

电力系统暂态分析

第一章 电力系统故障分析的基本知识

本章主要内容:

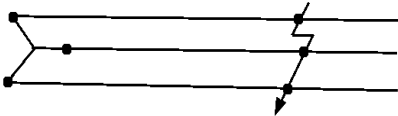
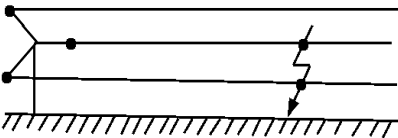
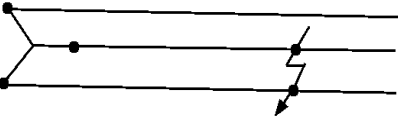
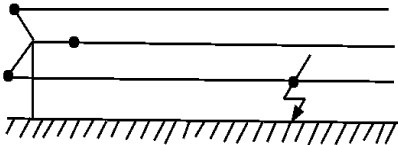
- 1、短路的一般概念
- 2、标么制的近似算法
- 3、无穷大功率电源供电的三相短路电流分析

第一节 短路的一般概念

- **故障**:一般指短路和断线,分为简单故障和复杂故障
- **简单故障**:电力系统中的单一故障
- **复杂故障**:同时发生两个或两个以上故障
- **短路**:指一切**不正常**的相与相之间或相与地之间（对于中性点接地的系统）发生通路的情况。

一、短路的类型

表1-1 各种短路的示意图和代表符号

短路种类	示意图	代表符号
三 相 短 路		$f^{(3)}$ 5%
两 相 短 路 接 地		$f^{(1,1)}$ 20%
两 相 短 路		$f^{(2)}$ 10%
单 相 短 路		$f^{(1)}$ 65%

二、短路的主要原因

- ①绝缘材料的自然老化，设计、安装及维护不良所带来的设备缺陷发展成短路。
- ②恶劣天气：雷击造成的闪络放电或避雷器动作，架空线路由于大风或导线覆冰引起电杆倒塌等。
- ③人为误操作，如运行人员带负荷拉刀闸，线路或设备检修后未拆除地线就加上电压引起短路。
- ④挖沟损伤电缆，鸟兽跨接在裸露的载流部分等。

三、短路的危害

- (1) **电流**剧增：设备发热增加，若短路持续时间较长，可能使设备过热甚至损坏；由于短路电流的**电动力**效应，导体间还将产生很大的机械应力，致使导体变形甚至损坏。
- (2) **电压**大幅度下降，对用户影响很大。
- (3) 当短路发生地点离电源不远而持续时间又较长时，并列运行的**发电机可能失去同步**，破坏系统运行的稳定性，造成大面积停电，这是短路最严重的后果。
- (4) 发生不对称短路时，**三相不平衡电流**会在相邻的通讯线路感应出电动势，影响通讯。

四、减少短路危害的措施

- (1) 限制短路电流（加电抗器）。
- (2) 继电保护快切。
- (3) 结线方式。
- (4) 设备选择。

五、计算短路电流的目的

短路电流计算结果

- 是选择电气设备（断路器、互感器、瓷瓶、母线、电缆等）的依据；
- 是电力系统继电保护设计和整定的基础；
- 是比较和选择发电厂和电力系统电气主接线图的依据，根据它可以确定限制短路电流的措施。

第二节 标么制

一、计算短路电流的基本假设

1、以电网的平均电压取代元件的额定电压

同一电压级中各元件的额定电压可能不一样

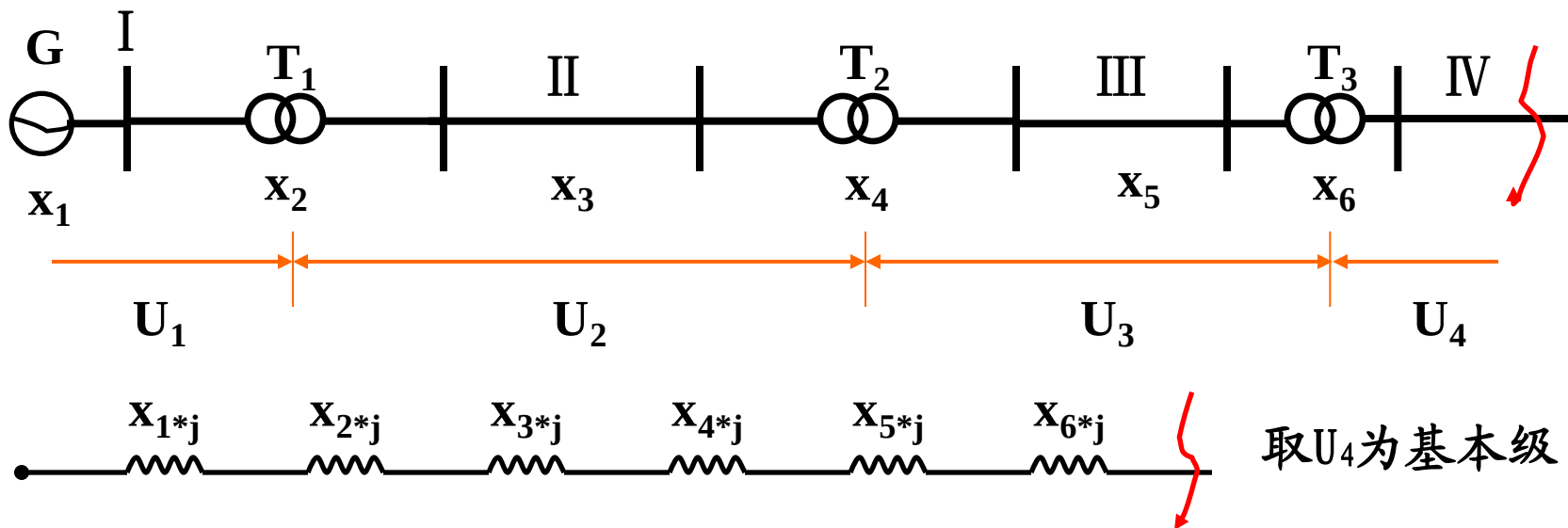
{ 线路首端，升压变压器二次侧高出10%
线路末端，降压变压器一次侧 U_N
发电机高出5%

简化计算——同一电压级中各元件的额定电压相同，
数值上=平均电压， $U_{av}=(1.1U_N+U_N)/2=1.05U_N$

2、高压电网只计及电抗，当 $R_{d\Sigma} < X_{d\Sigma} / 3$ 时，忽略 $R_{d\Sigma}$

$$I_{d\Sigma} = \frac{U_{av}}{\sqrt{3}X_{d\Sigma}}$$

二、具有变压器的多电压级网络标么值等值电路的建立(近似法)



采用平均电压后简化计算, 无需考虑变压器变比归算

1、发电机

有名值
$$x_1 = x_{d*N}'' \frac{U_1^2}{S_{GN}}$$

归算到基本级
$$x_1' = x_{d*N}'' \frac{U_1^2}{S_{GN}} \left(\frac{U_2}{U_1} \frac{U_3}{U_2} \frac{U_4}{U_3} \right)^2$$

$$\begin{aligned}
 x'_{1*j} &= x'_1 \frac{S_B}{U_4^2} = x''_{d*N} \frac{U_1^2}{S_{GN}} \left(\frac{U_2}{U_1} \frac{U_3}{U_2} \frac{U_4}{U_3} \right)^2 \frac{S_B}{U_4^2} \\
 &= x''_{d*N} \frac{S_B}{S_{GN}}
 \end{aligned}$$

2、变压器

$$x_{2*j} = \frac{U_{k1}\%}{100} \frac{U_2^2}{S_{T1N}} \left(\frac{U_3}{U_2} \frac{U_4}{U_3} \right)^2 \frac{S_B}{U_4^2} = \frac{U_{k1}\%}{100} \frac{S_B}{S_{T1N}}$$

$$T_2 \quad x_{4*j} = \frac{U_{k2}\%}{100} \frac{S_B}{S_{T2N}} \quad T_3 \quad x_{6*j} = \frac{U_{k3}\%}{100} \frac{S_B}{S_{T3N}}$$

3、输电线

$$x_{3*j} = x_3 \left(\frac{U_3}{U_2} \frac{U_4}{U_3} \right)^2 \frac{S_B}{U_4^2} = x_3 \frac{S_B}{U_2^2}$$

$$\text{III段} \quad x_{5*j} = x_5 \left(\frac{U_4}{U_3} \right)^2 \frac{S_B}{U_4^2} = x_5 \frac{S_B}{U_3^2}$$

第三节 恒定电势源电路的三相短路

- **恒定电势源**（又称**无限大功率电源**），是指端电压幅值和频率都保持恒定的电源，其内阻抗为零。

一、三相短路的暂态过程

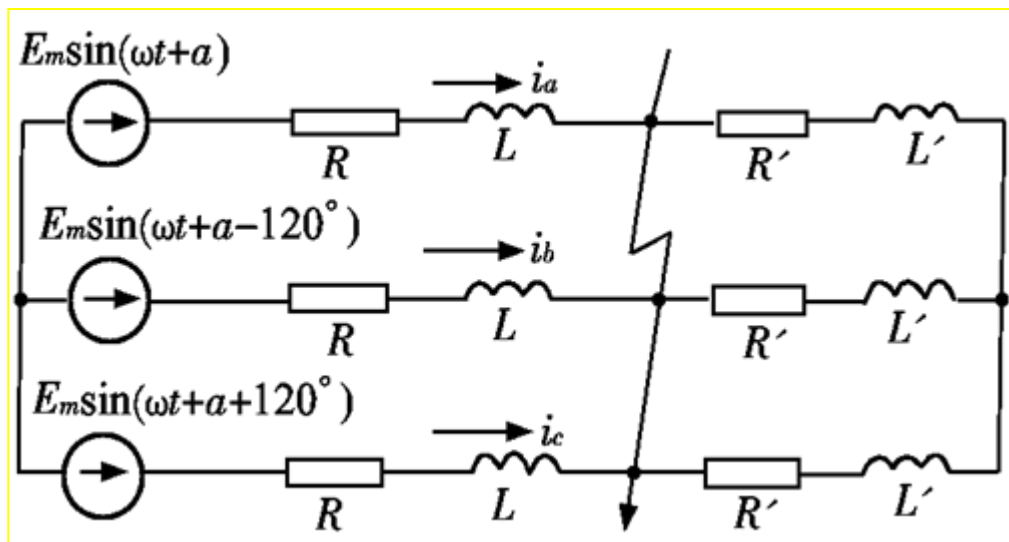


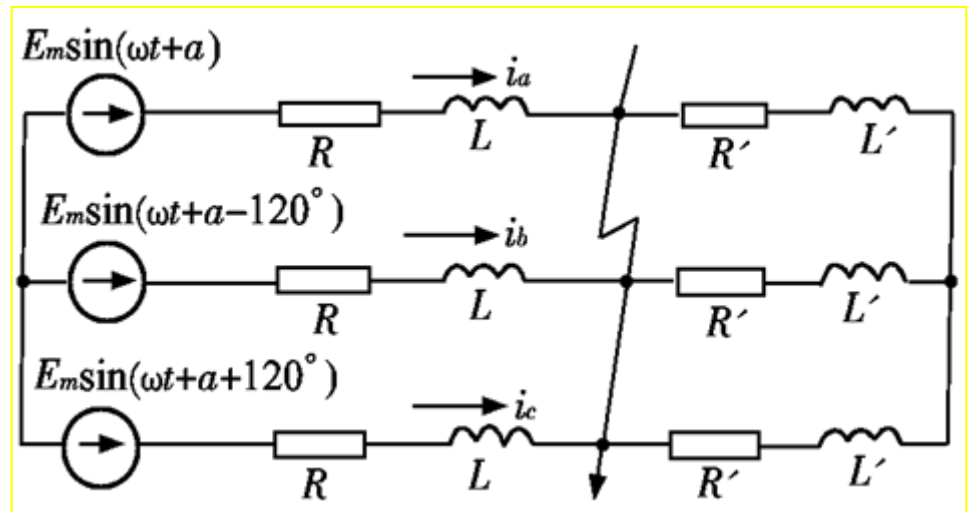
图1-2 简单三相电路短路

•短路前电路处于稳态:

$$\left. \begin{aligned} e &= E_m \sin(\omega t + \alpha) \\ i &= I_{m|0|} \sin(\omega t + \alpha - \varphi') \end{aligned} \right\}$$

$$I_{m|0|} = \frac{E_m}{\sqrt{(R + R')^2 + \omega^2 (L + L')^2}}$$

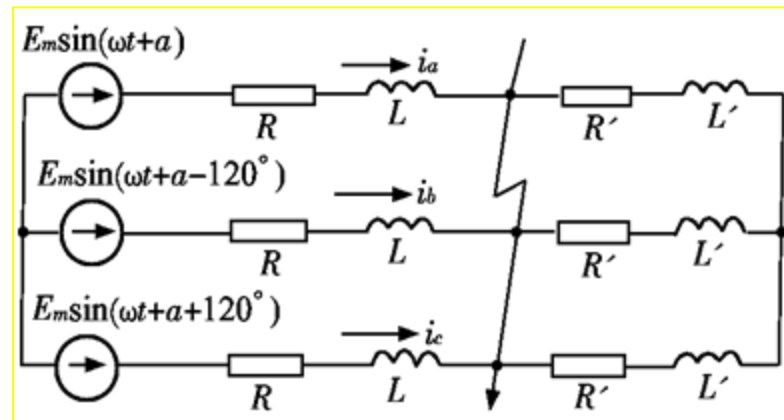
$$\varphi' = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\omega(L + L')}{R + R'}$$



假定 $t = 0$ 时刻发生短路

a相的微分方程式如下：

$$Ri + L \frac{di}{dt} = E_m \sin(\omega t + \alpha)$$



其解就是短路的全电流，它由两部分组成：
周期分量和**非周期分量**。

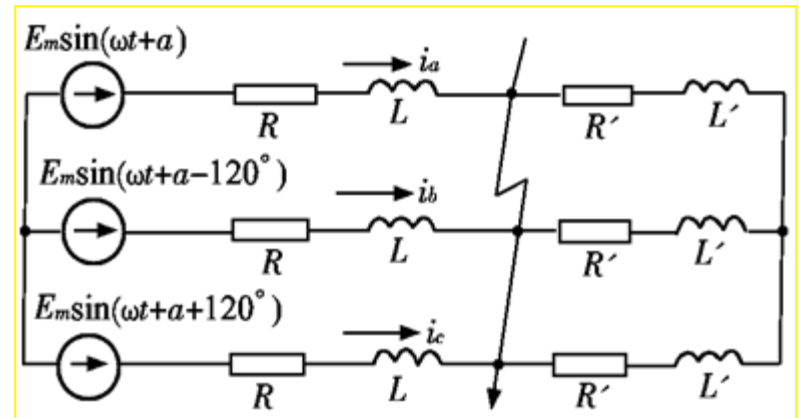
周期分量:

短路电流的强制分量，并记为 i_{dza}

$$i_{dza} = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi)$$

$$I_m = \frac{E_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}}$$

$$\varphi = \operatorname{tg}^{-1} \frac{\omega L}{R}$$



非周期电流：
短路电流的自由分量, 记为

$$i_{dfa} = Ce^{pt} = Ce^{-\frac{t}{T_a}} \quad (\text{C为由初始条件决定的积分常数})$$

p — 特征方程 $R + pL = 0$ 的根。

$$p = -\frac{R}{L}$$

T_a — 非周期分量电流衰减的时间常数

$$T_a = -\frac{1}{p} = \frac{L}{R}$$

积分常数的求解

短路的全电流可表示为：

短路前电流

$$i = i_{dza} + i_{dfa} = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + Ce^{-t/T_a}$$

$$i = I_{m|0|} \sin(\omega t + \alpha - \varphi')$$

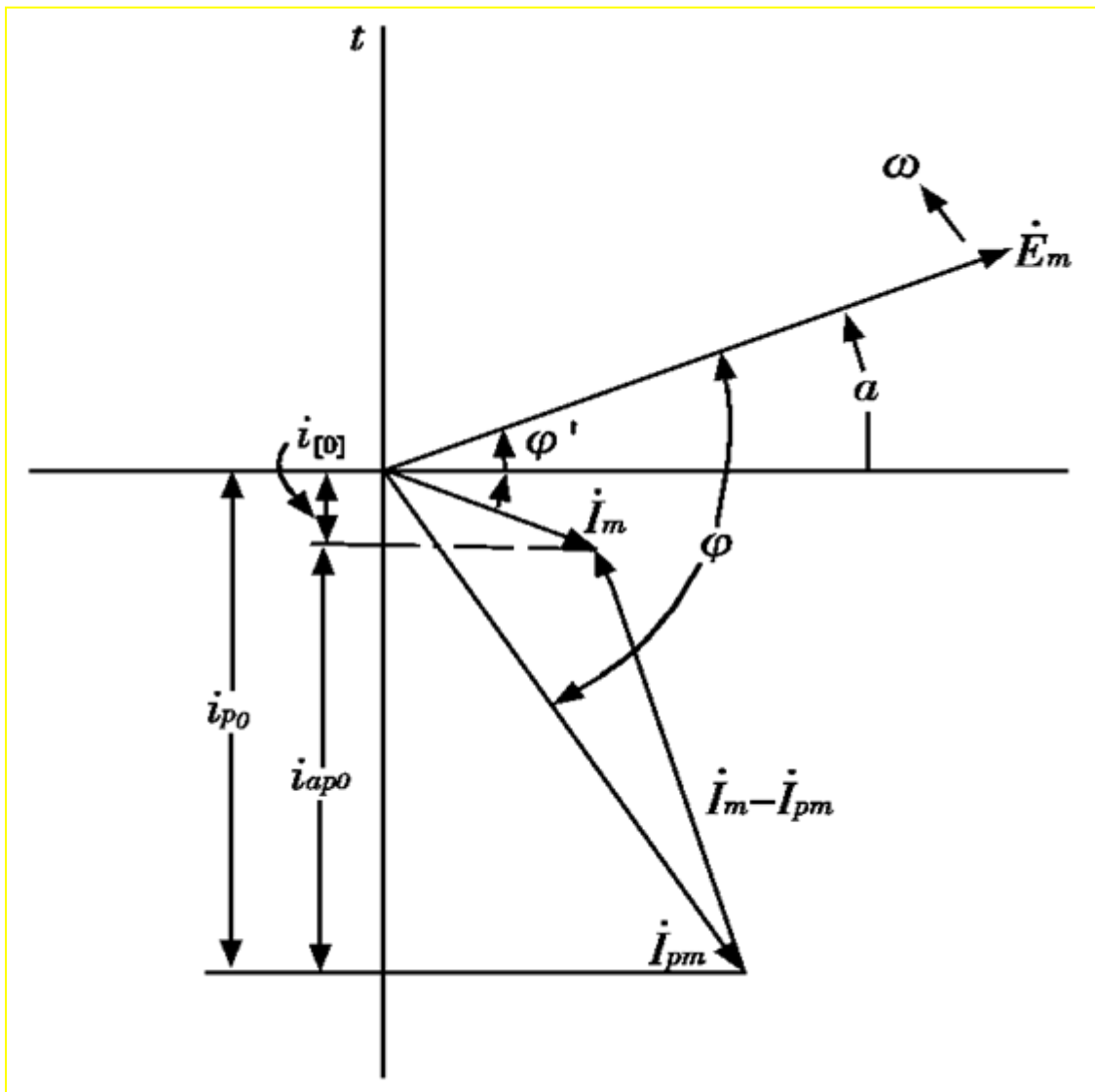
短路电流
不突变

$$I_{m|0|} \sin(\alpha - \varphi') = I_m \sin(\alpha - \varphi) + C$$

$$C = I_{m|0|} \sin(\alpha - \varphi') - I_m \sin(\alpha - \varphi)$$

$$i = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) + [I_{m|0|} \sin(\alpha - \varphi') - I_m \sin(\alpha - \varphi)]e^{-t/T_a}$$

短路电流关系的相量图表示



在时间轴上的
投影代表各量
的瞬时值

$$I_{m|0|} \sin(\alpha - \varphi') = i_{[0]}$$

$$I_m \sin(\alpha - \varphi) = i_{P0}$$

$$i_{P0} \neq i_{[0]}$$

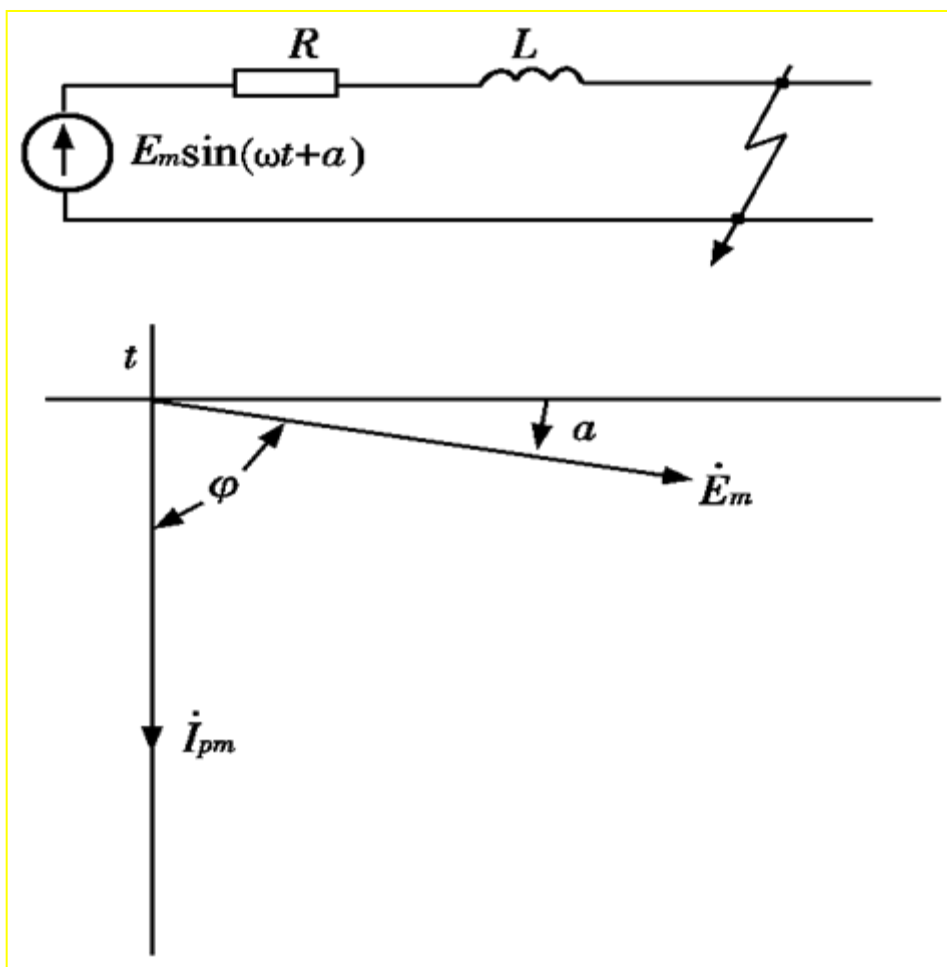
二、短路冲击电流

- 指短路电流最大可能的瞬时值，用 i_M 表示。
其主要作用是校验电气设备的电动力稳定度。

非周期电流有最大初值的条件应为：

- (1) 相量差 $\dot{I}_{m|0|} - \dot{I}_m$ 有最大可能值；
- (2) 相量差 $\dot{I}_{m|0|} - \dot{I}_m$ 在 $t=0$ 时与时间轴平行。

一般电力系统中，短路回路的感抗比电阻大得多，即 $\omega L \gg R$ ，故可近似认为 $\varphi \approx 90^\circ$ 。因此，非周期电流有最大值的条件为：短路前电路空载 ($I_{m0}=0$)，并且短路发生时，电源电势过零 ($\alpha = 0$)。



非周期电流有最大值的条件为 (1)
 短路前电路空载
 ($I_{m0}=0$);
 (2) 短路发生时,
 电源电势过零
 ($\alpha=0$)。

图1-3 短路电流非周期分量有最大可能值的条件图

将 $I_{m|0}| = 0$ ， $\varphi \approx 90^\circ$ 和 $\alpha = 0$ 代入式短路全电流表达式：

$$i = -I_m \cos \omega t + I_m e^{-t/T_a}$$

短路电流的最大瞬时值在短路发生后约半个周期时出现（如图1-4）。若 $f = 50$ Hz，这个时间约为0.01秒，将其代入式（6-8），可得短路冲击电流：

$$i_M = I_m + I_m e^{-0.01/T_a} = (1 + e^{-0.01/T_a}) I_m = k_M I_m \quad k_M = 1 + e^{-0.01/T_a}$$

k_M 为冲击系数，实用计算时，短路发生在发电机电压母线时 $k_M=1.9$ ；短路发生在发电厂高压母线时 $k_M=1.85$ ；在其它地点短路 $k_M=1.8$ 。

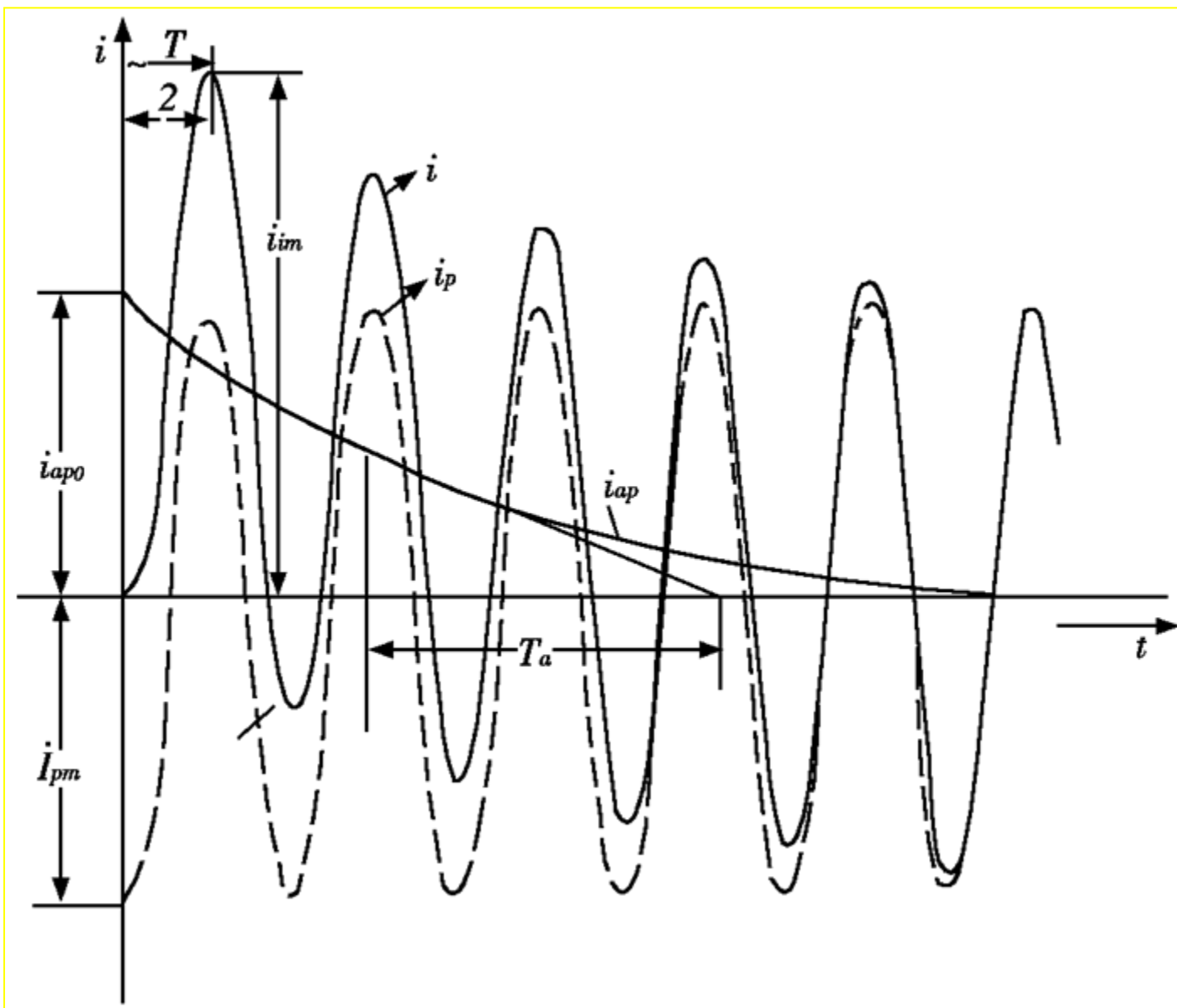


图1-4 非周期分量有最大可能值时的短路电流波形图

三、短路电流的有效值

• 在短路过程中，任意时刻 t 的**短路电流有效值**，是指以时刻 t 为中心的一个周期内瞬时电流的均方根值，即

$$I_t = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} i_t^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} (i_{dzt} + i_{dft})^2 dt}$$

为了简化计算，通常**假定**：**非周期电流**在以时间 t 为中心的一个周期内恒定不变，因而它在时间 t 的有效值就等于它的瞬时值，即

$$I_{dft} = i_{dft}$$

对于**周期电流**，认为它在所计算的周期内是幅值恒定的，其数值即等于由周期电流包络线所确定的 t 时刻的幅值。因此， t 时刻的周期电流有效值应为

$$I_{dz} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$$

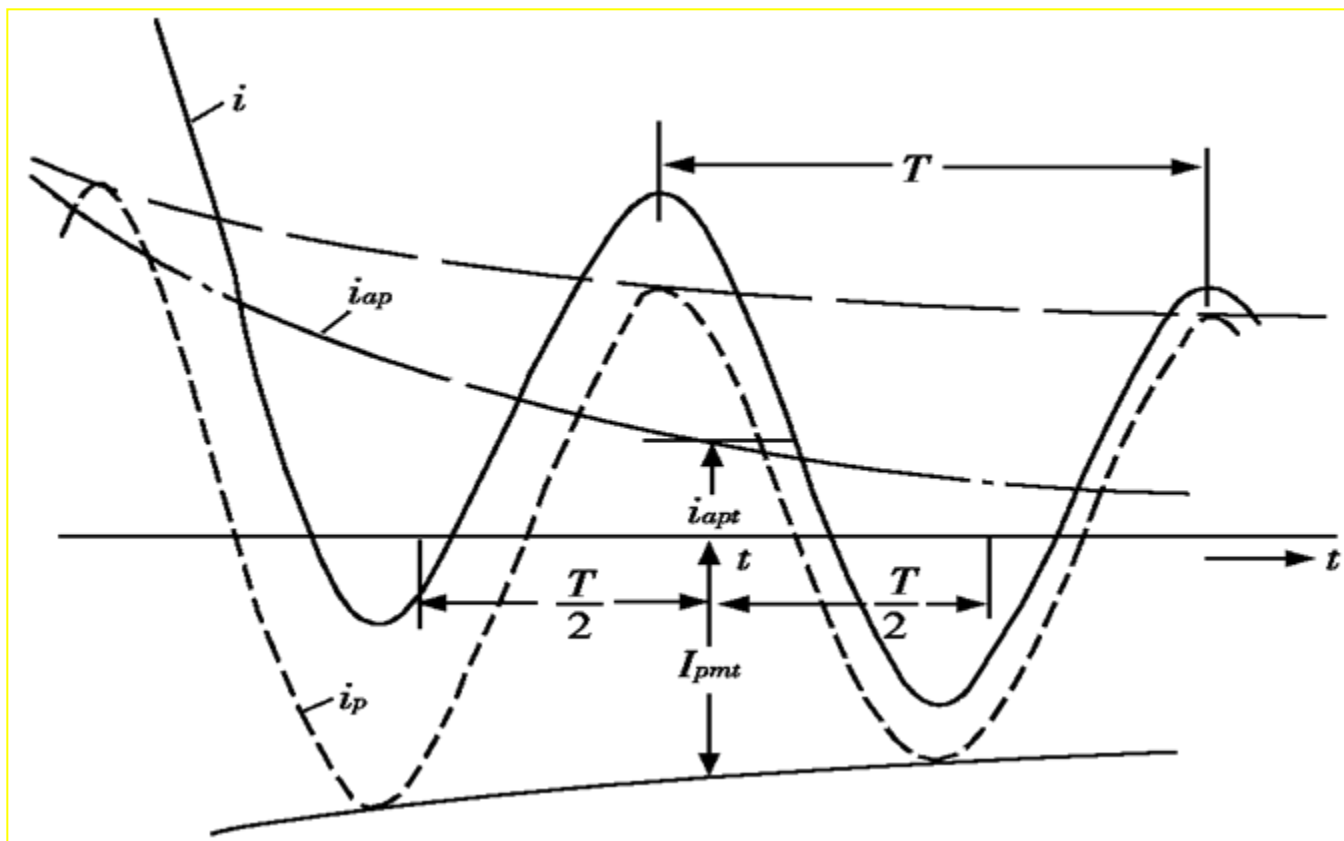


图1-5 短路电流有效值的确定

根据上述假定条件：

$$I_t = \sqrt{I_{dz}^2 + I_{dft}^2}$$

短路电流最大有效值出现在第一周期，其中心为： $t=0.01s$

$$I_{dft} = I_m e^{-0.01/T_a} = (k_M - 1)I_m \quad k_M = 1 + e^{-0.01/T_a}$$

短路电流的最大有效值：

$$I_M = \sqrt{I_{dz}^2 + [(k_M - 1)\sqrt{2}I_{dz}]^2} = I_{dz} \sqrt{1 + 2(k_M - 1)^2}$$

短路电流的最大有效值常用于校验某些电气设备的断流能力或耐力强度。

四、短路容量

短路容量也称为短路功率，它等于短路电流有效值同短路处的正常工作电压（一般用平均额定电压）的乘积，即

$$S_d = \sqrt{3}V_{av}I_{dz}$$

用标么值表示时

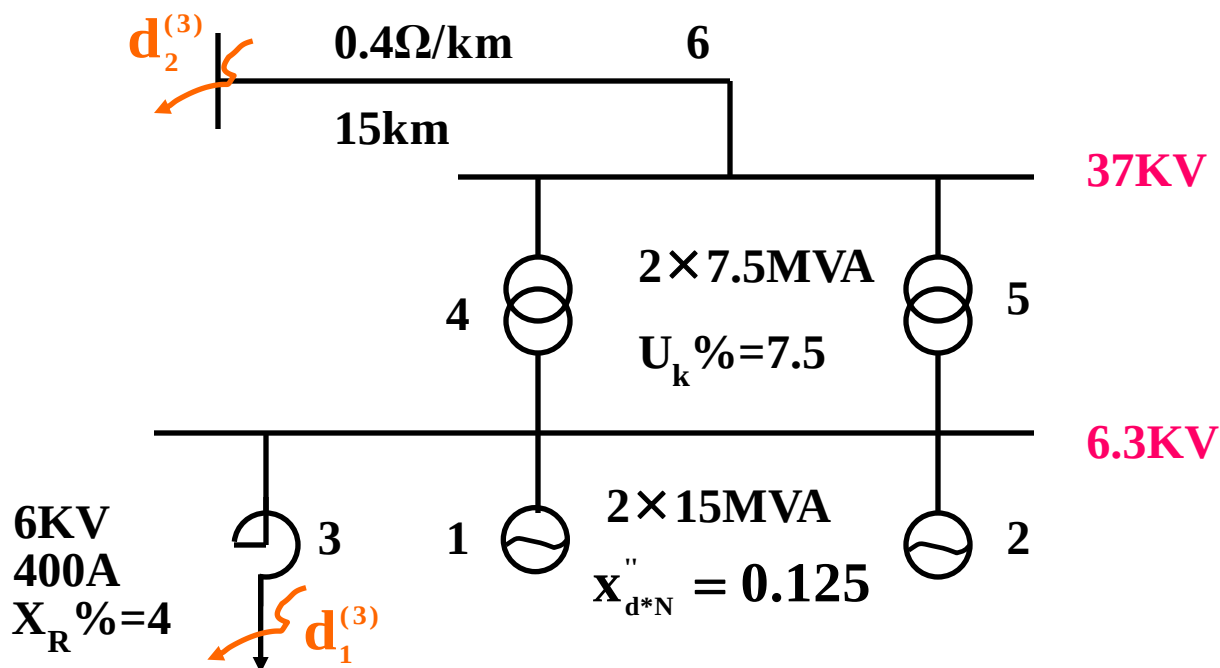
$$S_{t*} = \frac{\sqrt{3}V_{av}I_{dz}}{\sqrt{3}V_B I_B} = \frac{I_{dz}}{I_B} = I_{dz*}$$

短路容量**主要用来**校验开关的切断能力。

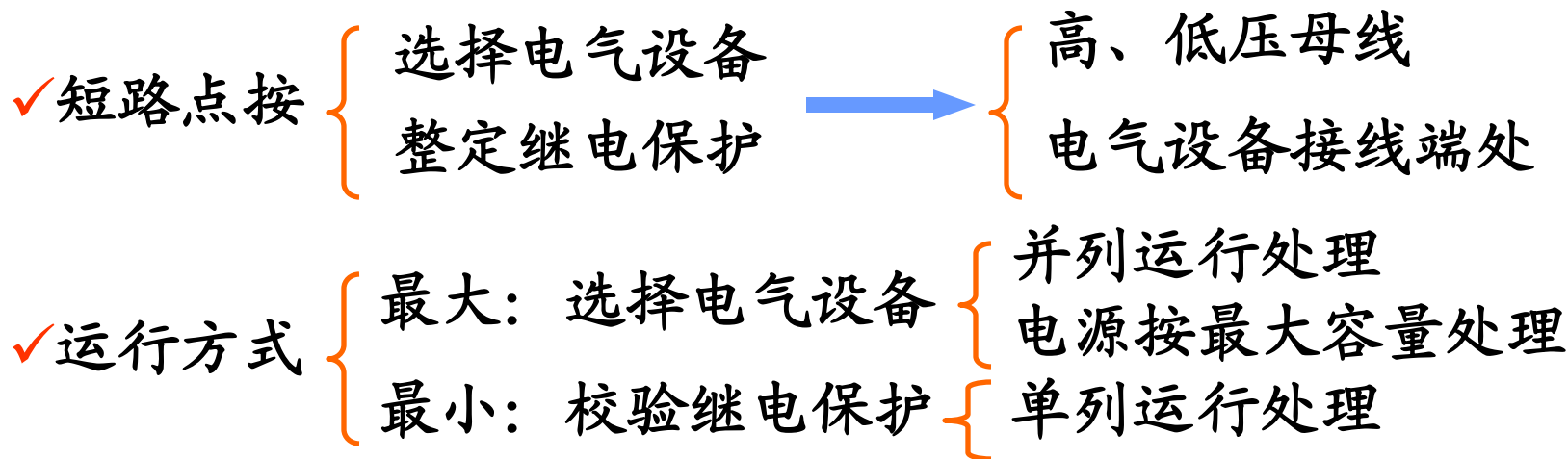
第四节 短路回路总阻抗求取

1、绘制计算电路图

- ✓ 用单相节线图表示——计算电路图
- ✓ 标明各元件额定参数
- ✓ 各元件均按顺序编号



2、短路计算点和系统运行方式确定



$$X_{1*} = X_{2*} = x_{d*N}'' \frac{S_B}{S_{GN}} = 0.125 \times \frac{100}{15} = 0.83$$

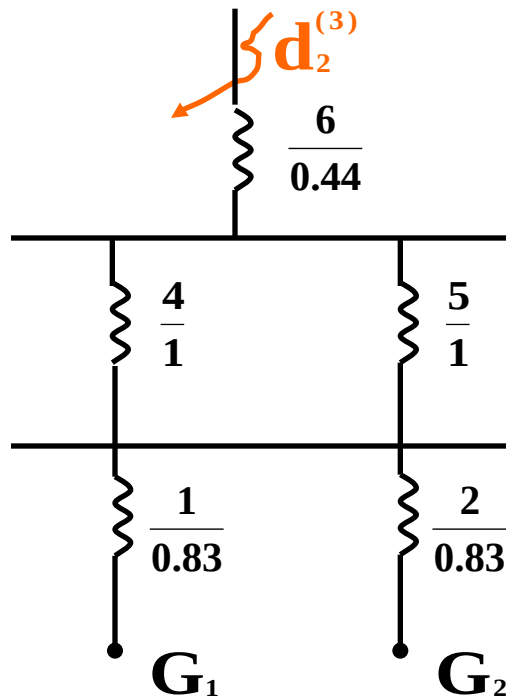
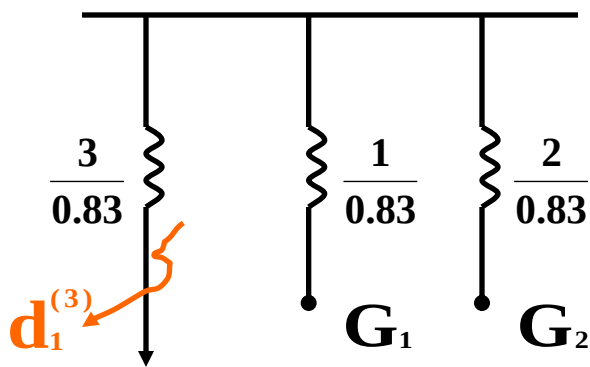
$$X_{3*} = \frac{X_R \%}{100} \frac{U_N}{\sqrt{3} I_N} \frac{S_B}{U_B^2} = \frac{4}{100} \frac{6}{\sqrt{3} \times 0.4} \frac{100}{6.3^2} = 0.872$$

$$X_{4*} = X_{5*} = \frac{U_{k2} \%}{100} \frac{S_B}{S_{TN}} = \frac{7.5}{100} \frac{100}{7.5} = 1$$

$$X_{6*} = X_6 \frac{S_B}{U_2^2} = 0.4 \times 15 \times \frac{100}{37^2} = 0.44$$

3、绘制等值电路图

- ✓ 对应每一个短路点作出一个等值电路图
- ✓ 任一短路点对应等值电路中，只要求表示该点短路时，短路电流通过的元件电抗
- ✓ 分子为顺序号，分母为该元件的电抗标么值

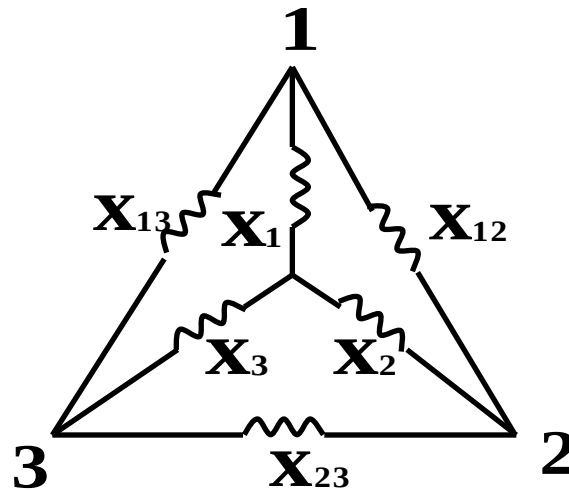


4、等值电路图归并与简化

✓ 串联 $X_{\Sigma} = \sum X_i$

✓ 并联 $\frac{1}{X_{\Sigma}} = \sum \frac{1}{X_i}$

✓ $\Delta \leftrightarrow Y$



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

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

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

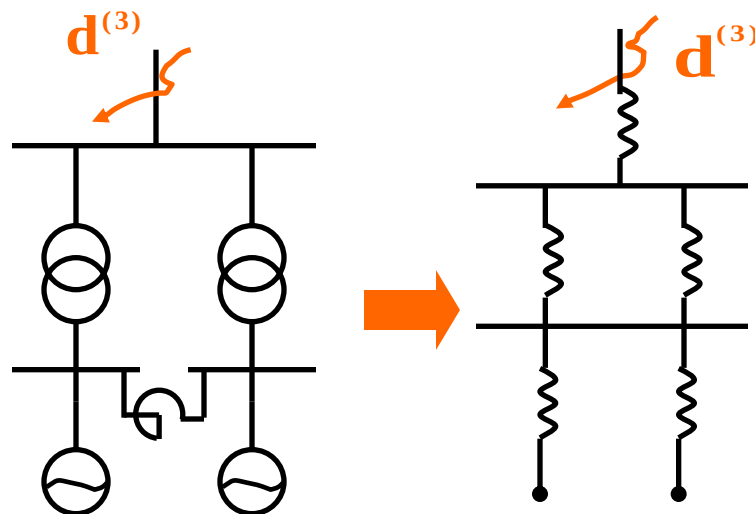
$$X_{12} = X_1 + X_2 + \frac{X_1 X_2}{X_3}$$

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

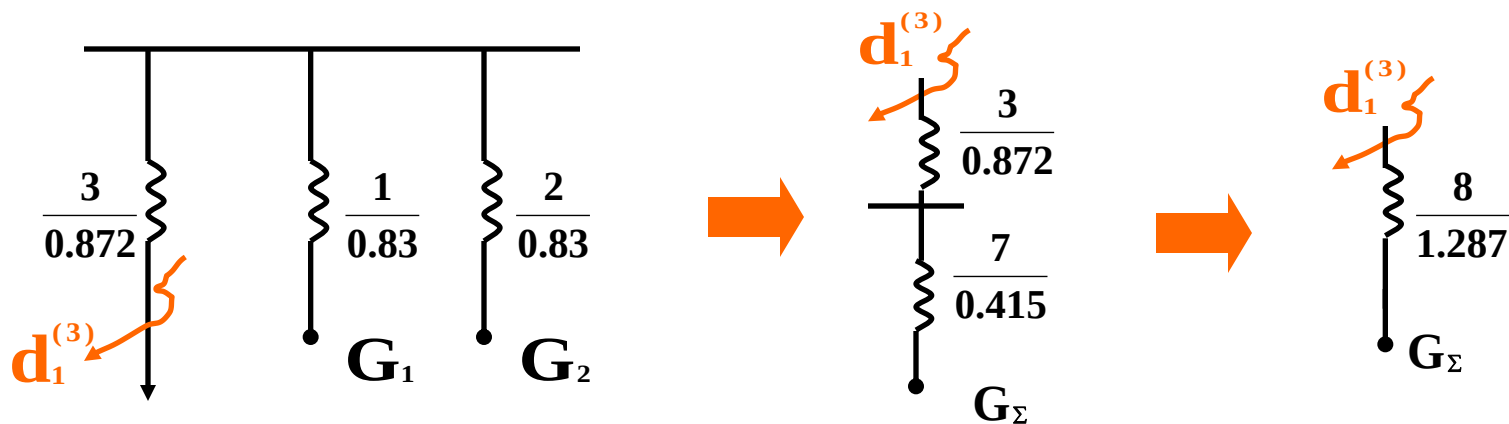
$$X_{13} = X_1 + X_3 + \frac{X_1 X_3}{X_2}$$

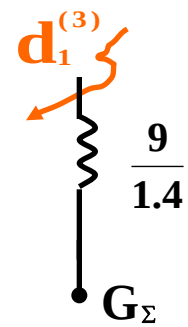
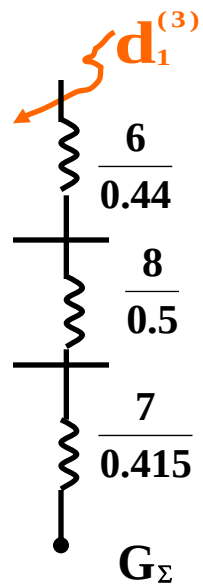
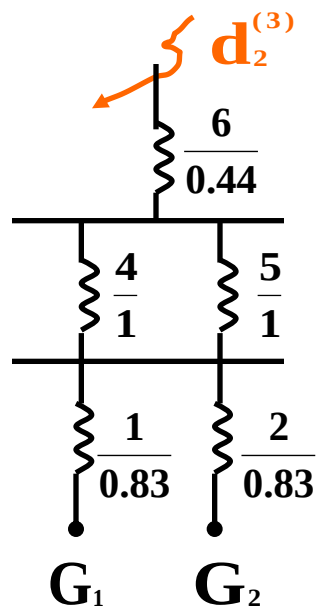
✓ 利用网络的对称性

对称性 { 网络的结构相同
电源一样
电抗参数相等
短路电流流向一致



例： d_1 ， d_2 发生短路时，计算短路回路的总电抗标么值





第五节 无限大容量电源供电系统三相短路电流计算

一、基本概念

1. 那种故障短路电流最大
2. 短路电流计算值

中性点接地：三相或单相

中性点不接地：三相

I'' —次暂态短路电流：周期分量起始 ($t=0$) 的有效值
用途：保护整定计算及校验断路器的额定断流容量

I_M —短路全电流的最大有效值
用途：校验电气设备的动稳定和断路器的额定断流量

i_M

当前无法显示此图像。

—三相短路冲击电流

用途：校验电气设备的动稳定

I_∞

—三相短路电流稳态有效值

用途：校验电气设备和载流体的热稳定性

在无限大容量, $I'' = I_{0.2} = I_\infty = I_{dz}$

二、有名制法

适用于： 1KV以下的低压系统和电压等级少、接线简单的高压系统

- 短路点所在电压级作为基本级
- 各元件的阻抗用变压器的近似变比归算到基本级，求出电源至短路点的总阻抗 Z_{Σ}

➤ 计及电阻时 $I_{d\Sigma} = \frac{U_{av}}{\sqrt{3}\sqrt{R_{d\Sigma}^2 + X_{d\Sigma}^2}}$ 不计电阻 $\longrightarrow$ $I_{d\Sigma} = \frac{U_{av}}{\sqrt{3}X_{d\Sigma}}$

- 计算冲击电流、最大有效值、断路器的短路容量

$$i_M = \sqrt{2}k_M I_{dz} \quad k_M=1.8 \text{ 时, } i_M = 2.55 I_{dz}$$

$$I_M = I_{dz} \sqrt{1 + 2(k_M - 1)^2} \quad k_M=1.8 \text{ 时, } I_M = 1.52 I_{dz}$$

$$S_d = \sqrt{3}U_{av} I_{dz}$$

三、标么值法

适用于： 多电压等级、接线复杂的高压系统

➤ 取基准值 S_B, U_{av} $I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3}U_B}$

➤ 计算短路电流周期分量标么值

$$I_{d\Sigma^*} = \frac{I_{dz}}{I_B} = \frac{\frac{U_{av}}{\sqrt{3}X_{d\Sigma}}}{\frac{U_B}{\sqrt{3}Z_B}} = \frac{\frac{U_{av}}{U_B}}{\frac{X_{d\Sigma}}{Z_B}} = \frac{1}{X_{d\Sigma^*}}$$

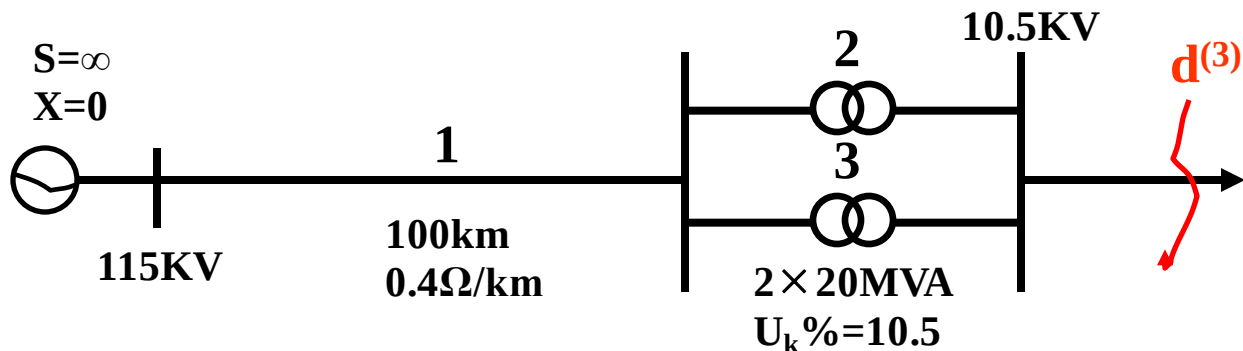
➤ 计算三相短路容量的标么值

$$S_{d^*} = \frac{S_d}{S_B} = \frac{\sqrt{3}U_{av}I_{dz}}{\sqrt{3}U_{av}I_B} = \frac{I_{dz}}{I_B} = I_{dz^*} = \frac{1}{X_{dz^*}}$$

➤ 计算有名值 $I_{d\Sigma} = \frac{I_B}{X_{d\Sigma^*}} \quad S_d = \frac{S_B}{X_{d\Sigma^*}}$

四、例题

如图所示电路发生三相短路，试分别用有名制法和标幺制法计算 I_{dz} 、 i_M 、 I_M 和 S_d ($K_M=1.8$)

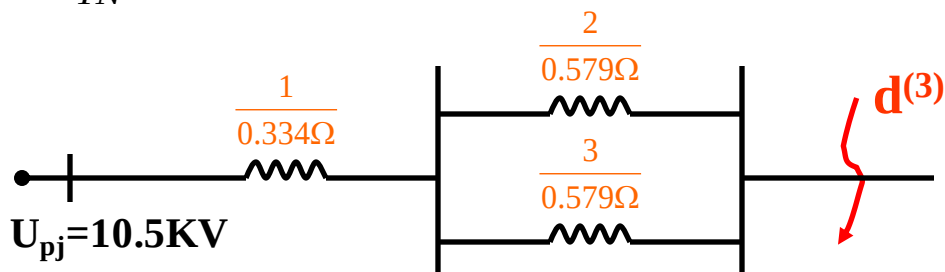


解：①有名制法：取10.5KV电压级为基本级

$$X_1' = 100 \times 0.4 = 40(\Omega) \Rightarrow X_1 = 40 \times \left(\frac{10.5}{115} \right)^2 = 0.334(\Omega)$$

$$X_2 = X_3 = \frac{U_k \%}{100} \frac{U_N^2}{S_{TN}} = \frac{10.5}{100} \frac{10.5^2}{20} = 0.579(\Omega)$$

等值电路



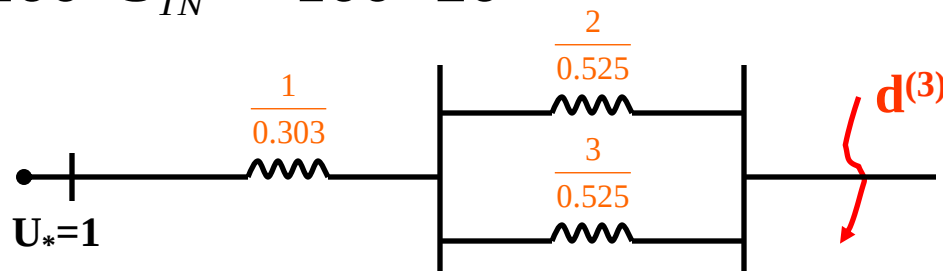
- 回路总阻抗 $X_{d\Sigma} = X_1 + X_2 / 2 = 0.334 + 0.289 = 0.623(\Omega)$
- 周期分量有效值 $I_{d\Sigma} = \frac{U_{av}}{\sqrt{3}X_{d\Sigma}} = \frac{10.5}{\sqrt{3} \times 0.623} = 9.73(KA)$
- 冲击电流 $i_M = 2.55I_{d\Sigma} = 2.55 \times 9.73 = 24.81(KA)$
- 全电流最大有效值 $I_M = 1.52I_{d\Sigma} = 1.52 \times 9.73 = 14.79(KA)$
- 短路容量 $S_d = \sqrt{3}U_{av}I_{dz} = \sqrt{3} \times 10.5 \times 9.73 = 176.9(MVA)$

② 标么制法：取 $S_B=100MVA$, $U_B=U_{av}$

$$X_{1*} = X_1 \frac{S_B}{U_B^2} = 0.4 \times 100 \times \frac{100}{115^2} = 0.303$$

$$X_{2*} = X_{3*} = \frac{U_k \%}{100} \frac{S_B}{S_{TN}} = \frac{10.5}{100} \frac{100}{20} = 0.525$$

等值电路



➤ 回路总阻抗标么值

$$X_{d\Sigma^*} = X_{1^*} + X_{2^*} / 2 = 0.303 + 0.525 / 2 = 0.566$$

➤ 周期分量有效值

标么值 $I_{d\Sigma^*} = \frac{1}{X_{d\Sigma^*}} = \frac{1}{0.566} = 1.767$

有名值 $I_{d\Sigma} = I_{d\Sigma^*} I_B = 1.767 \times \frac{100}{\sqrt{3} \times 10.5} = 9.72 \text{ (KA)}$

➤ 冲击电流 $i_M = 2.55 I_{d\Sigma} = 2.55 \times 9.72 = 24.79 \text{ (KA)}$

➤ 全电流最大有效值 $I_M = 1.52 I_{d\Sigma} = 1.52 \times 9.72 = 14.77 \text{ (KA)}$

➤ 短路容量 $S_d = I_{dz^*} S_M = 1.767 \times 100 = 176.7 \text{ (MVA)}$

第二章 同步发电机突然三相短路的分析

- 第一节 短路的一般概念
- 第二节 同步发电机突然三相短路后的物理过程及短路电流的近似分析
 - 第三节 同步发电机的基本方程
- 第四节 同步发电机的暂态参数和等效电路
- 第五节 同步发电机的次暂态参数和等效电路
- 第六节 自动励磁调节对短路电流的影响

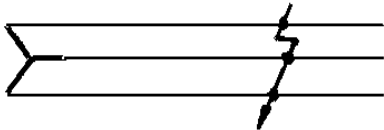
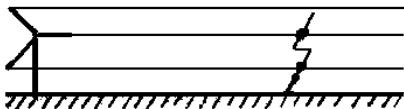
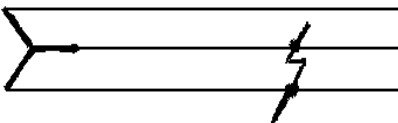
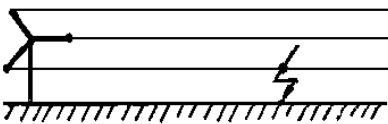
第一节 短路的一般概念

一、短路的原因、类型及后果

原因：

- ①元件损坏，例如绝缘材料的自然老化，设计、安装及维护不良所带来的设备缺陷发展成短路等；
- ②气象条件恶化，例如雷击造成的闪络放电或避雷器动作，架空线路由于大风或导线覆冰引起电杆倒塌等；
- ③人为事故，例如运行人员带负荷拉隔离开关，线路或设备检修后未拆除接地线就加上电压等；
- ④其他，例如鸟兽跨接在裸露的载流部分等

第一节 短路的一般概念

短路类型	示意图	符号
三相短路		$f^{(3)}$
两相接地短路		$f^{(1,1)}$
两相短路		$f^{(2)}$
单相接地短路		$f^{(1)}$

第一节 短路的一般概念

后果：

- (1) 短路电流产生的电动力损坏导体和电气设备
- (2) 短路电流发热烧毁设备
- (3) 短路电流产生电弧，引发火灾
- (4) 短路引起电压下降，影响用户供电，严重时发生电压崩溃
- (5) 短路会破坏电力系统稳定运行，造成大面积停电
- (6) 不对称短路产生零序电流，干扰通讯线路
- (7) 不对称短路产生的负序电流损害电机

第一节 短路的一般概念

二、短路计算的作用和若干简化假设

作用：

- (1) 选择电气设备
- (2) 合理配置继电保护和自动装置并正确整定其参数
- (3) 在设计电力系统电气主接线时，确定是否需要采取限制短路电流的措施
- (4) 进行暂态稳定计算、研究短路对用户工作的影响

第一节 短路的一般概念

假设：

- (1) 忽略磁路饱和、磁滞、涡流等的影响
- (2) 电机转子的结构分别相对于直轴和交轴对称
- (3) 定子的三相绕组的空间位置互差120电角度，在结构上完全相同，它们均在气隙中产生正弦分布的磁动势。
- (4) 电机空载、转子恒速旋转时，转子绕组的磁动势在定子绕组所感应的空载电动势是时间的正弦函数
- (5) 定子和转子的槽和通风沟不影响定子和转子的电感

第二节 同步发电机突然三相短路后的物理过程及短路电流近似分析

影响电力系统动态特性的最主要元件是同步发电机，不充分了解同步发电机的特性，谈论电力系统的特性是完全无意义的。

——关根泰次

本节在实测的短路电流波形基础上，应用同步发电机的**双反应原理**和超导回路的**磁链守恒原理**，对短路后的物理过程和短路电流的表达式作近似分析。

第二节 同步发电机突然三相短路后的物理过程及短路电流近似分析

一、空载时突然三相短路的电流波形

假设：

发电机转子保持同步转速，即频率保持恒定

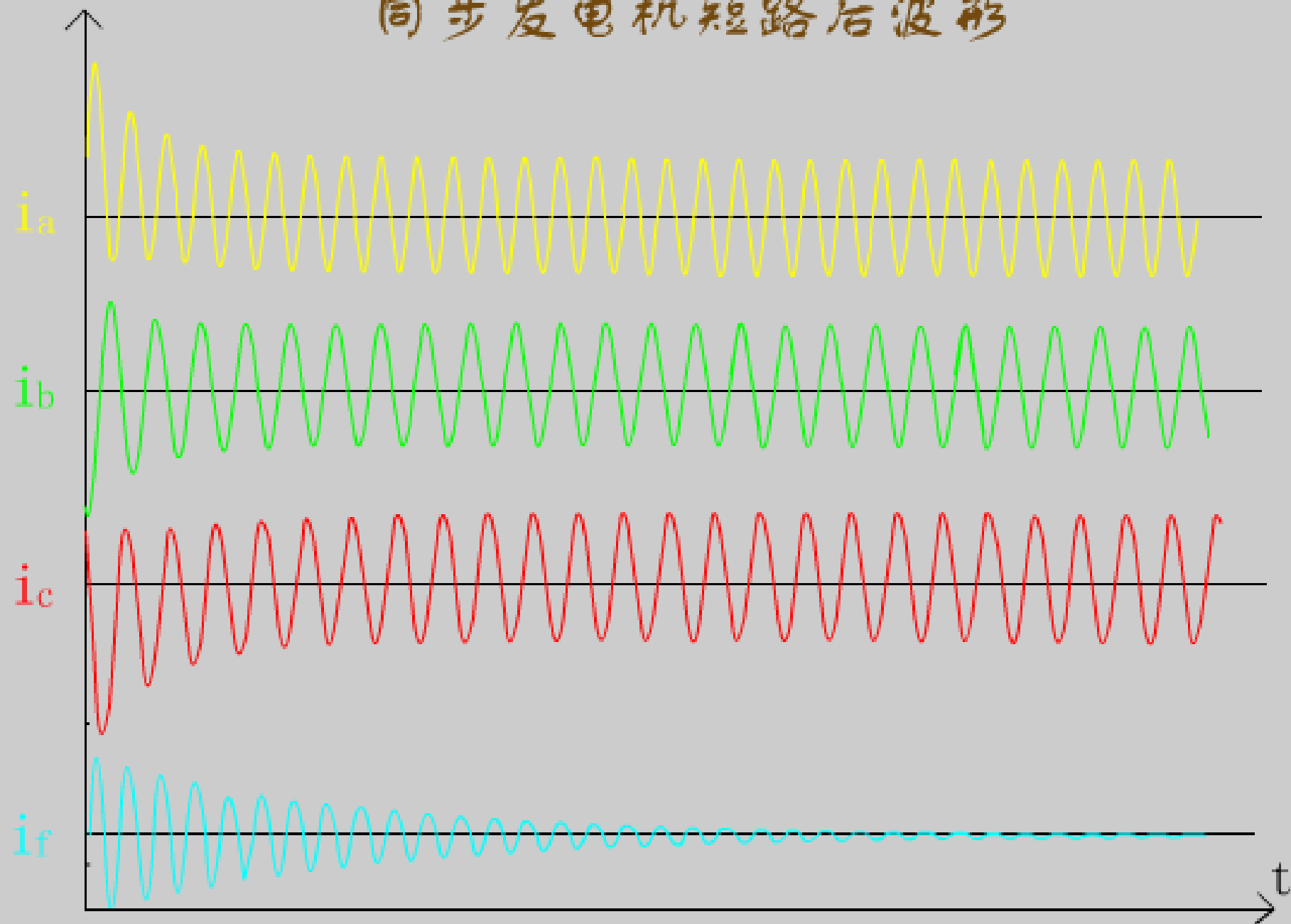
短路条件：

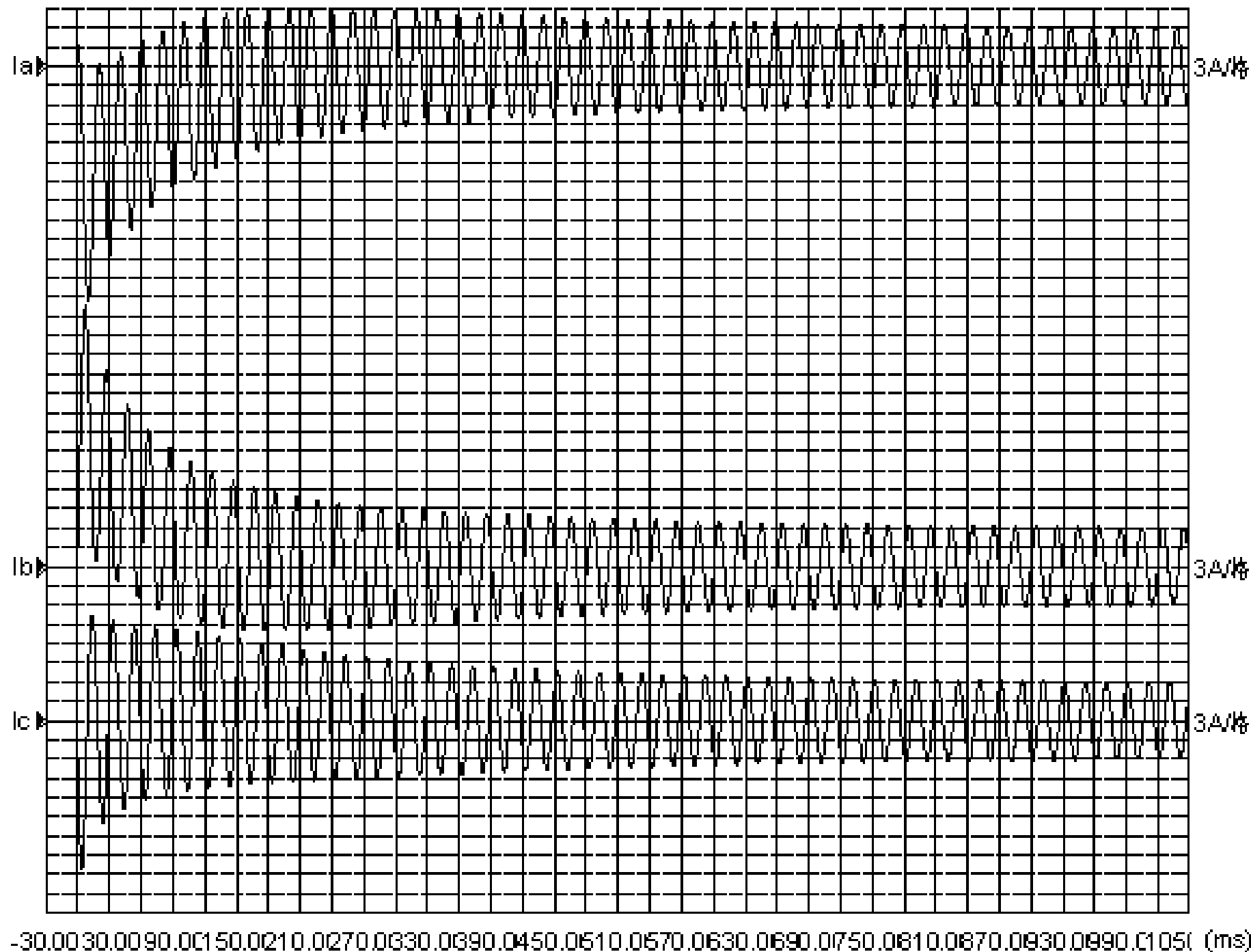
同步发电机转子有励磁电流

定子回路开路即空载

定子三相绕组端部突然三相短路

同步发电机短路后波形





1 波形分析

定子电流：

直流分量：三相短路电流包络线，下图所示，三相大小不等，但以同样时间常数衰减

交流分量：包含两个衰减时间常数 T_d' , T_d'' .

