

例

继电保护整定的实用故障计算举

主讲人：周羽生

长沙理工大学电力工程系

18874835197

zysdl0193@sina.com

2013.8

第一节

实用短路电流

■ 1-1 线路电阻短路点的电弧电阻与负荷电流

(1) 对于 35kV 及以上的网络，一般可不计电阻；对 35kV 以下的网络，需要考虑电阻；对发电机变压器的电阻也不考虑。但在距离保护整定时要考虑线路阻抗角。但用计算机计算时考虑电阻并不困难。一般都加以考虑以提高计算的精度。

(2) 短路点的电弧电阻（也叫过渡电阻），对电流、电压值以及电流、电压的相位产生影响。在一般情况下，短路计算均假定为金属性短路，不计电弧电阻的影响。接地短路常常通过某些物质（铁塔、树枝等）接地，过渡电阻较大，有时需要考虑，尤其是在灵敏度校验应加以考虑。对距离保护要校验承受过渡电阻的能力。

电弧电阻的特性是非线性电阻性的，短路瞬间电弧电阻最小的约为几个欧姆，电流最大，电弧长度最短。随着短路的时间延长，电弧长度加长（由于风力、空气对流和电动力等影响），电弧电阻将增大。目前计算电弧电阻的方法，是根据电弧中的电位梯度得出的经验公式计算的。据研究认为电位梯度约为 1050 伏 / 米左右。

当电弧电阻中的电流大于 250 ~ 300A 时，短路瞬间（约 0.1 ~ 0.2s 内）的电弧电阻近似用下式表示：

$$(欧) \quad R_h \approx 1050 \frac{L_h}{I_h}$$

(2-1)

式中：
 I_h

——电弧长度（米）

——电弧中的电流（安），

即短路点的总电流。

短路瞬间电弧的长度 L 短，当两相短路时 I_h

等于导线间距离，

其他可根据具体情况分析来定。

(3) 负荷电流对短路（尤其是不对称短路）电流

的影响较大，在手工计算时一般不考虑。在用计算机计算时可加以考虑，即先计算短路前负荷状态下的电流、电压，再用迭加原理与不考虑负荷时的计算结果迭加，以得到实际的电流电压。

1-2、关于设备参数问题

1、发电机参数

作快速保护计算用，的次暂态电抗值，
为了可靠也可用饱和值。

X_d'' 的标么值 是以发电机额定容量为基准的。有的发电机铭牌标有几种工作状况的，按国家标准它是对应于小容量工况的。例如：一台发电机 $P_e=100\text{MW}$ ， $\cos\varphi=0.85$ （对入口风温为 40°C 时，） $\cos\varphi=0.8$ （对入口风温为 30°C 时），则其是以 $\cos\varphi=0.85$ 的容量为基准， $S_b=S_n=100/0.85=117.5\text{kVA}$ 。

2、 变压器参数

正序电抗用铭牌值（即出厂实验值）

零序电抗，对于 Y_0/Δ 的三相五柱式、壳式单相变压器组其 $X_0=X_1$ ，对于 Y_0/Δ 的三相三柱式变压器。其 $X_0<X_1$ 据实测结果 $X_0\approx(0.75\sim0.8)X_1$ ，目前变压器零序电抗应实测为好。对于 Y/Y_0 的三柱式变压器， $X_0=X_1+X_\mu$ 具体值应实测。对 Y_0/Y 全星形自耦变压器零序电抗必须实测。

3、 架空线参数

- 正序电抗的计算值与实测值基本相符，可以用计算值。但是对于零序电抗，因受大地电导率及其他屏蔽等影响较大。应用实测值。
- 有架空地线的单回线，其范围一般为 $X_0 \approx (2.5 \sim 3.5)X_1$ ，
- 单回分裂式导线为 $X_0 \approx (3 \sim 3.5)X_1$ 。
- 平原地区 X_0 较小，山地 X_0 较大，。
- 对于双回线的差电流系数（包括正序，零序），用计算值是不准确的，应进行实测。
- 对于双回线间的零序互感系数，因为受影响的因素更多，更应进行实测。

1-3 短路电流的衰减

- 短路电流的周期分量也要衰减，由暂态过渡到稳态的过程约为 3 ~ 5 秒。短路点的远近影响衰减常数，对短路电流的衰减也有很大的影响，在运用计算曲线时，当计算电抗（以电源容量为基础的标么电抗） $X_{jx}^* \geq 3$ ，表示短路点很远，可不考虑衰减。

稳态电势标么值 $E_{\infty}^* = 0.2 + KI_L^*$ (2-2)

I_L^* ——励磁电流标么值（以本机额定励磁为基准）

K ——常数，汽轮机取 0.8；对于水轮机，当励磁电流不超过额定负荷下的 I_L^* 时取 0.8，否则取 0.7。

令 $0 \cdot k \cdot Z$ = 发电机短路比，即励磁电流标么值为 1 时的发电机机端三相短路稳态电流，则 I_L^* 不等于 1 时同步电抗

$$X_{d\infty}^* = \frac{E_{\infty}^*}{0 \cdot k \cdot Z \cdot I_L^*} \quad (2-3)$$

$$I_{\infty}^* = \frac{E_{\infty}^*}{X_{d\infty}^* + X_*} \quad (2-4)$$

式中： $X_{d\infty}^*$ ——发电机同步电抗标么值。

X_* ——发电机以外的网络电抗标么值

在额定励磁电流 $I_L^* = 1$ 情况下，机端三相短路
的稳态电流

$$I_\infty = E_\infty^* / X_{d\infty}^* = 0 \cdot k \cdot Z$$

上述计算结果用于 $I_\infty \cdot X \leq U_e$ 时。

若 $I_\infty \cdot X > U_e$ 说明机端电压不变了，

则改用下式：

$$I_\infty = \frac{U_e}{X} \quad (2-5)$$

式中 I_e 和 U_e 为发电机的额定电流和电压。

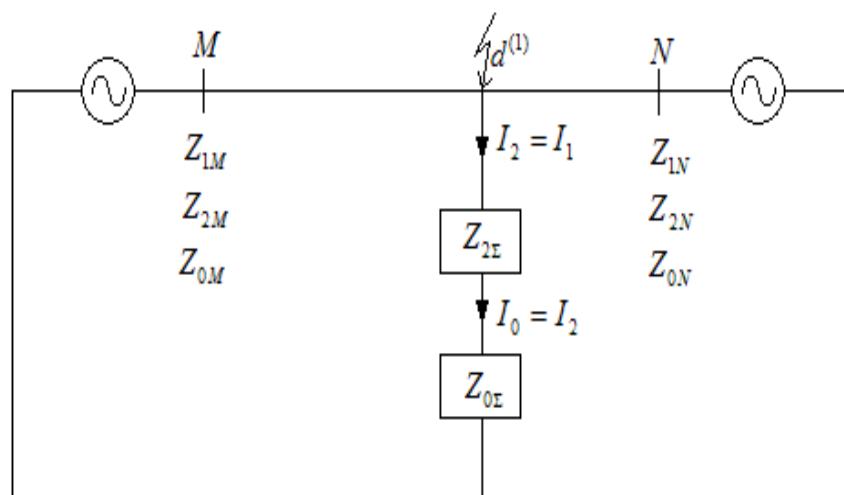
- 对多电源的降压系统，不论保护动作时间多少，均可不考虑衰减。
- 对多电源系统但靠近电厂出线的短路点，当保护时间在 2.5s 左右时，一般不考虑衰减，而保护动作时间在 2.5 ~ 3 s 以上时，应计算距短路点较近的电厂所供短路电流的衰减。
- 对单机、单电厂的电源，因电源容量和短路点远近对电流衰减均有影响，故应以计算阻抗 $X_{jx}^* \geq 3$ 来判断，但通常对 2s 以上动作时间的保护才考虑衰减。
- 考虑短路电流衰减的常用方法是运算曲线法，尽管此法比较老，还有不足之处但因比较简便，故仍然常常应用。
- 对不同型式发电机组组成的电源，应查平均运算曲线。

1-4 短路计算常用公式与电流电压分布规律

- 计算电势（电压） E_{ε}^* 的选取，在 3kV 以上的系统中可取 $E_{\varepsilon}^*=1$ 。在厂用系统和 3kV 以下的系统中，可取降压变压器的高压母线 $U^*=1$ （即取电源系统的阻抗 $X_{xt}=0$ ）。
- 常用短路计算的公式见表 2-1，表中设不考虑电阻，各元件的正序阻抗等于负序阻抗，其短路电压变化情况见图 2-1，短路点的电流电压向量图见图 2-2，变压器中零序电流分布见图 2-3，各序电流的分布按各序网的支路阻抗成反比分配，与其它序网无关，而各序电流的绝对值则与各序综合电抗有关。

