

6.1 电力系统暂态及故障的基本概念

• 电力系统发生故障或在受到其他类型扰动的暂态过程中，各元件的电磁量以及旋转电机的转速等机械量都将发生变化，而且电磁量和机械量的变化是相互关联的。

• 全面严格地分析电力系统暂态过程不但非常复杂而且相当困难，所以工程上根据不同的研究问题，将电力系统暂态过程分为电磁暂态过程和机电暂态过程两类。

• 电磁暂态过程研究电流、电压等电量及电机、变压器中磁通的变化过程，而电机转速变化则可以忽略不计，例如研究短路电流、同步电机自励磁等快速暂态过程。

• 机电暂态过程着重研究同步电机转速和转子相对位置变化的暂态过程，一些对其影响不大的电磁变化因素则可忽略不计，例如电力系统运行稳定性、同步发电机异步运行等问题的研究。

• 第6章主要讨论电力系统短路故障的电磁暂态过程。

• 同步电机是电力系统的电源，其暂态过程比其他元件复杂，且对电力系统电磁和机电暂态过程起主导作用。

• 短路故障指正常运行情况以外的相与相之间或相与地（或中性线）之间的接通，是各种电力系统可能发生的故障中，对电力系统运行和电力设备安全危害最大，且发生概率较大的故障。

• 产生短路故障的主要原因是电力设备绝缘损坏。常见的有：1）设备绝缘损坏，雷击或操作过电压引起绝缘子/绝缘套管表面闪络（电弧放电）；2）绝缘材料老化等原因，在过电压甚至在正常电压下发生绝缘介质击穿；3）自然灾害及跨接裸露导体造成的短路。另外，运行人员误操作也是造成短路的一个原因，例如设备检修后忘记拆除临时接地线（用于保护人员安全）而导致在合上电源时造成短路。

• 在三相交流电力系统中，短路故障的基本类型有：三相短路、两相短路、单相接地短路、两相接地短路。三相短路为对称短路，其余三类为不对称短路。

• 各种短路故障中，单相短路所占的比例最高；三相短路最小，约为5%。电力系统短路故障大多数发生在架空线部分（约占70%）。在110kV以上的架空线路上发生的短路故障，单相短路可达到90%以上。

• 中性点不接地或经过大电抗（补偿电抗器）接地的电力网中，单相接地时线路的电流变化不大，但可能会引起过电压。

• 短路时，短路点相间或相与地间将燃起电弧。

• 电弧的电阻是非线性的，其值与电流大小及电弧长度有关，变

化范围很大，难以准确估计，实际计算中常近似用恒定电阻代替。

- 电弧电阻很小、忽略不计时，称为**金属性短路**；相同条件下，金属性短路的电流较大，通常作为**计算最大可能短路电流**的条件。

- 电力网中除了同一地点短路以外，还可能在不同地点同时发生短路，称为**多重短路故障或复杂短路故障**。

- 短路时，电力网的电压突然降低（**短路点附近电压下降得最多**），就会影响用户用电设备的正常工作。

- 首先受影响的是**异步电动机**，电压低于 70% 以下时，其转速急剧下降以至停转，造成产品报废甚至设备损坏。

- 短路电流可能达到额定电流的几倍至十几倍，可能造成危害：1) **严重发热**；2) 电流瞬时值最大时的电动力；3) **电压突然降低**，影响电动机等设备的正常工作；4) **严重后果**：并列运行的发电机失去同步，造成系统解列/崩溃，甚至大面积停电；5) 不对称短路时会**干扰通信**，甚至危及通信设备和人身的安全。

- 在电力系统设计和运行时，要采取适当措施降低短路故障的发生概率，如**防雷设施、配电装置结构完善，运行维护管理**等；还要采取**减小短路危害的措施**，如**继电保护装置**。

- 架空线路的短路大多数是**瞬时性**的，即经故障线路与电源隔离，使短路点电弧熄灭并去游离后，能够恢复正常绝缘能力，因此普遍采用**自动重合闸措施**，即**当发生短路时断路器迅速跳闸（220kV 及以上广泛采用单相重合闸）**，经过一定时间（0.4~1s）后断路器自动重合闸。对于瞬时性短路，重合闸后系统即恢复正常运行；对永久性故障，重合闸后三相同时断开。

- **短路故障的计算结果是电气结线拓扑、配电设备、断路器、继电保护、短路电流限制措施等实践操作的依据之一。**

- **断线故障指线路一相或两相断开的故障**。多发生在具有三相分别操作断路器的架空线路中，当断路器的一相或两相跳闸时即形成断线故障，非全相运行状态；架空线路的一相或两相导线断裂是次要原因。

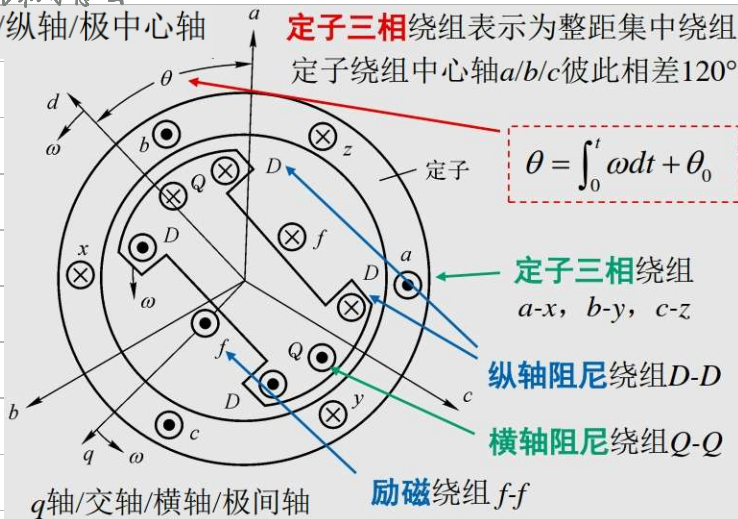
6.2 同步电机的数学模型

理想同步电机假设

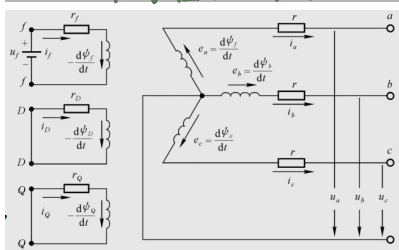
假设	对象	内容	解释
1	各磁路的导磁系数	常数	铁心不饱和
2	定子三相绕组	①结构完全相同 ②空间位置彼此相距120电角度	
	转子铁心及绕组	对极中心轴和极间轴完全对称	
3	定转子各绕组电流	在空气隙中产生的磁势和磁感应强度（磁通密度）按正弦规律分布	
4	定转子的槽	不影响各绕组的电感	定转子表面光滑

改极同步电机示意图

d 轴/直轴/纵轴/极中心轴



6.2.1 电压方程和磁链方程



转子回路电压方程

定子回路电压方程

$$\begin{cases} u_f = \frac{d\psi_f}{dt} + r_f i_f \\ 0 = \frac{d\psi_D}{dt} + r_D i_D \\ 0 = \frac{d\psi_Q}{dt} + r_Q i_Q \end{cases}$$

$$\begin{cases} u_a = e_a - r i_a = \frac{d\psi_a}{dt} - r i_a \\ u_b = e_b - r i_b = \frac{d\psi_b}{dt} - r i_b \\ u_c = e_c - r i_c = \frac{d\psi_c}{dt} - r i_c \end{cases}$$

各绕组磁链方程式

$$\psi_{abc} = \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_b & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_a \\ -i_b \\ -i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} M_{af} & M_{aD} & M_{aQ} \\ M_{bf} & M_{bD} & M_{bQ} \\ M_{cf} & M_{cD} & M_{cQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} = -L_{SS} i_{abc} + L_{SR} i_{fDQ}$$

$$\psi_{fDQ} = \begin{bmatrix} \psi_f \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{af} & M_{bf} & M_{cf} \\ M_{aD} & M_{bD} & M_{cD} \\ M_{aQ} & M_{bQ} & M_{cQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_a \\ -i_b \\ -i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_f & M_{fD} & 0 \\ M_{fD} & L_D & 0 \\ 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} = -L_{RS} i_{abc} + L_{RR} i_{fDQ}$$

☆ 定子各绕组自感 ① 周期 180° ② L_a , d轴与a轴重合 max, q轴重合 min ③ 隐极, 常数

定子绕组间互感 ① 周期 180° ② $M_{bc} < 0$, $\theta = 90^\circ$ 时 abs max ③ 隐极, 常数

定转子绕组间互感 ① 周期 360° ② d轴与a轴重合 max ③ 直交 0

abc 转子各绕组的自感和互感 ① $L_f, L_D, L_Q, M_{fD}, M_{fQ}$ 都是常数

6.2.2 坐标变换

磁链 — 非线性代数方程式 $\xrightarrow{\text{变换}}$ 线性代数方程

电压 — 变系数微分方程式 $\xrightarrow{\text{变换}}$ 非线性微分方程 $\xrightarrow{w \text{ 常}}$ 线性微分方程

$$i_d = \frac{2}{3} [i_a \cos \theta + i_b \cos(\theta - 120^\circ) + i_c \cos(\theta + 120^\circ)]$$

$$i_q = -\frac{2}{3} [i_a \sin \theta + i_b \sin(\theta - 120^\circ) + i_c \sin(\theta + 120^\circ)]$$

$$i_0 = \frac{1}{3} (i_a + i_b + i_c)$$

纵横和横轴电枢反应磁势, 若 w 恒定且 $w_s = w$, 磁势恒定;

但 $w_s \neq w$, 磁势时变, $w_s - w$.