励磁电流：

直流分量：衰减常数与定子交流分量相同 T_d' , T_d''

交流分量：衰减常数与定子直流分量相同 T_a

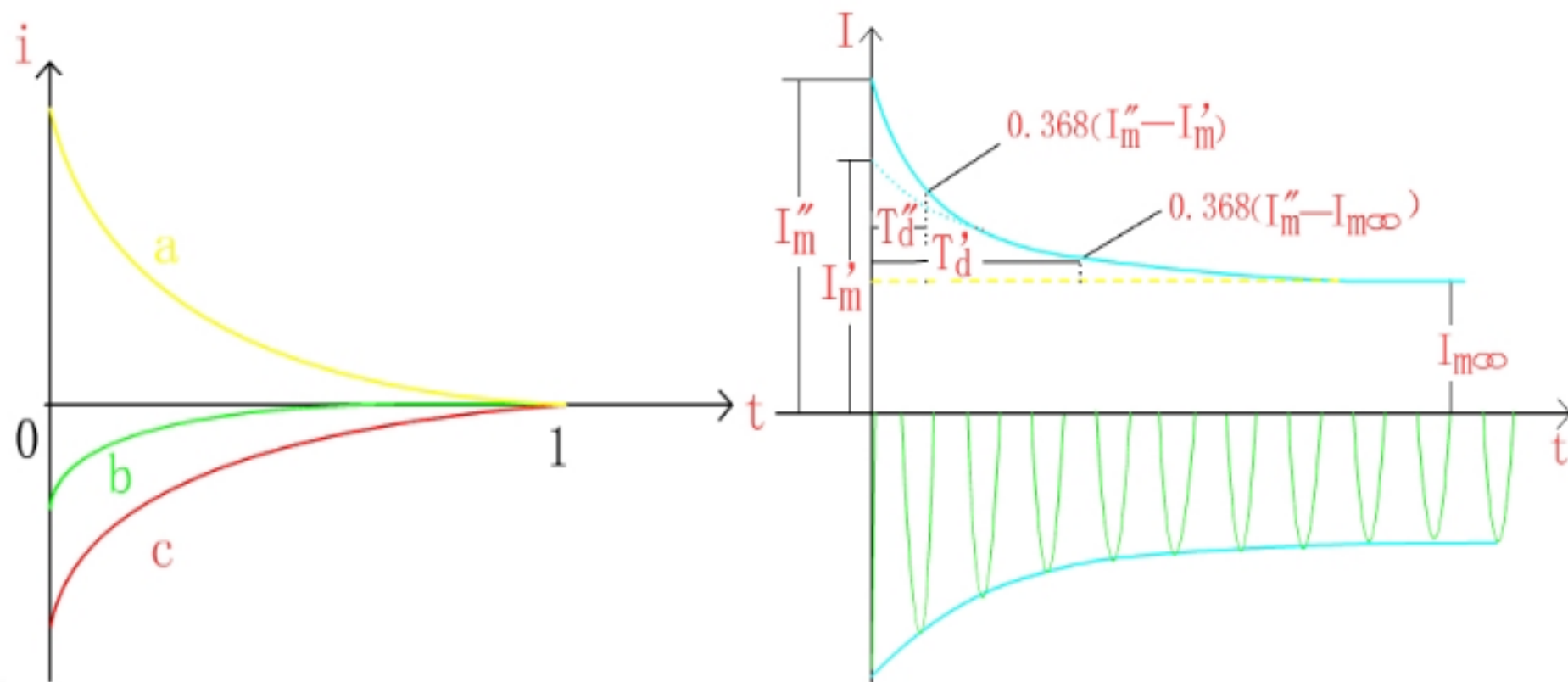


图 1-3 主磁通空间位置

第二节 同步发电机突然三相短路后的物理过程及短路电流近似分析

(一) 定子短路电流分量

$$\psi_{a0} = \psi_0 \cos \theta$$

$$\psi_{b0} = \psi_0 \cos(\theta - 120^\circ)$$

$$\psi_{c0} = \psi_0 \cos(\theta + 120^\circ)$$

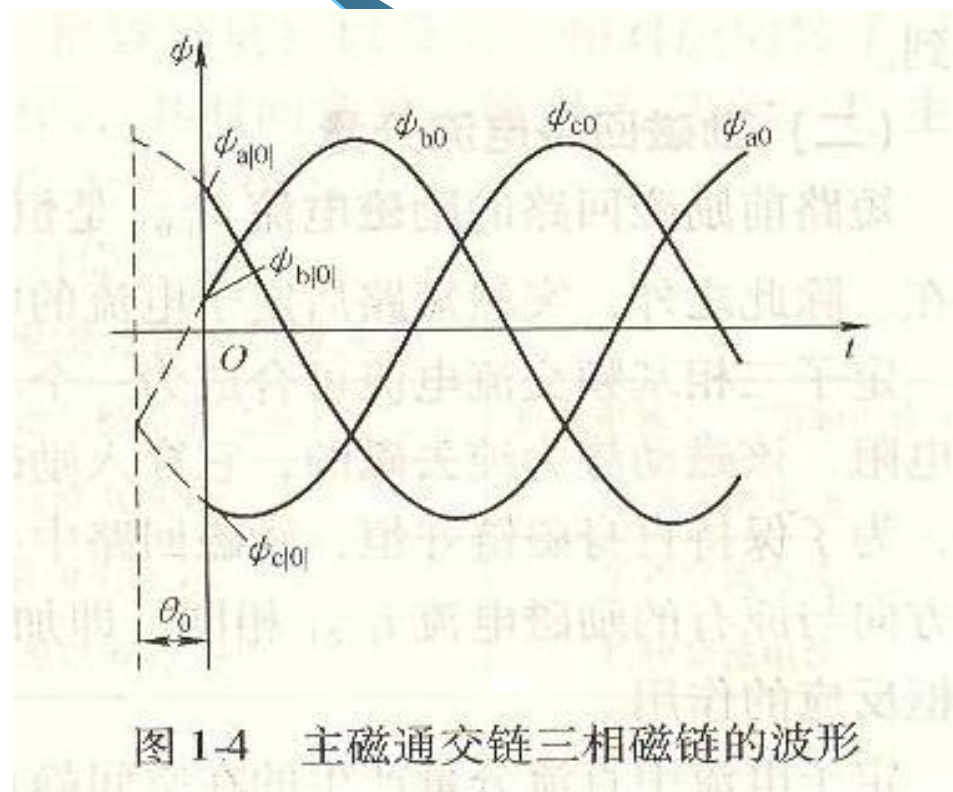
θ 随着时间的变化而变化



第二节 同步发电机突然三相短路后的物理过程及短路电流近似分析

$$\left. \begin{aligned} \psi_{a0} &= \psi_0 \cos(\theta_0 + \omega_0 t) \\ \psi_{b0} &= \psi_0 \cos(\theta_0 + \omega_0 t - 120^\circ) \\ \psi_{c0} &= \psi_0 \cos(\theta_0 + \omega_0 t + 120^\circ) \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \psi_{a|0|} &= \psi_0 \cos \theta_0 \\ \psi_{b|0|} &= \psi_0 \cos(\theta_0 - 120^\circ) \\ \psi_{c|0|} &= \psi_0 \cos(\theta_0 + 120^\circ) \end{aligned} \right\}$$



第二节 同步发电机突然三相短路后的物理过程及短路电流近似分析

短路后定子产生短路电流，短路电流产生相应磁链

$$\psi_{ai} \quad \psi_{bi} \quad \psi_{ci}$$

$$\left. \begin{aligned} \psi_{ai} + \psi_{a0} &= \psi_{a|0|} \\ \psi_{bi} + \psi_{b0} &= \psi_{b|0|} \\ \psi_{ci} + \psi_{c0} &= \psi_{c|0|} \end{aligned} \right\}$$

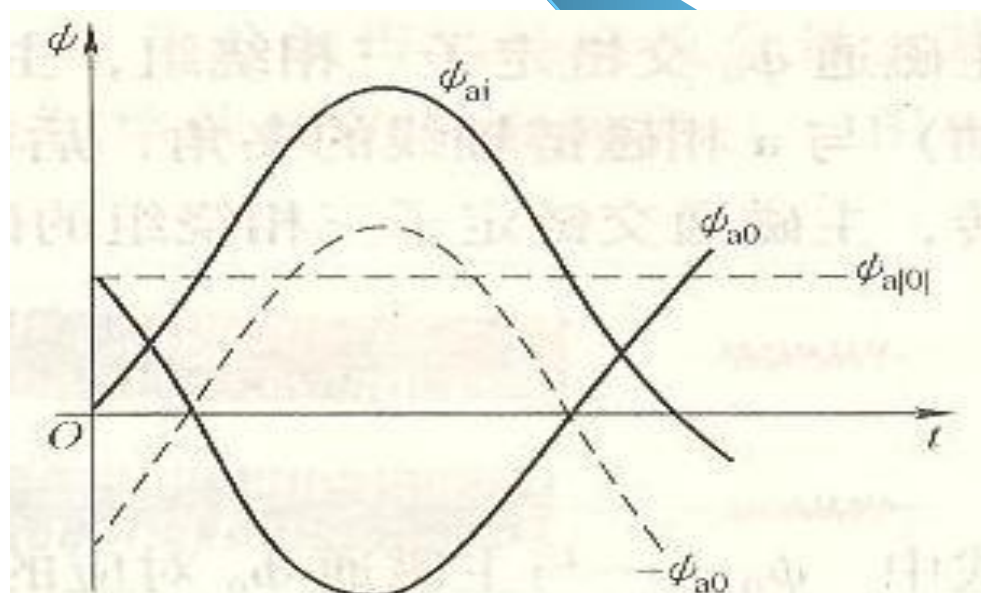


图 1-5 a 相电流应产生的磁链

第二节 同步发电机突然三相短路后的物理过程及短路电流近似分析

磁链分析结论：

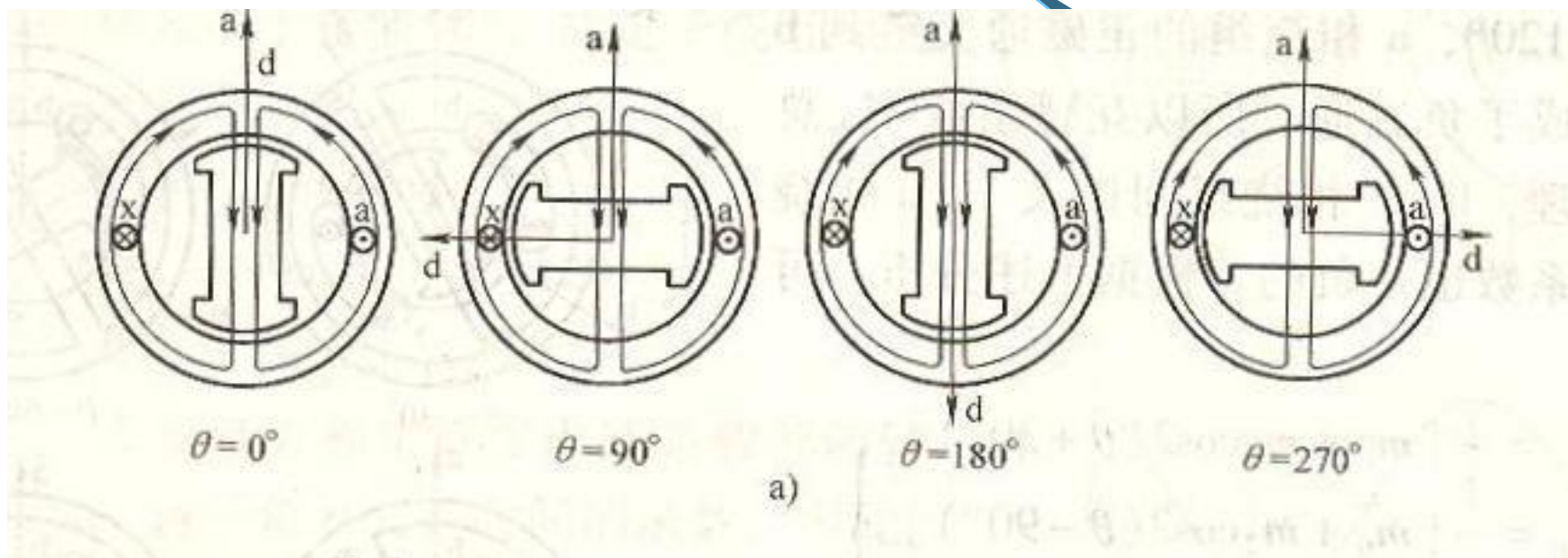
短路后定子绕组含有两个磁链 **交流磁链、直流磁链**

交流磁链 $\longrightarrow$ 基频交流电流

直流磁链 $\longrightarrow$ 直流电流 + 2倍频交流电流

定子回路：
基频交流电流
直流电流
2倍频交流电流

第二节 同步发电机突然三相短路后的物理过程及短路电流近似分析



$$r = R_0 + R_2 \sin 2\omega_0 t$$

$$i = aR_0 + aR_2 \sin 2\omega_0 t$$

第二节 同步发电机突然三相短路后的物理过程及短路电流近似分析

(二) 励磁回路电流分量

短路前励磁回路的励磁电流为 $i_{f|0|}$

突然短路后定子电流的电枢反应将引起励磁回路感生其他电流分量

短路后定子电流的电枢反应将使励磁回路感生其他电流分量

定子回路：
基频交流电流
直流电流
2倍频交流电流

第二节 同步发电机突然三相短路后的物理过程及短路电流近似分析

定子基频交流电流



与转子同步旋转的电枢反应磁动势



磁链守恒

励磁回路感生附加直流电流分量

第二节 同步发电机突然三相短路后的物理过程及短路电流近似分析

定子直流电流



空间静止磁场（与转子相对转速为同步速）



磁链守恒

励磁回路感生基频交流电流分量

第二节 同步发电机突然三相短路后的物理过程及短路电流近似分析

定子2倍频交流电流



2倍同步转速旋转磁场（与转子相对转速为同步速）



磁链守恒

励磁回路感生基频交流电流分量

第二节 同步发电机突然三相短路后的物理过程及短路电流近似分析

励磁回路: $\dot{i}_{f|0|}$ 励电流
附加直流电流
基频交流电流

(三) 阻尼回路电流分量

等效阻尼绕组D: 与励磁绕组同轴向

等效阻尼绕组Q: 与励磁绕组轴向垂直

D绕组: 附加直流电流
基频交流电流

Q绕组: 基频交流电流

第二节 同步发电机突然三相短路后的物理过程及短路电流近似分析

(四) 定子、转子回路电流分量对应关系与衰减

定子：基频交流电流
直流电流
2倍频交流电流

励磁：励磁电流
附加直流电流
基频交流电流

D绕组：附加直流电流
基频交流电流

Q绕组：基频交流电流

第二节 同步发电机突然三相短路后的物理过程及短路电流近似分析

定子: 基频交流电流
直流电流
2倍频交流电流

励磁: 励磁电流
附加直流电流
基频交流电流

两个衰减过程
 T'_d 、 T''_d

一个衰减过程
 T_a

D绕组: 附加直流电流
基频交流电流

Q绕组: 基频交流电流

第二节 同步发电机突然三相短路后的物理过程及短路电流近似分析

定子回路	稳态短路电流 I_∞	基频交流电流初始与稳态值之差 $I'' - I_\infty$	直流电流 i_a 二倍频电流 $i_{2\omega}$
励磁回路	励磁电流 $i_{f 0 }$	自由直流电流 i_{fa}	基频交流电流 $i_{f\omega}$
阻尼回路D		自由直流电流 i_{Da}	基频交流电流 $i_{D\omega}$
阻尼回路Q		自由直流电流 $i_{Qa} \approx 0$	基频交流电流 $i_{Q\omega}$

第二节 同步发电机突然三相短路后的物理过程及短路电流近似分析

三、空载短路电流基频交流分量的初始和稳态有效值

(一) 稳态值

$$I_{\infty} = I_{d\infty} = E_{q|0|} / X_d$$

$E_{q|0|}$ ——对应励磁电流 $i_{f|0|}$ 的空载电动势有效值

X_d ——直轴同步电抗 $X_d = X_{\sigma} + X_{ad}$

(二) 初始值

1. 不计阻尼回路时基频交流分量初始值 I'

I' 产生的定子漏磁通

ϕ'_0

$\dot{i}_{fa}$

产生的主磁通增量

$\phi_0 + \Delta\phi_0$

ϕ_R

I' 产生的电枢反应磁通

$\dot{i}_{f|0|}$

产生的主磁通

U_f

$\dot{i}_{f|0|} + \dot{i}_{fa}$

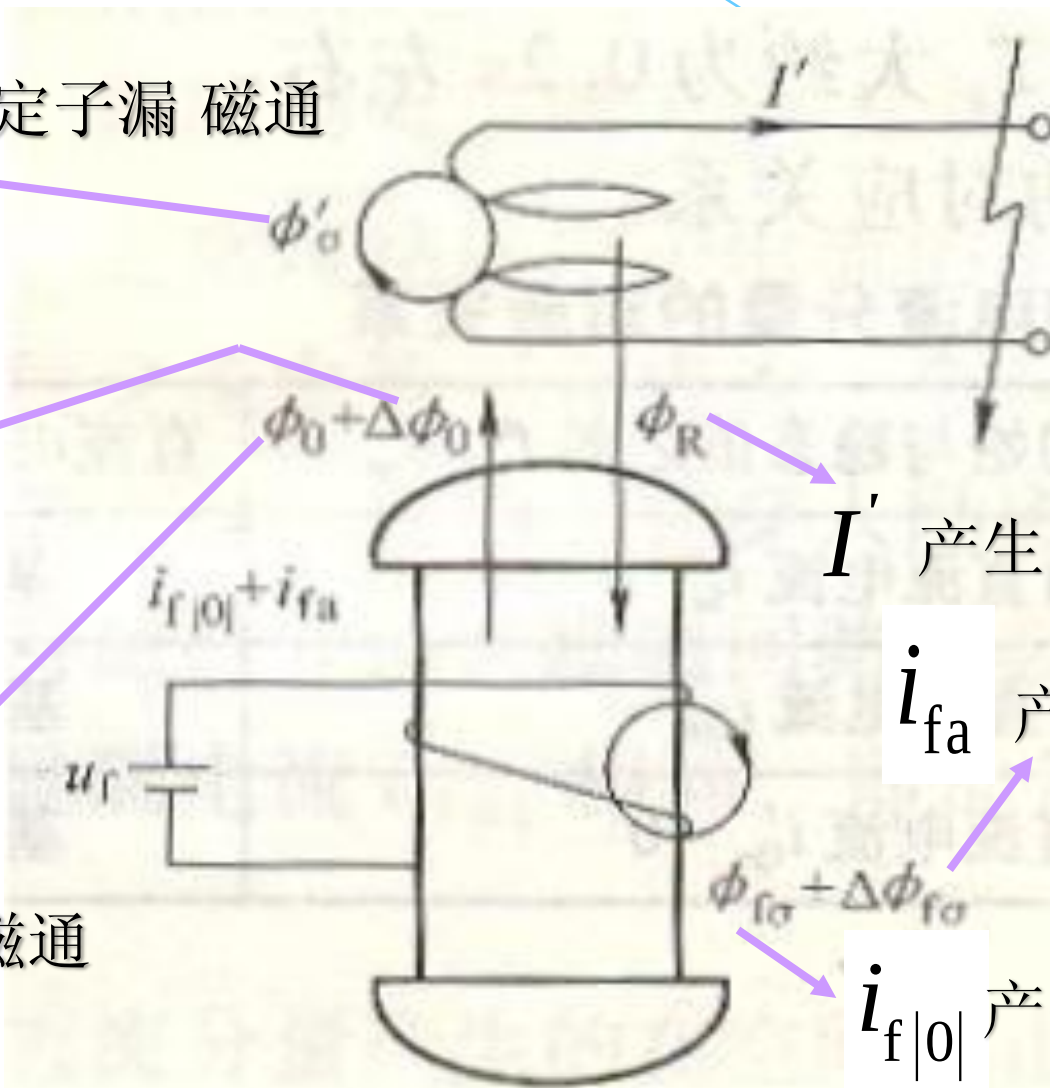
$\dot{i}_{fa}$

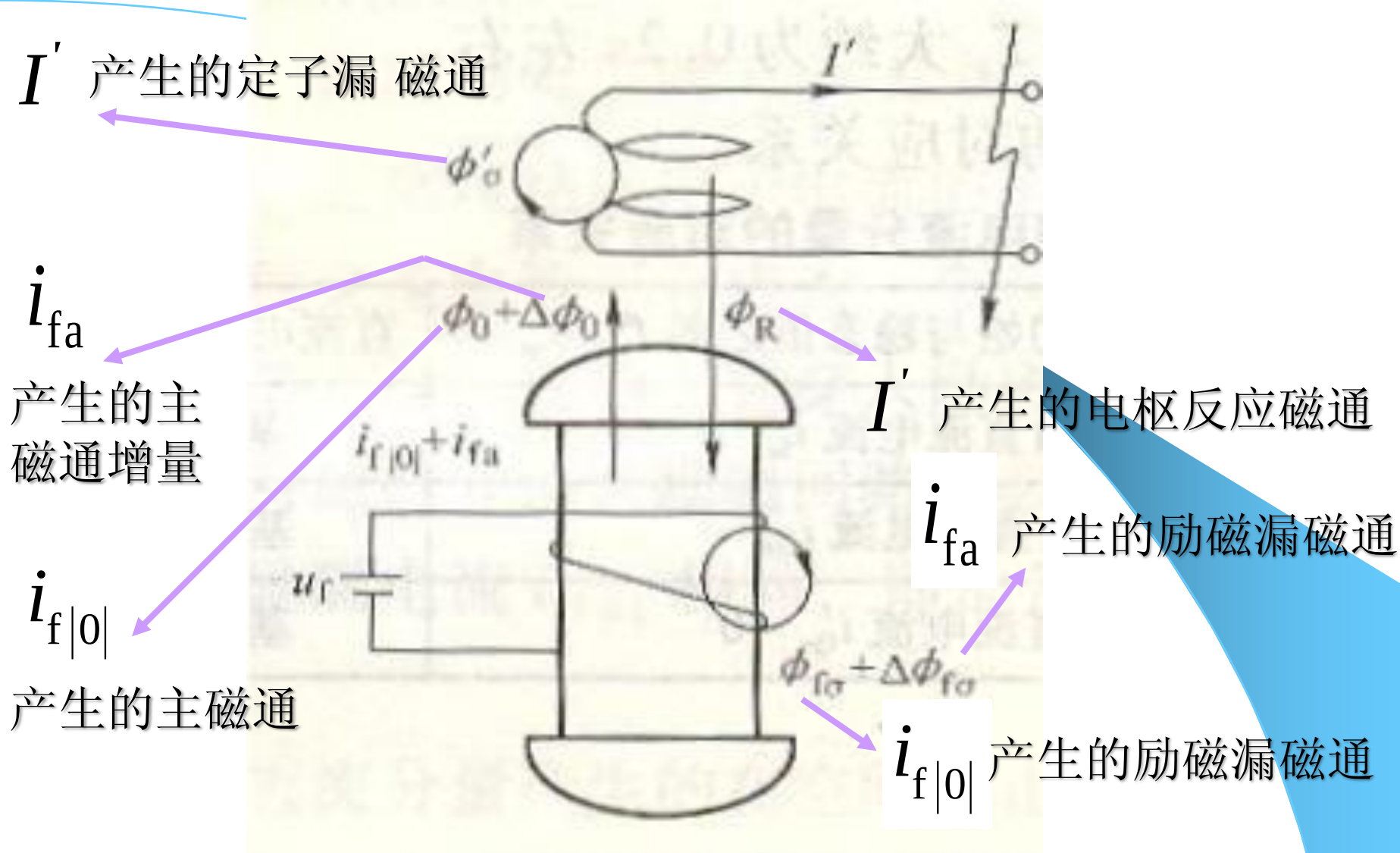
产生的励磁漏磁通

$\phi_{f\sigma} + \Delta\phi_{f\sigma}$

$\dot{i}_{f|0|}$

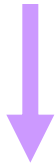
产生的励磁漏磁通





励磁绕组磁链守恒 $\Delta\phi_0 + \Delta\phi_{f\sigma} = \phi_R$

产生空载电动势 E_{q0}

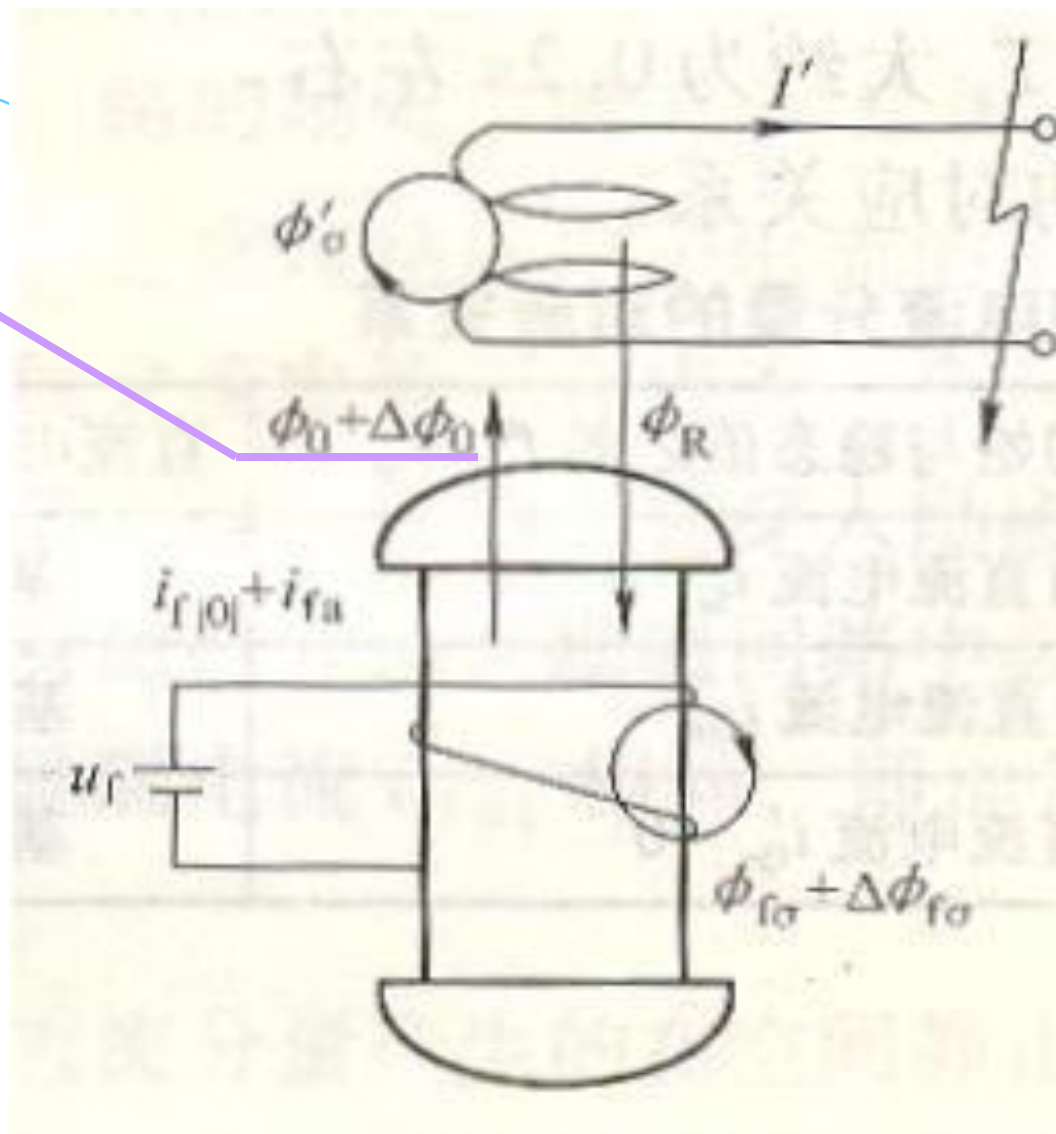


$$I' = I'_d = E_{q0} / X_d$$

$$I_\infty = I_{d\infty} = E_{q|0|} / X_d$$

$$E_{q0} > E_{q|0|}$$

E_{q0} 计算困难



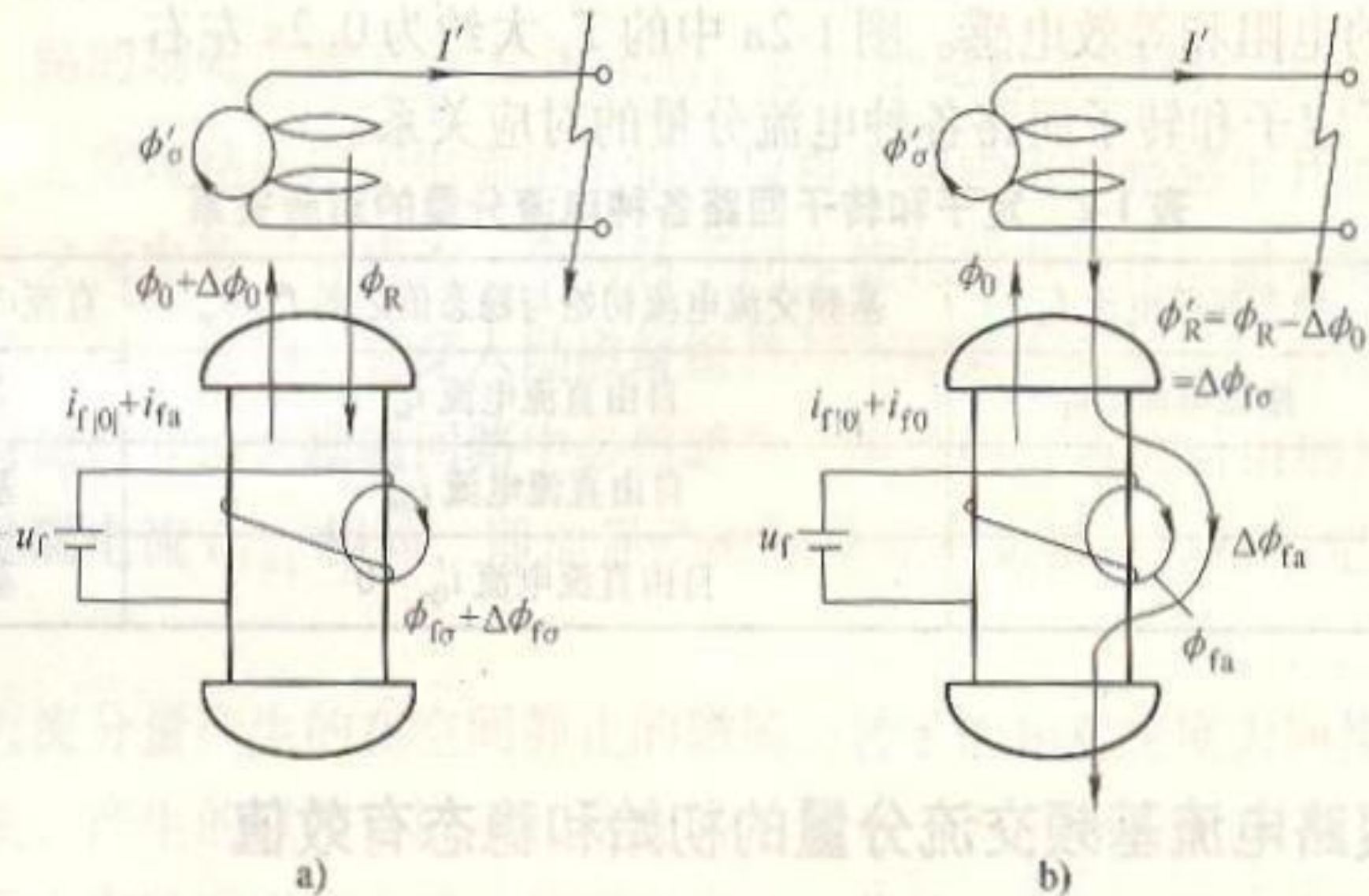


图 1-6 短路瞬时定子基频交流和励磁回路直流分量的磁通

a) 主磁通增加 b) 电枢反应走漏磁路径

产生空载电动势 $E_{q|0|}$

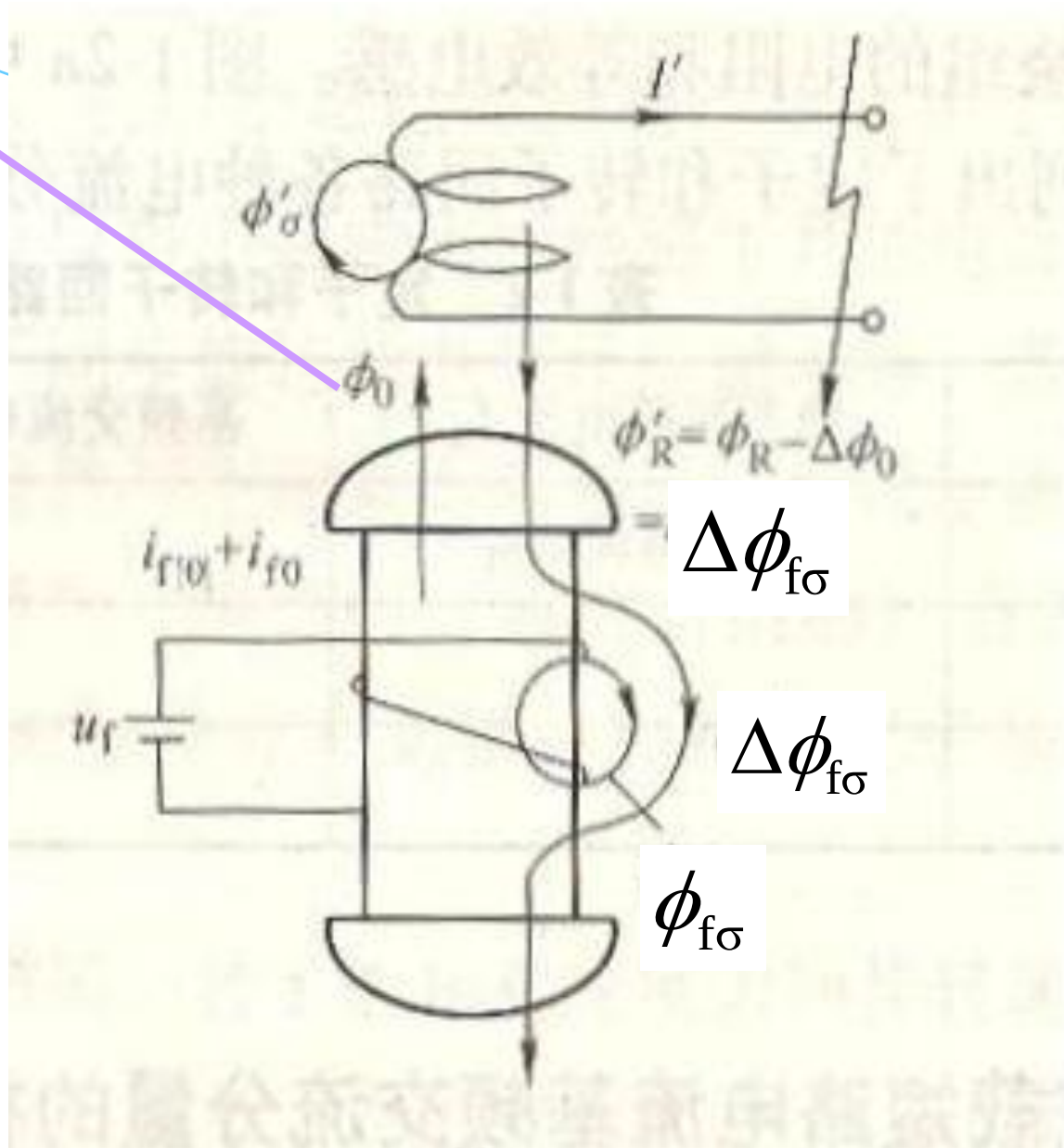


$$I' = I'_d = E_{q|0|} / X'_d$$

$$I_\infty = I_{d\infty} = E_{q|0|} / X_d$$

$$X'_d = X_\sigma + X'_{ad}$$

$$X'_d < X_d$$



第二节 同步发电机突然三相短路后的物理过程及短路电流近似分析

2. 计及阻尼回路时基频交流分量初始值 I''

磁通平衡关系

$$\left. \begin{aligned} \Delta\phi_0 + \Delta\phi_{f\sigma} &= \phi_R \\ \Delta\phi_0 + \Delta\phi_{D\sigma} &= \phi_R \end{aligned} \right\}$$

$$I'' = I_d'' = E_{q|0|} / X_d''$$

$$X_d'' = X_\sigma + X_{ad}'' \quad X_d'' < X_d' < X_d$$

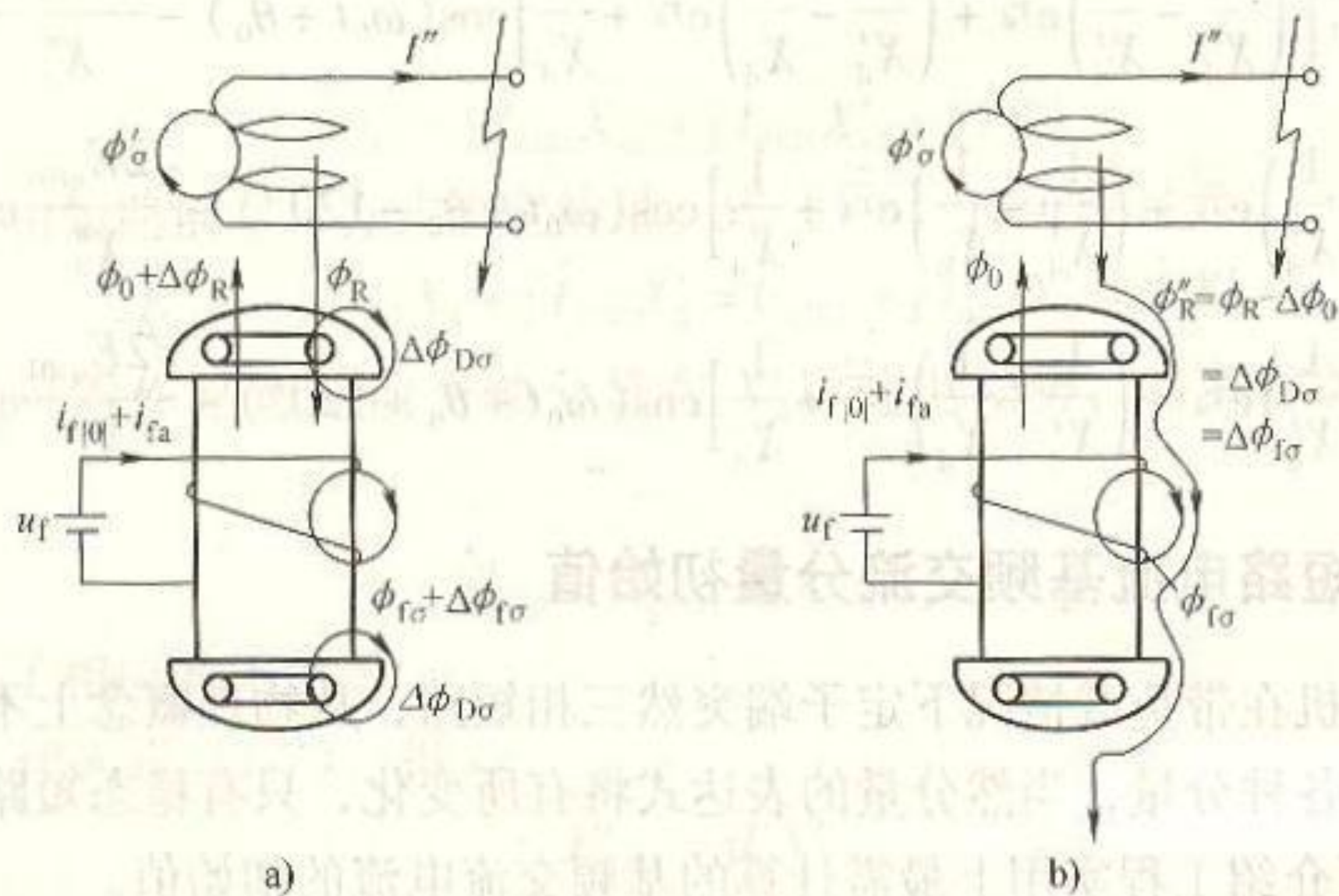


图 1-7 计及阻尼回路后的磁通

a) 主磁通增加 b) 电枢反应走漏磁路径

第二节 同步发电机突然三相短路后的物理过程及短路电流近似分析

当短路不是发生在发电机端，而是发生在外电路电抗 X 之后时
短路电流计算公式仍然适用，只是须对电抗进行修正

$$X_d \longrightarrow X_d + X$$

$$X'_d \longrightarrow X'_d + X$$

$$X''_d \longrightarrow X''_d + X$$

第二节 同步发电机突然三相短路后的物理过程及短路电流近似分析

当 X 很大时, 显然

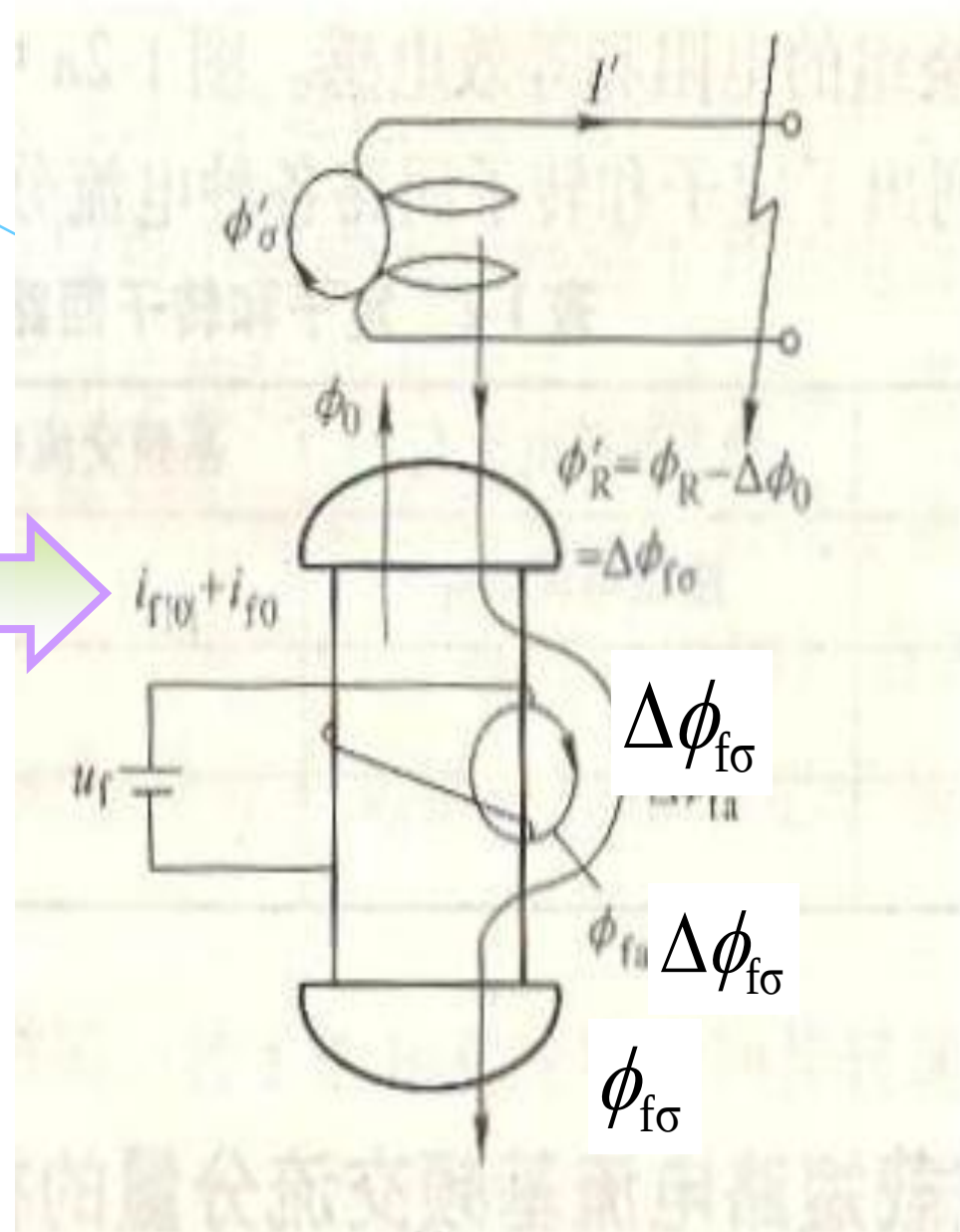
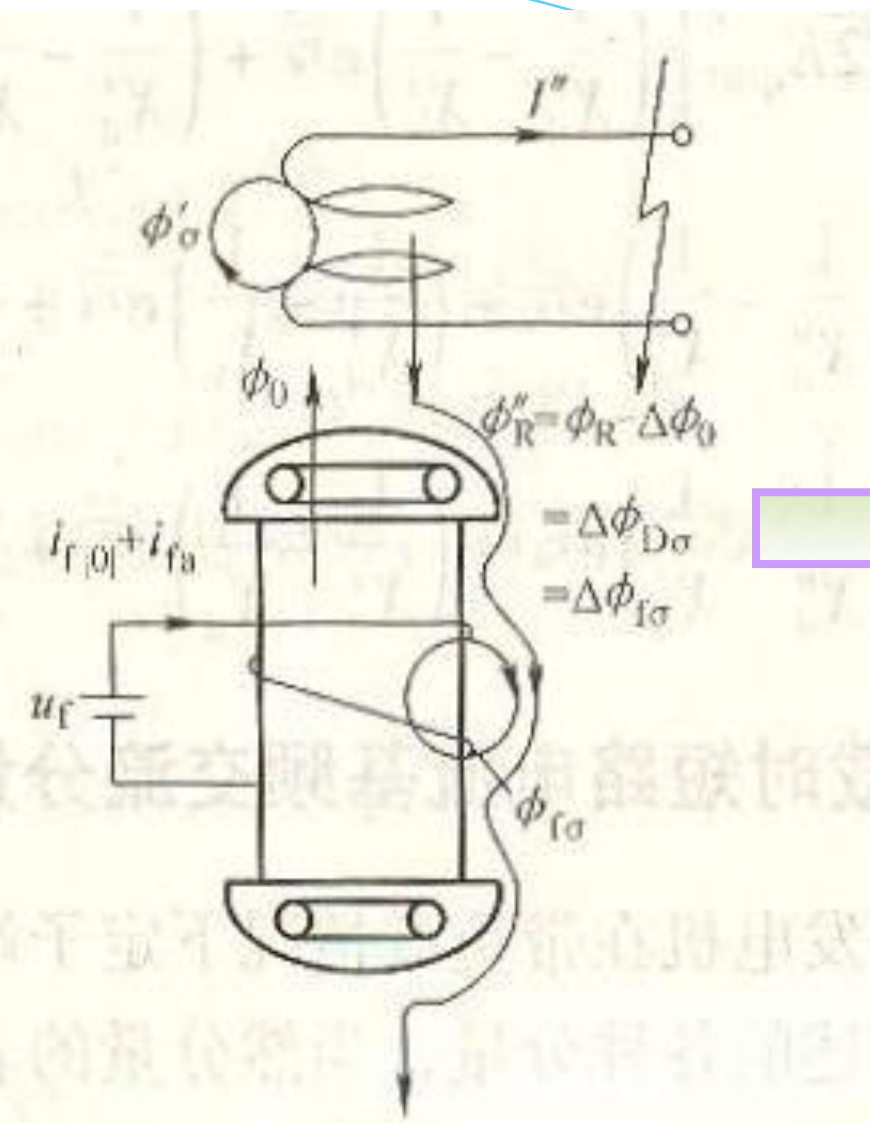
$$X_d + X \approx X'_d + X \approx X''_d + X \approx X$$

$$I_\infty = I_{d\infty} = E_{q|0|} / X_d$$

$$I' = I'_d = E_{q|0|} / X'_d$$

$$I'' = I''_d = E_{q|0|} / X''_d$$

$$\longrightarrow I'' \approx I' \approx I_\infty$$



变化过程

I''



I'



I_∞

第二节 同步发电机突然三相短路后的物理过程及短路电流近似分析

四、空载短路电流的近似表达式

(一) 基频交流分量的近似表达式

基频交流电流幅值

$$I_m(t) = \sqrt{2} E_{q|0} \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{-t/T_d''} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{-t/T_d'} + \frac{1}{X_d} \right]$$

三相交流基频电流瞬时值

$$\left. \begin{aligned} i_{pa}(t) &= I_m(t) \cos(\theta_0 + \omega_0 t) \\ i_{pb}(t) &= I_m(t) \cos(\theta_0 + \omega_0 t - 120^\circ) \\ i_{pc}(t) &= I_m(t) \cos(\theta_0 + \omega_0 t + 120^\circ) \end{aligned} \right\}$$

第二节 同步发电机突然三相短路后的物理过程及短路电流近似分析

(二) 全电流的近似表达式

$$i_a = \sqrt{2}E_{q|0|} \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{\frac{-t}{T_d''}} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{\frac{-t}{T_d'}} + \frac{1}{X_d} \right] \cos(\omega_0 t + \theta_0) \\ - \frac{\sqrt{2}E_{q|0|}}{X_d''} \cos \theta_0 e^{\frac{-t}{T_a}}$$

第二节 同步发电机突然三相短路后的物理过程及短路电流近似分析

五、负载时短路电流基频交流分量初始值

不计阻尼回路

$$I' = E'_{q|0|} / X'_d$$

计及阻尼回路

$$\dot{I}''_d = \dot{E}''_{q|0|} / jX''_d$$

$$\dot{I}''_q = \dot{E}''_{d|0|} / jX''_q$$

第二节 同步发电机突然三相短路后的物理过程及短路电流近似分析

虚构次暂态电动势

$$\dot{E}_{|0|}'' = \dot{U}_{|0|} + j \dot{I}_{|0|} X_d''$$



$$I'' = E_{|0|}'' / X_d''$$



$$I'' = 1 / X_d''$$

第二节 同步发电机突然三相短路后的物理过程及短路电流近似分析

负载短路电流与空载短路电流的比较

空载

$$I' = I'_d = E_{q|0|} / X'_d$$

$$I'' = I''_d = E_{q|0|} / X''_d$$

负载

$$I' = E'_{q|0|} / X'_d$$

$$I'' = E''_{|0|} / X''_d$$

结论：负载短路电流小于空载短路电流

第三节 同步发电机的基本方程

一、电压方程和磁链方程

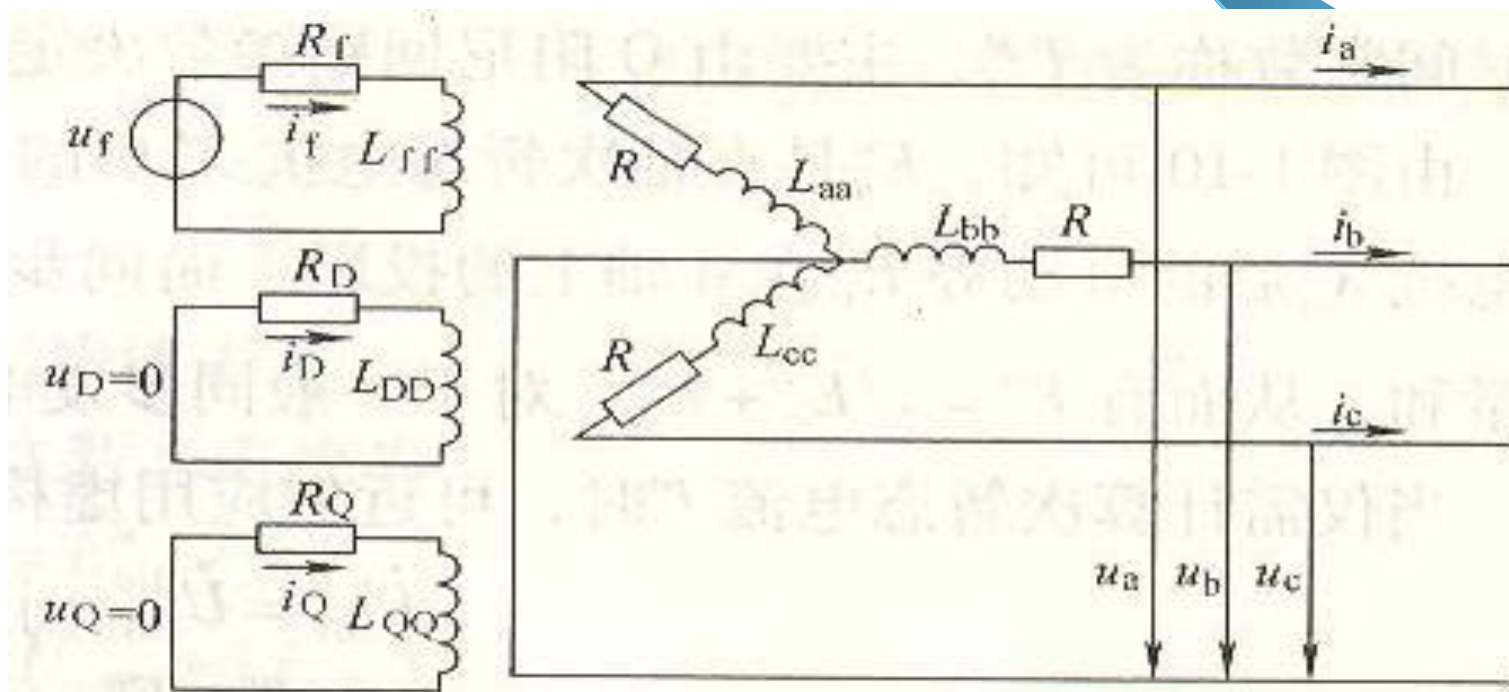


图 1-11 同步发电机的回路（图中未标互感）

电压方程

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \\ \dots \\ u_f \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & & & \vdots & & & \\ & R & & \vdots & & 0 & \\ & & R & \vdots & & & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & & & \vdots & R_f & & \\ & 0 & & \vdots & & R_D & \\ & & & \vdots & & & R_Q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\dot{i}_a \\ -\dot{i}_b \\ -\dot{i}_c \\ \dots \\ \dot{i}_f \\ \dot{i}_D \\ \dot{i}_Q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{\psi}_a \\ \dot{\psi}_b \\ \dot{\psi}_c \\ \dots \\ \dot{\psi}_f \\ \dot{\psi}_D \\ \dot{\psi}_Q \end{pmatrix}$$

磁链方程

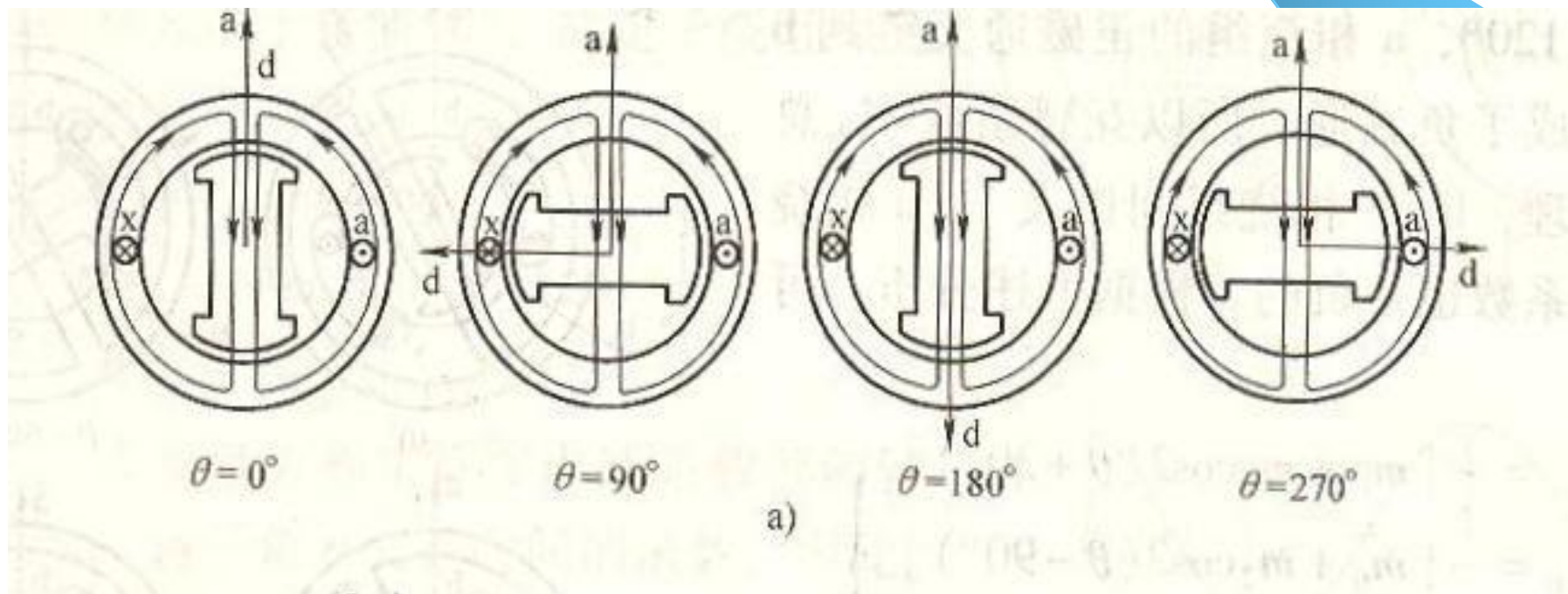
$$\begin{pmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \dots \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} & \vdots & M_{af} & M_{aD} & M_{aQ} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} & \vdots & M_{bf} & M_{bD} & M_{bQ} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} & \vdots & M_{cf} & M_{cD} & M_{cQ} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_{fa} & M_{fb} & M_{fc} & \vdots & L_{ff} & M_{fD} & M_{fQ} \\ M_{Da} & M_{Db} & M_{Dc} & \vdots & M_{Df} & L_{DD} & M_{DQ} \\ M_{Qa} & M_{Qb} & M_{Qc} & \vdots & M_{Qf} & M_{QD} & L_{QQ} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -i_a \\ -i_b \\ -i_c \\ \dots \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix}$$

第三节 同步发电机的基本方程

二、电感系数

(一) 定子各相绕组的自感系数

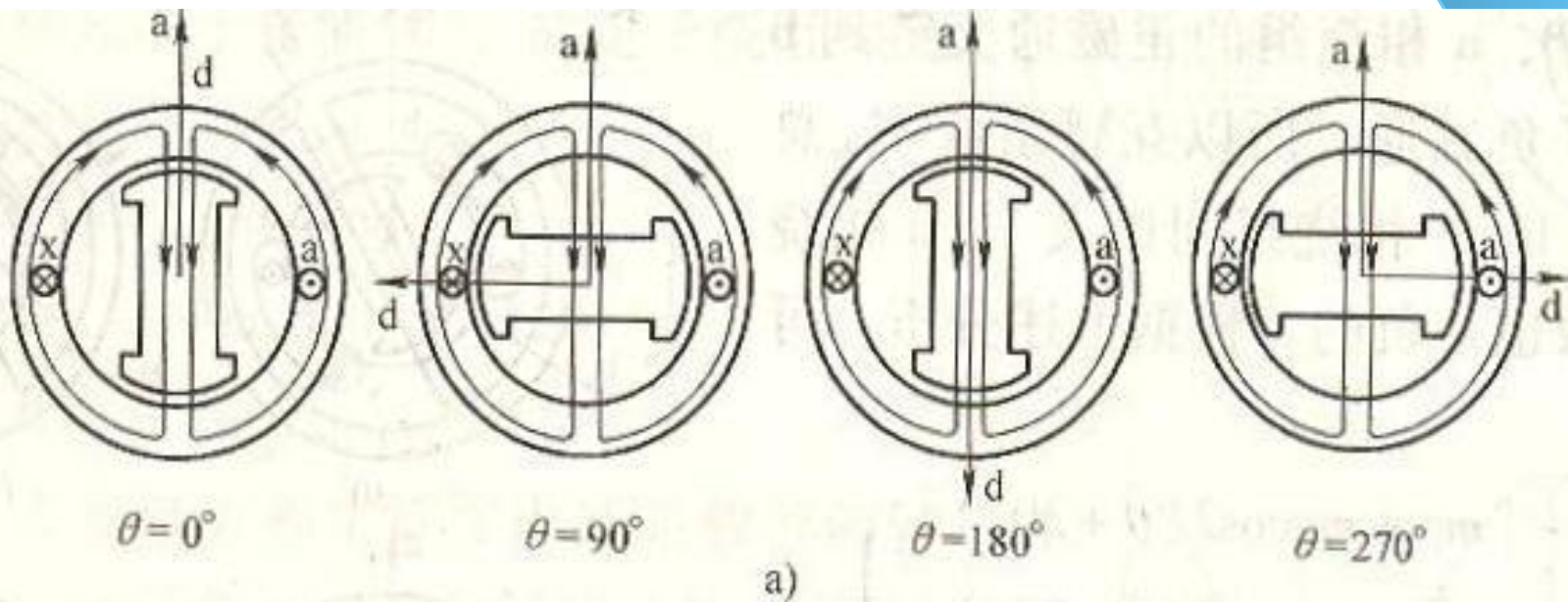
$$L_{aa} \quad L_{bb} \quad L_{cc}$$



第三节 同步发电机的基本方程

自感系数是 θ 角的周期函数，其变化周期为 π

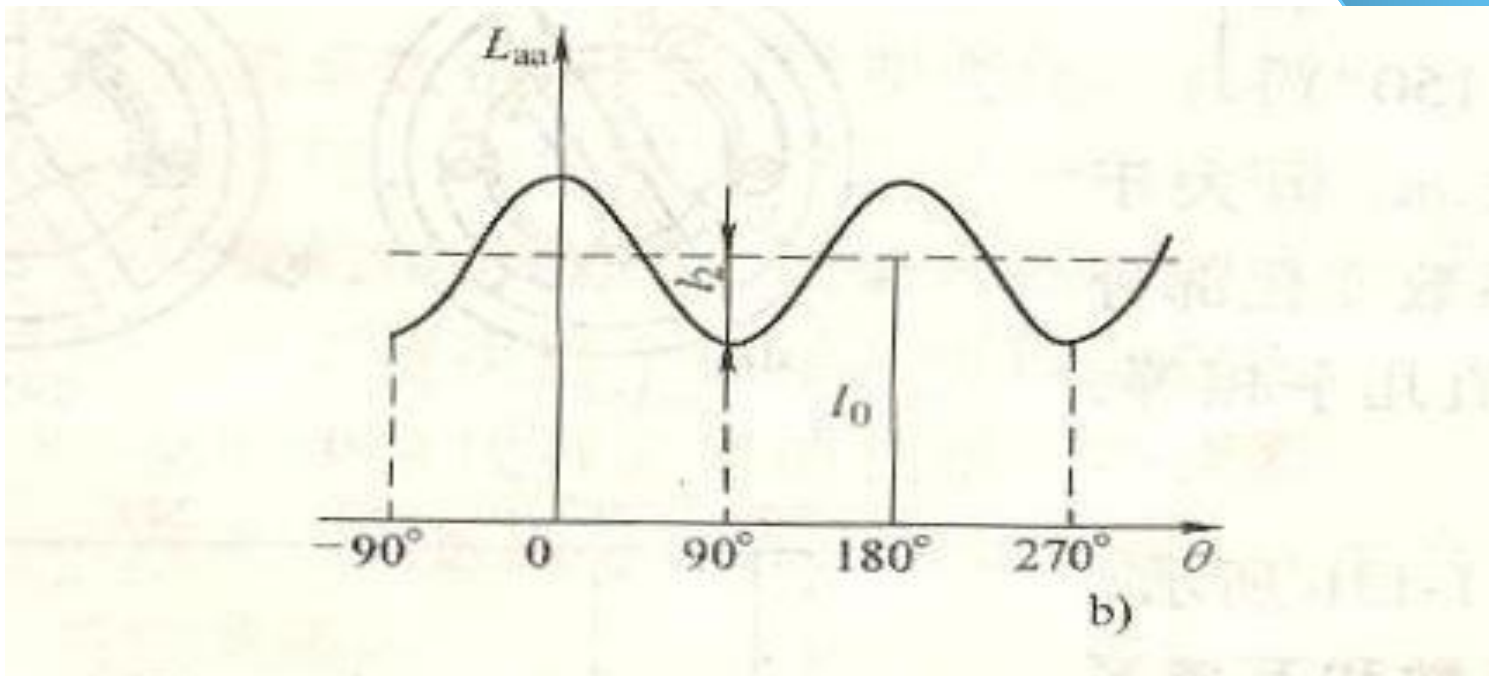
$$L_{aa} = l_0 + l_2 \cos 2\theta + l_4 \cos 4\theta + \dots$$



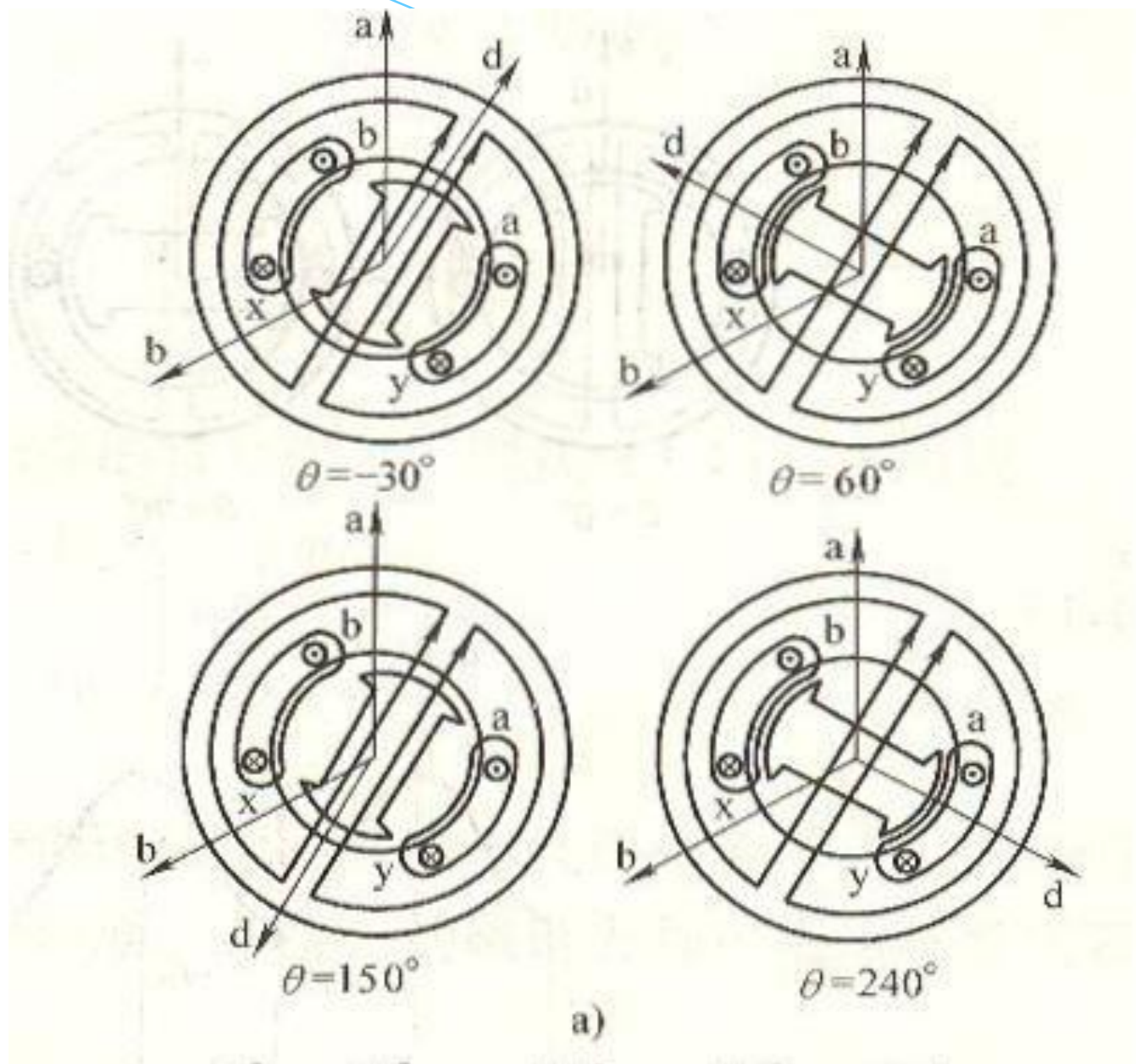
第三节 同步发电机的基本方程

自感系数是 θ 角的周期函数，其变化周期为 π

$$L_{aa} = l_0 + l_2 \cos 2\theta$$



(二) 定子绕组间的互感



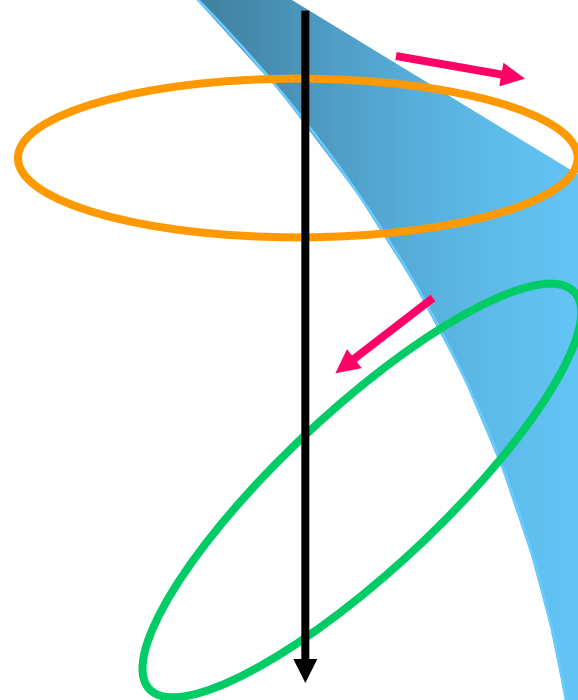
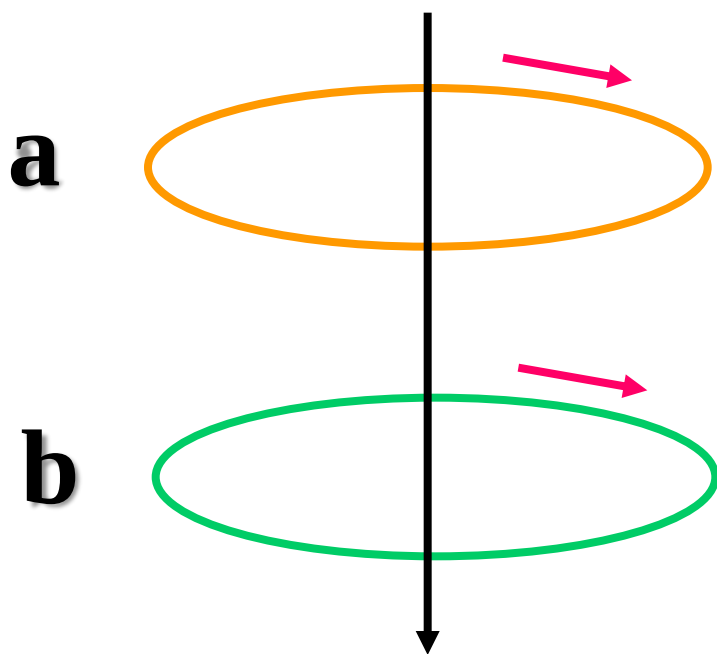
第三节 同步发电机的基本方程

互感系数是 θ 角的周期函数，其变化周期为 π

$$\left. \begin{aligned} M_{ab} &= M_{ba} = -\left[m_0 + m_2 \cos 2(\theta + 30^\circ) \right] \\ M_{bc} &= M_{cb} = -\left[m_0 + m_2 \cos 2(\theta - 90^\circ) \right] \\ M_{ca} &= M_{ac} = -\left[m_0 + m_2 \cos 2(\theta + 150^\circ) \right] \end{aligned} \right\}$$

互感系数恒为负值

第三节 同步发电机的基本方程



第三节 同步发电机的基本方程

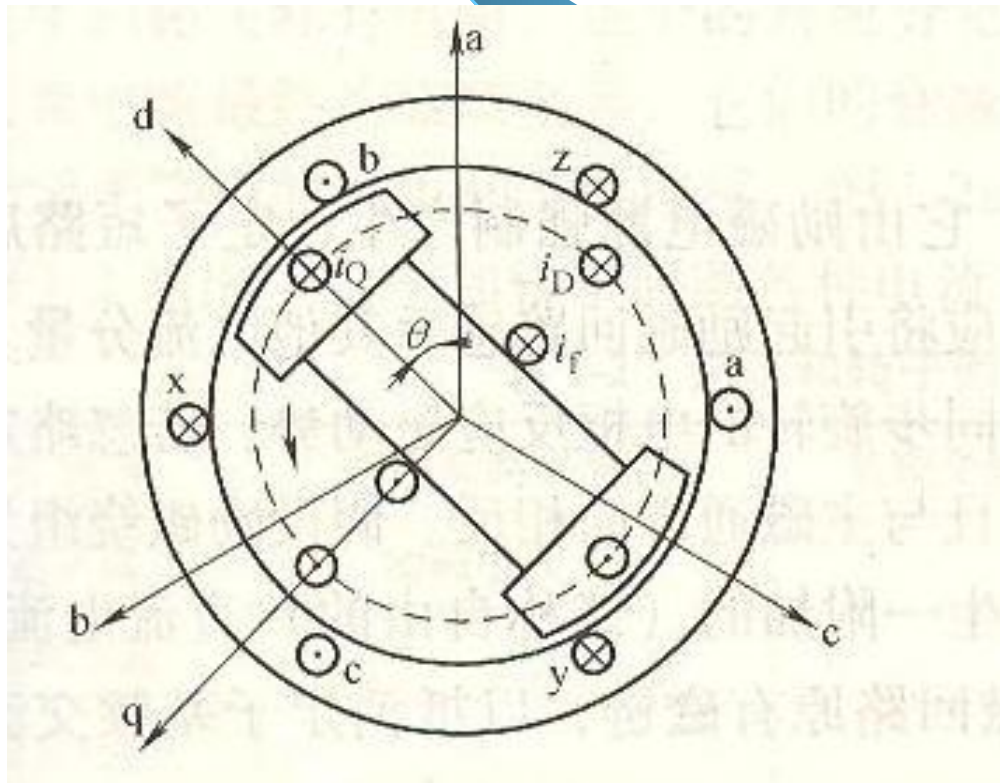
(三) 转子上各绕组的自感系数和互感系数

转子各绕组的自感、互感系数
为常数

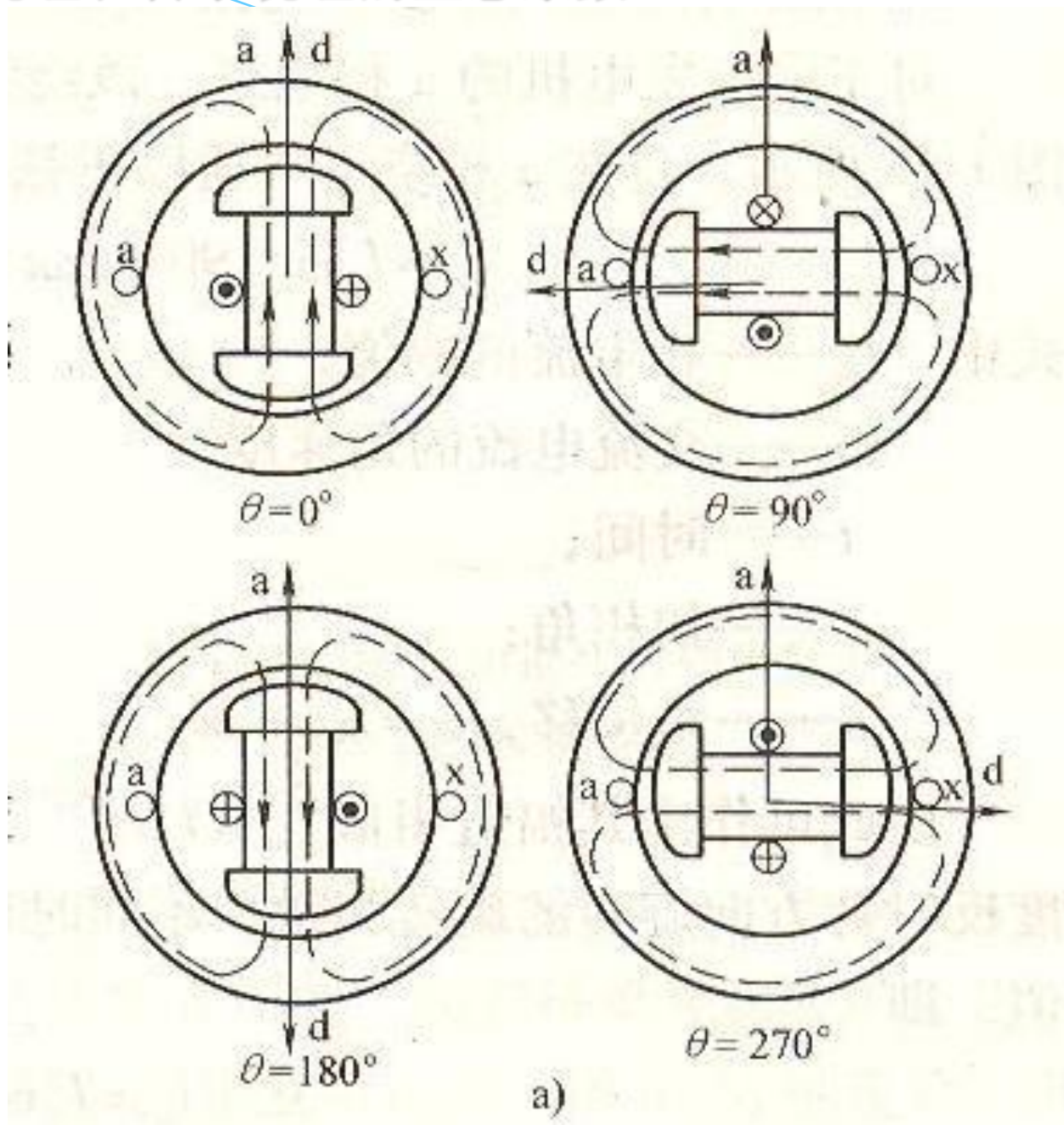
$$L_{ff} \quad L_{DD} \quad L_{QQ} \quad \text{常数}$$

$$M_{fD} = M_{Df} \quad \text{常数}$$

$$M_{fQ} = M_{Qf} = M_{DQ} = M_{QD} = 0$$



(四) 定子绕组和转子绕组的互感系数



定子各相绕组与励磁绕组间的互感系数

$$\left. \begin{aligned} M_{af} &= M_{fa} = m_{af} \cos \alpha \\ M_{bf} &= M_{fb} = m_{af} \cos(\alpha - 120^\circ) \\ M_{cf} &= M_{fc} = m_{af} \cos(\alpha + 120^\circ) \end{aligned} \right\}$$