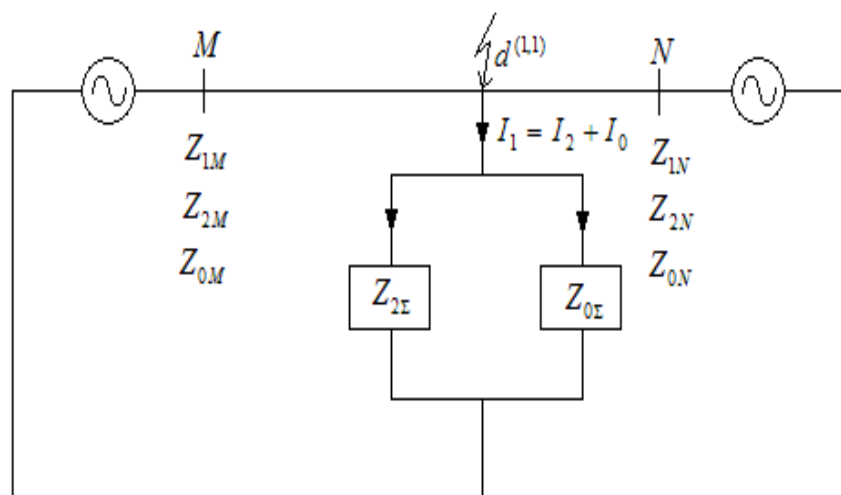
- 不对称短路：短路点非故障相中无短路电流，但**对于双电源线路中的非故障相电流不一定为零**。因为各支路中两侧的正序电抗、负序电抗、零序电抗三者之比一般是不相同的，因而各支路中各序电流之比与短路点各序电流之比也不相同，故各支路中非故障相的全电流即 $\dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3$ 向量和必然不为零。
- 各点的序电压，在不对称短路计算中都是相电压值，当需用线电压时正、负序线电压是相电压大 $\sqrt{3}$ 的倍，零序电压各相相同，其相间电压为零。

- 单相和两相接地短路时，非故障相电压有可能超过额定相电压，这是由于故障相的故障电流对非故障相的互感造成的，其值要视 $X_{0\Sigma}$ 与 $X_{1\Sigma}$ 的大小而定；当 $X_{0\Sigma} > X_{1\Sigma}$ 时，电压将超过额定相电压而出现过电压；当 $X_{0\Sigma} < X_{1\Sigma}$ 时，则低于额定相电压。
- 各序中电流电压的向量关系，决定于各序的阻抗角，一般假定为纯电抗性时，正序电流落后正序电压 90° ，负序电流超前负序电压 90° ，零序电流超前零序电压 90° 。



$$Z_{2\Sigma} = Z_{2M} // Z_{2N} \quad Z_{0\Sigma} = Z_{0M} // Z_{0N}$$

单相接地



负序阻抗 $Z_{2\Sigma}$ 越大，则 I_0 越大

两相接地

图1 单相和两相接地等效图，零序电流大小与 $Z_{1\Sigma}$ 和 $Z_{2\Sigma}$ 大小有关，在最大方式时零序电流大

短路点短路前电压为

$$\begin{aligned} U &= E_1 - IZ_1 = E_1 - \frac{E_1 - E_2}{Z_1 + Z_2} * Z_1 \\ &= \frac{E_1(Z_1 + Z_2) - E_1Z_1 + E_2Z_1}{Z_1 + Z_2} = \frac{E_1Z_2 + E_2Z_1}{Z_1 + Z_2} \end{aligned}$$

$$= E_{\Sigma} - I_1 Z_{1\Sigma} \approx E_{\Sigma} - I_1 X_{1\Sigma}$$

$$E_{\Sigma} = U + I_1 X_{1\Sigma}$$

- 单相接地与两相接地短路中，负序电流、零序电流大小的比较：

- 单相接地：
$$I_{d \cdot 0}^{(1)} = \frac{E_{\Sigma}}{X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}$$

- 两相接地：
$$I_{d \cdot 0}^{(1.1)} = \frac{E_{\Sigma}}{X_{1\Sigma} + \frac{X_{2\Sigma} \cdot X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}} \cdot \frac{X_{2\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}$$

- 当取 $X_{1\Sigma} = X_{2\Sigma}$ ，则：

$$I_{d \cdot 0}^{(1)} = \frac{E_{\Sigma}}{2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma}}$$

$$I_{d \cdot 0}^{(1.1)} = \frac{E_{\Sigma}}{X_{1\Sigma} + 2X_{0\Sigma}}$$

■ 用 K_0 表示两相接地与单相接地短路的零序电流之比为：

$$K_0 = \frac{I_{d0}^{1.1}}{I_{d0}^1} = \frac{2X_{1\Sigma} + X_{0\Sigma}}{X_{1\Sigma} + 2X_{0\Sigma}} = \frac{2 + \frac{X_{0\Sigma}}{X_{1\Sigma}}}{1 + 2\frac{X_{0\Sigma}}{X_{1\Sigma}}}$$

■ 由上式可见，当 $\frac{X_{1\Sigma}}{X_{0\Sigma}} = \frac{X_{1\Sigma}}{X_{0\Sigma}}$ 时， $K_0 = 1$ ， $I_{d0}^{(1)} = I_{d0}^{(1.1)}$ 。
 当 $\frac{X_{1\Sigma}}{X_{0\Sigma}} > \frac{X_{1\Sigma}}{X_{0\Sigma}}$ 时， $K_0 < 1$ ， $I_{d0}^{(1)} > I_{d0}^{(1.1)}$ 。
 当 $\frac{X_{1\Sigma}}{X_{0\Sigma}} < \frac{X_{1\Sigma}}{X_{0\Sigma}}$ 时， $K_0 > 1$ ， $I_{d0}^{(1)} < I_{d0}^{(1.1)}$ 。

■ 根据 K_0 公式可画出 $K_0 = f(\frac{X_{0\Sigma}}{X_{1\Sigma}})$ 曲线，当已知一种接地短路的零序电流时，可方便地得到另一种接地短路地零序电流值。

■ 用上述方法，也可找出负序电流在单相接地和两相接地的比例关系。当 $X_{0\Sigma} > X_{1\Sigma}$ 时， $I_{d2(1)} > I_{d2(1.1)}$ ，当 $X_{0\Sigma} < X_{1\Sigma}$ 时， $I_{d2(1)} < I_{d2(1.1)}$ 。

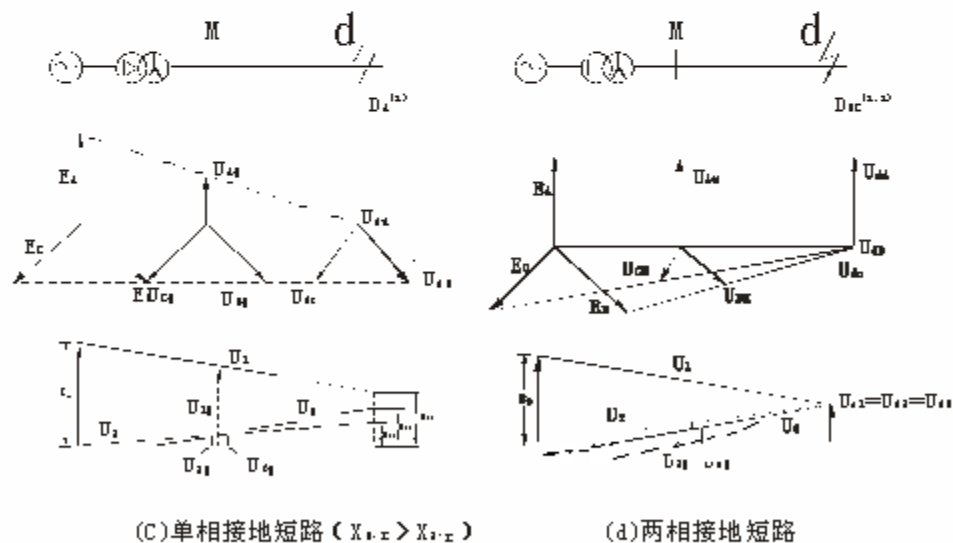
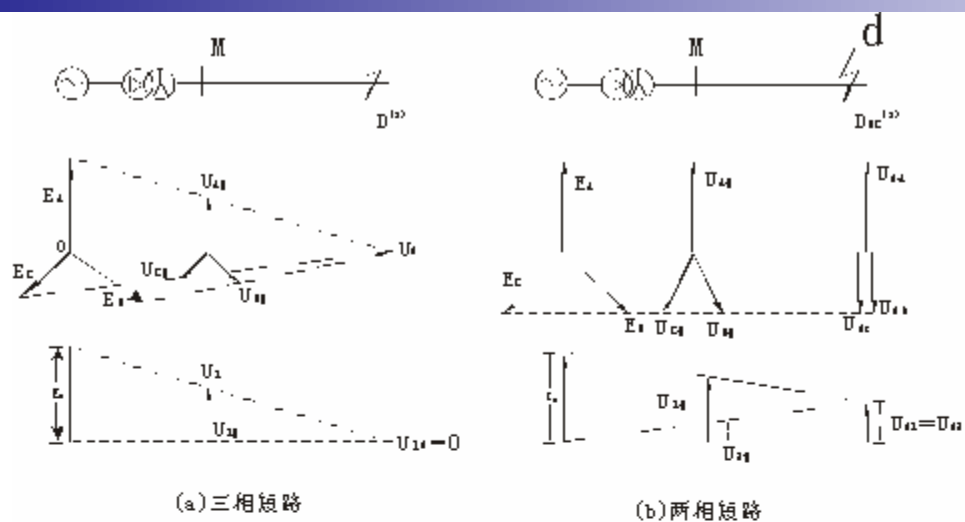
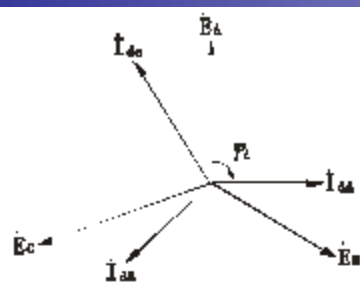
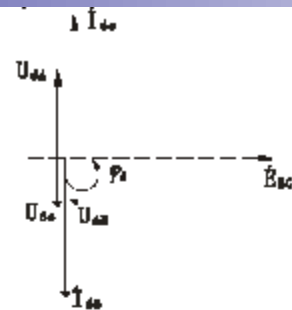


