{dm}^2}{S_{dm}} \cdot \frac{S_{cb}}{U_{cbI}^2} =$$

$$= \frac{10,5}{100} \cdot \frac{110^2}{15} \cdot \frac{100}{121^2} = 0,58 .$$

Điện kháng đường dây cáp  $D_2$ :

$$X_{D2} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_{cb}}{U_{cbIII}^2} = 0,08 \cdot 2,5 \cdot \frac{100}{7,26^2} = 0,38 .$$

Điện kháng của kháng điện :

$$X_K = \frac{X_K \%}{100} \cdot \frac{U_{dm}}{I_{dm}} \cdot \frac{I_{cbIII}}{U_{cbIII}} =$$

$$= \frac{5}{100} \cdot \frac{6}{0,3} \cdot \frac{7,95}{7,26} = 1,09 .$$

Điện kháng tổng hợp :

$$X_{\Sigma} = 0,87 + 0,33 + 0,22 + 0,58 + 1,09 + 0,38 = 3,47 .$$

Trị số tương đối của dòng điện ngắn mạch :

$$I_{N*(cb)} = \frac{E_F}{X_{\Sigma}} = \frac{1,05}{3,47} = 0,302 . .$$

Dòng điện ngắn mạch tại điểm N tính đổi sang đơn vị có tên :

$$I_{N(10kV)} = I_{N*(cb)} \cdot I_{cbIII}$$

$$= 0,302 \cdot 7,95 = 2,4 \text{ kA} .$$

Nếu tính dòng điện ngắn mạch trong máy phát và trên đường dây 110 kV ta có :

$$I_{N(10kV)} = I_{N*(cb)} \cdot I_{cbI} = 0,302 \cdot 5,5 = 1,65 \text{ kA} ;$$

$$I_{N(110kV)} = I_{N*(cb)} \cdot I_{cbII} = 0,302 \cdot 0,48 = 0,143 \text{ kA} .$$

Như vậy nếu cùng áp dụng các công thức chính xác thì tính toán trong hệ đơn vị có tên hoặc đơn vị tương đối đều cho kết quả như nhau.

c- Tính gần đúng trong hệ đơn vị tương đối.

Vẫn chọn  $S_{cb} = 100 \text{ MVA}$ , khi tính gần đúng thì  $U_{cb} = U_{th}$ , do đó ta có ngay :

$$U_{cbl} = U_{thl} = 10,5 \text{ kV}$$

$$U_{cbII} = U_{thII} = 115 \text{ kV}$$

$$U_{cbIII} = U_{thIII} = 6,3 \text{ kV}.$$

Các dòng điện cơ bản có thể xác định được :

$$I_{cbl} = \frac{S_{cb}}{\sqrt{3}U_{cbl}} = \frac{100}{\sqrt{3}.10,5} = 5,5 \text{ kA} ;$$

$$I_{cbII} = \frac{S_{cb}}{\sqrt{3}U_{cbII}} = \frac{100}{\sqrt{3}.115} = 0,5 \text{ kA} ;$$

$$I_{cbIII} = \frac{S_{cb}}{\sqrt{3}U_{cbIII}} = \frac{100}{\sqrt{3}.6,3} = 9,2 \text{ kA} .$$

Để thấy rằng, khi tính gần đúng trong hệ đơn vị tương đối, bước xác định các điện áp cơ bản đơn giản hơn nhiều. Không phụ thuộc vào sơ đồ (phức tạp tùy ý), không cần chọn cấp điện áp cơ sở ta có thể viết được ngay các trị số điện áp cơ bản (dựa vào điện áp định mức của mạng). Ngoài ra, khi áp dụng cách tính gần đúng người ta còn cho phép coi xấp xỉ điện áp định mức của các thiết bị (ví dụ máy phát, máy biến áp, kháng điện) bằng điện áp trung bình của mạng. Khi đó ta có các công thức tính đơn giản sau.

Điện kháng máy phát :

$$X_F = X'_d \cdot \frac{U_{dm}^2}{S_{dm}} \cdot \frac{S_{cb}}{U_{tb}^2} = X'_d \cdot \frac{S_{cb}}{S_{dm}} \quad .;$$

Điện kháng máy biến áp :

$$X_B = \frac{U_N \%}{100} \cdot \frac{U_{dm}^2}{S_{dm}} \cdot \frac{S_{cb}}{U_b^2} = \frac{U_N \%}{100} \cdot \frac{S_{cb}}{S_{dm}} \quad .;$$

Điện kháng của kháng điện :

$$X_K = \frac{X_K \%}{100} \cdot \frac{U_{dm}}{I_{dm}} \cdot \frac{I_{cb}}{U_b} = \frac{U_K \%}{100} \cdot \frac{I_{cb}}{I_{dm}} .$$

Với ví dụ trên theo các công thức vừa nêu ta tính được như sau :

Điện kháng máy phát :

$$X_F = X'_d \cdot \frac{S_{cb}}{S_{dm}} = 0,26 \cdot \frac{100}{30} = 0,87 \quad .;$$

Điện kháng máy biến áp  $B_1$ :

$$X_{B1} = \frac{U_N \%}{100} \cdot \frac{S_{cb}}{S_{dm}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{31,5} = 0,33 \quad .$$

Điện kháng đường dây 110 kV :

$$X_{D1} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_{cb}}{U_{cbII}^2} = 0,4 \cdot 80 \cdot \frac{100}{115^2} = 0,24 \quad .$$

Điện kháng máy biến áp  $B_2$ :

$$X_{B2} = \frac{U_N \%}{100} \cdot \frac{S_{cb}}{S_{dm}} = \frac{10,5}{100} \cdot \frac{100}{15} = 0,7 \text{ .}$$

Điện kháng của kháng điện :

$$X_K = \frac{X_K \%}{100} \cdot \frac{I_{cb}}{I_{dm}} = \frac{5}{100} \cdot \frac{9,2}{0,3} = 1,53 \text{ ;}$$

Điện kháng đường dây cáp :

$$X_{D2} = x_0 \cdot l \cdot \frac{S_{cb}}{U_{cbIII}^2} = 0,08 \cdot 2,5 \cdot \frac{100}{6,3^2} = 0,51 \text{ .}$$

Điện kháng tổng hợp :

$$X_{\Sigma} = 0,87 + 0,33 + 0,24 + 0,7 + 1,53 + 0,51 = 4,18 \text{ .}$$

Dòng điện ngắn mạch:

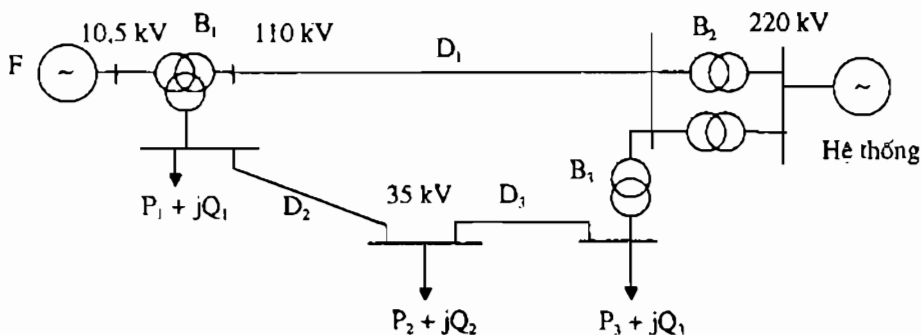
$$I_{N*(cb)} = \frac{E_F}{X_{\Sigma}} = \frac{1,05}{4,18} = 0,25 \text{ ;}$$

$$I_{N(\delta kV)} = I_{N*(cb)} \cdot I_{cbIII} = 0,25 \cdot 9,2 = 2,3 \text{ kA .}$$

Sai số mắc phải khoảng 4 % so với lúc áp dụng các công thức tính chính xác.

**Ví dụ 2.2** (sinh viên tự thực hiện). Cho sơ đồ hệ thống điện như trên hình 2.16. Hãy thiết lập sơ đồ thay thế đầy đủ và tính thông số các phần tử của sơ đồ. Thực hiện theo các nội dung sau:

- Thiết lập sơ đồ thay thế đầy đủ, tính thông số các phần tử của sơ đồ trong hệ đơn vị có tên không quy đổi (ứng với sơ đồ có nhiều cấp điện áp).
- Chọn cấp điện áp 110 kV làm cơ sở, tính quy đổi thông số các phần tử về cùng cấp điện áp này. Vẽ lại sơ đồ (một cấp điện áp) và ghi kết quả tính toán sau khi quy đổi vào sơ đồ.
- Tính thông số các phần tử trong hệ đơn vị tương đối theo các công thức chính xác, ghi kết quả vào sơ đồ (vẽ lại). Chọn  $S_{cb} = 500 \text{ MVA}$ ,  $U_{cb(110)} = 115 \text{ kV}$ .
- Tính lại thông số các phần tử của sơ đồ theo các công thức gần đúng (hệ đơn vị tương đối  $S_{cb} = 500 \text{ MVA}$ ,  $U_{cb} = U_{(b)}$ ).



**Hình 2.16.** Sơ đồ hệ thống điện

Thông số các phần tử được cho như sau:

Máy phát điện:

$$S_{dm} = 75 \text{ MVA} ; U_{dm} = 10,5 \text{ KV.}$$

$$E_F = 1,5 ; X_F = 0,7 ;$$

Máy biến áp B<sub>1</sub>:

$$S_{dm} = 120 \text{ MVA} ; U_{dm} = 115 \text{ kV;} ;$$

$$U_N\%_{C.T} = 17 ; U_N\%_{C.H} = 8 ; U_N\%_{T.H} = 10 ;$$

$$k_{C.T} = 121/10,5 ; k_{C.T} = 121/35$$

Máy biến áp B<sub>2</sub> (mỗi máy):

$$S_{dm} = 60 \text{ MVA} ; U_{dm} = 230 \text{ kV} ;$$

$$U_N\% = 11 ; k_2 = 225/110 ;$$

Máy biến áp B<sub>3</sub>:

$$S_{dm} = 45 \text{ MVA} ; U_{dm} = 110 \text{ kV} ;$$

$$U_N\% = 10,5 ; k_3 = 121/35 ;$$

Đường dây D<sub>1</sub>:

$$l_1 = 50 \text{ km} ; r_0 = 0,25 \Omega/\text{km} ; x_0 = 0,4 \Omega/\text{km} ;$$

Đường dây D<sub>2</sub>:

$$l_2 = 25 \text{ km} ; r_0 = 0,35 \Omega/\text{km} ; x_0 = 0,32 \Omega/\text{km} ;$$

Đường dây D<sub>3</sub>:

$$l_3 = 30 \text{ km} ; r_0 = 0,35 \Omega/\text{km} ; x_0 = 0,32 \Omega/\text{km} ;$$

Phụ tải :

$$S_1 = (10 + j 6) \text{ MVA} ; S_2 = (8 + j 5) \text{ MVA} ;$$

$$S_3 = (15 + j 7) \text{ MVA} ;$$

Hệ thống 220 kV:

$$U_H = 230 \text{ kV} ; S_N = 1200 \text{ MVA} ;$$

Câu hỏi phụ: nếu cho lại  $k_3 = 115/35$  thì có gì khó khăn khi giải bài toán ?

## 2.4 BIẾN ĐỔI ĐẲNG TRỊ SƠ ĐỒ

Khi thực hiện tính toán ngắn mạch thường phải biến đổi sơ đồ về dạng đơn giản nhất (gồm chỉ một sức điện động đẳng trị và một điện kháng tổng hợp) nhằm tính được dòng ngắn mạch tổng. Dòng điện ngắn mạch phân bố trong các nhánh cũng như điện áp các nút được thực hiện ở bước tiếp theo.

Khi tính toán bằng tay, phổ biến nhất vẫn là áp dụng các phép biến đổi đơn giản.

1- Ghép song song các nhánh có nguồn :

Ta có công thức tính toán chung như sau :

$$E_{dt} = \frac{E_1 Y_1 + E_2 Y_2 + \dots + E_n Y_n}{Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n} = \frac{\sum_{i=1}^n E_i Y_i}{\sum_{i=1}^n Y_i}$$

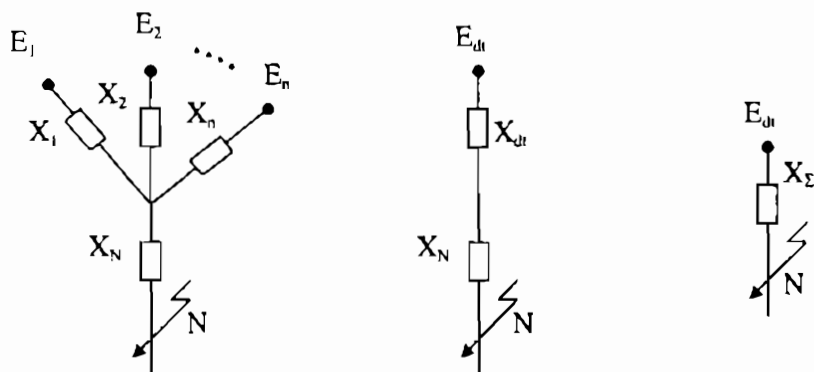
$$Y_{dt} = Y_1 + Y_2 + \dots + Y_n = \sum_{i=1}^n Y_i$$

Khi cho các điện kháng (hoặc tổng trở) cần xác định trước :  $Y_i = 1/X_i$  để áp dụng công thức, cuối cùng tính  $X_{dt} = 1/Y_{dt}$ .

Nếu mạng chỉ có 2 nhánh ta có :

$$E_{dt} = \frac{E_1 X_2 + E_2 X_1}{X_1 + X_2}$$

$$X_{dt} = \frac{X_1 \cdot X_2}{X_1 + X_2}$$

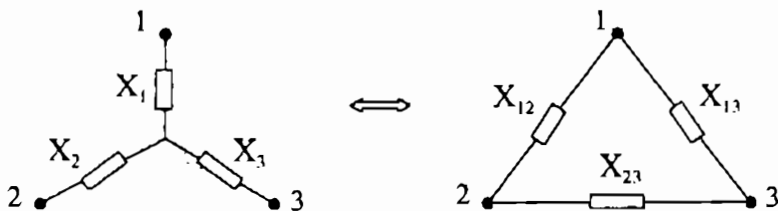


Hình 2.17

Điều đáng chú ý là các công thức trên áp dụng được cả đối với các nhánh có sdd bằng 0. Nghĩa là có thể ghép chung nhánh nguồn với nhánh phụ tải trong sơ đồ thay thế. Lúc đó, trong công thức các số hạng tương ứng với  $E_i = 0$  sẽ triệt tiêu (nhưng  $Y_i$  vẫn tồn tại trong biểu thức tính  $Y_{dt}$ ).

## 2. Biến đổi sao - tam giác.

a- Biến đổi sơ đồ hình sao thành tam giác :



Hình 2.18

$$X_{12} = X_1 + X_2 + \frac{X_1 X_2}{X_3}$$

$$X_{13} = X_1 + X_3 + \frac{X_1 X_3}{X_2}$$

$$X_{23} = X_2 + X_3 + \frac{X_2 X_3}{X_1}$$

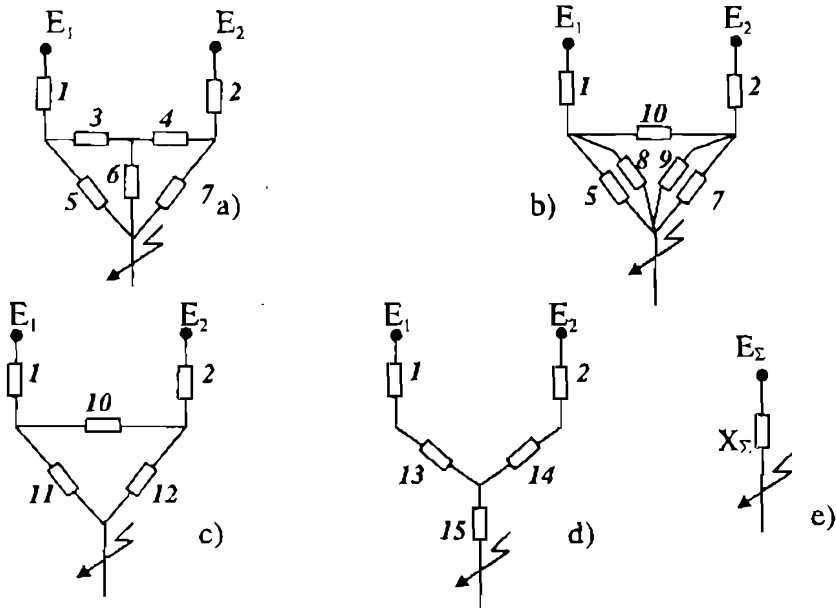
a- Biến đổi sơ đồ tam giác thành sao :

$$X_1 = \frac{X_{12} X_{13}}{X_{12} + X_{13} + X_{23}}$$

$$X_2 = \frac{X_{12} X_{23}}{X_{12} + X_{13} + X_{23}}$$

$$X_3 = \frac{X_{13} X_{23}}{X_{12} + X_{13} + X_{23}}$$

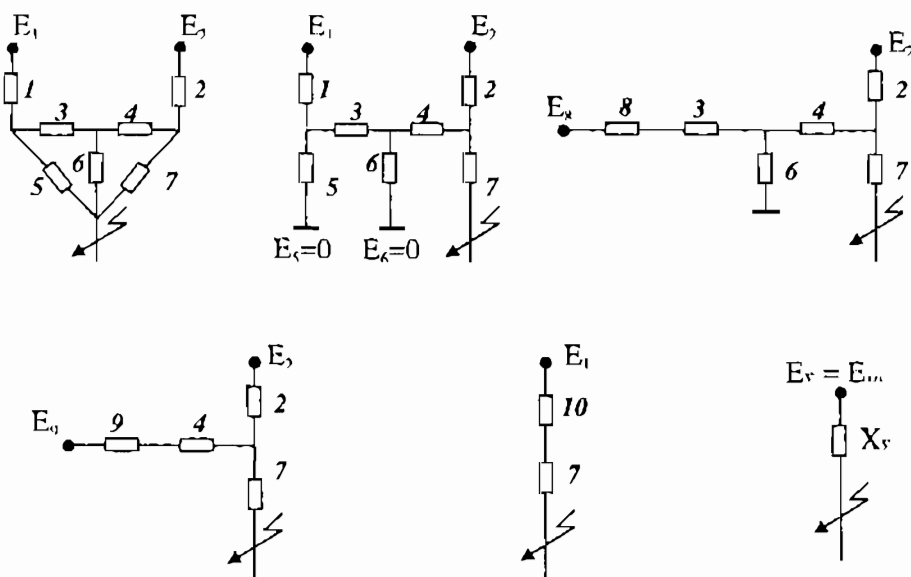
Ví dụ : Làm đơn giản sơ đồ trên hình 2.19,a về dạng một nguồn nối với điểm ngắn mạch qua điện kháng tổng hợp.



Hình 2.19

### c- Tách nhập các nhánh có nguồn

Với các nhánh song song có nguồn ta có thể nhập các sdd nguồn thành một sdd đẳng trị, ngược lại, một nguồn nằm tại đỉnh sơ đồ tam giác ta có thể tách sdd ra, tạo thành các nhánh có nguồn độc lập (bằng nhau) .