定子各相绕组与D绕组间的互感系数

$$\left. \begin{aligned} M_{aD} &= M_{Da} = m_{aD} \cos \alpha \\ M_{bD} &= M_{Db} = m_{aD} \cos(\alpha - 120^\circ) \\ M_{cD} &= M_{Dc} = m_{aD} \cos(\alpha + 120^\circ) \end{aligned} \right\}$$

定子各相绕组与Q绕组间的互感系数

$$\left. \begin{aligned} M_{aQ} &= M_{Qa} = -m_{aQ} \sin \alpha \\ M_{bQ} &= M_{Qb} = -m_{aQ} \sin(\alpha - 120^\circ) \\ M_{cQ} &= M_{Qc} = -m_{aQ} \sin(\alpha + 120^\circ) \end{aligned} \right\}$$

磁链方程

$$\begin{pmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \dots \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} & \vdots & M_{af} & M_{aD} & M_{aQ} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} & \vdots & M_{bf} & M_{bD} & M_{bQ} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} & \vdots & M_{cf} & M_{cD} & M_{cQ} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ M_{fa} & M_{fb} & M_{fc} & \vdots & L_{ff} & M_{fD} & M_{fQ} \\ M_{Da} & M_{Db} & M_{Dc} & \vdots & M_{Df} & L_{DD} & M_{DQ} \\ M_{Qa} & M_{Qb} & M_{Qc} & \vdots & M_{Qf} & M_{QD} & L_{QQ} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -i_a \\ -i_b \\ -i_c \\ \dots \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix}$$

电感系数为常数

电压方程 $\longrightarrow$ 线性变系数微分方程

$$\begin{pmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \\ \dots \\ u_f \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & & & \vdots & & & \\ & R & & \vdots & & 0 & \\ & & R & \vdots & & & \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ & & & \vdots & R_f & & \\ & 0 & & \vdots & & R_D & \\ & & & \vdots & & & R_Q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\dot{i}_a \\ -\dot{i}_b \\ -\dot{i}_c \\ \dots \\ \dot{i}_f \\ \dot{i}_D \\ \dot{i}_Q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{\psi}_a \\ \dot{\psi}_b \\ \dot{\psi}_c \\ \dots \\ \dot{\psi}_f \\ \dot{\psi}_D \\ \dot{\psi}_Q \end{pmatrix}$$

第三节 同步发电机的基本方程

三、派克变换及其应用

拉氏变换 $\longrightarrow$ 从时域变换到频域，微分方程变为代数方程

对称分量变换 $\longrightarrow$ 从不对称空间变换到对称空间

傅立叶变换、小波变换等等

派克变换 $\longrightarrow$ 把变系数微分方程变换为常系数微分方程

$$i_a = I_m \sin(90^\circ + \omega t + \alpha_0) = I_m \cos(\omega t + \alpha_0) = I_m \cos \alpha$$

旋转相量

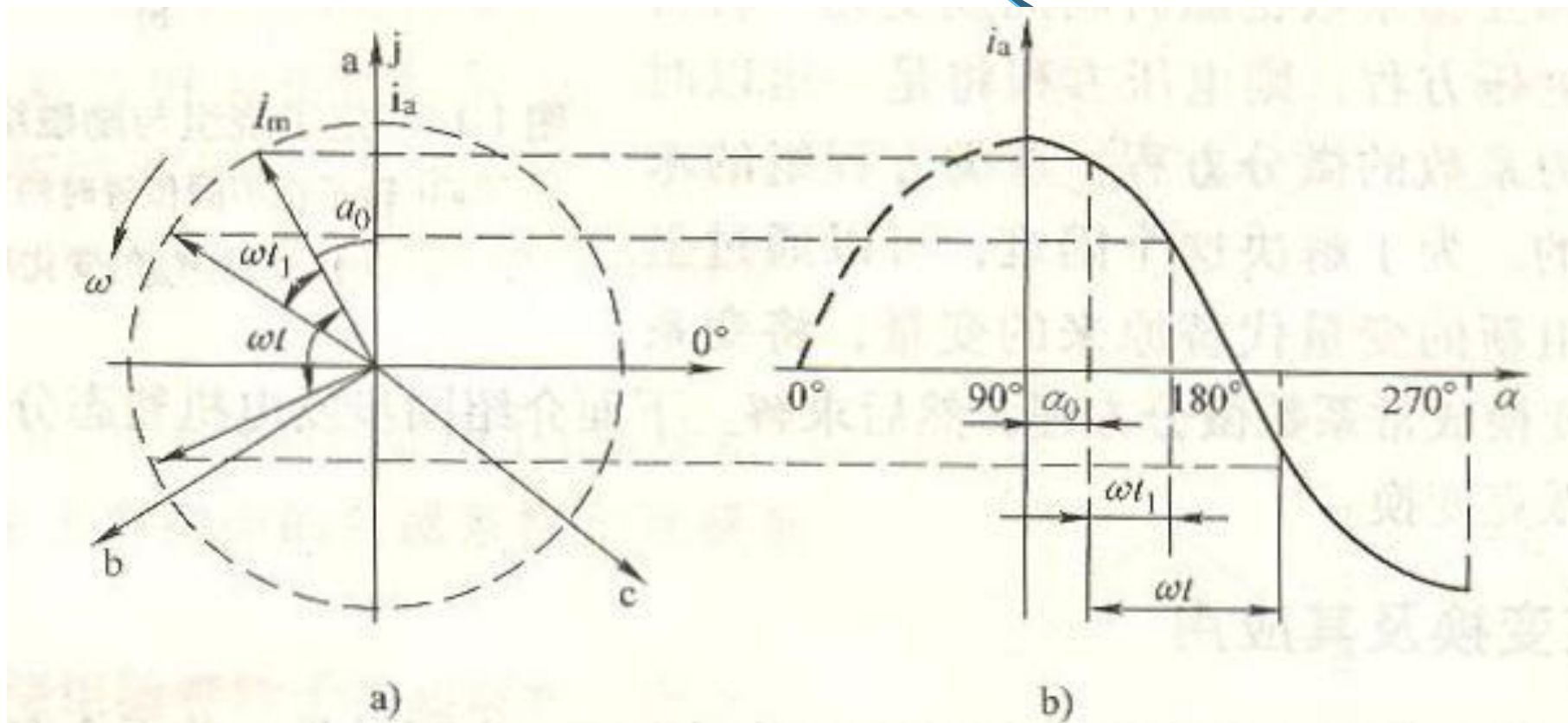


图 1-15 旋转相量与正弦量的关系

第三节 同步发电机的基本方程

$$\left. \begin{aligned} i_a &= I_m \cos \alpha \\ i_b &= I_m \cos(\alpha - 120^\circ) \\ i_c &= I_m \cos(\alpha + 120^\circ) \end{aligned} \right\}$$

同步发电机的双反应原理：**a、b、c**三相电流产生的电枢反应，用同步旋转的**d、q**轴电枢反应等效

综合相量

$$\left. \begin{aligned} i_d &= I_m \cos(\alpha - \theta) \\ i_q &= I_m \sin(\alpha - \theta) \end{aligned} \right\}$$

$$\alpha = \alpha_0 + \omega t$$

$$\theta = \theta_0 + \omega t$$



$$\alpha - \theta = \alpha_0 - \theta_0$$

显然 i_d i_q 为直流

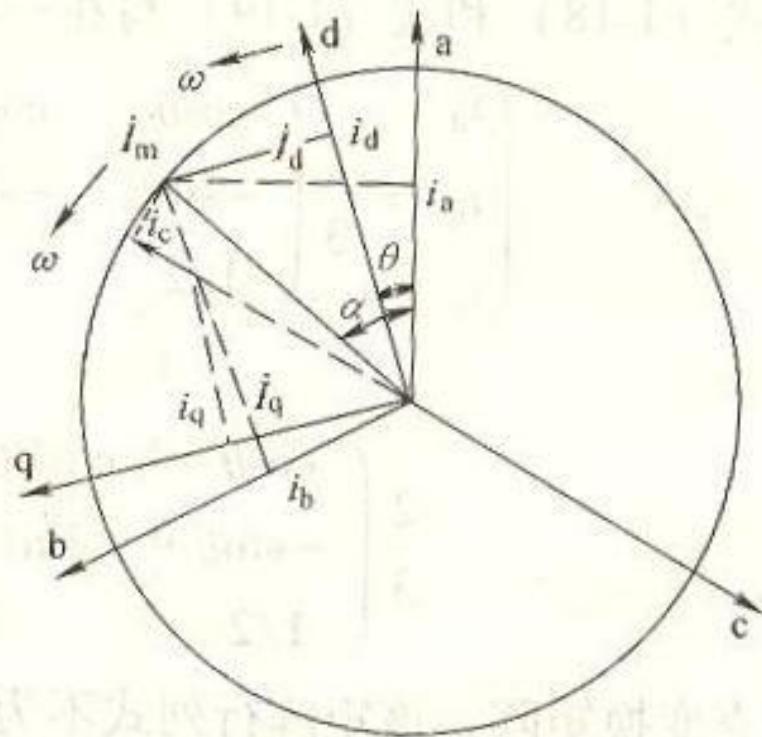


图 1-16 综合相量在两种坐标系统上的投影关系

第三节 同步发电机的基本方程

$$\left. \begin{aligned} i_d &= \frac{2}{3} [i_a \cos \theta + i_b \cos(\theta - 120^\circ) + i_c \cos(\theta + 120^\circ)] \\ i_q &= -\frac{2}{3} [i_a \sin \theta + i_b \sin(\theta - 120^\circ) + i_c \sin(\theta + 120^\circ)] \end{aligned} \right\}$$



增加“0”
轴

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix}$$

第三节 同步发电机的基本方程

$$\frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{pmatrix} = \mathbf{P}$$

派克变换矩阵

派克变换实现了不同坐标系电流的等价变换

$$\mathbf{i}_{dq0} = \mathbf{P} \mathbf{i}_{abc}$$

$$\mathbf{i}_{abc} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{i}_{dq0}$$

第三节 同步发电机的基本方程

派克变换同样适用于电压和磁链

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{U}_{dq0} &= \mathbf{P} \mathbf{U}_{abc} \\ \mathbf{U}_{abc} &= \mathbf{P}^{-1} \mathbf{U}_{dq0} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \boldsymbol{\Psi}_{dq0} &= \mathbf{P} \boldsymbol{\Psi}_{abc} \\ \boldsymbol{\Psi}_{abc} &= \mathbf{P}^{-1} \boldsymbol{\Psi}_{dq0} \end{aligned} \right\}$$

第三节 同步发电机的基本方程

举例：

$$\begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = I_m \begin{pmatrix} \cos(\omega t + \alpha_0) \\ \cos(\omega t + \alpha_0 - 120^\circ) \\ \cos(\omega t + \alpha_0 + 120^\circ) \end{pmatrix}$$

交流电流

派克变换

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{pmatrix} = I_m \begin{pmatrix} \cos(\theta_0 - \alpha_0) \\ -\sin(\theta_0 - \alpha_0) \\ 0 \end{pmatrix}$$

直流电流

第三节 同步发电机的基本方程

举例：

$$\begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = I_m \begin{pmatrix} 1 \\ -0.25 \\ -0.25 \end{pmatrix}$$

直流电流

派克变换

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{pmatrix} = \frac{I_m}{6} \begin{pmatrix} 5 \cos(\omega t + \theta_0) \\ -5 \sin(\omega t + \theta_0) \\ 1 \end{pmatrix}$$

交流电流

四、派克变换后的磁链、电压方程

$$\begin{pmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \\ \dots \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} L_d & 0 & 0 & \vdots & m_{af} & m_{aD} & 0 \\ 0 & L_q & 0 & \vdots & 0 & 0 & m_{aQ} \\ 0 & 0 & L_0 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{3}{2}m_{af} & 0 & 0 & \vdots & L_f & m_r & 0 \\ \frac{3}{2}m_{aD} & 0 & 0 & \vdots & m_r & L_D & 0 \\ 0 & \frac{3}{2}m_{aQ} & 0 & \vdots & 0 & 0 & L_Q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -i_d \\ -i_q \\ -i_0 \\ \dots \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix}$$

派克变换后的磁链方程

$$\begin{pmatrix} p\psi_d \\ p\psi_q \\ p\psi_0 \\ \dots \\ p\psi_f \\ p\psi_D \\ p\psi_Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_d & 0 & 0 & \vdots & X_{ad} & X_{ad} & 0 \\ 0 & X_q & 0 & \vdots & 0 & 0 & X_{aq} \\ 0 & 0 & X_0 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots \\ X_{ad} & 0 & 0 & \vdots & X_f & X_{ad} & 0 \\ X_{ad} & 0 & 0 & \vdots & X_{ad} & X_D & 0 \\ 0 & X_{aq} & 0 & \vdots & 0 & 0 & X_Q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -pi_d \\ -pi_q \\ -pi_0 \\ \dots \\ pi_f \\ pi_D \\ pi_Q \end{pmatrix}$$

派克变换后的电压方程

$$\begin{pmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \\ \dots \\ u_f \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & & \vdots & & & & \\ & R & \vdots & & 0 & & \\ & & R & \vdots & & & \\ \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots \\ & & & \vdots & R_f & & \\ & 0 & & \vdots & & R_D & \\ & & & \vdots & & & R_Q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -\dot{i}_d \\ -\dot{i}_q \\ -\dot{i}_0 \\ \dots \\ \dot{i}_f \\ \dot{i}_D \\ \dot{i}_Q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} p\psi_d \\ p\psi_q \\ p\psi_0 \\ \dots \\ p\psi_f \\ p\psi_D \\ p\psi_Q \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} (1+s)\psi_q \\ -(1+s)\psi_d \\ 0 \\ \dots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

一般不存在0轴分量，所以发电机模型为5阶

如果不考虑阻尼绕组，则发电机模型为3阶

第四节 同步发电机的暂态 参数和等效电路

一、同步发电机正常运行时定子回路的电压方程

正常运行时，同步发电机定子三相电流对称

$$\left. \begin{aligned} i_a &= I_m \cos(\omega t + \alpha_0) \\ i_b &= I_m \cos(\omega t + \alpha_0 - 120^\circ) \\ i_c &= I_m \cos(\omega t + \alpha_0 + 120^\circ) \end{aligned} \right\}$$

→ i_d i_q 为常数 → u_d u_q ψ_d ψ_q 为常数

$$\begin{pmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \\ \dots \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_d & 0 & 0 & \vdots & X_{ad} & X_{ad} & 0 \\ 0 & X_q & 0 & \vdots & 0 & 0 & X_{aq} \\ 0 & 0 & X_0 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots \\ X_{ad} & 0 & 0 & \vdots & X_f & X_{ad} & 0 \\ X_{ad} & 0 & 0 & \vdots & X_{ad} & X_D & 0 \\ 0 & X_{aq} & 0 & \vdots & 0 & 0 & X_Q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -i_d \\ -i_q \\ -i_0 \\ \dots \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix}$$

$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= -X_d i_d + X_{ad} i_f = -X_d i_d + E_q \\ \psi_q &= -X_q i_q \end{aligned} \right\}$$

变压器电动势

$$\begin{pmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \\ \vdots \\ u_f \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & & & & & & \\ & R & & & & & \\ & & R & & & & \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ & & & & R_f & & \\ & & & & & R_D & \\ & & & & & & R_Q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -i_d \\ -i_q \\ -i_0 \\ \vdots \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} p\psi_d \\ p\psi_q \\ p\psi_0 \\ \vdots \\ p\psi_f \\ p\psi_D \\ p\psi_Q \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} (1+s)\psi_q \\ -(1+s)\psi_d \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$



$$\left. \begin{aligned} u_d &= -\psi_q - Ri_d \\ u_q &= \psi_d - Ri_q \end{aligned} \right\}$$

发电机电动势

$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= -X_d i_d + X_{ad} i_f = -X_d i_d + E_q \\ \psi_q &= -X_q i_q \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} u_d &= -\psi_q - R i_d \\ u_q &= \psi_d - R i_q \end{aligned} \right\}$$

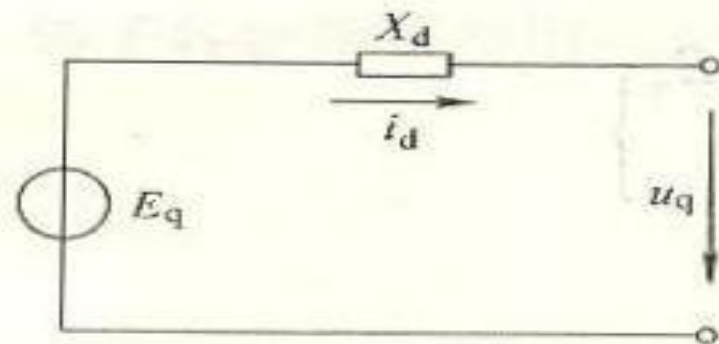


$$\left. \begin{aligned} u_d &= -R i_d - \psi_q = -R i_d + X_q i_q \\ u_q &= -R i_q + \psi_d = -R i_q - X_d i_d + E_q \end{aligned} \right\}$$

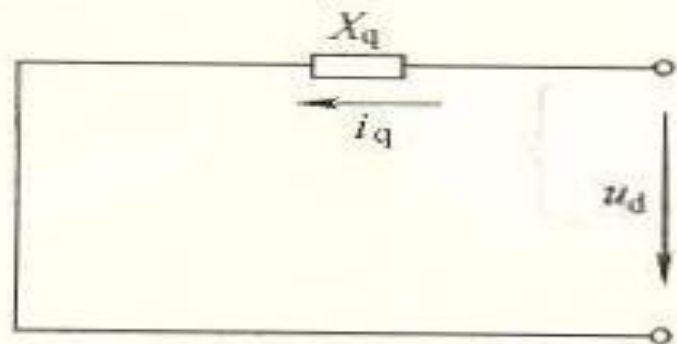
$$\left. \begin{aligned} u_d &= -Ri_d - \psi_q = -Ri_d + X_q i_q \\ u_q &= -Ri_q + \psi_d = -Ri_q - X_d i_d + E_q \end{aligned} \right\}$$

忽略电阻

$$\left. \begin{aligned} i_d &= \frac{E_q - u_q}{X_d} = \frac{E_q - U \cos \delta}{X_d} \\ i_q &= \frac{u_d}{X_q} = \frac{U \sin \delta}{X_q} \end{aligned} \right\}$$



a)



b)

图 1-18 正常运行时同步发电机的等效电路

a) 直轴电路 b) 交轴电路

虚构电动势

$$E_Q = E_q - (X_d - X_q)i_d$$

$$\left. \begin{aligned} u_d &= -Ri_d - \psi_q = -Ri_d + X_q i_q \\ u_q &= -Ri_q + \psi_d = -Ri_q - X_d i_d + E_q \end{aligned} \right\}$$

代入

$$u_q = -Ri_q - X_q i_d + E_Q$$

组合

$$u_d + ju_q = -R(i_d + ji_q) - jX_q(i_d + ji_q) + jE_Q$$

$$jE_Q = u_d + ju_q + (R + jX_q)(i_d + ji_q)$$

$$jE_Q = u_d + ju_q + (R + jX_q)(i_d + ji_q)$$

以相量表示

$$\dot{E}_Q = \dot{U} + Z_q \dot{i}$$

$$\dot{E}_Q = jE_Q \quad \dot{U} = u_d + ju_q$$

$$\dot{I} = i_d + ji_q \quad Z_q = R + jX_q$$

E_Q 在虚轴 (j) 轴上

$$E_Q = E_q - (X_d - X_q)i_d$$

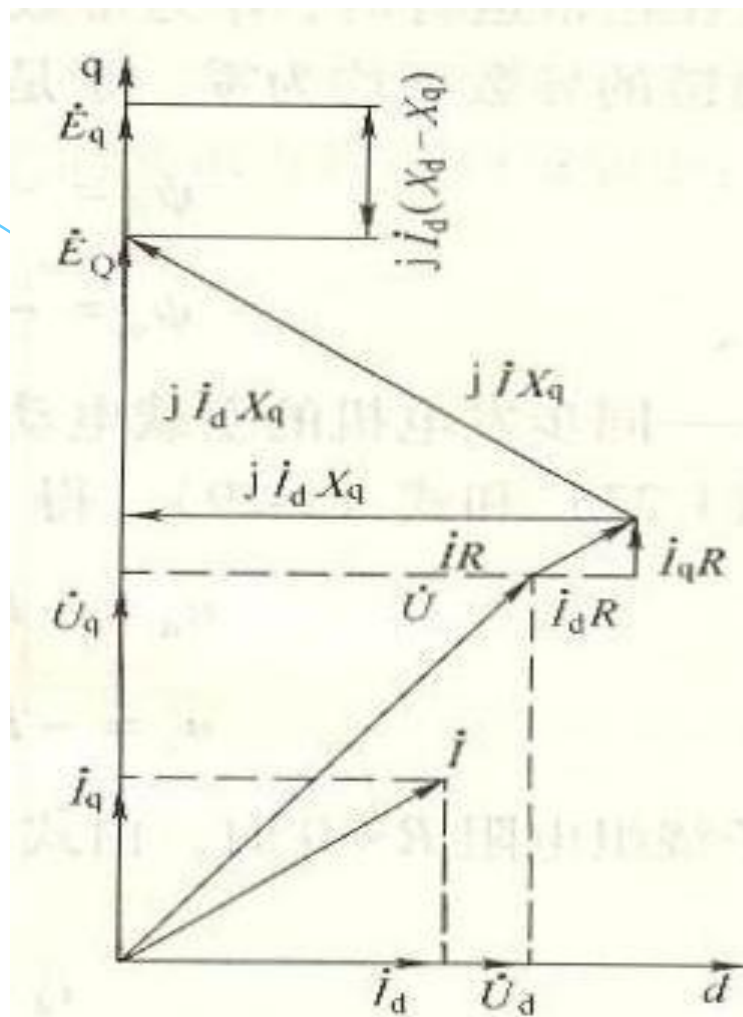


图 1-19 同步发电机正常运行时的相量图

二、无阻尼绕组同步发电机三相短路的物理过程

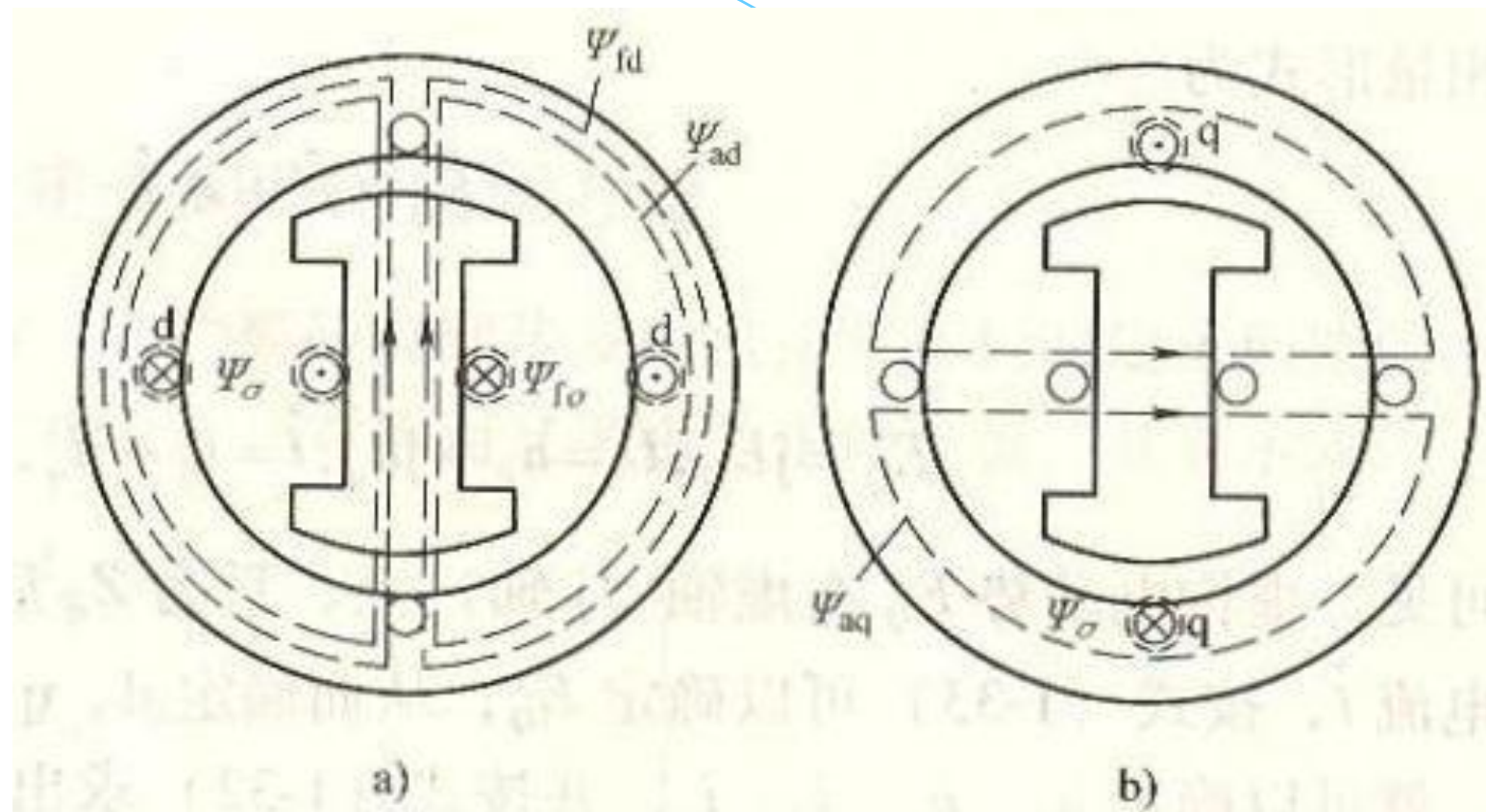


图 1-20 无阻尼绕组同步发电机
在正常稳态运行时的磁链分解示意图

a) 直轴方向 b) 交轴方向

第四节 同步发电机的暂态 参数和等效电路

$$\dot{i}_f = \dot{i}_f(0) + \Delta \dot{i}_{fa} + \Delta \dot{i}_{f\omega}$$

$$\dot{i} = \dot{i}_{\omega(0)} + \underline{\Delta \dot{i}_{\omega k}} + \Delta \dot{i}'_{\omega} + \Delta \dot{i}_a + \Delta \dot{i}_{2\omega}$$

Diagram illustrating the relationship between field current components and armature current components:

- $\dot{i}_f(0)$ is related to $\dot{i}_{\omega(0)}$ via a purple arrow.
- $\Delta \dot{i}_{fa}$ and $\Delta \dot{i}'_{\omega}$ are related via a vertical purple double-headed arrow labeled T_d'' .
- $\Delta \dot{i}_{f\omega}$ is related to $\Delta \dot{i}_a$ via a purple arrow.
- $\Delta \dot{i}_{f\omega}$ is related to $\Delta \dot{i}_{2\omega}$ via a purple arrow labeled T_a .

第四节 同步发电机的暂态 参数和等效电路

三、同步发电机的暂态电动势和暂态电抗

$$\left. \begin{aligned} i_d &= \frac{E_q - u_q}{X_d} = \frac{E_q - U \cos \delta}{X_d} \\ i_q &= \frac{u_d}{X_q} = \frac{U \sin \delta}{X_q} \end{aligned} \right\} E_q \propto i_f$$

暂态过程中 E_q 、 U_d 、 U_q 随 i_f 、 i 的变化而变化，
此公式不能用来计算暂态过程中的 i_d 、 i_q

第四节 同步发电机的暂态 参数和等效电路

$$\begin{pmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \\ \dots \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_d & 0 & 0 & \vdots & X_{ad} & X_{ad} & 0 \\ 0 & X_q & 0 & \vdots & 0 & 0 & X_{aq} \\ 0 & 0 & X_0 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots \\ X_{ad} & 0 & 0 & \vdots & X_f & X_{ad} & 0 \\ X_{ad} & 0 & 0 & \vdots & X_{ad} & X_D & 0 \\ 0 & X_{aq} & 0 & \vdots & 0 & 0 & X_Q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -i_d \\ -i_q \\ -i_0 \\ \dots \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix}$$



$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= -X_d i_d + X_{ad} i_f \\ \psi_f &= -X_{ad} i_d + X_f i_f \end{aligned} \right\}$$

第四节 同步发电机的暂态 参数和等效电路

$$\begin{pmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_0 \\ \dots \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_d & 0 & 0 & \vdots & X_{ad} & X_{ad} & 0 \\ 0 & X_q & 0 & \vdots & 0 & 0 & X_{aq} \\ 0 & 0 & X_0 & \vdots & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \vdots & \dots & \dots & \dots \\ X_{ad} & 0 & 0 & \vdots & X_f & X_{ad} & 0 \\ X_{ad} & 0 & 0 & \vdots & X_{ad} & X_D & 0 \\ 0 & X_{aq} & 0 & \vdots & 0 & 0 & X_Q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -i_d \\ -i_q \\ -i_0 \\ \dots \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix}$$



$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= -X_d i_d + X_{ad} i_f \\ \psi_f &= -X_{ad} i_d + X_f i_f \end{aligned} \right\}$$

第四节 同步发电机的暂态 参数和等效电路

$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= -X_d i_d + X_{ad} i_f \\ \psi_f &= -X_{ad} i_d + X_f i_f \end{aligned} \right\}$$

消去 i_f

$$\psi_d = \frac{X_{ad}}{X_f} \psi_f - \left(X_d - \frac{X_{ad}^2}{X_f} \right) i_d$$

第四节 同步发电机的暂态 参数和等效电路

令 $\frac{X_{ad}}{X_f} \psi_f = E'_q$ $X_d - \frac{X_{ad}^2}{X_f} = X'_d$

$R=0$

$$u_q = E'_q - X'_d i_d$$

$$i_d = (E'_q - u_q) / X'_d$$

由于 $E'_q \propto \psi_f$ 短路瞬间不突变，可由正常运行状态

求出，且 $E'_q = E'_{|0|}$

第四节 同步发电机的暂态 参数和等效电路

暂态过程中

$$\left. \begin{aligned} i_d &= (E'_q - u_q) / X'_d \\ i_q &= u_d / X_q \end{aligned} \right\}$$

$$u_d = u_q = 0$$

$$i_d = E'_q / X'_d$$

$$i_q = 0$$

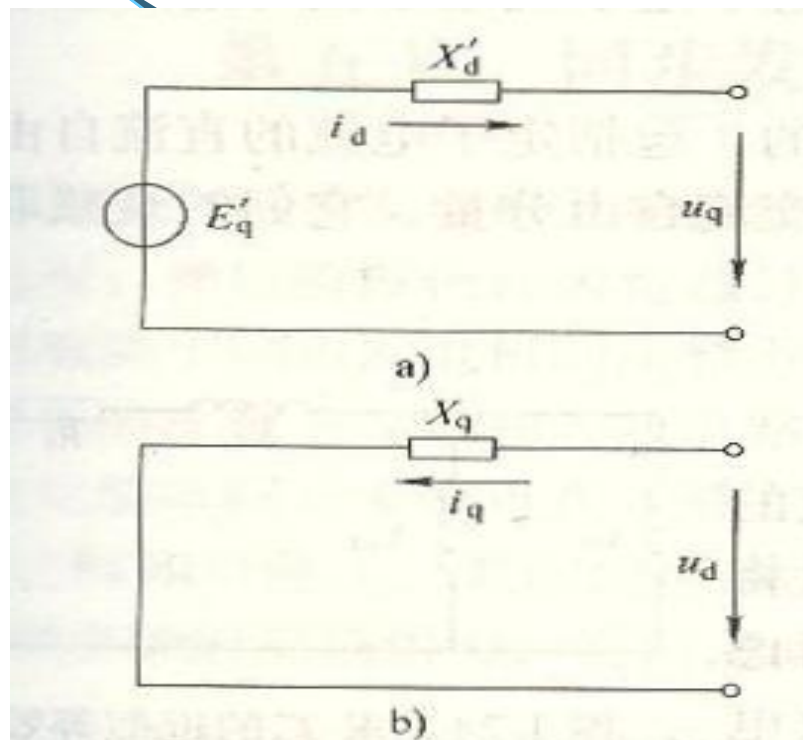


图 1-21 同步发电机用暂态参数
表示的等效电路

a) 直轴电路 b) 交轴电路

$$\dot{E}_Q = \dot{U} + Z_q \dot{I} \approx \dot{U} + j \dot{I} X_q$$

$$E' = \dot{U} + j \dot{I} X'_d$$

$$E'_q = u_q + X'_d i_d$$

$$E_Q = E_q - (X_d - X_q) i_d$$

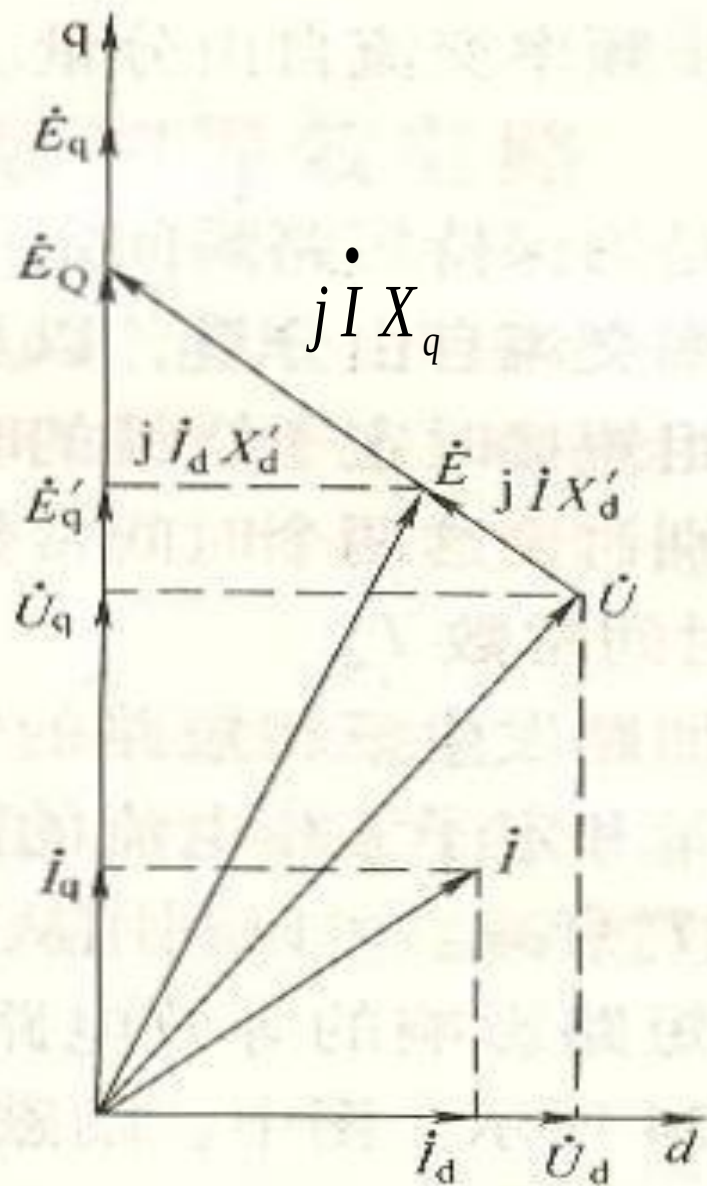


图 1-22 确定 E'_q 的相量图

第四节 同步发电机的暂态 参数和等效电路

$$\frac{X_{\text{ad}}}{X_{\text{ad}} + X_{\text{f}\sigma}} \psi_{\text{f}} = \frac{X_{\text{ad}}}{X_{\text{f}}} \psi_{\text{f}} = E'_{\text{q}}$$

$$X_{\sigma} + \frac{X_{\text{ad}} X_{\text{f}\sigma}}{X_{\text{ad}} + X_{\text{f}\sigma}} = X'_{\text{d}}$$

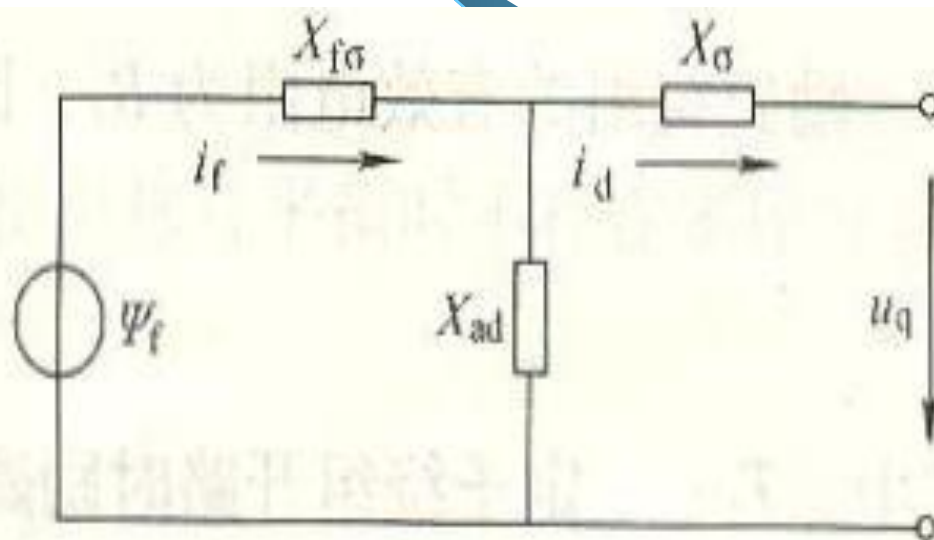


图 1-23 无阻尼绕组同步发电机直轴方向的等效电路

第四节 同步发电机的暂态 参数和等效电路

四、无阻尼绕组同步发电机电 流自由分量衰减的时间常数

$$T'_d = \frac{X_f}{R_f} \frac{X'_d}{X_d} = T_f \frac{X'_d}{X_d}$$

$$T_f = X_f / R_f$$

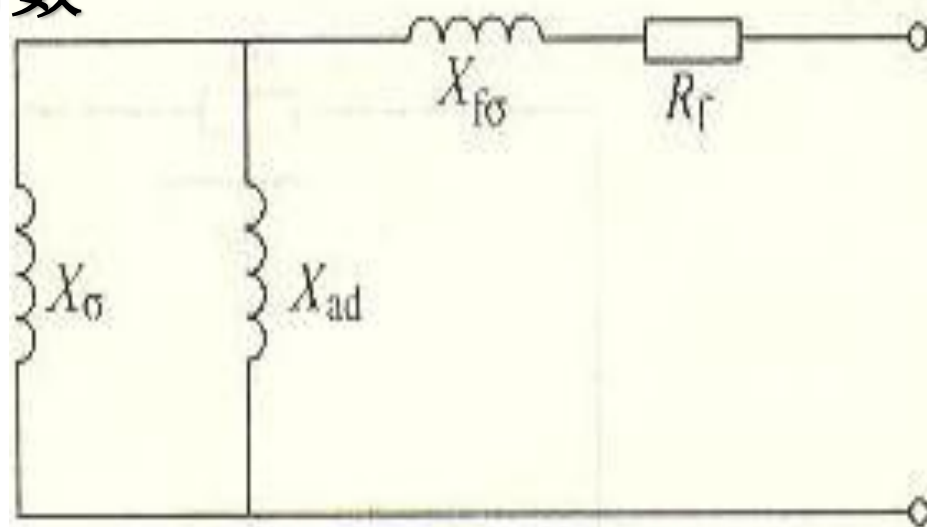


图 1-24 求 T'_d 的近似等效电路

第四节 同步发电机的暂态 参数和等效电路

$$X_{\sigma} + \frac{X_{ad} X_{f\sigma}}{X_{ad} + X_{f\sigma}} = X'_d$$

$$X_{\sigma} + X_{aq} = X_q$$

$$T_a = \frac{2X'_d X_q}{R(X'_d + X_q)}$$

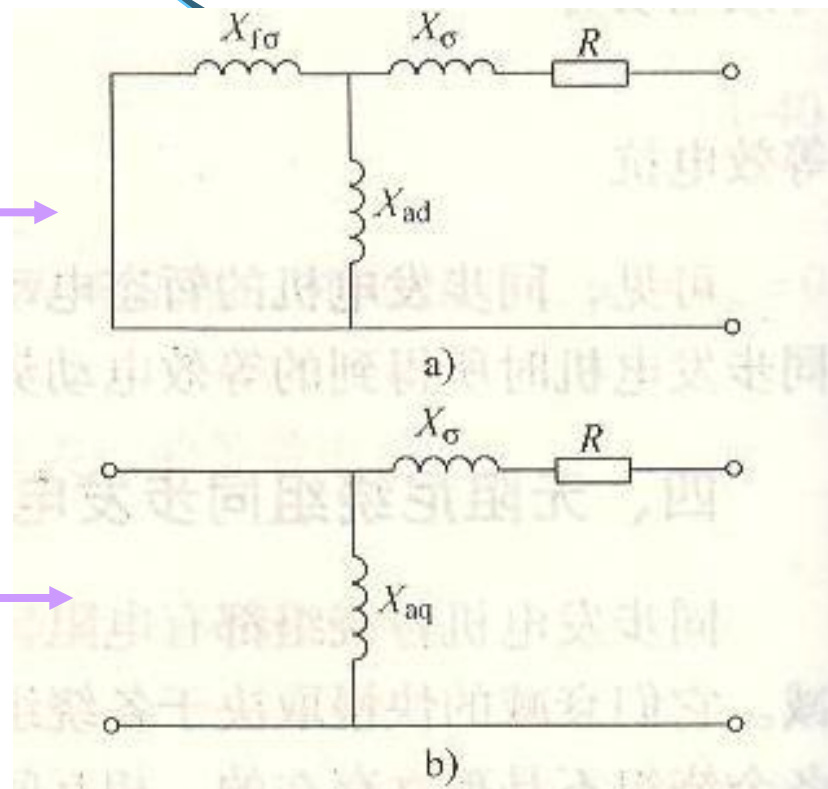


图 1-25 求 T_a 的等效电路

a) 转子 d 轴与定子某相绕组轴线一致时

b) 转子 q 轴与定子某相绕组轴线一致时

第五节 同步发电机的次暂态 参数和等效电路

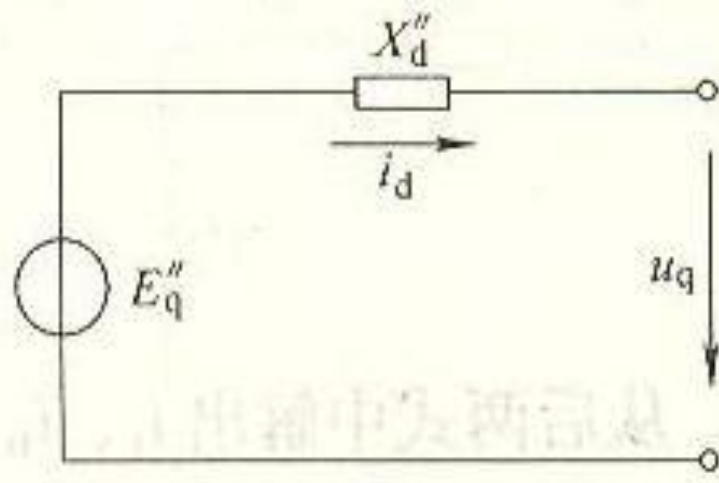
一、同步发电机的次暂态电动势和次暂态电抗

$$\begin{pmatrix} \psi_d \\ \psi_q \\ \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_d & 0 & X_{ad} & X_{aD} & 0 \\ 0 & X_q & 0 & 0 & X_{aQ} \\ X_{ad} & 0 & X_f & X_{fD} & 0 \\ X_{aD} & 0 & X_{fD} & X_D & 0 \\ 0 & X_{aQ} & 0 & 0 & X_Q \end{pmatrix} \begin{pmatrix} -i_d \\ -i_q \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{pmatrix}$$

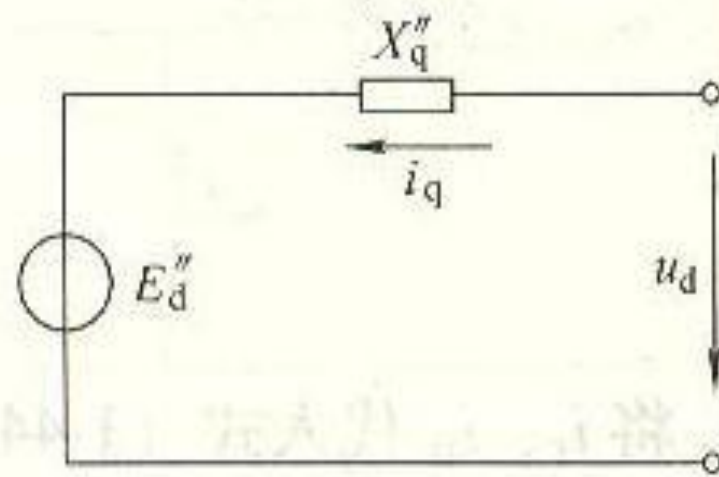
$$\left. \begin{aligned} \frac{X_{ad}}{X_D X_f - X_{ad}^2} [(X_D - X_{ad})\psi_f + (X_f - X_{ad})\psi_D] &= E_q'' \\ X_d - \frac{X_{ad}^2 (X_D + X_f - 2X_{ad})}{X_D X_f - X_{ad}^2} &= X_d'' \end{aligned} \right\}$$

$$-\frac{X_{aq}}{X_Q} \psi_Q = E_d''$$

$$X_q - \frac{X_{aq}^2}{X_Q} = X_q''$$



a)



b)

图 1-26 用次暂态参数表示的
同步发电机的等效电路
a) 直轴电路 b) 交轴电路

第五节 同步发电机的次暂态 参数和等效电路

二、有阻尼绕组同步发电机电流 自由分量的衰减时间常数

$$T_d'' = \left(X_{D\sigma} + \frac{X_{ad} X_{\sigma} X_{f\sigma}}{X_{ad} X_{\sigma} + X_{f\sigma} X_{\sigma} + X_{ad} X_{f\sigma}} \right) / R_D$$

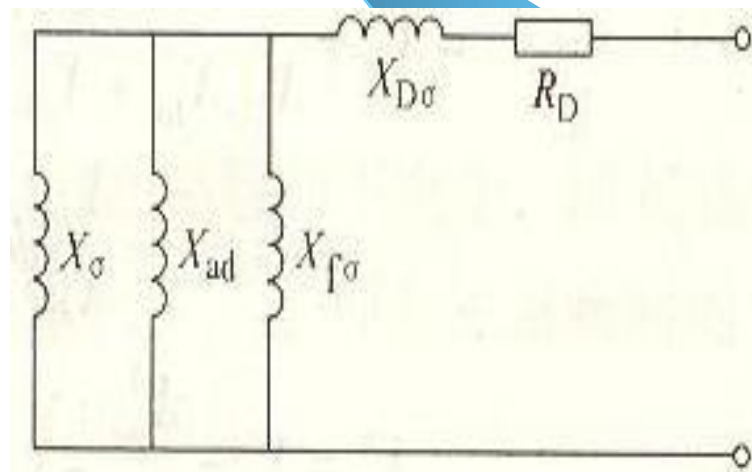
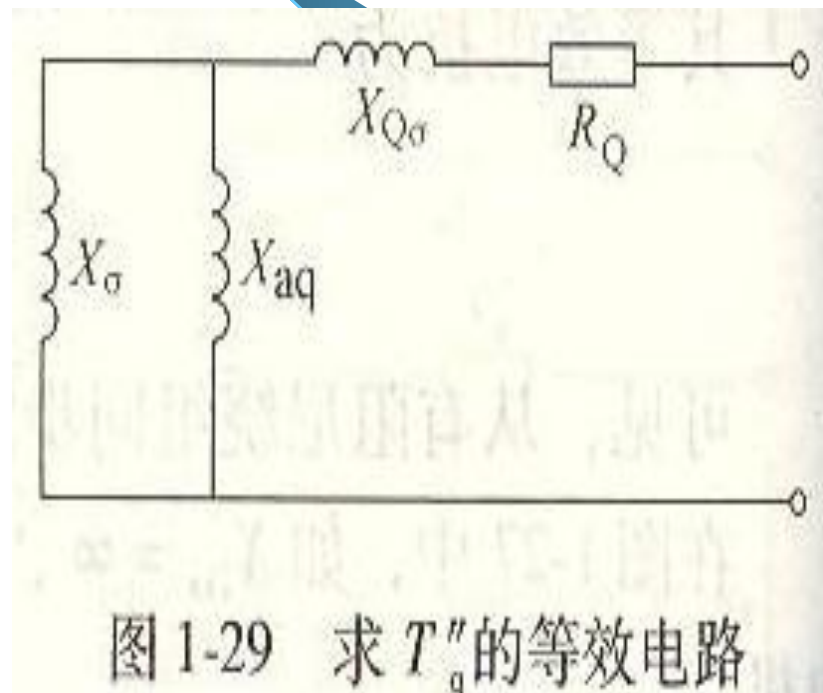


图 1-28 求 T_d'' 的近似等效电路

第五节 同步发电机的次暂态 参数和等效电路

$$T_q'' = \frac{X_Q}{R_Q} \frac{X_q''}{X_q} = T_Q \frac{X_q''}{X_q}$$

$$T_Q = X_Q / R_Q$$



三、同步发电机各电抗、电动势大小的比较

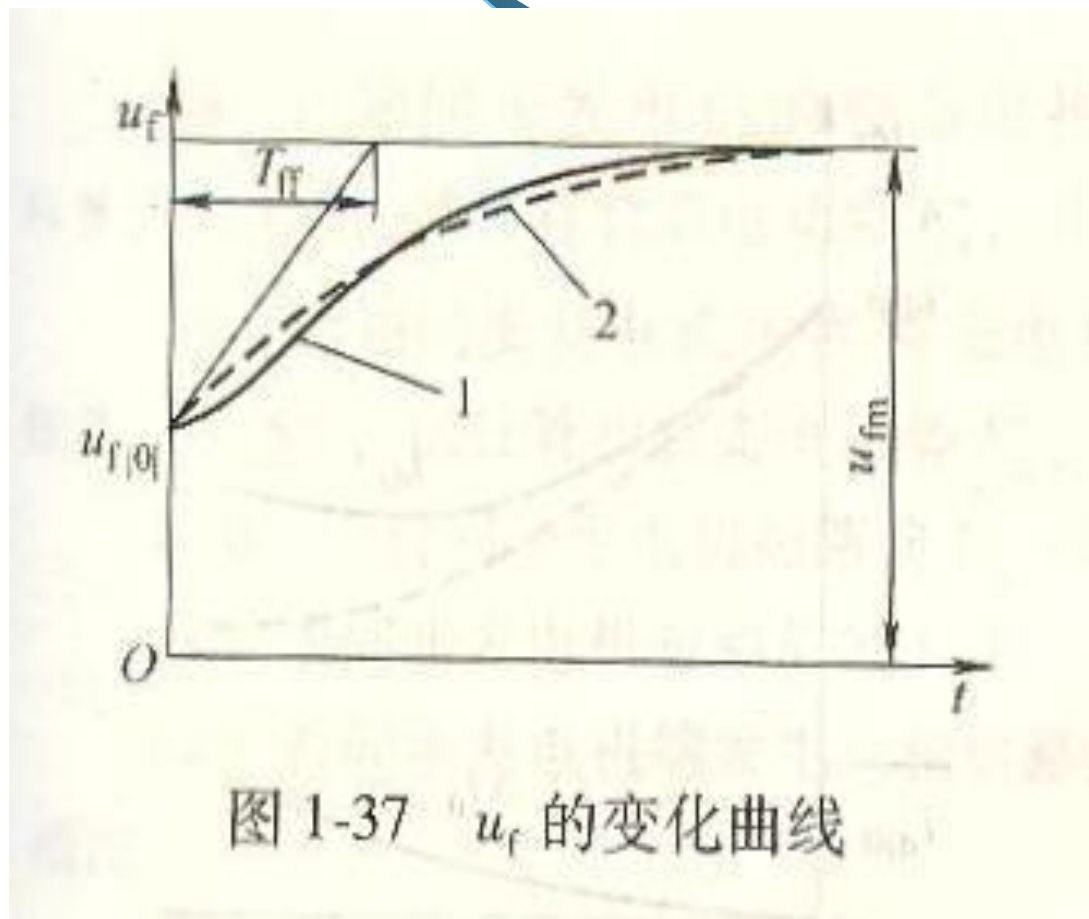
$$E_q \geq E_Q > E'_q > E''_q > E_{\delta q}$$

$$E''_d > E_d (E'_d = E_d = 0)$$

电抗类型	水轮发电机	汽轮发电机
X_d	0.7-1.4	1.2-2.2
X'_d	0.2-0.35	0.15-0.24
X''_d	0.14-0.26	0.1-0.15
X_q	0.45-0.7	1.2-2.2
X''_q	0.15-0.35	0.1-0.15

第八节 自动调节励磁装置对短路电流的影响

主要是强行励磁会对短路电流产生明显影响，其他控制由于限幅环节的作用，对短路电流影响不大。



第八节 自动调节励磁装置对短路电流的影响

$$\Delta i_a = \frac{\Delta E_{qm}}{X_d} \left(1 - \frac{T'_d e^{\frac{-t}{T'_d}} - T_{ff} e^{\frac{-t}{T_{ff}}}}{T'_d - T_{ff}} \right) \cos(\omega t + \theta_0)$$

$$= \frac{\Delta E_{qm}}{X_d} F(t) \cos(\omega t + \theta_0)$$

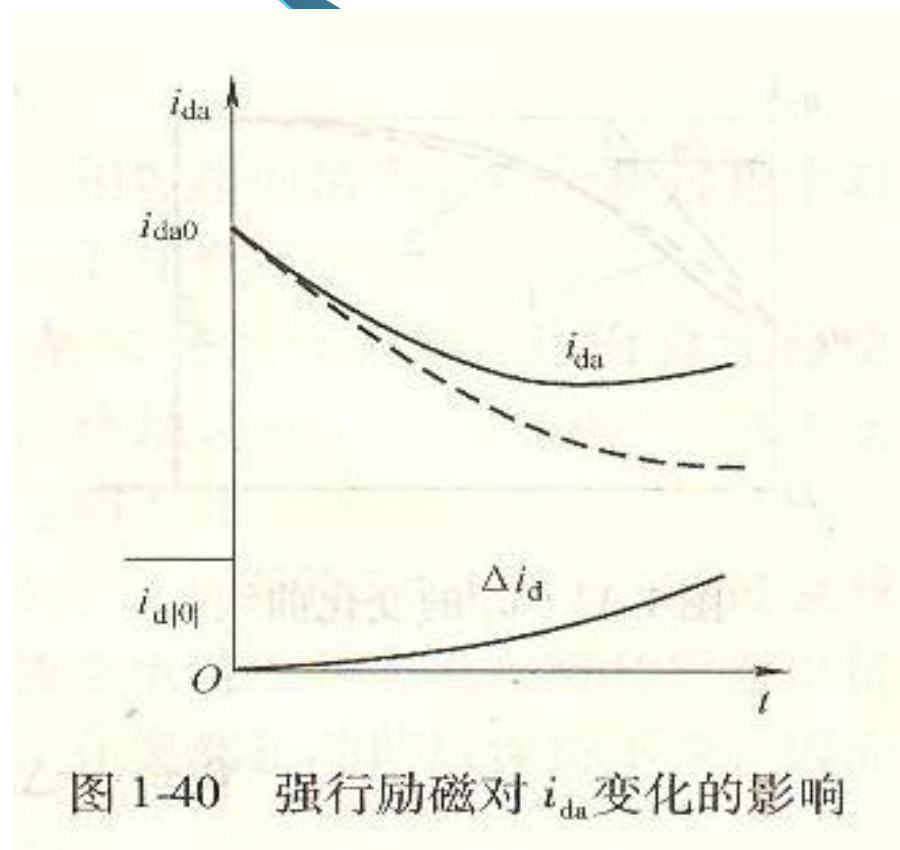


图 1-40 强行励磁对 i_{da} 变化的影响

第六节 同步发电机的三相短路电流

等效定子电流 $\dot{i}_d$ $\dot{i}_q$ 的完整表达式

$$\left. \begin{aligned} i_d &= \frac{E_{q|0|}}{X_d} + u_{|0|} \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) \cos \delta_0 e^{-t/T_d''} \\ &\quad + u_{|0|} \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) \cos \delta_0 e^{-t/T_d'} - \frac{u_{|0|}}{X_d''} \cos(\omega t + \delta_0) e^{-t/T_a} \\ i_q &= -u_{|0|} \left(\frac{1}{X_q''} - \frac{1}{X_q} \right) \sin \delta_0 e^{-t/T_q''} + \frac{u_{|0|}}{X_q''} \sin(\omega t + \delta_0) e^{-t/T_a} \end{aligned} \right\}$$

第六节 同步发电机的三相短路电流

派克变换后定子 d 相电流为

$$\begin{aligned} i_a = & \frac{E_{q|0|}}{X_d} \cos(\omega t + \theta_0) + u_{|0|} \left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) \cos \delta_0 \cos(\omega t + \theta_0) e^{-t/T_d''} \\ & + u_{|0|} \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) \cos \delta_0 \cos(\omega t + \theta_0) e^{-t/T_d'} + u_{|0|} \left(\frac{1}{X_q''} - \frac{1}{X_q} \right) \sin \delta_0 \sin(\omega t + \theta_0) e^{-t/T_q''} \\ & - \frac{u_{|0|}}{\frac{2X_d''X_q''}{X_d'' + X_q''}} \cos(\delta_0 - \theta_0) e^{-t/T_a} - \frac{u_{|0|}}{\frac{2X_d''X_q''}{X_q'' - X_d''}} \cos(2\omega t + \delta_0 + \theta_0) e^{-t/T_a} \end{aligned}$$

三、同步发电机稳态运行的电势方程

1. 基本方程的实用化

(1) 转子转速不变并等于额定转速；

(2) 电机纵轴向三个绕组只有一个公共磁通，而不存在只同两个绕组交链的漏磁通。

$$\left. \begin{aligned} X_d &= X_{\sigma a} + X_{ad} \\ X_f &= X_{\sigma f} + X_{ad} \\ X_D &= X_{\sigma D} + X_{ad} \\ X_q &= X_{\sigma a} + X_{aq} \\ X_Q &= X_{\sigma Q} + X_{aq} \end{aligned} \right\}$$

(3) 略去定子电势方程中的变压器电势，即认为

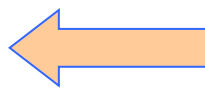
$$\dot{\psi}_d = \dot{\psi}_q = 0$$

，这条假设适用于不计定子回路电磁暂态过程或者对定子电流中的非周期分量另行考虑の場合；

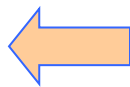
(4) 定子回路的电阻只在计算定子电流非周期分量衰减时予以计及，而在其它计算中则略去不计。

在(1)、(2)两项假设条件的基础上，可将基本方程改写如下：

$$\left. \begin{aligned} v_d &= \dot{\psi}_d - \omega \psi_q - R i_d \\ v_q &= \dot{\psi}_q + \omega \psi_d - R i_q \\ v_f &= \dot{\psi}_f + R_f i_f \\ 0 &= \dot{\psi}_D + R_D i_D \\ 0 &= \dot{\psi}_Q + R_Q i_Q \end{aligned} \right\}$$



$$\left. \begin{aligned} v_d &= \dot{\psi}_d - \omega \psi_q - R i_d \\ v_q &= \dot{\psi}_q + \omega \psi_d - R i_q \\ v_0 &= \dot{\psi}_0 - R i_0 \\ v_f &= \dot{\psi}_f + R_f i_f \\ 0 &= \dot{\psi}_D + R_D i_D \\ 0 &= \dot{\psi}_Q + R_Q i_Q \end{aligned} \right\}$$



$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= -X_d i_d + X_{ad} i_f + X_{ad} i_D \\ \psi_q &= -X_q i_q + X_{aq} i_Q \\ \psi_f &= -X_{ad} i_d + X_f i_f + X_{ad} i_D \\ \psi_D &= -X_{ad} i_d + X_{ad} i_f + X_D i_D \\ \psi_Q &= -X_{aq} i_q + X_Q i_Q \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= -L_d i_d + m_{af} i_f + m_{aD} i_D \\ \psi_q &= -L_q i_q + m_{aQ} i_Q \\ \psi_0 &= -L_0 i_0 \\ \psi_f &= -m_{af} i_d + L_f i_f + L_{fD} i_D \\ \psi_D &= -m_{aD} i_d + L_{fD} i_f + L_D i_D \\ \psi_Q &= -m_{aQ} i_q + L_Q i_Q \end{aligned} \right\}$$

2. 稳态运行的电势方程、相量图和等值电路

稳态时, $\dot{\psi}_d = \dot{\psi}_q = 0$, 等效阻尼绕组中电流为零, 励磁电流 $i_f = v_f / R_f$ 是常数。略去定子电阻 R , **定子电势方程** 将为

$$\left. \begin{aligned} v_q &= \dot{\psi}_d = X_{ad} i_f - X_d i_d \\ &= \psi_{fd} - X_d i_d = E_q - X_d i_d \\ v_d &= -\dot{\psi}_q = X_q i_q \end{aligned} \right\}$$

式中, $E_q = \psi_{fd} = X_{ad} i_f$

$$\left. \begin{aligned} v_d &= \dot{\psi}_d - \dot{\psi}_q - R i_d \\ v_q &= \dot{\psi}_q + \dot{\psi}_d - R i_q \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= -X_d i_d + X_{ad} i_f + X_{ad} i_D \\ \psi_q &= -X_q i_q + X_{aq} i_Q \end{aligned} \right\}$$

ψ_{fd} 和 E_q 分别代表励磁电流对定子绕组产生的互感磁链 (即空载磁链) 和相应的感应电势, E_q 即通常所指的**空载电势**。

相量形式：

选q轴作为虚轴，比q轴落后 90° 的方向为实轴，则有：

$$\dot{V}_d = v_d, \quad \dot{I}_d = i_d$$

$$\dot{V}_q = jv_q, \quad \dot{I}_q = ji_q, \quad \dot{E}_q = jE_q$$

$$\left. \begin{aligned} v_q &= E_q - X_d i_d \\ v_d &= X_q i_q \end{aligned} \right\} \Rightarrow \left. \begin{aligned} \dot{V}_q &= \dot{E}_q - jX_d \dot{I}_d \\ \dot{V}_d &= -jX_q \dot{I}_q \end{aligned} \right\}$$

相应的交流等值电路如图6-12所示。

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_q &= \dot{E}_q - jX_d \dot{I}_d \\ \dot{V}_d &= -jX_q \dot{I}_q \end{aligned} \right\}$$

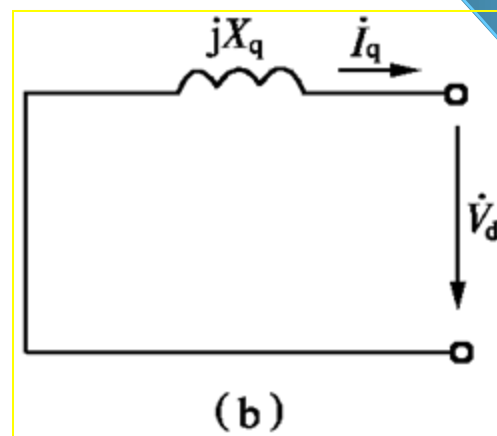
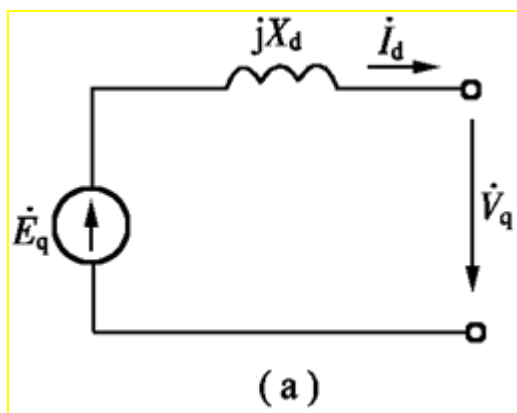


图6-12 凸极机的等值电路

(a) 纵轴向 (b) 横轴向

$$\text{令 } \dot{V} = \dot{V}_d + \dot{V}_q, \quad \dot{I} = \dot{I}_d + \dot{I}_q$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_q &= \dot{E}_q - jX_d \dot{I}_d \\ \dot{V}_d &= -jX_q \dot{I}_q \end{aligned} \right\}$$

可将式(6-49)合写成:

$$\dot{V} = \dot{E}_q - jX_q \dot{I}_q - jX_d \dot{I}_d$$

$$= \dot{E}_q - j(X_d - X_q) \dot{I}_d - jX_q \dot{I}$$

为了能用一个等值电路来代表凸极同步电机，引入一虚拟电势 $\dot{E}_Q$ 。

$$\dot{E}_Q = \dot{E}_q - j(X_d - X_q) \dot{I}_d$$

方程式(6-50)便简化为: $\dot{V} = \dot{E}_q - j(X_d - X_q)\dot{I}_d - jX_q\dot{I}$

$$\dot{V} = \dot{E}_Q - jX_q\dot{I}$$

$$\dot{E}_Q = \dot{E}_q - j(X_d - X_q)\dot{I}_d$$

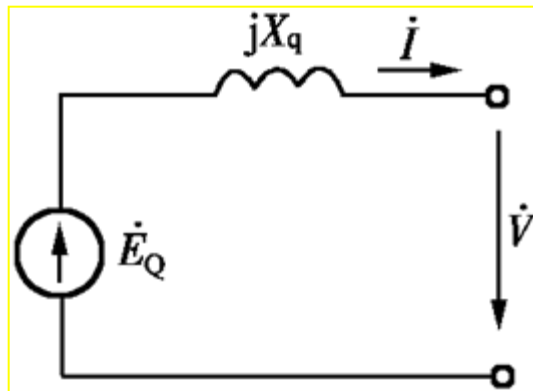
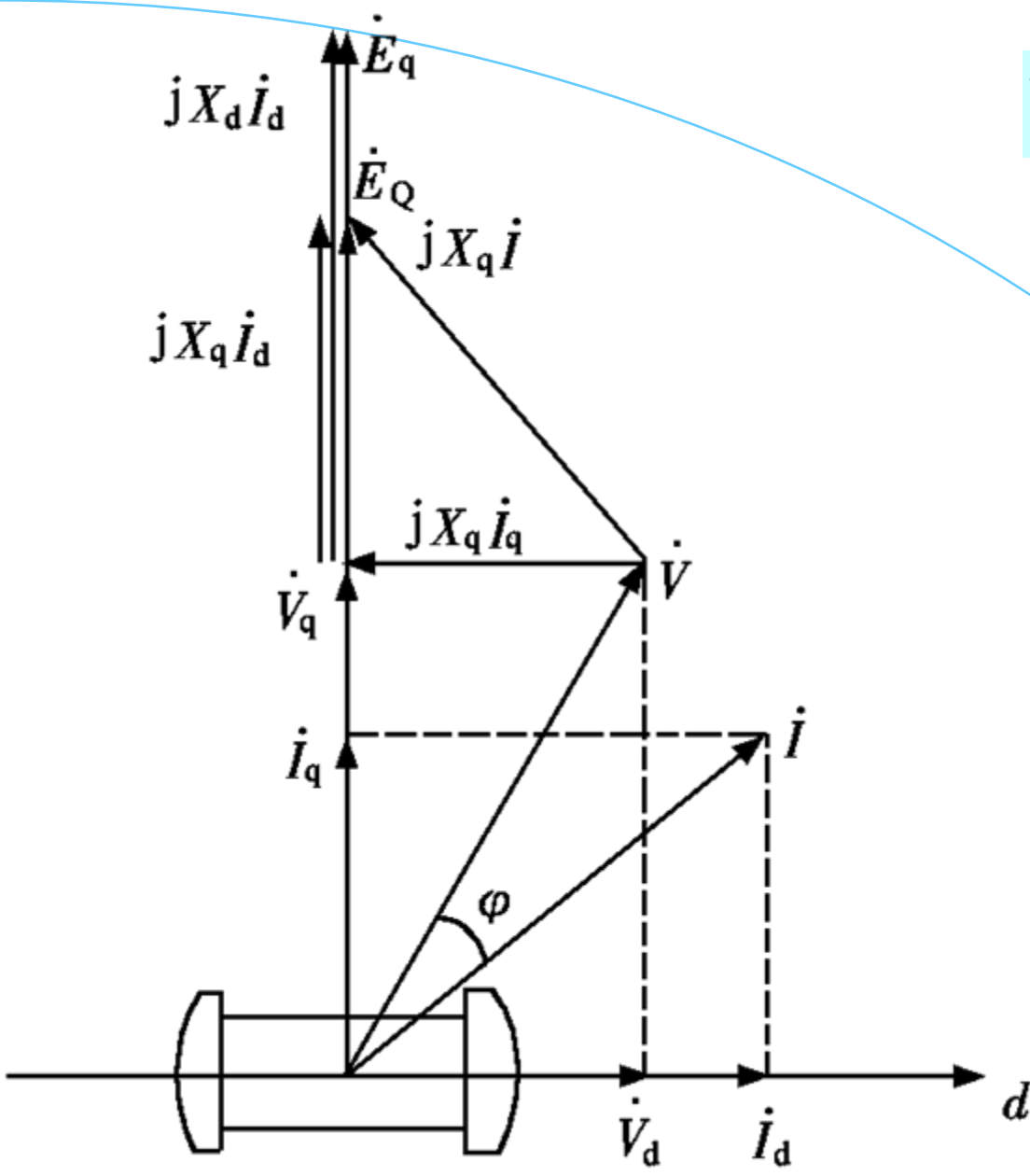


图6-14 等值隐极机电路

同步电机稳态运行相量图如图6-13所示。



$$\begin{aligned}\dot{V} &= \dot{E}_q - jX_q \dot{I}_q - jX_d \dot{I}_d \\ &= \dot{E}_q - j(X_d - X_q) \dot{I}_d - jX_q \dot{I}\end{aligned}$$

$$\dot{E}_Q = \dot{E}_q - j(X_d - X_q) \dot{I}_d$$

$$\dot{V} = \dot{E}_Q - jX_q \dot{I}$$

图6-13 同步电机稳态运行相量图

例6-2

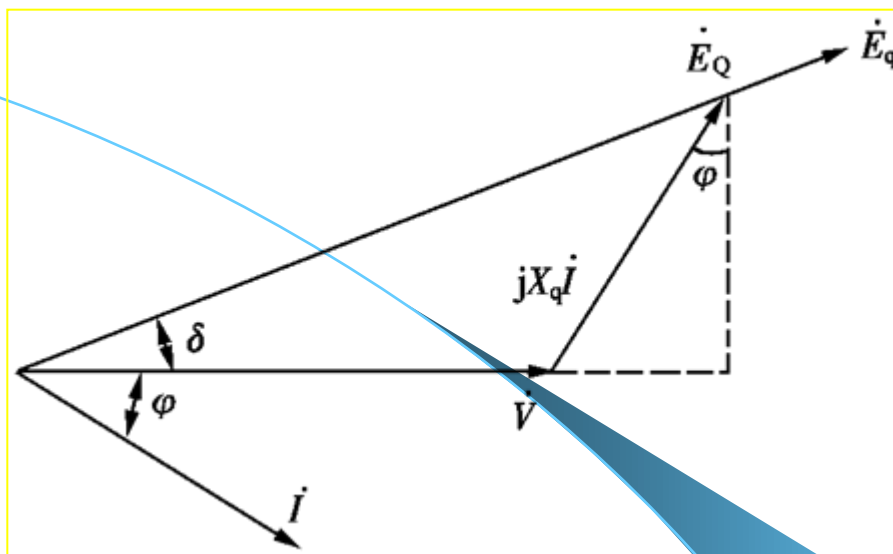


图6-15 电势相量图

(1) 先计算 $\dot{E}_Q$;

(2) 确定 $\dot{E}_Q$ 的相位;

(3) 计算电流和电压的两个轴向分量;

(4) 计算空载电势 $\dot{E}_q$ 。

第四节 同步电机的三相短路

一、突然短路暂态过程的特点

- **对称稳态**运行时，电枢磁势的大小不随时间而变化，在空间以同步速度旋转，它同转子没有相对运动，因此不会在转子绕组中感应电流。
- **突然短路**时，定子电流在数值上发生急剧变化，电枢反应磁通也随着变化，并在转子绕组中感应电流，这种电流又反过来影响定子电流的变化。这种**定子和转子绕组电流的互相影响**就是突然短路暂态过程的特点。