派克变换

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

则有 $i_{dq0} = P i_{abc}$, $u_{dq0} = P u_{abc}$, $\psi_{dq0} = P \psi_{abc}$

$$P^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - 120^\circ) & -\sin(\theta - 120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta + 120^\circ) & -\sin(\theta + 120^\circ) & 1 \end{bmatrix}$$

则有定子三相电流、电压、磁链的坐标逆变换关系

$$i_{abc} = P^{-1} i_{dq0}, \quad u_{abc} = P^{-1} u_{dq0}, \quad \psi_{abc} = P^{-1} \psi_{dq0}$$

6.2.3 用dq0坐标表示的同步电机方程式

磁链方程

d 轴	$\psi_d = -L_d i_d + m_{af} i_f + m_{aD} i_D$	$\psi_f = -\frac{3}{2} m_{af} i_d + L_f i_f + m_r i_D$	3
		$\psi_D = -\frac{3}{2} m_{aD} i_d + m_r i_f + L_D i_D$	
q 轴	$\psi_q = -L_q i_q + m_{aQ} i_Q$	$\psi_Q = -\frac{3}{2} m_{aQ} i_q + L_Q i_Q$	2
0 轴	$\psi_0 = -L_0 i_0$		1

① 各电感是常数 ② dq轴与转子绕组互感不可逆 (1.5倍)

dq轴绕组与定子一相绕组的结构相同, 等值匝数也一样

等值定子零序绕组 ① 独立, 无磁耦合 ② 磁链 $\propto i$

等值定子 dq 轴绕组 ① 与转子 dq 轴重合, 和转子一起转

② d 轴绕组与 q 轴各绕组间无互感

d, q 轴磁链方程特点

① 等值定 d 与 d 轴重合, $\therefore$ 磁导不变, L_d 常, 同轴互感为常

② 等值定 d 与转子 d 轴和绕组间互感不可逆 1-相电流和三相电流

L_d 只有纵轴电枢反应时定子各相的等值电感

q 同理

回路电压方程

$$\begin{aligned}
 u_d &= \frac{d}{dt} \psi_d - \omega \psi_q - r i_d & u_f &= \frac{d}{dt} \psi_f + r_f i_f \\
 u_q &= \frac{d}{dt} \psi_q + \omega \psi_d - r i_q & 0 &= \frac{d}{dt} \psi_D + r_D i_D \\
 u_0 &= \frac{d}{dt} \psi_0 - r i_0 & 0 &= \frac{d}{dt} \psi_Q + r_Q i_Q
 \end{aligned}$$

非线性微分方程

↓ $\omega = \text{constant}$

线性微分方程

变压器电势

6.2.4 标么值表示的派克方程

S_B 、线电压有效值基准值 U_B $U_B = \sqrt{2} U_{\phi B} = \sqrt{\frac{2}{3}} U_B$ $i_B = \sqrt{2} I_B$ $t_B = \frac{1}{\omega_B}$

在 $\omega_B = 1$ 条件下, 自(互)感抗 = 相应的自(互)感系数

发电机电势 = 相应磁链

转子采用 x_{ad} 基准值系统时, 标么制磁链方程的互感都变为可逆

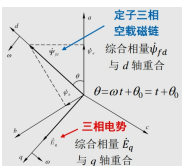
$$\begin{aligned}
 \psi_d &= -x_d i_d + x_{ad} i_f + x_{ad} i_D \\
 \psi_q &= -x_q i_q + x_{aq} i_Q \\
 \psi_0 &= -x_0 i_0 \\
 \psi_f &= -x_{ad} i_d + x_f i_f + x_{ad} i_D \\
 \psi_D &= -x_{ad} i_d + x_{ad} i_f + x_D i_D \\
 \psi_Q &= -x_{aq} i_q + x_Q i_Q
 \end{aligned}$$

形式不变

6.2.5 同步发电机的稳态运行

e, u, i 三相对称、正弦, $i_f = \text{constant}$, $i_d, \psi_d, i_Q, \psi_Q = 0$

1. 空载运行



$$i_d = i_q = i_0 = 0 \quad \psi_d = x_{ad} i_f = \psi_{fd} \quad \psi_q = \psi_0 = 0$$

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = P^{-1} \begin{bmatrix} \psi_{fd} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \psi_{fd} \cos \theta \\ \psi_{fd} \cos(\theta - 120^\circ) \\ \psi_{fd} \cos(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

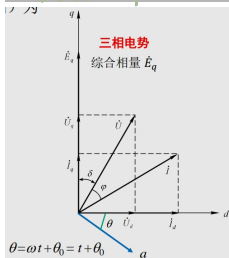
$$U_d = 0 \quad U_g = W\psi_d = W\psi_{fd} \quad U_o = 0$$

$$\begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = P^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \psi_{fd} \\ 0 \end{bmatrix} = \omega \psi_{fd} \begin{bmatrix} -\sin \theta \\ -\sin(\theta - 120^\circ) \\ -\sin(\theta + 120^\circ) \end{bmatrix} = \underbrace{E_q}_{\text{red star}} \begin{bmatrix} \cos(\theta + 90^\circ) \\ \cos(\theta + 90^\circ - 120^\circ) \\ \cos(\theta + 90^\circ + 120^\circ) \end{bmatrix}$$

$\omega_{4fd} = \omega_{0d} \text{ if 同步电机空载时势 (会突变)}$

$$\bar{E}_q = \chi_{ad} \dot{\gamma}_n = \chi_{ad} (I_{f(1)} + \Delta \dot{\gamma}_n)$$

2. 负载运行



$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U \sin \delta \\ U \cos \delta \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = P \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I \sin(\delta + \varphi) \\ I \cos(\delta + \varphi) \\ 0 \end{bmatrix}$$

常数

定子电压方程

$$U_d = x_q I_q - r I_d$$

$$U_q = E_q - x_d I_d - r I_q$$

$$\Rightarrow I_d = \frac{x_q(E_q - U_q) - rU_d}{r^2 + x_d x_q} \quad I_q = \frac{r(E_q - U_q) + x_d U_d}{r^2 + x_d x_q}$$

$$\downarrow r < \lambda_d \quad r < \lambda_g \quad r \geq 0$$

稳态运行

$$I_d = \frac{E_q - U_q}{x_d} \quad I_q = \frac{U_d}{x_q}$$

6.3 同步电机三相短路电磁暂态过程

分析中**假定**：1) 在短路后的暂态过程中，电机转速保持不变， $\omega_* = 1$ ；
2) 同步电机是理想的，磁路不饱和，故可应用**叠加原理**；
3) 励磁直流电源看作**没有内电阻和内电感**的电压源，不计自动励磁调节器的作用，励磁电压保持不变，暂不考虑强行励磁的影响（6.3.3节考虑）。

6.3.1 无阻尼绕组同步电机突然三相短路

$$\psi_d = -x_d \dot{i}_d + x_{ad} \dot{i}_f$$

$$u_d = p \psi_d - \psi_a - r i_d$$

$$\psi_a = -x_a i_a$$

$$u_a = p\psi_a + \psi_d - ri_a$$

$$\psi_f = -x_{ad} \dot{i}_d + x_f \dot{i}_f$$

$$u_f = p\psi_f + r_f i_f$$

定子三相电流仍对称, $i_0 = 0, \psi_0 = 0$

$$U_a = U_b = U_o = 0 \Rightarrow U_d = U_g = 0 \quad U_f \text{ 不变}$$

故障分量关系式

$$\Delta \psi_d = -x_d \Delta i_d + x_{ad} \Delta i_f$$

$$\Delta u_d = p \Delta \psi_d - \Delta \psi_a - r \Delta i_d$$

$$\Delta \psi_a = -x_a \Delta i_a$$

$$\Delta u_a = p \Delta \psi_a + \Delta \psi_d - r \Delta i_a$$

$$\Delta \psi_f = -x_{ad} \Delta i_d + x_f \Delta i_f$$

$$\Delta u_f = p \Delta \psi_f + r_f \Delta i_f$$

转矩的分配

运行同步电机

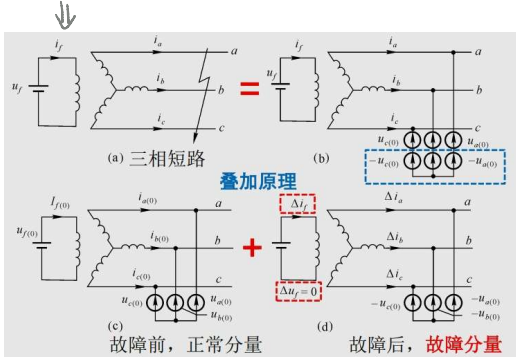
$$\textcircled{c} U_d = (U_d)_0 + \Delta U_d = 0$$

② U_f 不变 $\Rightarrow \Delta U_f = 0$

③ i 中不突变, Δi 、 $\Delta \mu$ 均为 0

上突然加上 $-U_{n(0)}$..

$$-V_{d(0)} \times I(t)$$



1. 暂态电势和暂态电抗

由 \$u_d, u_f\$ 式中消去 \$I_f\$, 得 $u_d = \frac{x_{ad}}{x_f} u_f - (x_d - \frac{x_{ad}^2}{x_f}) i_d = u_d' - x_d' i_d$

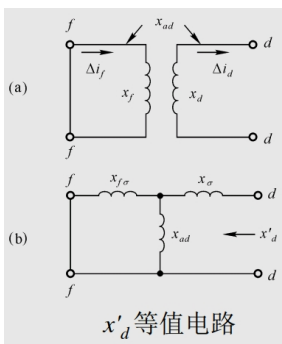
定子纵轴等值磁链 → 定子纵轴暂态电抗

↓产生

定子旋转电势 $E_g' = \omega \psi_d' = u_d'$ (暂态电势)