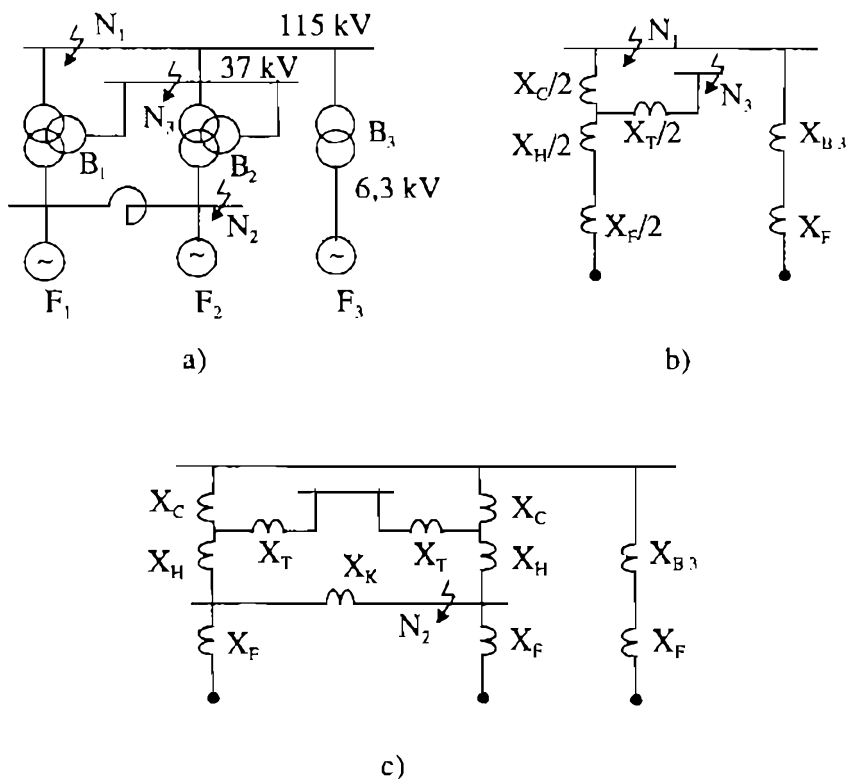


Hình 2.20

Phép tách nguồn như vậy đôi khi rất thuận lợi cho phép biến đổi. Hãy lấy lại sơ đồ hình 2.19,a làm ví dụ. Giả sử cần tìm dòng điện ngắn mạch trên các nhánh nối với điểm ngắn mạch. Mỗi dòng nhánh có thể nhận được khá đơn giản theo phép biến đổi trên hình 2.20.

### d) Gập đôi sơ đồ đối xứng

Nếu sơ đồ có tính chất đối xứng qua điểm ngắn mạch thì điện áp của các điểm đối xứng bằng nhau. Có thể chập chúng với nhau không làm thay đổi trạng thái của mạch. Cũng vậy, có thể bỏ đi các nhánh nối 2 nút có điện áp bằng nhau. Bằng cách ấy (giống như gập đôi sơ đồ) sơ đồ đơn giản đi đáng kể. Ví dụ sơ đồ hình 2.21,a khi ngắn mạch tại  $N_1$  và  $N_1$  sơ đồ đối xứng. " Gập đôi sơ đồ " qua điểm ngắn mạch ta có sơ đồ tương đương hình 2.21,b. Khi ngắn mạch tại  $N_2$  không có sự đối xứng nào, cần tính theo sơ đồ đầy đủ (hình 2.21,c).



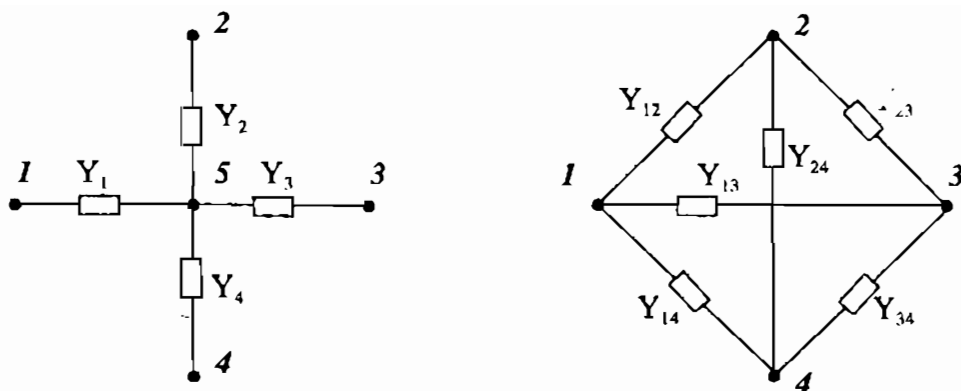
Hình 2.21

e) *Phép biến đổi sao - lưới.*

Phép biến đổi sơ đồ hình sao nhiều cánh thành sơ đồ lưới có ý nghĩa quan trọng đặc biệt:

- Nó bao trùm phép biến đổi sao-tam giác.
- Có thể biến đổi tương đương sơ đồ dạng chung (phức tạp bất kỳ) về dạng đơn giản nhất chỉ chứa các nút nguồn và điểm ngắn mạch. Nếu điện áp thanh cái các nguồn bằng nhau thì sơ đồ nhận được cuối cùng có dạng chỉ gồm một sdd nối với điểm ngắn mạch qua điện kháng. Nếu chỉ áp dụng phép biến đổi sao-tam giác thì không phải bao giờ cũng nhận được kết quả như mong muốn.
- Công thức biến đổi sao-lưới có dạng tổng quát nên rất thuận lợi thiết lập các chương trình máy tính biến đổi sơ đồ.

Hãy xét các biểu thức biến đổi sao-lưới sơ đồ trên hình 2.22.



$$Y_{12} = \frac{Y_1 Y_2}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4};$$

$$Y_{13} = \frac{Y_1 Y_3}{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4};$$

$$\dots$$

Hình 2.22

Có thể viết công thức chung cho trường hợp hình sao (n-1) cánh. Các nhánh nối nút đỉnh n với (n-1) nút còn lại. Phép biến đổi tạo ra sơ đồ lưới (n-1) nút. Nhánh nối nút i và k bất kỳ của sơ đồ lưới đẳng trị có tổng dẫn :

$$Y_{ik} = \frac{Y_i Y_k}{\sum_{j=1}^{n-1} Y_j};$$

Trị số  $Y_{nn} = \sum_{j=1}^{n-1} Y_j$  cũng chính là tổng dẫn riêng của nút n.

## Những điểm cần ghi nhớ trong chương hai

1. Khi tính toán ngắn mạch tần số hệ thống được giả thiết không thay đổi (vẫn xấp xỉ bằng tần số định mức) do đó sơ đồ thay thế tính toán của các phần tử hệ thống vẫn giống như trong CĐXL. Nguồn và phụ tải cần được biểu diễn riêng trên sơ đồ, phụ thuộc thời gian tính toán ngắn mạch.
2. Thông số của các phần tử trên sơ đồ tính toán có thể biểu thị trong hệ đơn vị có tên hoặc tương đối. Khi tính trong hệ đơn vị có tên cần tính đối thông số của mọi phần tử về cấp điện áp cơ sở (tùy chọn). Sau khi thực hiện tính toán cần đổi các kết quả về cấp điện áp ban đầu. Khi thực hiện trong hệ đơn vị tương đối việc quy đổi điện áp được thực hiện cho các lượng cơ bản: chọn tùy ý lượng cơ bản cho cấp cơ sở, sau đó chuyển đổi điện áp cơ bản các cấp về cấp cơ sở. Trị số tương đối khi đó đã ở cùng một cấp điện áp.
3. Khi tính gần đúng có thể coi hệ số biến áp bằng tỉ số giữa 2 điện áp làm việc trung bình của lưới. Khi đó nhiều công thức tính toán trở nên đơn giản hơn.
4. Có các phép biến đổi đẳng trị cho phép làm đơn giản sơ đồ khi thực hiện tính toán ngắn mạch.

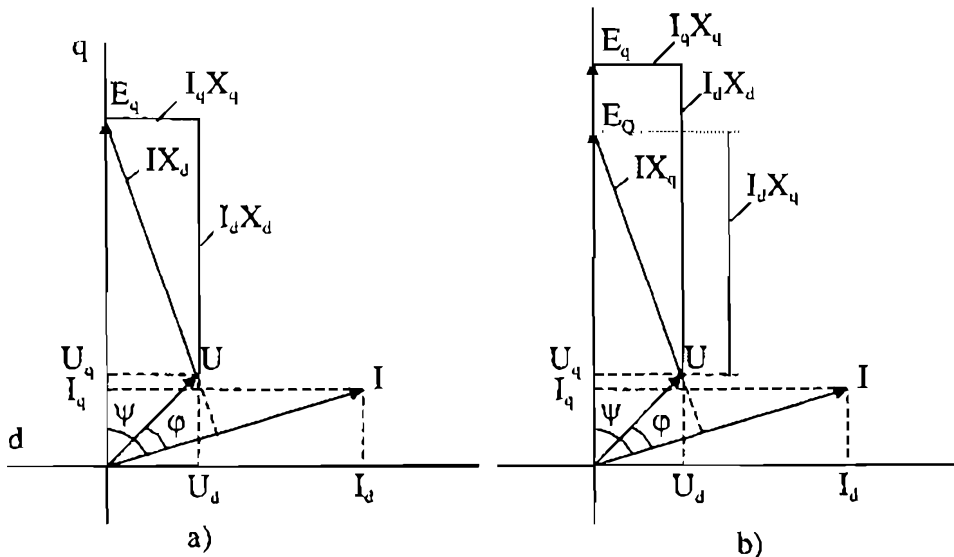
## Chương ba

# TÍNH TOÁN NGẮN MẠCH BA PHA DUY TRÌ

### 3.1 KHÁI NIỆM CHUNG

Tình trạng ngắn mạch 3 pha duy trì được định nghĩa là tình trạng ngắn mạch lâu dài, khi mà tất cả các thành phần tự do xuất hiện trong quá trình quá độ đã tắt đến gần giá trị 0. Như vậy tính toán dòng điện ngắn mạch duy trì thực chất là tính thành phần chu kỳ của dòng điện ngắn mạch ở giai đoạn cuối của quá trình quá độ.

Thường thì rất ít xảy ra tình trạng ngắn mạch duy trì, bởi khi có ngắn mạch các thiết bị tự động bảo vệ sẽ cắt phần lưới có điểm ngắn mạch ra. Tuy nhiên, vẫn cần tính ngắn mạch duy trì để đánh giá trạng thái ngắn mạch nặng nề nhất và xác định khả năng đảm bảo ổn định nhiệt của các trang thiết bị trong tình trạng sự cố bị kéo dài.



Hình 3.1 Đồ thị vec-tơ CĐXL máy phát  
điện cực ẩn (a) và cực lồi (b)

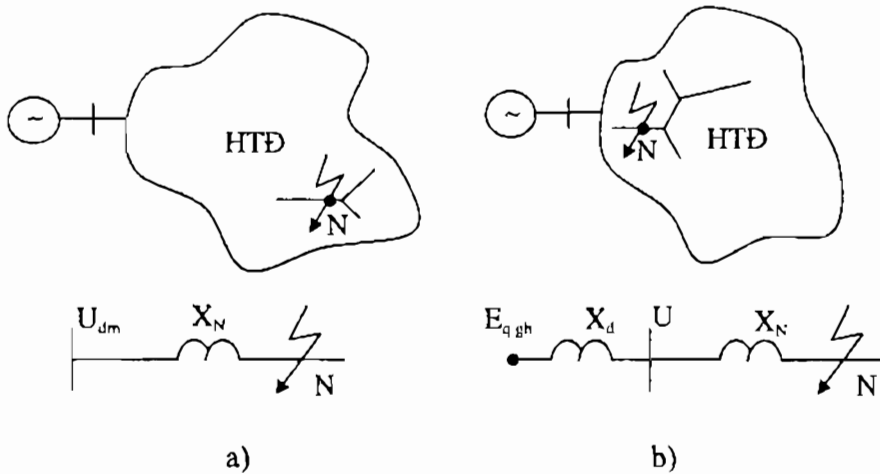
Quan hệ điện từ trong các máy phát điện đồng bộ khi ngắn mạch ba pha duy trì hoàn toàn giống như trong chế độ xác lập (CĐXL): dòng điện xoay chiều 3 pha đối xứng chạy trong các cuộn dây stato tạo nên từ trường không đổi, quay đồng bộ với từ trường của roto (cũng không đổi). Chính vì thế có thể sử dụng đồ thị vec-tơ như trong CĐXL để biểu diễn quan hệ giữa các đại lượng bên trong máy phát cho chế độ ngắn mạch duy trì (hình 3.1).

### 3.2 MÁY PHÁT ĐIỆN TRONG TRẠNG THÁI NGẮN MẠCH DUY TRÌ

Sự khác nhau cơ bản về trạng thái của máy phát điện ở chế độ ngắn mạch duy trì so với CĐXL chỉ là ở trị số dòng điện kích từ (đương nhiên, cả dòng điện ngắn mạch ở stato cũng lớn lên nhiều). Dưới tác động của TĐK dòng điện kích từ trong chế độ ngắn mạch duy trì, nói chung bị tăng lên đáng kể. Có 2 tình huống xảy ra cần phân biệt:

- Ngắn mạch ở xa, TĐK giữ được điện áp đầu cực máy phát ở trị số định mức.
- Ngắn mạch ở gần, TĐK tăng dòng điện kích từ đến trị số giới hạn, trong khi điện áp đầu cực máy phát vẫn thấp hơn giá trị định mức.

Giới hạn của 2 trường hợp trên là trạng thái điện áp đầu cực máy phát bằng trị số định mức khi dòng điện kích từ cũng vừa tăng đến trị số giới hạn (tối đa).



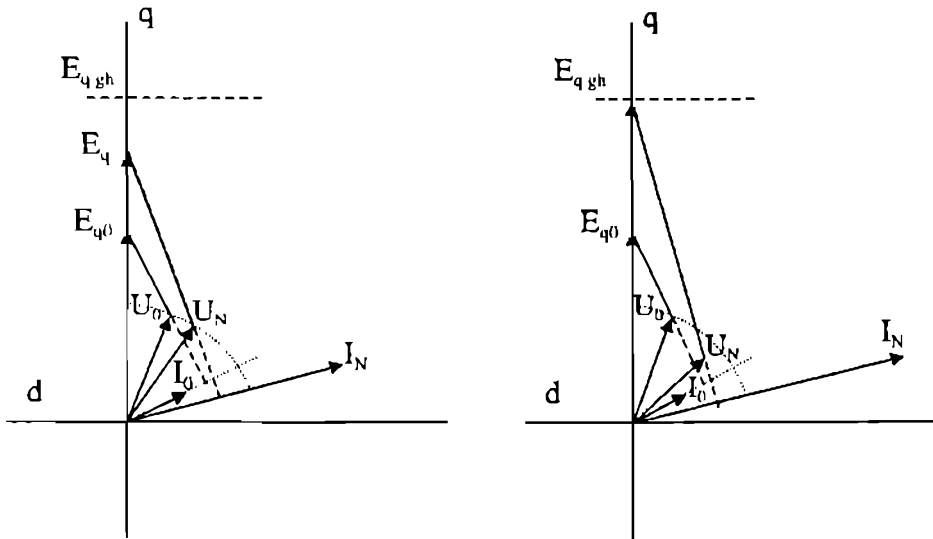
Hình 3.2 Ngắn mạch ở xa (a)  
và ở gần (b)

Khi tính toán ngắn mạch duy trì cần mô tả máy phát điện theo 1 trong 2 trạng thái nói trên. Dễ thấy rằng, ở trường hợp đầu có thể mô tả máy phát như 1 thanh cái điện áp không đổi  $U = U_{dm}$ . Không cần quan tâm đến điện kháng và sức điện động bên trong. Trạng thái sau cần mô tả máy phát bằng sdd  $E_{q_{gh}}$  nằm sau điện kháng đồng bộ  $X_N$ .

Đồ thị véc tơ mô tả quan hệ các đại lượng bên trong máy phát khi xảy ra ngắn mạch duy trì được thể hiện trên hình 3.3. Để so sánh giữa 2 trạng thái (ngắn mạch ở gần và ở xa) trên đồ thị có vẽ thêm các đại lượng véc tơ CĐXL trước sự cố (giống nhau trong hai trường hợp).

Ở CĐXL trước sự cố điện áp đầu cực máy phát được duy trì ở trị số  $U_0 = U_{dm}$ , dòng điện làm việc  $I_0$  lệch so với  $U_0$  một góc  $\varphi$ , và với  $E_q$  một góc  $\psi$  nào đó phụ thuộc tính chất phụ tải. Ở tình trạng ngắn mạch góc pha chậm sau của  $I_N$  lớn lên do mạng điện khi ngắn mạch thường có điện trở nhỏ ( $\psi_N \approx 90^\circ$ ). Khi ngắn mạch ở xa,

dòng điện ngắn mạch có trị số không lớn lắm, sụt áp trên  $X_d$  nhỏ, dòng điện kích từ có thể tăng lên đến trị số đủ lớn để sdd  $E_q$  đảm bảo được điện áp đầu cực  $U_N = U_{dm}$ . Lúc ngắn mạch gần, dòng điện ngắn mạch  $I_N$  rất lớn, TĐK tác động tăng dòng kích từ đến hết giới hạn, tương ứng với sdd  $E_{qgh}$  nhưng điện áp đầu cực vẫn ở trị số  $U_N < U_{dm}$ . Điện áp  $U_N$  còn giữ được phụ thuộc điện kháng mạch ngoài và các thông số  $E_{qgh}$ ,  $X_d$  của máy phát. Trị số  $E_{qgh}$  và  $X_d$  xác định bởi cấu tạo máy phát, có thể tìm thấy trong lý lịch máy.



Hình 3.3

Đôi khi thay cho điện kháng  $X_d$  người ta cho giá trị tỉ số ngắn mạch. Tỉ số ngắn mạch TN được định nghĩa là tỉ số giữa dòng điện ngắn mạch đầu cực máy phát khi giữ dòng điện kích từ định mức với trị số định mức của dòng điện kích từ:

$$TN = \frac{I_{I_r = I_{fdm}}}{I_{fdm}}$$

Đó cũng là hệ số góc của đặc tính ngắn mạch (xác định theo thí nghiệm ngắn mạch). Khi  $I_r = I_{fdm}$  thì sdd đồng bộ  $E_q = E_{qdm}$  (bằng điện áp đầu cực máy phát trong thí nghiệm không tải).