二、无阻尼绕组同步电机突然三相短路的物理分析

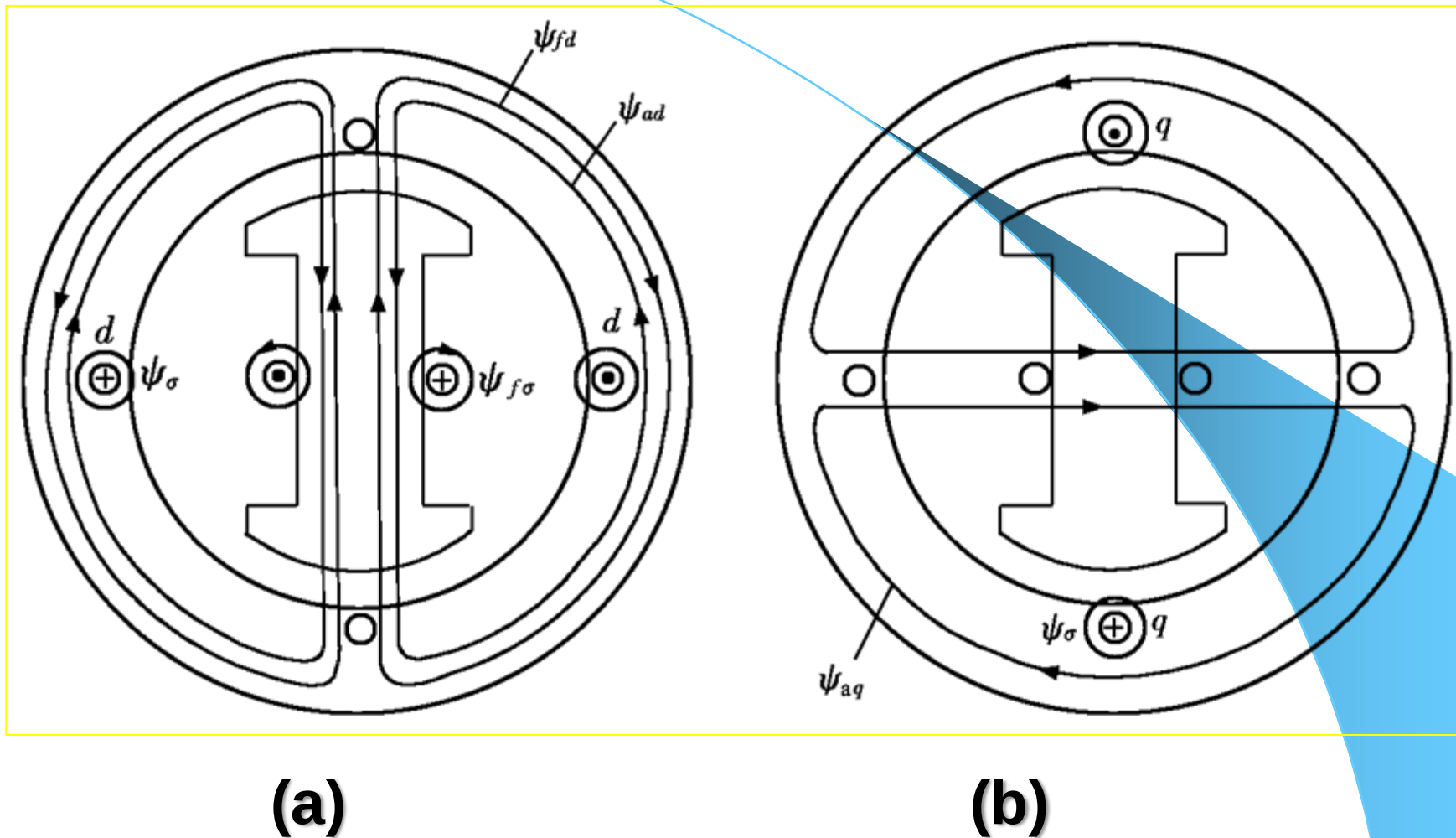


图6-16 无阻尼绕组同步发电机正常稳态运行时磁链分解示意图

1、 超导体闭合回路磁链守恒原则

- (1) **超导体**：电阻为零的导体。
- (2) **超导体磁链守恒原则**：超导体回路能永久维持磁链不变。
- (3) 超导体磁链守恒原则的**数学描述**：

$$\frac{d\psi}{dt} + Ri = 0$$

若回路为超导体，则 $R=0$ ，便有

$$\frac{d\psi}{dt} = 0, \text{即 } \psi = \text{常数}$$

- (4) 同步电机的各种绕组的电阻相对电抗来说很小，在分析时假定电阻为零，即**作为超导体闭合回路来分析**。



图 5-6 超导体闭合回路磁链守恒

短路瞬间，外
接阻抗减小

产生定子基频
电流增量 Δi_{ω}

电枢反应增强，
转子磁链减小

电枢反应增强，
定子磁链增大

为保持磁链守恒，
转子中产生自由直流
 Δi_{fd} 分量

转子基频分量 $i_{f\omega}$

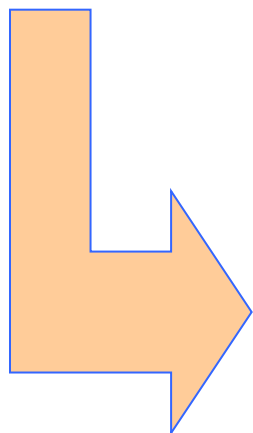
定子直流分量

定子绕组产生自由
基频电流分量 i'_{ω}

恒定直流 i_{ap}

倍频分量 $i_{2\omega}$

产生的脉动磁链分解为正反两个方向
以同步速旋转的磁链



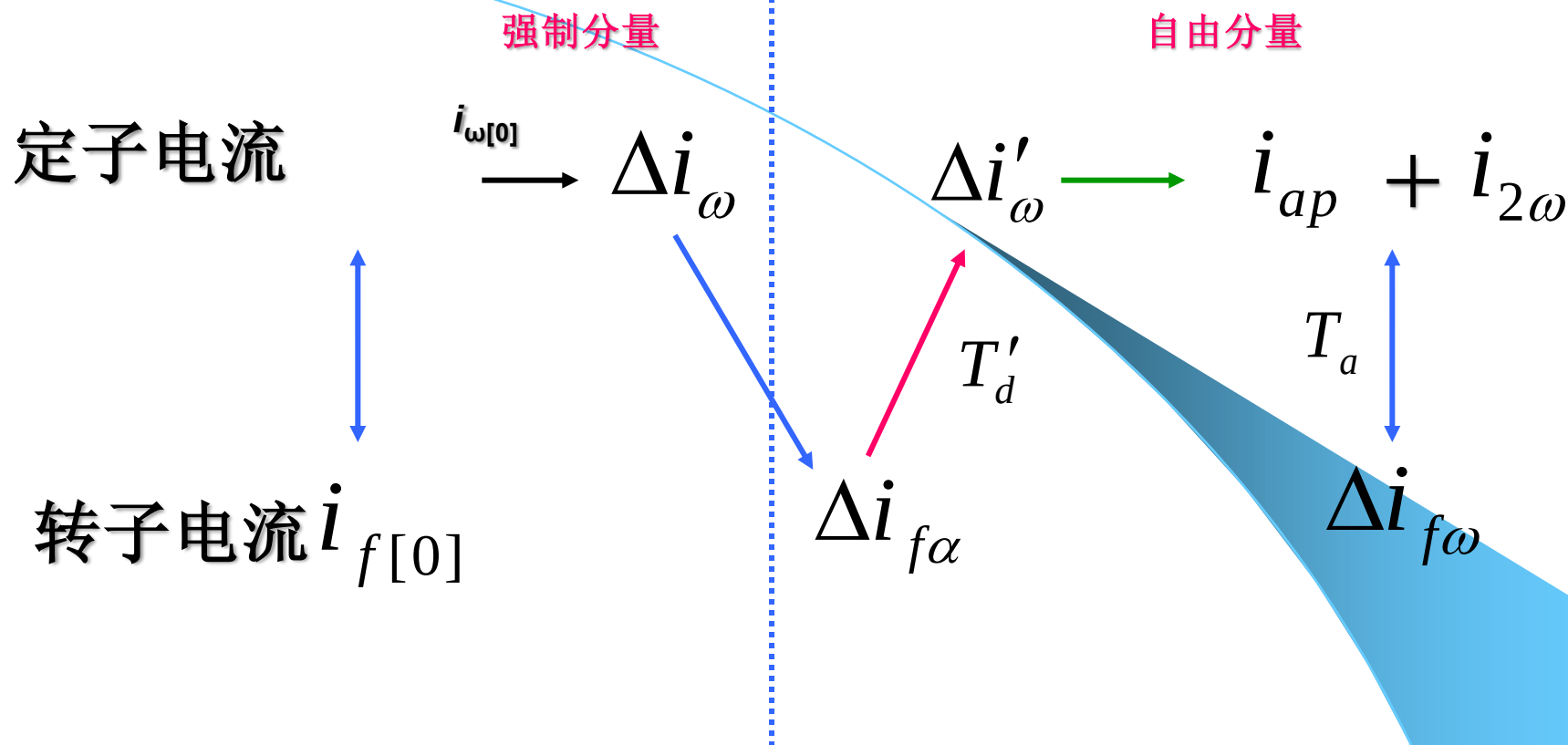


图6-17 定子和转子电流的相互关系示意图

三、同步发电机的暂态电势和暂态电抗

➤ 无阻尼绕组同步电机的磁链平衡方程

$$\begin{aligned}\psi_d &= -X_d i_d + X_{ad} i_f \\ &= -X_{\sigma a} i_d + X_{ad} (i_f - i_d)\end{aligned}$$

$$\psi_q = -X_q i_q$$

$$\begin{aligned}\psi_f &= -X_{ad} i_d + X_f i_f \\ &= X_{ad} (i_f - i_d) + X_{\sigma f} i_f\end{aligned}$$

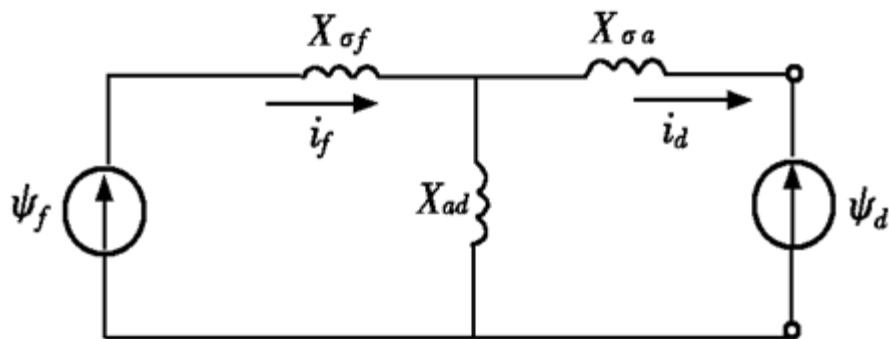
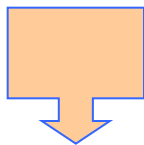
$$\left. \begin{aligned}\psi_d &= -X_d i_d + X_{ad} i_f + X_{ad} i_D \\ \psi_q &= -X_q i_q + X_{aq} i_Q \\ \psi_f &= -X_{ad} i_d + X_f i_f + X_{ad} i_D \\ \psi_D &= -X_{ad} i_d + X_{ad} i_f + X_D i_D \\ \psi_Q &= -X_{aq} i_q + X_Q i_Q\end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned}X_d &= X_{\sigma a} + X_{ad} \\ X_f &= X_{\sigma f} + X_{ad} \\ X_D &= X_{\sigma D} + X_{ad} \\ X_q &= X_{\sigma a} + X_{aq} \\ X_Q &= X_{\sigma Q} + X_{aq}\end{aligned} \right\}$$

电路图

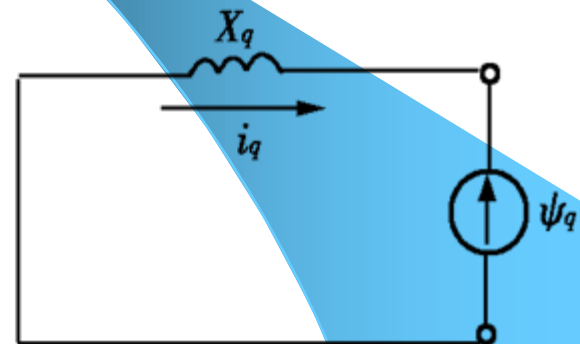
$$\psi_d = -X_{\sigma a} i_d + X_{ad} (i_f - i_d)$$

$$\psi_f = X_{ad} (i_f - i_d) + X_{\sigma f} i_f$$



(a)

$$\psi_q = -X_q i_q$$



(b)

图6-18 无阻尼绕组发电机的磁链平衡等值电路

(a) 纵轴向 (b) 横轴向

$$\psi_d = -X_{\sigma a} i_d + X_{ad} (i_f - i_d)$$

$$\psi_f = X_{ad} (i_f - i_d) + X_{\sigma f} i_f$$



消去 i_f

$$\begin{aligned}\psi_d &= \frac{X_{ad}}{X_f} \psi_f - \left(X_d - \frac{X_{ad}^2}{X_f} \right) i_d \\ &= \frac{X_{ad}}{X_f} \psi_f - \left(X_{\sigma a} + \frac{X_{\sigma f} X_{ad}}{X_{\sigma f} + X_{ad}} \right) i_d\end{aligned}$$

如果定义：

$$E'_q = \frac{X_{ad}}{X_f} \psi_f$$

暂态电势，不突变

$$X'_d = X_{\sigma a} + \frac{X_{\sigma f} X_{ad}}{X_{\sigma f} + X_{ad}}$$

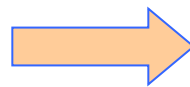
暂态电抗

则

$$\psi_d = E'_q - X'_d i_d$$

当变压器电势 $\dot{\psi}_d = \dot{\psi}_q = 0$ 时，忽略电阻则有：

$$\left. \begin{aligned} v_d &= \dot{\psi}_d - \psi_q - Ri_d \\ v_q &= \dot{\psi}_q + \psi_d - Ri_q \end{aligned} \right\}$$



$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= v_q \\ \psi_q &= -v_d \end{aligned} \right\}$$

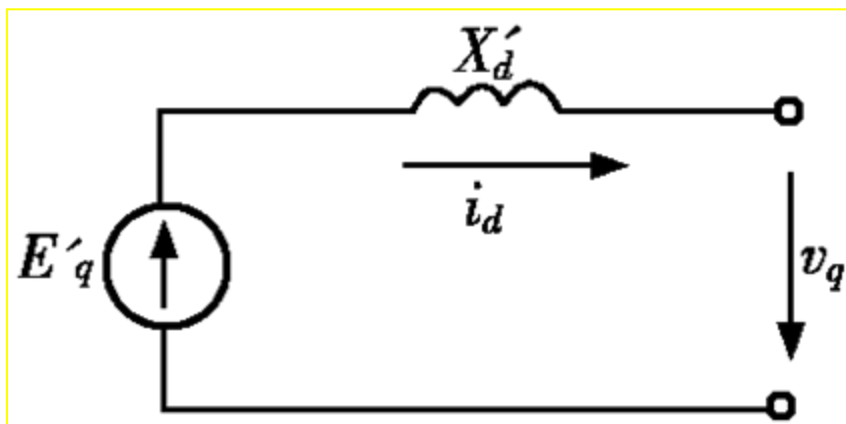
$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= E'_q - X'_d i_d \\ \psi_q &= -X_q i_q \end{aligned} \right\}$$



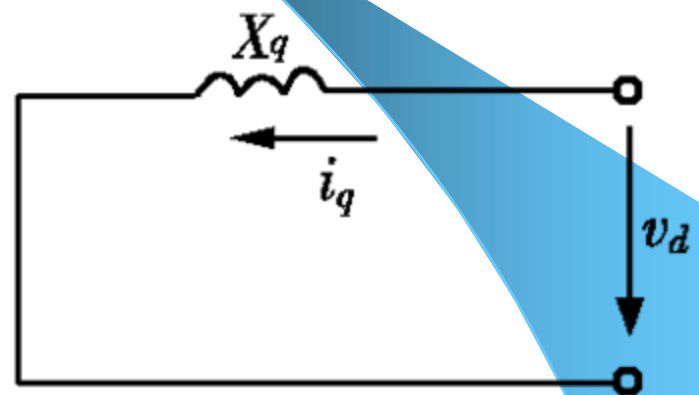
$$\left. \begin{aligned} v_q &= E'_q - X'_d i_d \\ v_d &= X_q i_q \end{aligned} \right\}$$

$$v_q = E'_q - X'_d i_d$$

$$v_d = X_q i_q$$



(a)



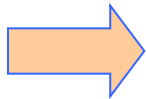
(b)

图6-19 用暂态参数表示的同步发电机等值电路

(a) 纵轴向 (b) 横轴向

相量形式

$$\left. \begin{aligned} v_q &= E'_q - X'_d i_d \\ v_d &= X_q i_q \end{aligned} \right\}$$



$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_q &= \dot{E}'_q - jX'_d \dot{I}_d \\ \dot{V}_d &= -jX_q \dot{I}_q \end{aligned} \right\}$$

两个方程相加可得：

$$\dot{V} = \dot{E}'_q - jX_q \dot{I}_q - jX'_d \dot{I}_d$$

令

$$\dot{E}' = \dot{E}'_q - j(X_q - X'_d) \dot{I}_q$$

于是

$$\dot{V} = \dot{E}' - jX'_d \dot{I}$$

$$\dot{V} = \dot{E}' - jX'_d \dot{I}$$

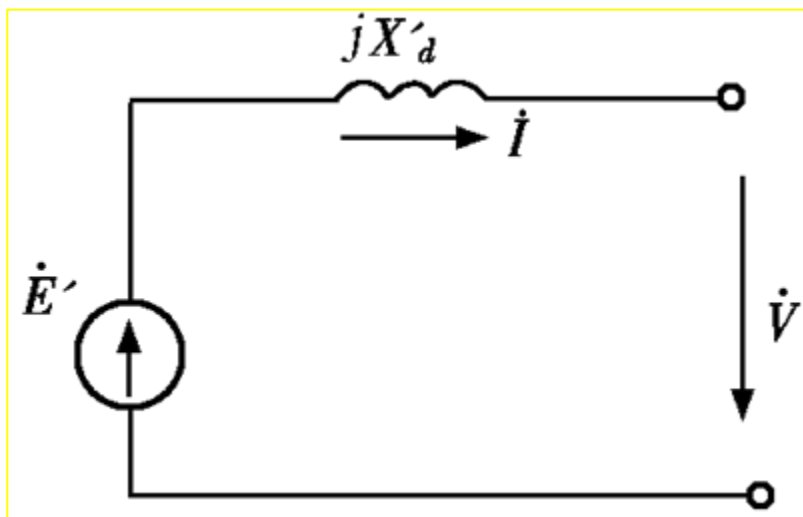


图6-20 用 E' 和 X'_d 表示的
同步发电机的等值电路

例6-3

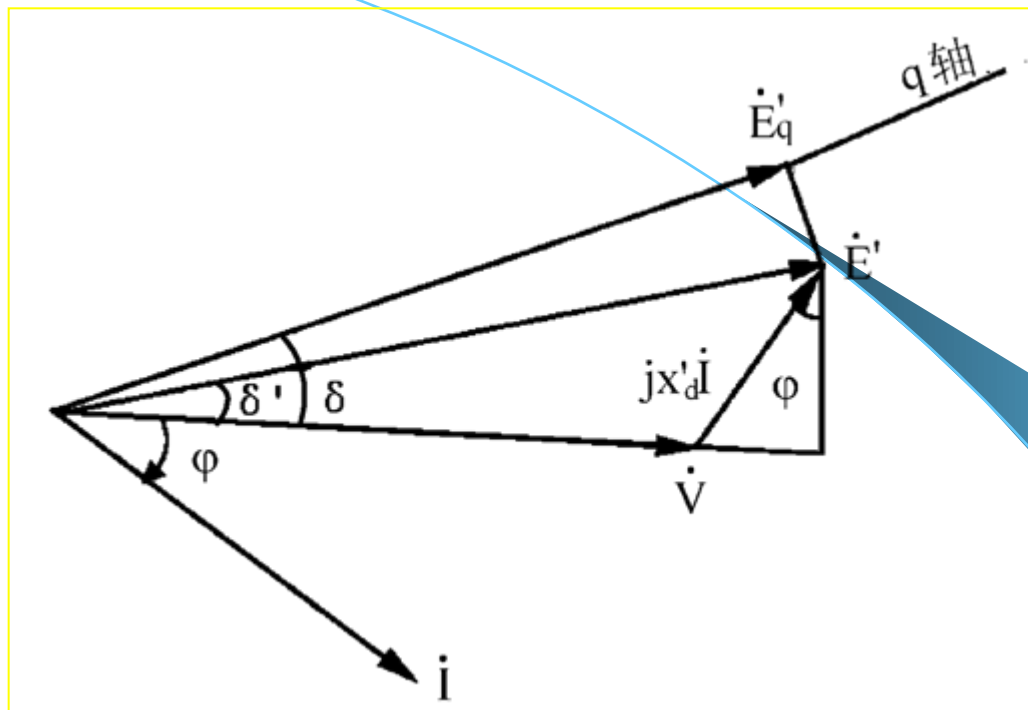


图6-22 例6-3的电势相量图

四、同步发电机的次暂态电势和次暂态电抗

$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= -X_d i_d + X_{ad} i_f + X_{ad} i_D \\ \psi_q &= -X_q i_q + X_{aq} i_Q \\ \psi_f &= -X_{ad} i_d + X_f i_f + X_{ad} i_D \\ \psi_D &= -X_{ad} i_d + X_{ad} i_f + X_D i_D \\ \psi_Q &= -X_{aq} i_q + X_Q i_Q \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} X_d &= X_{\sigma a} + X_{ad} \\ X_f &= X_{\sigma f} + X_{ad} \\ X_D &= X_{\sigma D} + X_{ad} \\ X_q &= X_{\sigma a} + X_{aq} \\ X_Q &= X_{\sigma Q} + X_{aq} \end{aligned} \right\}$$

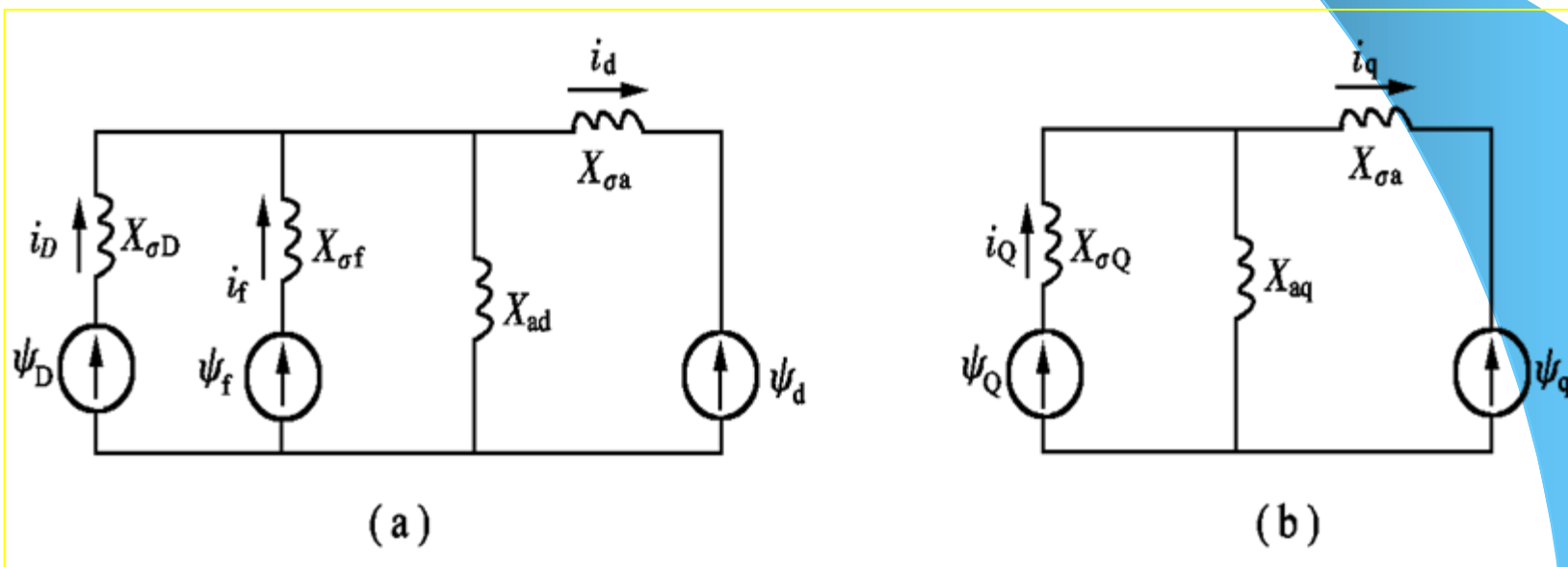
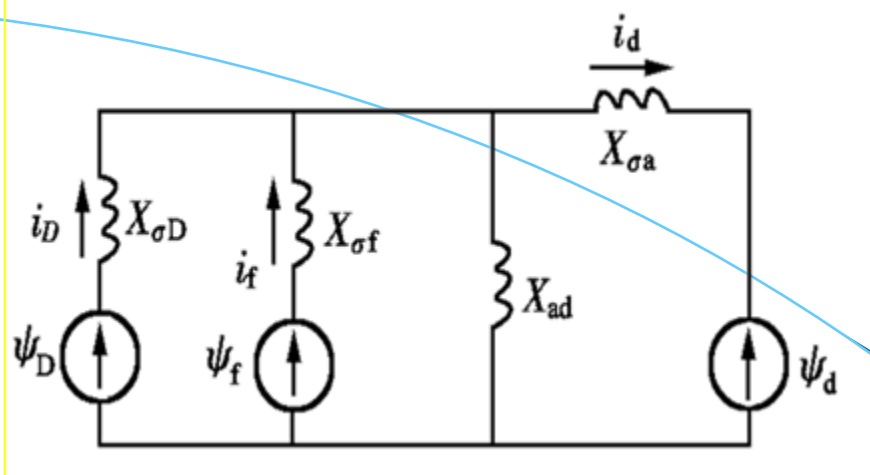
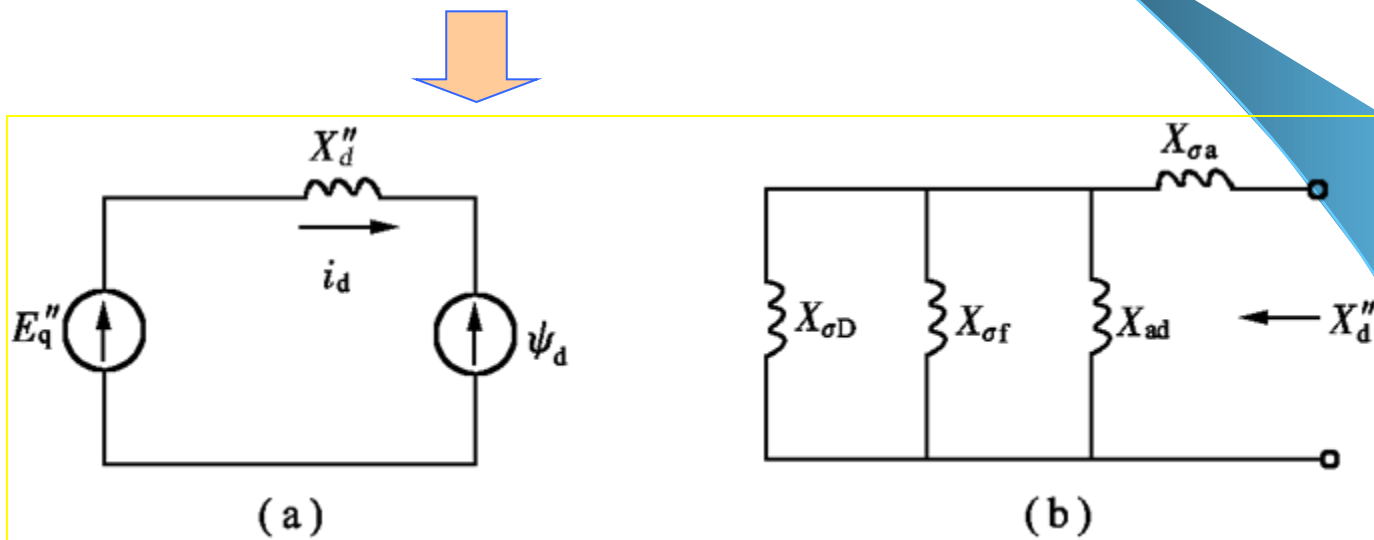


图6-23 有阻尼绕组电机的磁链平衡等值电路
(a) 纵轴向 (b) 横轴向

纵轴
方向



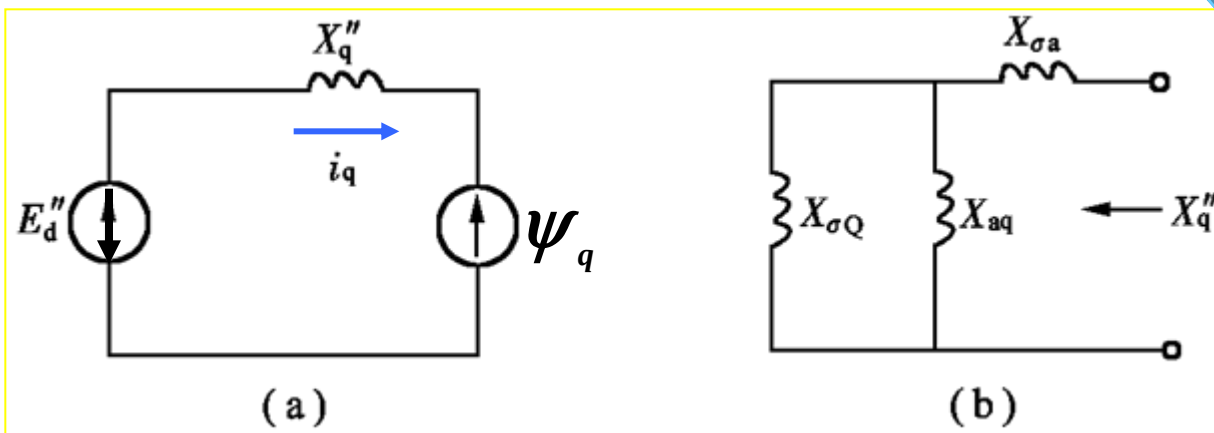
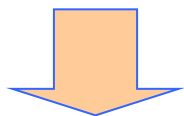
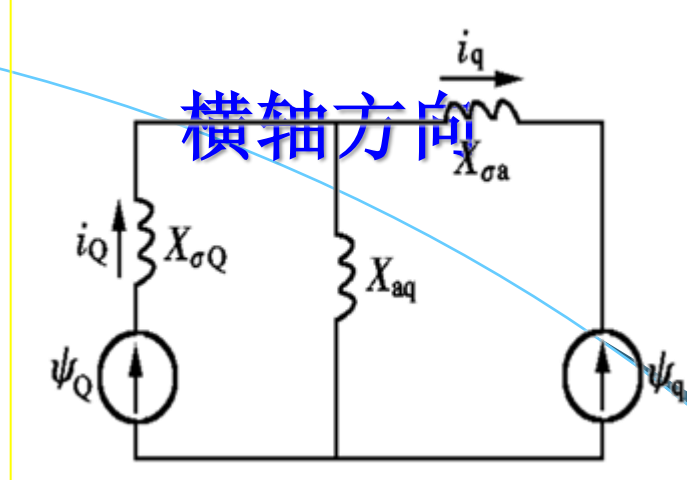
用戴维南等值
定理进行简化



$$E_q'' = \frac{\frac{\psi_f}{X_{\sigma f}} + \frac{\psi_D}{X_{\sigma D}}}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_{\sigma D}}}$$

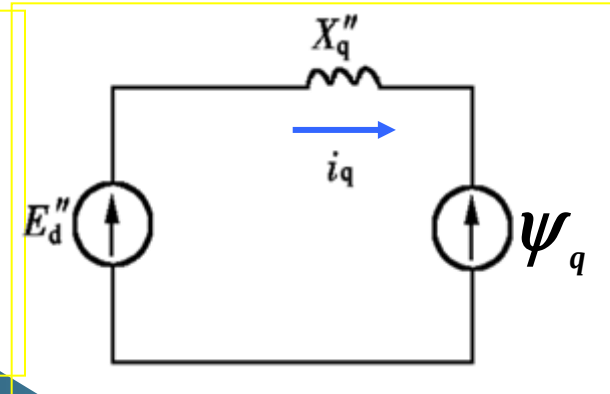
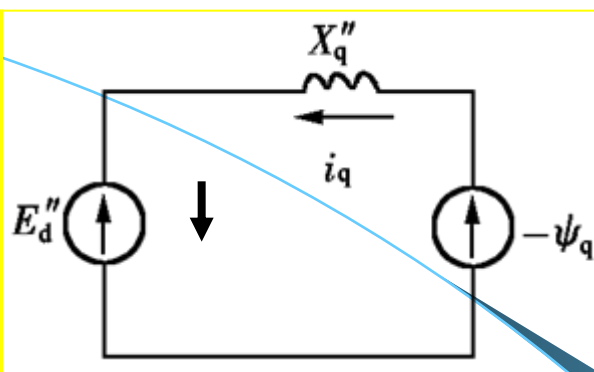
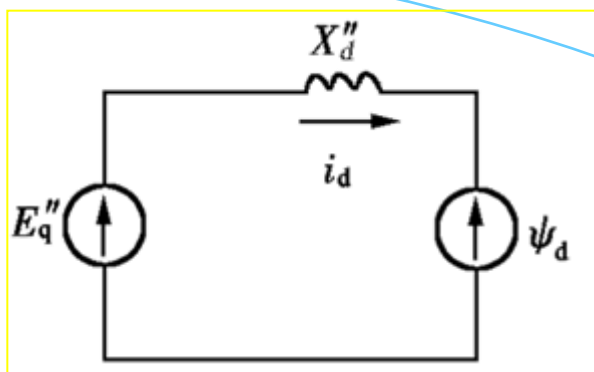
$$X_d'' = X_{\sigma a} + \frac{1}{\frac{1}{X_{ad}} + \frac{1}{X_{\sigma f}} + \frac{1}{X_{\sigma D}}}$$

横轴方向



$$E_d'' = - \frac{\frac{\psi_Q}{X_{\sigma Q}}}{\frac{1}{X_{\sigma Q}} + \frac{1}{X_{aq}}}$$

$$X_q'' = X_{\sigma a} + \frac{1}{\frac{1}{X_{\sigma Q}} + \frac{1}{X_{aq}}}$$



$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= E_q'' - X_d'' i_d \\ -\psi_q &= E_d'' + X_q'' i_q \end{aligned} \right\}$$

当电机处于稳态或忽略变压器电势时(忽略电阻):

$$\psi_d = v_q, \quad -\psi_q = v_d$$

便得

$$\left. \begin{aligned} v_q &= E_q'' - X_d'' i_d \\ v_d &= E_d'' + X_q'' i_q \end{aligned} \right\}$$

用交流相量的形式写成：

$$\left. \begin{aligned} v_q &= E_q'' - X_d'' i_d \\ v_d &= E_d'' + X_q'' i_q \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_q &= E_q'' - jX_d'' \dot{I}_d \\ \dot{V}_d &= \dot{E}_d'' - jX_q'' \dot{I}_q \end{aligned} \right\}$$

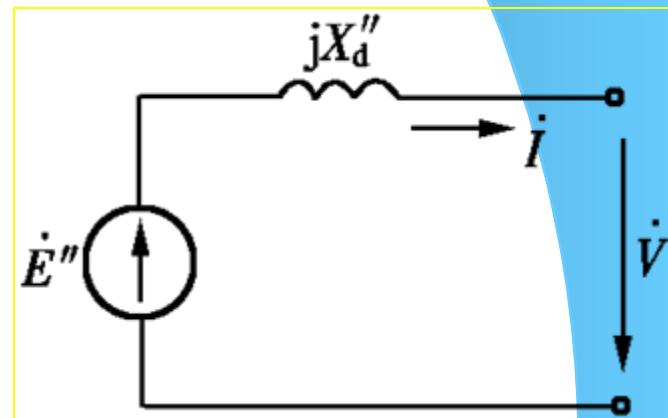
两式相加：

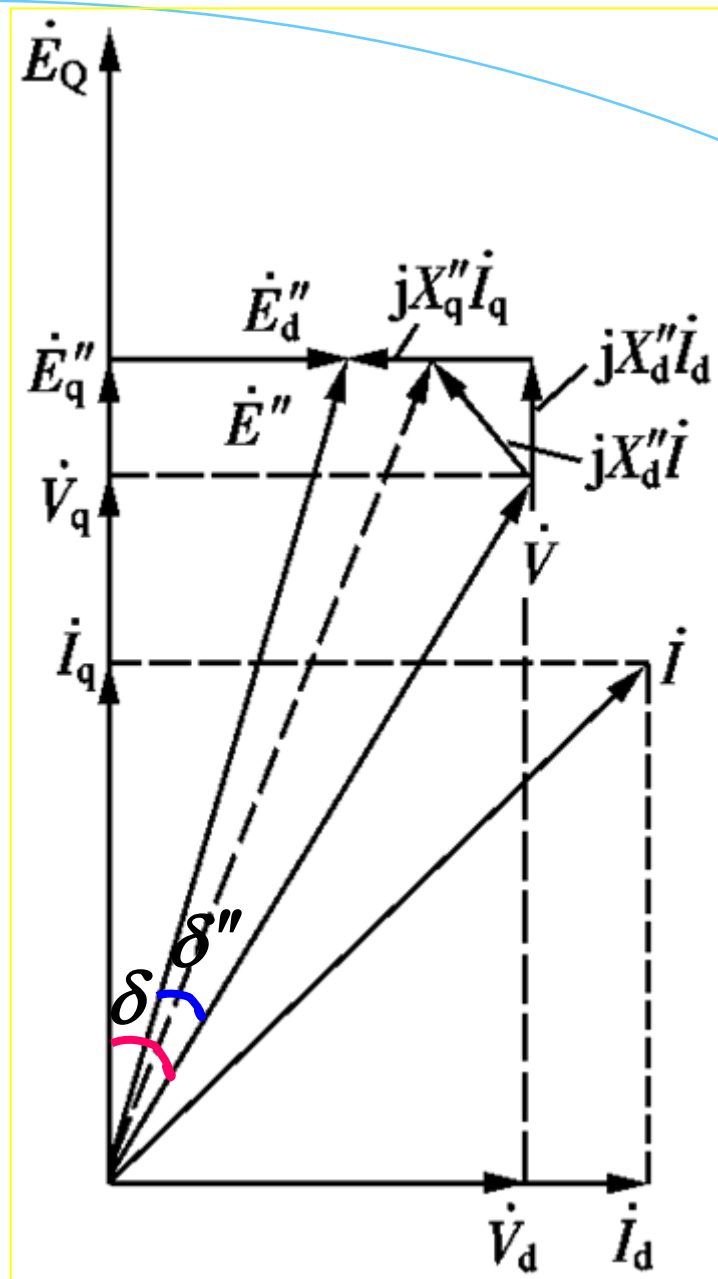
$$\begin{aligned} \dot{V} &= (\dot{E}_q'' + \dot{E}_d'') - jX_d'' \dot{I}_d - jX_q'' \dot{I}_q \\ &= \dot{E}'' - jX_d'' \dot{I}_d - jX_q'' \dot{I}_q \end{aligned}$$

$$\dot{V} = \dot{E}'' - jX_d'' \dot{I} - j(X_q'' - X_d'') \dot{I}_q$$

略去第三项

$$\dot{V} = \dot{E}'' - jX_d'' \dot{I}$$





$$\begin{aligned}\dot{V} &= (\dot{E}_q'' + \dot{E}_d'') - jX_d''\dot{I}_d - jX_q''\dot{I}_q \\ &= \dot{E}'' - jX_d''\dot{I}_d - jX_q''\dot{I}_q\end{aligned}$$

$$\dot{V} = \dot{E}'' - jX_d''\dot{I} - j(X_q'' - X_d'')\dot{I}_q$$

图6-26 同步电机相量图

例6-4

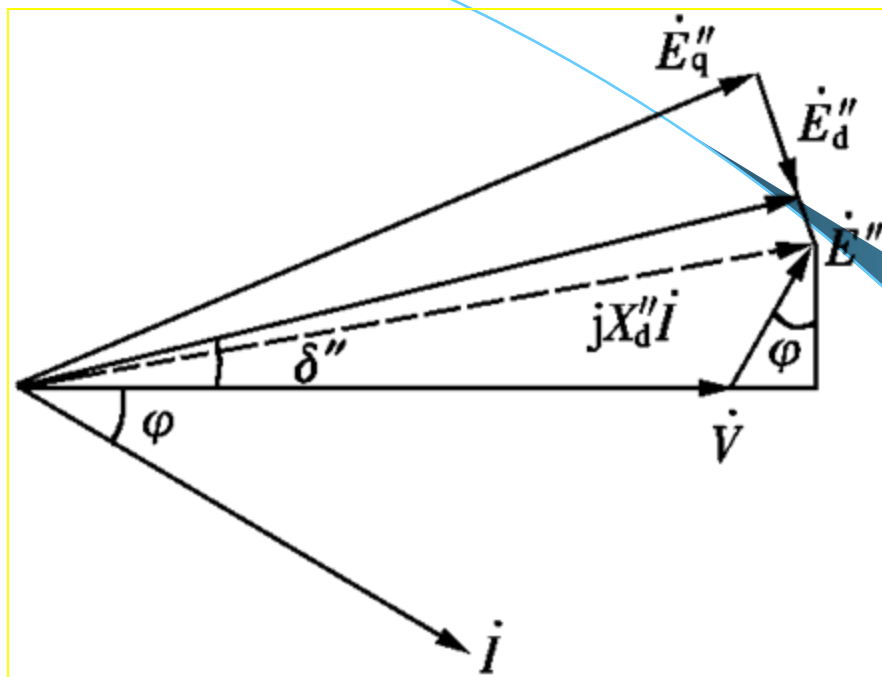


图6-28 例6-4的电势相量图

第三章 电力系统三相短路的实用计算

一、三相短路实用计算的基本假设

- (1) **电势都同相位**：短路过程中各发电机之间不发生摇摆，并认为所有发电机的电势都同相位。
- (2) **负荷近似估计**：或当作**恒定电抗**，或当作某种临时**附加电源**，视具体情况而定。
- (3) **不计磁路饱和**：系统各元件的参数都是恒定的，可以应用**叠加原理**。

(4) **对称三相系统**: 除不对称故障处出现局部的不对称以外, 实际的电力系统通常都当做是对称的。

(5) **纯电抗表示**: 忽略高压输电线的电阻和电容, 忽略变压器的电阻和励磁电流 (三相三柱式变压器的零序等值电路除外), 加上所有发电机电势都同相位的条件, 这就避免了复数运算。

(6) **金属性短路**: 短路处相与相 (或地) 的接触往往经过一定的电阻 (如外物电阻、电弧电阻、接触电阻等), 这种电阻通常称为“过渡电阻”。所谓金属性短路, 就是不计过渡电阻的影响, 即认为过渡电阻等于零的短路情况。

第三章 电力系统三相短路的实用计算

由于多电源复杂系统中，不能将所有电源均视为无限大功率电源，精确计算出三相短路电流比较困难，故工程上采用一些简化计算。

- 发电机参数用次暂态参数表示
- 忽略较小的负荷
- 忽略线路对地电容和变压器的励磁支路
- 高压电网忽略电阻的影响
- 变压器的变比用平均电压之比

短路电流的计算主要是求短路电流周期分量的起始值，即次暂态电流 I''

计算方法主要有

等值法
叠加原理法
运算曲线法
转移阻抗法

第一节 交流电流初始值计算

一、简单系统 I'' 计算—等值法

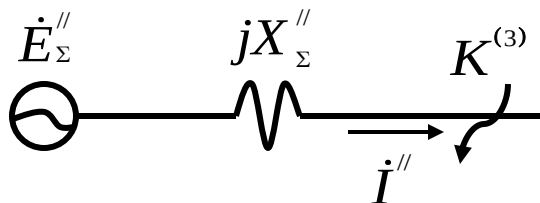
1) 计算故障前正常运行时的潮流分布。首先求得各发电机（包括短路点附近得大型电动机）的端电压和定子电流，然后计算它们的次暂态电动势。

$$\text{对于发电机 } \dot{E}'' = \dot{U} + j \dot{I} X''$$

$$\text{对于电动机 } \dot{E}'' = \dot{U} - j \dot{I} X''$$

近一步简化计算时可认为： $\dot{E}'' = 1$

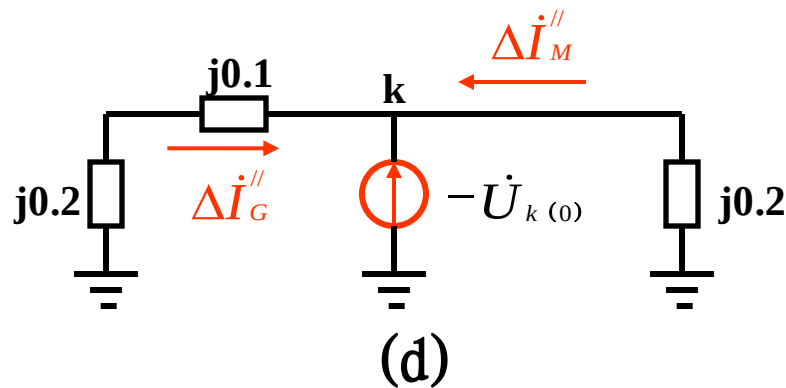
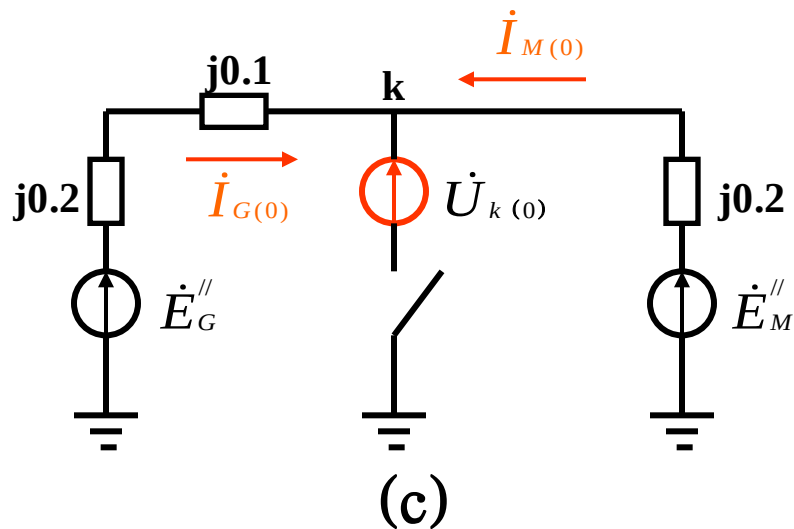
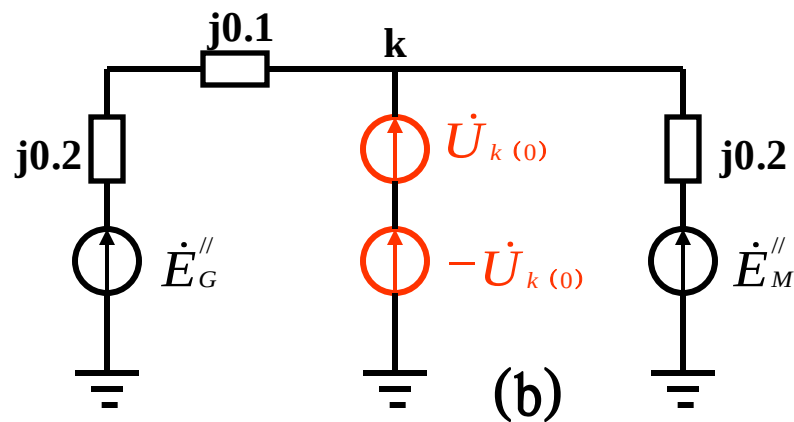
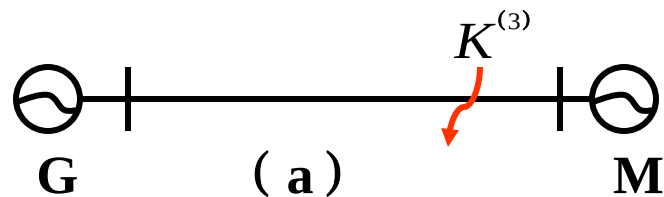
2) 以短路点为中心，将网络化简为用等值电动势和等值电抗表示的等值电路，由此求出起始暂态电流。



$$i'' = \dot{E}_{\Sigma}'' / j X_{\Sigma}''$$

二、多电源系统系统 I'' 计算—叠加原理法

图(a)所示系统K点发生短路时，短路点电压为零，可等值为图(b)。利用叠加原理可将图(b)分解为：正常运行等值电路(c) + 故障分量等值电路(d)，分别求解可得最终结果。



利用叠加原理的解题步骤:

- 1) 由正常运行等值电路(c), 求出网络中各节点的正常电压和各支路的正常电流, 如: $\dot{U}_{k(0)}$ 、 $\dot{I}_{G(0)}$ 、 $\dot{I}_{M(0)}$
- 2) 由故障分量等值电路(d), 求出网络中各节点电压变化量和各支路电流的变化量, 如: $\Delta\dot{U}_k = -\dot{U}_{k(0)}$ 、 $\Delta\dot{I}_G''$ 、 $\Delta\dot{I}_M''$
- 3) 将正常和故障分量相叠加, 可得故障后各节点电压和各支路电流, 如:

$$\dot{U}_{k(0)} + \Delta\dot{U}_k = 0; \quad \dot{I}_K'' = \Delta\dot{I}_K''$$

$$\dot{I}_G'' = \dot{I}_{G(0)} + \Delta\dot{I}_G''; \quad \dot{I}_M'' = \dot{I}_{M(0)} + \Delta\dot{I}_M''$$

【例 5-4】 试运用叠加原理计算例 5-3 图 5-8 所示网络中 k 点三相短路时，故障点电流以及发电机和电动机支路中的电流。

解 按叠加原理有：

(1) 正常情况下的电流和电压（在例 5-3 中已求得）。

发电机支路中的正常电流 $\dot{I}_{G[0]} = 0.69 - j0.52$

电动机支路中的正常电流 $\dot{I}_{M[0]} = -0.69 + j0.52$

故障支路中的正常电流 $\dot{I}_{k[0]} = 0$

故障点的正常电压 $\dot{U}_{k[0]} = 0.97 \angle 0^\circ$

(2) 故障情况下的电流和电压。将图 5-10 (d) 所示网络对 k 点化简，求得整个网络对 k 点的等值电抗为

$$X_\Sigma = \frac{0.3 \times 0.2}{0.3 + 0.2} = 0.12$$

故障点电压的故障分量为 $\Delta \dot{U}_k = -\dot{U}_{k[0]} = -0.97 \angle 0^\circ$

由此得故障支路中的故障分量电流为

$$\Delta \dot{I}''_k = \frac{-\Delta \dot{U}_k}{jX_\Sigma} = \frac{\dot{U}_{k[0]}}{jX_\Sigma} = \frac{0.97 \angle 0^\circ}{j0.12} = -j8.08$$

将此故障分量电流按阻抗反比分配到各并联支路中去，便有

$$\Delta \dot{I}''_G = -j8.08 \times \frac{j0.2}{j0.5} = -j3.23$$

$$\Delta \dot{I}''_M = -j8.08 \times \frac{j0.3}{j0.5} = -j4.85$$

(3) 将正常和故障情况叠加。发电机支路中的电流

$$\dot{I}''_G = \dot{I}_{G[0]} + \Delta \dot{I}''_G = (0.69 - j0.52) + j(-j3.23) = 0.69 - j3.75$$

电动机支路中的电流

$$\dot{I}''_M = \dot{I}_{M[0]} + \Delta \dot{I}''_M = (-0.69 + j0.52) + (-j4.85) = -0.69 - j4.33$$

故障支路中的电流

将此故障分量电流按阻抗反比分配到各并联支路中去，便有

$$\Delta \dot{I}''_G = -j8.08 \times \frac{j0.2}{j0.5} = -j3.23$$

$$\Delta \dot{I}''_M = -j8.08 \times \frac{j0.3}{j0.5} = -j4.85$$

(3) 将正常和故障情况叠加。电动机支路中的电流

$$\dot{I}''_G = \dot{I}_{G[0]} + \Delta \dot{I}''_G = (0.69 - j0.52) + j(-j3.23) = 0.69 - j3.75$$

电动机支路中的电流

$$\dot{I}''_M = \dot{I}_{M[0]} + \Delta \dot{I}''_M = (-0.69 + j0.52) + (-j4.85) = -0.69 - j4.33$$

故障支路中的电流

$$\dot{I}''_k = \dot{I}_{k[0]} + \Delta \dot{I}''_k = -j8.08$$

故障点的电压

$$\dot{U}_k = \dot{U}_{k[0]} + \Delta \dot{U}_k = 0.97 \angle 0^\circ + (-0.97 \angle 0^\circ) = 0$$

由上可见，采用叠加原理与直接用等值法进行计算所得结果完全相同。由本例计算还可知，大容量同步电动机在故障点附近时，它对故障电流的影响较大。

$$\dot{I}''_G = \dot{I}_{G[0]} + \Delta \dot{I}''_G = (0.69 - j0.52) + j(-j3.23) = 0.69 - j3.75$$

电动机支路中的电流

$$\dot{I}''_M = \dot{I}_{M[0]} + \Delta \dot{I}''_M = (-0.69 + j0.52) + (-j4.85) = -0.69 - j4.33$$

故障支路中的电流

$$\dot{I}''_k = \dot{I}_{k[0]} + \Delta \dot{I}''_k = -j8.08$$

故障点的电压

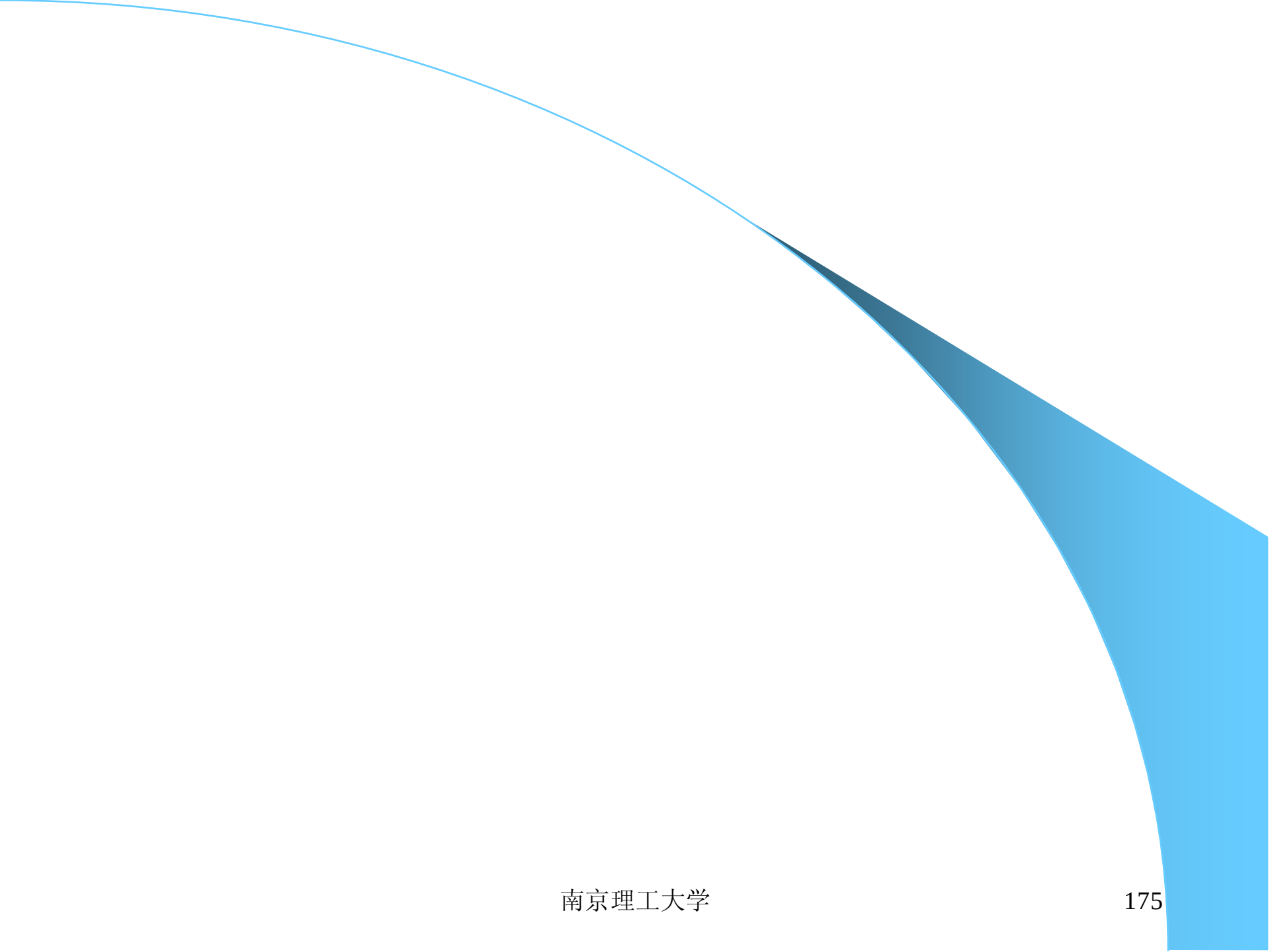
$$\dot{U}_k = \dot{U}_{k[0]} + \Delta \dot{U}_k = 0.97 \angle 0^\circ + (-0.97 \angle 0^\circ) = 0$$

由上可见,采用叠加原理与直接用等值法进行计算所得结果完全相同。由本例计算还可知,大容量同步电动机在故障点附近时,它对故障电流的影响较大。

在实用计算中,当系统中的电源电动势采用 $\dot{E}''_{[0]} = 1$ 时,电源至短路点的电流 $I''_k = 1/X_\Sigma$ 。如果短路处是经过阻抗 Z_k 短路,则短路点的电流为

$$\dot{I}''_k = \frac{1}{jX_\Sigma + Z_k} \quad (5-23)$$

对于复杂系统必须经过网络化简,求得 X_Σ 。在求得短路点的短路电流后,还要按网络结构计算电流分布,才能得到各支路的电流。



南京理工大学

175

(1) 由正常运行情况下等值电路图 5-10 (c)，求出网络中各节点正常时的电压和各支路的正常电流，如 $\dot{U}_{k[0]}$ 、 $\dot{I}_{G[0]}$ 、 $\dot{I}_{M[0]}$ 等。

(2) 由确定故障分量的等值电路图 5-10 (d)，求出由于故障而引起的各节点电压的变化量和各支路电流的变化量。如 $\Delta \dot{U}_k = -\dot{U}_{k[0]}$ 、 $\Delta \dot{I}_G''$ 、 $\Delta \dot{I}_M''$ 等。

(3) 将正常和故障两种情况叠加，可得故障后各节点的电压和各支路的电流。如图 5-10 (b) 中的电压和电流

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{k[0]} + \Delta \dot{U}_k &= 0 \\ \dot{I}_G'' &= \dot{I}_{G[0]} + \Delta \dot{I}_G'' \\ \dot{I}_M'' &= \dot{I}_{M[0]} + \Delta \dot{I}_M'' \\ \dot{I}_k'' &= \dot{I}_{k[0]} + \Delta \dot{I}_k'' \end{aligned} \right\} \quad (5-22)$$

第二节 应用运算曲线求任意时刻短路点的短路电流

1. 计算曲线的概念

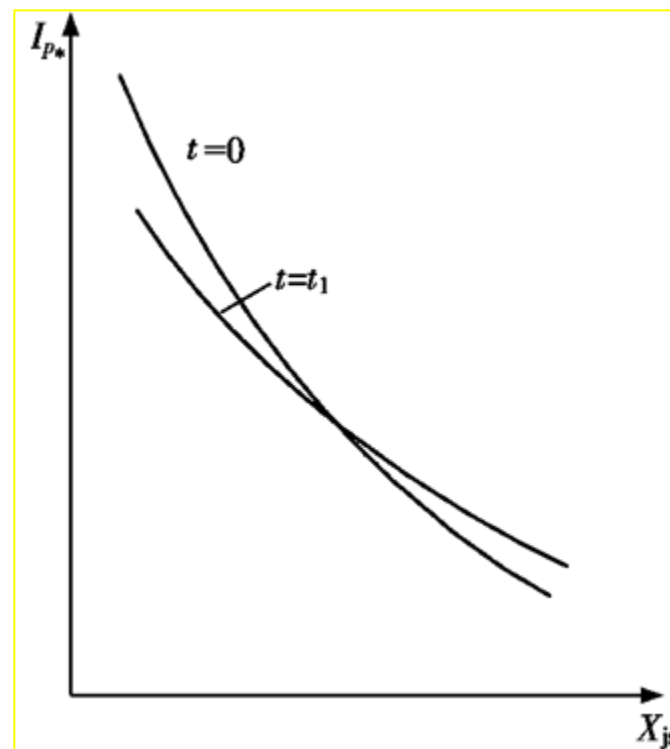
在发电机的参数和运行初态给定后，短路电流仅是电源到短路点的距离 和时间的函数。

$$I_f = f(X_e, t)$$

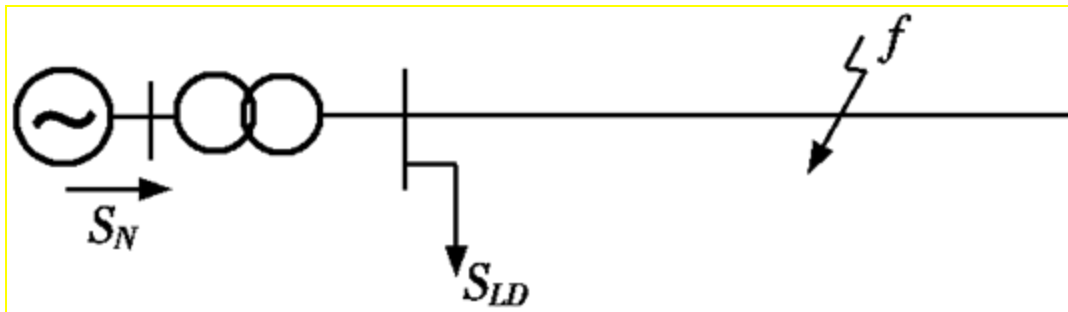
定义计算电抗 X_{js}

$$X_{js} = X_d'' + X_e$$

则 $I_{P*} = f(X_{js}, t)$



2. 计算曲线的制作



制作计算曲线的典型接线图

汽轮发电机(18种): 12MW ~ 200MW

水轮发电机(17种): 12.5MW ~ 225MW

当 $X_{js} \geq 3.45$ 时

$$I_{P^*} = 1 / X_{js}$$

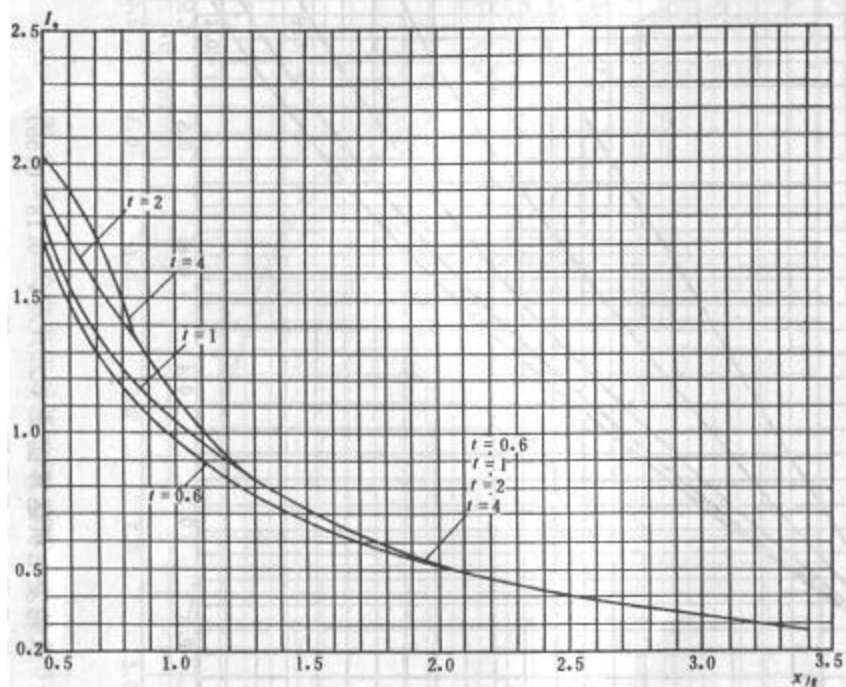


图 C-5 汽轮发电机运算曲线 (五) ($x_{jt} = 0.50 \sim 3.45$)

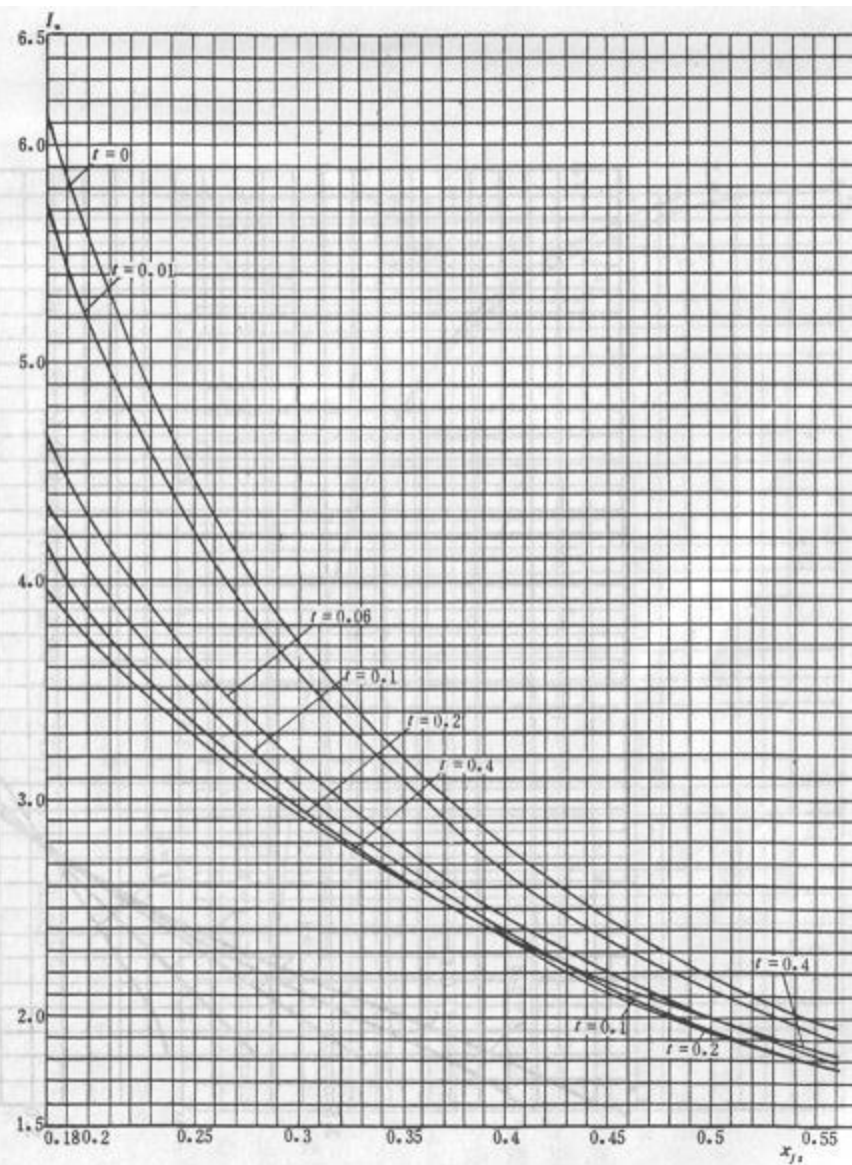


图 C-6 水轮发电机运算曲线 (一) ($x_{jt} = 0.18 \sim 0.56$)

3. 应用计算曲线法的步骤

- (1) 绘制等值网络;
- (2) 求转移电抗: $X_{if} (i=1, 2, \dots, g)$ 、 X_{sf} ;
- (3) 求计算电抗;

$$X_{jsi} = X_{if} \frac{S_{Ni}}{S_B}$$

- (4) 查表: $I_{pt1*}, I_{pt2*}, \dots, I_{ptg*}$ 。

- (5) 无限大功率电源供给的短路周期电流

$$I_{pS*} = \frac{1}{X_{sf}}$$

(6) 计算短路电流周期分量的有名值

第 i 台等值发电机提供的短路电流为：

$$I_{pt \cdot i} = I_{pt \cdot i*} I_{Ni} = I_{pt \cdot i*} \frac{S_{Ni}}{\sqrt{3}V_{av}}$$

无限大功率电源提供的短路电流为：

$$I_{pS} = I_{pS*} I_B = I_{pS*} \frac{S_B}{\sqrt{3}V_{av}}$$

短路点周期电流的有名值为：

$$I_{pt} = \sum_{i=1}^g I_{pt \cdot i*} \frac{S_{Ni}}{\sqrt{3}V_{av}} + I_{pS*} \frac{S_B}{\sqrt{3}V_{av}}$$

例题

4. 计算曲线的应用

电源合并的原则：把短路电流变化规律大体相同的发电机合并起来。

- (1) 与短路点电气距离相差不大的同类型发电机合并；
- (2) 直接接于短路点的发电机（或发电厂）单独考虑；
- (3) 远离短路点的同类型发电厂合并；
- (4) 无限大功率电源（如果有的话）合并成一组。

5、转移阻抗的求取

转移阻抗 Z_{if} 的定义：任一复杂网络，经网络化简消去了除电源电势和短路点以外的所有中间节点，最后得到的各电源与短路点之间的直接联系阻抗为转移阻抗。

$$\dot{I}_f = \frac{\dot{E}_1}{Z_{1f}} + \frac{\dot{E}_2}{Z_{2f}} + \dots + \frac{\dot{E}_i}{Z_{if}} + \dots$$

转移阻抗 Z_{if} 的物理意义：除 E_i 外，其余电动势均为零（短路接地），则 E_i 与此时 f 点电流之比值即为电源 i 与短路点 f 之间的转移阻抗。

(1)、网络化简法

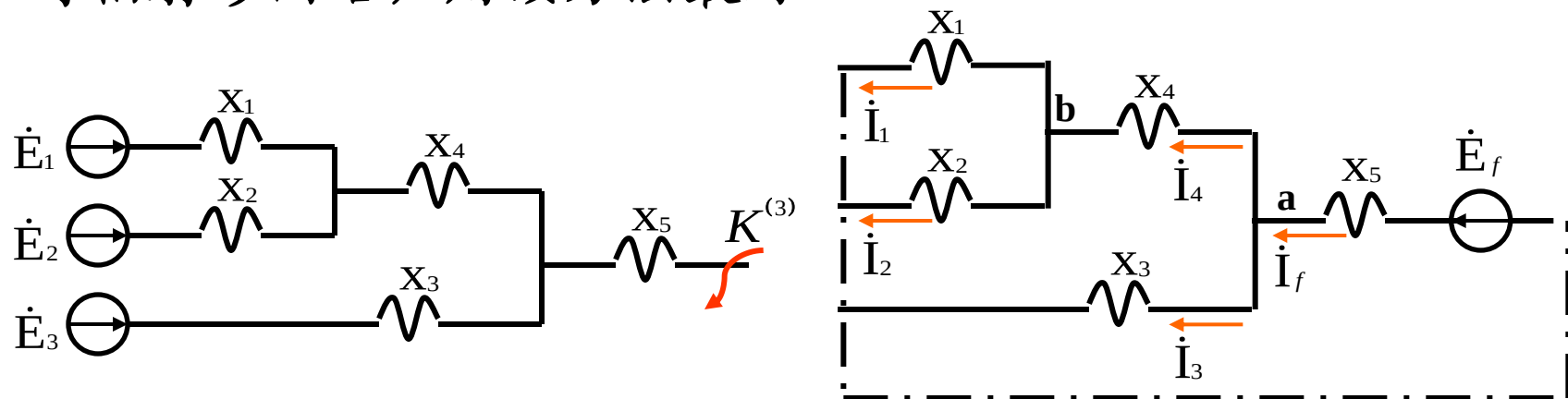
消去了除电源电势和短路点以外的所有中间节点，最后得到的各电源与短路点之间的直接联系阻抗为转移阻抗

短路电流周期分量计算步骤总结为：

1. 网络化简，得到各电源对短路点的转移电抗；
2. 求各电源的计算电抗 X_c ；
3. 查运算曲线，得到以发电机额定容量为基准的周期分量电流标么值；
4. 求得各周期分量电流有名值之和，即为短路点的总电流；
5. 若要求提高计算准确度，可进行有关的修正计算。

(2)、单位电流法

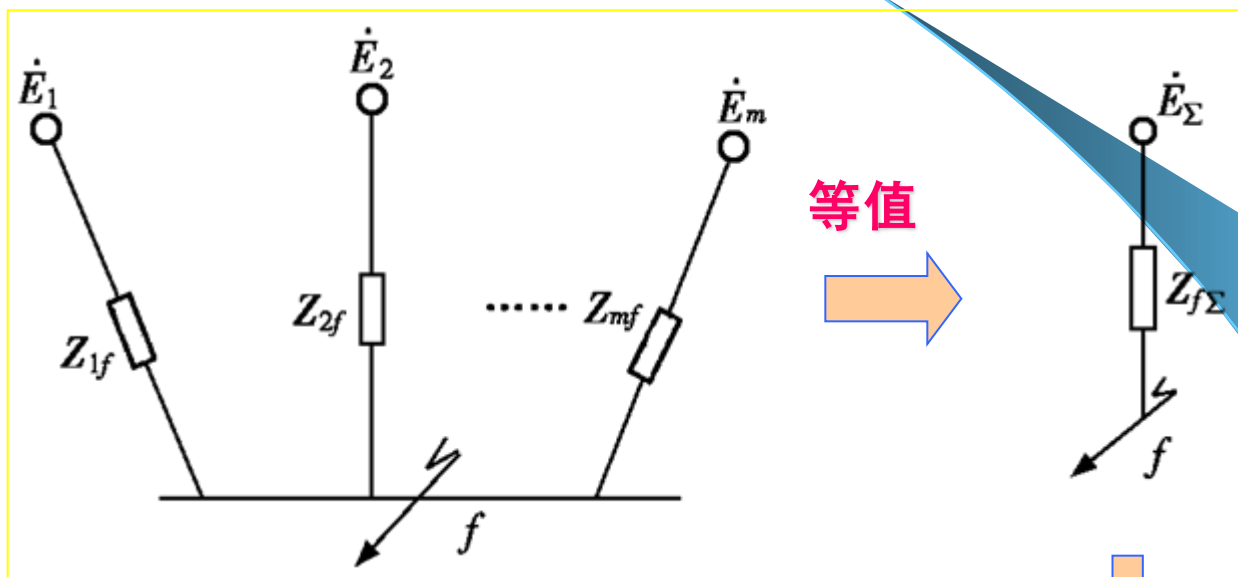
对辐射形网络，用该方法最好



$$\left\{ \begin{array}{l} U_b = I_1 X_1 = X_1; \quad I_2 = \frac{U_b}{X_2} = \frac{X_1}{X_2}; \quad I_4 = I_1 + I_2 \\ U_a = U_b + I_4 X_4; \quad I_3 = \frac{U_a}{X_3}; \quad I_f = I_3 + I_4 \\ E_f = U_a + I_f X_5 \end{array} \right. \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} x_{1f} = \frac{E_f}{I_1} = E_f \\ x_{2f} = \frac{E_f}{I_2} \\ x_{3f} = \frac{E_f}{I_3} \end{array} \right.$$