ψ 不突变 $\Rightarrow E_g'$ 不突变, 稳态时就存在

定子纵轴同步电抗 暂态 $x_d' \rightarrow$ 稳态 x_d 励磁绕组磁链守恒



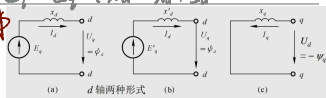
横轴方向转子上无绕组, 故在任何情况下横轴同步电抗都是 x_q

$u_d = -x_d' i_d + x_{ad} i_f = E_g' - x_d' i_d \quad U_g = u_d - r I_g$

$E_g' = U_g + x_d' i_d + r I_g$ 或 $E_g' = E_g - (x_d - x_d') i_d$

↓忽略定子压降

$I_d = \frac{E_g - U_g}{x_d} = \frac{E_g' - U_g}{x_d}$



2. 不计各绕组电阻的三相短路电流

$\Delta i_d, \Delta i_q$ 各含两分量 { 阶跃性质的直流分量 $\Delta i_{dn}, \Delta i_{qn}$
同步频率交流分量 $\Delta i_{dw}, \Delta i_{qw}$

f 守恒, Δi_d 两分量取决于 x_d , 电流不变, $\Delta i_d = \Delta i_q = 0$, 但各分量突然出现的

$$i_d = i_{dn} + \Delta i_{dw}$$

$$i_q = \Delta i_{qw} \text{ 无非周期分量}$$

$$i_f = i_{f(0)} + \Delta i_{fn} + \Delta i_{fw}$$

$$i_a = i_{aw} + i_{an} + i_{a(2w)}$$

$$i_{dn} \cos(t + \theta_0)$$

定子三相绕组磁链守恒的产物

对称正序, 恰 i_{dn}

周期分量

只产生同步的纵轴电枢反应磁势, 对励磁绕组起去磁作用, 与 x_d, x_q 均成正比

非周期分量

$\theta = \delta_0 + 180^\circ$ 时 $\max$ (此时 θ 相反 $\rightarrow 0$)

三相代数之和恒为 0 感应电动势

倍频交流分量

x_d 和 x_q 差别越小, 越小 对称正序 感应电动势

3. 考虑各绕组电阻时三相短路电流

不计电阻的分量是起始值

① i_{an} 和 $i_{a(2w)}$ 的衰减 定子绕组等值电感和等值电阻之比 $\Delta i_d / \Delta i_q$ 分母的根

定子三相绕组磁链守恒的产物

$$T_a = \frac{2x_d x_q}{x_d' + x_q} / r$$

相联系

励磁绕组短接时定子绕组的平均时间常数

② i_{aw} 定子绕组短路时励磁绕组等值电抗和电阻决定

周期分量中自由分量由励磁绕组磁链守恒引起

励磁电流非周期分量 $(i_{fn} + \Delta i_{fn})$ 对应的定子旋转电势产生

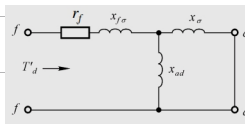
$$T_d' = \frac{r^2 + x_d' x_q}{r^2 + x_d x_q} T_f \quad T_f = \frac{x_f}{r_f} \quad \frac{x_d'}{x_d} \cdot \frac{x_f}{r_f} = \frac{1}{r_f} (x_{f0} + \frac{x_{ad} x_c}{x_{ad} + x_c})$$

Δi_{dn} 中自由分量的衰减时间常数, Δi_{qn} 中无 (忽略 r)

$$T_d' = \frac{x_d'}{x_d} \cdot \frac{x_f}{r_f} = \frac{1}{r_f} (x_{f0} + \frac{x_{ad} x_c}{x_{ad} + x_c})$$

也是 Δi_{fn} 的

定子绕组短接时励磁绕组的时间常数



考虑各自由分量衰减时，三相短路电流为

$$i_d = I_{d(0)} + \Delta i_d = \left(\frac{E'_{q(0)}}{x'_d} - \frac{E_{q(0)}}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \frac{E_{q(0)}}{x_d} - \frac{U_{(0)}}{x'_d} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(t + \delta_0)$$

$$i_q = I_{q(0)} + \Delta i_q = \frac{U_{(0)}}{x_q} e^{-\frac{t}{T_a}} \sin(t + \delta_0)$$

$$i_a = \left[\left(\frac{E'_{q(0)}}{x'_d} - \frac{E_{q(0)}}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \frac{E_{q(0)}}{x_d} \right] \cos(t + \theta_0) - \frac{U_{(0)}}{2} \frac{x_q + x'_d}{x_q x'_d} \cos(\delta_0 - \theta_0) e^{-\frac{t}{T_a}}$$

$$- \frac{U_{(0)}}{2} \frac{x_q - x'_d}{x_q x'_d} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(2t + \delta_0 + \theta_0)$$

$$\frac{U_{q(0)}}{x'_d} - \frac{U_{q(0)}}{x_d} = \frac{E'_{q(0)}}{x'_d} - \frac{E_{q(0)}}{x_d}$$

考虑各自由分量衰减时，励磁绕组电流为

$$i_f = I_{f(0)} + \Delta i_f = \frac{E_{q(0)}}{x_{ad}} + \frac{x_d - x'_d}{x_{ad}} \left[\frac{U_{q(0)}}{x'_d} e^{-\frac{t}{T'_d}} - \frac{U_{(0)}}{x'_d} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(t + \delta_0) \right]$$

三相短路时 $\begin{cases} E_q = x_d i_{dn} \\ U_d = U_{q(0)} = 0 \end{cases} \left\{ \frac{E_q = x_d i_{dn}}{E'_q = x'_d i_{dn}} = \frac{x_d}{x'_d} \right.$ 变化规律相同 i_{fn} 突增 Δi_{fn} $\left. \begin{matrix} E_q \text{ 突变} \\ E'_q \text{ 不突变} \end{matrix} \right\}$

6.3.2 有阻尼绕组同步电机三相短路

对称条件下取消 ψ 、 u 方程

故障分量方程
转子各绕组短路
空载运行的同步电机，定子加上所加电压 $-U_{d(0)}$

定子 d 轴和 q 轴	$\Delta u_d = -U_{d(0)}/p = p\Delta\psi_d(p) - \Delta\psi_q(p) - r\Delta i_d(p)$ $\Delta u_q = -U_{q(0)}/p = p\Delta\psi_q(p) + \Delta\psi_d(p) - r\Delta i_q(p)$ $\Delta\psi_d(p) = -x_d\Delta i_d(p) + x_{ad}\Delta i_f(p) + x_{ad}\Delta i_D(p)$ $\Delta\psi_q(p) = -x_q\Delta i_q(p) + x_{aq}\Delta i_Q(p)$
转子 d 轴	$\Delta u_f = 0 = p\Delta\psi_f(p) + x_f\Delta i_f(p)$ $0 = p\Delta\psi_D(p) + r_D\Delta i_D(p)$ $\Delta\psi_f(p) = -x_{ad}\Delta i_d(p) + x_f\Delta i_f(p) + x_{ad}\Delta i_D(p)$ $\Delta\psi_D(p) = -x_{ad}\Delta i_d(p) + x_{ad}\Delta i_f(p) + x_D\Delta i_D(p)$
转子 q 轴	$0 = p\Delta\psi_Q(p) + r_Q\Delta i_Q(p)$ $\Delta\psi_Q(p) = -x_{aq}\Delta i_q(p) + x_Q\Delta i_Q(p)$

1. 次暂态电势和次暂态电抗

A 纵轴方向 ψ_d, ψ_f, ψ_D 中消 ψ_f, ψ_D

$\psi_d = \frac{x_{ad}}{x_f x_D - x_{ad}^2} (x_{D\sigma} \psi_f + x_{f\sigma} \psi_D) - \left[x_d - \frac{x_{ad}^2 (x_f + x_D - 2x_{ad})}{x_f x_D - x_{ad}^2} \right] i_d = \psi_d'' - x_d'' i_d \Rightarrow \psi_d = E_q'' - x_d'' i_d$

式中, $\psi_d'' = \frac{x_{ad}}{x_f x_D - x_{ad}^2} (x_{D\sigma} \psi_f + x_{f\sigma} \psi_D), x_d'' = x_d - \frac{x_{ad}^2 (x_f + x_D - 2x_{ad})}{x_f x_D - x_{ad}^2}$

↓ 纵轴次暂态电抗
变换后 $E_q'' = \psi_d''$ ψ_f, ψ_D 不改变 $\Rightarrow E_q''$ 不改变

A 横轴方向 ψ_q, ψ_a 中消 ψ_a

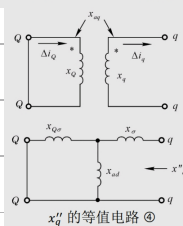
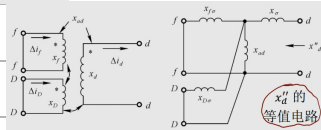
$\psi_q = \frac{x_{aq}}{x_Q} \psi_Q - \left(x_q - \frac{x_{aq}^2}{x_Q} \right) i_q = -\psi_q'' - x_q'' i_q \Rightarrow \psi_q = -E_d'' - x_q'' i_q$

式中, $\psi_q'' = -\frac{x_{aq}}{x_Q} \psi_Q, x_q'' = x_q - \frac{x_{aq}^2}{x_Q}$

↓ 横轴次暂态电抗
 $E_d'' = \psi_q''$ ψ_a 不改变, E_d'' 不改变

x_d'' 是有阻尼绕组电机在暂态过程开始瞬间的定子纵轴同步电抗

$< x_d' < x_d$

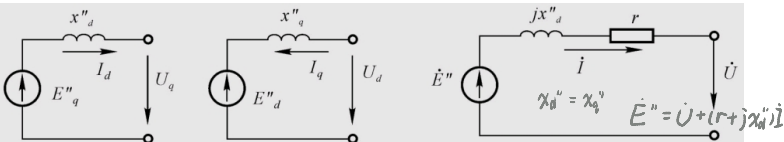


正常运行 $U_d = -\psi_q - r I_d = E_d'' + x_q'' I_q - r I_d$ $U_q = \psi_d - r I_d = E_q'' - x_d'' I_d - r I_d$