Xét trạng thái ngắn mạch đầu cực máy phát ta có:

$$E_q = I \cdot X_d$$

Điện kháng đồng bộ  $X_d$  có thể tính được :

$$X_d = \frac{E_q}{I}$$

Mặt khác, theo đặc tính không tải của máy phát ta có :

$$E_q = C I_r$$

Với  $C$  là một hệ số tỉ lệ. Theo đặc tính ngắn mạch ta cũng có:

$$I = TN \cdot I_f$$

Do đó :

$$X_d = \frac{E_q}{I} = \frac{C}{TN}$$

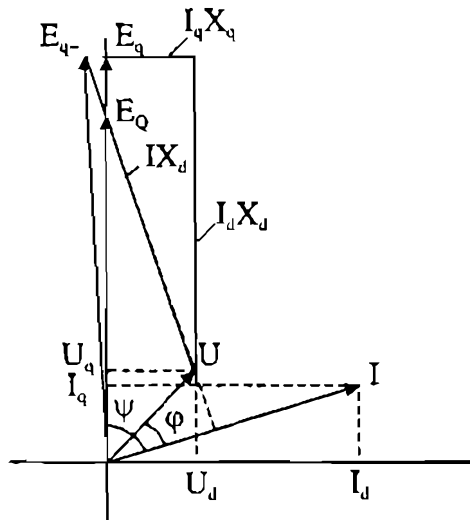
Khi xét đến đặc tính bão hoà,  $C$  bị thay đổi theo  $I_f$ . Tuy nhiên gần đúng có thể coi  $C$  không đổi (lấy trị số ứng với lúc  $I_{fdm}$  và  $E_{qdm}$  của thí nghiệm không tải). Trung bình có thể lấy (trong hệ đơn vị tương đối định mức) như sau:

Với máy phát điện tua bin hơi  $C \approx 1,2$ ;  $TN \approx 0,7$ ;  $X_d \approx 1,7$ .

Với máy phát điện tua bin nước  $C \approx 1,6$ ;  $TN \approx 1,1$ ;  $X_d \approx 1,45$ .

Tính theo các giá trị trên nói chung mắc sai số nhiều, cần sử dụng các số liệu trong lý lịch máy hay theo các sổ tay kỹ thuật.

Cần chú ý là đối với máy phát điện cực lỗi ta có  $X_d \neq X_q$ . Nhưng trong các tính toán ngắn mạch thường lấy  $X_q \approx X_d$ . Thực chất khi đó đã lấy xấp xỉ véc-tơ  $E_q$  thay cho  $E_q$  như trên hình 3.4. Sai số mắc phải không lớn khi góc pha giữa  $E_q$  và  $I$  gần với  $90^\circ$ , nghĩa là  $I_N \approx I_d$ .



Hình 3.4

### 3.3 TÍNH TOÁN DÒNG ĐIỆN NGẮN MẠCH DUY TRÌ KHI MÁY PHÁT KHÔNG CÓ TĐK.

Khi không có TĐK sdd của máy phát ở trước và sau thời điểm ngắn mạch không thay đổi (bởi  $E_q$  tỉ lệ với  $I_f$ ). Khi đó sdd của máy phát ở chế độ ngắn mạch duy trì và CĐXL trước sự cố có trị số hoàn toàn bằng nhau. Có thể tính được sdd máy phát thông qua các thông số CĐXL trước sự cố. Từ đồ thị véc-tơ ta có:

$$E_q = \sqrt{(U_0 \cos \varphi)^2 + (U_0 \sin \varphi + I_0 X_d)^2} .$$

Trong đó  $U_0$ ,  $I_0$ ,  $\cos \varphi$  là trị số điện áp, dòng điện và hệ số công suất máy phát ở CĐXL trước sự cố. Với máy phát điện cực lõi kết quả tính toán theo công thức trên có mắc sai số nhỏ (do coi  $X_q = X_d$ ).

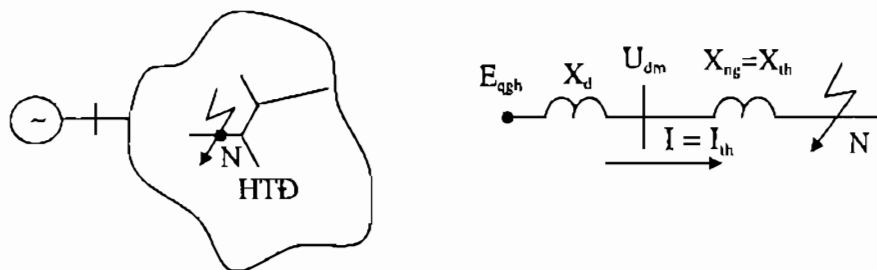
Sau khi mô tả các máy phát điện bằng sdd và điện kháng  $X_d$  như trên (giả thiết đều không có TĐK) ta có thể tính được dòng điện ngắn mạch dựa vào biến đổi đẳng trị sơ đồ. Nếu sơ đồ hệ thống biến đổi về được dạng đơn giản nhất gồm sdd  $E_\Sigma$  và  $Z_\Sigma$ , ta có :

$$I_N = \frac{E_\Sigma}{Z_\Sigma} = \frac{E_\Sigma}{\sqrt{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2}} .$$

Như vậy thực chất tính toán ngắn mạch duy trì chỉ là giải mạch điện tuyến tính thông thường, tương ứng với sơ đồ HTĐ lúc có sự cố .

### 3.4 TÍNH DÒNG ĐIỆN NGẮN MẠCH DUY TRÌ XÉT ĐẾN ẢNH HƯỞNG CỦA TĐK

Như đã phân tích ở trên, khi có TĐK máy phát điện trong tình trạng ngắn mạch duy trì có thể ở 1 trong 2 trạng thái : làm việc với điện áp định mức hoặc với dòng điện kích từ giới hạn. Để phân biệt giữa 2 trạng thái cần xác định trạng thái tới hạn. Hãy xét trường hợp đơn giản khi sơ đồ hệ thống chỉ có một máy phát điện. Điện kháng đẳng trị phân lưới từ đầu cực máy phát đến điểm ngắn mạch là  $X_{ng}$ . Điện kháng đồng bộ máy phát là  $X_d$  .



Hình 3.5 Trạng thái tới hạn

Giả thiết lúc đầu điểm ngắn mạch ở xa,  $X_{ng}$  lớn, máy phát làm việc ở trạng thái định mức. Giảm dần  $X_{ng}$  (điểm ngắn mạch gần hơn) dòng điện ngắn mạch tăng, độ sụt áp trên  $X_d$  bên trong máy phát cũng tăng. Để giữ điện áp đầu cực, TĐK tác động tăng dòng điện kích từ (tương ứng với nâng cao trị số  $E_q$ ). Lúc đầu với  $E_q < E_{qgh}$  (chưa hết giới hạn kích từ) điện áp đầu cực máy phát đã bằng định mức. Đến một lúc, khi  $X_{ng} = X_{th}$  nào đó, để giữ được điện áp định mức cần tăng sdd đến trị số

giới hạn  $E_q = E_{qgh}$ . Đó chính là trạng thái tới hạn của điện kháng ngoài: nếu giảm nữa  $X_{ng}$  (điểm ngắn mạch trở thành gần) điện áp đầu cực máy phát sẽ thấp hơn định mức.

Từ sơ đồ trạng thái giới hạn, xét toàn hệ thống ta có :

$$I = \frac{E_{qgh}}{X_d + X_{th}}$$

Cũng lúc, nếu xét phần mạch phía hệ thống thì:

$$I = \frac{U_{dm}}{X_{th}}$$

Ta có :

$$I = \frac{E_{qgh}}{X_d + X_{th}} = \frac{U_{dm}}{X_{th}} = I_{th}$$

suy ra :

$$X_{th} = \frac{X_d \cdot U_{dm}}{E_{qgh} - U_{dm}}$$

Trong hệ đơn vị tương đối (định mức) ta có :

$$X_{th} = \frac{X_d}{E_{qgh} - 1}$$

Ngoài ra cũng xác định được trị số dòng ngắn mạch ở trạng thái tới hạn:

$$I_{th} = \frac{U_{dm}}{X_{th}} \quad \text{hay} \quad I_{*th} = \frac{1}{X_{th}}$$

Như vậy, sau khi tính toán, căn cứ vào  $X_{th}$  và  $X_{ng}$  có thể kết luận về chế độ của máy phát điện khi có ngắn mạch duy trì như bảng sau :

**Bảng 3-1**

| Trạng thái kích từ giới hạn<br>(ngắn mạch gần) | Trạng thái điện áp định mức<br>(ngắn mạch ở xa) |
|------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| $X_{ng} < X_{th}$                              | $X_{ng} > X_{th}$                               |
| $E_q = E_{qgh}$                                | $E_q < E_{qgh}$                                 |
| $U < U_{dm}$                                   | $U = U_{dm}$                                    |
| $I = \frac{E_{qgh}}{X_d + X_{ng}} > I_{gh}$    | $I = \frac{U_{dm}}{X_{ng}} < I_{gh}$            |

Sau khi xác định được trạng thái của máy phát điện, để tính dòng điện ngắn mạch ta chỉ việc sử dụng các sơ đồ mô tả tương ứng.

Chẳng hạn nếu biết điểm ngắn mạch ở xa, cần mô tả máy phát bằng thanh cái điện áp không đổi, ta tính :

$$I_N = \frac{U_{dm}}{X_{ng}}$$

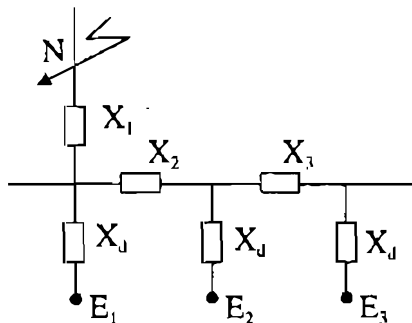
Khi biết máy phát điện ở trạng thái kích từ giới hạn cần mô tả theo sơ đồ gồm sdd  $E_{q_{gh}}$  sau điện kháng  $X_d$ , ta tính :

$$I_N = \frac{E_{q_{gh}}}{X_d + X_{ng}}$$

Với hệ thống điện phức tạp (nhiều máy phát), về nguyên tắc nếu biết được trạng thái của mỗi máy phát ta thay chúng bằng sơ đồ tương ứng như trên. Việc tính toán dòng điện ngắn mạch sau đó, cũng như khi không xét TĐK, thực chất là giải mạch điện tuyến tính xác lập.

Tuy nhiên đối với hệ thống điện nhiều máy ta không có cách xác định được  $X_{th}$  như vừa nêu, bởi không có khái niệm chính xác về  $X_{ng}$ . Cách thực hiện duy nhất là áp dụng phép tính lặp và dựa vào phán đoán chủ quan. Có thể mô tả các bước thực hiện như sau.

Trước tiên căn cứ vào sơ đồ và điểm ngắn mạch, phán đoán và giả thiết trạng thái của các máy phát điện. Những máy phát xa điểm ngắn mạch (ước lượng theo điện kháng) cần giả thiết làm việc ở trạng thái định mức. Những máy phát gần điểm ngắn mạch - trạng thái kích từ giới hạn. Khi không khẳng định được thì có thể áp đặt tùy ý (máy phát ở trạng thái kích từ giới hạn hay trạng thái định mức). Sau đó mô tả máy phát theo các sơ đồ tương ứng và thực hiện tính toán dòng điện ngắn mạch. Lần đầu có thể chưa hoàn toàn đúng (khi còn có những máy phát bị giả thiết áp đặt trạng thái sai), do đó cần phải kiểm tra. Dòng điện ngắn mạch trong các máy phát và điện áp đầu cực của chúng thường được dùng làm thông số kiểm tra. Nếu các tiêu chuẩn phù hợp theo bảng (3.1) thì trạng thái máy phát đã giả thiết đúng. Khi không phù hợp cần phải giả thiết ngược lại. Việc tính toán ngắn mạch lần thứ 2 thường cho ngay kết quả phù hợp, rất ít khi phải tính lặp nhiều lần. đương nhiên, khi giả thiết lần đầu cần phải phân tích phán đoán tương đối chính xác trạng thái của mỗi máy phát. Hãy xét ví dụ với sơ đồ trên hình 3.6.



Hình 3.6

Trước hết ta phân tích trạng thái của máy phát  $F_1$ . Giả sử nhận thấy  $X_1 < X_{th}$ , trong đó :

$$X_{th1} = \frac{X_{d1}}{E_{qgh1} - 1}$$

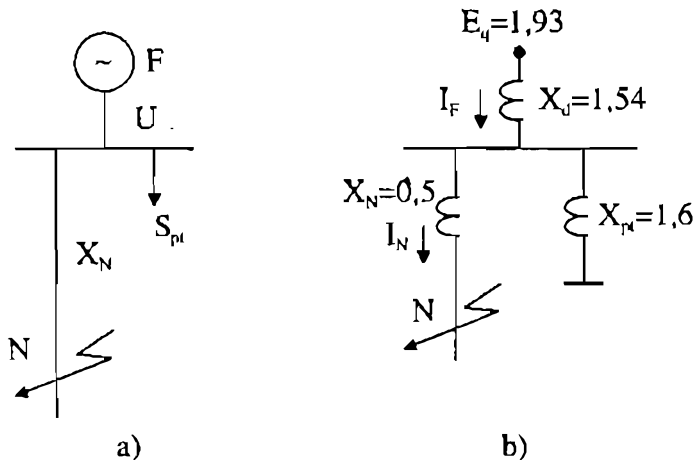
Khi đó chắc chắn  $F_1$  làm việc ở chế độ kích từ giới hạn. Lý do là  $F_1$  ở gần điểm ngắn mạch hơn so với  $F_2$  và  $F_3$ . Sự có mặt của  $F_2$  và  $F_3$  không có tác dụng nâng cao thêm điện áp đầu cực  $F_1$  khi nó gần tới  $U_{dm}$  (đó là vì  $U_2$  và  $U_3$  chỉ có thể nhận giá trị cao nhất bằng  $U_{dm}$ , trong khi luôn tồn tại sụt áp trên kháng điện  $X_2$  và  $X_3$ ).

Trong trường hợp ngược lại, thì chỉ khi  $X_1 \gg X_{th1}$  mới có khả năng  $F_1$  làm việc ở điện áp định mức và khi đó cả  $F_2$  và  $F_3$  cũng có điện áp đầu cực bằng định mức. Để xét máy phát  $F_2$  ta có thể so sánh tổng  $(X_1 + X_2)$  với  $X_{th2}$  (coi như bỏ qua  $F_1$  và  $F_3$ ). Nếu  $(X_1 + X_2)$  gần bằng hoặc lớn hơn  $X_{th2}$  thì có thể kết luận chắc chắn  $F_2$  làm việc ở trạng thái định mức. Đó là vì có thêm  $F_1$  điện áp của  $F_2$  được nâng lên cao hơn (do  $F_1$  ở gần điểm ngắn mạch). Nếu tổng nhỏ hơn nhiều so với  $X_{th2}$  thì  $F_2$  làm việc ở trạng thái kích từ giới hạn. Riêng máy phát  $F_3$  có thể giả thiết ngay làm việc ở chế độ điện áp định mức vì ở khá xa điểm ngắn mạch.

**Ví dụ 3.1.** Cho sơ đồ HTĐ như hình 3.7,a. Máy phát cực ẩn,  $X_d = 1,54$ . Giả thiết ngắn mạch xảy ra vào lúc phụ tải bằng 75% công suất máy phát, điện áp đầu cực máy phát  $U = U_{dm}$ ,  $\cos \varphi = 0,8$ . Ngắn mạch xảy ra tại điểm N trên đường dây xuất phát từ đầu cực máy phát, với điện kháng  $X_N = 0,5$  (trong hệ đơn vị tương đối định mức của máy phát). Trước khi ngắn mạch đường dây làm việc không tải. Không xét ảnh hưởng của TĐK tính dòng điện ngắn mạch tại điểm N và chạy trong máy phát.

*Giải :* Trước hết cần xác định sơ đồ thay thế của máy phát. Do máy phát không có TĐK nên sdd của nó không đổi bằng bằng trị số sdd trước khi xảy ra ngắn mạch. Tính tất cả trong hệ đơn vị tương đối định mức của máy phát, ta có :

$$\begin{aligned} E_q &= \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi + I X_d)^2} \\ &= \sqrt{(1.0.8)^2 + (1.0.6 + 0.75.1.54)^2} = 1.93 \end{aligned}$$



Hình 3.7

Để đơn giản ta dùng mô hình phụ tải thuần kháng. Biết rằng, khi tính trong hệ đơn vị tương đối định mức của tải có thể  $X_{pt} = 1,2$ . Trường hợp này, trước khi ngắn mạch tải chỉ bằng 75% công suất máy phát nên cần phải tính đổi (về lượng định mức của máy phát):

$$X_{pt} = 1,2 \cdot \frac{1}{0,75} = 1,6 ;$$

Ta có sơ đồ thay thế hệ thống như trên hình 3.7,b.

Điện kháng đẳng trị tổng hợp tính đến điểm ngắn mạch N :

$$\begin{aligned} X_{\Sigma} &= (X_d // X_{pt}) + X_N \\ &= (1,54 // 1,6) + 0,5 \\ &= 0,79 + 0,5 = 1,29 . \end{aligned}$$

Sức điện động đẳng trị :

$$\begin{aligned} E_{\Sigma} &= \frac{E_q \cdot X_{pt} + 0 \cdot X_d}{X_{pt} + X_d} \\ &= \frac{1,93 \cdot 1,6 + 0}{1,54 + 1,6} = 0,98 . \end{aligned}$$

Dòng điện ngắn mạch tổng tại điểm ngắn mạch :

$$I_N = \frac{E_{\Sigma}}{X_{\Sigma}} = \frac{0,98}{1,29} = 0,76 .$$

Điện áp đầu cực máy phát :

$$U = I_N \cdot X_N = 0,76 \cdot 0,5 = 0,38 .$$

Dòng điện chạy trong máy phát :

$$I_F = \frac{E_q - U}{X_d} = \frac{1,93 - 0,38}{1,54} = 1,01 .$$

Như vậy dòng điện ngắn mạch duy trì chạy trong máy phát, trong trường hợp này chỉ cao hơn dòng điện định mức một chút. Tuy nhiên đầu cực của máy phát (cũng là điện áp cung cấp cho phụ tải) bị giảm xuống quá thấp (chỉ bằng 38 %  $U_{dm}$ ). Muốn duy trì được điện áp cao hơn phải có biện pháp để  $X_N$  lớn lên, chẳng hạn đặt kháng điện vào đầu đường dây. Ta hãy tính  $X_N$  để  $U = 0,7 U_{dm}$  (điện áp tối thiểu cần duy trì cho phụ tải).

$$\begin{aligned} I_N &= I_F - I_{pt} \\ &= \frac{E_q - U}{X_d} - \frac{U}{X_{pt}} \\ &= \frac{1,93 - 0,7}{1,54} - \frac{0,7}{1,6} = 0,38 . \end{aligned}$$

Tương ứng ta có :  $X_N = \frac{U}{I_N} = \frac{0,7}{0,38} = 1,84$

**Ví dụ 3.2** Vẫn xét sơ đồ như trong ví dụ 3.1 nhưng giả thiết máy phát có TĐK với điện áp kích từ giới hạn cho trước  $E_{qgh} = 3,8$ . Vì chỉ có 1 máy phát, ta có thể tìm được điện kháng tới hạn :

$$X_{th} = \frac{X_d}{E_{qgh} - 1} = \frac{1,54}{3,8 - 1} = 0,55 .$$

Bình thường để nhận biết được máy phát ở trạng thái nào cần tính điện kháng ngoài  $X_{ng}$  mới có thể so sánh. Tuy nhiên, trường hợp này có thể nhận xét ngay  $X_{ng} < X_{th}$  bởi vì  $X_{ng} < X_N = 0,5 < X_{th}$ . Như vậy, máy phát ở trạng thái kích từ giới hạn : cần sử dụng sơ đồ thay thế gồm  $E_{qgh}$  nối với  $X_d$ .