二、网络变换与化简

化简目标



$$\dot{I}_f = \frac{\dot{E}_1}{Z_{1f}} + \frac{\dot{E}_2}{Z_{2f}} + \dots + \frac{\dot{E}_m}{Z_{mf}}$$

$$\dot{I}_f = \frac{\dot{E}_\Sigma}{Z_{f\Sigma}}$$

1. 网络的等值变换

(1) 星网变换

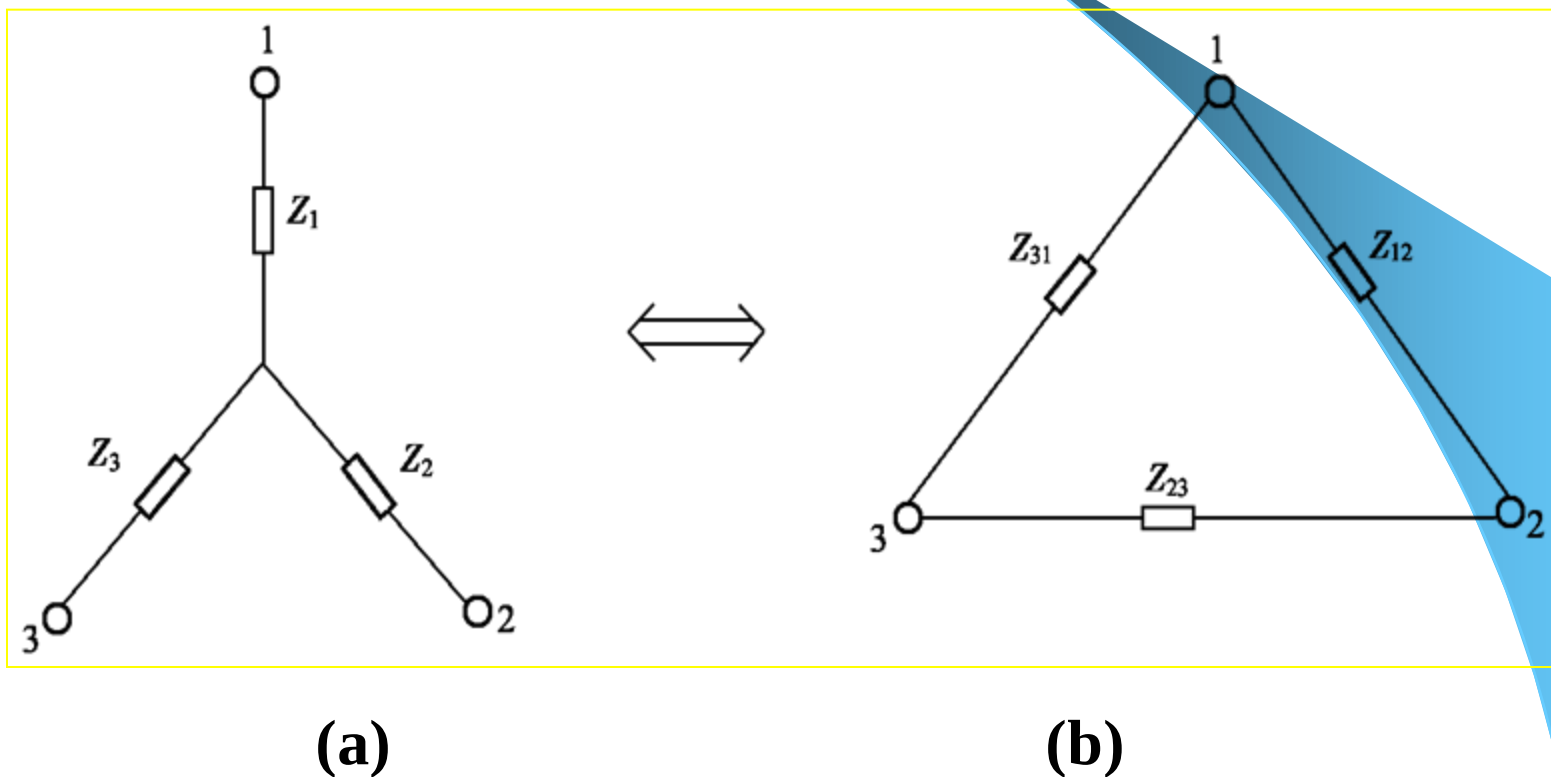
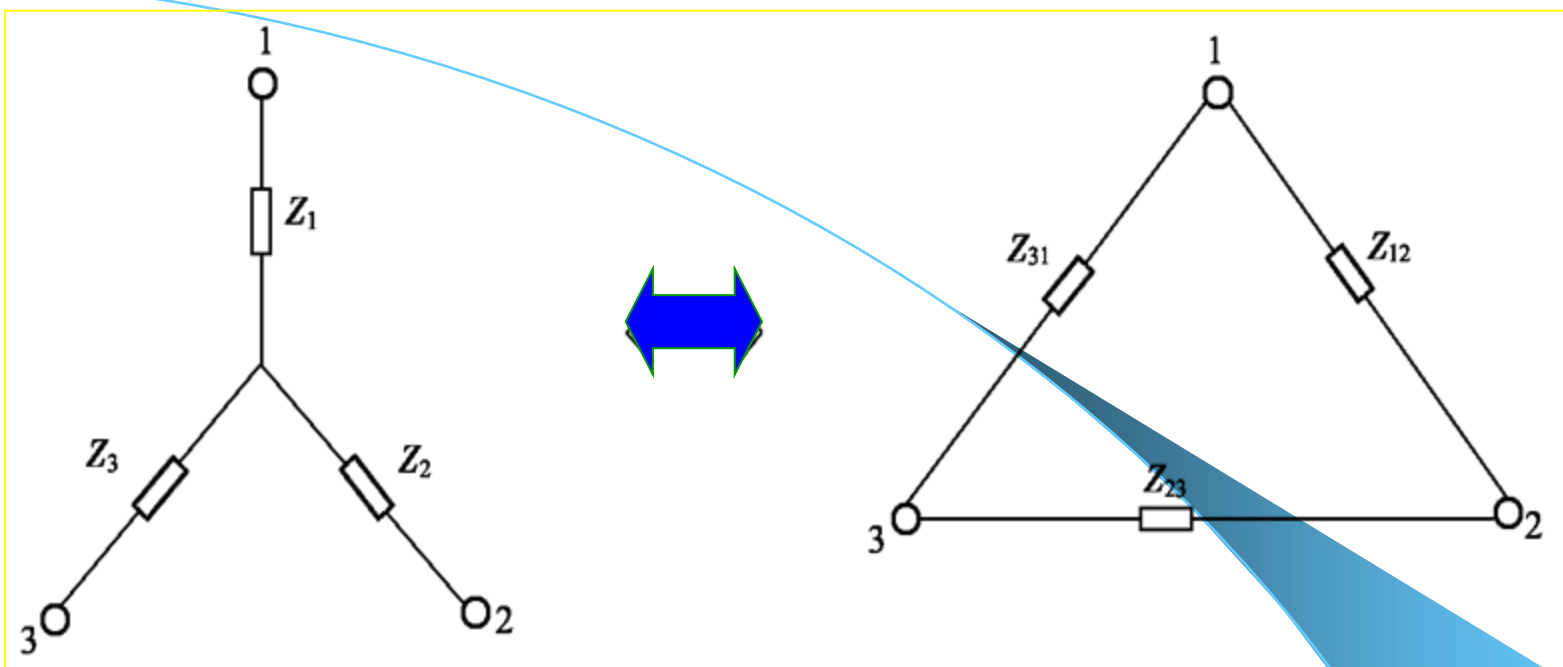
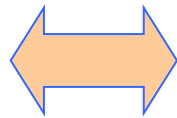


图6-30 星形(a)和三角形(b)接线



$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= \frac{Z_{12} \cdot Z_{31}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}} \\ Z_2 &= \frac{Z_{12} \cdot Z_{23}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}} \\ Z_3 &= \frac{Z_{23} \cdot Z_{31}}{Z_{12} + Z_{23} + Z_{31}} \end{aligned} \right\}$$



$$\left. \begin{aligned} Z_{12} &= Z_1 + Z_2 + \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_3} \\ Z_{23} &= Z_2 + Z_3 + \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_1} \\ Z_{31} &= Z_3 + Z_1 + \frac{Z_3 \cdot Z_1}{Z_2} \end{aligned} \right\}$$

多支路星形变为网形

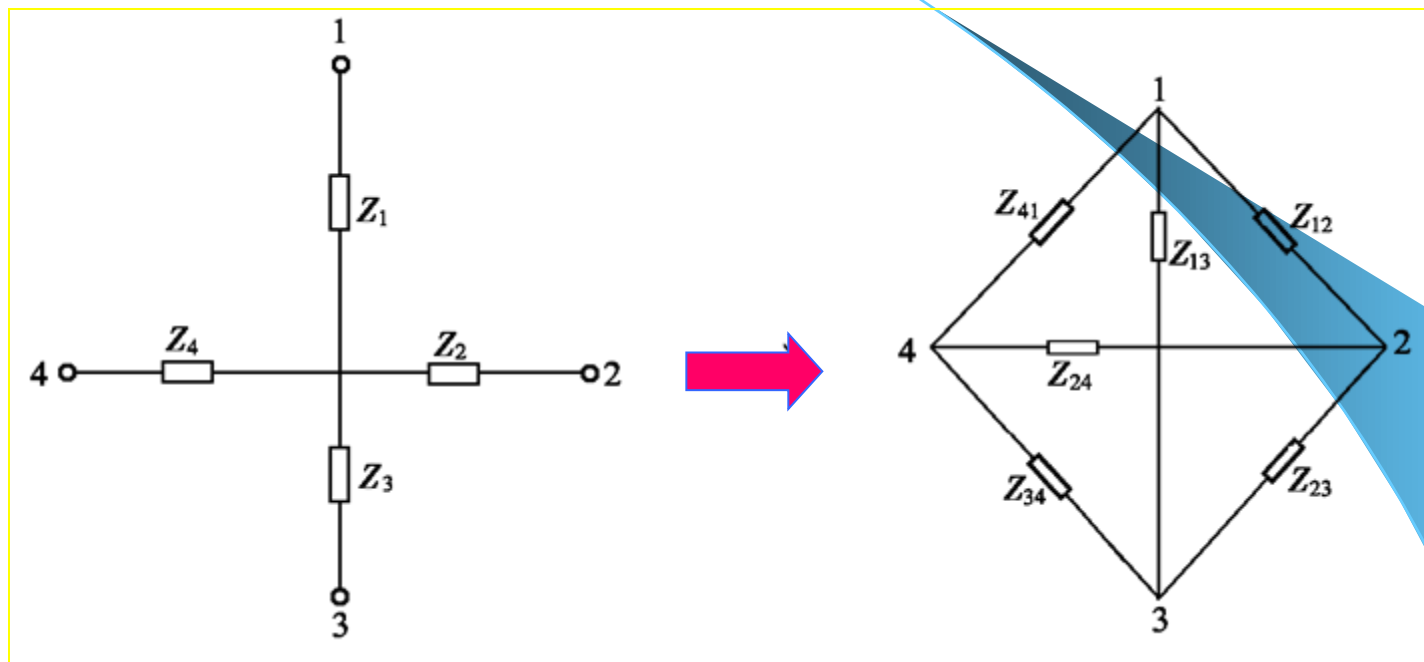
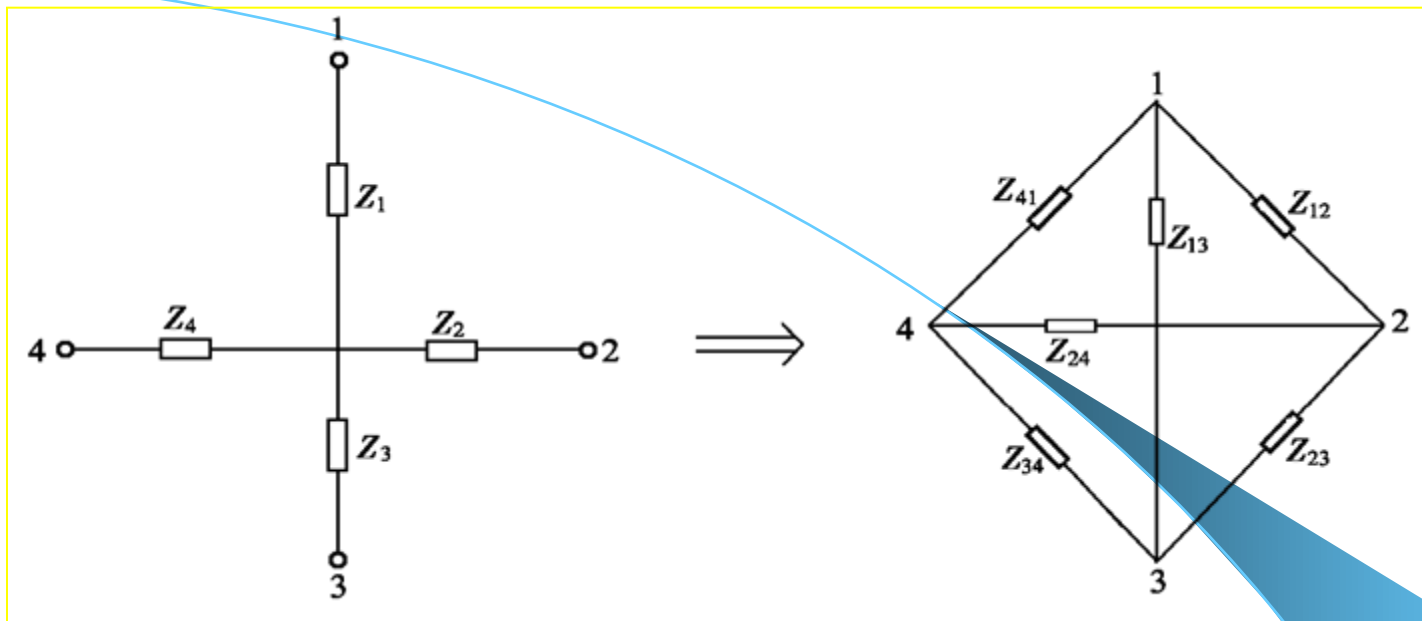


图6-31 多支路星形变为网形



$$Z_{12} = Z_1 Z_2 \sum_{i=1}^4 \frac{1}{Z_i}$$

$$Z_{23} = Z_2 Z_3 \sum_{i=1}^4 \frac{1}{Z_i}$$

.....

$$Z_{ij} = Z_i Z_j \sum_{i=1}^4 \frac{1}{Z_i}$$

$$\text{式中: } \sum_{i=1}^4 \frac{1}{Z_i} = \frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3} + \frac{1}{Z_4}$$

可以把该变化推广到
i=n的情况

(2) 有源支路的并联

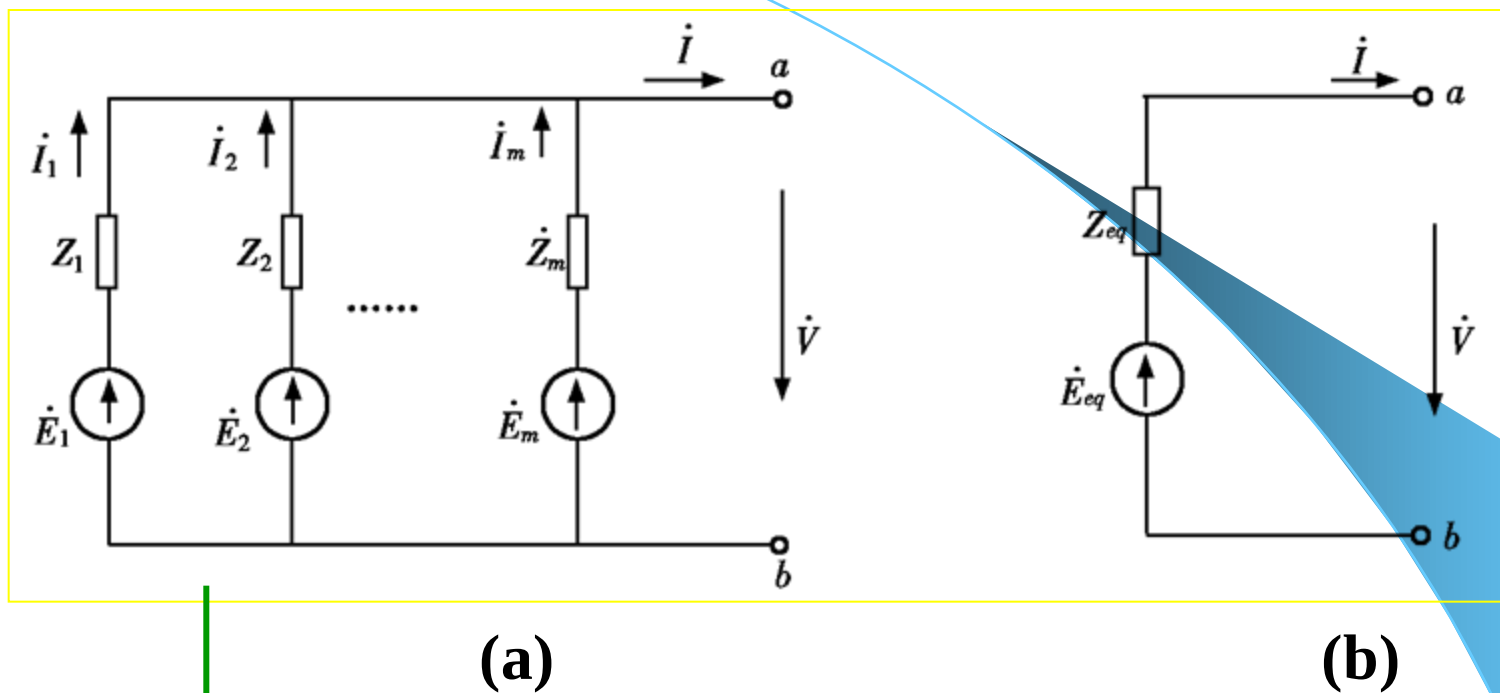


图6-32 并联有源支路的化简

$$\sum_{i=1}^m \frac{\dot{E}_i - \dot{V}}{Z_i} = \dot{I}$$

由上图可得

$$\sum_{i=1}^m \frac{\dot{E}_i - \dot{V}}{Z_i} = \dot{I}$$

由戴维南定理定义计算

令 $\dot{E}_i = 0$

$$Z_{eq} = -\frac{\dot{V}}{\dot{I}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^m \frac{1}{Z_i}}$$

令 $\dot{I} = 0$

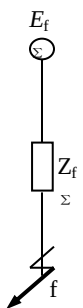
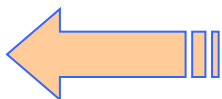
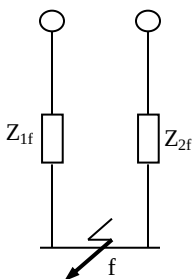
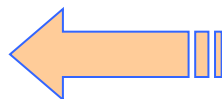
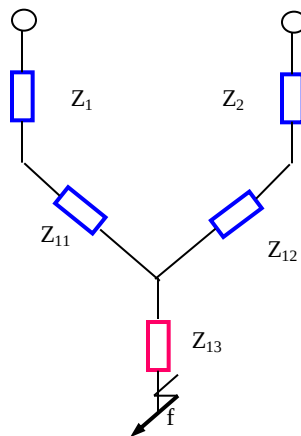
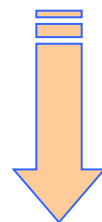
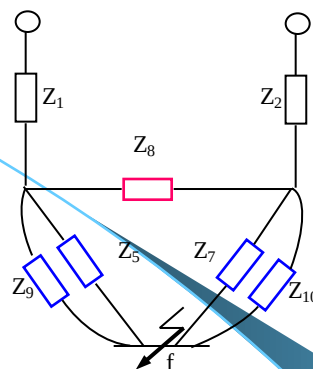
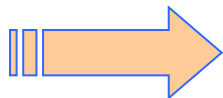
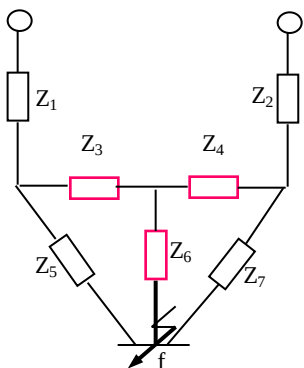
$$\dot{E}_{eq} = \dot{V}^{(0)} = Z_{eq} \sum_{i=1}^m \frac{\dot{E}_i}{Z_i}$$

对于两条有源支路并联

$$Z_{eq} = \frac{Z_1 Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

$$E_{eq} = \frac{\dot{E}_1 Z_2 + \dot{E}_2 Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

例:



求输入阻抗和转移阻抗的过程

输入阻抗

转移阻抗

2. 分裂电势源和分裂短路点

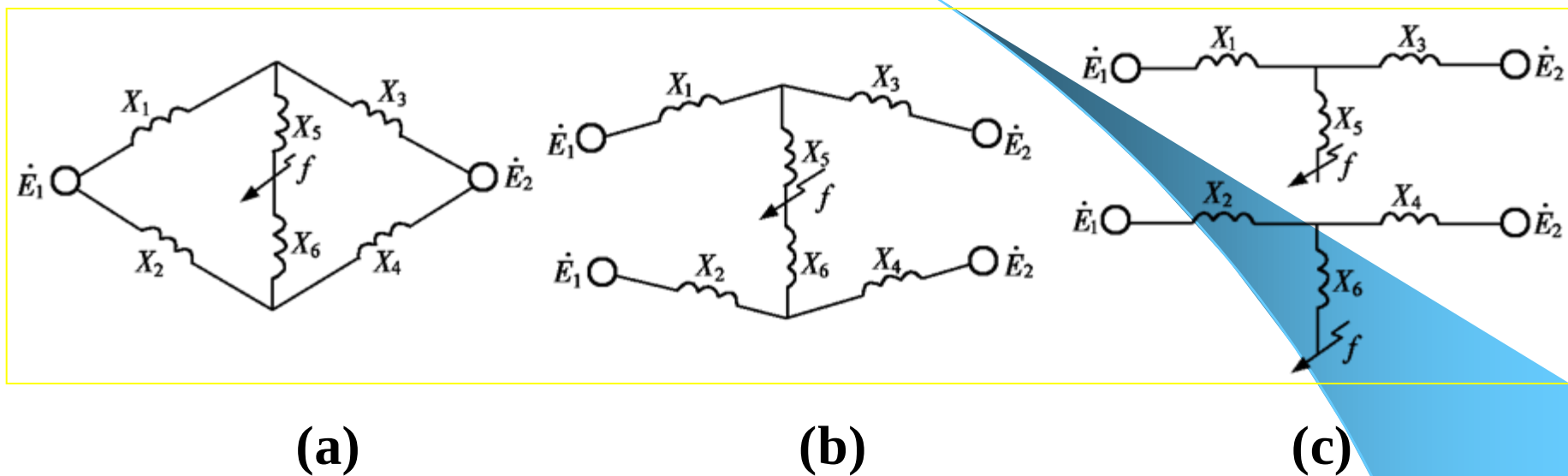


图6-33 分裂电势源和分裂短路点

3. 利用网络的对称性化简

对称性：指网络的结构相同，电源一样，阻抗参数相等（或其比值相等）以及短路电流的走向一致等。

在**对应的点**上，电位必然相同。

同**电位点**之间的电抗可根据需要短接或断开。

以图6-34为例进行说明。

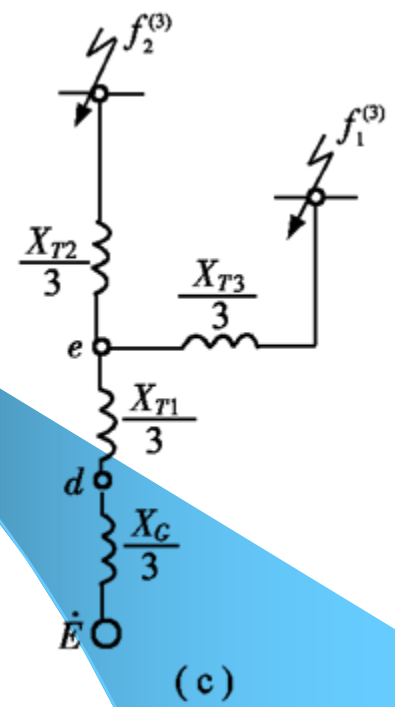
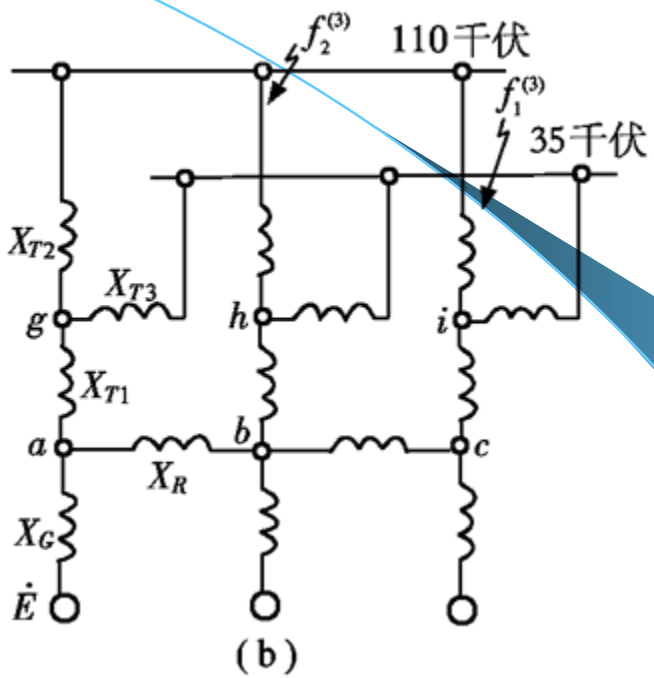
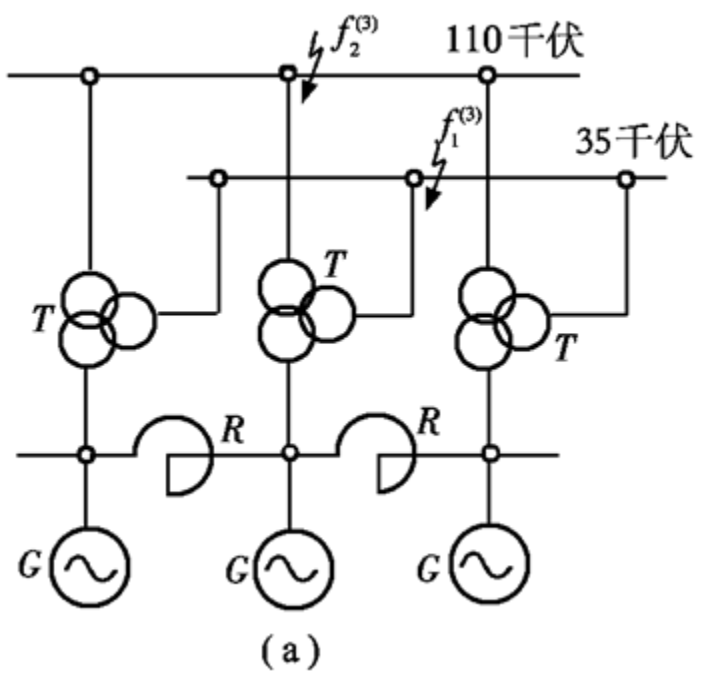


图6-34 利用电路的对称性进行网络简化

(a) 网络接线图 (b) 等值电路

(c) 简化后的等值电路

4. 电流分布系数法

(1) 电流分布系数的基本概念

电流分布系数的定义

取网络中各发电机的电势为零，并仅在网络中某一支路（如短路支路）施加电势 $\dot{E}$ ，在这种情况下，各支路电流与电势所在支路电流的比值，称为各支路电流的分布系数，用C表示。

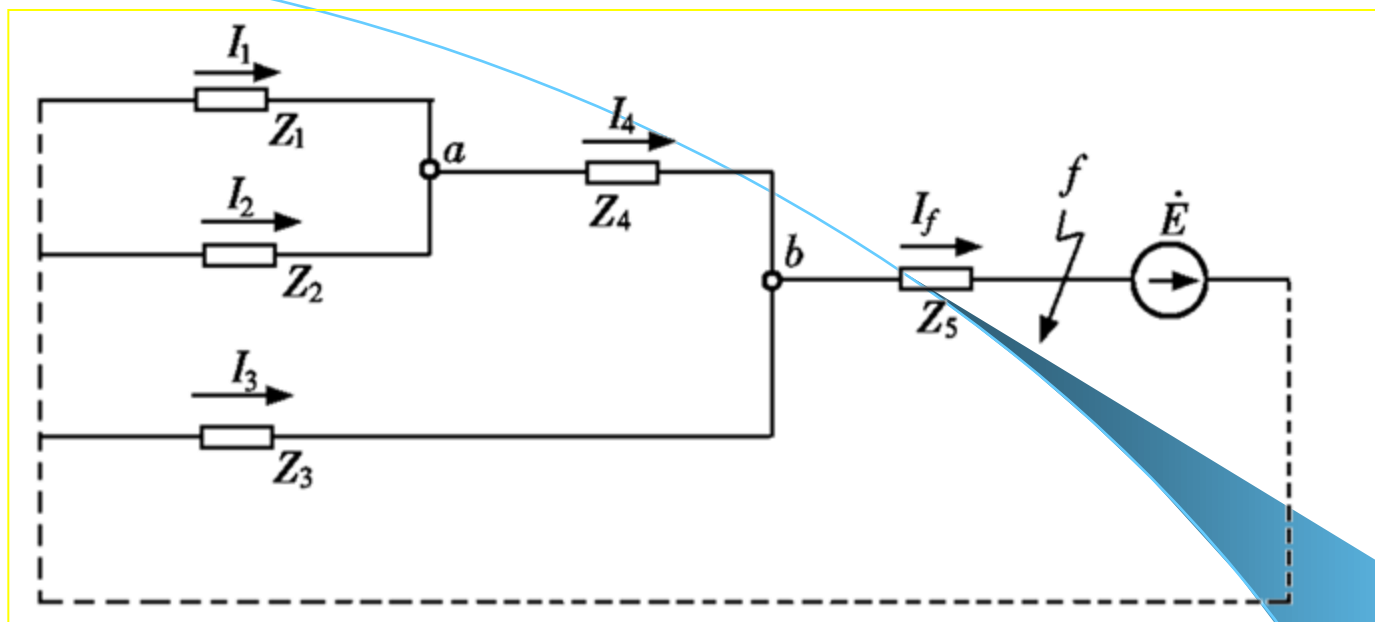


图6-35 求电流分布系数示意图

$$c_1 = \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_f} \quad c_2 = \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_f} \quad \dots\dots\dots c_i = \frac{\dot{I}_i}{\dot{I}_f}$$

电流分布系数的特点：

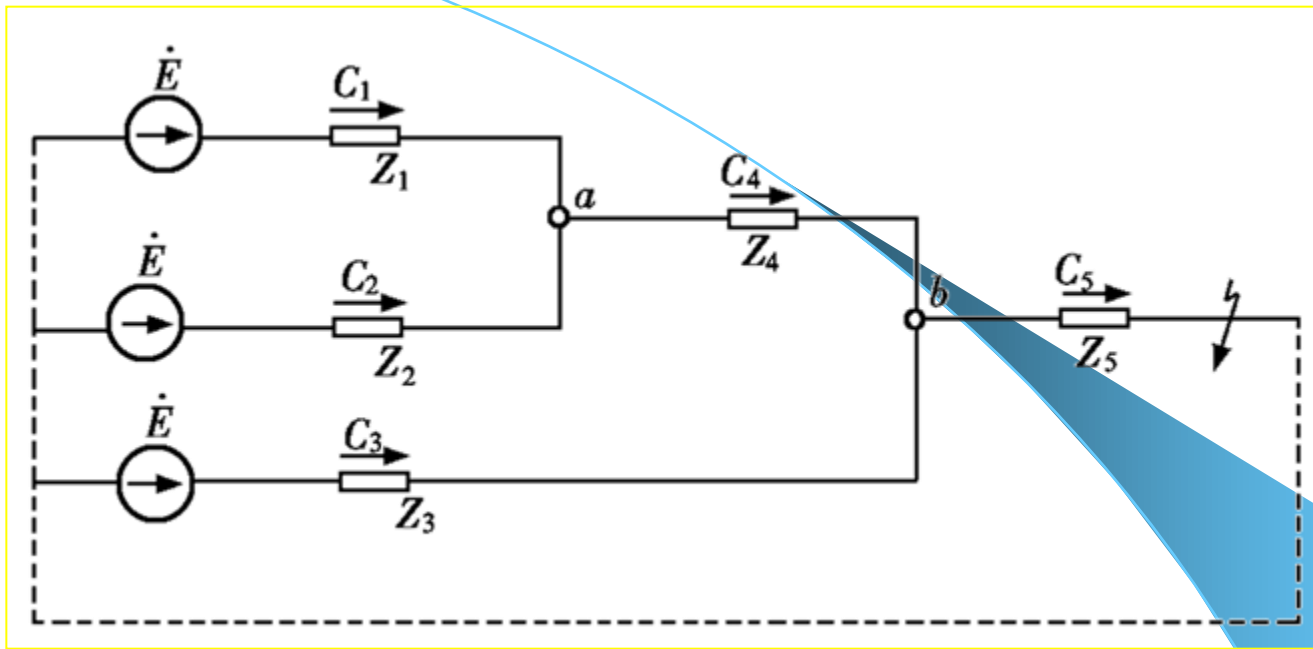


图6-35 求电流分布系数示意图

因为 $\dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{I}_4$ 所以 $C_1 + C_2 = C_4$

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = \dot{I}_f \Rightarrow \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_f} + \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_f} + \frac{\dot{I}_3}{\dot{I}_f} = C_1 + C_2 + C_3 = 1$$

(2) 分布系数与转移阻抗之间的关系

$$Z_{f\Sigma} = \frac{\dot{E}}{\dot{I}_f} ;$$

$$Z_{1f} = \frac{\dot{E}}{\dot{I}_1} ;$$

$$Z_{2f} = \frac{\dot{E}}{\dot{I}_2} ;$$

$$Z_{3f} = \frac{\dot{E}}{\dot{I}_3}$$

$$\left. \begin{aligned} c_1 &= \frac{\dot{I}_1}{\dot{I}_f} = \frac{\dot{E} / Z_{1f}}{\dot{E} / Z_{f\Sigma}} = \frac{Z_{f\Sigma}}{Z_{1f}} \\ c_2 &= \frac{\dot{I}_2}{\dot{I}_f} = \frac{\dot{E} / Z_{2f}}{\dot{E} / Z_{f\Sigma}} = \frac{Z_{f\Sigma}}{Z_{2f}} \\ c_3 &= \frac{\dot{I}_3}{\dot{I}_f} = \frac{\dot{E} / Z_{3f}}{\dot{E} / Z_{f\Sigma}} = \frac{Z_{f\Sigma}}{Z_{3f}} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} Z_{1f} &= \frac{Z_{f\Sigma}}{c_1} \\ Z_{2f} &= \frac{Z_{f\Sigma}}{c_2} \\ Z_{3f} &= \frac{Z_{f\Sigma}}{c_3} \end{aligned} \right\}$$

(3) 电流分布系数的确定方法

令 $\dot{I}_1 = 1$

$$\dot{V}_a = Z_1 \dot{I}_1 = Z_1, \quad \dot{I}_2 = \dot{V}_a / Z_2, \quad \dot{I}_4 = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$$

$$\dot{V}_b = \dot{V}_a + Z_4 \dot{I}_4, \quad \dot{I}_3 = \dot{V}_b / Z_3, \quad \dot{I}_f = \dot{I}_4 + \dot{I}_3$$

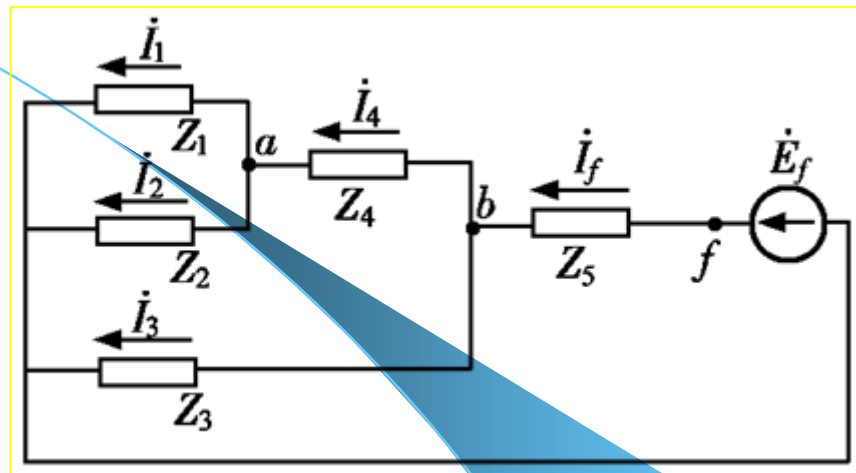
$$\dot{E}_f = \dot{V}_b + Z_5 \dot{I}_f$$

$$Z_{f\Sigma} = \dot{E}_f / \dot{I}_f$$

$$c_1 = \dot{I}_1 / \dot{I}_f \quad c_2 = \dot{I}_2 / \dot{I}_f \quad c_3 = \dot{I}_3 / \dot{I}_f$$

$$c_4 = \dot{I}_4 / \dot{I}_f \text{ 或 } c_4 = c_1 + c_2$$

单位电流法



$$\left. \begin{aligned} Z_{1f} &= \frac{Z_{f\Sigma}}{c_1} \\ Z_{2f} &= \frac{Z_{f\Sigma}}{c_2} \\ Z_{3f} &= \frac{Z_{f\Sigma}}{c_3} \end{aligned} \right\}$$

网络还原法

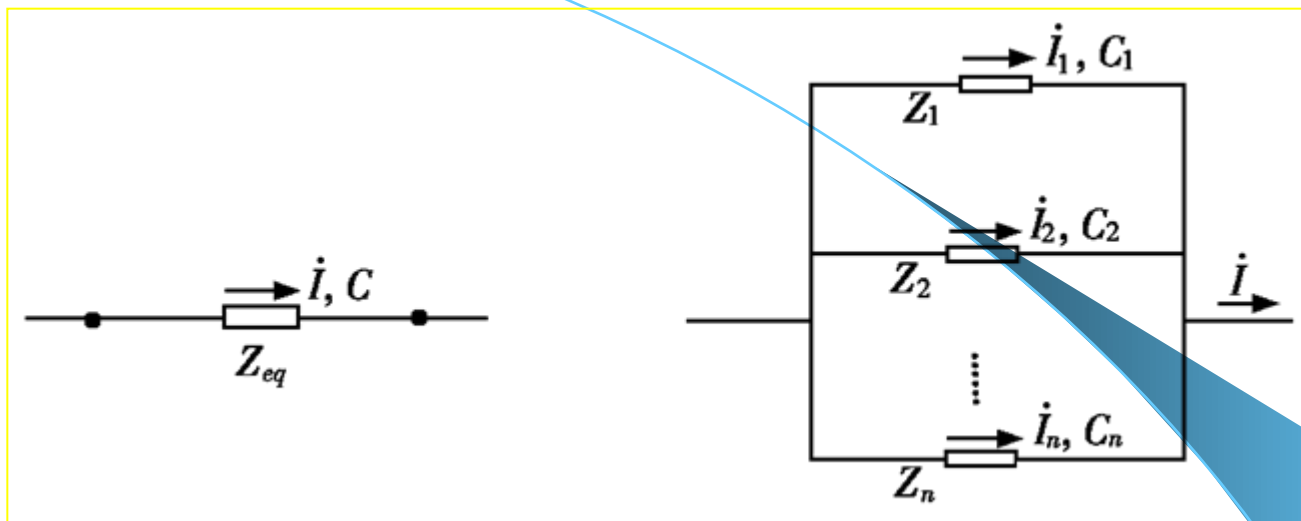


图6-37 并联支路的电流分布系数

$$Z_i \dot{I}_i = Z_{eq} \dot{I}$$

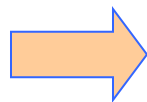
$$\dot{I}_i = \frac{Z_{eq}}{Z_i} \dot{I}$$

两端同时除以短路电流 $\dot{I}_f$

$$C_i = \frac{Z_{eq}}{Z_i} C$$

对于两条并联支路且短路发生在总支路上时
($c = 1$)

$$C_i = \frac{Z_{eq}}{Z_i} C$$



$$\left. \begin{aligned} c_1 &= \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \\ c_2 &= \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \end{aligned} \right\}$$

补充例题1

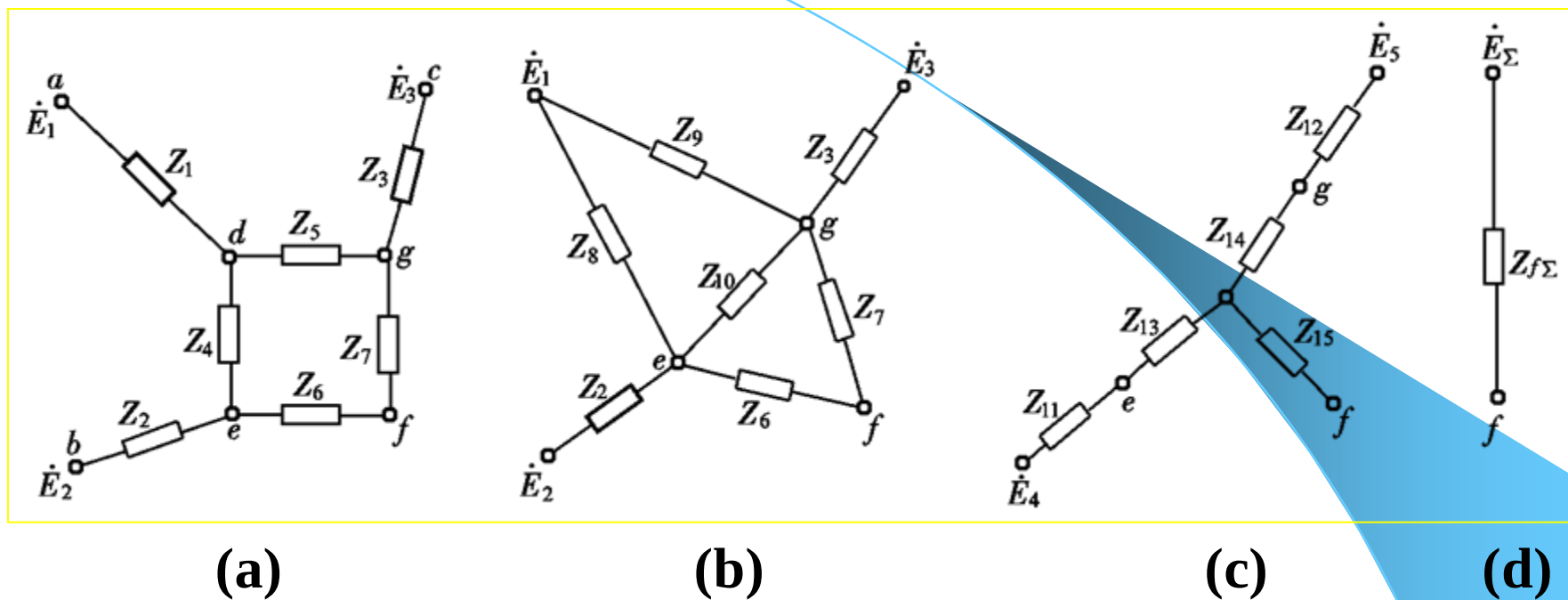


图6-38 网络及其变换过程

补充例题2

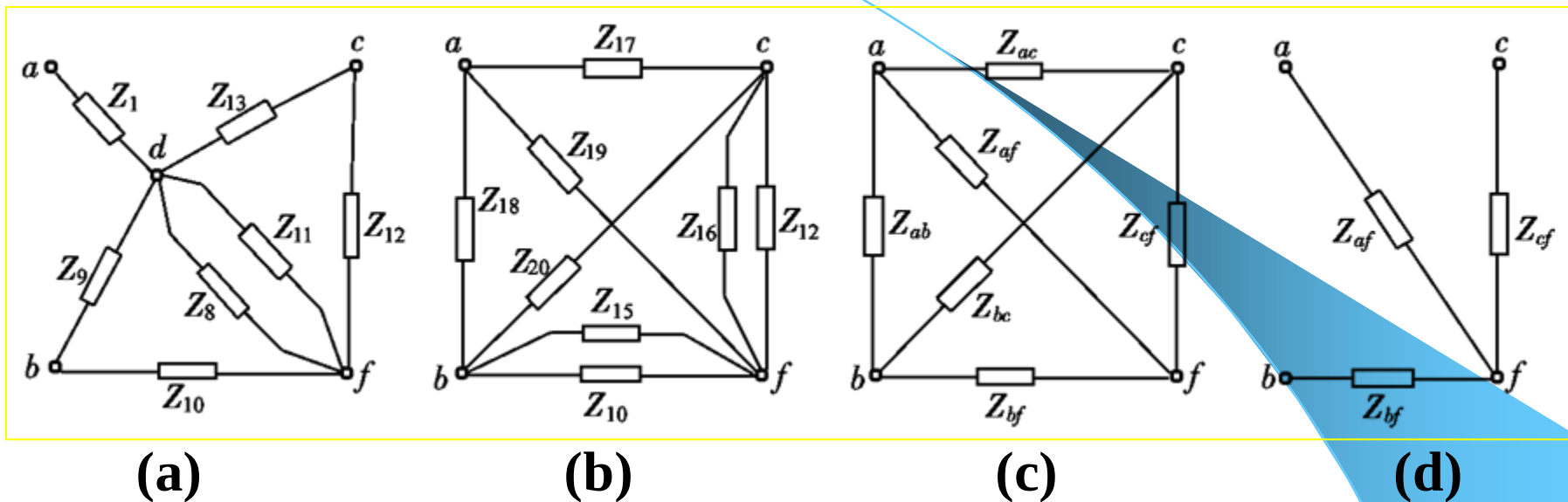


图6-39 网络的变换过程

三、起始次暂态电流和冲击电流的实用计算

1. 起始次暂态电流的计算

- **起始次暂态电流**：短路电流周期分量（基频分量）的初值。

- 静止元件的次暂态参数与稳态参数相同。

- **发电机**：用次暂态电势 E'' 和次暂态电抗 X_d'' 表示。

实用计算： $E'' = 1.05 \sim 1.11$

$$\dot{V} = \dot{E}'' - jX_d'' \dot{I}$$

不计负载影响： $E'' = 1$

• 异步电动机：

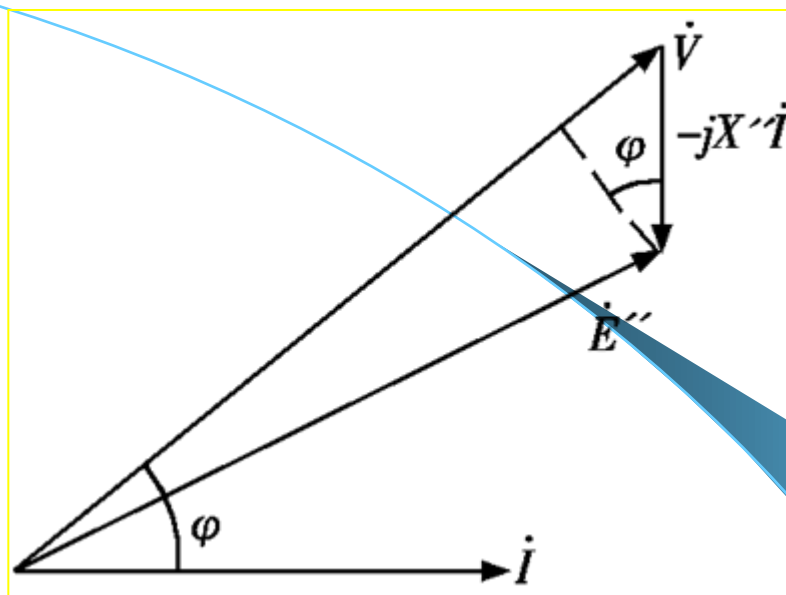


图6-40 异步电机简化相量图

$$E'' \approx V_{[0]} - X'' I_{[0]} \sin \varphi_{[0]}$$

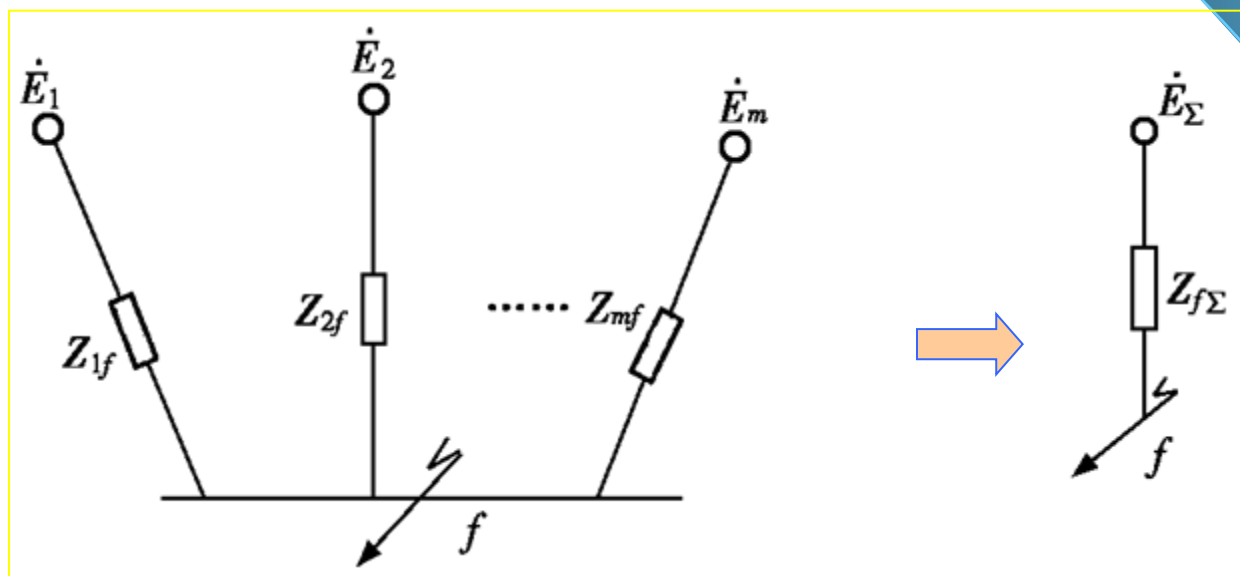
近似计算： $X'' = 0.2$

• 综合负荷：

$$E'' = 0.8$$

$$X'' = 0.35$$

• 输电线路和变压器：次暂态参数与其稳态参数相同。



$$\dot{I}_f = \frac{\dot{E}_1}{Z_{1f}} + \frac{\dot{E}_2}{Z_{2f}} + \dots + \frac{\dot{E}_m}{Z_{mf}}$$

$$\dot{I}_f = \frac{\dot{E}_\Sigma}{Z_{f\Sigma}}$$

用次暂态参数表示的等值电路及次暂态电流计算

2. 冲击电流的计算

• 异步电机提供的冲击电流: $i_{im.LD} = k_{im.LD} \sqrt{2} I''_{LD}$

对小容量电机和综合负荷: $k_{im.LD} = 1$

容量为200~500kW的异步电机: $k_{im.LD} = 1.5 \sim 1.7$

容量为1000kW以上的异步电机: $k_{im.LD} = 1.7 \sim 1.8$

冲击电流
$$i_{im} = k_{im} \sqrt{2} I'' + k_{im.LD} \sqrt{2} I''_{LD}$$

例6—5

发电机冲击
系数P16

四、短路电流计算曲线及其应用

作用： 求任意时刻 t 的短路电流周期分量。

1. 计算曲线的概念

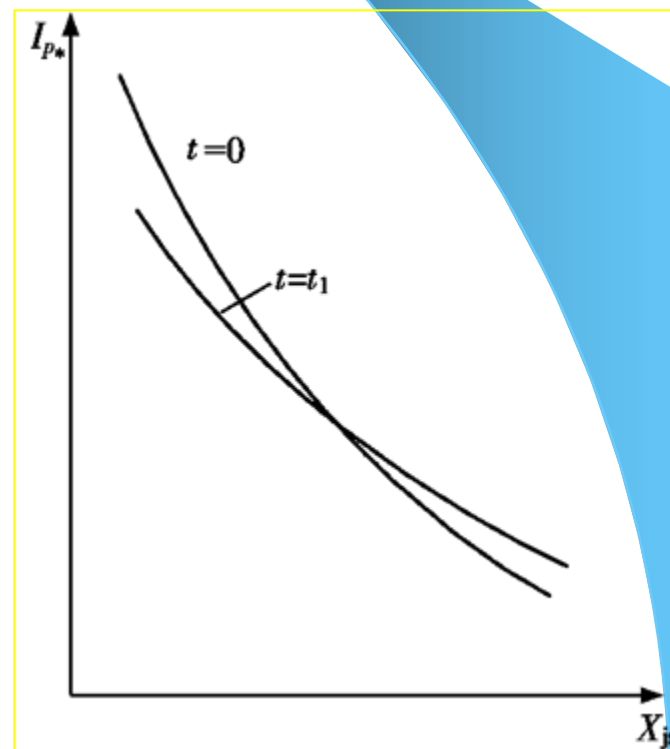
在发电机的参数和运行初态给定后，短路电流仅是电源到短路点的距离 和时间的函数。

$$I_f = f(X_e, t)$$

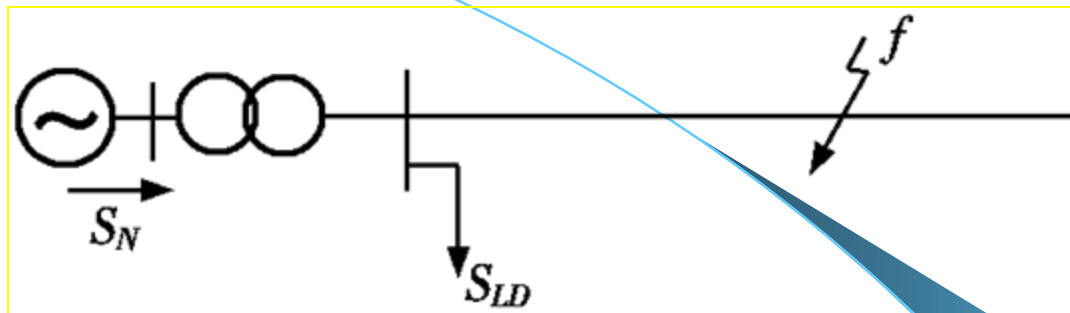
定义计算电抗 X_{js}

$$X_{js} = X_d'' + X_e$$

则 $I_{P*} = f(X_{js}, t)$



2. 计算曲线的制作



制作计算曲线的典型接线图

汽轮发电机(18种): 12MW ~ 200MW

水轮发电机(17种): 12.5MW ~ 225MW

当 $X_{js} \geq 3.45$ 时

$$I_{P^*} = 1 / X_{js}$$

3. 计算曲线的应用

电源合并的原则：把短路电流变化规律大体相同的发电机合并起来。

- (1) 与短路点电气距离相差不大的同类型发电机合并；
- (2) 直接接于短路点的发电机（或发电厂）单独考虑；
- (3) 远离短路点的同类型发电厂合并；
- (4) 无限大功率电源（如果有的话）合并成一组。

应用计算曲线法的步骤

- (1) 绘制等值网络;
- (2) 求转移电抗: $X_{if} (i=1, 2, \dots, g)$ 、 X_{sf} ;
- (3) 求计算电抗;

$$X_{jsi} = X_{if} \frac{S_{Ni}}{S_B}$$

- (4) 查表: $I_{pt1*}, I_{pt2*}, \dots, I_{ptg*}$ 。

- (5) 无限大功率电源供给的短路周期电流

$$I_{pS*} = \frac{1}{X_{sf}}$$

(6) 计算短路电流周期分量的有名值
第 i 台等值发电机提供的短路电流为：

$$I_{pt \cdot i} = I_{pt \cdot i*} I_{Ni} = I_{pt \cdot i*} \frac{S_{Ni}}{\sqrt{3}V_{av}}$$

无限大功率电源提供的短路电流为：

$$I_{pS} = I_{pS*} I_B = I_{pS*} \frac{S_B}{\sqrt{3}V_{av}}$$

短路点周期电流的有名值为：

$$I_{pt} = \sum_{i=1}^g I_{pt \cdot i*} \frac{S_{Ni}}{\sqrt{3}V_{av}} + I_{pS*} \frac{S_B}{\sqrt{3}V_{av}}$$

例6—6

五、短路电流周期分量的近似计算

基本思想

假定电源为恒定电势源，周期分量的幅值不随时间而变化。

(1) 选定基准功率 S_B 和基准电压 $V_B = V_{av}$ ，作出系统的标么值等值电路，其中电源电势 $E = 1$ ，不计负荷。

(2) 网络化简求出电源对短路点的组合电抗 $X_{f\Sigma^*}$

(3) 求短路电流周期分量的标么值

$$I_{P^*} = \frac{1}{X_{f\Sigma^*}}$$

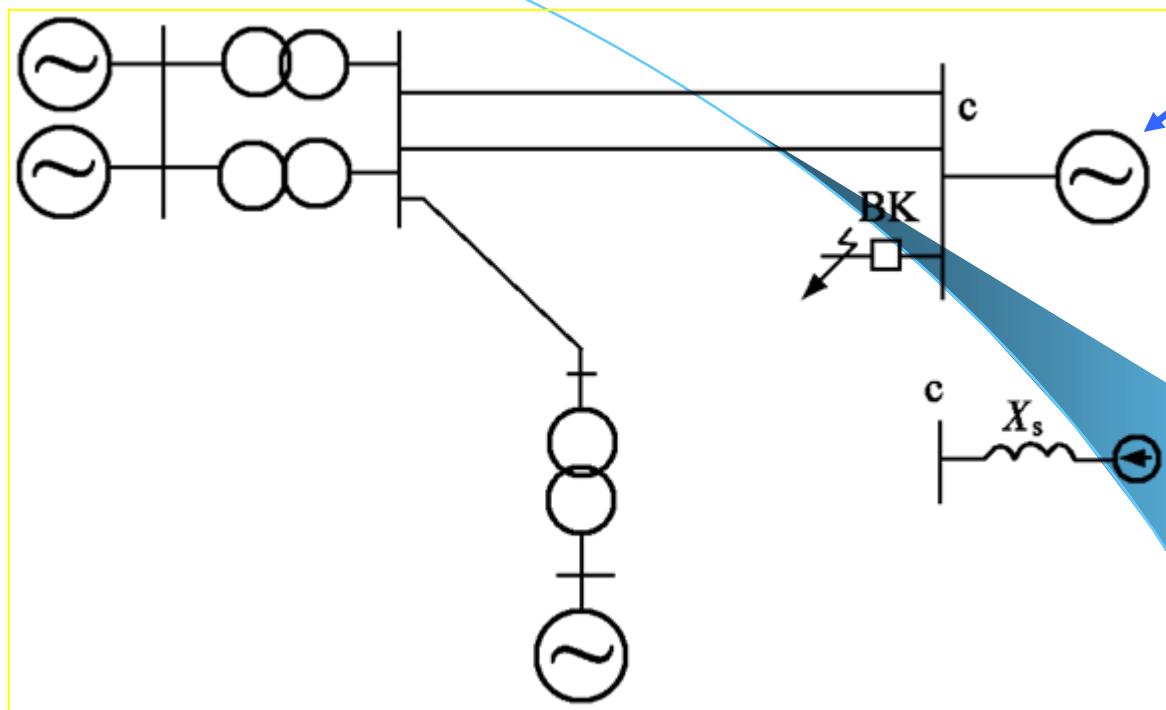
(4) 电流有名值

$$I_P = I_{P*} I_B = \frac{I_B}{X_{f\Sigma*}}$$

(5) 功率的有名值

$$S = \frac{S_B}{X_{f\Sigma*}}$$

近似计算的应用



未知
系统

确定未知系统的电抗(已知短路电流或短路功率):

$$X_{S*} = \frac{I_B}{I_S} = \frac{S_B}{S_S}$$

第四章

电力系统简单不对称故障的分析计算

- 1、什么是对称分量法？
- 2、为什么要引入对称分量法？

• 对称分量法

分析过程是什么？

• 对称分量法

如何利用对称分量法对简单不对称故障进行分析与计算？

1. 各元件的序参数是怎样的？

绘制电力系统的序网图？

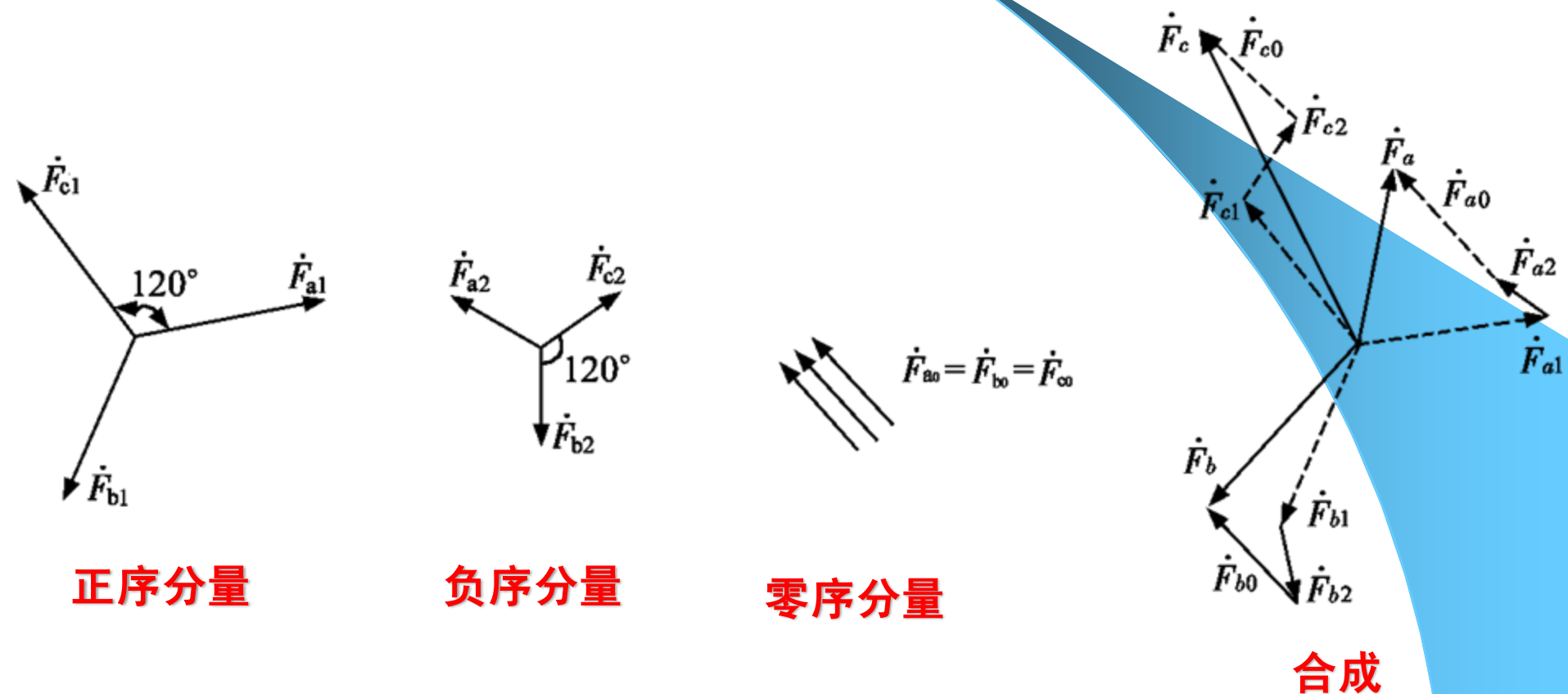
• 电力系统

系统的序网图

• 简单不对称故障的分析计算

4.1 对称分量法在不对称短路计算中的应用

一、对称分量法



一、对称分量法

- **正序分量**：三相量大小相等，互差 120° ，且与系统正常运行相序相同。
- **负序分量**：三相量大小相等，互差 120° ，且与系统正常运行相序相反。
- **零序分量**：三相量大小相等，相位一致。

$$\left. \begin{aligned} \dot{F}_{b1} &= a^2 \dot{F}_{a1}, \dot{F}_{c1} = a \dot{F}_{a1} \\ \dot{F}_{b2} &= a \dot{F}_{a2}, \dot{F}_{c2} = a^2 \dot{F}_{a2} \\ \dot{F}_{b0} &= \dot{F}_{c0} = \dot{F}_{a0} \end{aligned} \right\}$$

逆时针旋转 120°

$$a = e^{j120^\circ}$$

在图4-1 (d) 中三组对称的相量合成得三个不对称相量。

写成数学表达式为：

$$\dot{F}_a = \dot{F}_{a(1)} + \dot{F}_{a(2)} + \dot{F}_{a(0)}$$

$$\dot{F}_b = \dot{F}_{b(1)} + \dot{F}_{b(2)} + \dot{F}_{b(0)}$$

$$\dot{F}_c = \dot{F}_{c(1)} + \dot{F}_{c(2)} + \dot{F}_{c(0)}$$

(4-1)

由于每一组是对称的，故有下列关系：

$$\left. \begin{aligned}\dot{F}_{b(1)} &= e^{j240^\circ} \dot{F}_{a(1)} = a^2 \dot{F}_{a(1)} \\ \dot{F}_{c(1)} &= e^{j120^\circ} \dot{F}_{a(1)} = a \dot{F}_{a(1)} \\ \dot{F}_{b(2)} &= e^{j120^\circ} \dot{F}_{a(2)} = a \dot{F}_{a(2)} \\ \dot{F}_{c(2)} &= e^{j240^\circ} \dot{F}_{a(2)} = a^2 \dot{F}_{a(2)} \\ \dot{F}_{b(0)} &= \dot{F}_{c(0)} = \dot{F}_{a(0)}\end{aligned}\right\}$$

(4
—2)

$$a = e^{j120^\circ} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^2 = e^{j240^\circ} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$

将式 (4—2) 代入 (4—1) 可得：

$$\begin{bmatrix} \dot{F}_a \\ \dot{F}_b \\ \dot{F}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{F}_{a(1)} \\ \dot{F}_{a(2)} \\ \dot{F}_{a(0)} \end{bmatrix}$$

或简写为：

$$F_P = T^{-1} F_S$$

上式说明三组对称相量合成得三个不对称相量。
其逆关系为：

$$\begin{bmatrix} \dot{F}_{a(1)} \\ \dot{F}_{a(2)} \\ \dot{F}_{a(0)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{F}_a \\ \dot{F}_b \\ \dot{F}_c \end{bmatrix}$$

(4—6)

或写为：

$$F_S = T^{-1} F_P$$

上式说明三个不对称的相量可以唯一地分解成为三组对称的相量(即对称分量)：

正序分量、负序分量和零序分量。

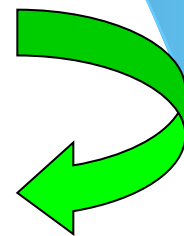
将式(4-6)的变换关系应用于基频电流(或电压)，则有：

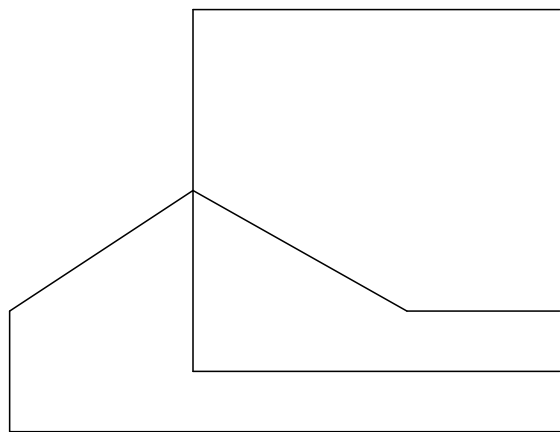
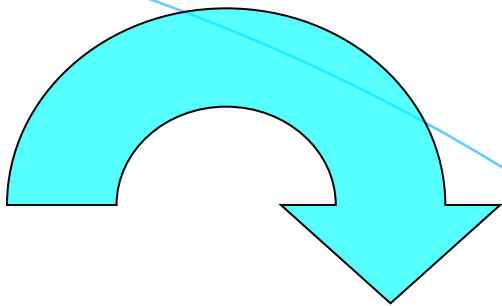
$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{a(1)} \\ \dot{I}_{a(2)} \\ \dot{I}_{a(0)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix}$$

则

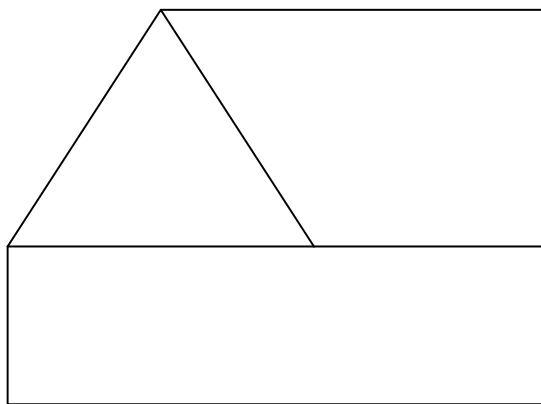
$$\dot{I}_{a(0)} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) \quad (4-8)$$

如图所示。零序电流必须以中性线为通路。

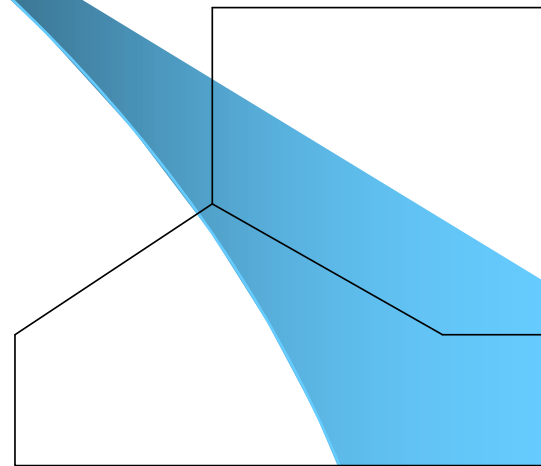




有零序



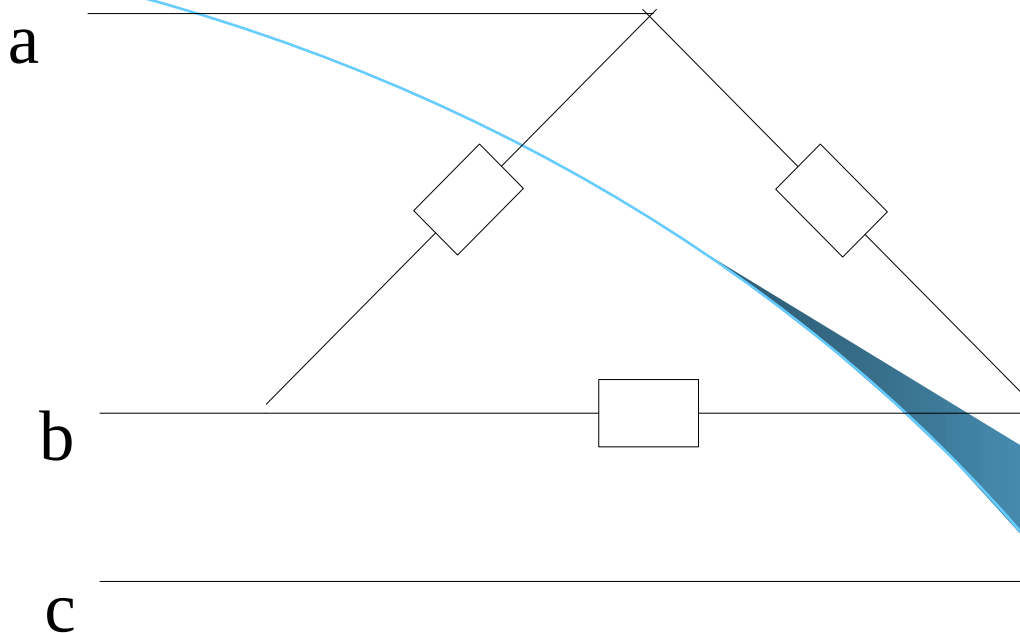
无零序



无零序

2017年4月5日星期三

例：



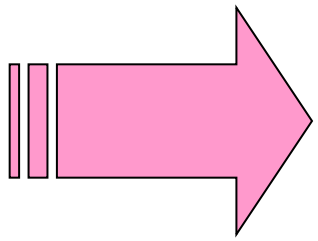
$$\dot{I}_a = 10 \angle 0^\circ \quad \dot{I}_b = 10 \angle 180^\circ \quad \dot{I}_c = 0$$