$\Rightarrow E_d'' = U_d - x_q'' I_q + r I_d, E_q'' = U_q + x_d'' I_d + r I_d$

或 $E_q'' = E_q - (x_d - x_d'') I_d = E_q - (x_d' - x_d'') I_d$

用 E_q'' 和 E_d'' 表示的同步电机稳态等值电路

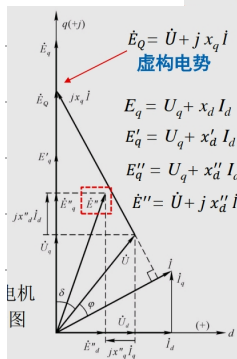


忽略定子压降 $I_d = \frac{E_q'' - U_q}{x_d''}$

$I_q = \frac{-E_d'' + U_d}{x_q''}$

次暂态电势 $E'' = E_d'' + E_q''$

or $E'' = \sqrt{E_d''^2 + E_q''^2}$
不改变



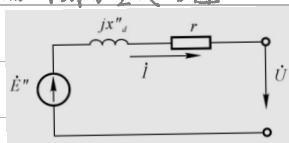
2. 不计各绕组时三相短路电流

$$\begin{aligned} i_d &= i_{dn} + i_{d\omega} & \frac{E_{q(0)}'}{\chi_d''} &\rightarrow \frac{E_{q(0)}}{\chi_d} \\ i_q &= i_{qn} + i_{q\omega} & \text{自由分量} &\text{衰减消失} \\ i_f &= i_{f(0)} + \Delta i_{fn} + \Delta i_{f\omega} \\ i_D &= \Delta i_{Dn} + \Delta i_{D\omega} \\ i_Q &= \Delta i_{Qn} + \Delta i_{Q\omega} \\ i_a &= i_{an} + i_{a\omega} + i_{a\omega\omega} & \text{定子三相绕组磁链守恒} \\ & \text{略 } i_{a\omega} = \frac{E_{q(0)}'}{\chi_d''} \text{ 的余} & \text{略 } i_{qn} = \frac{-E_{d(0)}'}{\chi_q''} \text{ 的正弦} \end{aligned}$$

起始次暂态电流 $I'' = \sqrt{\left(\frac{E_{q(0)}'}{\chi_d''}\right)^2 + \left(\frac{E_{d(0)}'}{\chi_q''}\right)^2}$ 定子电流周期分量起始值

$$\downarrow \chi_d'' = \chi_q''$$

$$\frac{\sqrt{E_{q(0)}'^2 + E_{d(0)}'^2}}{\chi_d''} = \frac{E_{(0)}'}{\chi_d''}$$



3. 计及各绕组电阻时三相短路电流

① 先令 $r_f = r_D = r_Q = 0$, 求 $\Delta i_{d\omega}$ 和 $\Delta i_{q\omega}$ (即 **定子电流非周期** i_{an} 和 **倍频交流分量** $i_{a(2\omega)}$ 及 **转子各绕组中交流电流** $i_{f\omega}$) 衰减的时间常数:

$$T_a = \frac{2x_d''x_q''}{x_d'' + x_q''/r} \quad \text{取决于定子绕组}$$

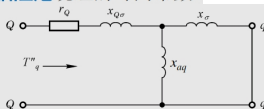
② 再令 $D(p)$ 中的 $r = 0$, 求 i_{dn} 和 i_{qn} (即 **定子电流同步频率周期分量** $i_{a\omega}$ 及 **转子各绕组中电流非周期分量** i_{fn}) 衰减的时间常数:

(a) i_{qn} 由 Δi_{an} 引起, 时常取决于 Q

$$T_q'' = -\frac{1}{p_1} = \frac{x_Q x_d''}{r_Q x_q} = T_{q0}'' \frac{x_d''}{x_q}$$

其中 $T_{q0}'' = x_Q / r_Q$ 为定子绕组开路时 **横轴阻尼** 绕组的时间常数。

$$T_q'' = \frac{1}{r_Q} \left(x_{Q\sigma} + \frac{x_{aq} x_{\sigma}}{x_{aq} + x_{\sigma}} \right)$$



$$\chi_Q = \chi_{Q\sigma} + \chi_{aq}$$

可见, T_q'' 是定子绕组短路时 **横轴阻尼** 绕组的时间常数。

(b) i_{dn}

$$T'_d = (T'_f + T'_D) \frac{1+q}{2} \approx T'_f + T'_D \approx T'_f = T_f (x'_d/x_d)$$

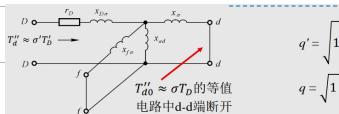
$$T''_d = (T'_f + T'_D) \frac{1-q}{2} \approx \frac{\sigma T_f T'_D}{T'_f + T'_D} \approx \sigma T'_D = \left(x_{D\sigma} + \frac{x_{ad}x_f\sigma}{x_{ad}+x_f\sigma} \right) \frac{1}{T_D}$$

$$T'_f = x'_f/r_f \text{ 和 } T'_D = x'_D/r_D$$

分别为定子绕组短路、

阻尼/励磁绕组开路时

励磁/阻尼绕组的时间常数



$$q' = \sqrt{1 - \frac{4\sigma' T_f T'_D}{(T'_f + T'_D)^2}}, \quad \sigma' = 1 - \frac{x_{ad}^2}{x'_f x'_D}$$

$$q = \sqrt{1 - \frac{4\sigma T_f T_D}{(T_f + T_D)^2}}, \quad \sigma = 1 - \frac{x_{ad}^2}{x_f x_D}$$

故 T''_d 可近似视为定子绕组和励磁绕组均短路时，纵轴**阻尼**绕组的时间常数。

$$T'_d = (T_f + T_D) \frac{1+q}{2} \approx T_f + T_D \approx T'_f$$

$$T''_d = (T_f + T_D) \frac{1-q}{2} \approx \frac{\sigma T_f T_D}{T_f + T_D} \approx \sigma T_D = \left(x_{D\sigma} + \frac{x_{ad}x_f\sigma}{x_{ad}+x_f\sigma} \right) \frac{1}{T_D}$$

$$T_f = x_f/r_f$$

$$T_D = x_D/r_D$$

可证明: $T'_d \approx T'_d \frac{x'_d}{x_d}$, $T''_d \approx T''_d \frac{x''_d}{x_d}$, 以此可求得 T'_d 和 T''_d 。

T'_d 和 T''_d 是定子绕组开路时的时间常数，与定子回路的情况无关。

当同步电机经外部电抗短路时，用该方法计算 T'_d 和 T''_d 更方便。

可近似认为 $T_{d\sigma}$ 是定子和阻尼绕组均开路时，**励磁**绕组的时间常数
 $T_{d\sigma}$ 是定子绕组开路、励磁绕组短路时，纵轴**阻尼**绕组的时间常数。

$$x'_{ad} = \frac{x_{\sigma} x_{ad}}{x_{\sigma} + x_{ad}} = x_{ad} - \frac{x_{ad}^2}{x_d}$$

$$x'_f = x_f - \frac{x_{ad}^2}{x_d} = x_f\sigma + x'_{ad}$$

$$x'_D = x_D - \frac{x_{ad}^2}{x_d} = x_{D\sigma} + x'_{ad}$$

显然， x'_{ad} 为 x_{σ} 与 x_{ad} 的并联值，因此 x'_f 为定子绕组短路、阻尼绕组开路时励磁绕组的电抗， x'_D 为定子绕组短路、励磁绕组开路时纵轴阻尼绕组的电抗。

记 $\sigma = 1 - \frac{x_{ad}^2}{x_f x_D}$ 和 $\sigma' = 1 - \frac{x_{ad}^2}{x'_f x'_D}$ 分别为定子绕组开路和短路时励磁绕组与纵轴阻尼绕组间的漏磁系数。

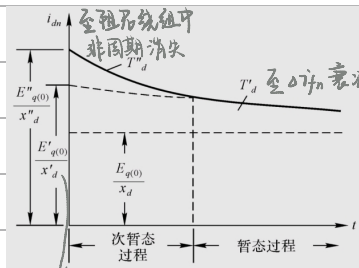
式中， $T_f = x_f/r_f$ 和 $T'_f = x'_f/r_f$ 分别为定子绕组开路和短路、**阻尼**绕组开路时**励磁**绕组的时间常数； $T_D = x_D/r_D$ 和 $T'_D = x'_D/r_D$ 分别为定子绕组开路和短路、励磁绕组开路时纵轴**阻尼**绕组的时间常数。

$T_d' > T_d''$ 衰减快

$$i_{dn} = \frac{E_{q(0)}}{x_d} + \left(\frac{E'_{q(0)}}{x'_d} - \frac{E_{q(0)}}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left(\frac{E''_{q(0)}}{x''_d} - \frac{E'_{q(0)}}{x'_d} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}}$$

不计绕组电阻

无阻尼绕组



起始暂态电流

T'_d 衰减结束

$$i_d = \frac{E_{q(0)}}{x_d} + \left(\frac{E'_{q(0)}}{x'_d} - \frac{E_{q(0)}}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left(\frac{E''_{q(0)}}{x''_d} - \frac{E'_{q(0)}}{x'_d} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} - \frac{U_{(0)}}{x'_d} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(t + \delta_0)$$

$$i_q = -\frac{E'_{d(0)}}{x'_q} e^{-\frac{t}{T'_q}} + \frac{U_{(0)}}{x'_q} e^{-\frac{t}{T_a}} \sin(t + \delta_0)$$

$$i_a = \left[\frac{E_{q(0)}}{x_d} + \left(\frac{E'_{q(0)}}{x'_d} - \frac{E_{q(0)}}{x_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} + \left(\frac{E''_{q(0)}}{x''_d} - \frac{E'_{q(0)}}{x'_d} \right) e^{-\frac{t}{T''_d}} \right] \cos(t + \theta_0) \\ + \frac{E'_{d(0)}}{x'_q} e^{-\frac{t}{T'_q}} \sin(t + \theta_0) - \frac{U_{(0)}}{2} \frac{x'_d + x''_q}{x'_d x''_q} \cos(\delta_0 - \theta_0) e^{-\frac{t}{T_a}} \\ - \frac{U_{(0)}}{2} \frac{x''_q - x'_d}{x'_d x''_q} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(2t + \delta_0 + \theta_0)$$

$$i_f = \frac{E_{q(0)}}{x_{ad}} + \left(\frac{x_{ad} x_{D\sigma}}{x_f x_D - x_{ad}^2} \frac{E_{q(0)}}{x'_d} - \frac{x_d - x'_d}{x_{ad}} \frac{U_{q(0)}}{x'_d} \right) e^{-\frac{t}{T'_d}} \\ + \frac{x_d - x'_d}{x_{ad}} \frac{U_{q(0)}}{x'_d} e^{-\frac{t}{T'_d}} - \frac{x_{ad} x_{D\sigma}}{x_f x_D - x_{ad}^2} \frac{U_{(0)}}{x'_d} e^{-\frac{t}{T_a}} \cos(t + \delta_0)$$

p257, 例6.2

$\Delta i_{fn}/\Delta i_{Dn}/\Delta i_{Qn}$ 源于 $f/D/Q$ 绕组磁链守恒, 在其激励下, 定子出现稳态运行时所没有的空载电势, 并导致 i_{dn} 和 i_{qn} 的增量。