Tương tự với cách tính trong ví dụ 3.1, ta có:

$$E_{\Sigma} = \frac{3,8 \cdot 1,6}{1,54 + 1,6} = 1,94$$

$$X_{\Sigma} = 1,29 \quad (\text{nghư ví dụ trên})$$

$$I_N = \frac{E_{\Sigma}}{X_{\Sigma}} = \frac{1,94}{1,29} = 1,5$$

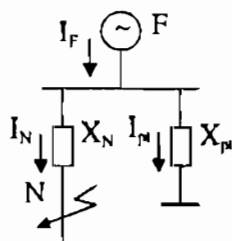
$$U_F = I_N \cdot X_N = 1,5 \cdot 0,5 = 0,75 .$$

$$I_F = \frac{E_{qgh} - U_F}{X_d} = \frac{3,8 - 0,75}{1,54} = 1,98 .$$

Như vậy khi có TĐK điện áp đầu cực máy phát sẽ duy trì được trị số đến 75 %  $U_{dm}$ . Tuy nhiên dòng điện ngắn mạch trong máy phát tăng lên nhiều so với khi không có TĐK.

### 3.5 ẢNH HƯỞNG CỦA PHỤ TẢI ĐẾN DÒNG ĐIỆN NGẮN MẠCH DUY TRÌ

Trong tình trạng ngắn mạch duy trì phụ tải có ảnh hưởng đáng kể đến trị số của dòng điện ngắn mạch. Một mặt, phụ tải càng lớn thì ở chế độ trước khi xảy ra sự cố dòng điện kích từ của máy phát càng phải cao để giữ điện áp, các sdd sẽ có trị số lớn làm tăng dòng điện ngắn mạch. Mặt khác, phụ tải có ảnh hưởng đến phân bố của dòng điện ngắn mạch: các nhánh phụ tải song song với điện kháng ngắn mạch, do đó nó làm tăng dòng điện ngắn mạch trong nguồn và làm giảm dòng điện ngắn mạch tổng tại nơi xảy ra ngắn mạch. Có thể thấy rõ điều này qua sơ đồ đẳng trị đơn giản hình 3.8.



$$I_F = I_N + I_P$$

$$X_{ng} = X_N // X_P$$

Hình 3.8

Ngoài ra cũng nhận thấy rằng ảnh hưởng của phụ tải nhiều hay ít còn phụ thuộc vào vị trí ngắn mạch. Ngắn mạch càng xa nguồn thì ảnh hưởng của phụ tải càng lớn, còn ngắn mạch càng gần nguồn thì ảnh hưởng của phụ tải càng ít. Khi ngắn mạch ở gần ngay đầu cực máy phát thì phụ tải hầu như không còn liên quan gì, vì điện áp cung cấp cho nó giảm xuống đến 0. Do ảnh hưởng đáng kể của phụ tải, khi tính toán ngắn mạch duy trì, nối chung không bỏ qua được sơ đồ phụ tải. Đôi khi để đơn giản cho tính toán (nhất là lúc thực hiện bằng tay) người ta thay thế gần đúng phụ tải bằng tổng trở thuần kháng.

Hãy xét trường hợp phụ tải biểu diễn trong hệ đơn vị tương đối định mức của nó. Nếu tải có trị số định mức, ta có :

$$Z_{pt} = \cos \varphi + j \sin \varphi$$

(chú ý: khi  $S \neq S_{dm}$  ta có :  $Z_{pt} = \frac{S_{dm}}{S} (\cos \varphi + j \sin \varphi)$  ) ;

Nếu thay  $Z_{pt}$  bằng tổng trở thuần kháng  $X_{pt}$  cần đảm bảo điều kiện tương đương về sdd và điện áp đầu cực máy phát làm việc trước khi xảy ra sự cố. Giả thiết với tải định mức,  $\cos \varphi = 0,8$ ,  $\sin \varphi = 0,6$  khi làm việc bình thường điện áp đầu cực máy phát bằng định mức. Khi thay tải bằng  $j X_{pt}$  ta có:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{dm} &= \dot{E}_q - j \dot{I} X_d \\ \dot{U}_{dm} &= j \dot{I} X_{pt} \end{aligned} \quad (*)$$

$$\text{suy ra } X_{pt} = X_d \frac{U_{dm}}{E_q - U_{dm}}$$

Mặt khác trong cùng điều kiện, khi phụ tải được thay thế đầy đủ theo tổng trở phức, thì :

$$\begin{aligned} \dot{U}_{dm} &= \dot{E}_q - j \dot{I} X_d \\ \dot{U}_{dm} &= \dot{I} Z_{pt} \end{aligned}$$

Suy ra :

$$\begin{aligned} \dot{E}_q &= \dot{I} Z_{pt} + j \dot{I} X_d \\ &= \dot{I} (Z_{pt} + j X_d) \end{aligned} \quad (**)$$

Sử dụng (\*) và (\*\*) để xác định trị số  $X_{pt}$  tương đương. Trong tính toán lấy phụ tải định mức là  $Z_{pt} = \cos \varphi + j \sin \varphi = 0,8 + j 0,6$  và cho  $X_d$  giá trị của các máy phát thông dụng. Thay  $Z_{pt}$  và  $X_d$  vào (\*\*) để xác định  $E_q$ , sau đó thay  $E_q$  vào (\*) xác định  $X_{pt}$  tương đương. Cụ thể :

- máy phát tua bin hơi :  $TN = 0,7$  ;  $X_d = 1,43$  ta có  $E_q \approx 2,8$  ;
- máy phát tua bin nước:  $TN = 1,1$  ;  $X_d = 0,91$  ta có  $E_q \approx 1,8$  .

Thay  $E_q$  và  $E_q$  vào (\*) ta luôn nhận được  $X_{pt} \approx 1,2$ .

Đó cũng chính là lý do để lấy gần đúng trị số phụ tải khi thay thế bằng tổng trở thuần kháng (đã nhắc đến trong chương 2). Cần chú ý là khi  $S_{pt} \neq S_{pt\,dm}$ , nếu chọn  $S_{cb}$  tùy ý còn  $U_{cb} = U_{th}$  ta có :

$$X_{pt(cb)} = 1,2 \frac{S_{cb}}{S_{pt}} ;$$

Trong đơn vị cố tên ta có :

$$X_{pt}(\Omega) = 1,2 \frac{U_{dm}^2}{S_{pt}} ;$$

**Ví dụ 3.3** Cũng các số liệu và sơ đồ như trong ví dụ 3.2 nhưng cho  $X_N = 1,0$ . Hãy tính dòng điện ngắn mạch duy trì tại điểm ngắn mạch N.

Qua các ví dụ trước ta biết rõ trường hợp này máy phát phải làm việc ở chế độ điện áp định mức. Tuy nhiên, ta thực hiện bài toán như khi làm ví dụ riêng biệt. Trước hết cần xác định điện kháng tới hạn và điện kháng ngoài :

$$X_{th} = \frac{X_d}{E_{qgh} - 1} = 0,55$$

$$X_{ng} = \frac{X_{pt} X_N}{X_{pt} + X_N} = \frac{1,6 \cdot 1,0}{1,6 + 1,0} = 0,615$$

Vì  $X_{ng} > X_{th}$  nên máy phát có điện áp đầu cực định mức.

Dòng điện ngắn mạch tại điểm N :

$$I_N = \frac{U_{dm}}{X_N} = \frac{1}{1,0} = 1,0 .$$

Dòng điện ngắn mạch chạy trong máy phát :

$$I_F = \frac{U_{dm}}{X_{ng}} = \frac{1}{0,615} = 1,63 .$$

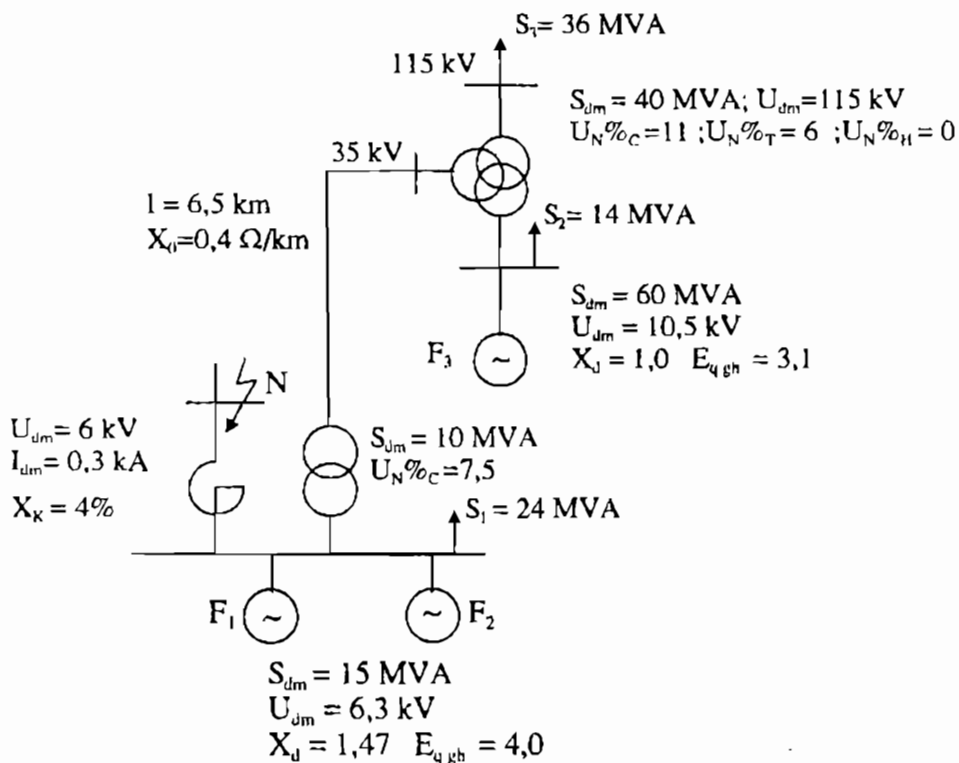
Ta hãy tính sdd của máy phát trong trường hợp này, mặc dù biết chắc chắn phải có  $E_q < E_{qgh} = 3,8$ . Theo công thức chung (đúng cho cả CĐXL và chế độ ngắn mạch duy trì) ta có :

$$E_q = \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi + I X_d)^2} .$$

Ở đây, trong chế độ ngắn mạch chấp nhận bỏ qua điện trở nên thực chất là đã coi gần đúng  $\cos \varphi \approx 0$ ,  $\sin \varphi \approx 1$ . Do đó :

$$\begin{aligned} E_q &= U \sin \varphi + I X_d \\ &= 0,75 + 1,63 \cdot 1,54 = 3,26. \end{aligned}$$

**Ví dụ 3.4** Sơ đồ hệ thống điện như hình 3.6 . Các thông số phần tử ghi trên sơ đồ .  
 Tính dòng điện ngắn mạch duy trì tại điểm N (sau kháng điện).



**Hình 3.6**

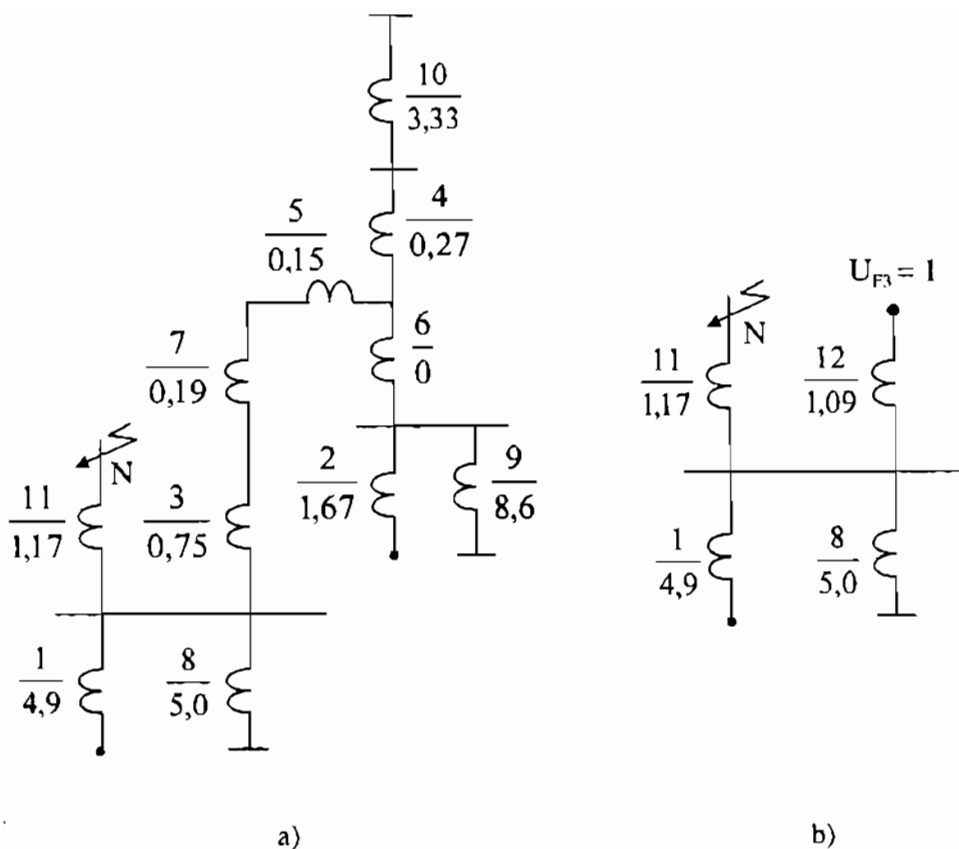
**Giải .** Chọn  $S_{ch} = 100 \text{ MVA}$  ,  $U_{ch} = U_{lb}$  .

Ta có các sdd giới hạn  $E_{q_{gh1}} = 4$  ;  $E_{q_{gh2}} = 3,1$

Điện kháng máy phát :

$$X_1 = X_{F1} / 2 = X_d \cdot \frac{S_{ch}}{2 \cdot S_{dm}} = 1,47 \cdot \frac{100}{15 \cdot 2} = 4,9$$

$$X_2 = X_{F3} = X_d \cdot \frac{S_{ch}}{S_{dm}} = 1,0 \cdot \frac{100}{60} = 1,67$$



Hình 3.7

Điện kháng máy biến áp :

$$X_3 = X_{B1} = \frac{7,5}{100} \cdot \frac{100}{10} = 0,75$$

$$X_4 = X_c = \frac{11}{100} \cdot \frac{100}{40,5} = 0,27$$

$$X_5 = X_T = \frac{6}{100} \cdot \frac{100}{40,5} = 0,15$$

$$X_6 = X_H = 0$$

Điện kháng đường dây 35 kV :

$$X_7 = X_D = 0,4.6,5. \frac{100}{37^2} = 0,19$$

Điện kháng các phụ tải :

$$X_8 = X_{11} = 1,2. \frac{S_{cb}}{S_1} = 1,2. \frac{100}{24} = 5,0$$

$$X_9 = X_{12} = 1,2. \frac{S_{cb}}{S_2} = 1,2. \frac{100}{14} = 8,6$$

$$X_{10} = X_{13} = 1,2. \frac{S_{cb}}{S_3} = 1,2. \frac{100}{36} = 3,33$$

Kháng điện :

$$X_{11} = X_K = \frac{X_K \%}{100} \cdot \frac{I_{cb}}{I_{dm}} \cdot \frac{U_{dm}}{U_{tb}} = \frac{4}{100} \cdot \frac{9,2}{0,3} \cdot \frac{6}{6,3} = 1,17$$

Trước hết để xác định trạng thái của các máy phát ta tính các điện kháng giới hạn của chúng :

$$X_{th1} = \frac{X_d}{E_{qgh} - 1} = \frac{4,9}{4 - 1} = 1,63$$

$$X_{th2} = \frac{X_d}{E_{qgh} - 1} = \frac{1,67}{3,1 - 1} = 0,8$$

Ở đây có một chú ý nhỏ khi so sánh  $X_{th}$  và  $X_{ng}$ . Chúng phải cùng được tính trong một hệ đơn vị tương đối. Tuy nhiên, thường vẫn chọn  $U_{cb}=U_{th}=U_{dm}$  (như trong ví dụ này) nên các sdd giới hạn và điện áp định mức máy phát trong công thức tính toán  $X_{th}$  vẫn có trị số ban đầu (trị số tương đối định mức). Ngoài ra, khi có các máy phát đẳng trị của nhiều máy phát song song, lúc tính toán phải lấy theo thông số của máy phát đẳng trị.

Các dòng điện tới hạn cũng xác định được :

$$I_{th} = \frac{U_{dm}}{X_{th}}$$

$$I_{th1} = \frac{1}{1,63} = 0,62$$

$$I_{th2} = \frac{1}{0,8} = 1,25$$

Các máy phát  $F_1$  và  $F_2$  (tương đương bằng  $E_i$  và  $X_i$ ) làm việc ở chế độ kích từ giới hạn bởi có tương quan :  $X_{11} < X_{th1}$ . Các tính toán đã bỏ qua phần hệ thống. Tuy nhiên nếu có xét thêm vào cũng không có khả năng nâng điện áp đầu cực  $F_1$  và  $F_2$  lên đến định mức, đó là vì hệ thống nằm xa điểm ngắn mạch.

Đối với máy phát điện  $F_3$  ta cũng có thể tính gần đúng  $X_{ng}$ , bằng cách bỏ qua  $F_1$  và  $F_2$ . Khi đó :

$$X_{ng} = [(X_{11} // X_8) + X_3 + X_7 + X_5] // (X_4 + X_{10}) // X_9 \\ = [(1,17 // 5) + 1,09] // 2,54 = 1,13 .$$

Điện kháng này lớn hơn  $X_{th2} = 0,8$ , do đó máy phát  $F_3$  làm việc ở trạng thái điện áp đầu cực định mức. Khi xét thêm máy phát  $F_1$  và  $F_2$  vào, chế độ điện áp còn được cải thiện hơn bởi  $F_1$  và  $F_2$  ở gần điểm ngắn mạch hơn.

Cũng có thể nhận xét theo dòng  $I_{th}$ . Chẳng hạn giả thiết  $F_1$  và  $F_2$  làm việc ở chế độ điện áp định mức. Khi đó dòng điện ngắn mạch chạy trong nó sẽ phải là :

$$I_F = \frac{1}{X_{11}} + \frac{1}{X_8} .$$

Nhánh  $(X_3 + X_7 + X_5)$  nối 2 điện áp cân bằng không có dòng điện chạy qua. Như thế :

$$I_F = \frac{1}{1,17} + \frac{1}{5} = 1,05 > I_{th1} = 0,62$$

Mâu thuẫn này dẫn đến phải coi  $F_1$  và  $F_2$  làm việc ở trạng thái kích từ giới hạn. Sau khi biết trạng thái của máy phát ta chính xác hoá lại sơ đồ và xác định dòng điện ngắn mạch. Máy phát  $F_1$  và  $F_2$  vẫn giữ nguyên: tương đương bằng nhánh  $(E_1, X_1)$  với  $E_1 = E_{q_{gh1}} = 4,0$ .