请分解成对称相量。

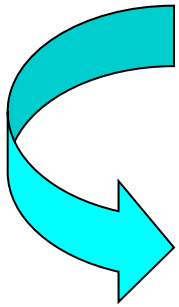
解：

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{a(1)} \\ \dot{I}_{a(2)} \\ \dot{I}_{a(0)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ a & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix}$$

$$\begin{cases} \dot{I}_{a1} = \frac{1}{3} (10 \angle 0^\circ + 10 \angle 180^\circ + 120^\circ + 0) = 5.78 \angle -30^\circ \\ \dot{I}_{a2} = \frac{1}{3} (10 \angle 0^\circ + 10 \angle 180^\circ + 240^\circ + 0) = 5.78 \angle 30^\circ \\ \dot{I}_{a0} = \frac{1}{3} (10 \angle 0^\circ + 10 \angle 180^\circ + 0) = 0 \end{cases}$$



$$\begin{cases} \dot{I}_{b1} = a^2 \dot{I}_{a1} = 5.78 \angle -150^\circ \\ \dot{I}_{b2} = a \dot{I}_{a2} = 5.78 \angle 150^\circ \\ \dot{I}_{b0} = \dot{I}_{a0} = 0 \end{cases}$$



$$\begin{cases} \dot{I}_{c1} = a \dot{I}_{a1} = 5.78 \angle 90^\circ \\ \dot{I}_{c2} = a^2 \dot{I}_{a2} = 5.78 \angle -90^\circ \\ \dot{I}_{c0} = \dot{I}_{a0} = 0 \end{cases}$$

例7-1

- 设电力系统某点发生a相单相接地故障，现测得短路点的三相线电压分别为：
 $\dot{U}_a = 0, \dot{U}_b = 233.1\angle -20^\circ \text{V}, \dot{U}_c = 233.1\angle -220^\circ \text{V}$
- 试求其三组序电压分量。
- 解：取a相为基准相，

$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{a1} \\ \dot{U}_{a2} \\ \dot{U}_{a0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ 223.1\angle -20^\circ \\ 223.1\angle -220^\circ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 113.9\angle 60^\circ \\ 139.8\angle -120^\circ \\ 25.8\angle 60^\circ \end{bmatrix}$$

例4-1

- 求出另二相的各序电压分量

正序分量: $\dot{U}_{b1} = a^2 \dot{U}_{a1} = 113.9 \angle 300^\circ = 113.9 \angle -60^\circ \text{ V}$

$$\dot{U}_{c1} = a \dot{U}_{a1} = 113.9 \angle 180^\circ = -113.9 \text{ V}$$

负序分量: $\dot{U}_{b2} = a \dot{U}_{a2} = 139.8 \angle 0^\circ = 139.8 \text{ V}$

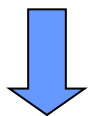
$$\dot{U}_{c2} = a^2 \dot{U}_{a2} = 139.8 \angle 120^\circ \text{ V}$$

零序分量: $\dot{U}_{b0} = \dot{U}_{c0} = \dot{U}_{a0} = 25.8 \angle 60^\circ \text{ V}$

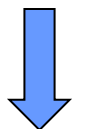
二、序阻抗的概念

● 静止的三相电路元件序阻抗

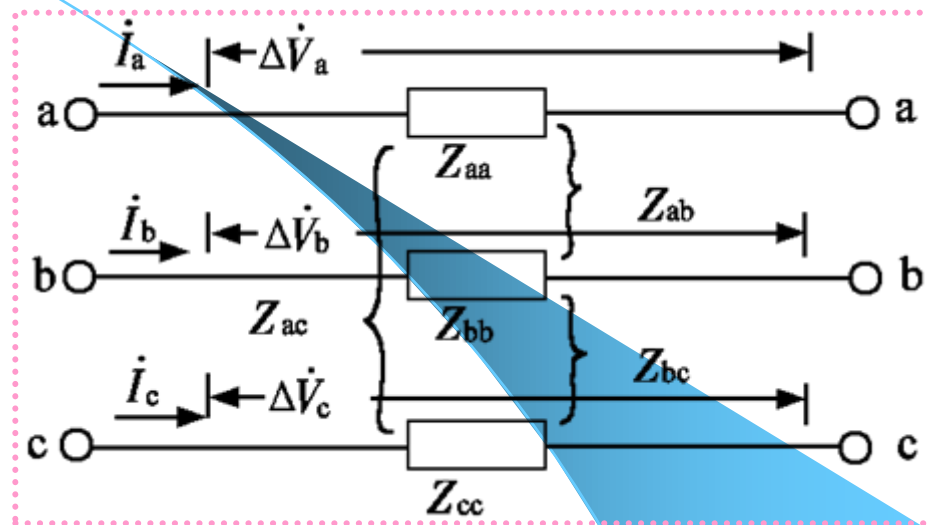
$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{V}_a \\ \Delta \dot{V}_b \\ \Delta \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ab} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ac} & Z_{bc} & Z_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix}$$



$$\Delta \mathbf{V}_{abc} = \mathbf{Z} \mathbf{I}_{abc}$$



$$\Delta \mathbf{V}_{120} = \mathbf{S} \mathbf{Z} \mathbf{S}^{-1} \mathbf{I}_{120} = \mathbf{Z}_{sc} \mathbf{I}_{120}$$



$$\mathbf{Z}_{sc} = \mathbf{S} \mathbf{Z} \mathbf{S}^{-1}$$

称为序阻抗矩阵

二、序阻抗的概念

- 当元件参数完全对称时 $Z_{aa} = Z_{bb} = Z_{cc} = Z_s$ $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} = Z_m$

$$\mathbf{Z}_{sc} = \begin{bmatrix} Z_s - Z_m & 0 & 0 \\ 0 & Z_s - Z_m & 0 \\ 0 & 0 & Z_s + 2Z_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & 0 \\ 0 & 0 & Z_0 \end{bmatrix}$$

$$\Delta \mathbf{V}_{120} = \mathbf{Z}_{sc} \mathbf{I}_{120} \longrightarrow \left. \begin{aligned} \Delta \dot{V}_{a1} &= Z_1 \dot{I}_{a1} \\ \Delta \dot{V}_{a2} &= Z_2 \dot{I}_{a2} \\ \Delta \dot{V}_{a0} &= Z_0 \dot{I}_{a0} \end{aligned} \right\}$$

结论：在三相参数对称的线性电路中，各序对称分量具有独立性，因此，可以对正序、负序、零序分量分别进行计算。

即：

$$\left. \begin{aligned}\Delta \dot{U}_{a(1)} &= (z_s - z_m) \dot{I}_{a(1)} = z_{(1)} \dot{I}_{a(1)} \\ \Delta \dot{U}_{a(2)} &= (z_s - z_m) \dot{I}_{a(2)} = z_{(2)} \dot{I}_{a(2)} \\ \Delta \dot{U}_{a(0)} &= (z_s + 2z_m) \dot{I}_{a(0)} = z_{(0)} \dot{I}_{a(0)}\end{aligned} \right\}$$

式中 $z_{(1)}$ $z_{(2)}$ $z_{(0)}$ 分别称为此线路的正序、负序、零序阻抗。

由此可知：各序电压降与各序电流成线性关系；

电压、电流、阻抗是可以分别解耦为正序、
负序和零序的。

二、序阻抗的概念

- 序阻抗：元件三相参数对称时，元件两端某一序的电压降与通过该元件的同一序电流的比值。

$$\left. \begin{array}{l} \text{正序阻抗} \longrightarrow Z_1 = \Delta \dot{V}_{a1} / \dot{I}_{a1} \\ \text{负序阻抗} \longrightarrow Z_2 = \Delta \dot{V}_{a2} / \dot{I}_{a2} \\ \text{零序阻抗} \longrightarrow Z_0 = \Delta \dot{V}_{a0} / \dot{I}_{a0} \end{array} \right\}$$



下面结合图4-4(a)的简单系统中发生a相短路接地的情况，介绍用对称分量法分析其短路电流及短路点电压的方法。

故障点k发生的不对称短路：

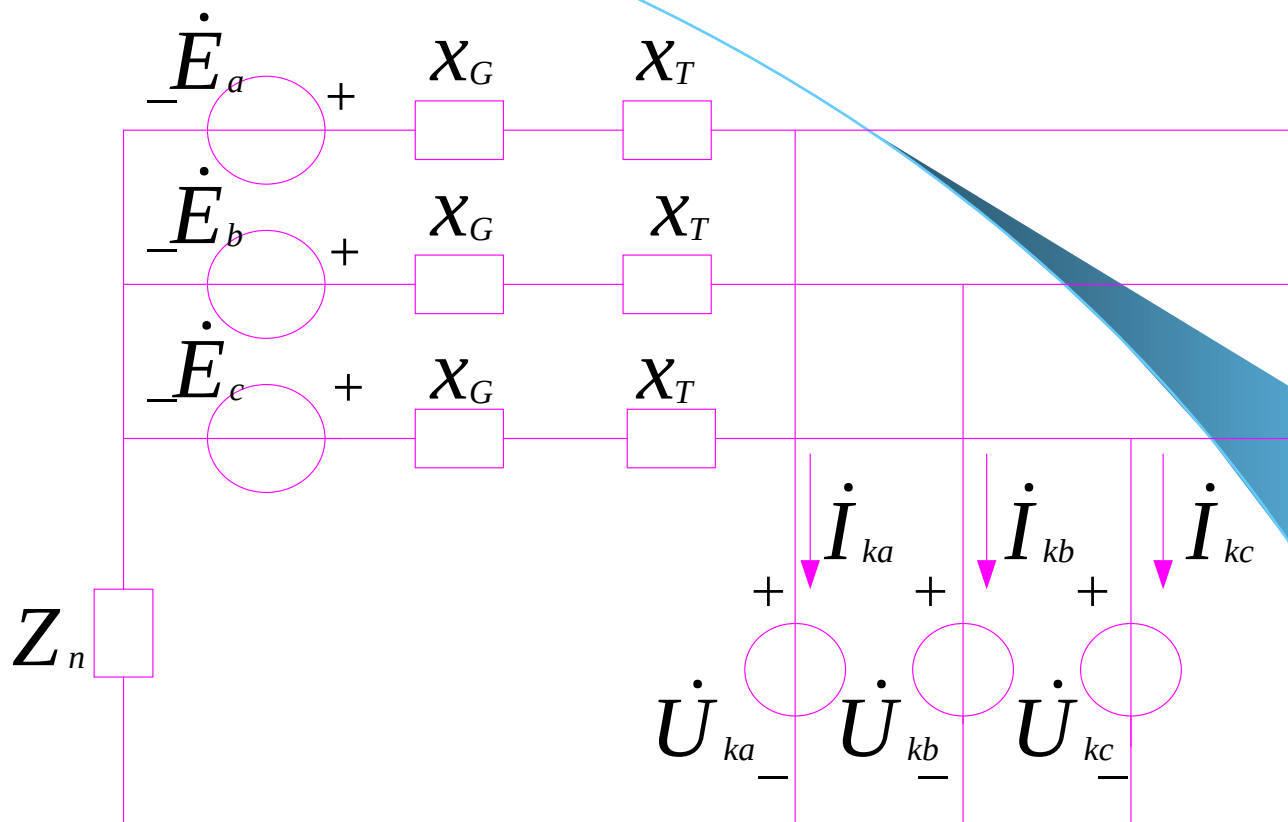
k点的三相对地电压

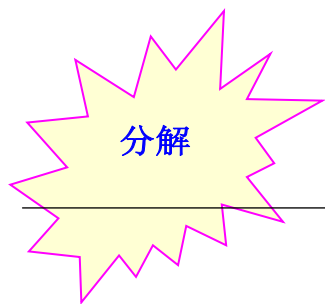
$$\dot{U}_{ka} \quad \dot{U}_{kb} \quad \dot{U}_{kc}$$

和由k点流出的三相电流（即短路电流）
均为三相不对称。

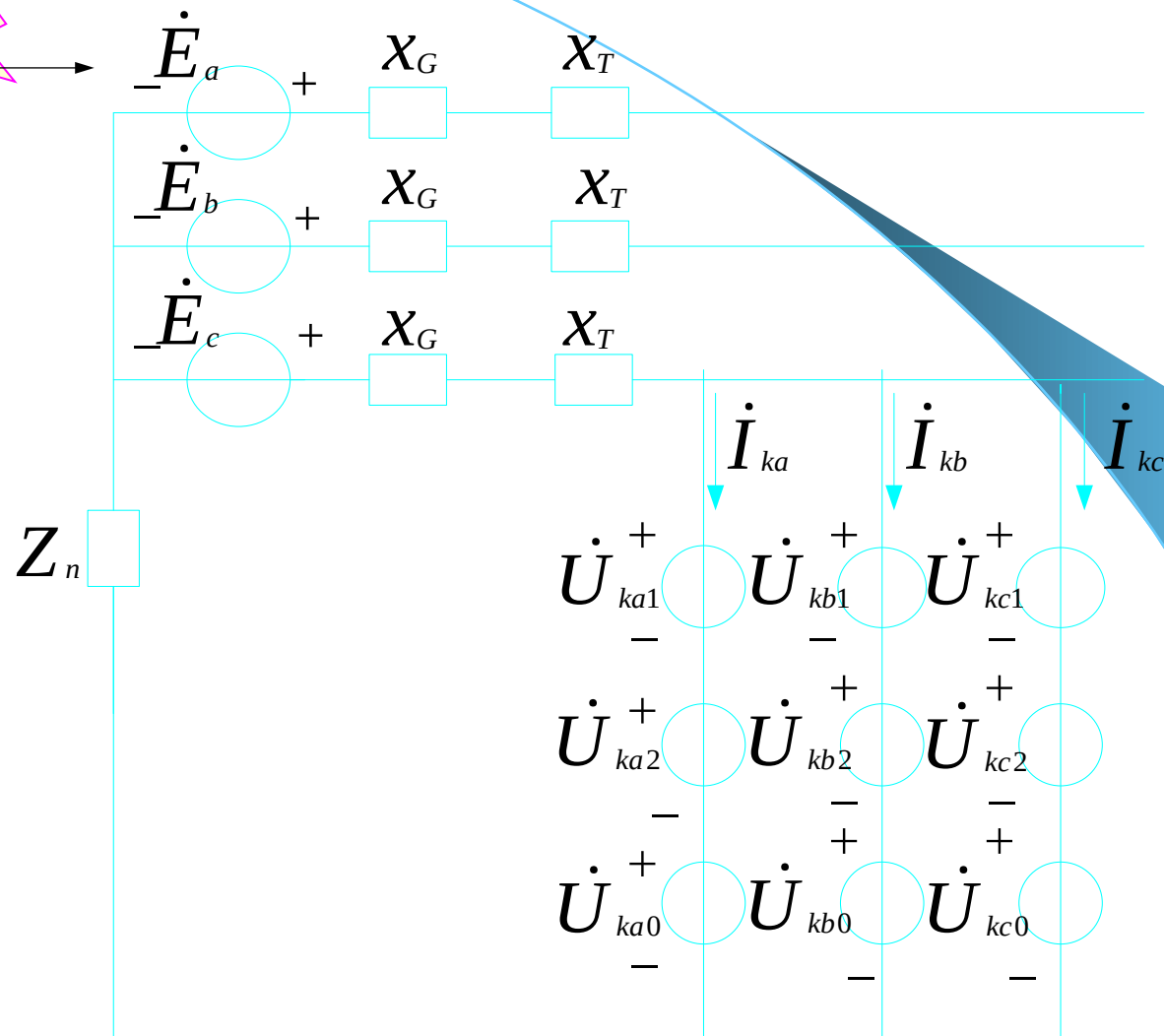
$$\dot{I}_{ka} \quad \dot{I}_{kb} \quad \dot{I}_{kc}$$

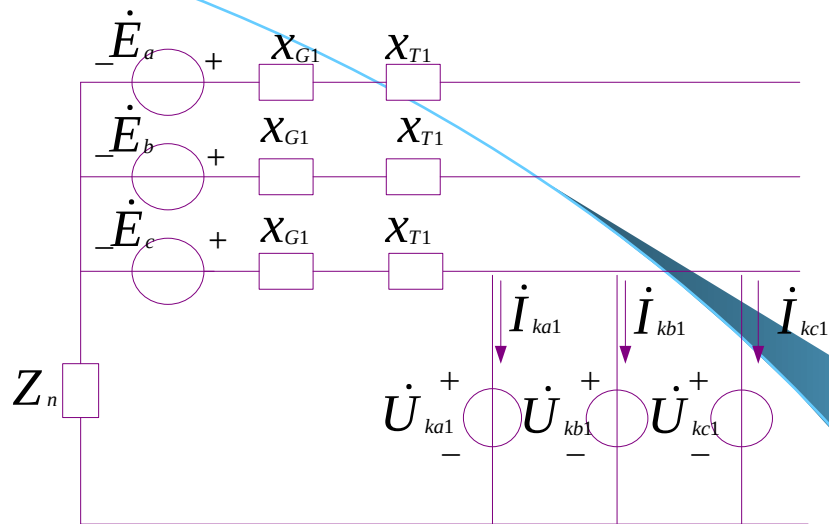
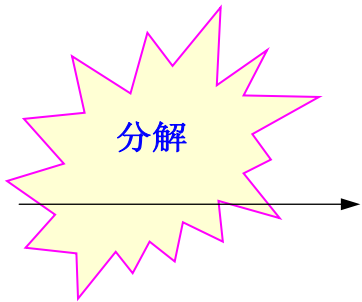
如图:



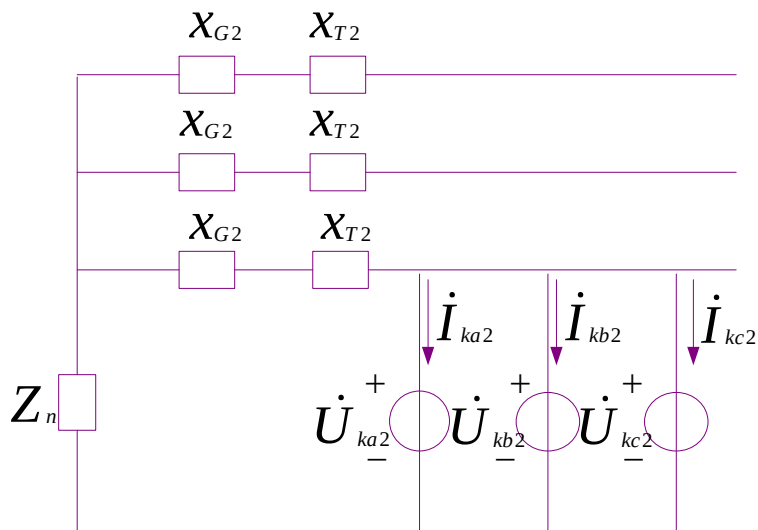


分解

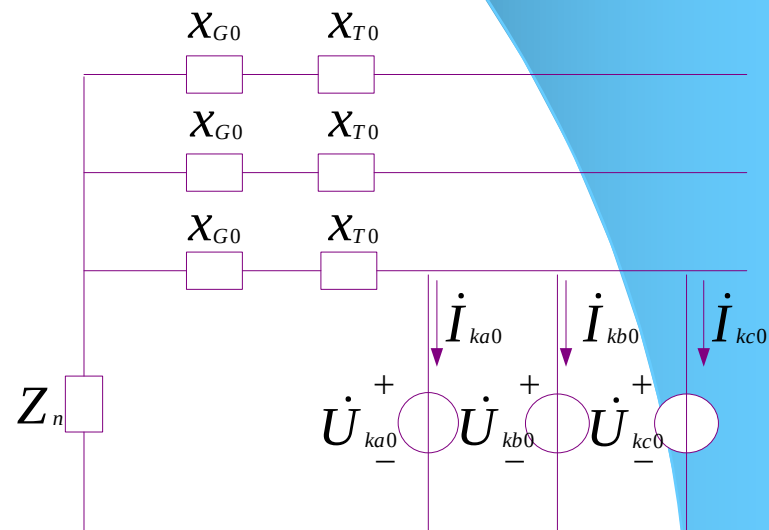




+



+



2017年4月5日星期三

序网络：

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_a - \dot{U}_{ka(1)} &= \dot{I}_{ka(1)} (z_{G(1)} + z_{T(1)} + z_{L(1)}) \\ -\dot{U}_{ka(2)} &= \dot{I}_{ka(2)} (z_{G(2)} + z_{T(2)} + z_{L(2)}) \\ -\dot{U}_{ka(0)} &= \dot{I}_{ka(0)} (z_{T(0)} + z_{L(0)}) \end{aligned} \right\}$$

其中零序电压平衡方程不包括发电机的零序阻抗，这是因为发电机侧没有零序电流流过。

4-3 各元件的序阻抗

★ (一) 发电机的序阻抗

正序阻抗: $X_d \quad X_q \quad X'_d \quad X''_d \quad X''_q$

负序阻抗: $X_{(2)} \approx X''_d$

定义: 机端负序电压基频分量与流入定子绕组负序电流基频分量的比值。

零序阻抗: $X_{(0)} \approx (0.15 \sim 0.16)X''_d$

定义: 机端零序电压基频分量与流入定子绕组零序电流基频分量的比值。

★ (二) 输电线路的序阻抗

正序: $X_{(1)} = X_L$

负序=正序 $X_{(1)} = X_{(2)}$

零序= (3~4) 倍正序电抗

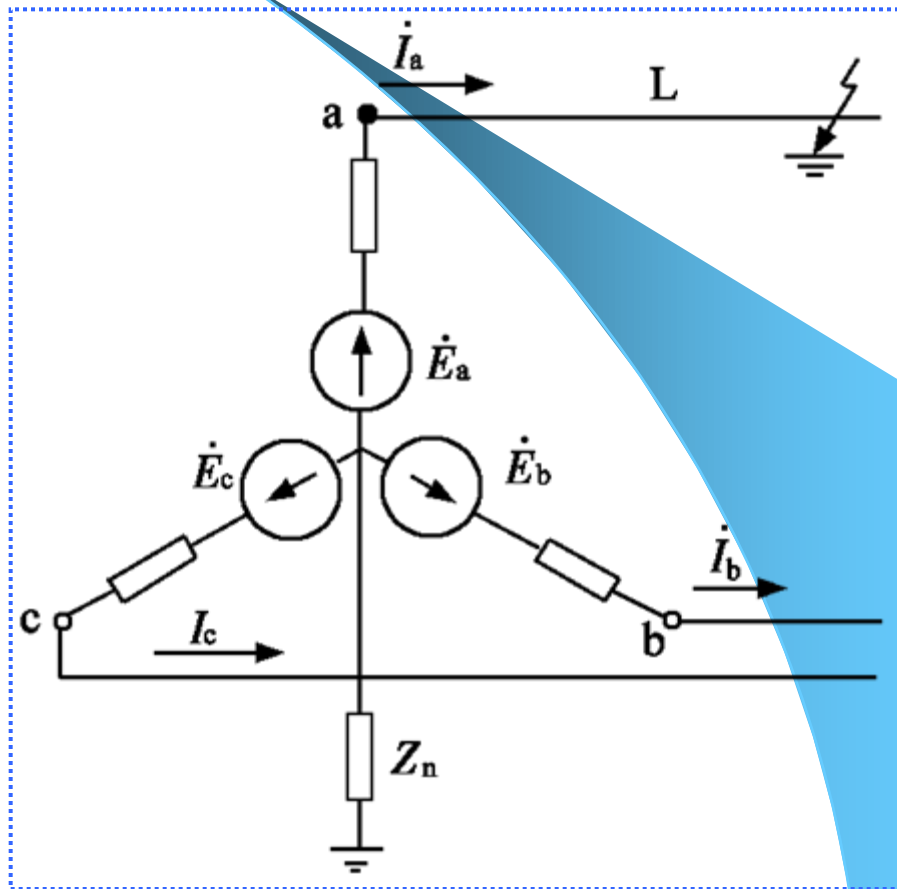
三、对称分量法在不对称短路计算中的应用

- 一台发电机接于空载线路，发电机中性点经阻抗 Z_n 接地。
- a相发生单相接地

$$\dot{V}_a = 0 \quad \dot{I}_a \neq 0$$

$$\dot{V}_b \neq 0 \quad \dot{I}_b = 0$$

$$\dot{V}_c \neq 0 \quad \dot{I}_c = 0$$



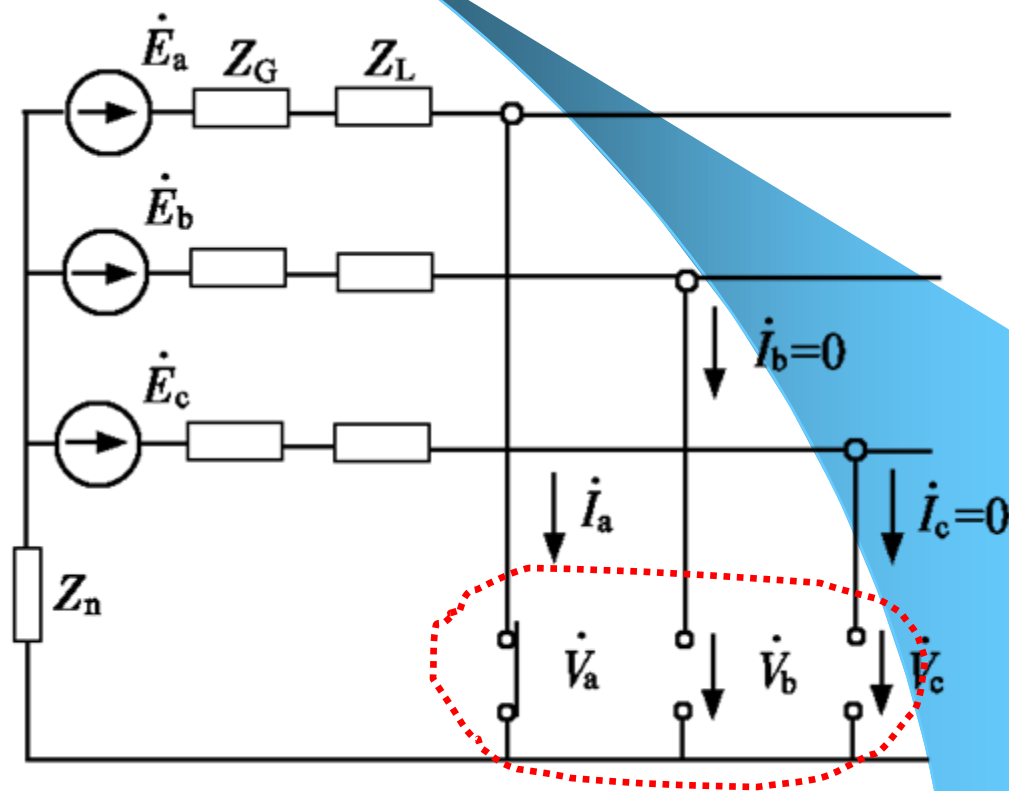
三、对称分量法在不对称短路计算中的应用

- a相接地的模拟

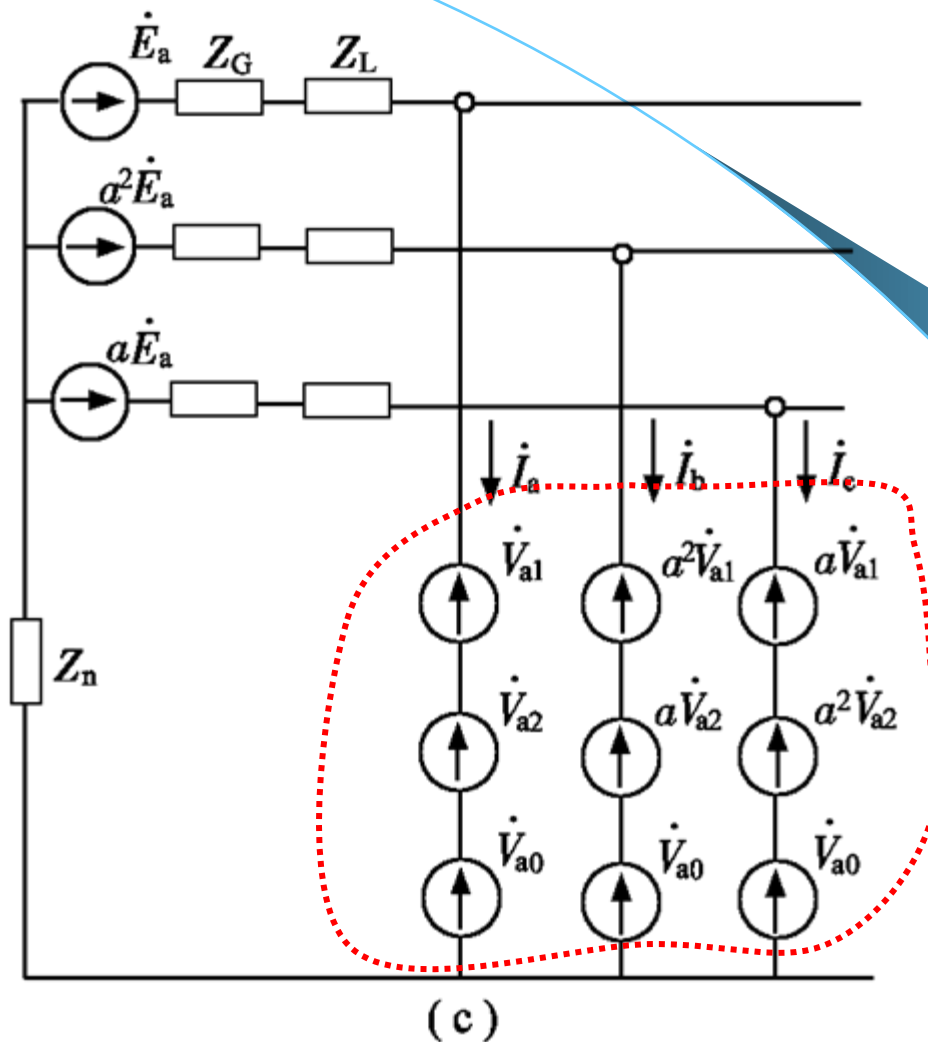
$$\dot{V}_a = 0 \quad \dot{I}_a \neq 0$$

$$\dot{V}_b \neq 0 \quad \dot{I}_b = 0$$

$$\dot{V}_c \neq 0 \quad \dot{I}_c = 0$$

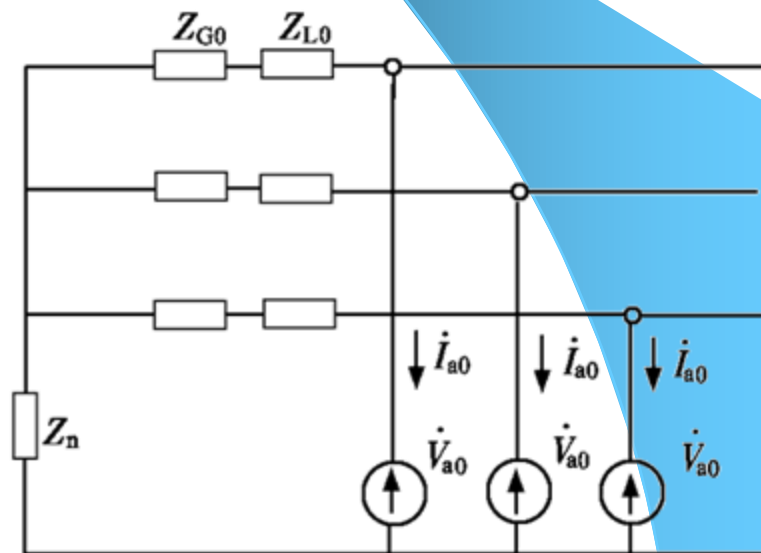
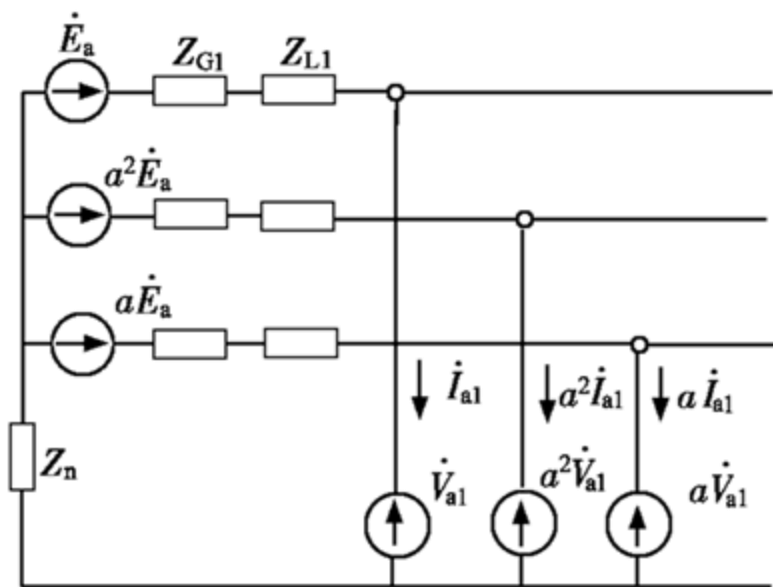
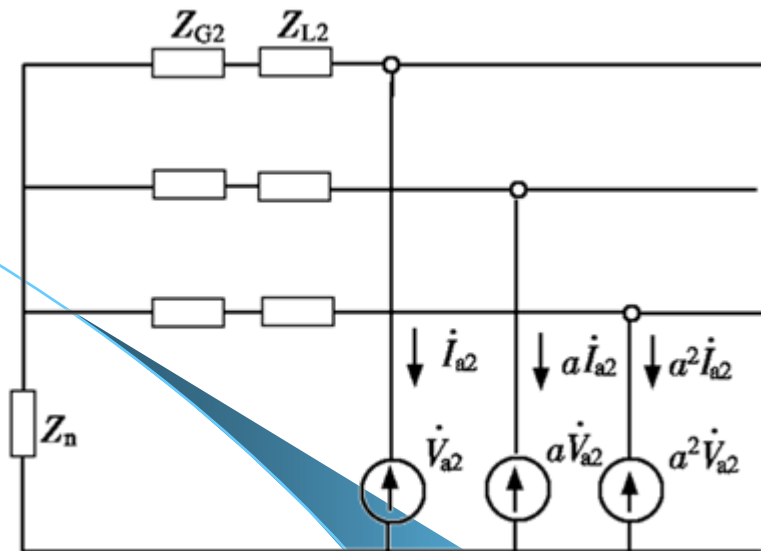
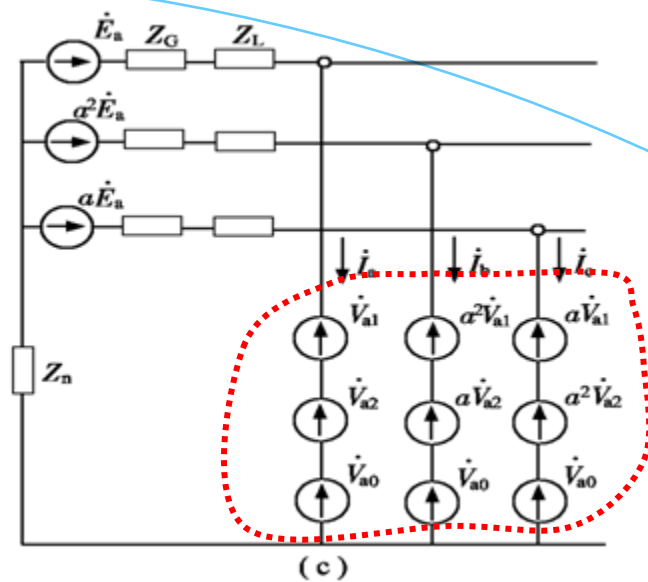


三、对称分量法在不对称短路计算中的应用



将不对称部分用三序分量表示

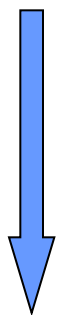
应用叠加原理进行分解



三、对称分量法在不对称短路计算中的应用

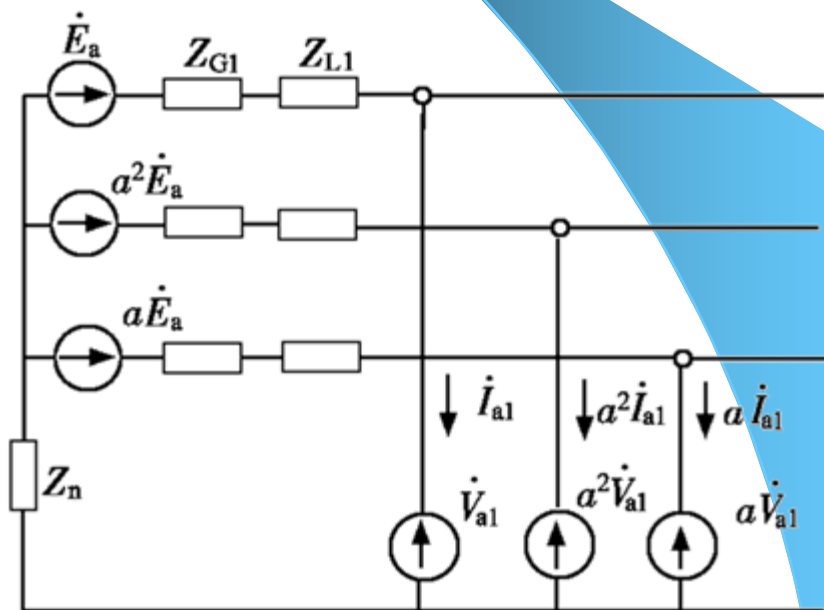
➤ 正序网

$$\dot{E}_a - \dot{I}_{a1}(Z_{G1} + Z_{L1}) - (\dot{I}_{a1} + a^2\dot{I}_{a1} + a\dot{I}_{a1})Z_n = \dot{V}_{a1}$$



$$\begin{aligned} & \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{c1} \\ &= \dot{I}_{a1} + \alpha^2\dot{I}_{a1} + \alpha\dot{I}_{a1} \\ &= 0 \end{aligned}$$

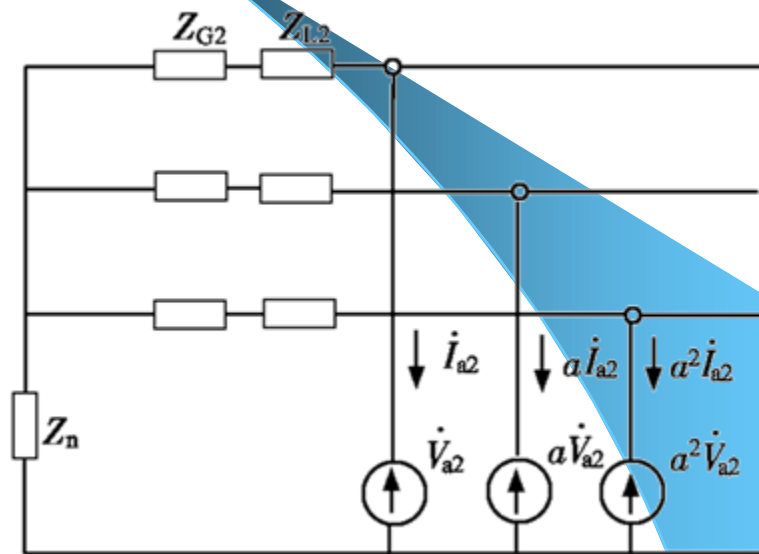
$$\dot{E}_a - \dot{I}_{a1}(Z_{G1} + Z_{L1}) = \dot{V}_{a1}$$



三、对称分量法在不对称短路计算中的应用

➤ 负序网

$$0 - \dot{I}_{a2}(Z_{G2} + Z_{12}) = \dot{V}_{a2}$$



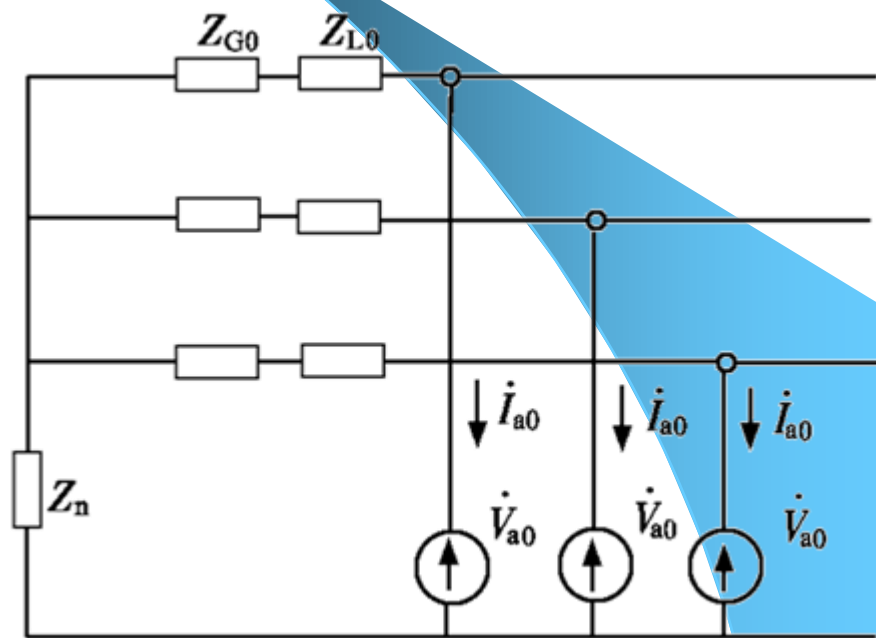
三、对称分量法在不对称短路计算中的应用

➤ 零序网

$$\dot{I}_{a0} + \dot{I}_{b0} + \dot{I}_{c0} = 3\dot{I}_{a0}$$

$$0 - \dot{I}_{a0}(Z_{G0} + Z_{L0}) - 3\dot{I}_{a0}Z_n = \dot{V}_{a0}$$

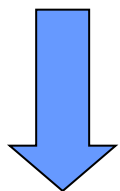
$$0 - \dot{I}_{a0}(Z_{G0} + Z_{L0} + 3Z_n) = \dot{V}_{a0}$$



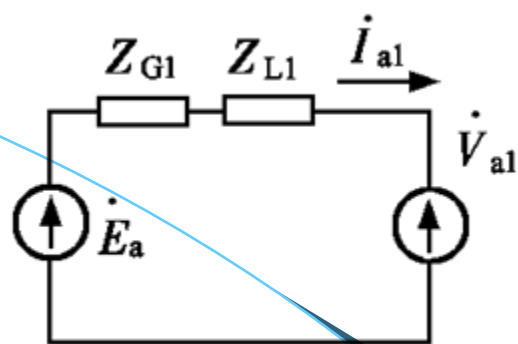
$$\dot{E}_a - \dot{I}_{a1}(Z_{G1} + Z_{L1}) = \dot{V}_{a1}$$

$$0 - \dot{I}_{a2}(Z_{G2} + Z_{L2}) = \dot{V}_{a2}$$

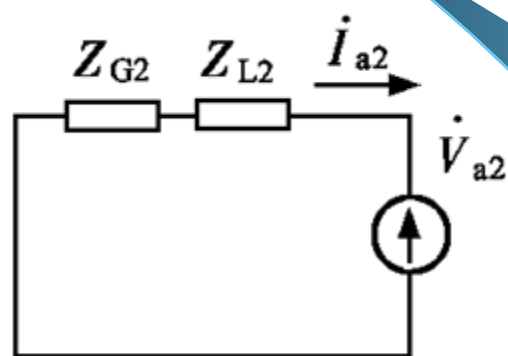
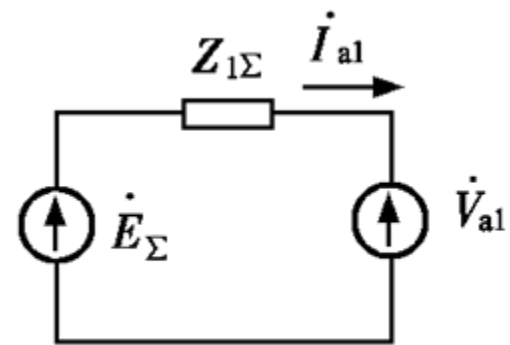
$$0 - \dot{I}_{a0}(Z_{G0} + Z_{L0} + 3Z_n) = \dot{V}_{a0}$$



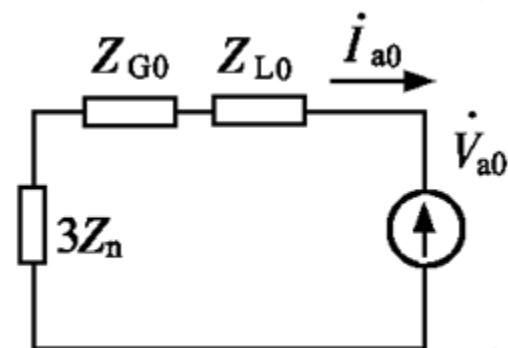
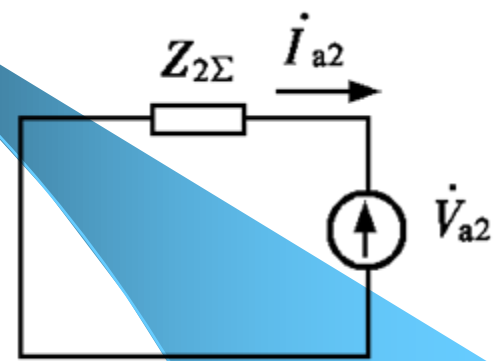
$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_\Sigma - \dot{I}_{a1}Z_{1\Sigma} &= \dot{V}_{a1} \\ 0 - \dot{I}_{a2}Z_{2\Sigma} &= \dot{V}_{a2} \\ 0 - \dot{I}_{a0}Z_{0\Sigma} &= \dot{V}_{a0} \end{aligned} \right\}$$



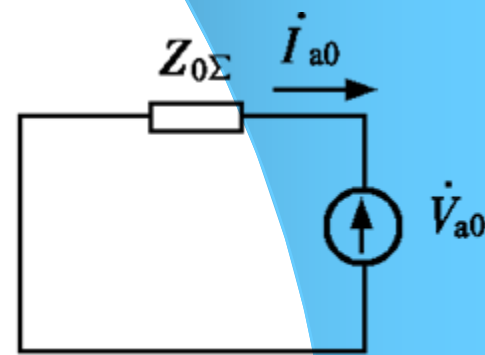
(a)



(b)



(c)



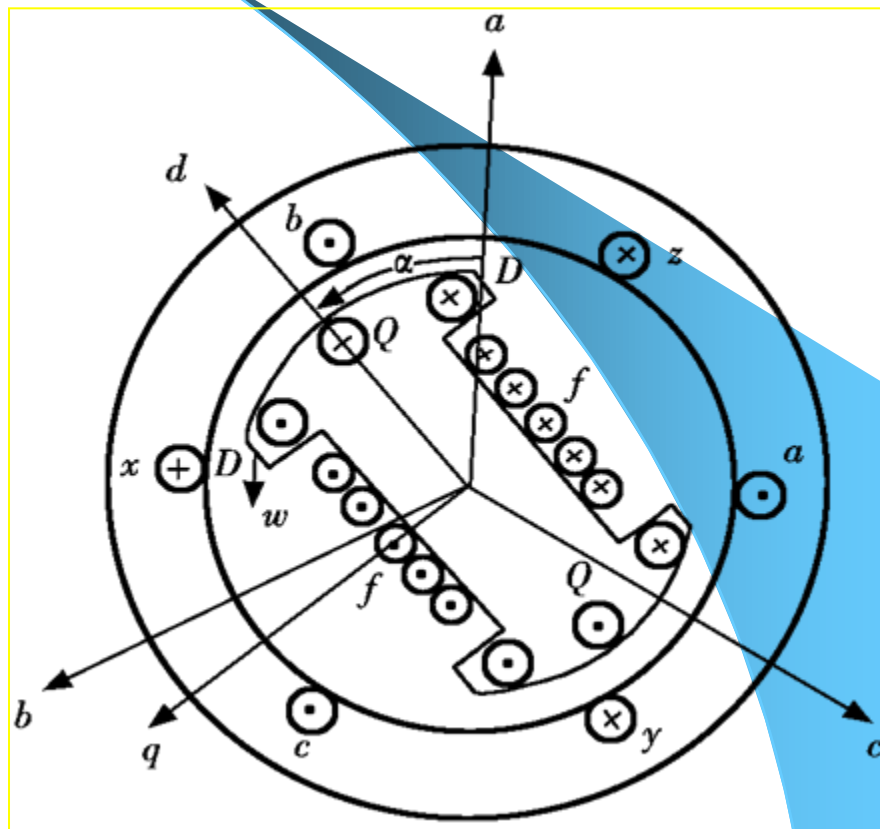
4.2 电力系统各序网络

- **静止元件**：正序阻抗等于负序阻抗，不等于零序阻抗。如：变压器、输电线路等。
- **旋转元件**：各序阻抗均不相同。如：发电机、电动机等元件。

一、同步发电机的负序和零序电抗

1 同步发电机的负序电抗

- 负序旋转磁场与转子旋转方向相反，因而在不同的位置会遇到不同的磁阻（因转子不是任意对称的），负序电抗会发生周期性变化。
- 有阻尼绕组发电机 $X_d'' \sim X_q''$
- 无阻尼绕组发电机 $X_d' \sim X_q'$



1 同步发电机的负序电抗

- 实用计算中发电机负序电抗计算

有阻尼绕组 $X_2 = \frac{1}{2}(X_d'' + X_q'')$ 无阻尼绕组 $X_2 = \sqrt{X_d' X_q'}$

- 发电机负序电抗近似估算值

有阻尼绕组 $X_2 = 1.22 X_d''$ 无阻尼绕组 $X_2 = 1.45 X_d'$

- 无确切数值，可取典型值

电机类型 电抗	水轮发电机		汽轮发电机	调相机和 大型同步电动机
	有阻尼绕组	无阻尼绕组		
X_2	0.15~0.35	0.32~0.55	0.134~0.18	0.24
X_0	0.04~0.125	0.04~0.125	0.036~0.08	0.08

2. 同步发电机的零序电抗

- 三相零序电流在气隙中产生的合成磁势为零，因此其零序电抗仅由定子线圈的漏磁通确定。
- 同步发电机零序电抗在数值上相差很大（绕组结构形式不同）： $X_0 = (0.15 \sim 0.6)X_d''$
- 零序电抗典型值

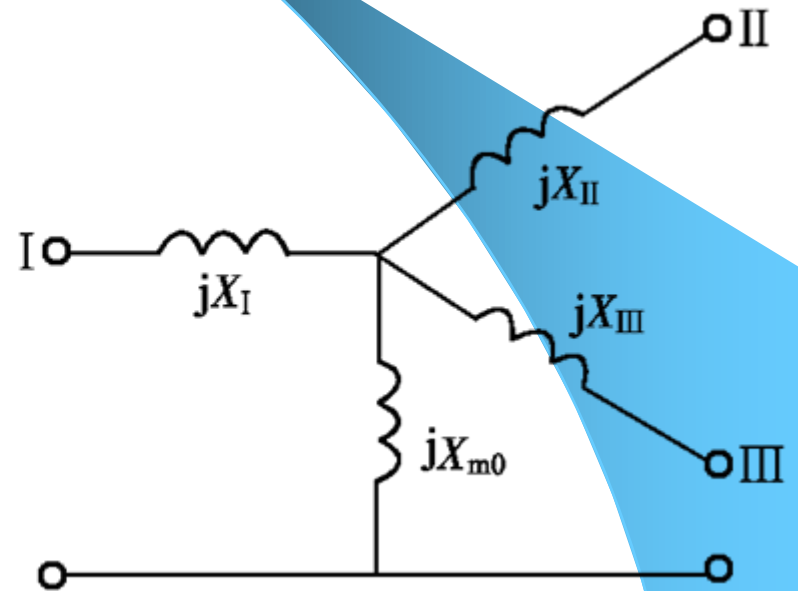
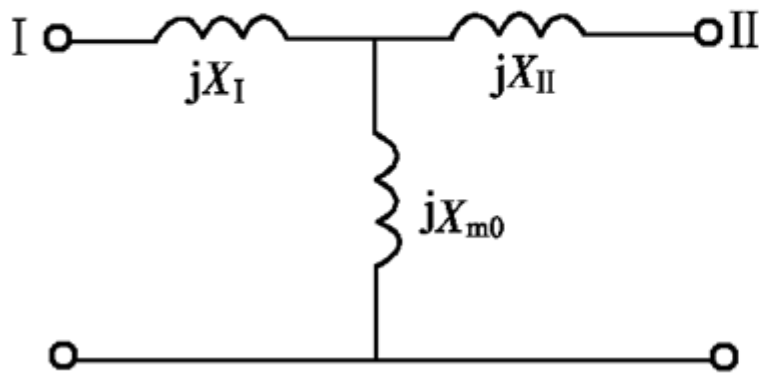
二、异步电动机和综合负荷的序阻抗

- 异步电动机和综合负荷的正序阻抗：
 $Z_1=0.8+j0.6$ 或 $X_1=1.2$ ；
- 异步电动机负序阻抗： $X_2=0.2$ ；
- 综合负荷负序阻抗： $X_2=0.35$ ；
- 异步电动机和综合负荷的零序电抗： $X_0=\infty$ 。

三、变压器的零序电抗及其等值电路

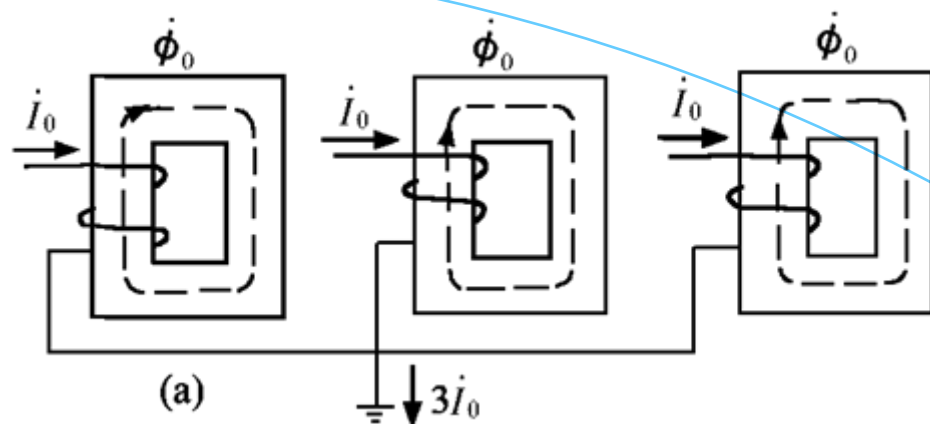
1. 普通变压器的零序阻抗及其等值电路

- 正序、负序和零序等值电路结构相同。

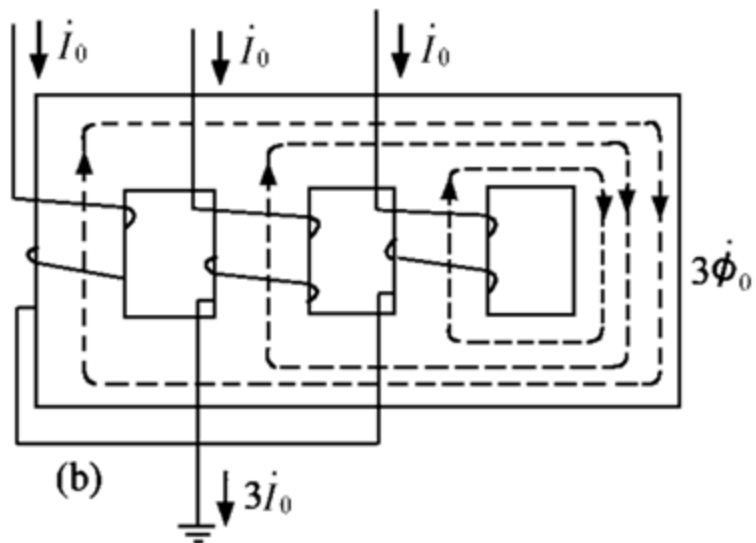


1 . 普通变压器的零序阻抗及其等值电路

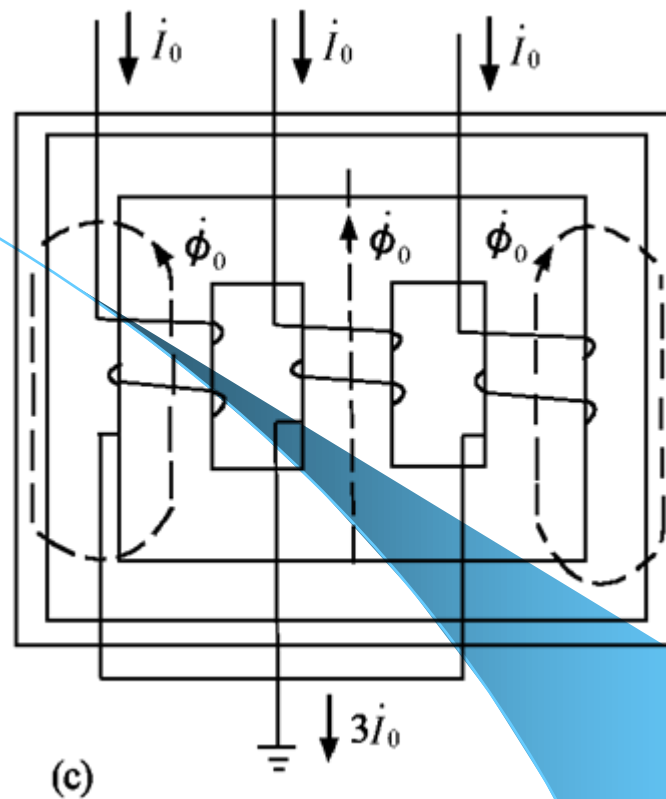
- ▶ 漏磁通的路径与所通电流的序别无关，因此变压器的各序等值漏抗相等。
- ▶ 励磁电抗取决于主磁通路径，正序与负序电流的主磁通路径相同，负序励磁电抗与正序励磁电抗相等。因此，变压器的正、负序等值电路参数完全相同。
- 变压器的零序励磁电抗与变压器的铁心结构相关。



零序励磁电抗等于正序励磁电抗



零序励磁电抗等于正序励磁电抗



零序励磁电抗比正序励磁电抗小得多： $X_{m0}=0.3\sim1.0$

2. 变压器的零序等值电路与外电路的连接

基本原理

a) 变压器零序等值电路与外电路的联接取决于零序电流的流通路径，因此，与变压器三相绕组联结形式及中性点是否接地有关。

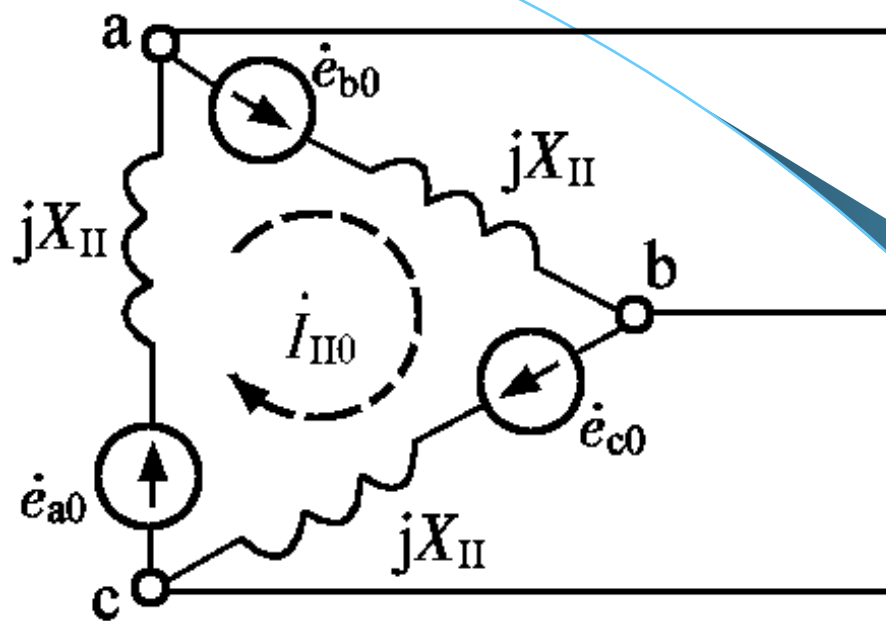
b) 不对称短路时，零序电压施加于相线与大地之间。

考虑三个方面：

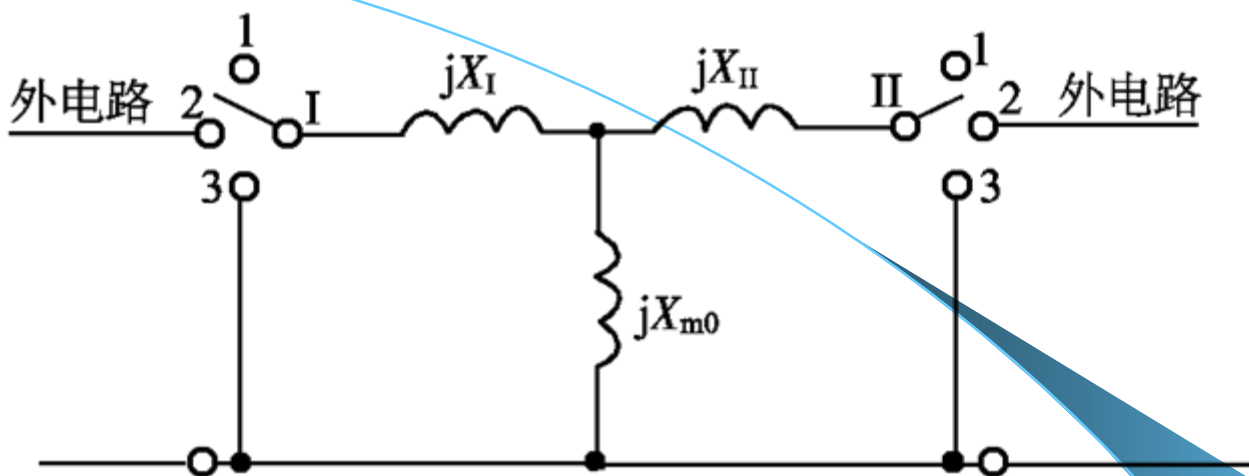
(1) 当外电路向变压器某侧施加零序电压时，如果能在该侧产生零序电流，则等值电路中该侧绕组端点与外电路接通；反之，则断开。根据这个原则：**只有中性点接地的星形接法绕组才能与外电路接通。**

(2) 当变压器绕组具有零序电势（由另一侧感应过来）时，如果它能够将零序电势施加到外电路并能提供零序电流的通路，则等值电路中该侧绕组端点与外电路接通，否则断开。据此：**只有中性点接地星形接法绕组才能与外电路接通。**

(3) 三角形接法的绕组中，绕组的零序电势虽然不能作用到外电路中，但能在三相绕组中形成环流。因此，**在等值电路中该侧绕组端点接零序等值中性点。**



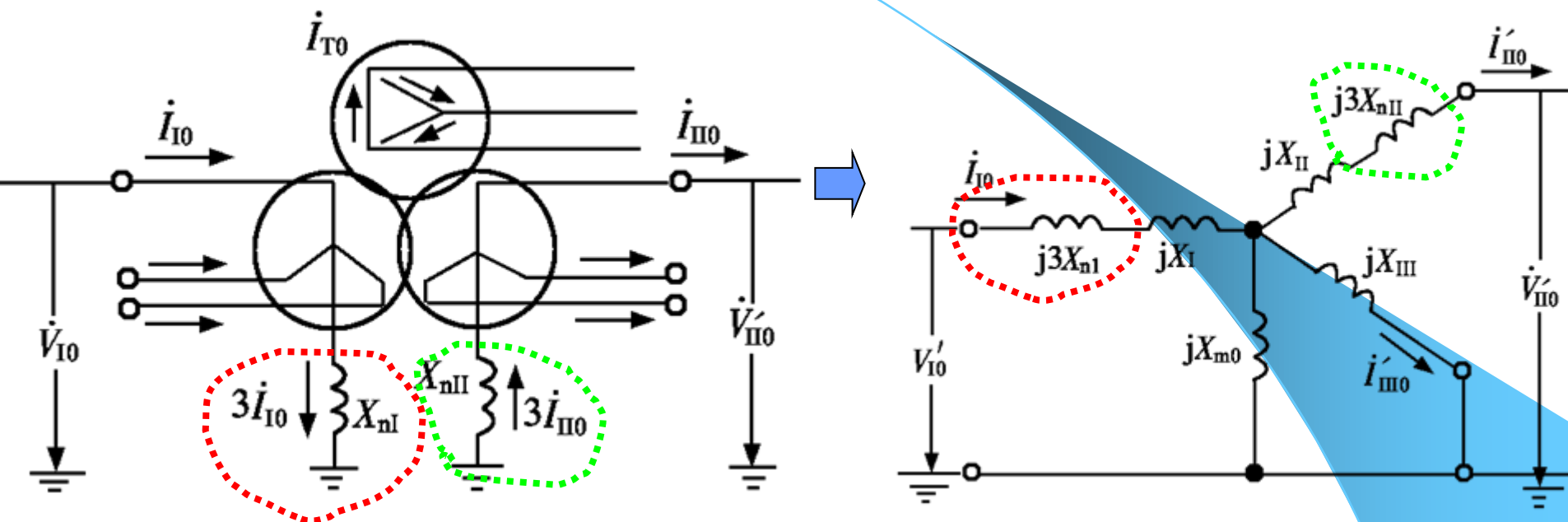
Y_0/Δ 接法三角形侧的零序环流



变压器绕组接法	开关位置	绕组端点与外电路的连接
Y	1	与外电路断开
Y_0	2	与外电路接通
Δ	3	与外电路断开，但与励磁支路并联

变压器零序等值电路与外电路的联接

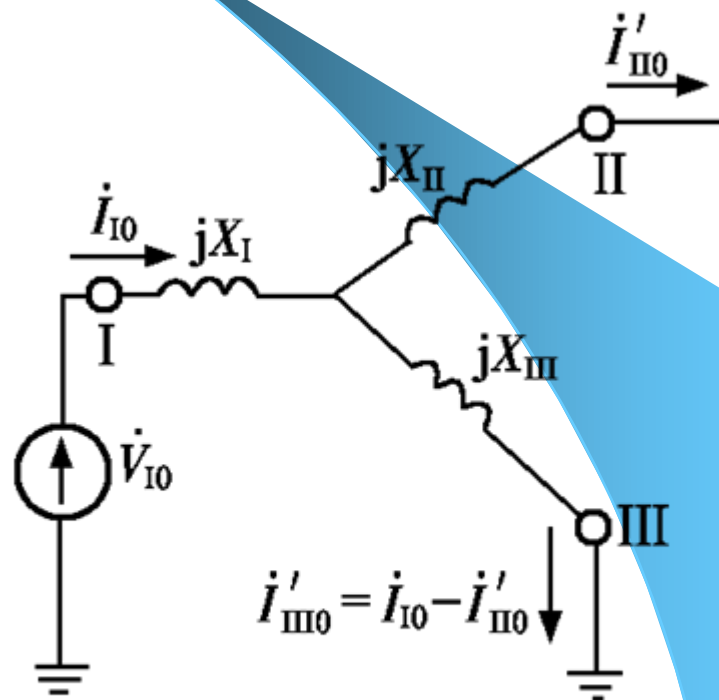
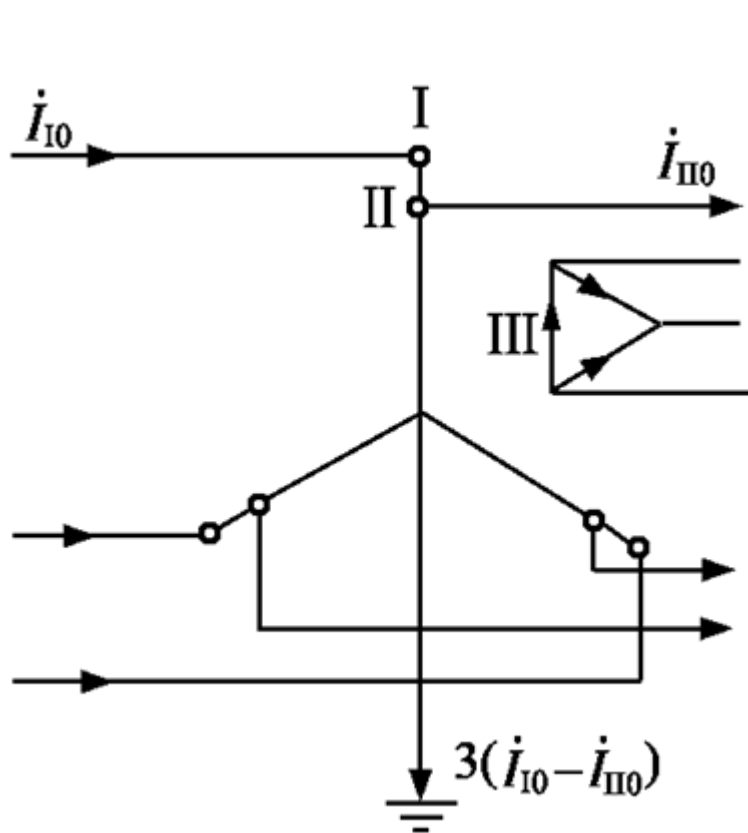
3. 中性点有接地电阻时变压器的零序等值电路



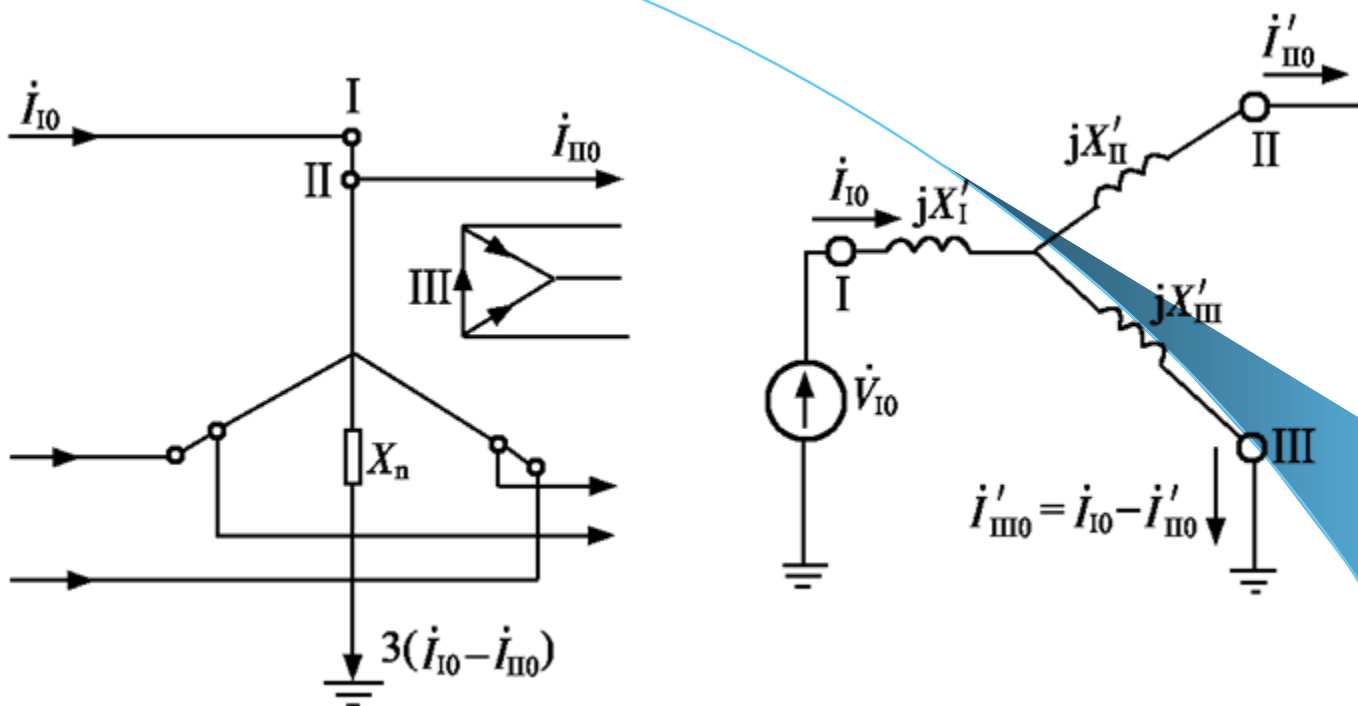
变压器中性点经电抗接地时的零序等值电路

4. 自耦变压器的零序阻抗及其等值电路

- 中性点直接接地的自耦变压器



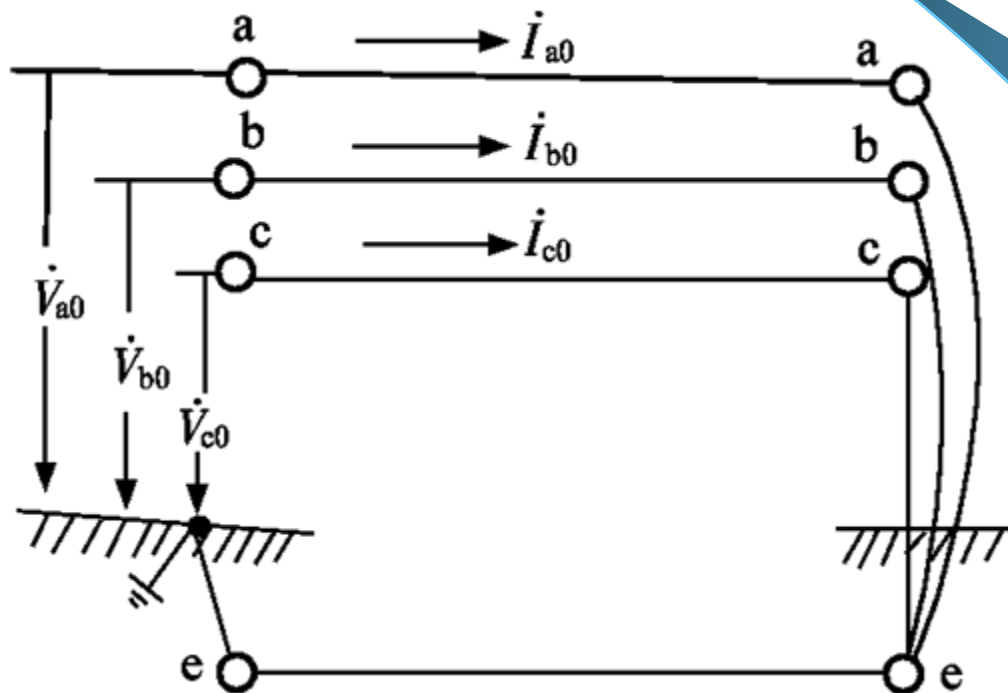
中性点经电抗接地的自耦变压器



$$\left. \begin{aligned} X'_I &= X_I + 3X_n(1 - k_{12}) \\ X'_{II} &= X_{II} + 3X_n k_{12}(k_{12} - 1) \\ X'_{III} &= X_{III} + 3X_n k_{12} \end{aligned} \right\}$$