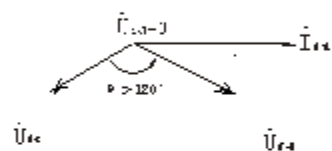
图 2-1 短路情况下电压变化图
(每组图中, 上图为相电压向量; 下图为序电压)



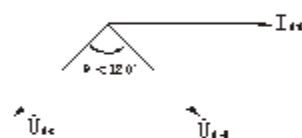
(a) 三相短路 $\varphi_k = 90^\circ$



(b) BC两相短路 $\varphi_k = 90^\circ$

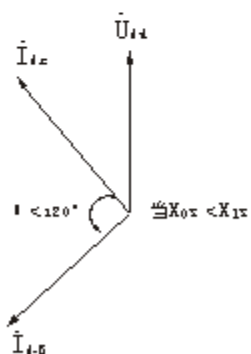


当 $X_{0x} < X_{1x}$ 时



当 $X_{0x} > X_{1x}$ 时

(c) A相单相接地短路 $\varphi_k = 90^\circ$

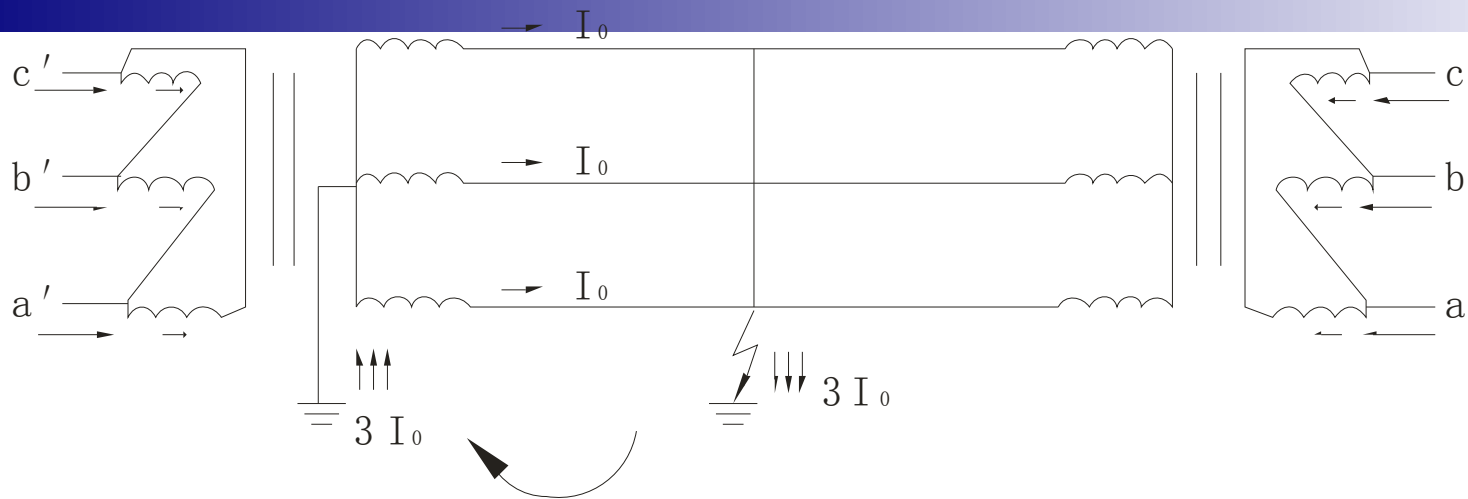


(d) BC两相接地短路 $\varphi_k = 90^\circ$

图2-2 各种短路的短路电流、电压向量图

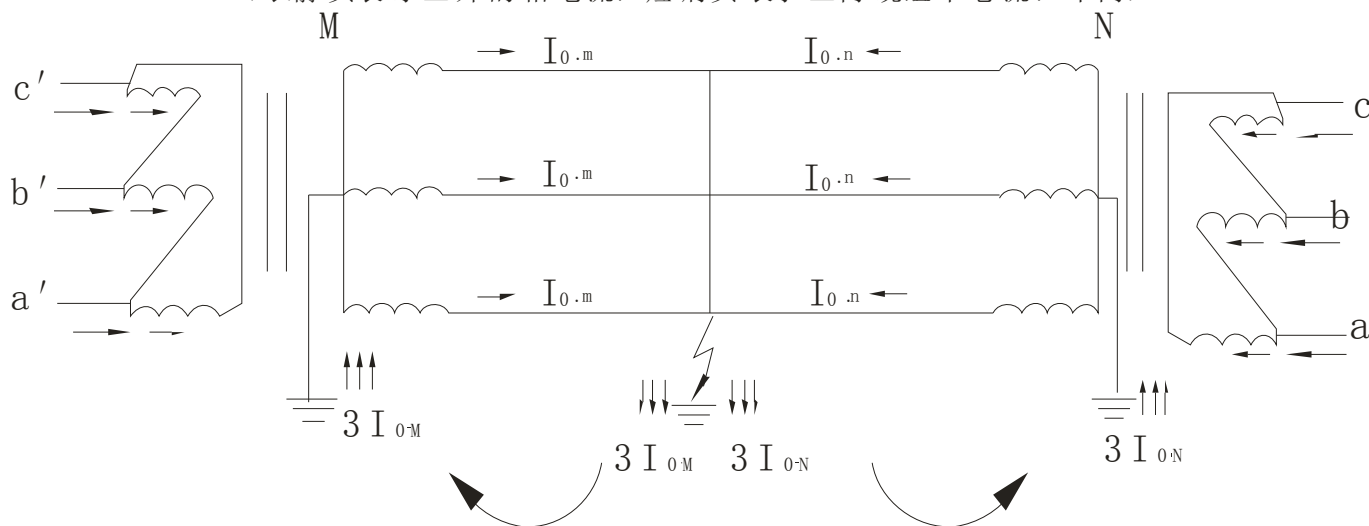
表2-1 常用短路计算公式

短路点 待求量名称	短 路 种 类		
	B c两相短路	A相单相接地短路	B c两相接地短路
A相正序电流	$I_{a1} = \frac{E_{a\Sigma}}{j(X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma})}$	$I_{a1} = j \frac{E_{a\Sigma}}{(X_1 + X_{0\Sigma})}$	$I_{a1} = \frac{E_{a\Sigma}}{j(X_1 + \frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}})}$
A相负序电流	$I_{a2} = -I_{a1}$	$I_{a2} = I_{a1}$	$I_{a2} = -I_{a1} - \frac{X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}$
零序电流	$I_0 = 0$	$I_0 = I_{a1}$	$I_0 = -I_{a1} - \frac{X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}$
A相电流	$I_a = 0$	$I_a = 3I_{a1}$	$I_a = 0$
B相电流	$I_b = -j\sqrt{3} I_{a1}$	$I_b = 0$	$I_b = (a^2 - \frac{X_{2\Sigma} + aX_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}) I_{a1}$
C相电流	$I_c = j\sqrt{3} I_{a1}$	$I_c = 0$	$I_c = (a - \frac{X_{2\Sigma} + a^2 X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}) I_{a1}$
A相正序电压	$\dot{U}_{a1} = jX_{1\Sigma} I_{a1}$	$\dot{U}_{a1} = j(X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}) I_{a1}$	$\dot{U}_{a1} = j(\frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}) I_{a1}$
A相负序电压	$\dot{U}_{a2} = jX_{2\Sigma} I_{a1}$	$\dot{U}_{a2} = -jX_{0\Sigma} I_{a1}$	$\dot{U}_{a2} = j(\frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}) I_{a1}$
零序电压	$\dot{U}_0 = 0$	$\dot{U}_0 = -jX_{0\Sigma} I_{a1}$	$\dot{U}_0 = j(\frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}) I_{a1}$
A相电压	$U_a = 2jX_{1\Sigma} I_{a1}$	$\dot{U}_a = 0$	$\dot{U}_a = 3j(\frac{X_{2\Sigma} X_{0\Sigma}}{X_{2\Sigma} + X_{0\Sigma}}) I_{a1}$
B相电压	$U_b = -jX_{2\Sigma} I_{a1}$	$U_b = j[(a^2 - a)X_{2\Sigma} + (a^2 - 1)X_{0\Sigma}] I_{a1}$	$\dot{U}_b = 0$
C相电压	$U_c = -jX_{2\Sigma} I_{a1}$	$U_c = j[(a - a^2)X_{2\Sigma} + (a - 1)X_{0\Sigma}] I_{a1}$	$\dot{U}_c = 0$