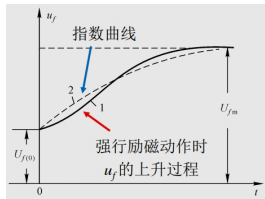
i_{an} 和 $i_{a(2\omega)}$ 源于定子绕组磁链守恒, 感应出 $\Delta i_{f\omega}$, $\Delta i_{D\omega}$, $\Delta i_{Q\omega}$ 。因 x'_d 与 x''_q 大小接近, $i_{a(2\omega)}$ 很小。

$$I_{d(0)} = \frac{E_{q(0)} - U_{q(0)}}{x_d} = \frac{E'_{q(0)} - U_{q(0)}}{x'_d} = \frac{E''_{q(0)} - U_{q(0)}}{x''_d}$$

$$\frac{E'_{q(0)}}{x'_d} - \frac{E'_{q(0)}}{x'_d} = \frac{U_{q(0)}}{x'_d} - \frac{U_{q(0)}}{x'_d}$$

三个恒等式

6.3.3 强行励磁对同步电机三相短路的影响 (前面保持 U_f 不变, U_f 不变)

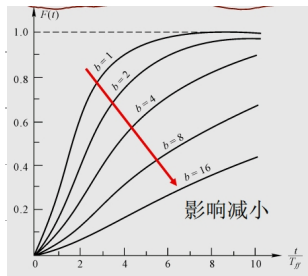


$$\Delta U_f = (U_{fm} - U_{f(0)}) (1 - e^{-t/T_{fH}}) \quad \text{强迫励磁倍数} \quad \frac{U_{fm}}{U_{f(0)}}$$

$I_{fm} = U_{fm}/r_f$ 励磁电流极限值 $E_{gm} = x_{ad} I_{fm}$ 空载电势极限值

$\Delta i_{de} = \frac{\Delta E_{gm}}{x_d} F(t)$ $\Delta i_{fe} = \frac{\Delta E_{gm}}{x_{ad}} F(t) = (I_{fm} - I_{f(0)}) F(t)$ $\Delta i_{ge}(t) = 0$ (无阻尼绕组 U_f 对 i_q 影响小)

非共同



$b = \frac{T_d'}{T_H}$ 越大, f 增加越慢

短路处越远, T_d' 越大, $F(t)$ 上升越慢

短路点离电机越远 (X_e 越大), 机端电压恢复效果越好

计及强行励磁, i_{dn} 应加上 Δi_{de} , 同期周期的余弦也增加 Δi_{de}

有限时, Δi_{de} 上升慢, 对次暂态力明显影响

6.3.4 短路电流最大瞬时值和有效值

短路冲击电流: 短路电流最大可能瞬时值 验算电力设备承受最大电动力的重要依据

空载 ($\delta_0 = 0$)、转子位置角 $\theta_0 = 180^\circ$ (a 相电压过 0) 时, $I_{max} = 0.01s$

非周期电流起始值 $\frac{E_{q0}}{x_d'}$, 与周期电流起始值 I'' 相等, 最大冲击电流 $i_{ch} = k_{ch} I''$

有效值 $I_t = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_t^2 dt} = \sqrt{I_{av}^2 + 2(I''^2 e^{-2t/T_d'})} I_B$ (A 或 kA) 最大有效值 $I_{ch} = \sqrt{I_{(0.01)}^2 + 2(I''^2 e^{-0.01/T_d'})} I_B \approx \sqrt{1 + 2(k_{ch} - 1)^2} I'' I_B$ (A 或 kA)

6.3.5 异步电动机的三相短路电流

视作有阻绕组但无 f 绕组的同步电机

定子短路电流周期分量 不含 T_d' 衰减的自由分量, 且稳态值为 0, 只有次暂态

转子在 d、q 轴对称, $x_d'' = x_q'' = x''$, $T_d'' = T_q'' = T'' \Rightarrow$ 不含倍频交流分量

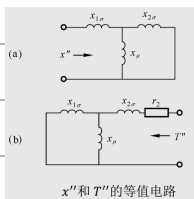
$$i_a = \frac{E_{q(0)}''}{x''} e^{-\frac{t}{T''}} \cos(t + \theta_0) + \frac{E_{d(0)}''}{x''} e^{-\frac{t}{T''}} \sin(t + \theta_0) + I_{n0} e^{-\frac{t}{T_a}}$$

$$= \frac{E_{q(0)}''}{x''} e^{-\frac{t}{T''}} \cos(t + \theta_0 - \alpha_0) + I_{n0} e^{-\frac{t}{T_a}}$$

$\theta_0 - \alpha_0 = 180^\circ$ 时发生三相短路, 非周期 max 幅值 $\approx I''$ $i_{ch} = I'' e^{-\frac{0.01}{T''}} + I'' e^{-\frac{0.01}{T_a}} = k_{ch} I''$

$$x'' = x_{1s} + \frac{x_{1s} x_{2s}}{x_{1s} + x_{2s}} \approx x_{1s} + x_{2s}$$

$$T'' = \frac{x_{1s} + x_{2s}}{r_2} = \frac{x''}{r_2} \text{ 转子电阻}$$



定转子角 $T_a \approx T''$

次暂态电势 $E''_0 = U_{00} - jx''I_{00}$

最后需要指出，只有短路点接近异步电动机端部时，其提供的短路电流才比较大。短路点较远时，端电压与 E'' 相差不大，短路电流就很小，甚至端电压仍大于 E'' ，电动机还从电网吸取电流。

6.4 电力系统三相短路实用计算

元件	假设
同步电机	不考虑同步电机之间的摇摆，即各电机空载电势间的相位差保持不变
短路电流	①倍频交流分量不计；②非周期分量近似计算；③多机短路电流周期分量的变化规律与单机相同
电力线路	①线路对地电容不计；②高压线路的电阻可不计；③电缆和低压线路用纯电抗时，取阻抗模 $\sqrt{r^2 + x^2}$
变压器	①等值励磁接地支路不计；②变压器的电阻可不计
负荷	根据计算任务作不同的简化处理

6.4.1 三相短路起始次暂态电流的计算

周期分量的起始值

假设 $x_d'' = x_q''$

发电机和调相机 $E'' - x_d''$

①直接计算

a) 接近短路点的大量同步和异步电动机 (E'' , x'') — 电源

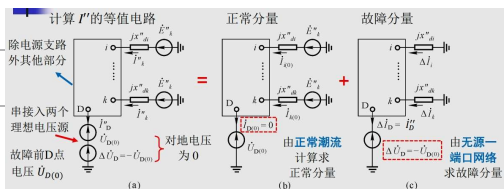
b) 接近短路点的综合负荷 $\Rightarrow$ 等值异步电动机 $x'' = 0.35$

c) 短路点以外的综合负荷 $\Rightarrow$ 阻抗支路 $Z = r + jx = \frac{U^2}{S} (P + jQ)$

$\Rightarrow$ 纯电抗支路 1.2

d) 远离短路点的负荷 $\Rightarrow$ 忽略

②基于叠加原理



只计算短路点的分方便

③ 平均额定电压 (约为额定电压的 1.05 倍) = 各级电压基准值

$$\alpha_s = \alpha_{s+1} \frac{U_N^2}{S_N} \frac{S_B}{U_{MN}^2} = \alpha_{s+1} \frac{S_B}{S_N} \quad \alpha_s = \frac{U_N^2}{600} \frac{S_B}{S_N} \quad U_N = U_{MN} \text{ 只需容量计算}$$

潮流和稳定计算中不允许

- ④ 简易计算方法 ④ 假设: 1) 故障前各节点的电压都等于 **平均额定电压** (标么值为 1), **相位都相同**; 2) 正常电流一般比故障分量小很多, 略去不计, 从而各支路的 I'' 可 **只计故障分量**; 3) 除短路点的 **大型** 电动机及综合负荷用 $E''-x''$ 等值外, **其他负荷都略去不计**; 4) 全部线路及变压器的 **电阻也不计**。

$$a) I_0'' = 1/x_{00} \quad I_i'' = \Delta I_i \quad U_i = 1 + \Delta U_i$$

b) 只计算 **非故障点** 的 I_0'' 误差不大; **短路点** I_0'' 在正常电流较大时误差大

$$c) \text{ 短路容量/功率 } S_D = \sqrt{3} U_N I_0''$$

$$S_D = \sqrt{3} U_{MN} I_0'' = \sqrt{3} U_{MN} I_0'' \frac{S_B}{\sqrt{3} U_{MN}} = I_0'' S_B \quad \text{短路容量}^* = I_0''^*$$

6.4.2 复杂电力系统起始次暂态电流的计算

叠加原理

等值网络中, 只有短路节点 D 加电源, 注入电流为 I_0''

$$\begin{aligned} \Delta U_i &= -Z_{i0} I_0'' & \Delta U_D &= -U_{D(0)} = -Z_{D0} I_0'' & I_0'' &= \frac{U_{D(0)}}{Z_{D0}} \\ U_i &= U_{i(0)} + \Delta U_i = U_{i(0)} - Z_{i0} I_0'' & I_{ij} &= \frac{U_i - U_j}{Z_{ij}} \end{aligned}$$

$$\text{近似计算 } U_{i(0)} = 1 \Rightarrow I_0'' = \frac{1}{Z_{D0}} \quad U_i = 1 - \frac{Z_{i0}}{Z_{D0}} \quad I_{ij} = \frac{1}{Z_{ij}} \frac{Z_{j0} - Z_{i0}}{Z_{D0}}$$

综上, 复杂电力系统计算起始次暂态电流的步骤如下:

- ① 形成计算 **故障分量** 用的 **等值网络** 的节点导纳矩阵;
- ② 解节点电压方程, 求出短路点 D 对应的节点 **阻抗矩阵第 D 列** 元素;
- ③ 计算 **短路点的起始次暂态电流** $I_D'' = U_{D(0)}/Z_{D0}$;
- ④ 计算 **各节点的电压** $U_i = U_{i(0)} - Z_{iD} I_D''$;
- ⑤ 计算 **各支路的起始次暂态电流** $I_{ij} = (U_i - U_j)/Z_{ij}$ 。

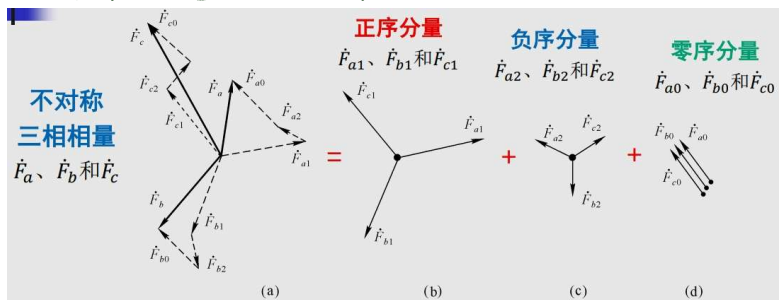
网络简化

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_1 \\ \vdots \\ \dot{I}_m \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1m} & Y_{1,m+1} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{m1} & \cdots & Y_{mm} & Y_{m,m+1} & \cdots & Y_{mn} \\ Y_{m+1,1} & \cdots & Y_{m+1,m} & Y_{m+1,m+1} & \cdots & Y_{m+1,n} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{n,m} & Y_{n,m+1} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{U}_1 \\ \vdots \\ \dot{U}_m \\ \dot{U}_{m+1} \\ \vdots \\ \dot{U}_n \end{bmatrix}$$

保留 $1 \sim m$
消去 $m+1 \sim n$ 联络节点

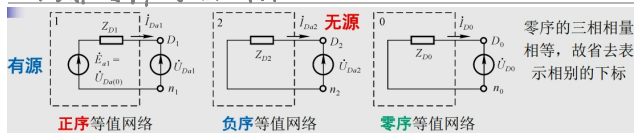
6.5 电力系统不对称运行分析方法——对称分量法

6.5.1 对称分量法及其应用



$$\begin{bmatrix} \dot{F}_a \\ \dot{F}_b \\ \dot{F}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{F}_{a1} \\ \dot{F}_{a2} \\ \dot{F}_{a0} \end{bmatrix} \quad \text{线性} \quad \begin{bmatrix} \dot{F}_{a1} \\ \dot{F}_{a2} \\ \dot{F}_{a0} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{F}_a \\ \dot{F}_b \\ \dot{F}_c \end{bmatrix}$$

正/负/零序等值网络



三序分量互不相关

$$\dot{U}_{Da1} = \dot{U}_{Da(0)} - Z_{D1} \dot{I}_{Da1}$$

$$\dot{U}_{Da2} = -Z_{D2} \dot{I}_{Da2}$$

$$\dot{U}_{D0} = -Z_{D0} \dot{I}_{D0}$$

若D点发生a相金属性接地短路 $\Rightarrow \dot{U}_{Da} = 0, \dot{I}_{Db} = 0, \dot{I}_{Dc} = 0$

$$\downarrow$$

$$\dot{I}_{Da1} = \dot{I}_{Da2} = \dot{I}_{D0}$$

正序网络的结构和元件参数与正常运行的等值网络相同

负序网络的结构和正序网络相同，但负序电势为0，负序阻抗与正序不同

零序与正序很大差别

发电机/负荷

6.5.2 同步电机负序和零序阻抗

负序电抗 $x_2 \approx \frac{1}{2}(x_d + x_q)$

负序电阻 $>$ 正序电阻, 但较 x_1 小得多, 一般忽略

零序电抗 $x_0 = (0.5 \sim 0.6) x_d$

零序电阻 = 正序电阻

6.5.3 异步电动机和综合负荷的负序及零序阻抗

异步电动机的负序阻抗 $z_2 = (r_1 + \frac{s}{1-s}) + j(x_1 + x_2) \approx r_1 + \frac{s}{1-s} + jx_2$ 不接地Y/Δ

综合负荷的负序阻抗由各用电设备的负序阻抗和供电线路阻抗确定, Δ/Y

随负荷成分不同而异

零序电流不流通

$z_2 = \textcircled{1} 0.18 + j0.24 (6 \sim 10 \text{ kV})$ $\textcircled{2} 0.19 + j0.36 (35 \text{ kV})$

零序网络中用不到

$\textcircled{2} z_2 = j0.35$

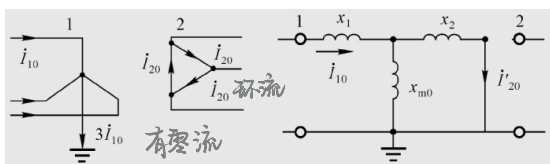
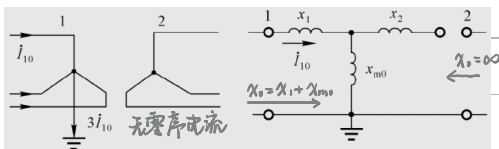
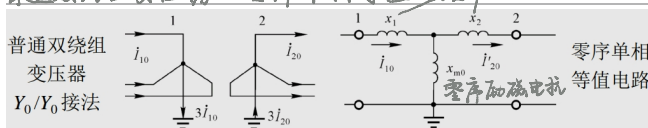
后者的零序阻抗

6.5.4 三相变压器零序参数和等值电路

正、负序参数和等值电路完全相同

1. 普通变压器零序等值电路

普通双绕组变压器的零序单相等值电路 零序漏抗

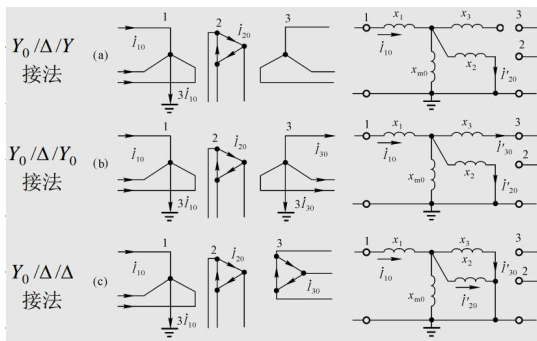


$$x_0 = x_1 + \frac{x_2 x_{m0}}{x_2 + x_{m0}} \approx x_1 + x_2$$

$$x_0 = 0$$

Y/Y、Y/Δ 都有 $x_0 = \infty$

普通三绕组变压器的零序单相等值电路



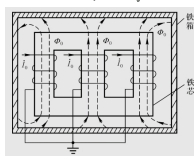
各相铁心是独立的

零序励磁电流和正序一样,可

认为 $x_{m0} = \infty$

零序漏抗 = 正序漏抗

三相三柱式变压器



正/负序电压, 励磁电抗很大

零序电压, x_{m0} 为有限值

只有 Y_0/Y 、 Y_0/Y_0 和 $Y_0/Y_0/Y$ 等零序阻抗数值有限的 x_{m0}

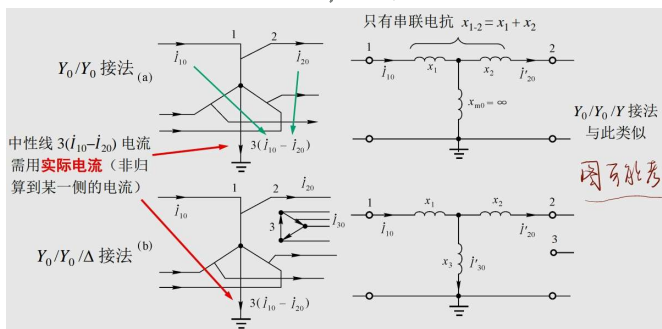
中性点经阻抗接地时的零序等值电路

零序等值电路必须计及接地阻抗

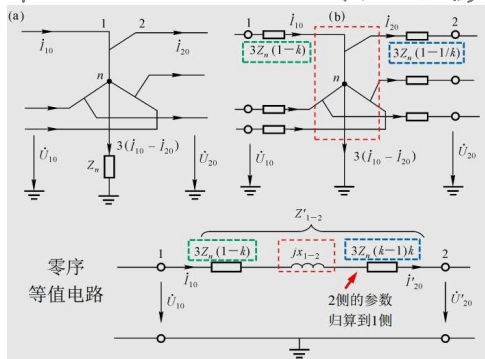
2. 自耦变压器零序等值电路

三个单相自耦变压器构成三相, x_{m0} 可处理为无穷大

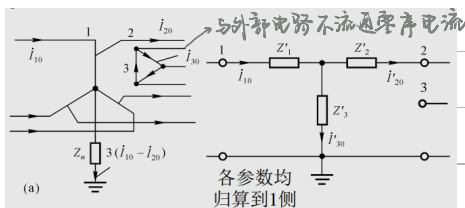
中性点直接接地时的零序和普变完全相同.