四、架空线路的零序阻抗及其等值电路

- 零序电流必须借助大地及架空地线构成通路

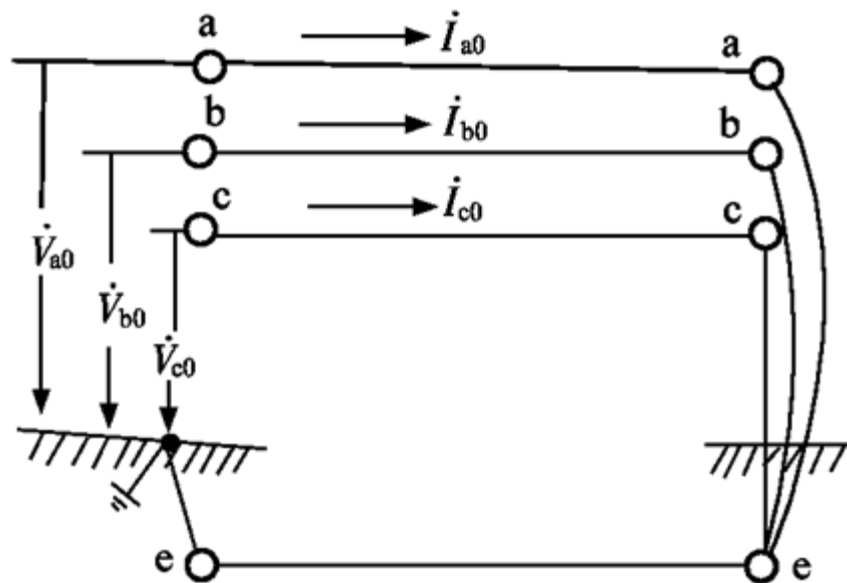


四、架空线路的零序阻抗及其等值电路

- 零序阻抗比正序阻抗大

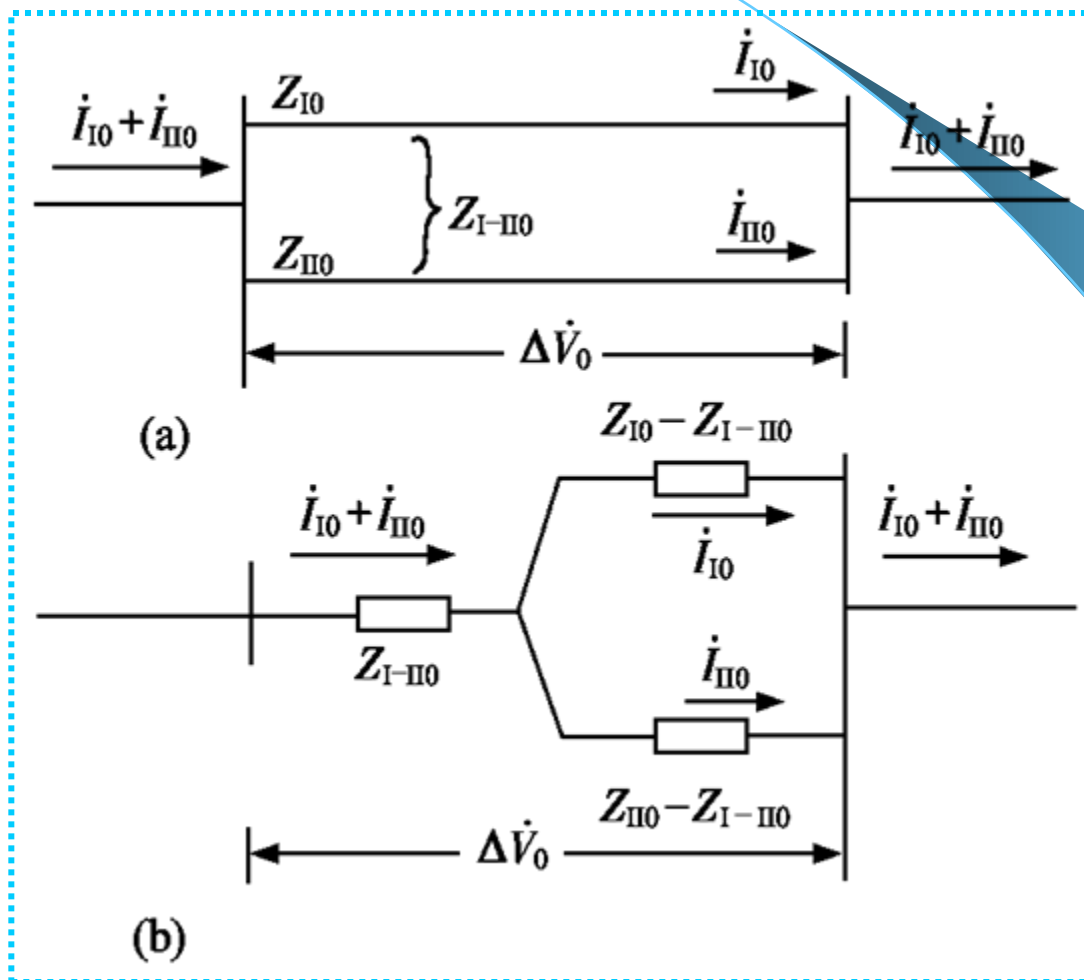
(1) 回路中包含了大地电阻

(2) 自感磁通和互感磁通是助增的



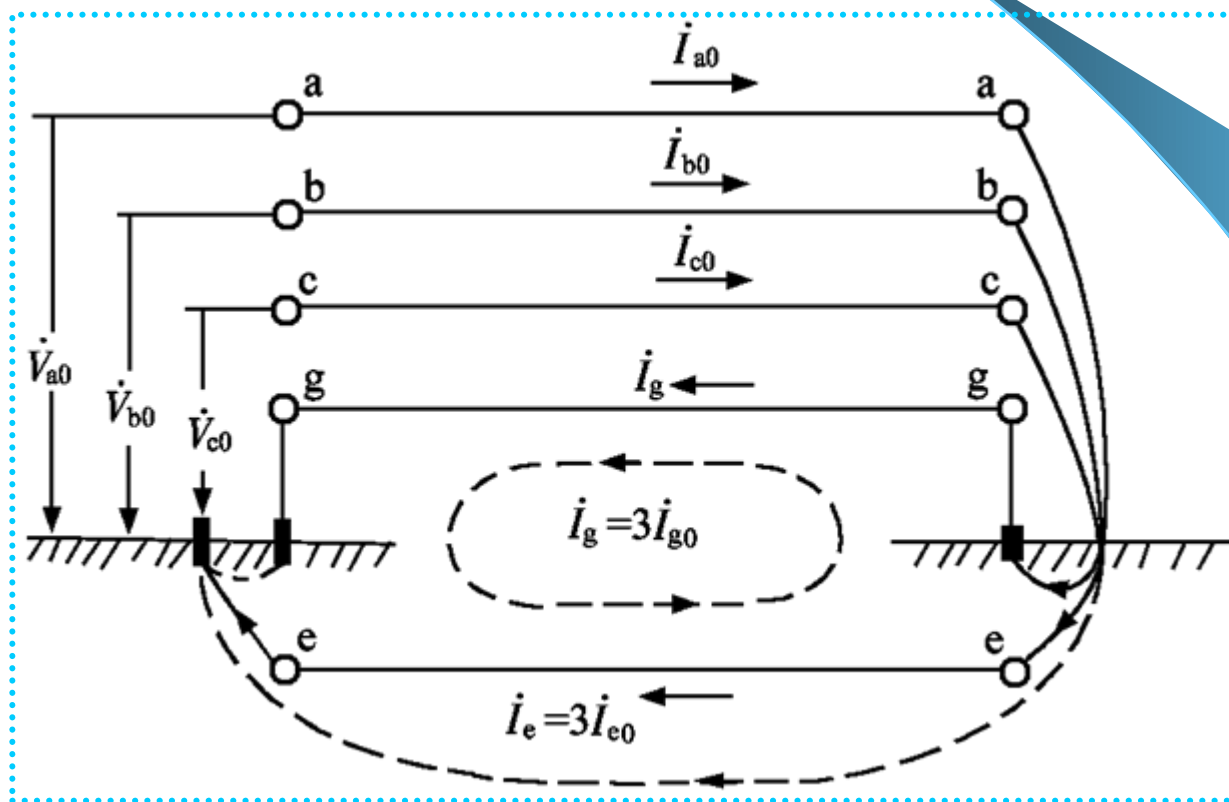
四、架空线路的零序阻抗及其等值电路

● 平行架设双回线零序等值电路



四、架空线路的零序阻抗及其等值电路

- 有架空地线的情况：零序阻抗有所减小。



四、架空线路的零序阻抗及其等值电路

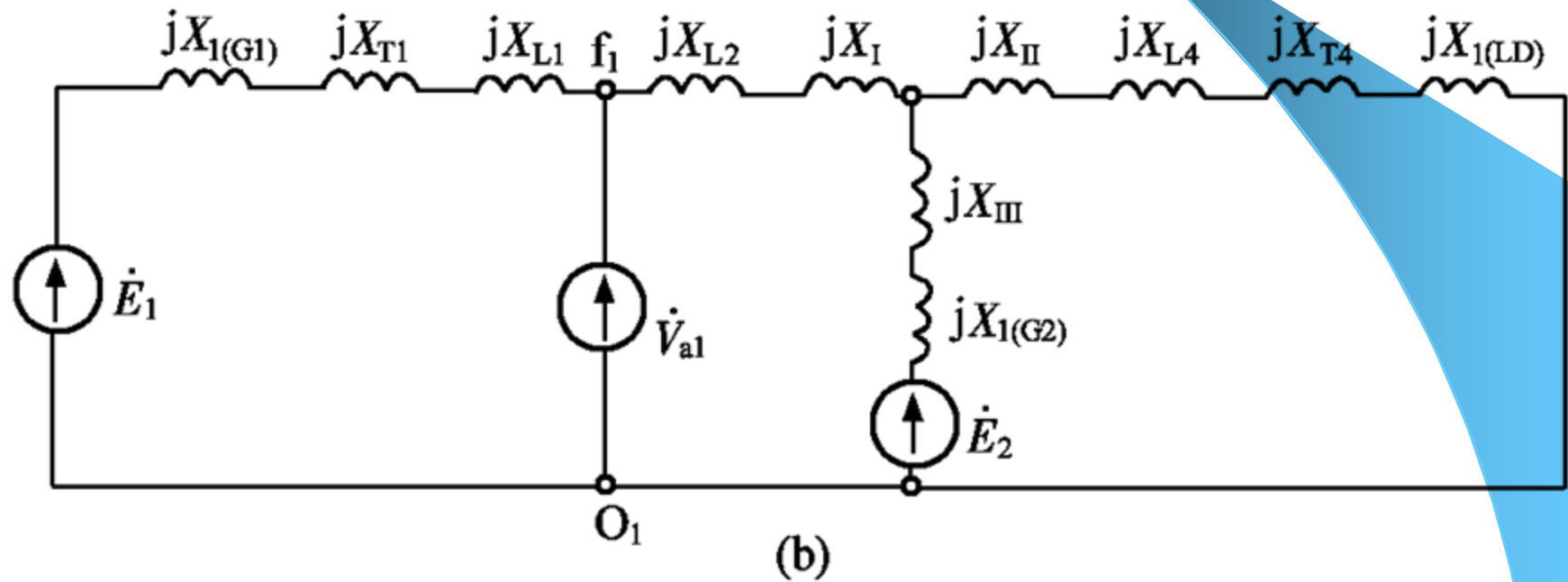
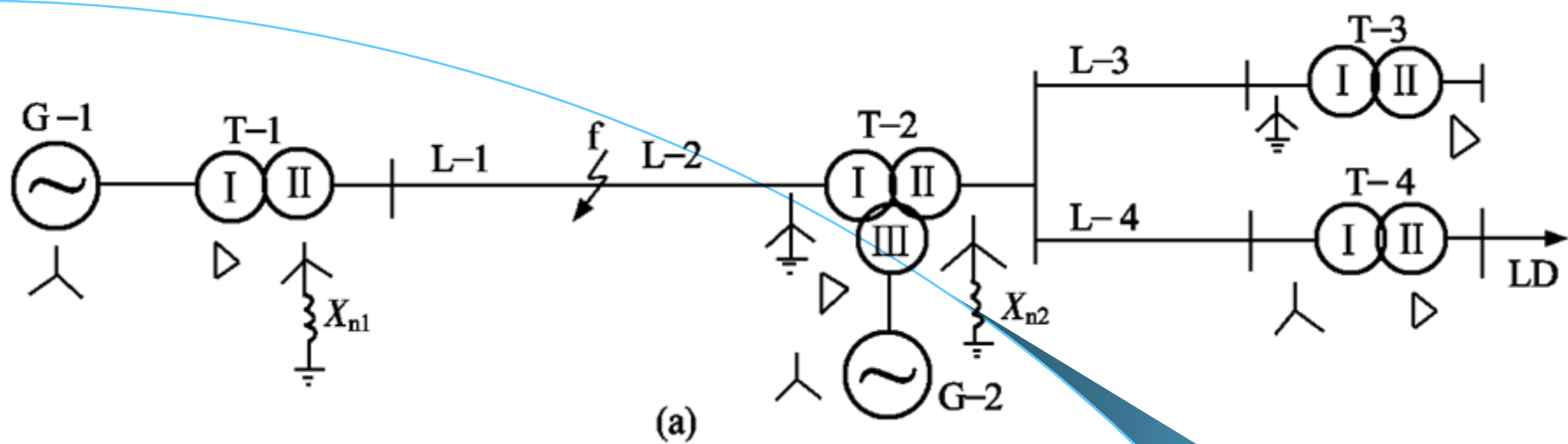
► 实用计算中一相等值零序电抗

无架空地线的	→	$x_0 = 3.5x_1$
有钢质架空地线的	→	$x_0 = 3x_1$
的单回线路	→	$x_0 = 2x_1$
有良导体架空地线的	→	$x_0 = 5.5x_1$
的单回线路	→	$x_0 = 4.7x_1$
有钢质架空地线的	→	$x_0 = 3x_1$
双回线路	→	$x_0 = 3x_1$

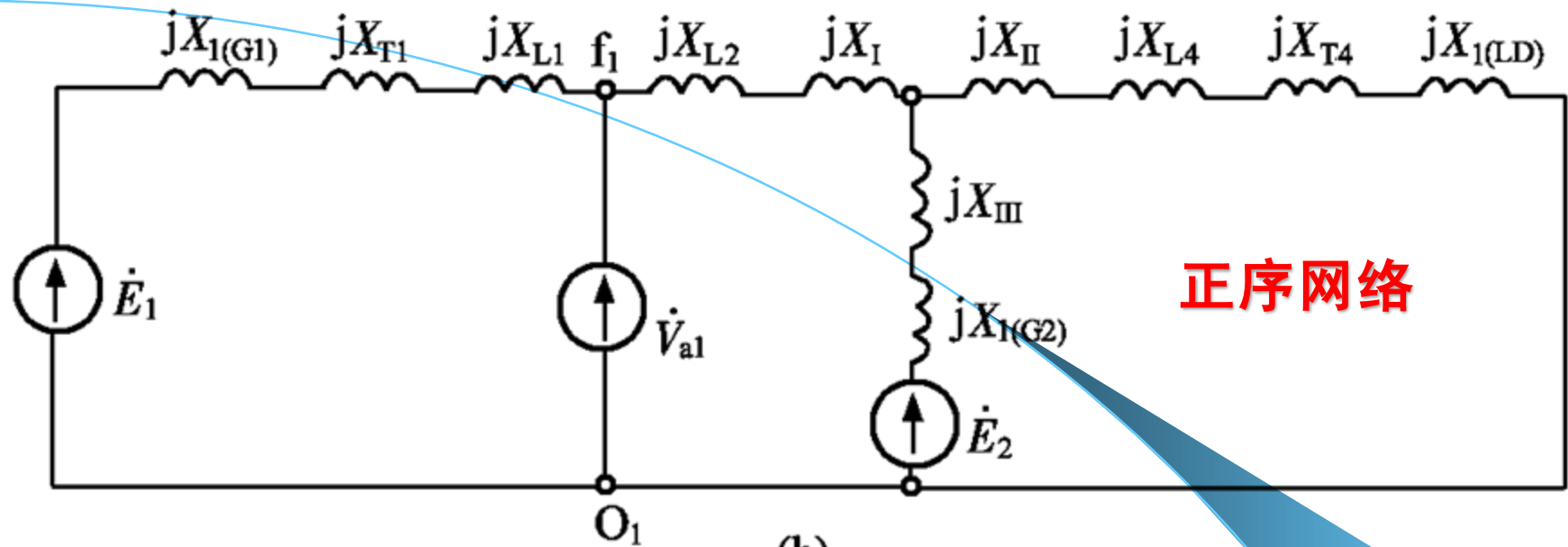
五、电力系统各序网络

➤ 等值电路的绘制原则

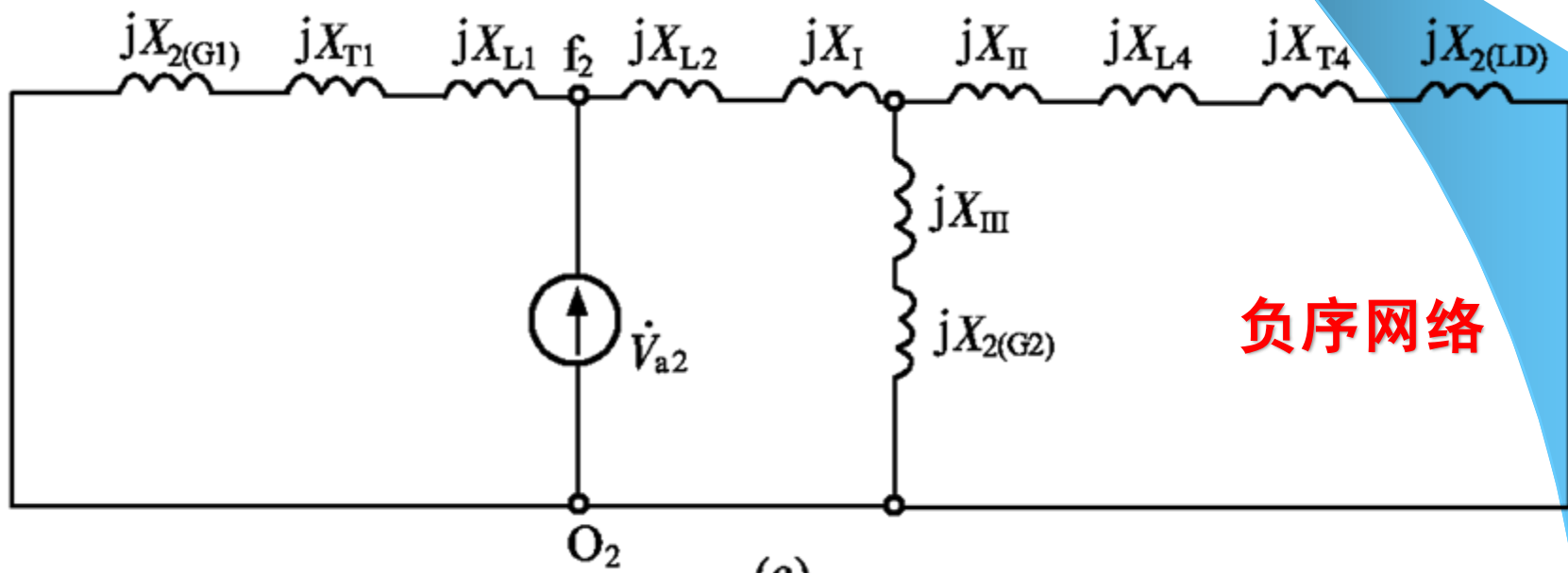
根据电力系统的原始资料，在故障点分别施加各序电势，从故障点开始，查明各序电流的流通情况，凡是某序电流能流通的元件，必须包含在该序网络中，并用相应的序参数及等值电路表示。



正序网络

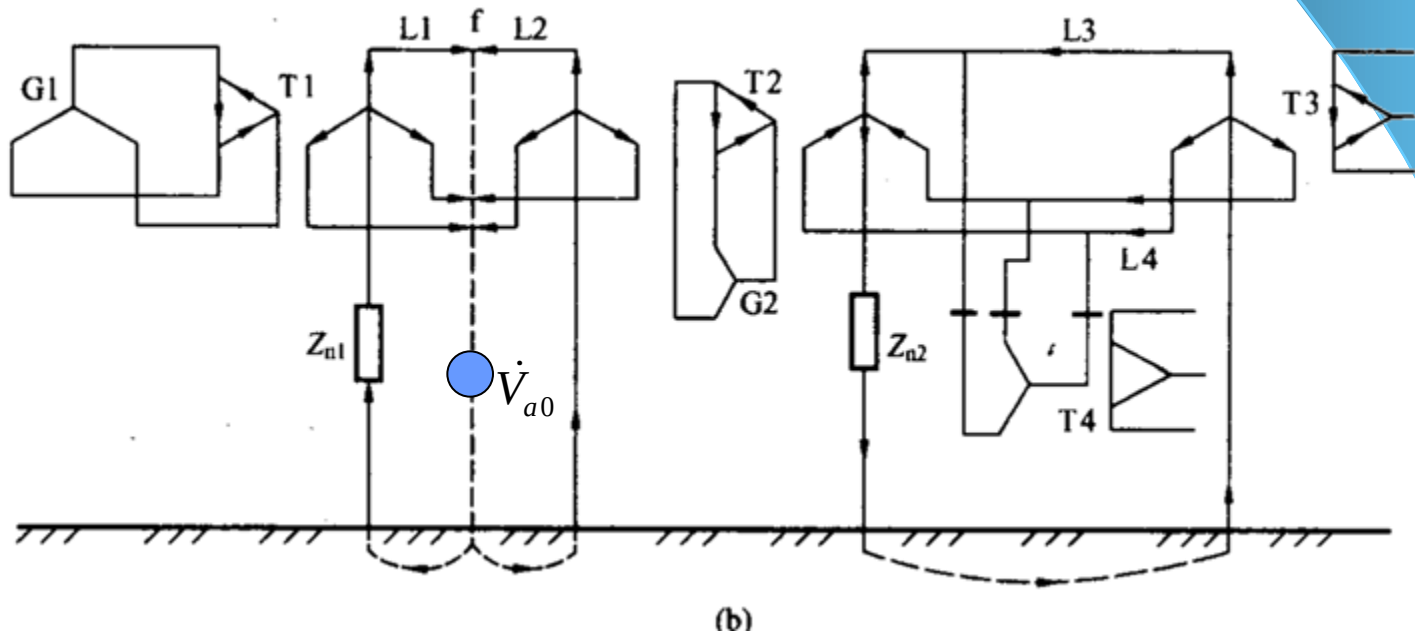
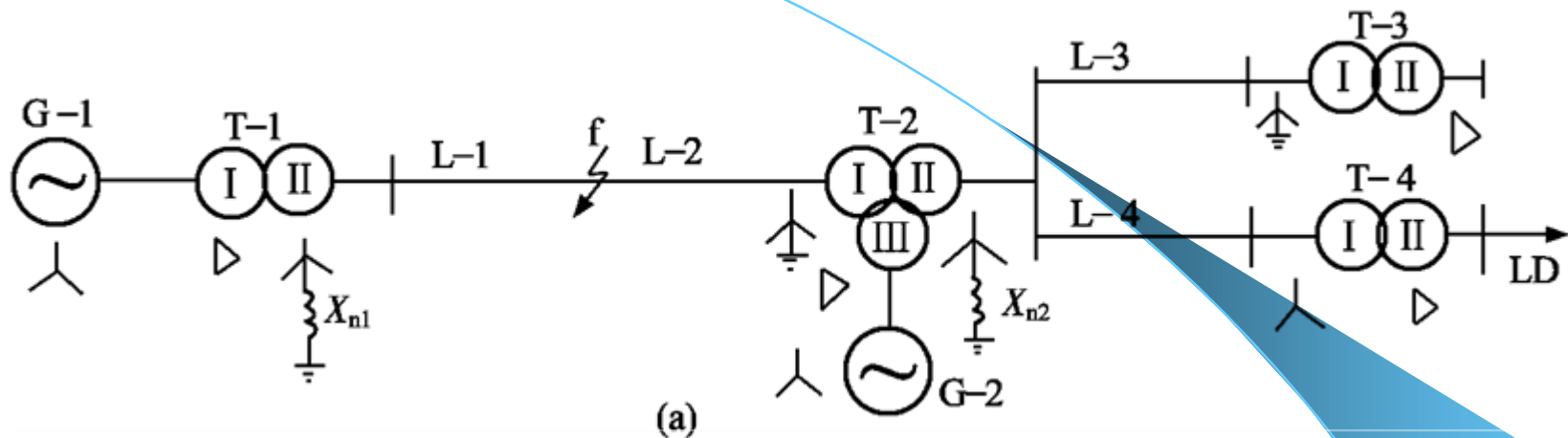


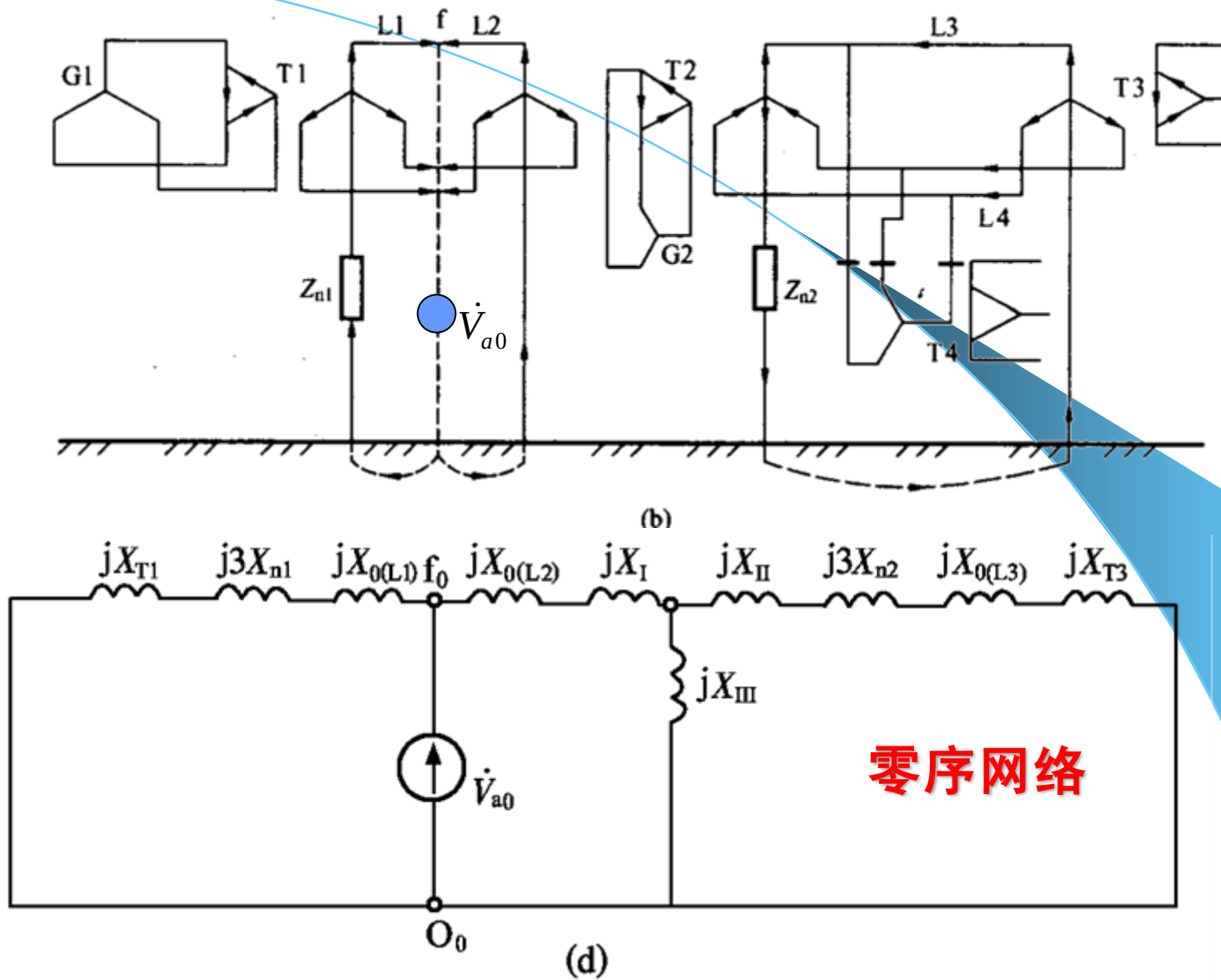
(b)



(c)

零序网络：必须首先确定零序电流的流通路径。





例7-1

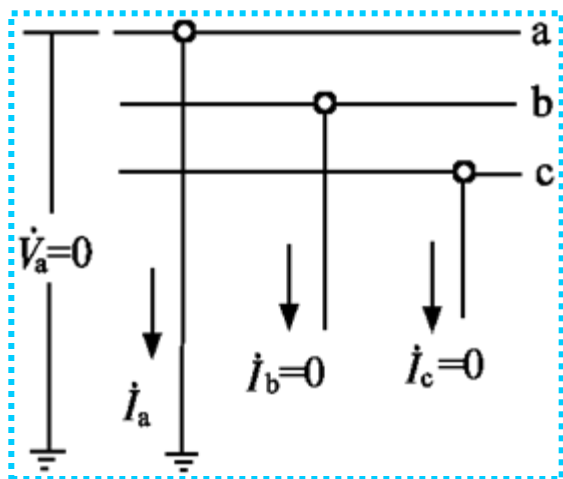
第五章 不对称短路的分析计算

- 当网络元件只用电抗表示时，不对称短路的序网络方程

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{\Sigma} - \dot{I}_{a1} Z_{1\Sigma} &= \dot{V}_{a1} \\ 0 - \dot{I}_{a2} Z_{2\Sigma} &= \dot{V}_{a2} \\ 0 - \dot{I}_{a0} Z_{0\Sigma} &= \dot{V}_{a0} \end{aligned} \right\} \longrightarrow \left. \begin{aligned} \dot{E}_{\Sigma} - jX_{1\Sigma} \dot{I}_{a1} &= \dot{V}_{a1} \\ -jX_{2\Sigma} \dot{I}_{a2} &= \dot{V}_{a2} \\ -jX_{0\Sigma} \dot{I}_{a0} &= \dot{V}_{a0} \end{aligned} \right\}$$

该方程组有三个方程，但有六个未知数，必须根据边界条件列出另外三个方程才能求解。

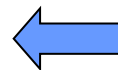
一、单相接地短路



$$\left. \begin{array}{l} \dot{V}_a = 0 \\ \dot{I}_b = 0 \\ \dot{I}_c = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \left. \begin{array}{l} \dot{V}_{a1} + \dot{V}_{a2} + \dot{V}_{a0} = 0 \\ a^2 \dot{I}_{a1} + a \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} = 0 \\ a \dot{I}_{a1} + a^2 \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} = 0 \end{array} \right\}$$



$$\left. \begin{array}{l} \dot{V}_{a1} + \dot{V}_{a2} + \dot{V}_{a0} = 0 \\ \dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2} = \dot{I}_{a0} \end{array} \right\}$$



$$\left. \begin{array}{l} \dot{E}_\Sigma - jX_{1\Sigma} \dot{I}_{a1} = \dot{V}_{a1} \\ -jX_{2\Sigma} \dot{I}_{a2} = \dot{V}_{a2} \\ -jX_{0\Sigma} \dot{I}_{a0} = \dot{V}_{a0} \end{array} \right\}$$

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

$$\left. \begin{array}{l} \dot{I}_{a2} = \dot{I}_{a0} = \dot{I}_{a1} \\ \dot{V}_{a1} = \dot{E}_\Sigma - jX_{1\Sigma} \dot{I}_{a1} = j(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}) \dot{I}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} = -jX_{2\Sigma} \dot{I}_{a1} \\ \dot{V}_{a0} = -jX_{0\Sigma} \dot{I}_{a1} \end{array} \right\}$$

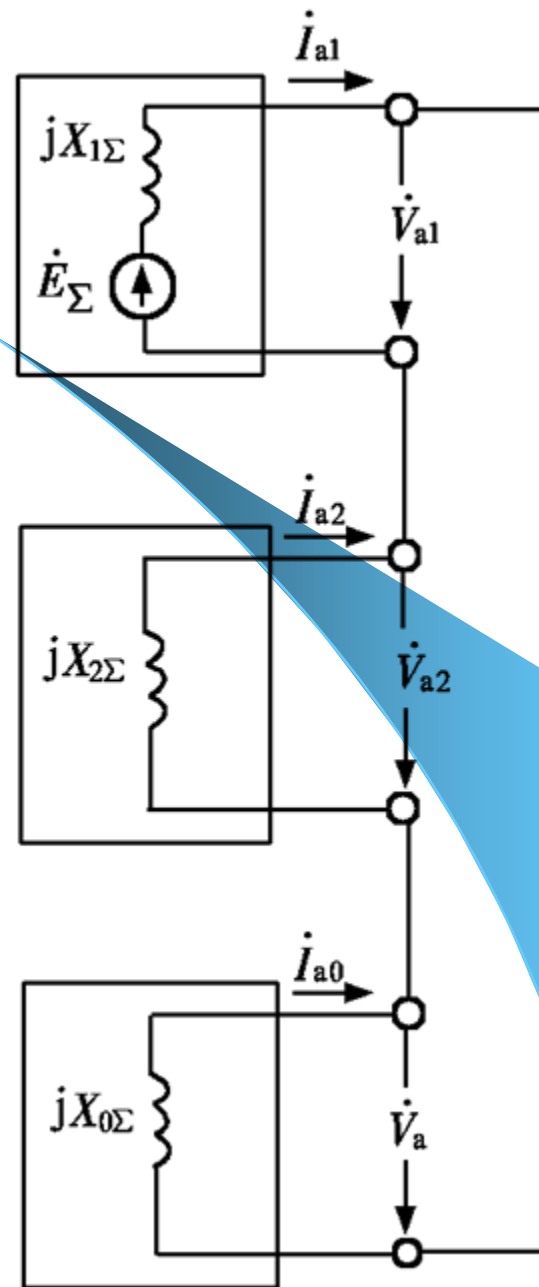
单相接地故障的复合序网

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_{a1} + \dot{V}_{a2} + \dot{V}_{a0} &= 0 \\ \dot{I}_{a1} &= \dot{I}_{a2} = \dot{I}_{a0} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{\Sigma} - jX_{1\Sigma} \dot{I}_{a1} &= \dot{V}_{a1} \\ -jX_{2\Sigma} \dot{I}_{a2} &= \dot{V}_{a2} \\ -jX_{0\Sigma} \dot{I}_{a0} &= \dot{V}_{a0} \end{aligned} \right\}$$

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

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{a2} &= \dot{I}_{a0} = \dot{I}_{a1} \\ \dot{V}_{a1} &= \dot{E}_{\Sigma} - jX_{1\Sigma} \dot{I}_{a1} = j(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}) \dot{I}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} &= -jX_{2\Sigma} \dot{I}_{a1} \\ \dot{V}_{a0} &= -jX_{0\Sigma} \dot{I}_{a1} \end{aligned} \right\}$$

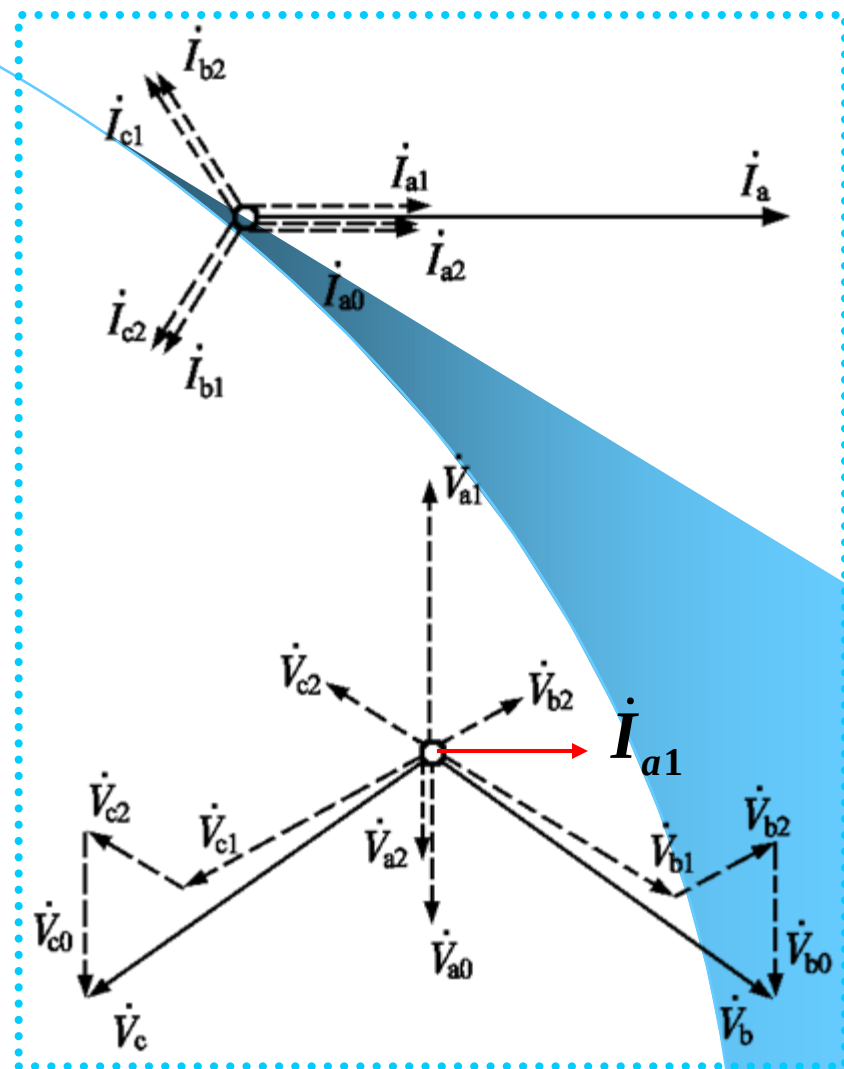


单相接地的短路电流和短路点非故障相电压

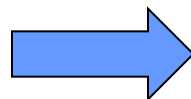
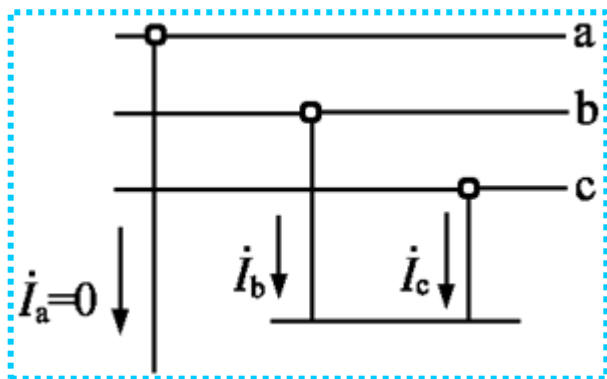
$$\dot{I}_f^{(1)} = \dot{I}_a = \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} = 3\dot{I}_{a1}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_b &= a^2 \dot{V}_{a1} + a \dot{V}_{a2} + \dot{V}_{a0} \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2} [(2X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}) - j\sqrt{3}X_{0\Sigma}] \dot{I}_{a1} \\ \dot{V}_c &= a \dot{V}_{a1} + a^2 \dot{V}_{a2} + \dot{V}_{a0} \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2} [-(2X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}) - j\sqrt{3}X_{0\Sigma}] \dot{I}_{a1} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{a2} = \dot{I}_{a0} = \dot{I}_{a1} &= \frac{\dot{E}_\Sigma}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})} \\ \dot{V}_{a1} &= \dot{E}_\Sigma - jX_{1\Sigma} \dot{I}_{a1} = j(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}) \dot{I}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} &= -jX_{2\Sigma} \dot{I}_{a1} \\ \dot{V}_{a0} &= -jX_{0\Sigma} \dot{I}_{a1} \end{aligned} \right\}$$



二、两相短路

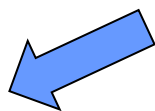


$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= 0 \\ \dot{I}_b + \dot{I}_c &= 0 \\ \dot{V}_b &= \dot{V}_c \end{aligned} \right\}$$

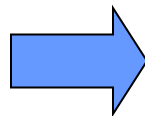


$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} &= 0 \\ a^2 \dot{I}_{a1} + a \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} + a \dot{I}_{a1} + a^2 \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} &= 0 \\ a^2 \dot{V}_{a1} + a \dot{V}_{a2} + \dot{V}_{a0} &= a \dot{V}_{a1} + a^2 \dot{V}_{a2} + \dot{V}_{a0} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{a0} &= 0 \\ \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} &= 0 \\ \dot{V}_{a1} &= \dot{V}_{a2} \end{aligned} \right\}$$



$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_\Sigma - jX_{1\Sigma} \dot{I}_{a1} &= \dot{V}_{a1} \\ -jX_{2\Sigma} \dot{I}_{a2} &= \dot{V}_{a2} \\ -jX_{0\Sigma} \dot{I}_{a0} &= \dot{V}_{a0} \end{aligned} \right\}$$

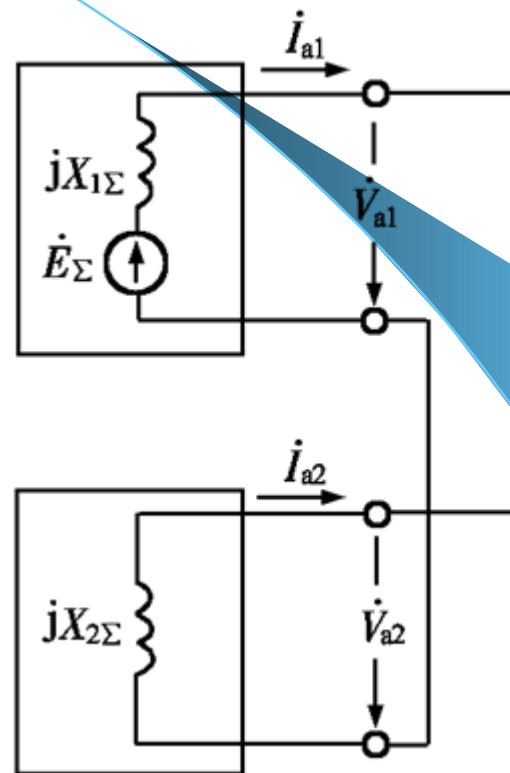
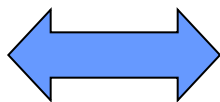


$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{a1} &= \frac{\dot{E}_\Sigma}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma})} \\ \dot{I}_{a2} &= -\dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a0} &= 0 \\ \dot{V}_{a1} = \dot{V}_{a2} &= -jX_{2\Sigma} \dot{I}_{a2} = jX_{2\Sigma} \dot{I}_{a1} \\ \dot{V}_{a0} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

两相短路的复合序网

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{a0} &= 0 \\ \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} &= 0 \\ \dot{V}_{a1} &= \dot{V}_{a2} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{\Sigma} - jX_{1\Sigma} \dot{I}_{a1} &= \dot{V}_{a1} \\ -jX_{2\Sigma} \dot{I}_{a2} &= \dot{V}_{a2} \\ -jX_{0\Sigma} \dot{I}_{a0} &= \dot{V}_{a0} \end{aligned} \right\}$$



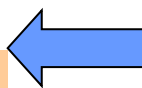
$$\dot{I}_{a1} = \frac{\dot{E}_{\Sigma}}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma})}$$

$$\dot{I}_{a2} = -\dot{I}_{a1}$$

$$\dot{I}_{a0} = 0$$

$$\dot{V}_{a1} = \dot{V}_{a2} = -jX_{2\Sigma} \dot{I}_{a2} = jX_{2\Sigma} \dot{I}_{a1}$$

$$\dot{V}_{a0} = 0$$



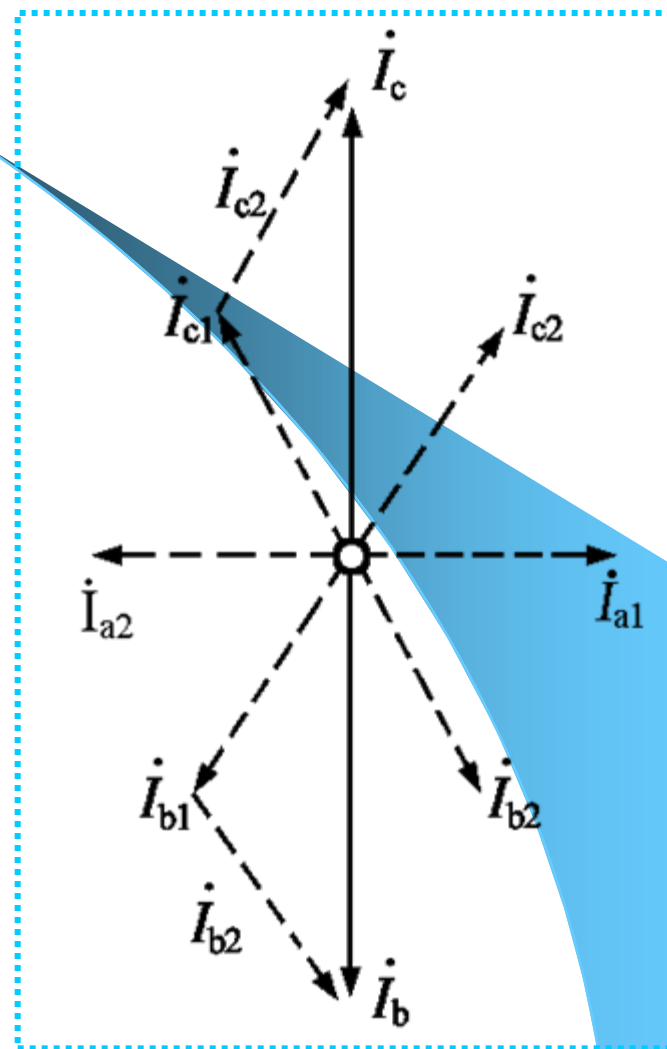
两相短路短路电流

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_b &= a^2 \dot{I}_{a1} + a \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} = (a^2 - a) \dot{I}_{a1} = -j\sqrt{3} \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_c &= -\dot{I}_b = j\sqrt{3} \dot{I}_{a1} \end{aligned} \right\}$$

$$I_f^{(2)} = I_b = I_c = \sqrt{3} I_{a1}$$

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

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{a2} &= -\dot{I}_{a1} \\ \dot{V}_{a1} &= \dot{V}_{a2} = -jX_{2\Sigma} \dot{I}_{a2} = jX_{2\Sigma} \dot{I}_{a1} \end{aligned} \right\}$$

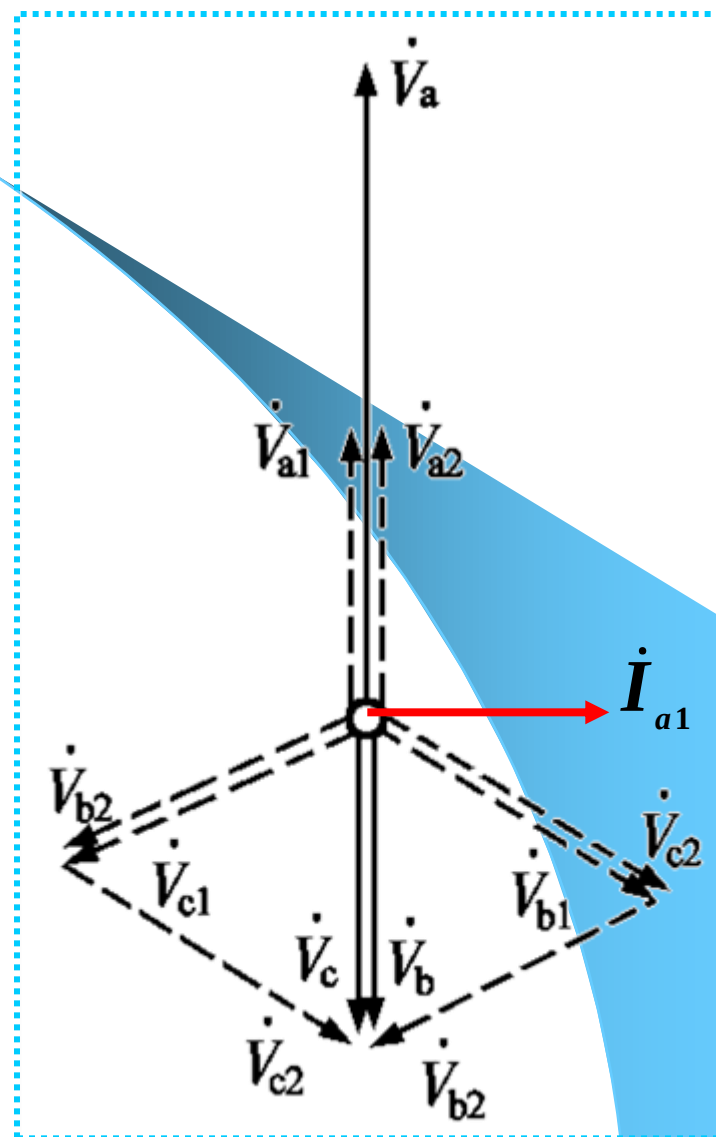


两相短路的电压

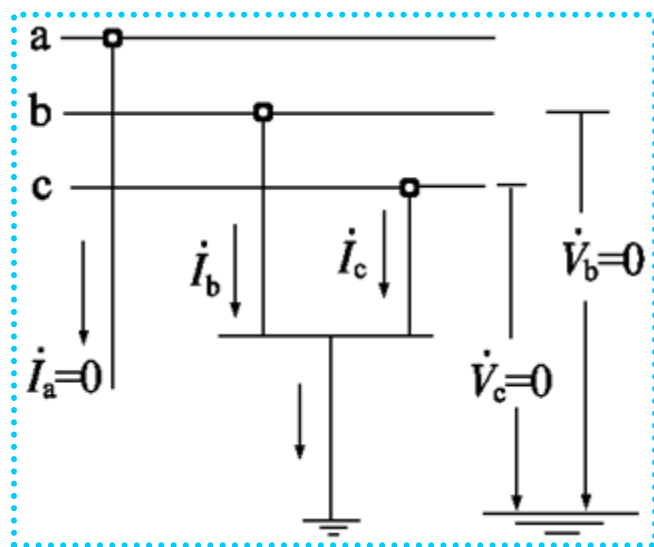
$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_a &= \dot{V}_{a1} + \dot{V}_{a2} + \dot{V}_{a0} = 2\dot{V}_{a1} = j2X_{2\Sigma} \dot{I}_{a1} \\ \dot{V}_b &= a^2 \dot{V}_{a1} + a \dot{V}_{a2} + \dot{V}_{a0} = -\dot{V}_{a1} = -\frac{1}{2} \dot{V}_a \\ \dot{V}_c &= \dot{V}_b = -\dot{V}_{a1} = -\frac{1}{2} \dot{V}_a \end{aligned} \right\}$$

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

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{a2} &= -\dot{I}_{a1} \\ \dot{V}_{a1} &= \dot{V}_{a2} = -jX_{2\Sigma} \dot{I}_{a2} = jX_{2\Sigma} \dot{I}_{a1} \end{aligned} \right\}$$



三、两相短路接地



$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_a &= 0 \\ \dot{I}_b &= 0 \\ \dot{I}_c &= 0 \end{aligned} \right\} \rightarrow$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_{a1} + \dot{V}_{a2} + \dot{V}_{a0} &= 0 \\ \dot{I}_{a1} &= \dot{I}_{a2} = \dot{I}_{a0} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= 0 \\ \dot{V}_b &= 0 \\ \dot{V}_c &= 0 \end{aligned} \right\} \rightarrow$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} &= 0 \\ \dot{V}_{a1} &= \dot{V}_{a2} = \dot{V}_{a0} \end{aligned} \right\}$$

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

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

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

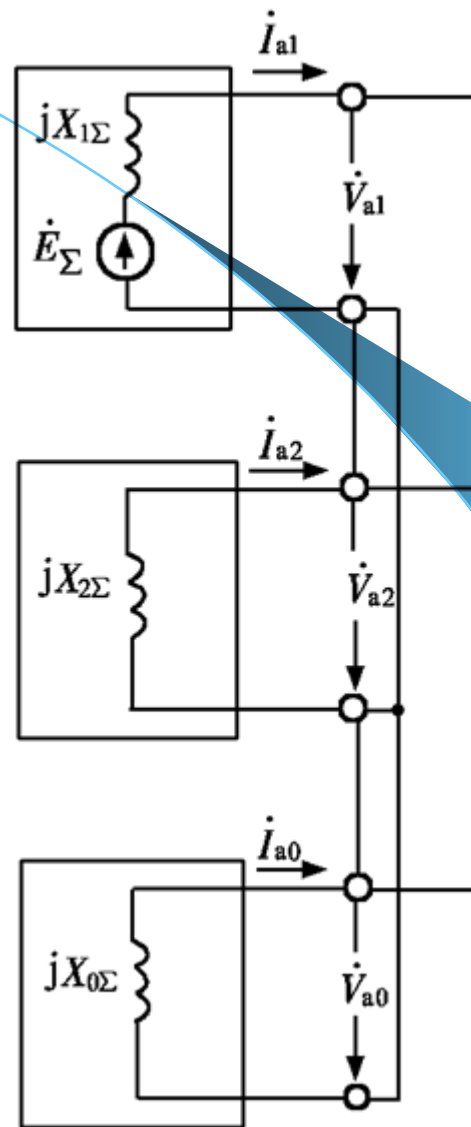
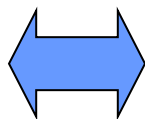
$$\dot{V}_{a1} = \dot{V}_{a2} = \dot{V}_{a0} = j \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \dot{I}_{a1}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_\Sigma - jX_{1\Sigma} \dot{I}_{a1} &= \dot{V}_{a1} \\ -jX_{2\Sigma} \dot{I}_{a2} &= \dot{V}_{a2} \\ -jX_{0\Sigma} \dot{I}_{a0} &= \dot{V}_{a0} \end{aligned} \right\}$$

两相短路接地序网图

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} &= 0 \\ \dot{V}_{a1} &= \dot{V}_{a2} = \dot{V}_{a0} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{E}_{\Sigma} - jX_{1\Sigma} \dot{I}_{a1} &= \dot{V}_{a1} \\ -jX_{2\Sigma} \dot{I}_{a2} &= \dot{V}_{a2} \\ -jX_{0\Sigma} \dot{I}_{a0} &= \dot{V}_{a0} \end{aligned} \right\}$$



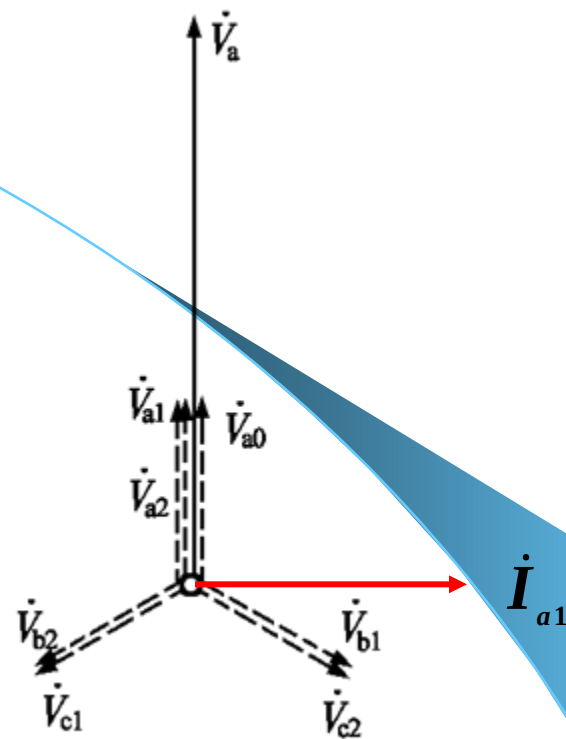
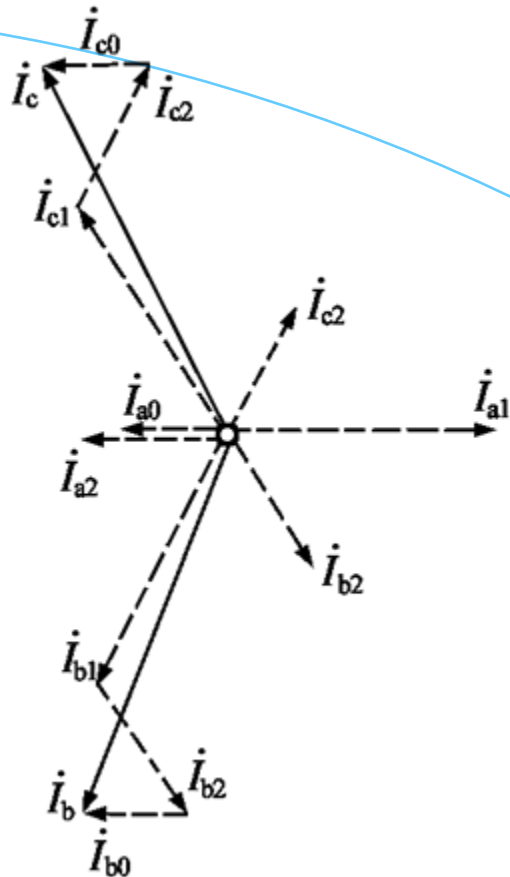
两相短路接地故障相电流

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_b &= a^2 \dot{I}_{a1} + a \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} = \left(a^2 - \frac{X_{2\Sigma} + aX_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \right) \dot{I}_{a1} \\ &= \frac{-3X_{2\Sigma} - j\sqrt{3}(X_{2\Sigma} + 2X_{0\Sigma})}{2(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})} \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_c &= a \dot{I}_{a1} + a^2 \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} = \left(a - \frac{X_{2\Sigma} + a^2 X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \right) \dot{I}_{a1} \\ &= \frac{-3X_{2\Sigma} + j\sqrt{3}(X_{2\Sigma} + 2X_{0\Sigma})}{2(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})} \dot{I}_{a1} \end{aligned} \right\}$$

$$I_f^{(1,1)} = I_b = I_c = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}} I_{a1}$$

$$\dot{V}_a = 3\dot{V}_{a1} = j \frac{3X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \dot{I}_{a1}$$

两相短路接地相量图



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

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

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

$$\dot{V}_{a1} = \dot{V}_{a2} = \dot{V}_{a0} = j \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \dot{I}_{a1}$$

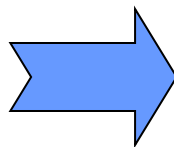
四、正序等效定则

正序分量的计算

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

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

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



$$\dot{I}_{a1} = \frac{\dot{E}_{\Sigma}}{j(X_{1\Sigma} + X_{\Delta}^{(n)})}$$

四、正序等效定则

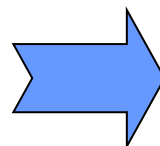
短路电流的计算

$$I_f^{(1)} = 3I_{a1}$$

$$I_f^{(2)} = I_b = I_c = \sqrt{3}I_{a1}$$

$$I_f^{(1,1)} = I_b = I_c$$

$$= \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}} I_{a1}$$



$$I_f^{(n)} = m^{(n)} I_{a1}^{(n)}$$

附加电抗和比例系数

短路类型 $f^{(n)}$	$X_{\Delta}^{(n)}$	$m^{(n)}$
三相短路 $f^{(3)}$	0	1
两相短路接地 $f^{(1,1)}$	$\frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}$	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}}$
两相短路 $f^{(2)}$	$X_{2\Sigma}$	$\sqrt{3}$
单相接地短路 $f^{(1)}$	$X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}$	3

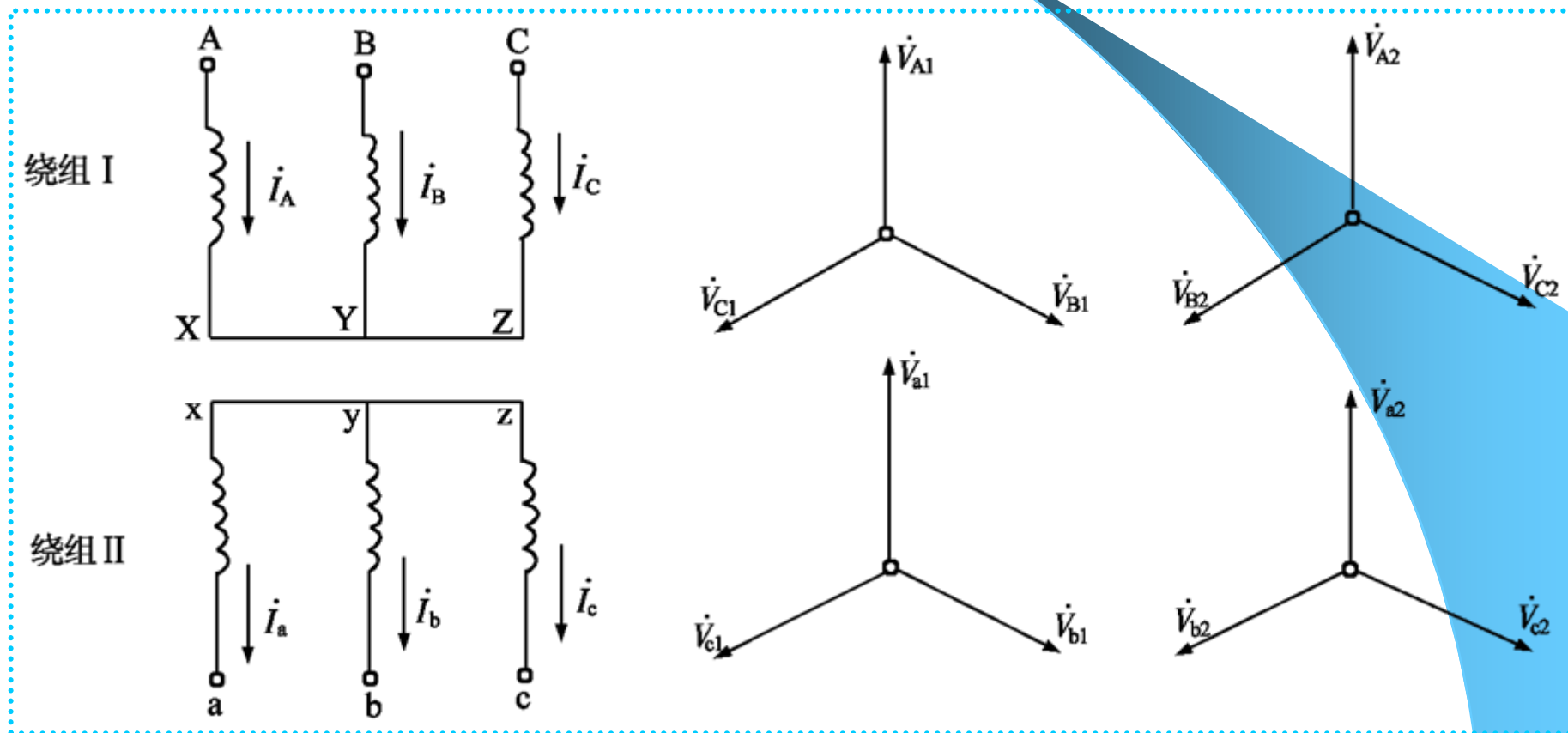
例7-2 7-3

5. 2不对称短路时网络中电流电压的计算

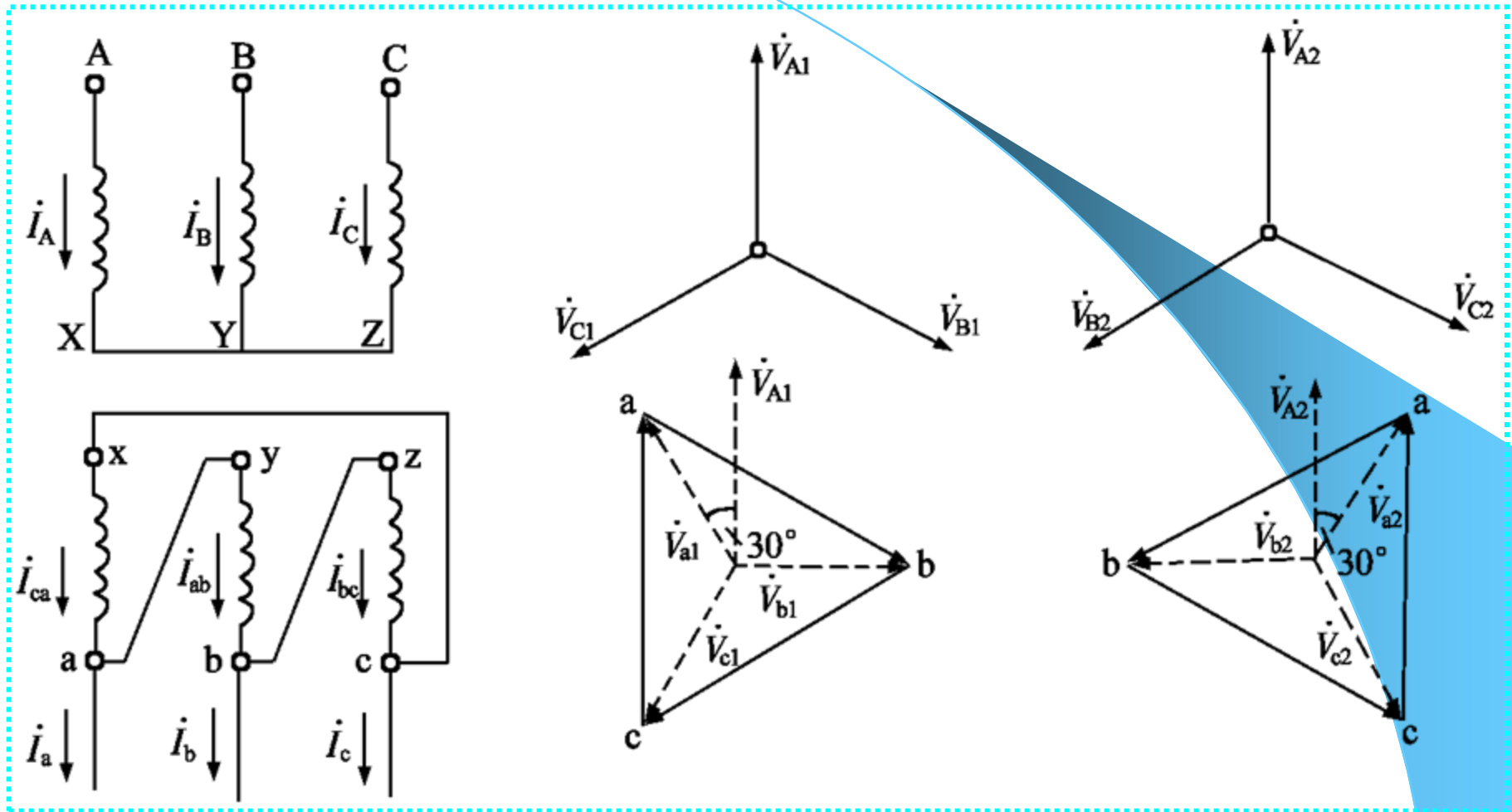
- 电力系统设计运行中，除需要知道故障点的短路电流和电压外，有时还需要知道网络中某些支路电流和节点电压。
- **基本思路：**先求出电流电压的各序分量在网络中的分布，然后将相应的各序分量进行合成求得各相电流和相电压。

一、对称分量经变压器后的相位变化

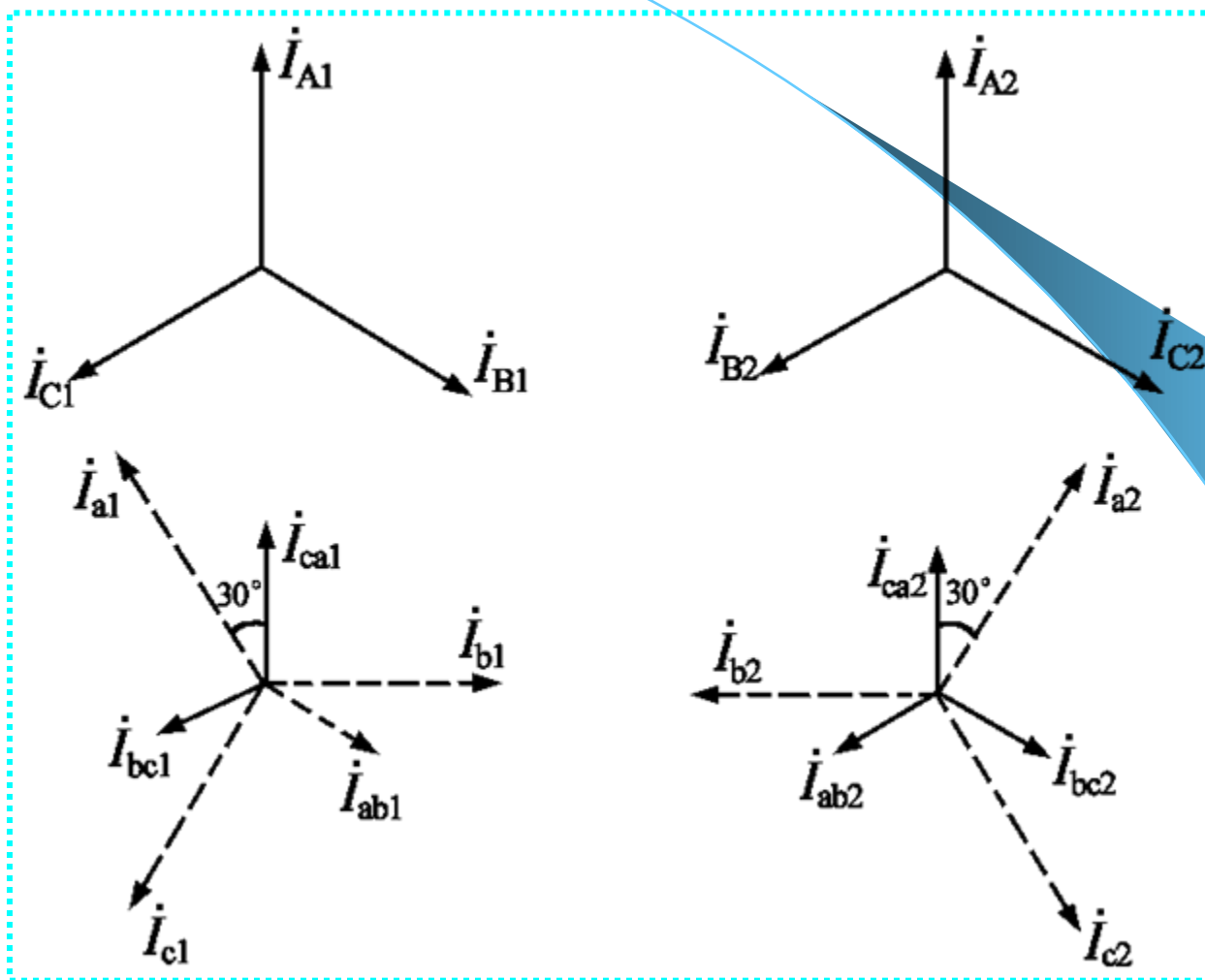
1. Y / Y—12连接的变压器：不发生相位移动。



2. Y / Δ - 11连接的变压器: 移相30°



2. Y / Δ -11连接的变压器



2. Y / Δ —11连接的变压器

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_{a1} &= \dot{V}_{A1} e^{j30^\circ} \\ \dot{V}_{a2} &= \dot{V}_{A2} e^{-j30^\circ} \end{aligned} \right\} \quad \left. \begin{aligned} \dot{I}_{a1} &= \dot{I}_{A1} e^{j30^\circ} \\ \dot{I}_{a2} &= \dot{I}_{A2} e^{-j30^\circ} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} = \dot{I}_{A1} e^{j30^\circ} + \dot{I}_{A2} e^{-j30^\circ} = -j[a\dot{I}_{A1} + a^2(-\dot{I}_{A2})] \\ \dot{I}_b &= a^2 \dot{I}_{a1} + a\dot{I}_{a2} = a^2 \dot{I}_{A1} e^{j30^\circ} + a\dot{I}_{A2} e^{-j30^\circ} = -j[\dot{I}_{A1} + (-\dot{I}_{A2})] \\ \dot{I}_c &= a\dot{I}_{a1} + a^2 \dot{I}_{a2} = a\dot{I}_{A1} e^{j30^\circ} + a^2 \dot{I}_{A2} e^{-j30^\circ} = -j[a^2 \dot{I}_{A1} + a(-\dot{I}_{A2})] \end{aligned} \right\}$$