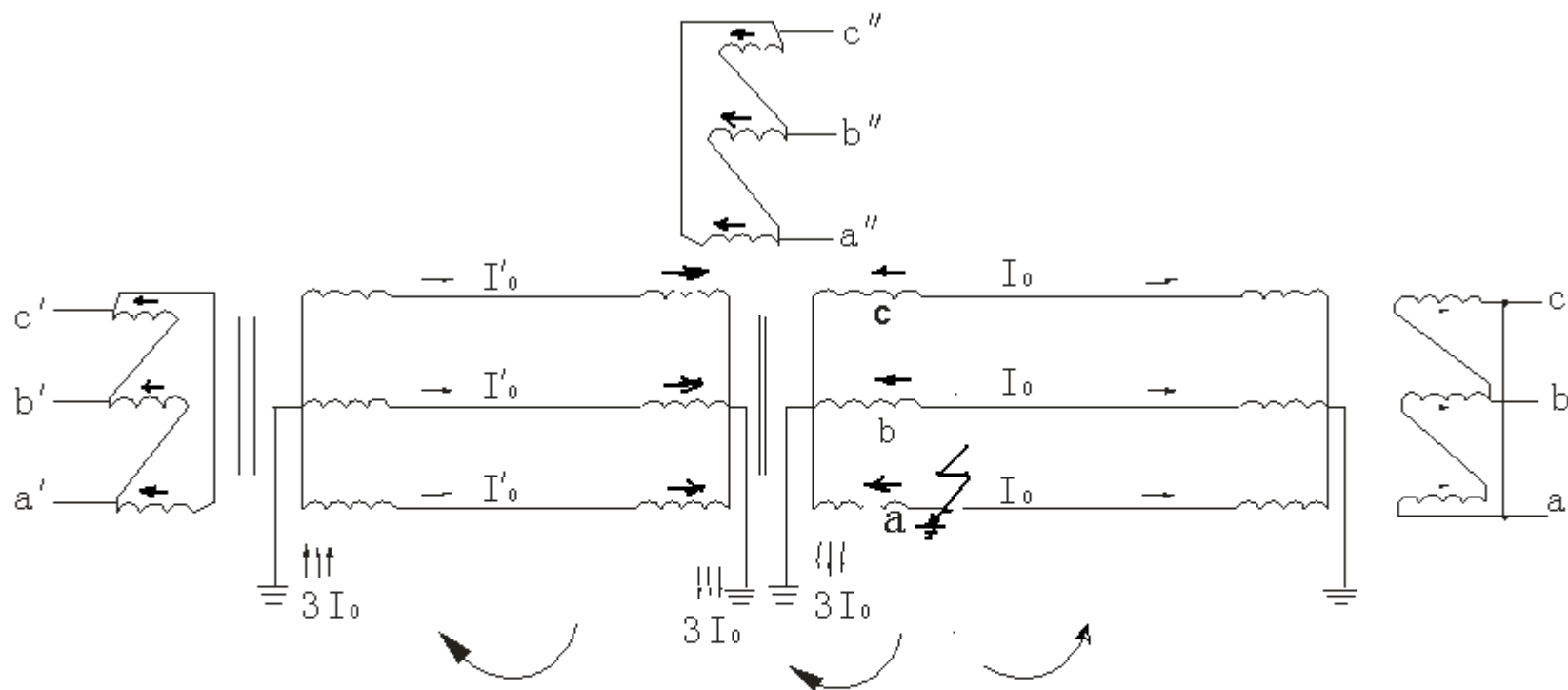


(a) 一侧变压器接地

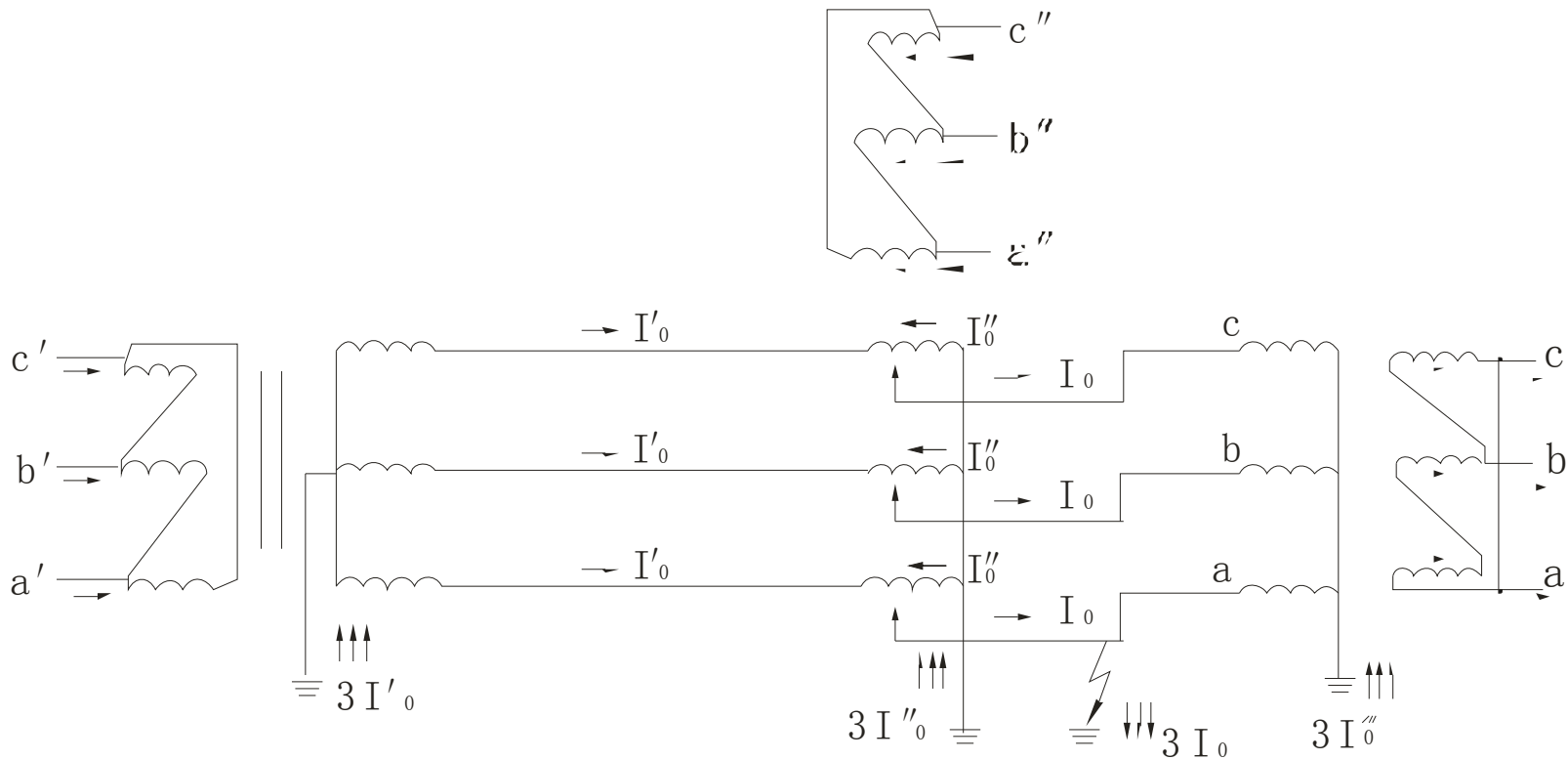
(长箭头表示 Δ 外的相电流，短箭头表示 Δ 内绕组中电流，下同)