Máy phát  $F_3$  làm việc với điện áp đầu cực định mức nên được mô tả bằng thanh cái với  $U = 1$ . Ngoài ra, điện kháng  $X_6 = 0$  nên điểm M cũng có điện áp  $U = U_{F3} = 1$ . Khi đó để tính dòng điện ngắn mạch ta có thể sử dụng sơ đồ hình 3.7,b. Phần sơ đồ ở phía xa hơn điểm M (tính đến điểm ngắn mạch) không cần xét đến. Ta có :

$$X_{12} = X_1 + X_5 + X_7 = 0,75 + 0,15 + 0,17 = 1,09 .$$

Cuối cùng ta tính sdd đẳng trị của toàn sơ đồ đối với điểm ngắn mạch :

$$E_{\Sigma} = \frac{1 \times \frac{1}{1,09} + 4,0 \times \frac{1}{4,9} + 0}{\frac{1}{1,09} + \frac{1}{4,9} + \frac{1}{5}} = 1,31 .$$

Điện kháng đẳng trị tổng hợp :

$$X_{\Sigma} = 1,17 + \frac{1}{\frac{1}{1,09} + \frac{1}{4,9} + \frac{1}{5}} = 1,93 .$$

Dòng điện ngắn mạch tại điểm ngắn mạch :

$$I_N = \frac{E_{\Sigma}}{X_{\Sigma}} = \frac{1,31}{1,93} = 0,68 .$$

Trong hệ đơn vị cổ tên :

$$I_N = 0,68 \cdot 9,2 = 6,25 \text{ KA} .$$

Điện áp đầu cực của máy phát  $F_1$  và  $F_2$  :

$$U = I_N \cdot X_{11} = 0,68 \cdot 1,17 = 0,8 .$$

Dòng điện chạy trong mỗi máy phát  $F_1$  và  $F_2$  :

$$I_f = \frac{1}{2} \frac{4 - 0,8}{4,9} = 0,33$$

$$\text{hay } I_f = 0,33 \times 9,2 \approx 3 \text{ KA}$$

### Những điểm cần ghi nhớ trong chương ba

1. Tính toán ngắn mạch duy trì thực chất là tính dòng điện ở cuối quá trình quá độ sau khi xảy ra ngắn mạch, khi mà mọi thành phần tự do đã tắt dần hết (xấp xỉ 0). Ở chế độ này dòng điện ngắn mạch rất phụ thuộc vào trạng thái kích từ của máy phát.
2. Có hai trạng thái : máy phát có điện áp đầu cực bằng định mức (khi đó dòng điện kích từ nhỏ hơn trị số giới hạn) và trạng thái kích từ ở giới hạn điều chỉnh. Trong trường hợp sau sdd máy phát nằm ở giới hạn, với trị số  $E_{q_{gh}}$  đã biết.
3. Cần phân biệt được trạng thái của máy phát để mô hình nó khi tính ngắn mạch duy trì: nếu máy phát làm việc với  $U_{dm}$  chỉ cần mô tả máy phát bằng một thanh cái điện áp không đổi (không cần xét đến các thông số bên trong). Nếu máy phát ở trạng thái kích từ giới hạn cần mô tả bằng sdd  $E_{q_{gh}}$  nối với điện kháng  $X_d$ .
4. Trong trường hợp sơ đồ đơn giản, dựa vào tương quan điện kháng mạch ngoài với  $X_d$  để phân biệt trạng thái máy phát trong chế độ ngắn mạch duy trì. Với sơ đồ phức tạp cần giả thiết gần đúng trạng thái máy phát và thực hiện tính lặp để xác định dòng điện ngắn mạch duy trì.
5. Phụ tải có ảnh hưởng đáng kể đến trạng thái ngắn mạch duy trì. Khi tính toán có thể thay thế phụ tải bằng tổng trở hoặc điện kháng cố định.

## *Chương 4*

# **QUÁ TRÌNH QUÁ ĐỘ ĐIỆN TỪ VÀ CÁC THÔNG SỐ CỦA MÁY PHÁT ĐIỆN KHI NGẮN MẠCH BA PHA**

### **4.1. VẤN ĐỀ TÍNH TOÁN DÒNG ĐIỆN NGẮN MẠCH QUÁ ĐỘ**

Như đã phân tích trong chương 1, từ sau thời điểm xảy ra ngắn mạch quá trình quá độ (QTQĐ) điện từ diễn ra trong các máy điện khá phức tạp. Ngoài thành phần tự do xuất hiện trên stato, trong cuộn dây roto cũng có thành phần tự do, sinh ra bởi tác dụng hỗ cảm của từ trường phản ứng. Kết quả là biên độ thành phần chu kỳ (cường bức) của dòng điện ngắn mạch bị biến thiên theo thời gian.

Việc xác định được biên độ (hay trị số hiệu dụng) thành phần chu kỳ của dòng điện ngắn mạch có ý nghĩa quan trọng hơn trong các ứng dụng thực tế so với tính toán trị số tức thời. Các lý do chủ yếu là :

- Từ trị số biên độ của thành phần chu kỳ dòng điện ngắn mạch có thể đánh giá hầu hết các ảnh hưởng của dòng điện ngắn mạch (tác dụng nhiệt, tác dụng lực cơ khí lớn nhất, ...) đến các thiết bị điện và dây dẫn, tính toán độ nhảy của bảo vệ rơle...
- Thành phần chu kỳ tương đối xác định trong các trường hợp tính toán còn trị số tức thời mang đặc trưng ngẫu nhiên, bất định chỉ có thể xác định cho các trường hợp điển hình (xem chương 1).
- Tính toán trị số tức thời của dòng điện ngắn mạch rất phức tạp, thực chất là phân tích quá trình quá độ điện từ trong mạng điện 3 pha có một số lượng lớn các phần tử. Việc giải bài toán gặp nhiều rất khó khăn, vì các thông số máy phát biến thiên theo góc quay của roto đang chuyển động.

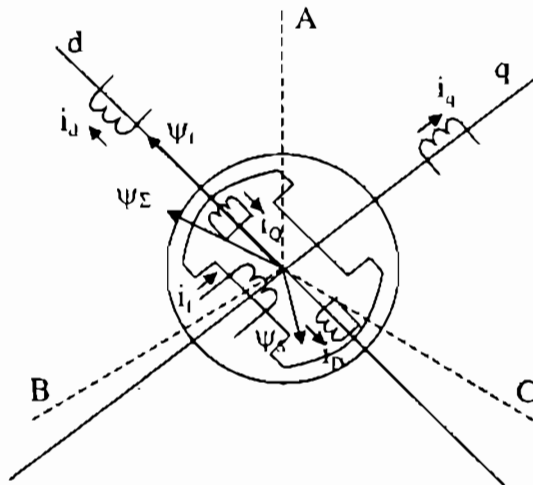
Trong khi đó, để tính biên độ của thành phần dòng điện ngắn mạch chu kỳ có thể áp dụng các phương pháp đơn giản hơn. Tuy nhiên cơ sở của các phương pháp này thực chất vẫn phải xuất phát từ việc phân tích quá trình quá độ điện từ. Thật vậy, mấu chốt của việc tính toán dòng điện ngắn mạch chu kỳ là mô phỏng sdd và điện kháng các máy phát. Trừ ngắn mạch duy trì có thể định nghĩa và xác định sdd máy phát tương tự như trong CĐXL, trong thời gian quá độ các thông số này thể hiện khá phức tạp và cần được định nghĩa tính toán theo cách khác. Mục đích chủ yếu của chương này là trên cơ sở phân tích QTQĐ điện từ đưa ra cách tính toán mô phỏng đơn giản các thông số sdd, điện kháng, hằng số thời gian... của máy phát nhằm ứng dụng trong các tính toán thành phần chu kỳ của dòng điện ngắn mạch.

Cần nói thêm là việc mô hình hoá QTQĐ điện từ còn là một đối tượng nghiên cứu và ứng dụng trong nhiều bài toán khác nhau của HTĐ: phân tích quá điện áp đóng cắt, các hiện tượng cộng hưởng điện từ, phân tích điện áp phục hồi và sự tổn tại hồ quang trên tiếp điểm các máy cắt ... Nội dung chi tiết này vượt ra khỏi phạm vi của môn học (một phần được giới thiệu thêm trong phụ lục 2).



Các cuộn dây pha đặt trên stato lệch so với nhau  $120^\circ$  có các dòng điện pha  $i_A, i_B, i_C$  chạy qua tạo nên các từ thông riêng, khi tổng hợp lại được từ thông tổng phản ứng  $\psi_{s\Sigma}$ . Ở chế độ xác lập  $i_A, i_B, i_C$  có biên độ bằng nhau không đổi, lệch pha  $120^\circ$ , do đó véc tơ từ thông tổng  $\psi_{s\Sigma}$  có trị số không đổi, có hướng quay đều cùng tốc độ chuyển động của ro to. Khi đó từ thông của ro to chỉ do dòng kích từ  $i_f$  sinh ra cũng có trị số không đổi  $\psi_{f\Sigma}$ . Các cuộn cảm trong CDXL có dòng bằng 0 nên không tham gia vào từ thông tổng. Véc tơ từ thông  $\psi_{f\Sigma}$  quay cùng tốc độ ro to (theo phương trục dọc) do đó đứng yên so với  $\psi_{s\Sigma}$ . Từ thông tổng hợp trong máy sẽ là  $\psi_\Sigma = \psi_{s\Sigma} + \psi_{f\Sigma}$ . Trong chế độ quá độ, ngoài các thành phần từ thông chính nói trên còn có từ thông của các cuộn cảm, do ảnh hưởng hồ cảm giữa các cuộn dây dòng điện và từ thông đều biến thiên phức tạp, như đã xét trong chương 1.

Để nghiên cứu quá trình quá độ và trị số tức thời của dòng điện ngắn mạch, theo mô hình toạ độ pha cần viết các phương trình vi phân mô tả quá trình quá độ điện từ cho mỗi cuộn dây (xem phụ lục 2). Mạch từ móc vòng giữa các cuộn dây luôn bị thay đổi trong quá trình ro to chuyển động (thay đổi cả hướng cuộn dây lẫn kết cấu mạch dẫn từ qua lõi thép) do đó hệ phương trình vi phân rất phức tạp. Giải trực tiếp hệ phương trình này rất khó khăn, chỉ có thể thực hiện được theo các phương pháp tích phân số (như trong phần mềm EMTP chẳng hạn).



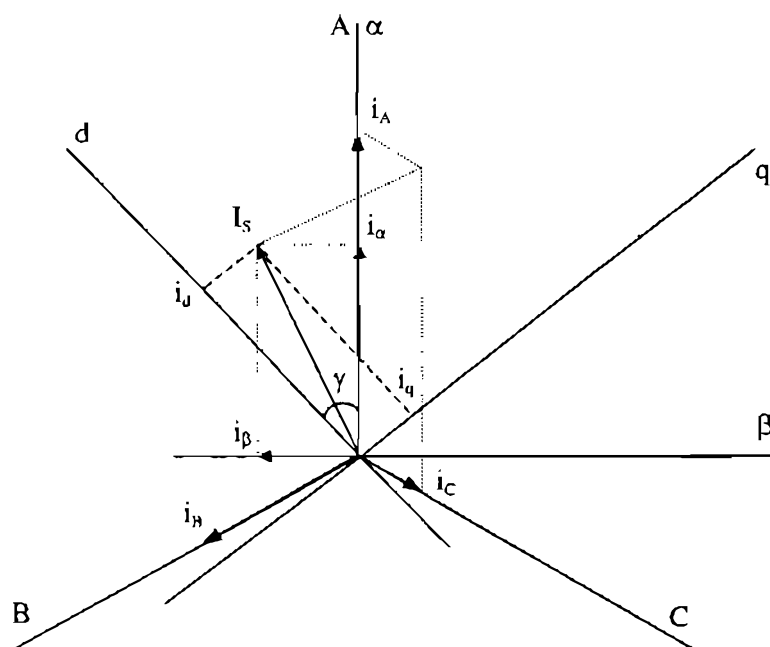
Hình 4.2

Để có thể nghiên cứu đơn giản và hiệu quả hơn QTQĐ người ta thường chuyển các phương trình sang hệ toạ độ quay vuông góc. Thực chất, đó là cách thực hiện đổi biến thông qua phép biến đổi tuyến tính hệ phương trình. Đơn giản hơn, người ta thường mô tả như phép biểu diễn tương đương máy phát điện đồng bộ 3 pha sang mô hình máy điện có 2 cuộn dây phản ứng vuông góc (Hình 4.2).

Chẳng hạn, dễ dàng chứng minh được rằng vẫn đảm bảo từ thông  $\psi_{\Sigma}$  trong máy nếu coi phần ứng chỉ có 2 cuộn dây vuông góc (nằm theo các trục  $\alpha$  và  $\beta$ ). Khi đó để có trị số tương đương, cần đảm bảo quan hệ (xem hình 4.3) :

$$i_{\alpha} = i_A - \frac{1}{2}i_B - \frac{1}{2}i_C$$

$$i_{\beta} = -\frac{\sqrt{3}}{2}i_B + \frac{\sqrt{3}}{2}i_C$$



Hình 4.3

Đáng chú ý hơn nữa, còn có thể coi  $\psi_{\Sigma}$  sinh ra bởi 2 dòng điện  $i_d$  và  $i_q$  vuông góc với nhau quay theo roto.  $i_d$  sinh ra từ thông theo phương trục dọc còn  $i_q$  sinh ra từ thông theo phương trục ngang của roto. Để đảm bảo sự tương đương về từ thông lúc roto quay cần có quan hệ (cần bằng các hình chiếu) :

$$i_d = i_{\alpha} \cos \gamma - i_{\beta} \sin \gamma$$

$$i_q = i_{\alpha} \sin \gamma + i_{\beta} \cos \gamma$$

Từ đó suy ra quan hệ giữa  $i_d$ ,  $i_q$  với các dòng điện pha :

$$i_d = i_A \cos \gamma + i_B \cos(\gamma - 120^\circ) + i_C \cos(\gamma + 120^\circ)$$

$$i_q = i_A \sin \gamma + i_B \sin(\gamma - 120^\circ) + i_C \sin(\gamma + 120^\circ)$$

Đó là các phép biến đổi tuyến tính các biến  $i_A, i_B, i_C$  thành  $i_d, i_q$  thông qua ma trận biến đổi phụ thuộc góc  $\gamma = \omega t + \gamma_0$ . Trong trường hợp này  $\omega$  không đổi nhưng phép biến đổi còn đúng cả khi  $\omega$  thay đổi. Khi đó hệ phương trình nhận được cho phép nghiên cứu cả quá trình quá độ kéo dài hơn, xét đến dao động góc lệch của roto của máy phát. Các nội dung này có thể tham khảo thêm trong phần phụ lục.

Cần chú ý rằng khi thực hiện biến đổi hệ phương trình bằng toán học người ta sử dụng phép biến đổi sai khác với phép biến đổi trên một hệ số là  $2/3$ .

$$i_d = \frac{2}{3} [i_A \cos \gamma + i_B \cos(\gamma - 120^\circ) + i_C \cos(\gamma + 120^\circ)]$$

$$i_q = \frac{2}{3} [i_A \sin \gamma + i_B \sin(\gamma - 120^\circ) + i_C \sin(\gamma + 120^\circ)]$$

Ngoài ra khi các dòng điện pha không cân bằng, nghĩa là có thành phần dòng điện  $i_A + i_B + i_C \neq 0$  chạy trong dây trung tính người ta còn đưa thêm vào hệ tọa độ vuông góc thành phần thứ tư không:

$$i_0 = 1/3(i_A + i_B + i_C).$$

Lúc đó ma trận biến đổi có dạng:

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

Có thể viết:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix}$$

Phép biến đổi ngược:

$$\begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} = [A]^{-1} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix}$$

hay ở dạng khai triển của phép biến đổi ngược:

$$i_A = i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma + i_0$$

$$i_B = i_d \cos(\gamma - 120^\circ) + i_q \sin(\gamma - 120^\circ) + i_0$$

$$i_C = i_d \cos(\gamma + 120^\circ) + i_q \sin(\gamma + 120^\circ) + i_0$$

Các biến đổi của điện áp  $U_d, U_q, U_0$  của từ thông  $\psi_d, \psi_q, \psi_0$ , và các sức điện động  $E_d, E_q, E_0$  cũng nhận được qua phép biến đổi tương tự.

Khi nghiên cứu quá trình quá độ điện từ thành phần thứ tự không thường được bỏ qua vì chúng có quan hệ độc lập với các thành phần khác.

Việc thay đổi tỉ lệ xích của phép biến đổi không gây ảnh hưởng gì đối với mô hình (tương tự như sử dụng hệ đơn vị tương đối) trong khi đó kết quả tính toán sử dụng thuận lợi hơn nhiều. Hãy xét ví dụ sau. Trong hệ tọa độ pha có các dòng điện :

$$i_A = I_m \cos(\omega t + \alpha_0) ;$$

$$i_B = I_m \cos(\omega t + \alpha_0 - 120^\circ) ;$$

$$i_C = I_m \cos(\omega t + \alpha_0 + 120^\circ) ;$$

Hãy tính các dòng điện  $i_d, i_q$  qua phép biến đổi. Trong trường hợp này  $i_0 = 0$ , còn :

$$i_d = \frac{2}{3} [I_m \cos(\omega t + \alpha_0) \cos \gamma + I_m \cos(\omega t + \alpha_0 - 120^\circ) \cos(\gamma - 120^\circ) + I_m \cos(\omega t + \alpha_0 + 120^\circ) \cos(\gamma + 120^\circ)]$$

$$i_q = \frac{2}{3} [I_m \cos(\omega t + \alpha_0) \sin \gamma + I_m \cos(\omega t + \alpha_0 - 120^\circ) \sin(\gamma - 120^\circ) + I_m \cos(\omega t + \alpha_0 + 120^\circ) \sin(\gamma + 120^\circ)]$$

Thay  $\gamma = \omega t + \gamma_0$  và thực hiện biến đổi ta có :

$$I_d = I_m \cos(\gamma_0 - \alpha_0) ;$$

$$I_q = I_m \sin(\gamma_0 - \alpha_0) ;$$

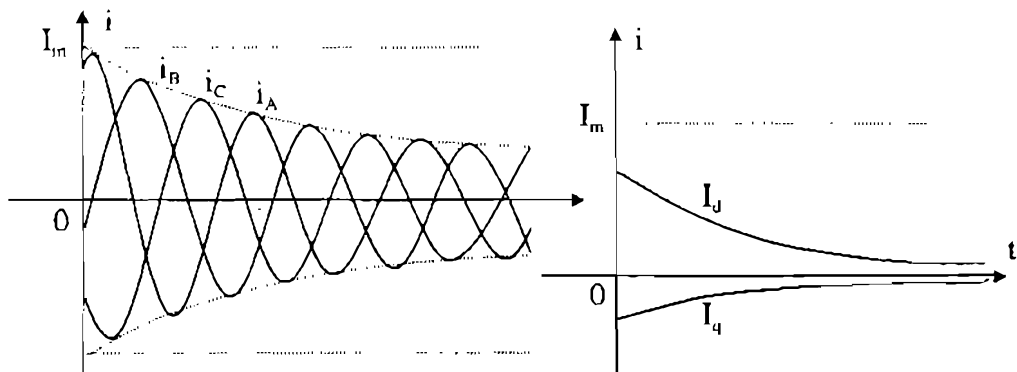
Nếu coi  $I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$  ta nhận được  $I = I_m$ .