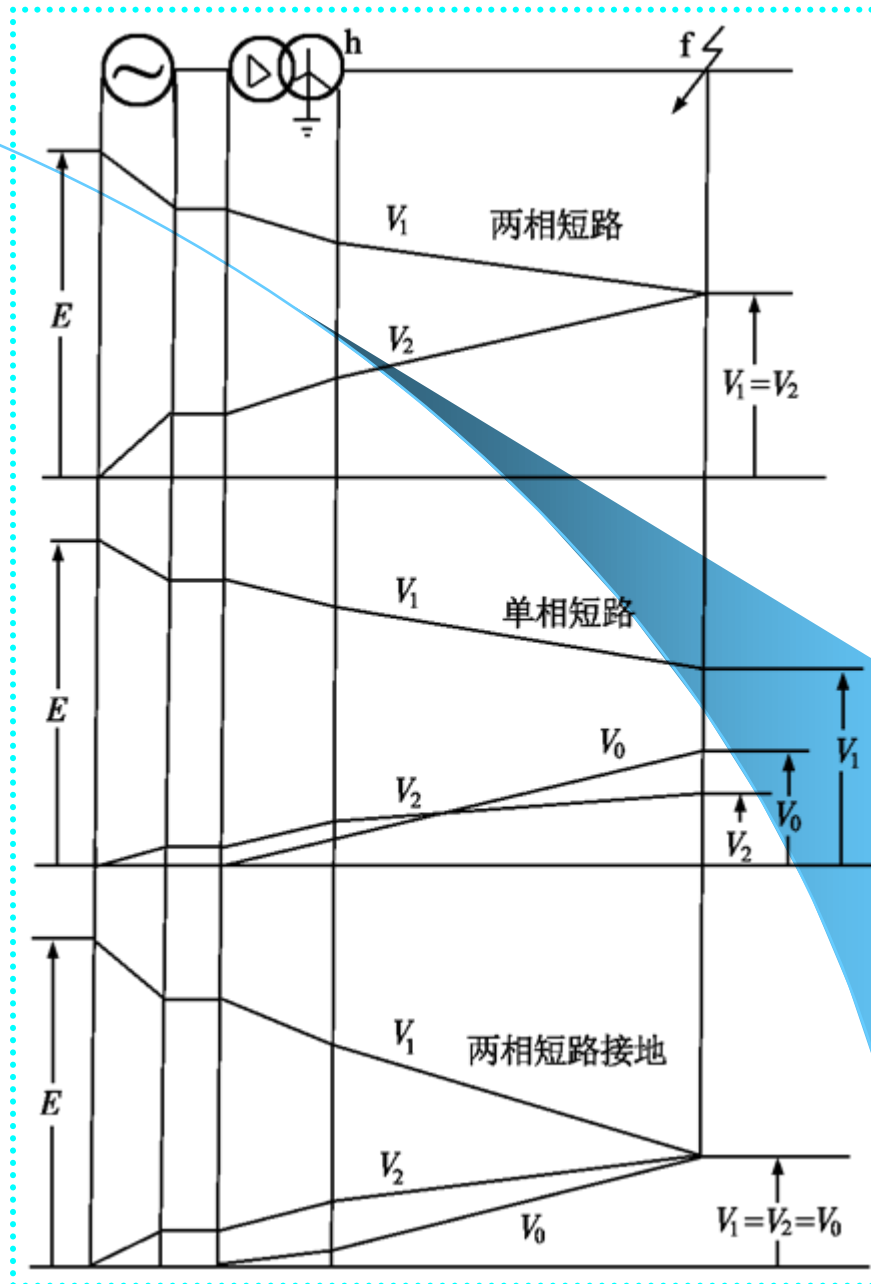
二、网络中电流电压的分布计算

1. 电流分布计算 常用电流分布系数法。

2. 电压分布的计算：

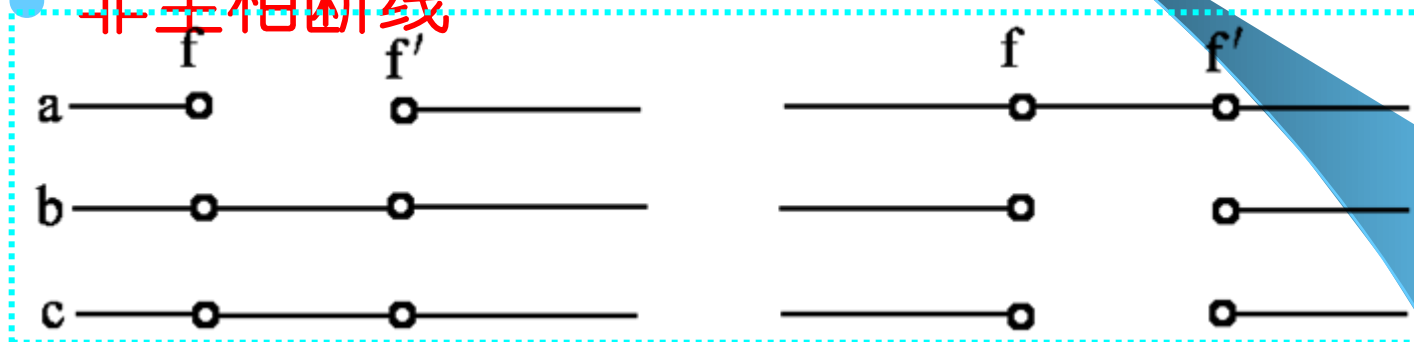
$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_{h1} &= \dot{V}_{f1} + jX_1 \dot{I}_1 \\ \dot{V}_{h2} &= \dot{V}_{f2} + jX_2 \dot{I}_2 \\ \dot{V}_{h0} &= \dot{V}_{f0} + jX_0 \dot{I}_0 \end{aligned} \right\}$$

例7-4



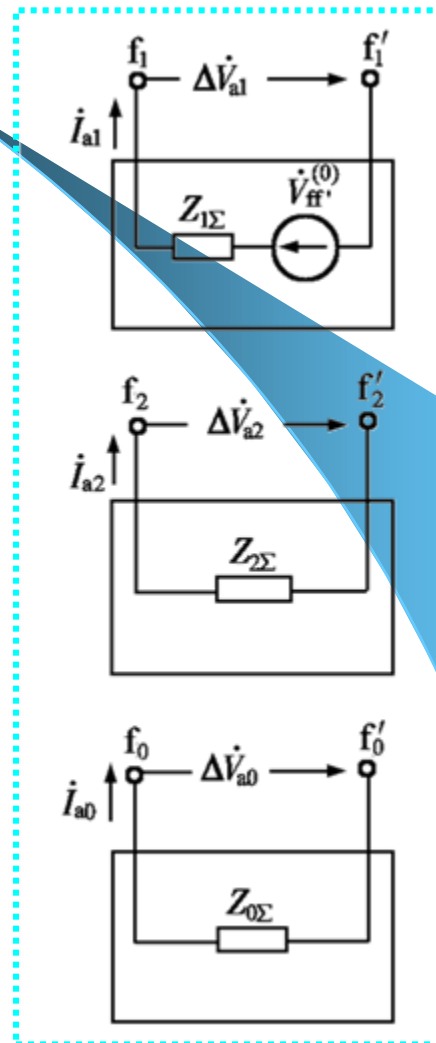
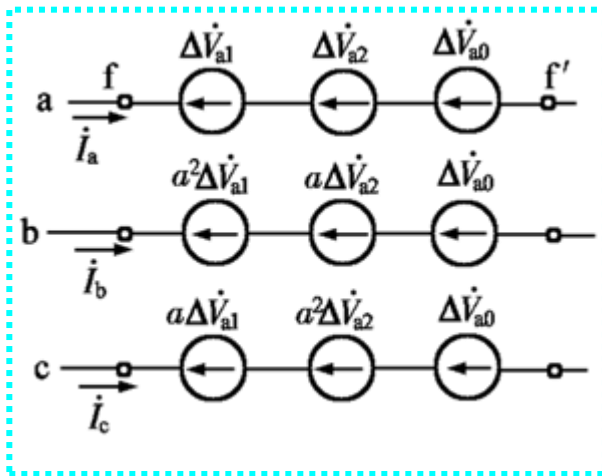
5.3 非全相断线的分析计算

- 非全相断线

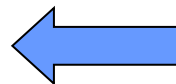


- 横向故障和纵向故障

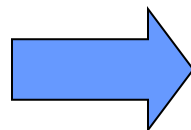
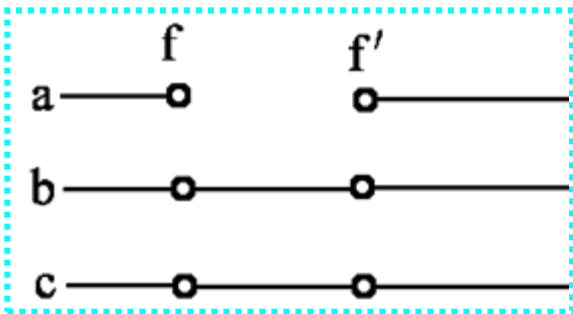
5.3 非全相断线的分析计算



$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_{ff'}^{(0)} - Z_{1\Sigma} \dot{I}_{a1} &= \Delta \dot{V}_{a1} \\ -Z_{2\Sigma} \dot{I}_{a2} &= \Delta \dot{V}_{a2} \\ -Z_{0\Sigma} \dot{I}_{a0} &= \Delta \dot{V}_{a0} \end{aligned} \right\}$$



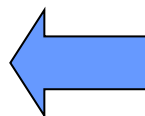
一、单相断开



$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= 0 \\ \Delta \dot{V}_b &= \Delta \dot{V}_c = 0 \end{aligned} \right\}$$



$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} &= 0 \\ \Delta \dot{V}_{a1} &= \Delta \dot{V}_{a2} = \Delta \dot{V}_{a0} \end{aligned} \right\}$$



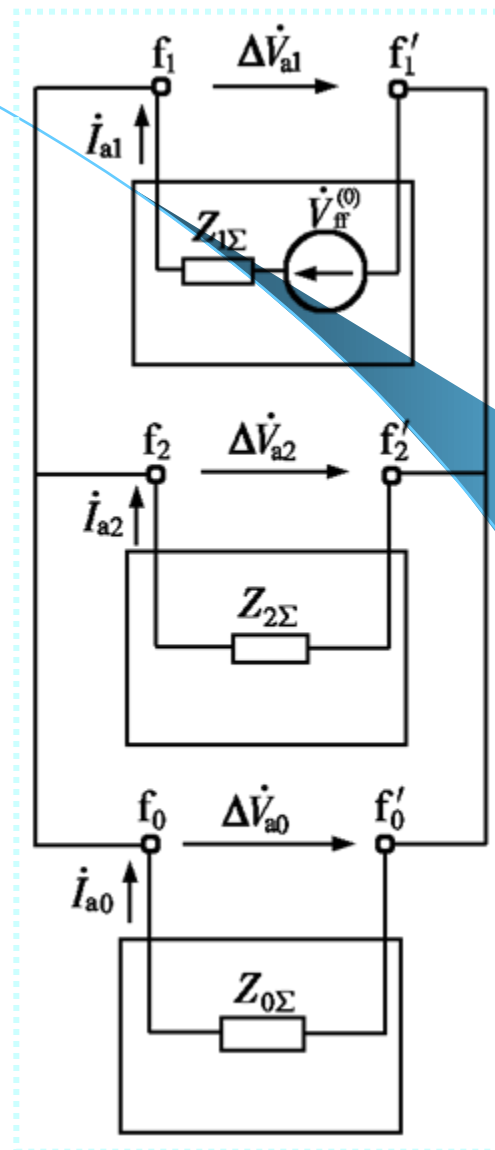
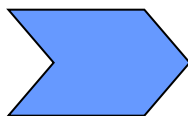
$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_{ff'}^{(0)} - jX_{1\Sigma} \dot{I}_{a1} &= \Delta \dot{V}_{a1} \\ -jX_{2\Sigma} \dot{I}_{a2} &= \Delta \dot{V}_{a2} \\ -jX_{0\Sigma} \dot{I}_{a0} &= \Delta \dot{V}_{a0} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{a1} &= \frac{\dot{V}_{ff'}^{(0)}}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} // X_{0\Sigma})} \\ \dot{I}_{a2} &= -\frac{X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a0} &= -\frac{X_{2\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \dot{I}_{a1} \end{aligned} \right\}$$

单相断开的复合序网

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_{ff'}^{(0)} - Z_{1\Sigma} \dot{I}_{a1} &= \Delta \dot{V}_{a1} \\ -Z_{2\Sigma} \dot{I}_{a2} &= \Delta \dot{V}_{a2} \\ -Z_{0\Sigma} \dot{I}_{a0} &= \Delta \dot{V}_{a0} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} &= 0 \\ \Delta \dot{V}_{a1} = \Delta \dot{V}_{a2} = \Delta \dot{V}_{a0} \end{aligned} \right\}$$



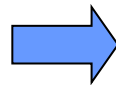
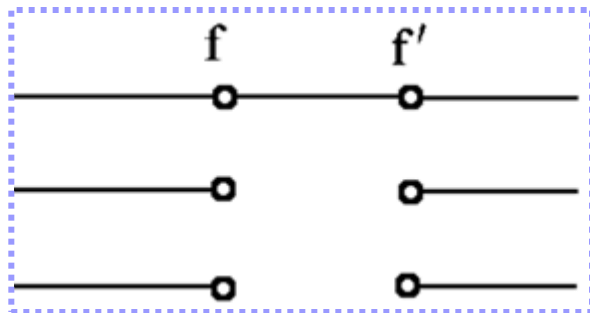
非故障相电流和断口电压

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_b &= \left(a^2 - \frac{X_{2\Sigma} + aX_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \right) \dot{I}_{a1} = \frac{-3X_{2\Sigma} - j\sqrt{3}(X_{2\Sigma} + 2X_{0\Sigma})}{2(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})} \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_c &= \left(a - \frac{X_{2\Sigma} + a^2X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \right) \dot{I}_{a1} = \frac{-3X_{2\Sigma} + j\sqrt{3}(X_{2\Sigma} + 2X_{0\Sigma})}{2(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})} \dot{I}_{a1} \end{aligned} \right\}$$

$$I_b = I_c = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})^2}} I_{a1}$$

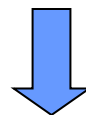
$$\Delta \dot{V}_a = 3\Delta \dot{V}_{a1} = j \frac{3X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}} \dot{I}_{a1}$$

二、两相断开

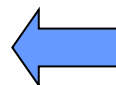


$$\dot{I}_b = \dot{I}_c = 0$$

$$\Delta \dot{V}_a = 0$$



$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{a1} &= \dot{I}_{a2} = \dot{I}_{a0} \\ \Delta V_{a1} + \Delta \dot{V}_{a2} + \Delta \dot{V}_{a0} &= 0 \end{aligned} \right\}$$



$$\dot{I}_{a1} = \dot{I}_{a2} = \dot{I}_{a0}$$

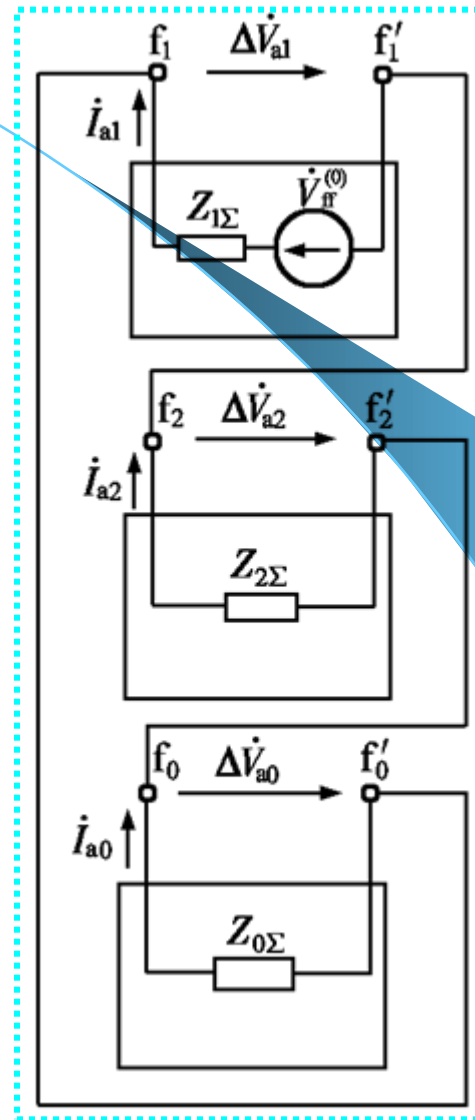
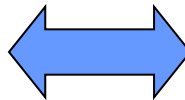
$$= \frac{\dot{V}_{ff'}^{(0)}}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_{ff'}^{(0)} - jX_{1\Sigma} \dot{I}_{a1} &= \Delta \dot{V}_{a1} \\ -jX_{2\Sigma} \dot{I}_{a2} &= \Delta \dot{V}_{a2} \\ -jX_{0\Sigma} \dot{I}_{a0} &= \Delta \dot{V}_{a0} \end{aligned} \right\}$$

两相断开时的复合序网

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{a1} &= \dot{I}_{a2} = \dot{I}_{a0} \\ \Delta \dot{V}_{a1} + \Delta \dot{V}_{a2} + \Delta \dot{V}_{a0} &= 0 \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_{ff'}^{(0)} - jX_{1\Sigma} \dot{I}_{a1} &= \Delta \dot{V}_{a1} \\ -jX_{2\Sigma} \dot{I}_{a2} &= \Delta \dot{V}_{a2} \\ -jX_{0\Sigma} \dot{I}_{a0} &= \Delta \dot{V}_{a0} \end{aligned} \right\}$$



非故障相电流和断口电压

$$\dot{I}_a = 3\dot{I}_{a1}$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta \dot{V}_b &= j[(a^2 - a)X_{2\Sigma} + (a^2 - 1)X_{0\Sigma}] \dot{I}_{a1} \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2}[(2X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})] - j\sqrt{3}X_{0\Sigma} \dot{I}_{a1} \\ \Delta \dot{V}_c &= j[(a - a^2)X_{2\Sigma} + (a - 1)X_{0\Sigma}] \dot{I}_{a1} \\ &= \frac{\sqrt{3}}{2}[-(2X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma})] - j\sqrt{3}X_{0\Sigma} \dot{I}_{a1} \end{aligned} \right\}$$

例7-5

第六章 机组的机电特性

- 第一节 同步发电机组的运动方程式
- 第二节 发电机的功-角特性方程式
- 第三节 异步电动机组的机电特性
- 第四节 自动调节励磁系统对功-角特性的影响

电力系统的稳定性：

概念 → 电力系统在受到一定的扰动后能否继续运行的能力。

按扰动大小分类 → 静态稳定性和暂态稳定性。

考虑自动调节
励磁系统和自
动调节转速系
统作用的分类

电源的稳定性，指同步发电机组运行的稳定性

负荷的稳定性，指异步电动机组运行的稳定性

电力系统稳定性主要是研究同步发电机组的稳定性。

第一节 同步发电机组的运动方程式

(一)、机械转矩方程式

同步发电机组转子运动的机械转矩方程式为

$$\Delta M = J\alpha = J \frac{d\Omega}{dt} = J \frac{d^2\Theta}{dt^2} \quad (9-1)$$

当忽略转子转动时的风阻和摩擦力时, ΔM 为:

$$\Delta M = M_m - M_e \quad (9-2)$$

机械转
矩, 属
于驱动
转矩

电磁转
矩, 属
于制动
转矩

(二)、同步发电机组的基本方程式

$$\Delta M = J \frac{d^2 \Theta}{dt^2} = J \frac{\Omega_N}{\omega_N} \times \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad (9-3)$$

其标么值形式为

$$\Delta M_* = \frac{T_J}{\omega_N} \times \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad (9-4)$$

惯性
时间
常数

其中 $T_J = J\omega_N^2 / S_B$

若机组的转速偏离同步转速不大，则不平衡转矩的标么值近似等于不平衡功率的标么值。

$$\text{即: } \Delta P_* \approx \Delta M_* = \frac{T_J}{\omega_n} \times \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{T_J}{\omega_n} \times \frac{d\omega}{dt} = T_J \times \frac{d\omega_*}{dt} \quad (9-5)$$

（三）、将同步发电机组运动方程式化为全标么值形式

$$\begin{aligned}\Delta P_* &\approx \frac{1}{360^\circ f_N} \times \frac{T_J(\text{rad})}{\omega_N(\text{rad/s})} \times \frac{d}{d \frac{t(\text{rad})}{\omega_n(\text{rad/s})}} \times \frac{d\delta(\text{rad}) \frac{360^\circ f_N}{\omega_n(\text{rad/s})}}{d \frac{t(\text{rad})}{\omega_n(\text{rad/s})}} \\ &= T_J(\text{rad}) \frac{d^2 \delta(\text{rad})}{dt^2 (\text{rad})^2}\end{aligned}\quad (9-6)$$

简写为

$$\Delta P_* \approx T_J \frac{d^2 \delta}{dt^2} \quad (9-7)$$

上式即为全标么值形式的同步发电机组转子的运动方程式。

（四）、惯性时间常数 T_J 及其物理意义

物理意义1：在额定转速时， T_J 是机组单位容量所具有动能的2倍。这反映了发电机组转子在额定转速时的机械转动的惯性。

物理意义2：当机组输出的电磁转矩 $M_e = 0$ ，输入的机械转矩 $M_m = 1$ ，则不平衡转矩 $\Delta M_* = 1 - 0 = 1$ 时，机组从静止升速至额定转速所需的时间。

由回转力矩求单位机组的惯性时间常数的计算公式为

$$T_{JN} = \frac{2.74GD^2 n_N^2}{1000S_N} \quad (9-8)$$

式中， GD^2 为包括原动机在内的机组转子的回转力矩； n_N 为机组的额定转速； S_N 为机组的额定功率。

在电力系统稳定计算中，当已选好全系统统一基准功率时，必须将各发电机组的惯性时间常数归算成统一基准功率的有名值

$$T_{JB} = T_{JN} \frac{S_N}{S_B} \quad (9-9)$$

则将 n 台并列运行的发电机组合成一台的等值发电机组时，其惯性时间常数为：

$$T_{JB\Sigma} = T_{JN1} \frac{S_{N1}}{S_B} + T_{JN2} \frac{S_{N2}}{S_B} + \cdots + T_{JNn} \frac{S_{Nn}}{S_B} = \sum_{i=1}^n T_{JNi} \frac{S_{Ni}}{S_B} \quad (9-10)$$

一般，汽轮发电机组的惯性时间常数为 $8 \sim 16s$ ；水轮发电机组的惯性时间常数为 $4 \sim 8s$ ；同期调相机的惯性时间常数为 $2 \sim 4s$ 。

第二节 发电机的功-角特性方程式

发电机的功-角特性：发电机输出的电磁功率和功率角的关系。

一、隐极式发电机的功-角特性方程式

1. 以空载电动势 E_q 和同步电抗 X_d 表示发电机时
发电机输出的有功功率的表达式为

$$P_{E_q} = U_d \frac{E_q - U_q}{X_d} + U_q \frac{U_d}{X_d} = \frac{E_q U_d}{X_d} = \frac{E_q U}{X_d} \sin \delta \quad (9-11)$$

发电机输出的无功功率的表达式为

$$Q_{E_q} = U_q \frac{E_q - U_q}{X_d} - U_d \frac{U_d}{X_d} = -\frac{U^2}{X_d} + \frac{E_q U}{X_d} \cos \delta \quad (9-12)$$

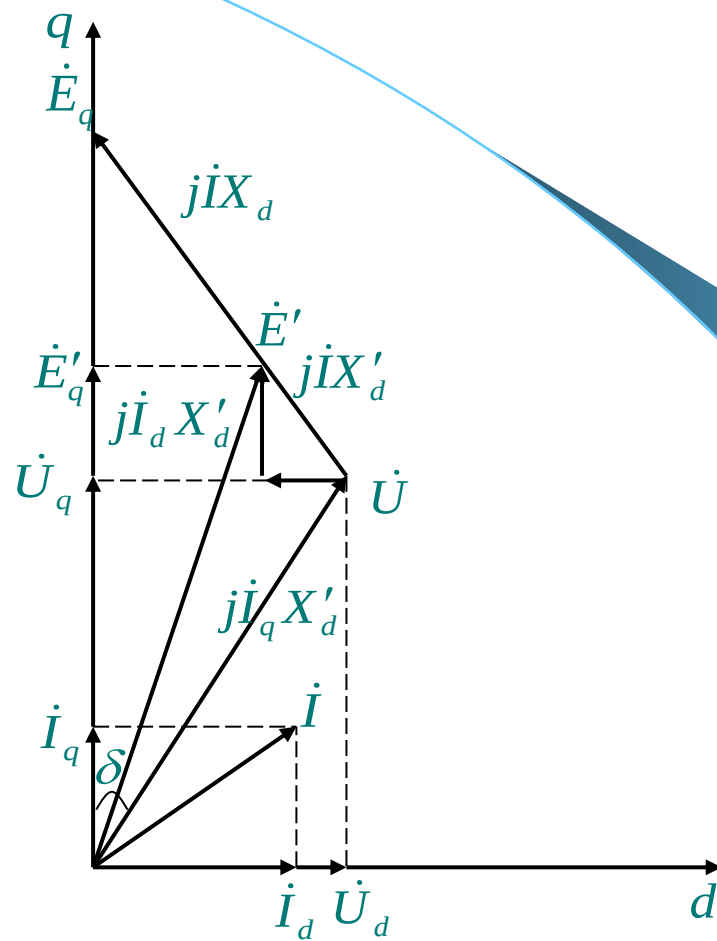


图9-1 隐极式发电机相量图

若发电机与无限大容量母线相连，则其功-角特性曲线，如下图所示：

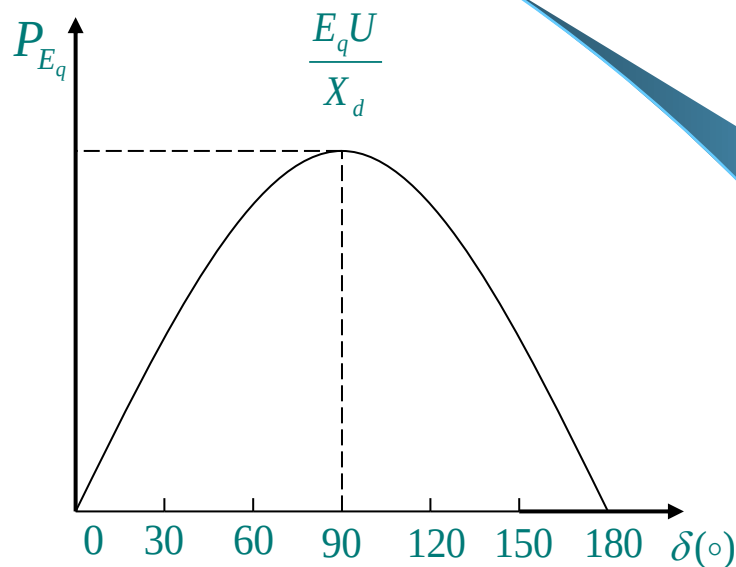


图9-2 以 E_q 表示的隐极式发电机的功-角特性曲线

由图可见，发电机有功功率的功-角特性曲线为一正弦曲线，其最大值为 $\frac{E_q U}{X_d}$ ，也称为功率极限。

2. 以交轴暂态电动势 E'_q 和直轴暂态电抗 X'_d 表示发电机时

发电机输出的有功功率的表达式为

$$\begin{aligned} P_{E'_q} &= U_d I_d + U_q I_q = U_d \frac{E'_q - U_q}{X'_d} + U_q \frac{U_d}{X_d} \\ &= \frac{E'_q U_d}{X'_d} \sin \delta - \frac{U^2}{2} \left(\frac{X_d - X'_d}{X_d X'_d} \right) \sin 2\delta \end{aligned} \quad (9-13)$$

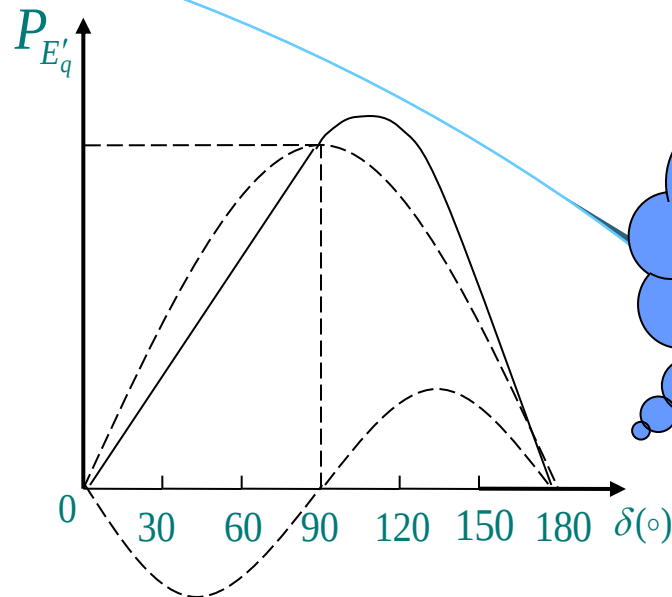


图9-3 以 E'_q 表示的隐极式发电机的功-角特性曲线

当发电机与无限大容量母线相连时，其功-角特性曲线如上图所示。由图可见，由于直轴暂态电抗和其同步电抗不等，出现了一个按2倍功率角正弦 $\sin 2\delta$ 变化的功率分量，一般称暂态磁阻功率。

为便于计算，可作如下的简化：

$$P'_E = \frac{E'U}{X'_d} \sin \delta' \quad (9-14)$$

二、凸极式发电机的功-角特性方程式

1. 以空载电动势 E_q 和同步电抗 X_d 、 X_q 表示发电机输出的有功功率的表达式为

$$\begin{aligned} P_{E_q} &= U_d I_d + U_q U_q = \frac{E_q U_d}{X_d} + U_d U_q \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \\ &= \frac{E_q U}{X_d} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \times \frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \sin 2\delta \end{aligned} \quad (9-15)$$

当无自动调节励磁装置的发电机与无限大容量母线相连时，其功-角特性曲线如下图所示。

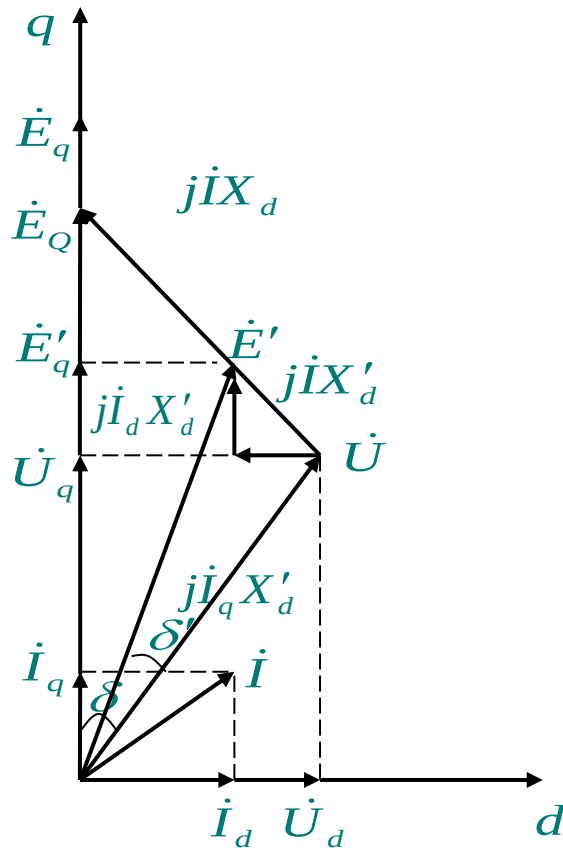


图9-4 凸极式发电机相量图

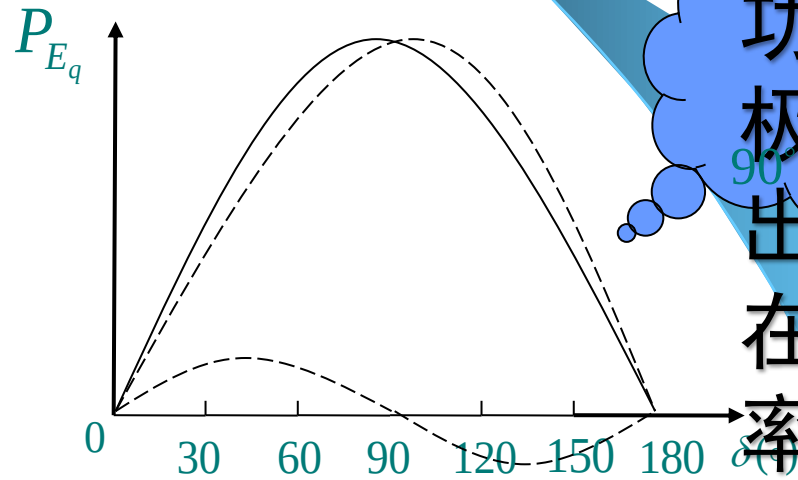


图9-5 以 E_q 表示的凸极式发电机的有功功率的功-角特性曲线

功率极限出现在功率角小于 90° 处

有功功率的功-角特性方程式的简化方案有两种：

其一：以发电机的交轴同步电抗和这个电抗后的虚构

E_Q 电动势 表示发电机；

其二：以其等值同步电抗 X_f 和这个电抗后的等值电动

E_f 势 表示发电机。

与这两个简化方案相对应的方程式如下：

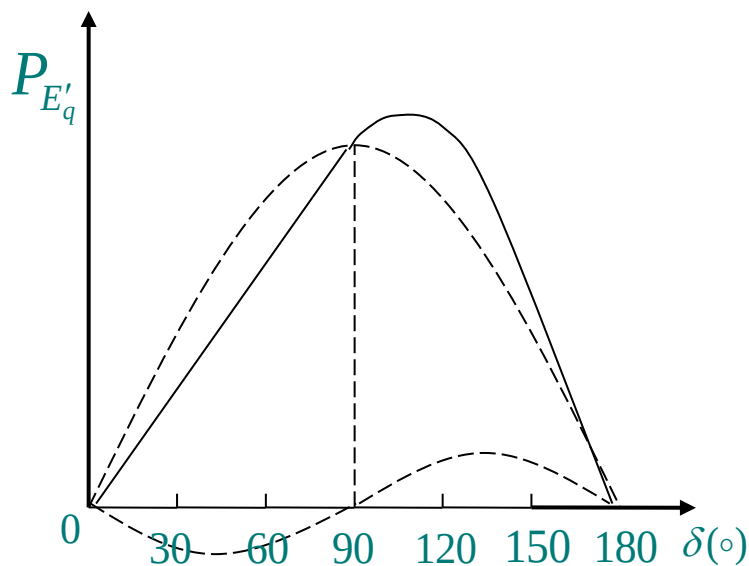
$$P_{E_Q} = \frac{E_Q U}{X_q} \sin \delta \quad (9-16)$$

$$P_{E_f} = \frac{E_f U}{X_f} \sin \delta_f \quad (9-17)$$

式中，等值同步电抗 $X_f = 0.85 X_d$ 。

2. 以交轴暂态电动势 E'_q 和直轴暂态电抗 X'_d 表示发电机

$$P_{E'_q} = \frac{E'_q U}{X'_d} \sin \delta - \frac{U^2}{2} \times \frac{X_q - X'_d}{X_q X'_d} \sin 2\delta \quad (9-18)$$



当发电机与无限大容量母线相连时，其功-角特性曲线如左图所示。由图可见，这时也出现了暂态磁阻功率分量。但其最大值往往小于隐极式发电机相应分量的最大值。

图9-6 以 E'_q 为表示的凸极式发电机的有功功率的功-角特性曲线

三、多机系统中发电机的功-角特性方程式

将整个系统简化为N网络，该网络除了保留发电机节点以外，已消除了网络中全部联络节点。

任一发电机 i 输出的有功功率为

$$\begin{aligned} P_{Ei} &= \operatorname{Re}(\dot{E}_i \dot{I}_i^*) = \operatorname{Re}\left(\dot{E}_i \sum_{j=1}^n \dot{E}_j^* \dot{Y}_{ij}^*\right) = \dot{E}_i \sum_{j=1}^n E_j (G_{ij} \cos \delta_{ij} - B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ &= E_i^2 G_{ii} + E_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_j (-g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ &= E_i^2 g_{ii} + E_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_j \left(-\frac{r_{ij}}{|Z_{ij}|^2} \cos \delta_{ij} + \frac{x_{ij}}{|Z_{ij}|^2} \sin \delta_{ij}\right) \\ &= E_i^2 |y_{ii}| \sin \alpha_{ii} + E_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_j |y_{ij}| \sin(\delta_{ij} - \alpha_{ij}) \end{aligned} \quad (9-19)$$

式（9-19）表明，任一发电机发出的有功功率是该发电机电动势相对于其它发电机电动势相量的相角差函数。

在系统含有三台及以上发电机的情况下，不能再用曲线作出发电机的功角特性。

对于系统有两台机的情形，其功率表达式为：

$$\left. \begin{aligned} P_{E1} &= E_1^2 |y_{11}| \sin \alpha_{11} + E_1 E_2 |y_{12}| \sin(\delta_{12} - \alpha_{12}) \\ P_{E2} &= E_2^2 |y_{22}| \sin \alpha_{22} + E_2 E_1 |y_{21}| \sin(\delta_{21} - \alpha_{21}) \\ &= E_2^2 |y_{22}| \sin \alpha_{22} - E_1 E_2 |y_{12}| \sin(\delta_{12} + \alpha_{12}) \end{aligned} \right\} \quad (9-20)$$

当发电机电动势 E_1 、 E_2 一定，且系统接线不变时，其功角特性曲线如下图所示。

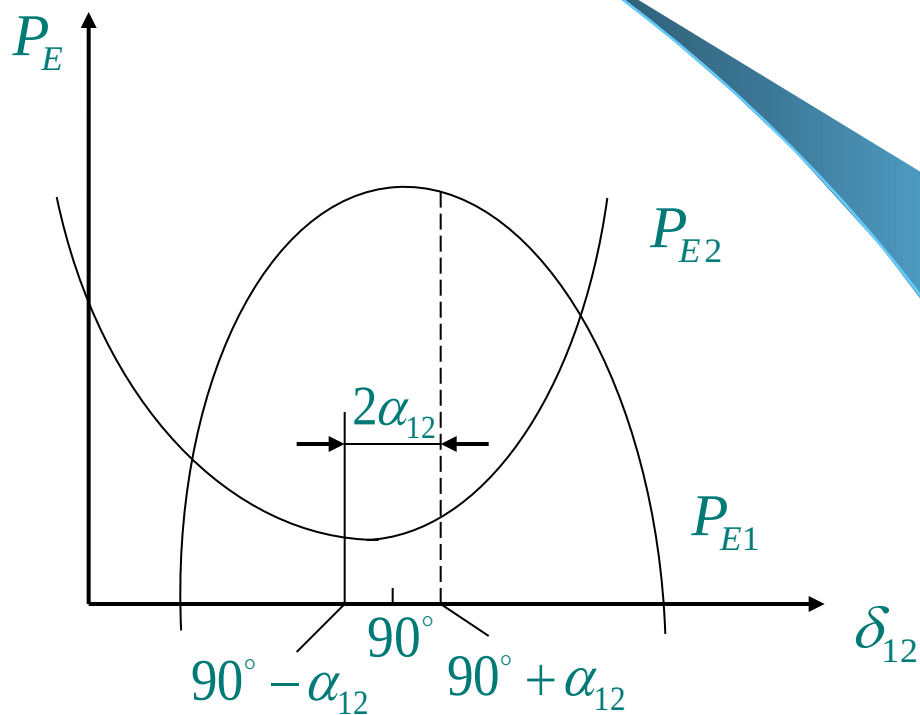


图9-7 两机系统有功功率的功-角特性曲线

四、网络接线及参数对有功功率功-角特性的影响

1. 串联电抗的影响

电力系统接线及其等值电路如图9-8所示

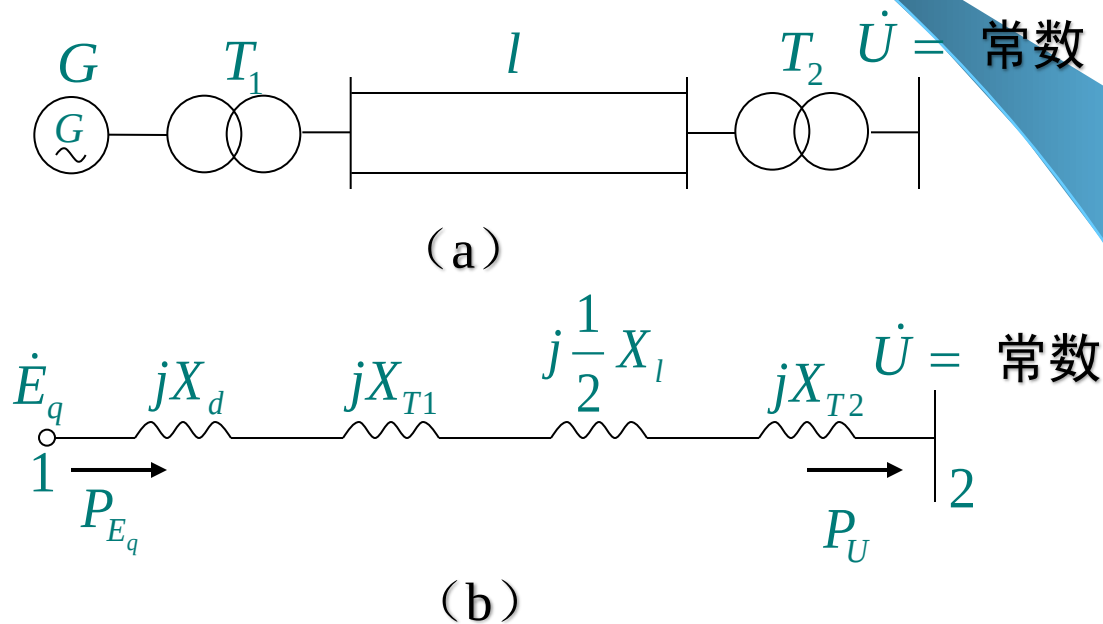


图9-8 (a) 电力系统接线图; (b) 等值电路

发电机输出的有功功率为

$$P_{E_q} = P_U = E_q U |y| \sin \delta = \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta \quad (9-21)$$

发电机端串联电抗与无限大容量母线相连时，功率极限下降了，且 $P_{E_q.\max}$ 的大小与 $X_{d\Sigma}$ 成反比。其功角特性曲线如下图所示。

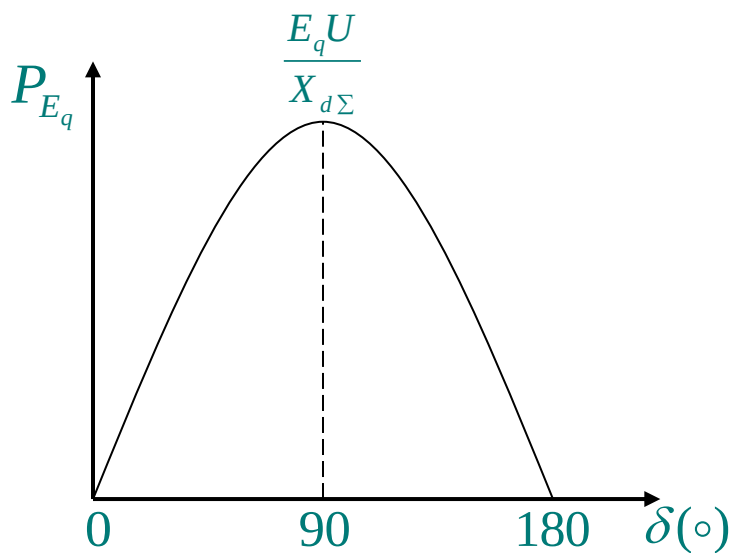


图9-9 串联电抗时有功功率的功-角特性曲线

2. 串联电阻的影响

电力系统接线及其等值电路如图9-10所示。设发电机为隐极机， $X_q = X_d$ ， $E_Q = E_q$ ，且无自动调节励磁装置。

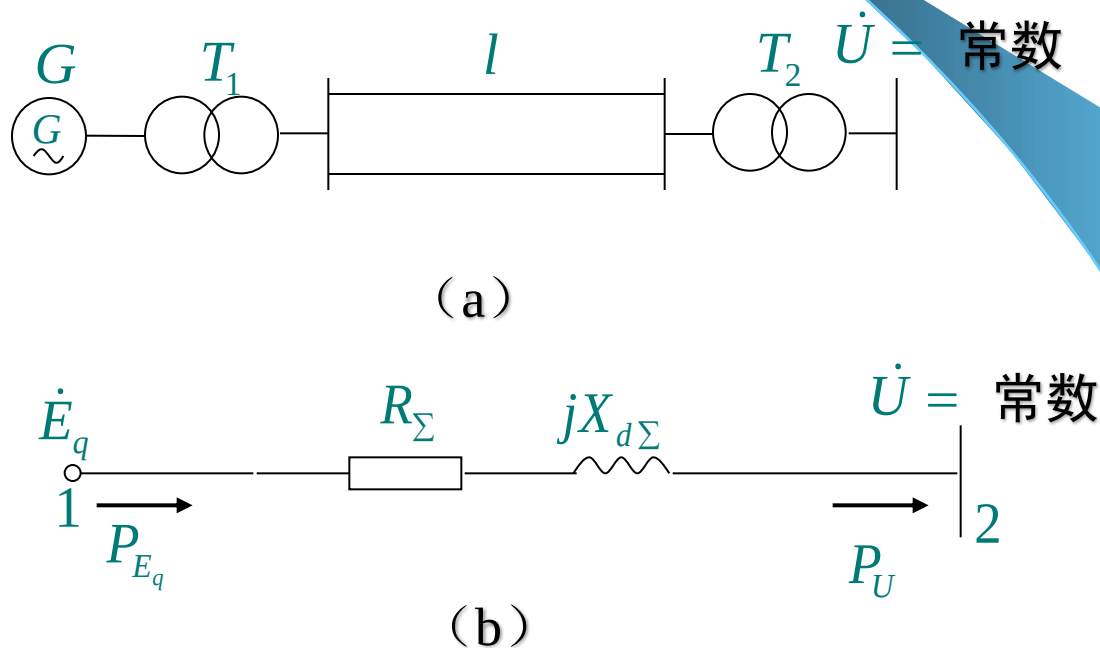


图9-10 (a) 电力系统接线图； (b) 等值电路

则由图9-10和式（9-20）可求得

$$\left. \begin{aligned} P_{E_q} &= E_q^2 |y| \sin \alpha + E_q U |y| \sin(\delta - \alpha) \\ P_U &= -U^2 |y| \sin \alpha + E_q U |y| \sin(\delta + \alpha) \end{aligned} \right\} \quad (9-22)$$

串联电阻对功-角特性的影响，如图9-11所示。

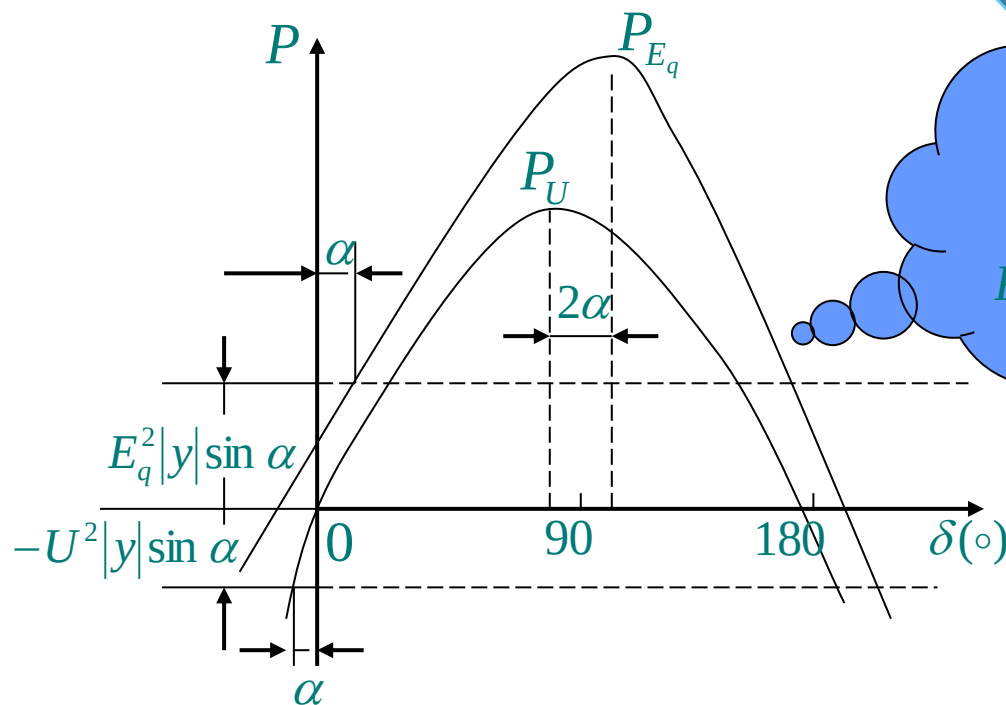


图9-11 串联电阻时有功功率的功-角特性曲线

两条曲线在同值

下的差值为串联电阻

消耗的功率

3. 并联电阻的影响

电力系统接线及其等值电路如图9-12所示，设发电机为隐极式，且无自动调节励磁装置。

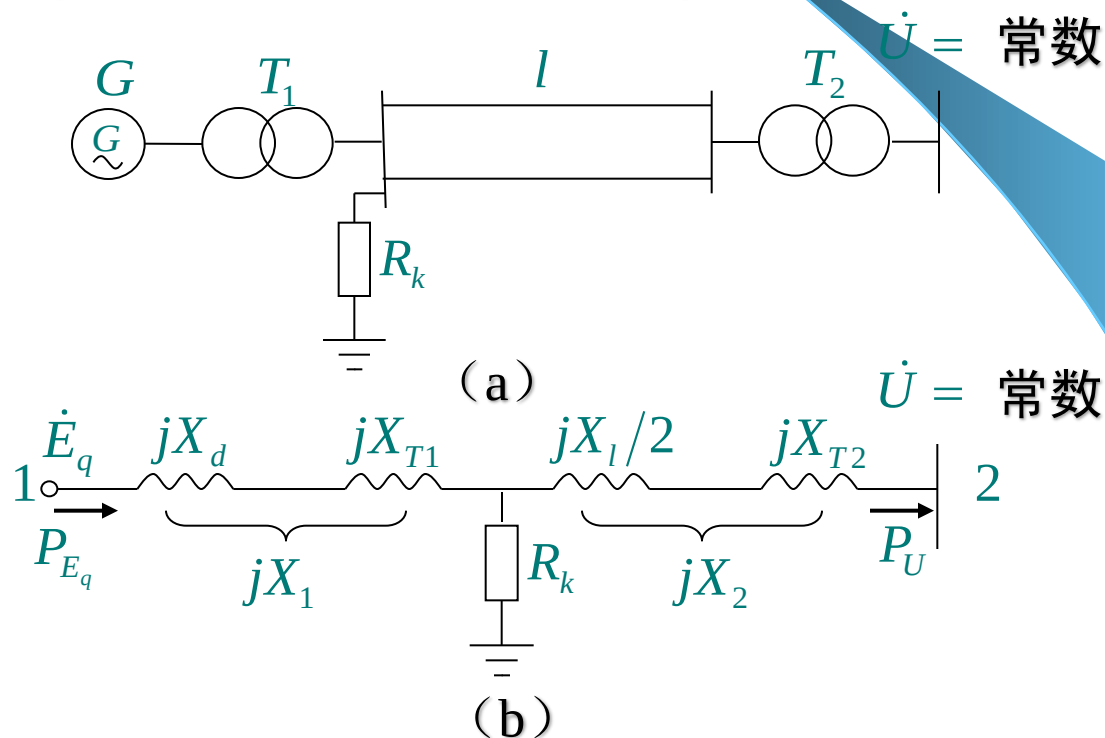
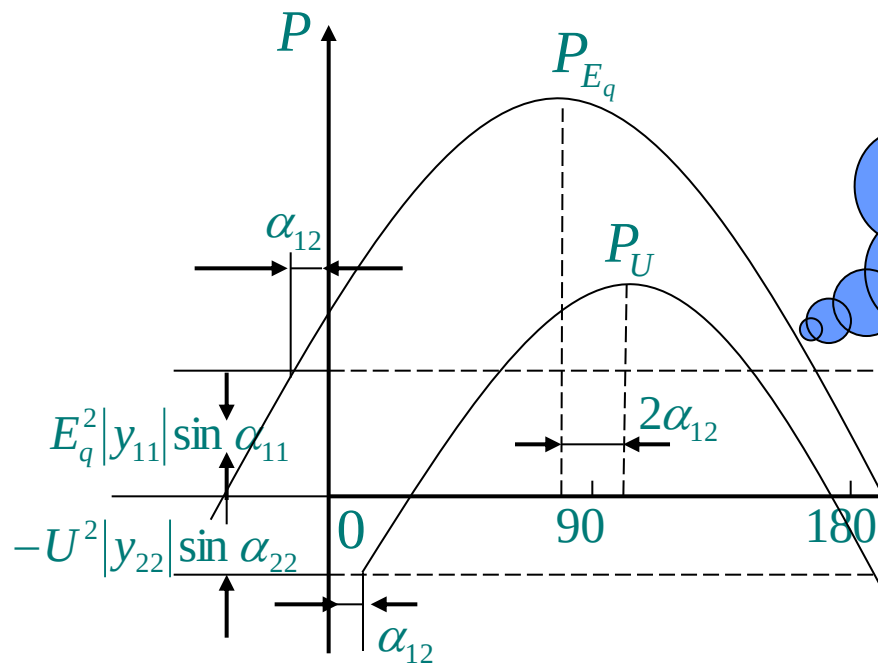


图9-12 (a) 电力系统接线图； (b) 等值电路

则由图9-12和式（9-20）可求得

$$\begin{cases} P_{E_q} = E_q^2 |y_{11}| \sin \alpha_{11} + E_q U |y_{12}| \sin(\delta - \alpha_{12}) \\ P_U = -U^2 |y_{22}| \sin \alpha_{22} + E_q U |y_{21}| \sin(\delta + \alpha_{12}) \end{cases} \quad (9-23)$$

并联电阻对功-角特性的影响，如图9-13所示。



同一值下的
与的
差值为
并联电
阻消耗
的功率

图9-13 并联电阻时有功功率的功-角特性曲线

接入并联电阻后发电机的功率极限为

$$P_{E_q, \max} = E_q^2 |y_{11}| \sin \alpha_{11} + E_q U |y_{12}| \quad (9-24)$$

4. 并联电抗的影响

电力系统接线及其等值电路如图9-14所示

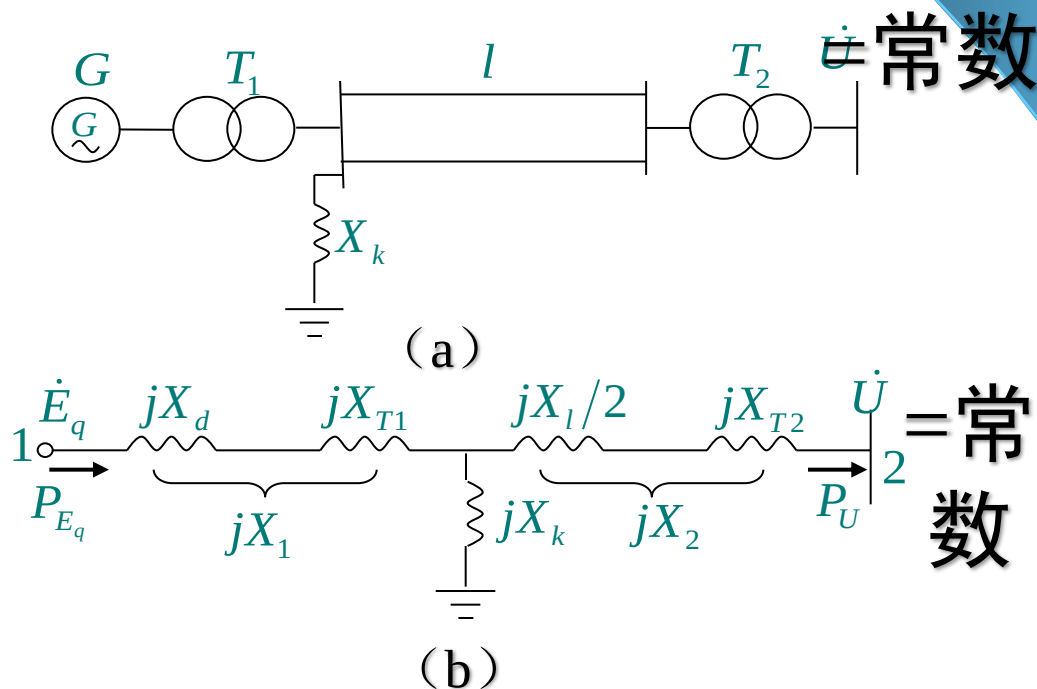


图9-14 (a) 电力系统接线图; (b) 等值电路

则由图9-14和式（9-23）可求得

或

$$\left. \begin{aligned} P_{E_q} &= P_U = E_q U |y_{12}| \sin \delta \\ P_{E_q} &= P_U = \frac{E_q U}{x_{12}} \sin \delta \end{aligned} \right\} \quad (9-25)$$

并联电抗对功-角特性的影响，如图9-15所示。

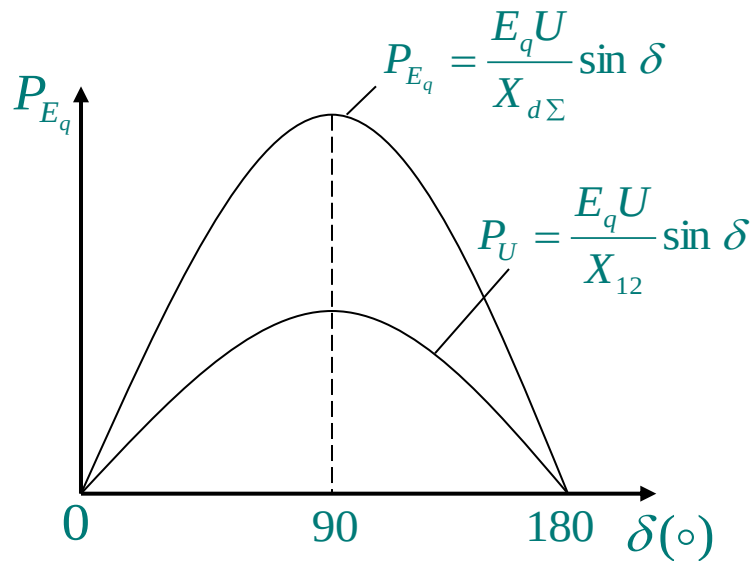


图9-15 并联电抗时有功功率的功-角特性曲线

五、关于同步发电机的等值电路

对于隐极式发电机，只有以空载电动势 E_q 和同步电抗 $X_d = X_q$ 或以直轴暂态电抗后的电动势 E' 和直轴暂态电抗 X'_d 表示发电机时，才能绘出其等值电路，如图9-16(a)所示。

对于凸极式发电机，只有以虚构电动势 E_Q 和交轴同步电抗 X_q 、以等值空载电动势 E_f 和等值同步电抗 X_f 或以直轴暂态电抗后的电动势 E' 和直轴暂态电抗 X'_d 表示发电机时，才能绘出其等值电路，如图9-16(b)所示。

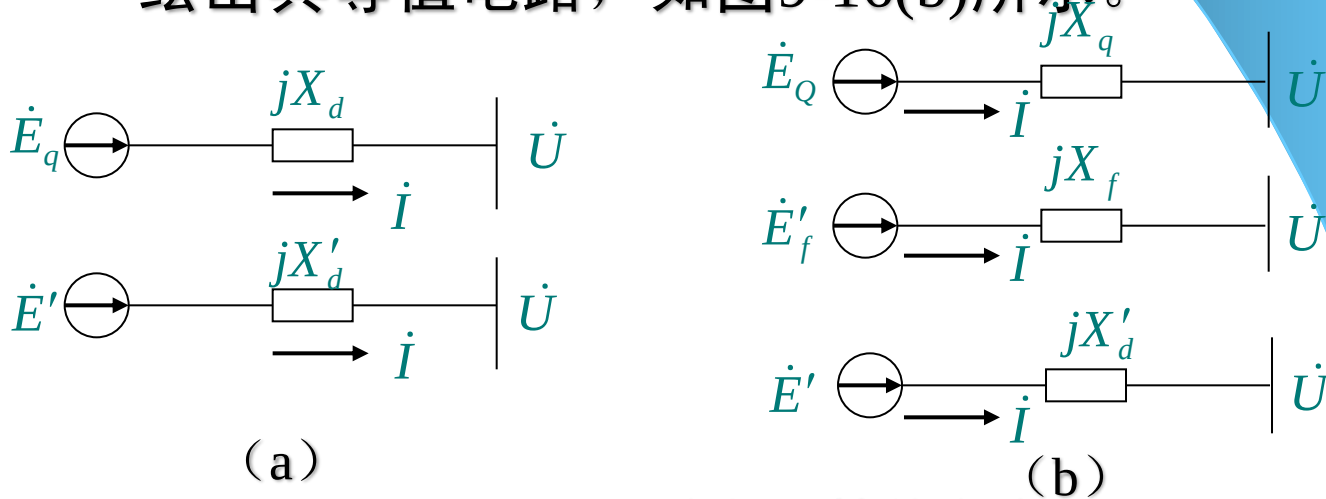


图9-16 发电机的等值电路

(a) 隐极式发电机； (b) 凸极式发电机

第三节 异步电动机的机电特性

一、异步电动机组的运动方程式

和同步发电机组一样，其表达式为

$$\Delta M_* = T_J \frac{d\omega_*}{dt} \quad (9-26)$$

习惯上，对异步电动机组的转速标么值常表示为

$$\omega_* = \frac{\omega}{\omega_N} = 1 - \frac{\omega_N - \omega}{\omega_N} = 1 - s \quad (9-27)$$

其中， s 为以标么值表示的转差率。则

$$\Delta M_* = T_J \frac{d(1-s)}{dt} = -T_J \frac{ds}{dt} \quad (9-28)$$

转矩和有功功率的关系为

$$\Delta M_* = \frac{\Delta P_*}{\omega_*} = \frac{\Delta P_*}{1-s} \quad (9-29)$$

对异步电动机而言

$$\Delta M_* = M_{e*} - M_{m*} \quad (9-30)$$

二、异步电动机的电磁转矩

异步电动机稳态运行时，以标么值表示的等值电路如图9-17所示，为了书写方便，图中“*”已省略，且以下相同。

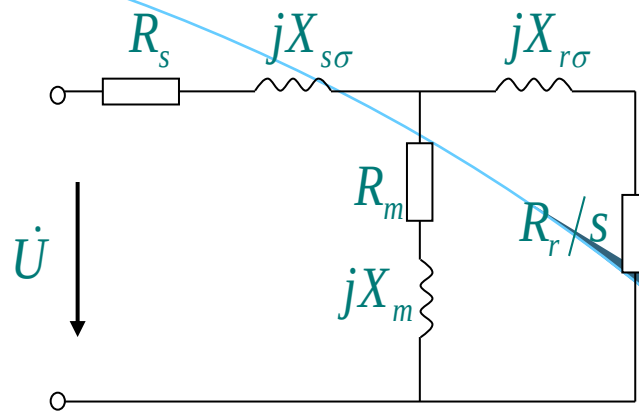


图9-17 异步电动机的等值电路

则异步电动机的阻抗为

$$Z = (R_s + jX_{s\sigma}) + \frac{(R_m + jX_m)(R_r/s + jX_{r\sigma})}{(R_m + jX_m) + (R_r/s + jX_{r\sigma})} \quad (9-31)$$

由图9-17可得其简化图9-18，由此图可得通过气隙传递到转子侧的有功功率为

$$P_{ea} = I^2 \frac{R_r}{s} = \frac{U^2 R_r}{(R_s + R_r/s)^2 + (X_{s\sigma} + X_{r\sigma})^2} \times \frac{1}{s} \quad (9-32)$$

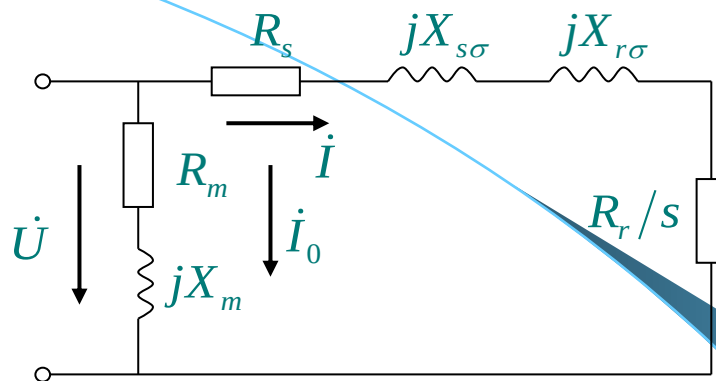


图9-18 异步电动机的等值电路简化图

转子绕组中的有功功率损耗为

$$\Delta P_e = I^2 R_r = \frac{U^2 R_r}{(R_s + R_r/s)^2 + (X_{s\sigma} + X_{r\sigma})^2} \quad (9-33)$$

可转化为机械功率的电磁功率为

$$P_e = P_{ea} - \Delta P_e = I^2 R_r = \frac{U^2 R_r}{(R_s + R_r/s)^2 + (X_{s\sigma} + X_{r\sigma})^2} \times \frac{1-s}{s} \quad (9-34)$$

转子轴上的电磁转矩为

$$M_e = \frac{P_e}{\omega} = \frac{P_e}{1-s} = \frac{U^2 R_r}{(R_s + R_r/s)^2 + (X_{s\sigma} + X_{r\sigma})^2} \times \frac{1}{s} \quad (9-35)$$

设 $R_s = 0$ ，求 M_e 对转差率 s 的偏导数，并令 $\frac{\partial M_e}{\partial s} = 0$ ，可得

临界

$$s = s_{cr} = \frac{R_r}{X_{s\sigma} + X_{r\sigma}} \quad (9-36)$$

转差率
与之对应的最大转矩为

$$M_{e.\max} = \frac{U^2}{2(X_{s\sigma} + X_{r\sigma})} \quad (9-37)$$

则此时 转子轴上的电磁转矩为

$$M_e = \frac{2M_{e.\max}}{s_{cr}/s + s/s_{cr}} \quad (9-38)$$

异步电动机转矩-转差率的特性曲线如下图所示。

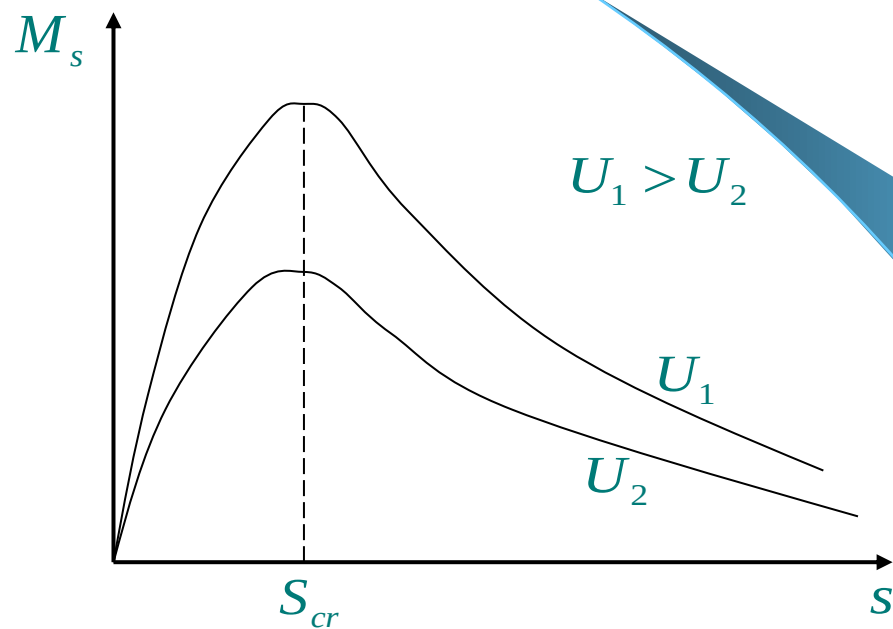
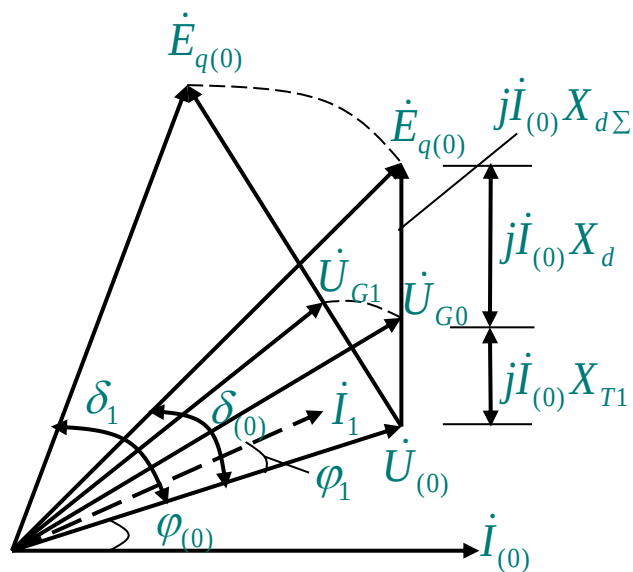


图9-19 异步电动机转矩-转差率的特性曲线

第四节 自动调节励磁系统对功-角特性的影响

一、无自动调节励磁电流时发电机端电压的变化



当不调节发电机的励磁电流而保持发电机的空载电动势 E_q 不变时，随着发电机输出有功功率的增加，功率角 δ 也要增大，因而发电机端电压 U_G 下降。图（9-20）所示为具有隐极式同步发电机的简单电力系统的相量图。

图9-20 功率角增加时发电机端电压的变化

二、自动调节励磁系统对功-角特性的影响

由功-角特性方程式 $P_{E_q} = \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta$ ，可以看出，由于自动调节励磁系统的作用，使空载电动势 E_q 随功率角 δ 的增大而增大，从而使 P_{E_q} 与 δ 不再是正弦关系。为了定性分析自动调节励磁系统对功-角特性的影响，对于不同的电动势 E_q 值，作出了一组正弦功-角特性曲线族，它们的幅值与空载 E_q 电动势 成正比，如图9-21所示。

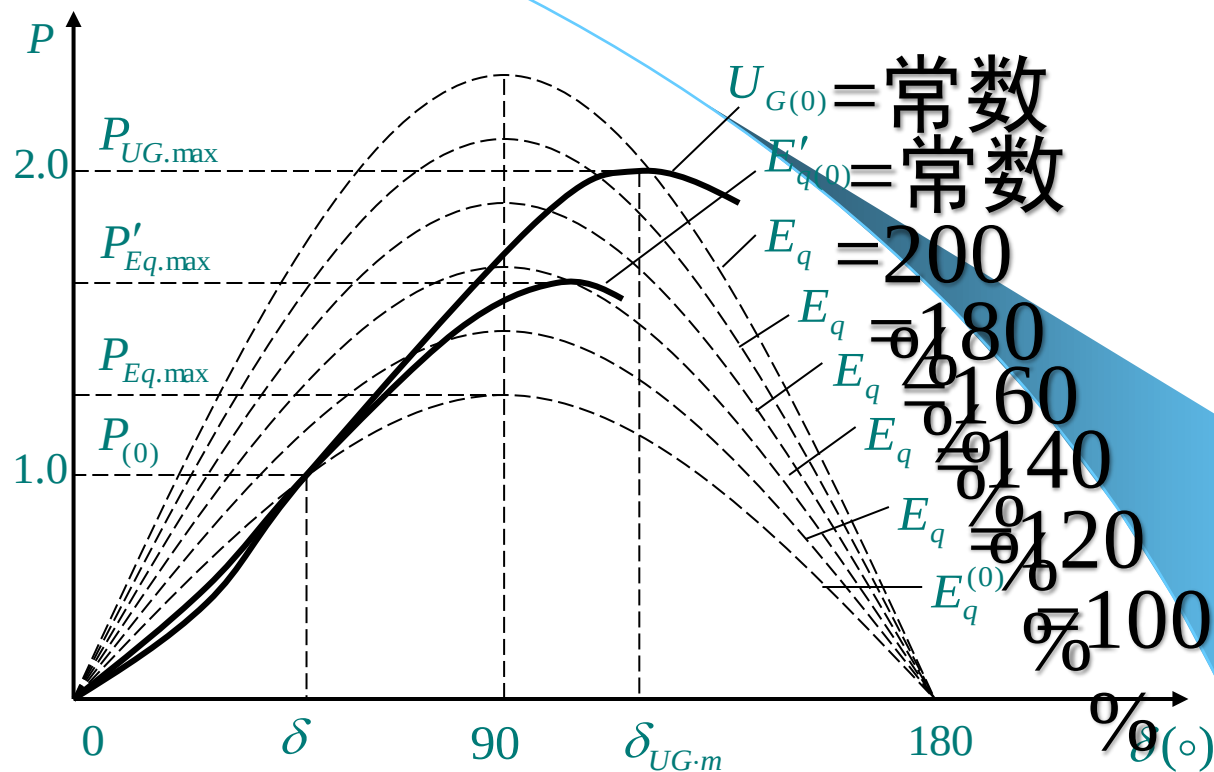


图9-21 自动调节励磁系统对功-角特性的影响