(b) 两侧变压器接地



(C)三卷变压器 高、中侧均接地



(d)自耦变压器接地

图2-3 零序电流在三相电路中的分布

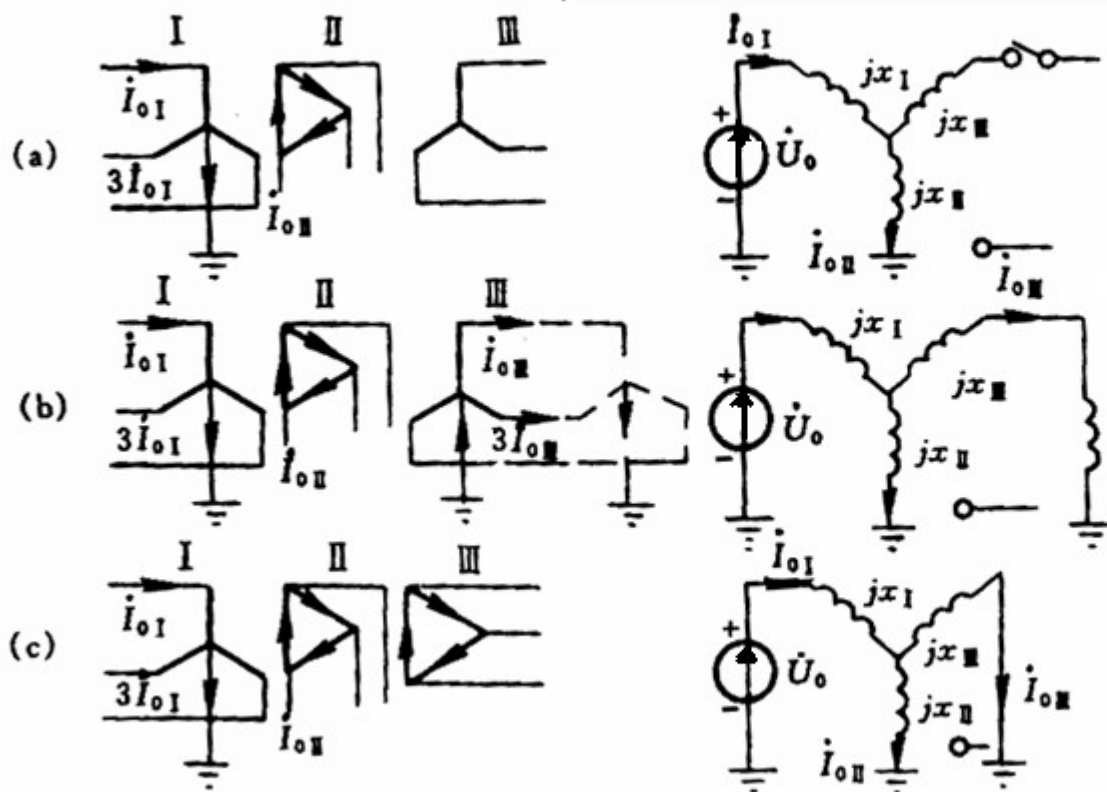


图 3-12 三绕组变压器零序电抗的等值电路

各序残余电压的计算方法：
可分为阻抗压降法和阻抗分压法两种，按已知条件
采用简便的方法。压降法能适用于复杂的电路计算。

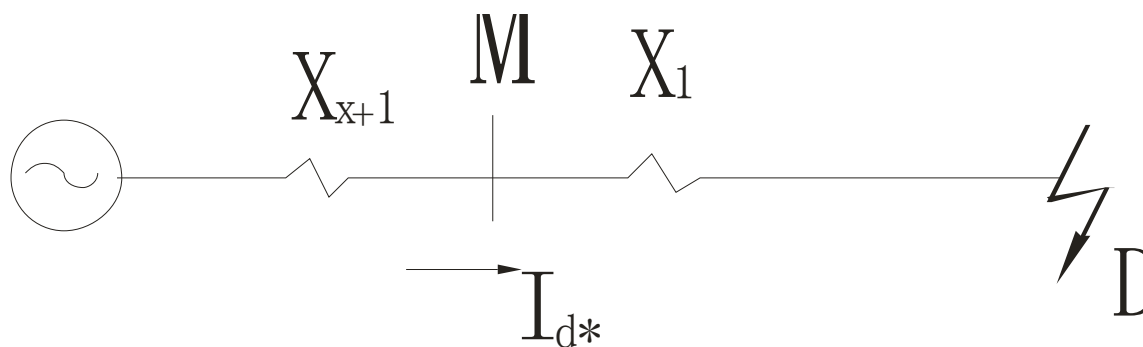


图2-4 正序阻抗图

(1) 正序残压计算

压降法为：

$$U_{CM.1}^* = E_e^* - I_{d1}^* \bullet X_{xt(1)}^*$$

上式适合于各种短路类型。

分压法为：设额定电势 $E_e^*=1$ ，则

$$U_{CM.1}^* = \frac{X_1^*}{X_{xt(1)} + X_1^*} \quad (2-7) \quad \text{上式只适合于三相短路类型}$$

式中： $\frac{U_{CM.1}}{I_{d1}}$ — M 点正序残余电压的标么值。

$\frac{X_{xt(1)}^*}{E^*}$ — 正序短路电流的标么值。
 $\frac{X_1^*}{E^*}$ — 系统电势标么值。

的标么值。 $U_{CM1} = U_{CM1}^* \bullet U_e$ — 分别为系统正序电抗和线路正序电抗

有名值的计算式为：

$$U_e \quad (2-8)$$

有分支线路影响的残压计算。则不能直接用（2-7）式。因受分支电源的影响，电压将会提高，分析如下：

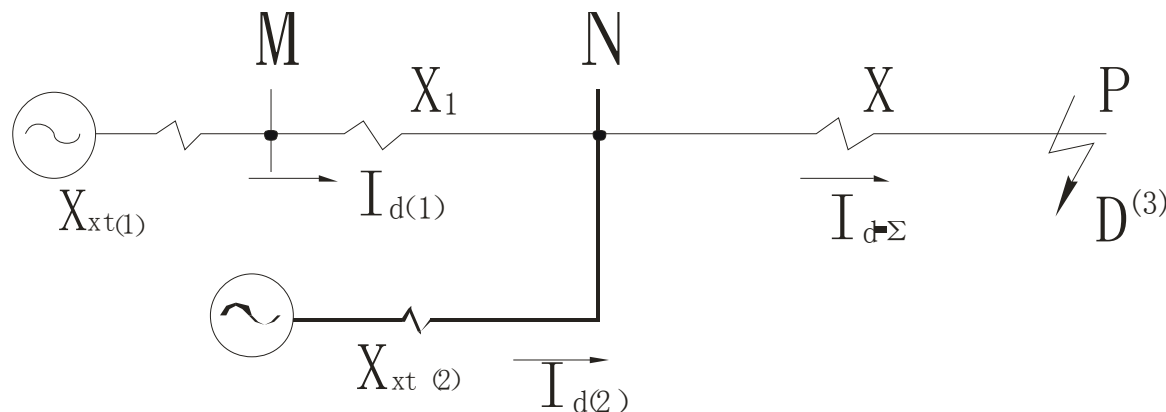


图2-5 有分支线路残压计算原图

求 M 点的正序残压，将图 2-5 网路转化为图 2-6 时，可导出计算关式。

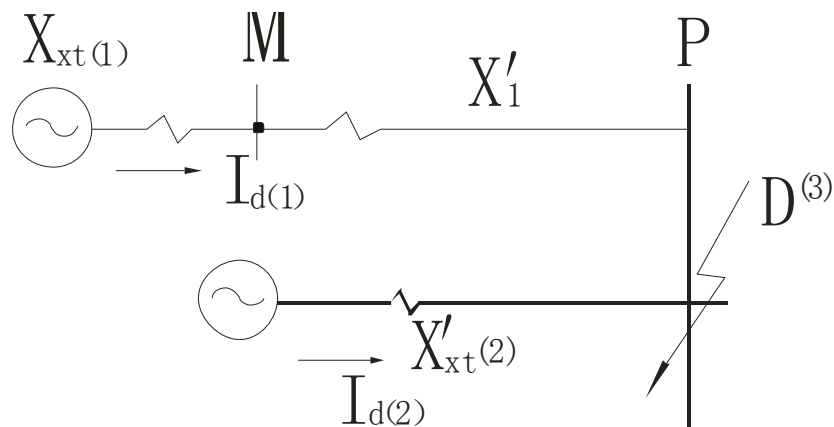


图2-6 有分支线路残压计算转化图

- 图 2-5 中 P 点之综合电抗为：

$$X_{\Sigma} = \frac{[X_{xt(1)} + X_1]}{X_{xt(1)} + X_1 + X_{xt(2)}} + X_{xt(2)} \quad (2-9)$$

- M 支路的电流分配系数 $\frac{I_{d(1)}}{I_{d(1)} + I_{d(2)}}$

$$\frac{X_{\Sigma}}{X_{xt(1)} + X_1'} = \frac{I_{d(1)}}{I_{d(1)} + I_{d(2)}} = C_1 \quad (2-10)$$

- 因

图 2-6 时，M 支路

$$\frac{X_{\Sigma}}{C_{(1)}} = X_{xt(1)} + X_1'$$

电抗为：

$$X_1' = \frac{X_{\Sigma}}{C_{(1)}} - X_{xt(1)} \quad (2-11)$$

，故转化为

即

$$(2-12)$$

图 2-5 转化为图 2-6 时，P 点电压仍为零，设电势标么值为 1，则求 M 点的残压就可用（2-7）

式了。并利用（2-11）和（2-12）式，M 点残压用分压法计算为：

$$\begin{aligned}
 U_{C \cdot M \cdot 1^*} &= \frac{X_1'}{X_{xt(1)} + X_1'} = \frac{\frac{X_\Sigma}{C_{(1)}} - X_{xt(1)}}{\frac{X_\Sigma}{C_{(1)}}} \\
 &= 1 - \frac{C_{(1)} \cdot X_{xt(1)}}{X_\Sigma} = \frac{X_\Sigma - C_{(1)} \cdot X_{xt(1)}}{X_\Sigma} \quad (2-13)
 \end{aligned}$$

已知总电流，M点残压也可用压降法计算。根据图 2-5 可写出为：

$$U_{C \cdot M \cdot 1^*} = I_{d\Sigma^*} \cdot X + C_{(1)} \cdot I_{d\Sigma^*} \cdot X_1$$

因已知 $I_{d\Sigma^*} = \frac{1}{X_\Sigma}$ ，将其代入上式得

$$U_{C \cdot M \cdot 1^*} = \frac{X + C_{(1)} \cdot X_1}{X_\Sigma} \quad (2-14)$$