Như vậy nếu xuất phát từ trị số biên độ (hay hiệu dụng) của các đại lượng pha, sau phép biến đổi và tính toán trong hệ tọa độ vuông góc ta nhận được các thành phần dọc trục và ngang trục với đại lượng tổng hợp trùng với biên độ (hay hiệu dụng) của đại lượng pha. Còn nếu giữ tỉ lệ xích ban đầu ta nhận được :

$$I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} = \frac{3}{2} I_m .$$

Như vậy, việc chọn lại tỉ lệ xích làm cho kết quả sử dụng được thuận lợi hơn. Đặc biệt do  $I_d$  và  $I_q$  là những thành phần vuông góc nên có thể coi một thành phần là trục thực, thành phần kia là trục ảo. Khi đó mô hình máy điện trong hệ toạ độ vuông góc đồng nhất với mô hình phức số. Đồ thị vectơ của máy phát trong CĐXL là một ví dụ (xem chương 3).

Ở đây, việc quy ước chọn trục mặc dù tùy ý vẫn cần có sự thống nhất. Trục dọc  $d$  được chọn gắn liền với phương dọc trục của roto, cùng chiều với từ thông của dòng kích từ. Trục ngang  $q$  vuông góc với trục dọc, chiều chậm sau trục dọc một góc là  $90^\circ$  (góc độ điện). Các thành phần của các đại lượng như sdd, từ thông, dòng điện ... được phân tích trên trục nào thì lấy tên trục ấy và dấu của chúng tùy thuộc hình chiếu vectơ tổng (cùng hay ngược chiều với trục). Theo quy ước này từ thông của cuộn kích từ  $\psi_d$  (dọc trục) sinh ra sdd  $E_q$  (chứ không phải  $E_d$ ) bởi sdd được sinh ra chậm pha sau từ thông một góc là  $90^\circ$ .



Hình 4.4

Ta cũng để ý rằng khi các dòng điện pha là chu kỳ với biên độ không đổi thì khi chuyển sang hệ toạ độ vuông góc sẽ nhận được các thành phần dòng điện một chiều (dọc trục và ngang trục) có trị số không đổi. Nếu dòng điện các pha vẫn là xoay chiều nhưng biên độ thay đổi thì trong hệ toạ độ vuông góc các thành phần  $i_d$  và  $i_q$  vẫn là một chiều nhưng trị số biến thiên. Chẳng hạn nếu :

$$i_A = I_m e^{-kt} \cos(\omega t + \alpha_0)$$

$$i_B = I_m e^{-kt} \cos(\omega t + \alpha_0 - 120^\circ)$$

$$i_C = I_m e^{-kt} \cos(\omega t + \alpha_0 + 120^\circ)$$

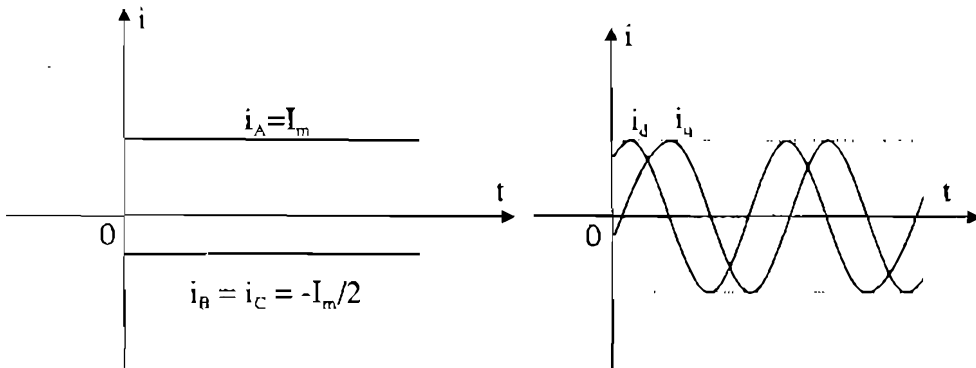
thì sau khi biến đổi :

$$I_d = I_m e^{-kt} \cos \alpha_0 ;$$

$$I_q = -I_m e^{-kt} \sin \alpha_0 .$$

đồ thị biểu diễn như trên hình 4.4 :

Ngược lại nếu cho vào các cuộn dây pha các thành phần dòng điện một chiều, biểu diễn trong hệ tọa độ quay vuông góc sẽ là thành phần xoay chiều dao động trong thời gian ( hình 4.5 ).



Hình 4.5

Các đặc điểm trên cũng có thể suy ra từ mô hình máy điện đồng bộ trong hệ tọa độ quay vuông góc.

#### 4.3 CÁC THÀNH PHẦN TỪ THÔNG TRONG MÁY PHÁT ĐIỆN PHÂN TÍCH THEO MÔ HÌNH TRONG HỆ TỌA ĐỘ VUÔNG GÓC

Mô hình máy phát điện trong hệ tọa độ quay vuông góc là sản phẩm của phép biến đổi tọa độ vì thế nó có thể sử dụng để xét quan hệ giữa các đại lượng trong hệ tọa độ quay vuông góc. Do trong hệ tọa độ vuông góc vị trí của các cuộn dây không bị thay đổi trong quá trình roto chuyển động, mạch từ theo các trục dọc và trục ngang cũng không thay đổi nên các trị số điện cảm và hồ cảm của các cuộn dây là hằng số. Các quan hệ viết ra sẽ đơn giản hơn nhiều so với hệ tọa độ pha (mặc dù đang vẫn xét trong QTQĐ).

Cần chú ý rằng khi phân tích từ thông trong mục này ta luôn sử dụng hệ đơn vị tương đối, do đó có thể viết các quan hệ theo các cách khác mà trong hệ đơn vị có tên không dùng được (xem chương 2). Ví dụ :

$$\begin{aligned} E &= \omega \psi \quad \text{hay} \quad E = \psi & (\text{vì } \omega_s = 1) \\ \psi &= LI \quad \text{hay} \quad \psi = XI & (\text{vì } X = \omega L = L) \\ E &= XI \dots & (\text{vì } E = \psi) \end{aligned}$$

Ta hãy viết quan hệ của tất cả các loại từ thông trong máy phát điện đồng bộ:

1. Từ thông có ích  $\psi_d$  : là từ thông do dòng điện kích từ  $i_f$  chạy trong cuộn dây roto sinh ra xuyên qua khe hở không khí và móc vòng được với các cuộn dây stato (có 2 cuộn dây vuông góc).

$$\psi_d = i_f X_{ad} ;$$

trong đó :  $X_{ad}$  - Điện kháng hồ cảm giữa stato và roto theo phương dọc trục.

2. Từ thông tản của cuộn kích từ :

$$\psi_{\sigma f} = I_f X_{\sigma f}$$

trong đó :  $X_{\sigma f}$  - điện kháng tản của cuộn dây kích từ.

3. Từ thông toàn phần do dòng điện kích từ sinh ra:

$$\psi_{f\Sigma} = \psi_f + \psi_{\sigma f} = I_f (X_{ad} + X_{\sigma f}) = I_f X_f$$

trong đó :  $X_f = (X_{ad} + X_{\sigma f})$  điện kháng toàn phần của cuộn dây kích từ.

4. Từ thông phản ứng phần ứng ( do các dòng điện trong cuộn dây phần ứng sinh ra ) :

Dọc trục :  $\psi_{ad} = I_d X_{ad}$  ;

Ngang trục :  $\psi_{aq} = I_q X_{aq}$  .

Trong đó :  $I_d$  và  $I_q$  chạy trong các cuộn dây vuông góc của mô hình, chính là thành phần dọc trục và ngang trục của dòng điện phần ứng ( stato ).

$X_{aq}$  - điện kháng hỗ cảm giữa cuộn dây stato và roto theo hướng ngang trục.

5. Từ thông tổng hợp móc vòng với cuộn kích thích (theo hướng dọc trục) :

$$\psi_{f\Sigma} = \psi_f + \psi_{ad} = I_f X_f + I_d X_{ad}$$

6. Các từ thông tản của stato :

Dọc trục :  $\psi_{\sigma d} = I_d X_{\sigma}$

Ngang trục :  $\psi_{\sigma q} = I_q X_{\sigma}$

Do tính đối xứng của stato nên theo các hướng điện kháng tản  $X_{\sigma}$  đều như nhau.

7. Khi máy phát có các cuộn cản (dọc trục và ngang trục) còn phải kể đến các từ thông sinh ra bởi các cuộn dây này:

- Cuộn cản dọc trục :  $\psi_{1d} = I_{1d} X_{ad}$  ( từ thông chính)

$$\psi_{\sigma 1d} = I_{1d} X_{\sigma 1d}$$
 ( từ thông tản)

- Cuộn cản ngang trục :  $\psi_{1q} = I_{1q} X_{aq}$  ( từ thông chính)

$$\psi_{\sigma 1q} = I_{1q} X_{\sigma 1q}$$
 ( từ thông tản)

Trong đó :  $I_{1d}$  và  $I_{1q}$  - là các dòng điện chạy trong cuộn cản dọc trục và ngang trục.

$X_{\sigma 1d}$  và  $X_{\sigma 1q}$  là các điện kháng tản của các cuộn cản dọc trục và ngang trục

Trong chế độ xác lập  $I_{ld}$  và  $I_{lq}$  bằng 0 nên không có các thành phần từ thông cuộn cản. Trong chế độ quá độ từ thông cuộn cản xuất hiện và có ảnh hưởng hồ cảm sang các cuộn dây khác.

Trong các biểu thức kể trên quy ước chiều các dòng điện như sau :

- Chiều dương của thành phần dòng điện phản ứng dọc trục  $I_d$  là chiều mà từ thông do nó sinh ra cùng chiều với từ thông của dòng điện kích từ (chiều của trục d).
- Chiều dương của thành phần dòng điện phản ứng ngang trục  $I_q$  là chiều mà từ thông của nó sinh ra chậm sau  $90^\circ$  so với từ thông dọc trục (chiều của trục q). Chiều dương dòng điện trong các cuộn cản cũng được lấy tương tự.

Người ta cũng áp dụng cả cách chọn chiều dương ngược lại cho từ thông và dòng điện phản ứng. Khi đó cần đổi dấu trong các biểu thức tính từ thông tổng hợp và điện áp rơi trên điện kháng (theo hướng trục dọc và trục ngang) do các thành phần dòng điện phản ứng sinh ra. Cách chọn này phù hợp với định luật cảm ứng điện từ, thuận tiện hơn khi xét chiều của từ thông, tuy nhiên lại phức tạp hơn khi quan tâm đến cả dấu của dòng điện và điện áp phản ứng.

#### 4.4 CÁC SỨC ĐIỆN ĐỘNG VÀ ĐIỆN KHÁNG CỦA MÁY PHÁT ĐIỆN ĐỒNG BỘ.

Các thành phần từ thông kể trên (mục 4-3) đều quay trong không gian với cùng tốc độ roto. Như vậy về nguyên tắc, khi móc vòng qua cuộn dây phần ứng chúng đều tạo ra một thành phần sức điện động. Mô tả máy phát điện theo sdd nào trên sơ đồ thay thế tính toán phụ thuộc vào khả năng xác định nó và sự tiện lợi sử dụng.

##### 1. Phân bố từ thông và sdd của máy phát trong chế độ xác lập.

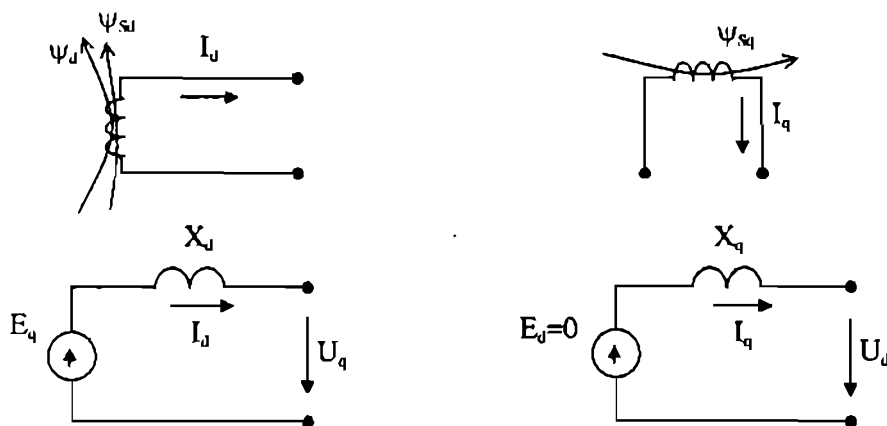
Ta xét trong chế độ xác lập, khi mà các cuộn cản không có dòng điện, từ thông tổng hợp móc vòng qua các cuộn dây phần ứng bao gồm :

$$\begin{aligned}
 \Psi_{sd} &= \Psi_d + \Psi_{ad} + \Psi_{\sigma d} \\
 &= I_f X_{ad} + I_d (X_{ad} + X_{\sigma}) \\
 &= I_f X_{ad} + I_d X_d = U_q \\
 \Psi_{sq} &= 0 + \Psi_{aq} + \Psi_{\sigma q} \\
 &= I_q (X_{aq} + X_{\sigma}) \\
 &= I_q X_q = -U_d
 \end{aligned}
 \tag{4-1}$$

Với các thành phần từ thông móc vòng kể trên thì hợp lý nhất là coi thành phần  $\Psi_d$  gây ra sức điện động cho máy phát. Đó là vì  $\Psi_d$  hoàn toàn xác định bởi dòng điện kích từ có nhiệm vụ tạo ra sdd. Các thành phần còn lại tỉ lệ với chính dòng điện phản ứng nên có thể coi là các điện áp rơi (sụt áp trên các điện kháng tản).

Khi bỏ qua điện trở của các cuộn dây thì có thể mô tả sơ đồ mạch cho phần ứng theo hướng dọc trục và ngang trục như hình vẽ 4.5. Ở đây cần chú ý là sức điện động do  $\Psi_d$  sinh ra biến thiên chậm pha so với  $\Psi_d$  một góc  $90^\circ$  do đó cần biểu diễn

bằng véc tơ quay có chiều trùng với trục q. Cũng chính vì vậy được ký hiệu là  $E_q$  (và được gọi là sdd đồng bộ ngang trục). Ở chế độ xác lập không có thành phần sdd dọc trục  $E_d$  hay nói khác đi  $E_d = 0$ . Ngoài ra, trong trường hợp chung  $X_d \neq X_q$  do đó sơ đồ mạch theo 2 trục không giống nhau. Chỉ với máy phát cực ẩn  $X_d \approx X_q$  có thể mô tả máy phát điện bằng sơ đồ mạch duy nhất.



Hình 4.5

Ta hãy xét các phương trình cân bằng điện áp theo các trục. Ứng với (4-1) ta có:

$$\begin{aligned} U_q &= E_q + I_d X_d \\ U_d &= -I_q X_q \end{aligned} \quad (4-2)$$

Ở đây, trong hệ đơn vị tương đối nên có thể viết:  $\psi_d = I_d X_{ad} = E_q$ .

Đặt các đại lượng tổng hợp dưới dạng số phức :

$$\begin{aligned} \dot{I} &= I_q + jI_d \\ \dot{U} &= U_q + jU_d \\ \dot{E} &= E_q \end{aligned}$$

Với máy phát cực ẩn  $X_q = X_d$ , ta có :

$$\dot{U} = \dot{E} - j\dot{I}X_q \quad (4-3)$$

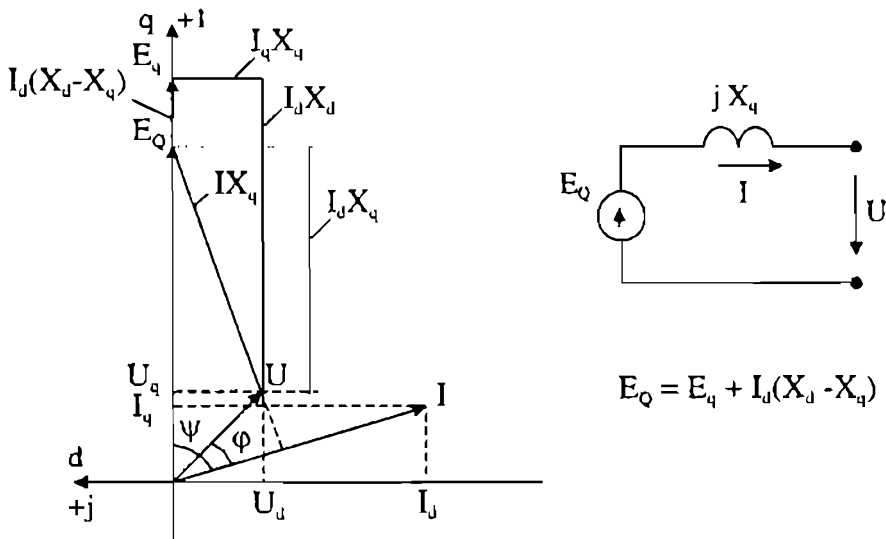
Biểu thức này tương đương với (4-1) và (4-2), thực chất thể hiện quan hệ giữa các đại lượng tổng hợp thuộc hệ tọa độ quay nhưng đồng thời lại cũng là quan hệ

biên độ (hoặc trị số hiệu dụng) của các đại lượng pha dạng phức. Chính đồ thị vectơ và sơ đồ mạch phức số biểu diễn CĐXL của máy phát điện (kể cả tính ngắn mạch duy trì) đều dựa trên cơ sở này.

Cũng cần nhắc lại rằng, với máy phát điện cực lõi không thể mô tả quan hệ giữa các đại lượng tổng hợp đơn giản như trên. Khi  $X_d \neq X_q$  thì (4-2) và (4-3) không tương đương. Để có thể mô tả được máy phát theo mô hình mạch và phức số người ta sử dụng một ký hiệu sdd  $E_Q = E_q + I_d(X_d - X_q)$  gọi là sdd giả tương. Khi đó ta cũng có:

$$\dot{U} = \dot{E}_Q - j\dot{I}X_q$$

Tuy nhiên quan hệ này chưa đủ bởi còn cần xác định  $E_Q$  theo  $E_q$  và  $I_d$ . Do  $I_d$  phụ thuộc chế độ hệ thống nên việc xác định khá phức tạp. Nói chung cần giải toàn bộ hệ phương trình trạng thái hệ thống với  $E_Q$  và  $I_d$  là ẩn số. Khó khăn này đã dẫn đến việc áp dụng những cách tính gần đúng, cũng như coi  $X_q = X_d$ . Sơ đồ mạch và đồ thị véc tơ của máy phát đồng bộ được thể hiện như hình 4.6 (trường hợp chung - máy phát điện cực lõi).