中性点阻抗接地的Y₀/Y₀自耦变压器



中性点阻抗接地的Y₀/Y₀/Δ自耦变压器



三相三柱式自耦变压器

α_{m0} 为有限值, 若有 Δ 接法的第三绕组, 仍可忽略 α_{m0}

Y/Y 和 Y₀/Y₀/Y 接法, 零序漏抗与正序漏抗完全不同, 且需计及有限值 α_{m0}

6.6.5 电力线路零序参数和等值电路

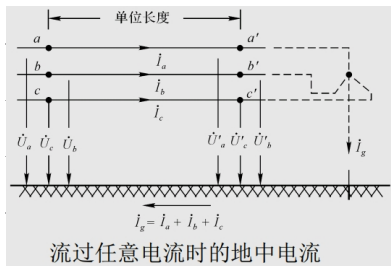
流正/负序电流时, 空间磁场只取决于三相导线本身

流零序电流时, 空间磁场取决于三相导线本身, 以及大地和避雷线及其中电流

零序 Z 与正序 Z 不同

加零序电压, 每相 0 序等值 C 也与正序不同

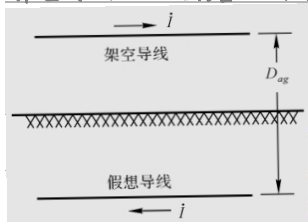
1. 单回路架空线的零序阻抗



正序(负序)阻抗 $Z_1 = Z_L - Z_M$

零序阻抗 $Z_0 = Z_L + 2Z_M$

架空导线—地回路的自感



$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{D_{ag}}{r} + \frac{1}{4} \right) + \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D_{ag}}{R_g} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{D_{ag}^2}{r R_g} + \frac{1}{4} \right) = \frac{\mu_0}{2\pi} \left(\ln \frac{D_g}{r} + \frac{1}{4} \right) \text{ (H/m)}$$

式中, $D_g = D_{ag}^2 / R_g$ 称假想导线的等值深度, 可推出 $D_g = 660 / \sqrt{f\gamma}$, 其中 f 为电流的频率(Hz), γ 为大地电导率(S/m)。

电力线路的零序阻抗

自感抗 $x_L = 2\pi f L = 0.06283 \ln \frac{D_g}{r} + 0.0157 \text{ (}\Omega/\text{km)}$

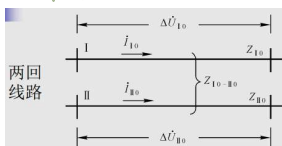
自阻抗 $Z_L = (r_1 + r_g) + j(0.06283 \ln \frac{D_g}{r} + 0.0157) \text{ (}\Omega/\text{km)}$

互阻抗 $Z_M = Z_L - Z_1 = r_g + j 0.06283 \ln \frac{D_g}{D_m} \text{ (}\Omega/\text{km)}$

零序阻抗 $Z_0 = Z_L + 2Z_M = (r_1 + 3r_g) + j(0.06283 \ln \frac{D_g^3}{r D_m^2} + 0.0157)$

$$= (r_1 + 3r_g) + j(0.1885 \ln \frac{D_g}{\sqrt[3]{r D_m^2}} + 0.0157) \text{ (}\Omega/\text{km)}$$

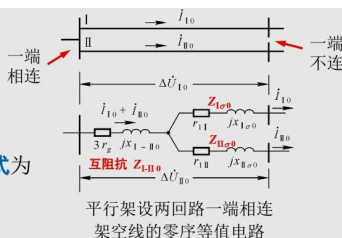
2. 平行架设的两回路架空线零序阻抗



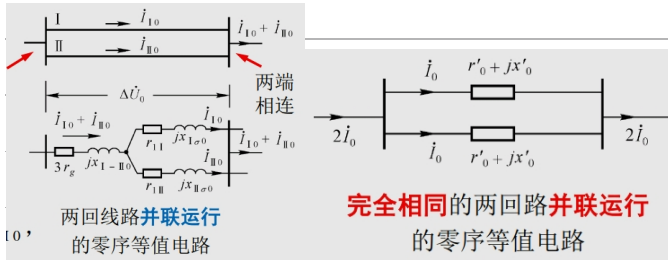
上图两线路零序电路的电压方程式为

$$\Delta U_{10} = Z_{10} I_{10} + Z_{1-20} I_{20}$$

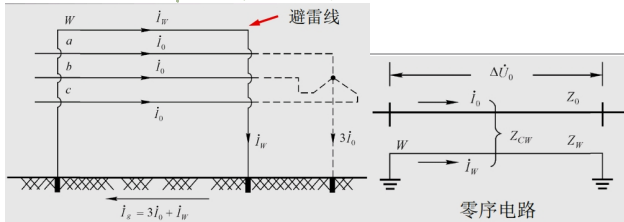
$$\Delta U_{20} = Z_{20} I_{20} + Z_{2-10} I_{10}$$



由于有故障线路

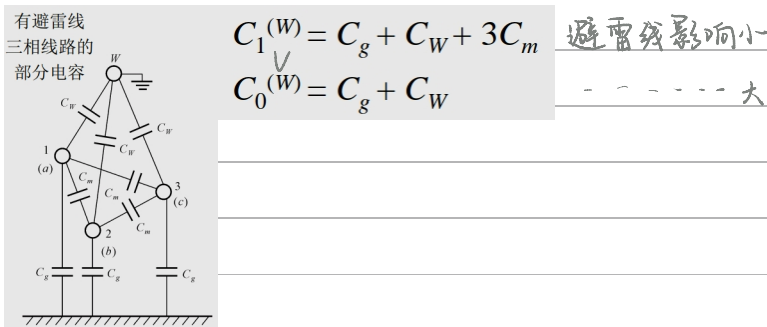


3. 避雷线对架空线路零序参数的影响



避雷线相当于一个与三相导线有磁耦合的短路线圈,使得 $\alpha_0^{(m)} \downarrow$, $r_0^{(m)} \uparrow$

4. 架空线路零序电容



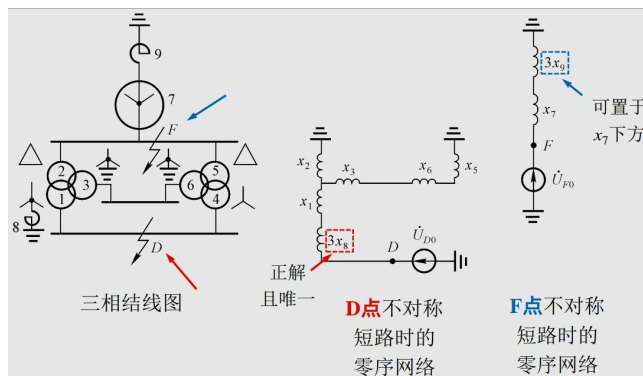
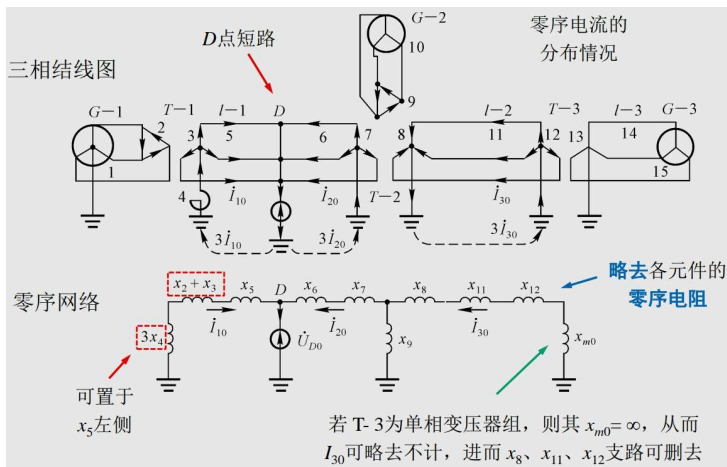
5. 三芯电力电缆的零序参数

铅包电流 $\uparrow$, 零序电抗 $\downarrow$, 零序电阻 $\uparrow$

6.5.6 电力系统的零序等值网络

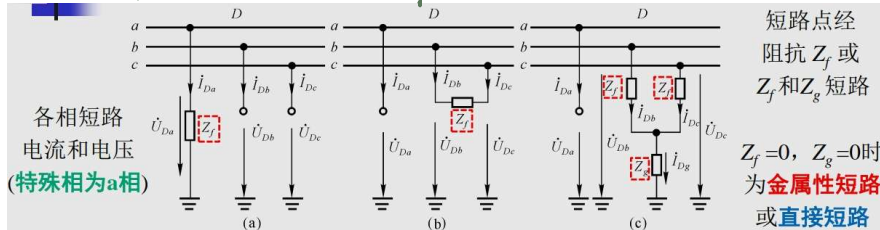
发电机无零序电势, 仅在不对称故障点加 0 序电压源

三相 0 序电流完全相同,

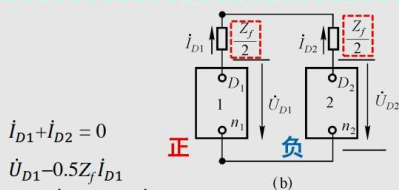
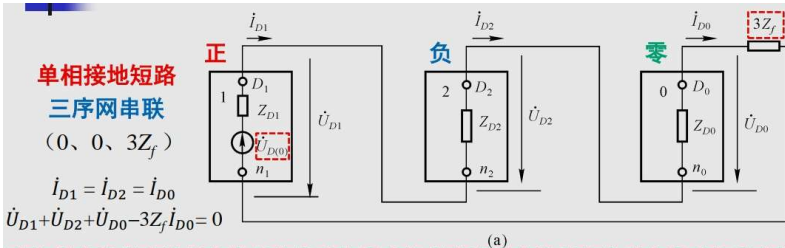


6.6 电力系统不对称短路分析

6.6.1 各种不对称短路的故障点电流和电压

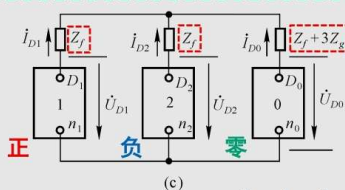


边界条件	电压、电流关系	各序电流关系	各序电压关系
单相接地短路 (a)	$i_{Db} = i_{Dc} = 0$ $\dot{U}_{Da} = Z_f i_{Da}$	$i_{D1} = i_{D2} = i_{D0}$	$\dot{U}_{D1} + \dot{U}_{D2} + \dot{U}_{D0} - 3Z_f i_{D0} = 0$
两相短路 (b)	$i_{Da} = 0$ $i_{Db} + i_{Dc} = 0$ $\dot{U}_{Db} - \dot{U}_{Dc} = Z_f i_{Db}$	$i_{D1} + i_{D2} = 0$ $i_{D0} = 0$	$\dot{U}_{D1} - 0.5Z_f i_{D1} = \dot{U}_{D2} - 0.5Z_f i_{D2}$ $\dot{U}_{D0} = 0$ (零序网)
两相接地短路 (c)	$i_{Da} = 0$ $\dot{U}_{Db} = Z_f i_{Db} + Z_g (i_{Db} + i_{Dc})$ $\dot{U}_{Dc} = Z_f i_{Dc} + Z_g (i_{Db} + i_{Dc})$	$i_{D1} + i_{D2} + i_{D0} = 0$	$\dot{U}_{D1} - Z_f i_{D1} = \dot{U}_{D2} - Z_f i_{D2} = \dot{U}_{D0} - (Z_f + 3Z_g) i_{D0}$