(2) 负序电压

负序电压的分布特征是电源中性点处电压为零。短路点的电压最高。

在图 2-7 中，M 处的负序电压标么值可求之如下：

压降法：

$$U_{C.M.2*} = 0 - I_{d2*} \cdot X_{xt2} = -I_{d2} \bullet X_{xt2} \quad (2-15)$$

分压法：

$$U_{C.M.2*} = - \frac{X_{xt2}}{X_{xt2} + X_2} U_{d2}^* \quad (2-16)$$

式中： U_{CM2}^* —— M 点负序电压标么值；

U_{d2}^* —— 短路点 D 负序电压标么值；

I_{d2}^* —— 流过负序电源支路的负序电流标么值。

$X_{xt.2}$ ， X_2 —— 分别为系统负序电抗和线路负序电抗的标么值

如果原选定基准电压为系统额定线电压 U_e ，则应用

(2-16) 式可得有名值。即：

$$7) \quad U_{C \cdot M \cdot 2} = U_{C \cdot M \cdot 2*} U_e = \frac{X_{xt \cdot 2}}{X_{xt \cdot 2} + X_2} U_e \quad (2-1)$$

式中： U_e —— 基准电压即系统额定相电压。

$U_{C \cdot m \cdot 2}$ ——M 点负序电压的有名值。

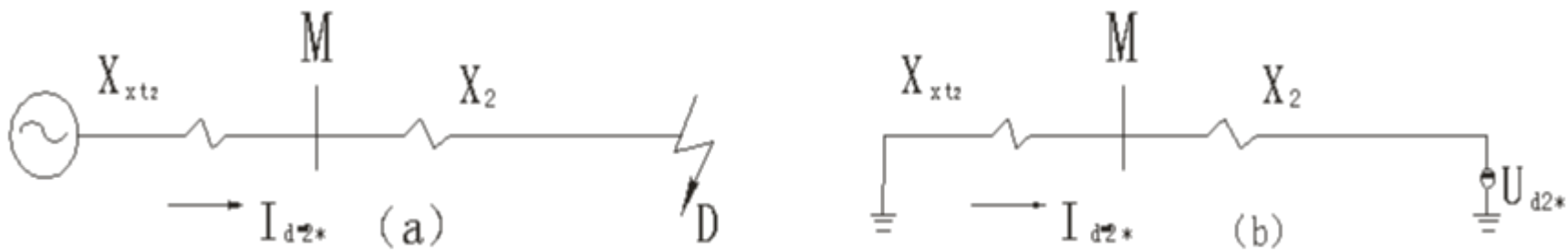


图2-7 负序阻抗图 (a) 和等效图 (b)

(3) 零序电压

- 零序电压的分布特征是变压器中性点处电压为零，短路点的电压最高。

用压降法：

$$U_{C.M.0*} = -I_{d.0*} \cdot X_{xt0} \quad (2-18)$$

用分压法：

$$U_{C.M.0*} = -\frac{X_{xt.0}}{X_{xt.0} + X_0} \cdot U_{d0*} \quad (2-19)$$

式中： $U_{c.m.0}^*$ ——M 点零序电压的标么值；

U_{d0}^* —— 短路点零序电压标么值；

$I_{d.0}^*$ —— 流过变压器中性点支路的零序电流标么值；

X_{xt0}, X_0 —— 分别为系统零序电抗和线路零序电抗的标么值。

求出标么值后乘以基准电压即可得有名值。

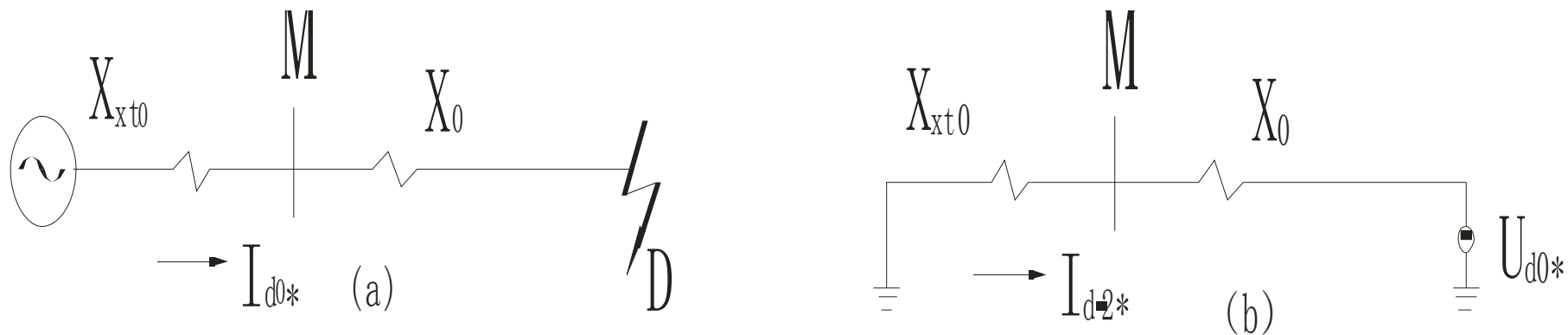


图2-8 零序阻抗图(a)和零序网络等效图 (b)

1-5 两相短路稳态电流

通常认为 $I_d^{(2)} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_d^{(3)} = 0.866 I_d^{(3)}$

它是假设 $X''_{1\Sigma} = X''_{2\Sigma}$ 为前提的。

一般假定发电机 $X''_1 = X''_2$ ，对暂态是适用的，对于稳态，因为发电机负序电抗不变而正序电抗变大，
三相短路电流之比：
根据下式，可求出稳态时两相短路电流与

$$\frac{I_d^{(2)}}{I_d^{(3)}} = \sqrt{3} \frac{X_{1\Sigma}}{X_{1\Sigma} + X_{2\Sigma}} = \sqrt{3} \frac{1}{1 + \frac{X_{2\Sigma}}{X_{1\Sigma}}} \quad (2-20)$$

所以 $I_{d\infty}^{(2)} \neq \frac{\sqrt{3}}{2} I_{d\infty}^{(3)}$ ，两相短路稳态电流在 $\frac{\sqrt{3}}{2} I_d^{(3)} \leq I_{d\infty}^{(2)} < \sqrt{3} I_d^{(3)}$ 范围之内。

当计算阻抗标么值时，
 $I_{d\infty}^{(2)} \leq I_{d\infty}^{(3)}$

$$X_{js*} \leq 0.6$$

$$I_{d\infty}^{(2)} \geq I_{d\infty}^{(3)}$$

$$X_{js*} \geq 0.6$$

。

使用计算曲线，计算两相稳态电流时，应取 $2X_{js}^*$ （以电源容量为基准的计算电抗）去查三相短路的运算曲线，然后用公式

$$I_{d\infty}^{(2)} = \sqrt{3} \cdot I_{*1} \cdot I_e$$

(2-21)

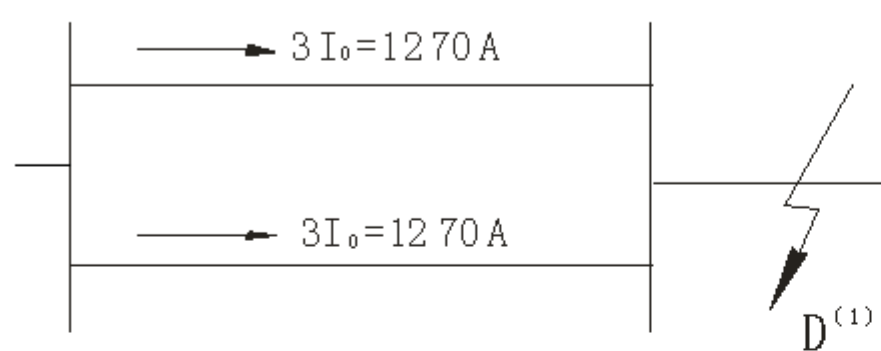
I_{*1}
 I_e

- 查运算曲线得出的正序短路电流倍数。
- 基准电流即电源的额定电流。

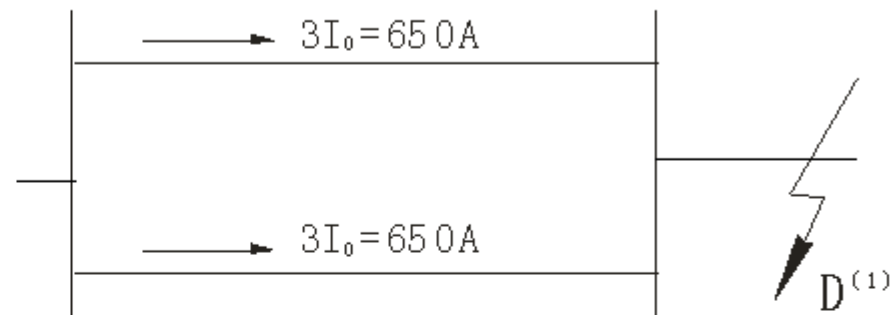
1-6 大电流接地系统中的零序互感问题

- 同杆并架线路或者平行的线路之间，都存在零序互感现象。互感的作用，将随两回线中的零序电流方向不同而不同。当两个电流同向时，其磁通是同方向，互感是助磁作用；当两个电流不同向时，其磁通是反方向，互感是去磁作用。
- 互感作用的大小随两条线路之间距离大小而变化。由于互感的作用，将使两回线中的零序电流增大或减小，短路电流计算必须计入互感影响，否则将会严重歪曲了实际情况，对于零序保护整定和通信干扰电压计算问题产生严重后果。