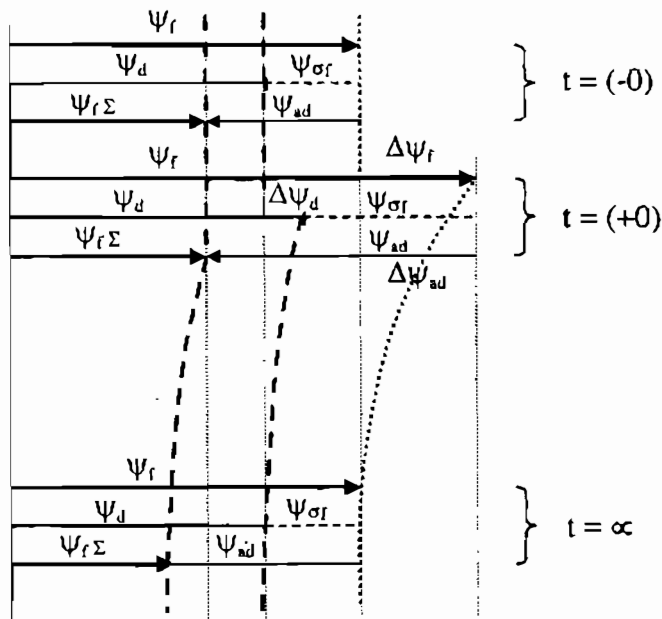
Hình 4.6

## 2- Phân bố từ thông và sdd máy phát trong thời gian quá độ (với máy phát điện không cuộn cảm).

Hình 4.7 biểu diễn một số thành phần từ thông cơ bản trong máy phát điện đồng bộ. Ở CĐXL từ thông toàn phần của dòng kích từ  $\psi_r$ , bao gồm thành phần từ thông có ích  $\psi_d$  và từ thông tản  $\psi_{\sigma r}$ , đều móc vòng qua cuộn dây kích thích. Ngoài ra nếu xét mọi thành phần từ thông móc vòng qua cuộn dây này (trong trường hợp không có cuộn cảm) thì còn phải kể đến từ thông phản ứng dọc trục  $\psi_{\omega}$ . Nói chung  $\psi_{\omega}$  ngược chiều với  $\psi_r$  (có tính chất khử từ khi tải mang tính cảm).  $\psi_d$  chính là thành phần từ thông sinh ra sdd đồng bộ  $E_q$  như đã phân tích trong phần trên. Tuy nhiên

từ sau thời điểm xảy ra ngắn mạch  $t = +0$ , từ thông có sự phân bố lại đột biến và thay đổi theo thời gian, trong đó có thành phần  $\psi_d$ . Do đó nếu vẫn biểu diễn máy phát bằng sdd  $E_q$  thì  $E_q$  (do  $\psi_d$  sinh ra) cũng thay đổi và đột biến, rất khó xác định.

Sự đột biến của từ thông trong cuộn kích từ có thể giải thích như sau. Theo tính chất của các cuộn dây điện cảm khép kín thì lượng từ thông tổng móc vòng qua các cuộn dây này không đột biến. Mạch cuộn dây roto (cuộn kích thích của máy phát) khép kín qua nguồn kích từ có điện trở nhỏ nên ở thời điểm ngắn mạch từ thông tổng móc vòng qua nó  $\psi_{r\Sigma}$  phải không đột biến. Trong khi đó, do xảy ra ngắn mạch dòng điện phản ứng máy phát tăng lên đột ngột. Từ thông phản ứng phản ứng  $\psi_{ad}$  chắc chắn phải tăng lên đột biến (một lượng là  $\Delta\psi_{ad}$ ). Từ thông  $\psi_{ad}$  ngược chiều với  $\psi_r$  trong cuộn dây kích thích, do đó để cho  $\psi_{r\Sigma}$  không đổi  $\psi_r$  cũng phải tăng lên một lượng tương ứng:  $\Delta\psi_r = \Delta\psi_{ad}$  (về trị tuyệt đối). Hiện tượng xảy ra làm dòng điện trong cuộn dây kích thích (vốn bằng  $I_{r0}$ ) đột ngột tăng lên một lượng  $\Delta I_r$  (thành phần tự do ban đầu). Từ thông tổng trong cuộn kích thích tăng lên kéo theo  $\psi_d$  và  $\psi_{\sigma r}$  đều tăng lên một cách tỉ lệ. Sự thay đổi nhảy vọt của từ thông hữu ích  $\psi_d$  (một lượng  $\Delta\psi_d$ ) làm cho  $E_q$  tăng nhảy vọt. Xác định  $E_q(+0)$  hết sức khó khăn bởi phải phân tích mạch của máy phát kích thích xét đến điện trở và điện cảm của toàn bộ mạch vòng. Diễn biến tiếp theo của  $\psi_d$  và  $E_q$  cũng rất phức tạp không thể xác định.



Hình 4.7

Cũng chính vì lý do trên, để phân tích quá trình quá độ điện từ và tính toán ngắn mạch người ta đưa ra khái niệm mới về sđđ của máy phát - sức điện động quá độ ký hiệu là  $E'_q$ , sinh ra bởi thành phần từ thông có ích của  $\psi_{f\Sigma}$ . Sức điện động này chỉ có ý nghĩa tính toán (không đo được trực tiếp) nhưng sử dụng rất thuận tiện vì không đột biến tại  $t = 0$ : có thể xác định theo thông số chế độ của máy phát trước khi xảy ra ngắn mạch (tại  $t = -0$ ).

Thành phần từ thông có ích đối với  $\psi_{f\Sigma}$  có thể xác định như sau:

$$\psi'_d = (1 - \sigma_f) \psi_{f\Sigma}.$$

trong đó:  $\sigma_f = \frac{X_{\sigma f}}{X_f}$  là hệ số tản của cuộn dây kích thích máy phát.

Hệ số  $\sigma_f$  là hằng số nên  $\psi'_d$  tỉ lệ với  $\psi_{f\Sigma}$ . Nói cách khác  $\psi'_d$  cũng là một lượng từ thông không đột biến. Như vậy trong hệ đơn vị tương đối có thể viết:

$$E'_q = \psi'_d = (1 - \sigma_f) \psi_{f\Sigma}$$

$E'_q$  không đột biến tại  $t = 0$ .

Vấn đề còn lại là xác định trị số của  $E'_q$  tại thời điểm  $t = 0$ . Do  $E'_q$  không đột biến ta xác định theo các thông số máy phát trước khi xảy ra ngắn mạch ( $t = -0$ ). Từ đây để thuận tiện (theo thói quen) ta lấy lại chiều dương của dòng điện phản ứng là chiều dòng điện gây ra phản ứng phản ứng ngược chiều với từ thông kích từ. Khi đó:  $\psi_{f\Sigma} = (\psi_f - \psi_{ad})$ . Ta có:

$$\begin{aligned} \psi'_d &= (1 - \sigma_f) \psi_{f\Sigma} = (1 - \sigma_f) (\psi_f - \psi_{ad}) \\ &= \left( 1 - \frac{X_{\sigma f}}{X_{ad} + X_{\sigma f}} \right) [I_f (X_{ad} + X_{\sigma f}) - I_d X_{ad}] \\ &= I_f X_{ad} - I_d \frac{X_{ad}^2}{X_{ad} + X_{\sigma f}} = E'_q \end{aligned}$$

Ở đây  $I_f$  và  $I_d$  đều tính tại thời điểm trước khi xảy ra ngắn mạch.

Mặt khác, để ý rằng ở CĐXL trước sự cố:

$$I_f X_{ad} = \psi_d = E_q = U_q + I_d X_d.$$

Do đó có thể viết:

$$E'_q = E_q - I_d \frac{X_{ad}^2}{X_{ad} + X_{\sigma f}} = U_q + I_d X_d - I_d \frac{X_{ad}^2}{X_{ad} + X_{\sigma f}}$$

Đặt:  $X'_d = X_d - \frac{X_{ad}^2}{X_{ad} + X_{\sigma f}}$  - gọi là điện kháng quá độ, ta có:

$$E'_q = U_q + I_d X'_d. \quad (4-4)$$

Đó chính là phương trình cân bằng điện áp theo phương ngang trục của máy phát tại  $t = 0$ , với khái niệm mới về sđd và điện kháng quá độ.

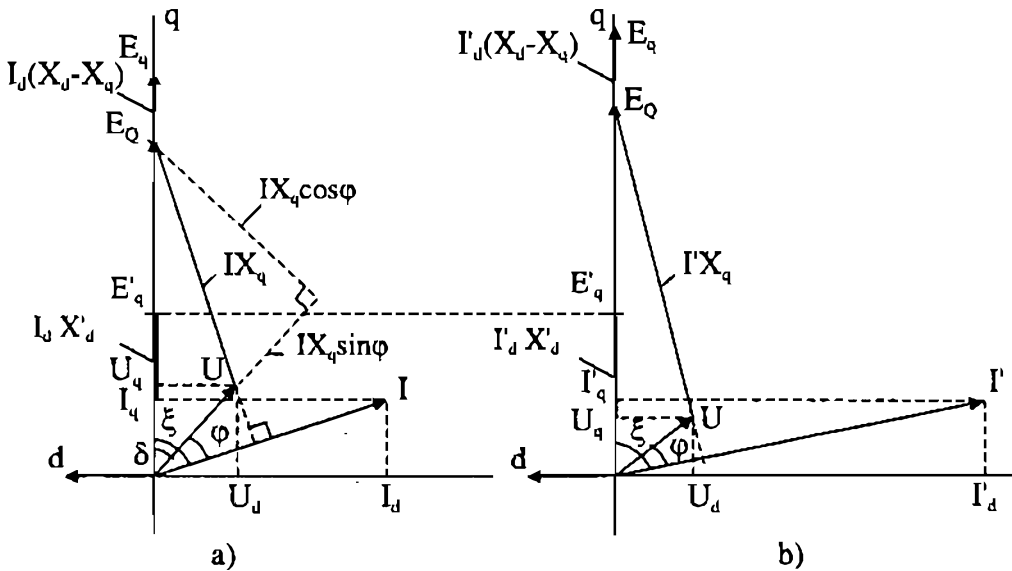
Chú ý là  $X_d = X_{\sigma} + X_{ad}$ , ta còn có biểu thức điện kháng quá độ dọc trục.:

$$X'_d = X_{\sigma} + \frac{1}{\frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_{ad}}} \quad (4-4,a)$$

Theo phương ngang trục không có từ thông kích từ, nên vẫn được coi là  $E'_d = E_d = 0$ . Điện áp rơi gây ra do phản ứng ngang trục (gây ra bởi  $I_q$ ) sẽ cân bằng với điện áp  $U_d$ :

$$E'_d = U_d - I_q X_q = 0 \quad (4-5)$$

Vì cả  $E'_q$  và  $E'_d$  đều không đột biến nên các phương trình (4-4) và (4-5) đều đúng với cả thời điểm sau khi xảy ra ngắn mạch. Nói khác đi có thể dựa vào (4-4) và (4-5) để xác định  $E'_q(+0)$  và  $E'_d(+0)$ . Đó là các số liệu cần thiết để mô tả máy phát điện ở thời điểm đầu sau khi xảy ra ngắn mạch.



Hình 4.8

Trên hình 4.8 thể hiện đồ thị véc tơ quan hệ giữa các đại lượng của máy phát (không cuộn cần) tại  $t = 0$  (trước và sau ngắn mạch). Đồ thị véc tơ vẽ cho trường hợp chung của máy phát điện cực lõi. Khi máy phát có cực ẩn thì  $X_d = X_q$  và  $E_Q = E_q$ .

Từ đồ thị véc tơ ta có thể suy ra cách tính  $E'_q$  cụ thể hơn, bởi trong (4-4) và (4-5) còn chứa các dòng điện và điện áp thành phần. Theo hình 4.8,a ta có :

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \xi &= \frac{IX_q + U \sin \varphi}{U \cos \varphi} \\ \operatorname{tg} \delta &= \frac{IX_q \cos \varphi}{U + IX_q \sin \varphi} \end{aligned} \quad (4-6)$$

Từ các biểu thức trên xác định được  $\xi$  và  $\sigma$ . Sau đó tính :

$$\begin{aligned} I_d &= I \sin \xi \\ U_d &= U \cos \delta \end{aligned}$$

Thay vào biểu thức (4-4) sẽ xác định được trị số của  $E'_q$ :

$$E'_q = U_d + I_d X'_d$$

Cách tính trên đúng cho trường hợp chung (cả máy phát điện cực lõi). Chú ý, trong các công thức (4-6) điện kháng tính toán luôn luôn phải là  $X_q$  (xem đồ thị véc tơ).

### 3. Phân bố từ thông và sdd của máy phát có cuộn cản.

Khi máy phát có thêm các cuộn cản thì sự biến thiên từ thông trong máy vẫn diễn ra tương tự như trường hợp không có cuộn cản. Tuy nhiên, khác nhau cơ bản là có sự tham gia của từ thông cuộn cản trong biểu thức bảo toàn từ thông tại thời điểm xảy ra ngắn mạch.

Ta có từ thông tổng móc vòng qua các cuộn dây như sau:

$$\text{Cuộn kích thích : } \psi_{f\Sigma} = \psi_f + \psi_{ld} + \psi_{\sigma ld} = \psi_d + \psi_{\sigma f} + \psi_{ld} - \psi_{\sigma ld} .$$

$$\text{Cuộn cản dọc trục : } \psi_{ld\Sigma} = \psi_{ld} + \psi_{\sigma ld} + \psi_{ld} - \psi_{\sigma ld} .$$

$$\text{Cuộn cản ngang trục : } \psi_{lq\Sigma} = \psi_{lq} + \psi_{\sigma lq} - \psi_{\sigma q} .$$

Trước hết xét từ thông của cuộn kích thích, tại thời điểm  $t = 0$ . Do xuất hiện đột biến từ thông phản ứng phần ứng dọc trục  $\Delta\psi_{\sigma ld}$  dòng điện trong cuộn dây kích từ vẫn phải tăng đột biến để bảo toàn từ thông tổng móc vòng  $\psi_{f\Sigma}$ . Tuy nhiên, trong trường hợp này sự có mặt của  $\psi_{ld}$  (từ thông của cuộn cản dọc trục) làm cho  $\Delta I_f$  xuất hiện nhỏ hơn. Ta có :

$$\begin{aligned} \Delta\psi_{f\Sigma} &= 0 = \Delta\psi_d + \Delta\psi_{\sigma f} + \Delta\psi_{ld} - \Delta\psi_{\sigma ld} ; \\ \Delta\psi_{ld\Sigma} &= 0 = \Delta\psi_{ld} + \Delta\psi_{\sigma ld} + \Delta\psi_d - \Delta\psi_{\sigma ld} . \end{aligned}$$

Chuyển về biểu thức dòng điện :

$$\begin{aligned} \Delta I_f (X_{\sigma ld} + X_{\sigma f}) + \Delta I_{ld} X_{\sigma ld} - \Delta I_d X_{\sigma ld} &= 0 ; \\ \Delta I_{ld} (X_{\sigma ld} + X_{\sigma ld}) + \Delta I_f X_{\sigma ld} - \Delta I_d X_{\sigma ld} &= 0 . \end{aligned}$$

Kết hợp 2 phương trình có thể tìm được quan hệ :

$$\Delta I_f X_{\sigma f} = \Delta I_{ld} X_{\sigma ld} ; \quad (4-7)$$

Nghĩa là độ tăng dòng điện trong các cuộn dây tỉ lệ nghịch với điện kháng tản của nó. Kết hợp với 1 trong 2 phương trình trên ta tính được  $\Delta I_f$  và  $\Delta I_{fd}$  (khi cho  $\Delta I_d$ ). Tuy nhiên, cũng như trường hợp máy phát không cuộn cảm ta không quan tâm xác định  $\Delta E_q$  (tỉ lệ với  $\Delta I_d$ ) vì rất phức tạp, mà cũng sử dụng khái niệm sdd mới, trong trường hợp này gọi là sdd siêu quá độ  $E''_q$ . Ký hiệu mới ở đây chỉ có ý nghĩa phân biệt để kể đến ảnh hưởng của cuộn cảm. Thực ra do ảnh hưởng của cuộn cảm,  $E''_q$  chỉ khác  $E'_q$  ở giai đoạn ngắn ban đầu. Dòng điện trong cuộn cảm tắt rất nhanh nên giai đoạn sau  $E''_q$  và  $E'_q$  không còn sai khác.

Sức điện động siêu quá độ  $E''_q$  cũng được định nghĩa do thành phần có ích của từ thông tổng móc vòng qua cuộn dây kích từ sinh ra:

$$\psi''_d = (1 - \sigma_f) \psi_{f\Sigma} = E''_q \cdot$$

Dựa vào biểu thức  $\psi_{f\Sigma}$  và quan hệ (4-7) ta cũng suy ra được biểu thức của  $E''_q$  theo cách tương tự như với  $E'_q$ :

$$E''_q = U_q + I_d \cdot X''_d \quad (4-8)$$

Trong trường hợp này :

$$X''_d = X_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_{\sigma ld}}}$$

$X''_q$  được gọi là điện kháng siêu quá độ dọc trục.

Xét theo hướng ngang trục, ta có từ thông tổng móc vòng qua cuộn cảm :

$$\psi_{lq\Sigma} = \psi_{lq} + \psi_{\sigma lq} - \psi_{\sigma q} \cdot$$

Thành phần có ích (móc vòng được sang cuộn dây phản ứng ngang trục) cũng xác định theo công thức:

$$\psi''_q = (1 - \sigma_{lq}) \psi_{lq\Sigma} = E''_d \quad (4-9)$$

Trong đó, hệ số tản của cuộn cảm ngang trục :

$$\sigma_{lq} = \frac{X_{\sigma lq}}{X_{\sigma q} + X_{\sigma lq}}$$

Thay biểu thức của  $\psi_{lq\Sigma}$  và  $\sigma_{lq}$  vào (4-9), thực hiện biến đổi ta nhận được biểu thức của sdd siêu quá độ ngang trục :

$$E''_d = U_d - I_q \cdot X''_q \quad (4-10)$$

Trong đó :

$$X''_q = X_\sigma + \frac{1}{\frac{1}{X_{\sigma q}} + \frac{1}{X_{\sigma f}}}$$

Điện kháng  $X''_q$  được gọi là điện kháng siêu quá độ ngang trục.

Tóm lại, trong trường hợp máy phát điện có cuộn cản ta cũng tìm được 2 phương trình (4-8) và (4-10) thể hiện quan hệ giữa sức điện động và điện áp máy phát. Vì các sdd siêu quá độ  $E''_d$  và  $E''_q$  đều không đột biến tại  $t = 0$ , do đó nó đúng cho cả chế độ trước khi xảy ra ngắn mạch. Nói riêng các quan hệ này cho phép xác định được trị số của  $E''_d$  và  $E''_q$  tại thời điểm  $t = 0$  theo thông số của máy phát trước khi xảy ra sự cố (CĐXL).