两相短路
正负序网并联
($Z_f/2, Z_f/2$)

零序网:
 $i_{D0} = 0, \dot{U}_{D0} = 0$



两相接地短路
三序网并联
($Z_f, Z_f, Z_f + 3Z_g$)

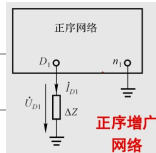
统一表示 $\dot{I}_{D1} = \frac{\dot{U}_{D(0)}}{Z_{D1} + \Delta Z}$ $\dot{U}_{D1} = \dot{I}_{D1} \Delta Z$ $\dot{I}_D = M \dot{I}_{D1}$

短路种类	ΔZ	$M = I_D / I_{D1}$
单相短路	$Z_{D2} + Z_{D0} + 3Z_f$	3
两相短路	$Z_{D2} + Z_f$	$\sqrt{3}$
两相接地短路	$Z_f + \frac{(Z_{D2} + Z_f)(Z_{D0} + Z_f + 3Z_g)}{Z_{D2} + Z_{D0} + 2Z_f + 3Z_g}$	$\sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{x_{D2}x_{D0}}{(x_{D2} + x_{D0})^2}}$
三相短路(金属性)	0	1

$$\Delta Z = \frac{x_{D2}x_{D0}}{x_{D2} + x_{D0}}$$

假设金属性短路，且不计零/负序网电阻

正序等效定则：不对称短路故障点的 $\dot{I}_{D1}$ 与同一点经阻抗 ΔZ 三相短路时的短路电流相等



短路点故障相的短路电流

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{单相接地短路 } \dot{I}_{D1} = \dot{I}_{D2} = \dot{I}_{D0} \quad \dot{I}_{Da} = \dot{I}_{D1} + \dot{I}_{D2} + \dot{I}_{D3} = 3\dot{I}_{D1} \\ \text{两相短路 } \dot{I}_{D1} = -\dot{I}_{D2}, \dot{I}_{D0} = 0 \quad \dot{I}_{Db} = -j\sqrt{3}\dot{I}_{D1} \quad \dot{I}_{Dc} = j\sqrt{3}\dot{I}_{D1} \\ \text{两相接地短路 } \dot{I}_{D2} = -\frac{x_{D0}}{x_{D2} + x_{D0}} \dot{I}_{D1} \quad \dot{I}_{D0} = -\frac{x_{D2}}{x_{D2} + x_{D0}} \dot{I}_{D1} \end{array} \right.$$

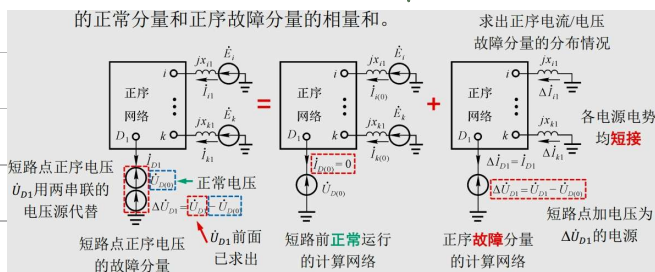
金属性两相接地短路 ($Z_f = Z_g = 0$)

$$\dot{I}_{Db} = \left(a^2 - \frac{ax_{D0} + x_{D2}}{x_{D2} + x_{D0}} \right) \dot{I}_{D1} \quad \dot{I}_{Dc} = \left(a - \frac{a^2x_{D0} + x_{D2}}{x_{D2} + x_{D0}} \right) \dot{I}_{D1} \quad M = \sqrt{3} \cdot \sqrt{1 - \frac{x_{D2}x_{D0}}{(x_{D2} + x_{D0})^2}}$$

6.6.2 不对称短路时网络中电流和电压的分布

+ 网络：叠加原理

的正常分量和正序故障分量的相量和。



-、0 网络：只短路点存在一或 0 的电压源

-、0 电压，离短路点越远越小；+ 电压相反

Y/Δ-11 变压器 $\begin{cases} Y \rightarrow \Delta & + \text{相量逆时针 } 30^\circ \quad - \text{相量顺时针 } 30^\circ \\ \Delta \rightarrow Y & + \text{相量顺时针 } 30^\circ \quad - \text{相量逆时针 } 30^\circ \end{cases}$

Y/Δ-12 变压器 $+,-$ 电压、电流无相位差，若两侧中性点接地，则 0 V, 2 也无相移

6.6.3 复杂电力系统简单不对称短路电流的计算

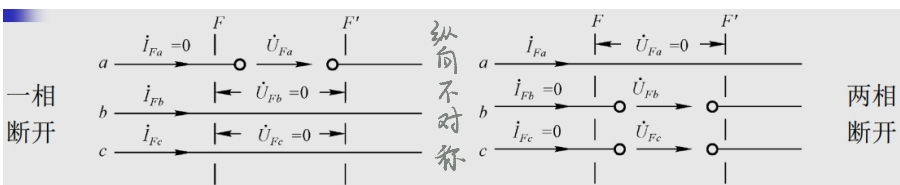
①用潮流计算求出各节点正常电压；②形成各序网络的Y；③求各序网Z的第D列；④用正序等效定则计算短路点的各序电流；⑤计算各节点正序电压和各支路正序电流；⑥负序；⑦零序；⑧合成三相。

6.7 电力系统非全相运行

一相或两相断开

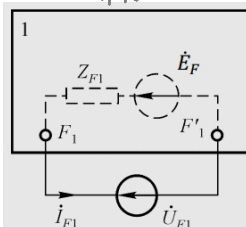
主要原因：架空线路装有分相操作的断路器，一相或两相跳闸

其它原因：... 一相或两相导线断线，但断线落地的同时接地短路

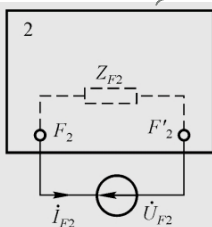


有源

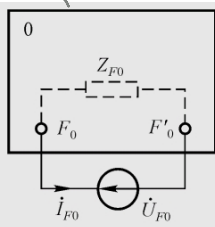
无源



正序网络



负序网络



零序网络

$$\begin{cases} \dot{U}_{F1} = \dot{E}_F - Z_{F1} i_{F1} \\ \dot{U}_{F2} = -Z_{F2} i_{F2} \\ \dot{U}_{F0} = -Z_{F0} i_{F0} \end{cases}$$

边界条件	电压、电流关系	各序电流关系	各序电压关系
一相开断	$\dot{I}_{Fa} = 0, \dot{U}_{Fb} = \dot{U}_{Fc} = 0$	$\dot{I}_{F1} + \dot{I}_{F2} + \dot{I}_{F0} = 0$	$\dot{U}_{F1} = \dot{U}_{F2} = \dot{U}_{F0}$
两相开断	$\dot{I}_{Fb} = \dot{I}_{Fc} = 0, \dot{U}_{Fa} = 0$	$\dot{I}_{F1} = \dot{I}_{F2} = \dot{I}_{F0}$	$\dot{U}_{F1} + \dot{U}_{F2} + \dot{U}_{F0} = 0$

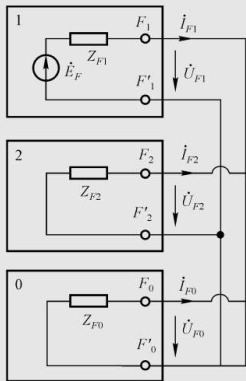
一相开断 (a相)

复合序网

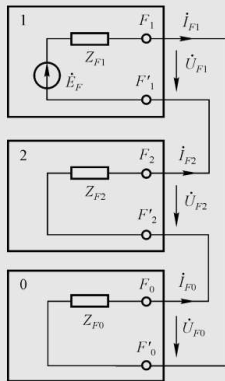
两相短路

三序网

并联



(a)



(b)

两相开断

(b、c相)

复合序网

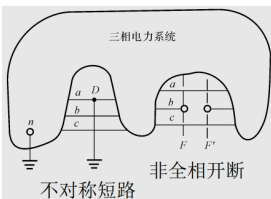
单相短路

三序网

串联

$$\dot{I}_{F1} = \frac{\dot{E}_F}{Z_{F1} + \Delta Z} \quad \dot{U}_{F1} = \dot{I}_{F1} \Delta Z \quad \Delta Z \begin{cases} \text{一相断开} & Z_{F1}, Z_{F0} / (Z_{F2} + Z_{F0}) \\ \text{两相断开} & Z_{F2} + Z_{F0} \end{cases}$$

6.8 电力系统复杂故障分析概述



$$\begin{bmatrix} \dot{U}_{D1} \\ \dot{I}_{F1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11(1)} & H_{12(1)} \\ H_{21(1)} & H_{22(1)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{D1} \\ \dot{U}_{F1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{U}_{D(0)} \\ \dot{I}_{F(0)} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \dot{U}_{D2} \\ \dot{I}_{F2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11(2)} & H_{12(2)} \\ H_{21(2)} & H_{22(2)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{D2} \\ \dot{U}_{F2} \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \dot{U}_{D0} \\ \dot{I}_{F0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_{11(0)} & H_{12(0)} \\ H_{21(0)} & H_{22(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_{D0} \\ \dot{U}_{F0} \end{bmatrix}$$

- 以a相为基准，D点a相直接接地短路点的边界条件 $\dot{I}_{D1} = \dot{I}_{D2}, \dot{I}_{D1} = \dot{I}_{D0}, \dot{U}_{D1} + \dot{U}_{D2} + \dot{U}_{D0} = 0$ ，F处b相开断的边界条件 $a^2 \dot{I}_{F1} + a \dot{I}_{F2} + \dot{I}_{F0} = 0, a^2 \dot{U}_{F1} = \dot{U}_{F0}, a \dot{U}_{F2} = \dot{U}_{F0}$ （一个三相网络只能指定某一相为基准）。6个序网方程式加6个边界条件共12个方程，联立求解可得12个变量。