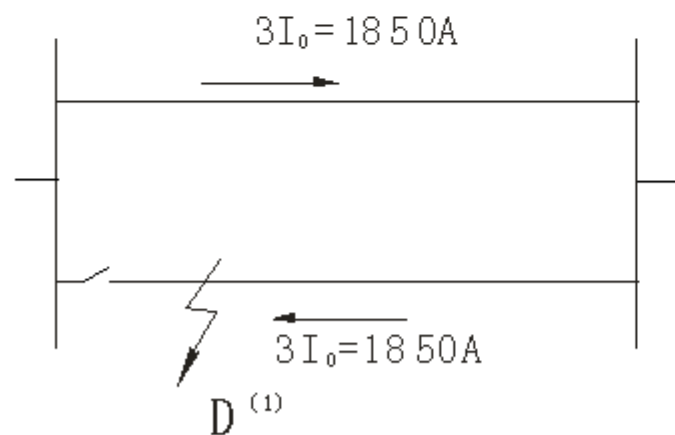
- 在计算中，互感作用用零序互感抗表示，根据计算和实测，零序互感抗在同杆并架线中可达 $(45 \sim 65)\%$ 的零序自感抗。此比例，对单导线的较低，对分裂复导线较高。在平行线中，零序互感抗可达 $(10 \sim 50)\%$ 的自感抗。当平行线路的导线间距离大于 500 米时，可以忽略互感的影响。
- 零序互感作用对零序短路电流的影响，视零序电流的方向而异，也与线路的运行情况有关。图 2-9 示同样短路情况下互感影响的例子。



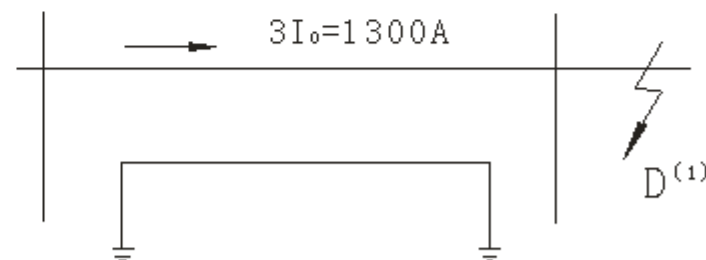
(a) 无互感情况



(b) 互感助磁作用



(c) 互感起去磁作用



(d) 相邻线检修，两端挂地线情况

图2-9 比较有互感和无互感的零序电流图

零序互感电抗的计算：

由于两回线间的磁通穿链情况不同因而有两种情况。

同杆并架双回线的方式：线间距离小于导线架设高度，其互感是由经空间成回路的和经大地成回路的两部分磁通穿链产生的。

单回路架设的平行线方式：线间距离大于导线架设高度时，只有经大地成回路磁链。

单回架设的平行线 I 和 II 间互感的计算公式。见图 2-10。

$$Z_{I-II,0} = 0.435 \frac{|Z_{tl0}|}{|Z_{T0}|} \left[L \lg \frac{D'_{I-II}}{D_{I-II}} - e \frac{1 - e^{-s\beta}}{e^\beta - 1} \lg \frac{D'_{nT}}{D_{nT}} \right]$$

式中：

Z_{Tl0}, Z_{T0} ——分别为一个平均档距长度地线的零序漏阻抗和零序自阻抗。

L ，——分别为线路总长度和平均档距。

S ——为档距的个数。有 $L = S \cdot \ell$

$$\beta \approx \sqrt{\frac{Z_{T0}}{R_{(on)0}}}$$

为 $5 \sim 10\Omega$ ， $R_{(on)0}$ 为杆塔接地电阻的三倍，一般为

10Ω 。

D_{I-II}, D'_{I-II} ——分别为 I 回线导线对 II 回线导线的几何均距和对 II 回线镜像的几何均距。

按照 (2.66) 式可以作出许多曲线表，以供查阅。

- 零序互感标么值的计算，当用于不同两个电压等级时是不同的，这在用标么值计算短路电流时应加以注意。
- 对同级电压的互感：

$$X_{*m} = X_{m(n)} \cdot \frac{S_b}{U_{pj}^2} \quad (2-23)$$

X_{*m} — 互感电抗的标么值。

$X_{m(n)}$ — 互感电抗的欧姆值，实测值或由计算公式计算所得的值。

S_b — 标么值的基准三相总容量（兆伏安）

U_{pj} — 标么值的基准线电压，取平均额定电压（千伏）

对不同电压等级的互感：

$$X_{*m} = X_{m(n)} \cdot \frac{S_b}{U_{pj(1)} \cdot U_{pj(2)}} \quad (2-24)$$

$U_{pj(1)}, U_{pj(2)}$ 一分别为两个不同电压等级的平均额定电压。

$$h_0 = 400 \sqrt{\frac{\rho_z}{f}}$$

图 2 — 10 中：

ρ_z

-- 大地电阻率（欧米），对一般土地为 50 ~ 200 。

f 为电网频率。 h_1 为 I 回线架设高度（米）、

h_2 为 II 回线的架设高度（米）

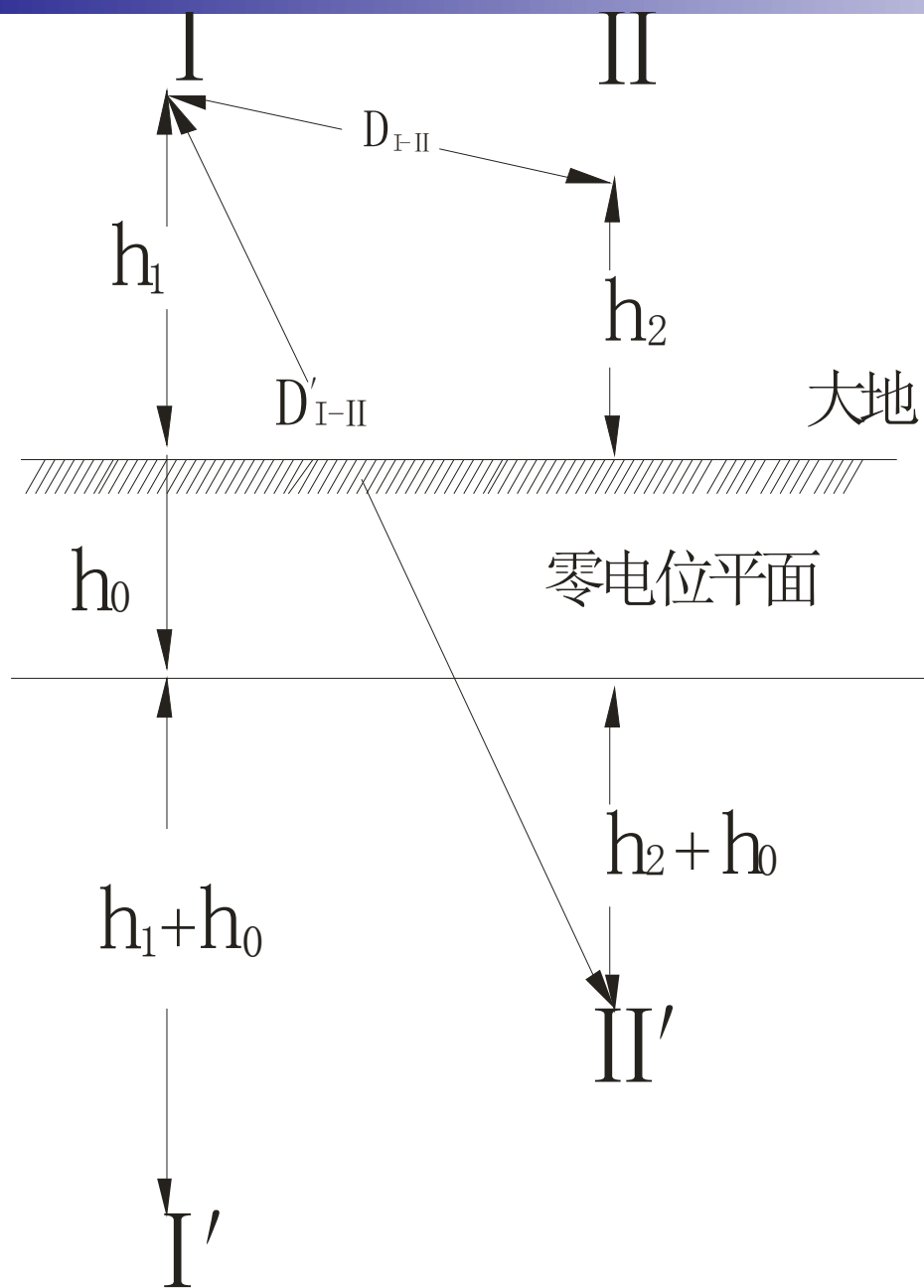
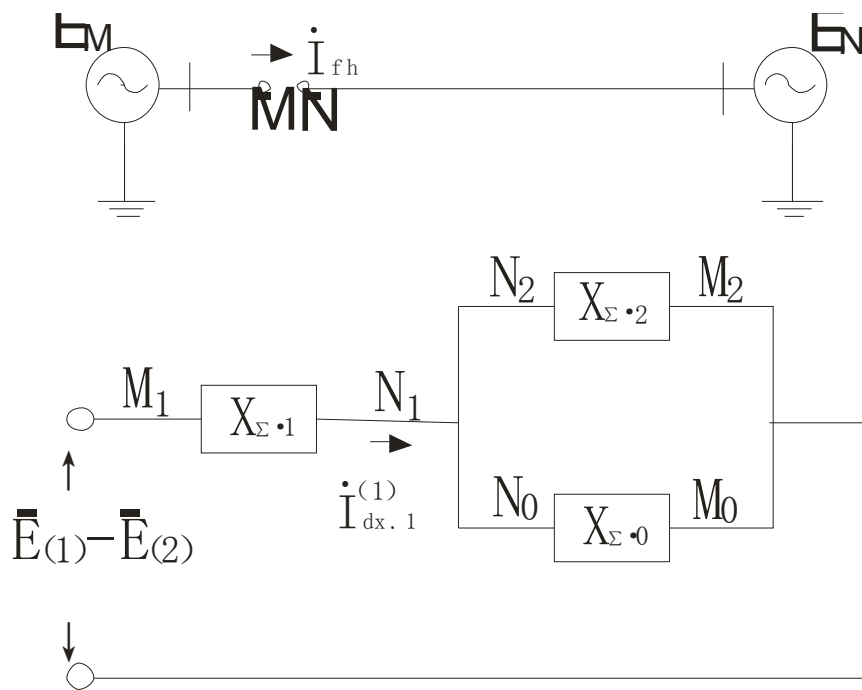