Để thuận tiện người ta cũng hay sử dụng đồ thị véc tơ. Hình 4.9 vẽ đồ thị véc tơ cho chế độ trước khi xảy ra ngắn mạch trong đó có mặt của sdd  $E''_d$  và  $E''_q$ . Ở chế độ sau khi xảy ra ngắn mạch  $E''_d$  và  $E''_q$  không thay đổi về trị số, các đại lượng khác (dòng, áp) đều bị thay đổi.

Người ta cũng định nghĩa sdd quá độ toàn phần  $E'' = \sqrt{E_q'^2 + E_d'^2}$  (xem hình vẽ). Do  $X''_d \neq X''_q$  nên mút của véc tơ  $E''$  không nằm trên đường thẳng ứng với điện áp rơi  $jIX_q$  hay  $jIX_d$  (cộng vào với vectơ điện áp).

Cách xác định  $E''_q$  và  $E''_d$  cụ thể như sau.

Trước hết xác định góc  $\xi$  tương tự như máy phát không cuộn cản :

$$\operatorname{tg} \xi = \frac{U \sin \varphi + IX_q}{U \cos \varphi}; \quad \text{suy ra trị số } \xi.$$

Xác định góc lệch :  $\delta = \xi - \varphi$  theo góc  $\xi$  và  $\varphi$  đã biết.

Từ đó có :

$$U_q = U \cos \delta; \quad U_d = U \sin \delta;$$

$$I_d = I \sin \xi; \quad I_q = I \cos \xi.$$

Thay vào biểu thức tính các thành phần của sdd :

$$E''_q = U_q + I_d X''_d;$$

$$E''_d = U_d - I_q X''_q.$$

Tuy được tính theo các thông số chế độ của máy phát trước khi sự cố nhưng các trị số trên được hiểu là giá trị đầu của sdd sau khi xảy ra ngắn mạch bởi sdd quá độ không có đột biến.

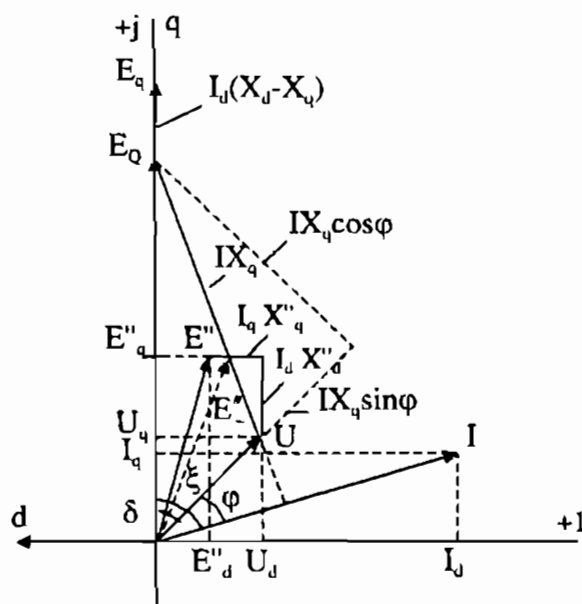
Trong trường hợp máy phát điện cực ẩn ta có  $X''_d \approx X''_q$ . Lúc đó mút của véc tơ  $E''$  nằm trên đường thẳng vuông góc với véc tơ dòng điện  $I$ , với :

$$\vec{E}'' = \vec{U} + jI X''_d. \quad (4-11)$$

Do đó có thể tính :

$$E'' = \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi + IX''_d)^2}.$$

Ở đây  $U$ ,  $I \cos \varphi$  là trị số điện áp, dòng điện và hệ số công suất của máy phát ở chế độ trước khi xảy ra ngắn mạch.



Hình 4.9

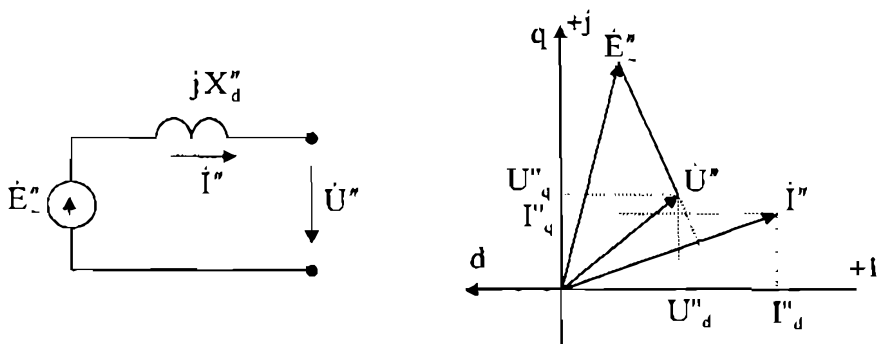
Đối với máy phát điện cực lõi thì  $X''_d \neq X''_q$ . Tuy nhiên sự sai khác cũng không lớn. Hơn nữa  $X''_d < X''_q$  nên người ta thường coi gần đúng  $X''_q = X''_d$  (lấy nhỏ đi).

Khi đó ta cũng xác định được :

$$E'' = \sqrt{(U \cos \varphi)^2 + (U \sin \varphi + I X''_d)^2}$$

Véc tơ  $E''$  có thể hiện trên hình 4.9 (véc tơ nét đứt).

Một điểm đáng chú ý khác là khi đã coi  $X''_d = X''_q$  thì máy phát điện còn có thể được mô tả bằng sơ đồ mạch duy nhất với các đại lượng phức (hình 4.10).



Hình 4.10

Ở đây, theo cách chọn lại chiều dương dòng điện phản ứng (gây ra từ thông ngược chiều với các trục d,q) biểu diễn phức của các đại lượng sẽ như sau:

$$\dot{E}'' = E_d'' + j E_q''$$

$$\dot{U}'' = U_d'' + j U_q''$$

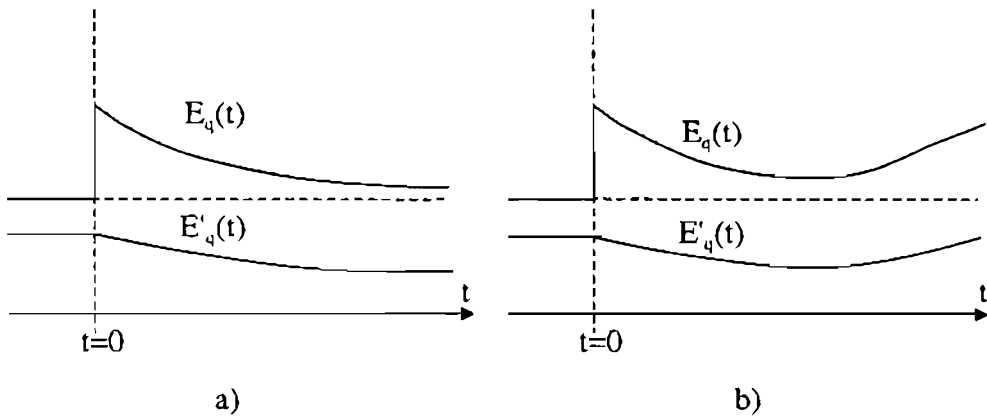
$$\dot{I}'' = I_d'' + j I_q''$$

Để kiểm tra được sự tương đương của (4-11) với các quan hệ (4-8) và (4-10) khi coi gần đúng  $X_q'' = X_d''$ .

#### 4.5 SỰ BIẾN THIÊN CỦA SỨC ĐIỆN ĐỘNG VÀ ĐIỆN KHÁNG MÁY PHÁT TRONG THỜI GIAN QUÁ ĐỘ SAU NGẮN MẠCH

##### 1. Sự biến thiên của sức điện động

Để đơn giản ta xét sự biến thiên của  $E_q'(t)$  trong trường hợp không có tự động điều chỉnh kích từ. Ở giai đoạn đầu, sự xuất hiện của thành phần dòng điện tự do trong cuộn dây kích từ làm từ thông  $\psi_d$  tăng đột biến (một lượng  $\Delta\psi_d$ ) nhằm cân bằng với độ tăng phản ứng phản ứng (nói chung ngược chiều với  $\psi_d$ ). Từ thông móc vòng tổng  $\psi_{\Sigma}$  giữ được không đổi tại  $t = 0$ . Tuy nhiên do tổn hao trong cuộn dây kích thích ( $r_f \neq 0$ ) nên thành phần tự do giảm dần, trong khi dòng phản ứng vẫn lớn (phản ứng phản ứng khử từ lớn). Kết quả là ở cuối quá trình quá độ từ thông tổng  $\psi_{\Sigma}$  giảm trị số. Sức điện động  $E_q'$  tỉ lệ với từ thông này nên cũng giảm (Hình 4.10,a). Nếu xét sdd  $E_q$  (tỉ lệ với  $\psi_d$ ) thì tại  $t = 0$  nhảy vọt sau đó giảm về trị số ban đầu do dòng điện kích từ vẫn giữ nguyên (không có TĐK).



Hình 4.10

Khi có TĐK tác động, dòng kích từ cường bức tăng lên, cuối quá trình quá độ  $E_q$  tăng,  $E'_q$  cũng tăng theo ( hình 4.10,b). Khi máy phát có cuộn cần hiện tượng diễn biến cũng tương tự. Về trị số  $E'_q$  và  $E''_q$  chỉ có sai khác nhỏ ở giai đoạn đầu.

## 2. Sự thay đổi của điện kháng quá độ.

Trước hết cần nhắc lại rằng điện kháng của cuộn dây tỉ lệ với độ dẫn từ của mạch từ mà từ thông do dòng điện cuộn dây sinh ra phải đi qua. Do đó khi từ thông đi qua 2 mạch dẫn từ song song (qua lõi thép và qua mạch tản ra không khí) thì điện kháng chung bằng tổng 2 điện kháng. Ví dụ, điện kháng của cuộn dây phản ứng dọc trục trong chế độ xác lập:

$$X_d = X_{sd} + X_\sigma$$

$X_{sd}$  đặc trưng cho độ dẫn từ mạch từ đi qua lõi thép;

$X_\sigma$  đặc trưng cho độ dẫn từ mạch tản ra không khí .

Ta hãy theo dõi mạch từ của dòng điện  $I_d$  (và của  $I'_d$  trong CDQĐ). Trong CDXL dòng  $I_d$  (chạy trong cuộn dọc trục) sinh ra từ thông  $\psi_{sd} = I_d X_d$ . Đường đi của từ thông này gồm 2 mạch khép kín : vòng qua roto tương ứng với  $X_{sd}$  và vòng ra ngoài không khí (từ thông tản) với  $X_\sigma$ . Vì thế :

$$X_d = X_{sd} + X_\sigma . \quad (2 \text{ mạch song song})$$

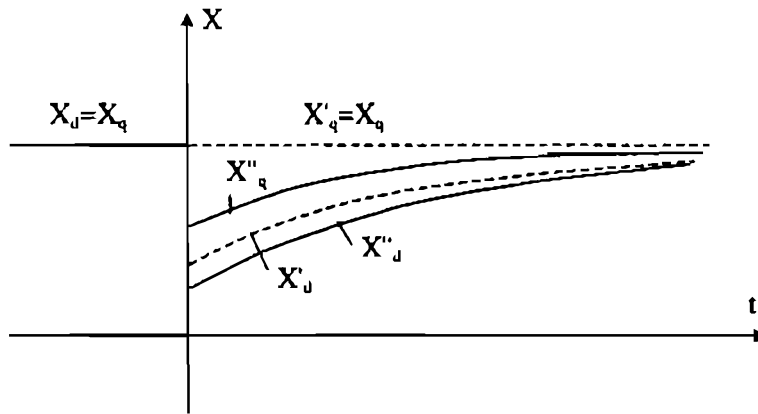
Ở chế độ quá độ dòng  $I'_d$  (chạy cũng trong cuộn dọc trục) sinh ra từ thông:

$$\psi'_{sd} = I'_d X'_d . \quad (\text{ký hiệu trong chế độ quá độ})$$

Mạch từ của  $\psi'_{sd}$  bị thay đổi mạnh ở thời điểm  $t=0$ . Ngoài thành phần từ thông tản vẫn như cũ (tương ứng với  $X_\sigma$ ), thành phần móc vòng vào roto bị chia làm 2:

phần từ thông ban đầu của  $\psi_{\omega}$  đi theo đường cũ) ứng với  $X_{\omega 0}$ ) còn phần tăng thêm  $\Delta\psi_{\omega}$  đi ra ngoài không khí cạnh cuộn kích từ (ứng với  $X_{\sigma f}$ ). Nguyên nhân là do từ thông trong lòng cuộn dây không thể tăng thêm. Như vậy độ dẫn từ chung mạch vòng  $\psi'_{\omega}$  giảm đi và  $X'_{\omega}$  giảm so với  $X_{\omega}$ . Biểu thức (4-4,a) của  $X'_{\omega}$  thể hiện rõ cấu trúc mạch từ nói trên.

Ở thời điểm đầu có thể coi phần từ thông  $\Delta\psi_{\omega}$  đi ra ngoài không khí hoàn toàn, tương ứng với  $X'_{\omega}$  nhỏ nhất. Cuối quá trình quá độ mạch từ của  $\psi_{\omega}$  lại đi hoàn toàn vào lòng cuộn dây roto, do đó  $X'_{\omega} \rightarrow X_{\omega}$  (hình 4.11).



Hình 4.11

Khi có cuộn cản dọc trục, từ trở của mạch từ còn có thể coi tăng lên nhiều hơn (do bị đẩy ra ngoài không khí mạnh hơn) nên  $X'_{\omega} < X''_{\omega}$ . Sự biến thiên của  $X''_{\omega}$  cũng tương tự và  $X''_{\omega} \rightarrow X_{\omega}$  ở cuối QTQĐ.

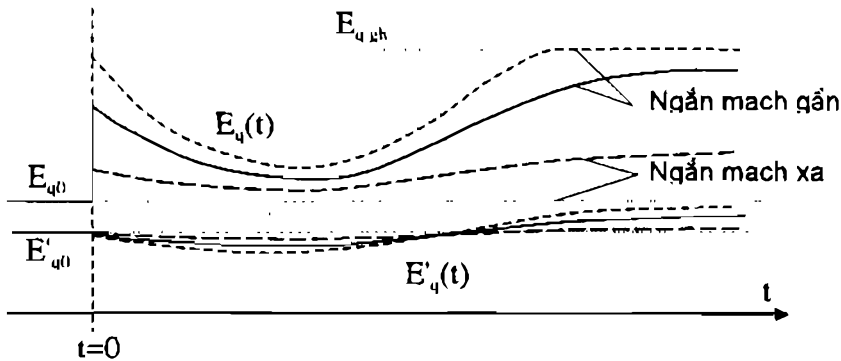
Đối với điện kháng phía ngang trục, khi không có cuộn cản  $X'_{\omega} = X_q = \text{const}$  vì mạch từ không có cuộn dây nào khép kín. Khi có cuộn cản ngang trục, từ trở mạch từ quá độ cũng tăng lên do cuộn cản khép kín đẩy từ thông ngang trục ra ngoài không khí, nên  $X''_{\omega} < X_q$ . Tuy nhiên do phía ngang trục chỉ có duy nhất cuộn cản, chỉ ảnh hưởng ít đến từ trở quá độ mạch từ, vì thế  $X''_{\omega} > X'_{\omega}$ .

Trên hình 4.11 biểu thị sự biến thiên điện kháng siêu quá độ dọc trục và ngang trục của máy phát điện cực ẩn. Khi không có cuộn cản các điện kháng quá độ biến thiên theo đường chấm chấm.

### 3. Ảnh hưởng của vị trí ngắn mạch

Sự biến thiên của sdd và điện kháng máy phát như vừa nêu có mức độ rất khác nhau phụ thuộc vào khoảng cách từ máy phát đến điểm ngắn mạch. Khi ngắn mạch gần, dòng điện ngắn mạch chạy trong các cuộn dây stato máy phát tăng nhiều, phản ứng phần ứng ảnh hưởng mạnh hơn đến từ thông của cuộn dây roto, dòng điện kích từ nhảy vọt, tăng cao ở thời điểm đầu kéo theo sự biến thiên nhiều của sdd. Mặt khác,

khi ngắn mạch gần, điện áp đầu cực máy phát giảm xuống rất thấp, bộ phận kích thích cường hành của TĐK tác động mạnh hơn, tăng cao dòng điện kích từ. Vì thế các sdd có trị số lớn hơn (ở giai đoạn cuối). Khi ngắn mạch gần dòng kích từ máy phát có thể tăng đến trị số giới hạn, như đã xét trong chương 3. Khi ngắn mạch xa, mức độ ảnh hưởng của phản ứng phản ứng và tác động của TĐK ít hơn - sdd và điện kháng không thay đổi nhiều.



Hình 4.12

Hình 4.12 minh họa các dạng biên thiên khác nhau của sdd máy phát tùy theo vị trí của điểm ngắn mạch. Để thấy rằng, khi các điểm ngắn mạch tương đối xa nguồn, có thể tính toán dòng điện ngắn mạch như với nguồn áp không đổi.

### Những điểm cần ghi nhớ trong chương bốn

1. Sự xuất hiện thành phần tự do trong dòng điện kích từ đã làm cho biên độ của sdd đồng bộ  $E_q$  do từ thông kích từ sinh ra có diễn biến nhảy vọt tại  $t = 0$ , rất khó xác định trong tính toán ngắn mạch. Để mô hình máy phát điện, phân tích quá trình quá độ và tính toán ngắn mạch người ta sử dụng khái niệm sdd quá độ  $E'_q$  và  $E''_q$ . Các sdd này có biên độ không thay đổi đột ngột biến thiên tại  $t = 0$  do được sinh ra bởi từ thông tổng móc vòng qua các cuộn điện cảm khép kín qua điện trở bé.
2. Quan hệ giữa các sdd quá độ  $E'_q$  và  $E''_q$  với các đại lượng dòng, áp, hệ số công suất máy phát đã cho phép xác định được trị số của chúng tại  $t = 0$ , theo chế độ làm việc của máy phát trước sự cố. Nhờ đó có thể mô hình máy phát và tính

toán dòng điện ngắn mạch tại thời điểm đầu. Khi sử dụng khái niệm sdd quá độ  $E'_q$  và  $E''_q$  điện kháng của máy phát cũng thể hiện bằng trị số mới: các điện kháng quá độ dọc trục và ngang trục:  $X'_{d1}$ ,  $X'_{q1}$  và  $X''_{d1}$ ,  $X''_{q1}$ . Chúng cũng hoàn toàn xác định bởi cấu trúc máy phát.

3. Có sự khác nhau về trị số sdd và điện kháng quá độ giữa máy phát điện cực ẩn và máy phát điện cực lỗi, dẫn đến những cách mô hình mạch khác nhau cho máy phát trong chế độ quá độ và tính toán ngắn mạch. Khi coi gần đúng  $X'_{q1} \approx X'_{d1}$  hoặc  $X''_{q1} \approx X''_{d1}$  thì mô hình máy phát là đồng nhất và có sơ đồ mạch phức số tương đương.