图 2-10

第二节 断相计算

在大电流接地系统中，发生断相后，将出现不对称电压，产生的不对称电压是沿导线方向的，故称为纵向不对称，这对于保护有一定影响，特别是**采用单相重合闸的系统中，在单相跳开而未重合前相当于断相**，需要进行计算分析。这种计算，也适用于两侧电源并列的瞬间或单带负荷合闸的瞬间的非全相情况。



2-1 一相断相计算

断相的等值网络图如图 2-11，取断相点两侧为 M、N 两

点。可见一相断线的复合序网和两相接地的复合序网相似，不过前者用的是纵向综合阻抗，而后者用的是对短路点的横向综合阻抗。

断相点的各序综合电流计算公式如下：

设以下标 dx 表示断线，1、2、0 表示正、负、零序，上标 (1) 表示一相断线，断线前在负荷电流作用下，

在振

荡状态下，忽略负荷电流时取 $E_{(1)} = E_{(2)} = E_{(0)} = 2E \sin \frac{\delta}{2}$

$$\dot{I}_{dx \cdot 1}^{(1)} = \frac{\dot{E}_{(1)} - \dot{E}_{(2)}}{X_{\Sigma \cdot 1} + \frac{X_{\Sigma 2} X_{\Sigma 0}}{X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}}} \quad (2-25)$$

$$\dot{I}_{dx \cdot 1}^{(1)} = \frac{I_{fh} \cdot X_{\Sigma 1}}{X_{\Sigma \cdot 1} + \frac{X_{\Sigma 2} X_{\Sigma 0}}{X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}}} \quad (2-26)$$

$$\dot{I}_{dx \cdot 2}^{(1)} = -\dot{I}_{dx \cdot 1}^{(1)} \cdot \frac{X_{\Sigma \cdot 0}}{X_{\Sigma \cdot 2} + X_{\Sigma \cdot 0}} \quad (2-27)$$

$$\dot{I}_{dx \cdot 0}^{(1)} = -\dot{I}_{dx \cdot 1}^{(1)} \cdot \frac{X_{\Sigma \cdot 2}}{X_{\Sigma \cdot 2} + X_{\Sigma \cdot 0}} \quad (2-28)$$

■ 当取 $X_{\Sigma 1}=X_{\Sigma 2}$ 时,

$$\dot{I}_{dx2} = -\frac{I_{fh} X_{\Sigma 0}}{X_{\Sigma 1} + 2X_{\Sigma 0}}$$

$$\dot{I}_{dx0}^{(1)} = -\frac{I_{fh} \cdot X_{\Sigma 2}}{X_{\Sigma 1} + 2X_{\Sigma 0}}$$

式中: $\dot{E}_{(1)}$ $\dot{E}_{(2)}$
电势。

——分别为断相点两侧的相

$X_{\Sigma 1}, X_{\Sigma 2}, X_{\Sigma 0}$ —— 分别为断相点两侧的 正序, 负序、零序

的纵向综合电抗, 即从断相 点两端看入网络的总串联电抗。正、负、零序电抗中均应分别计入负荷电抗, 取负荷电抗为

$$X_{*1}^*=1.2, \quad X_{*2}^*=0.35$$

I_{fh} —— 断相点断相前通过的负荷电流。

■ 断相点的正序电流故障分量为：

$$\dot{I}_{dx1}^{(1)'} = \dot{I}_{dx1}^{(1)} - \dot{I}_{fh} = \frac{-\dot{I}_{fh}}{\left(\frac{1}{X_{\Sigma 1}} + \frac{1}{X_{\Sigma 2}} + \frac{1}{X_{\Sigma 0}} \right)} \cdot X_{\Sigma 1}$$

■ 断相点的负序、零序电流故障分量同（2-27）和（2-28）式。

■ 断相点正序电流综合值。

$$\dot{I}_{dx1}^{(1)} = \dot{I}_{fh}^{(1)'} + \dot{I}_{dx1}^{(1)'}$$

- 各序电流向量如图 2-12 所示。

- 断相点的各相全电流为：

$$\begin{matrix} \bullet^{(1)} & \bullet^{(1)} & \bullet^{(1)} & \bullet^{(1)} & \bullet & \bullet^{(1)'} & \bullet^{(1)} & \bullet^{(1)} \\ I_{dxA} = I_{dx1} + I_{dx2} + I_{dx0} & \Rightarrow & I_{fh} + I_{dx1} + I_{dx2} + I_{dx0} = 0 \end{matrix} \quad (2-31)$$

$$\begin{matrix} \bullet^{(1)} & \bullet^{(1)} & \bullet^{(1)} & \bullet^{(1)} \\ I_{dxB} = a^2 I_{dx1} + a I_{dx2} + I_{dx0} \end{matrix} \quad (2-32)$$

$$\begin{matrix} \bullet^{(1)} & \bullet^{(1)} & \bullet^{(1)} & \bullet^{(1)} \\ I_{dxC} = a I_{dx1} + a^2 I_{dx2} + I_{dx0} \end{matrix} \quad (2-33)$$

- 各序中的各支路故障分量电流，按其序网的支路电抗反比分布。

断相点的电压为（以 A 相为特殊相），按图 2-11，

$$\Delta U_{dx1} = \Delta U_{dx2} = \Delta U_{dx0} = \dot{I}_{dx1}^{(1)} X_{\Sigma 1} = \dot{I}_{dx1}^{(1)} \frac{X_{\Sigma 2} X_{\Sigma 0}}{X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}}$$

将（2-26）式代入得：

$$\begin{aligned} \Delta U_{dx1} &= \frac{\dot{I}_{fh} X_{\Sigma 1}}{X_{\Sigma 1} + \frac{X_{\Sigma 2} X_{\Sigma 0}}{X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}}} \cdot \frac{X_{\Sigma 2} X_{\Sigma 0}}{X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}} \\ &= \frac{\dot{I}_{fh} X_{\Sigma 1} X_{\Sigma 2} X_{\Sigma 0}}{X_{\Sigma 1} X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 1} X_{\Sigma 0} + X_{\Sigma 2} X_{\Sigma 0}} \\ &= \frac{\dot{I}_{fh}}{\frac{1}{X_{\Sigma 1}} + \frac{1}{X_{\Sigma 2}} + \frac{1}{X_{\Sigma 0}}} \end{aligned}$$

因

$$\Delta U_{dx1} = \Delta U_{dx2} = \Delta U_{dx0} = \frac{1}{3} \Delta U_{dxA} \quad (2-34)$$

故

$$\Delta U_{dxA} = \frac{3 \dot{I}_{fh}}{\frac{1}{X_{\Sigma 1}} + \frac{1}{X_{\Sigma 2}} + \frac{1}{X_{\Sigma 0}}} \quad (2-35)$$

断相点各序的电压分布如图 2-13 所示。

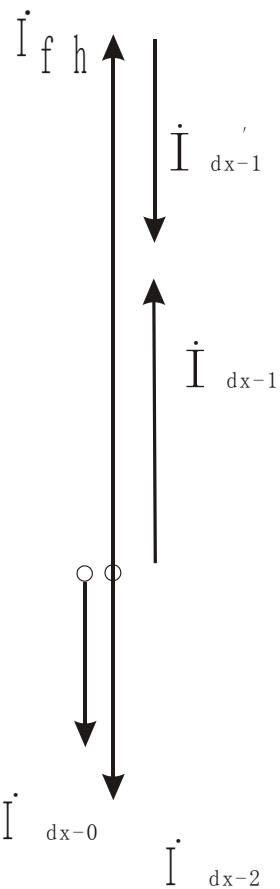


图 2-12 各序电流向量图

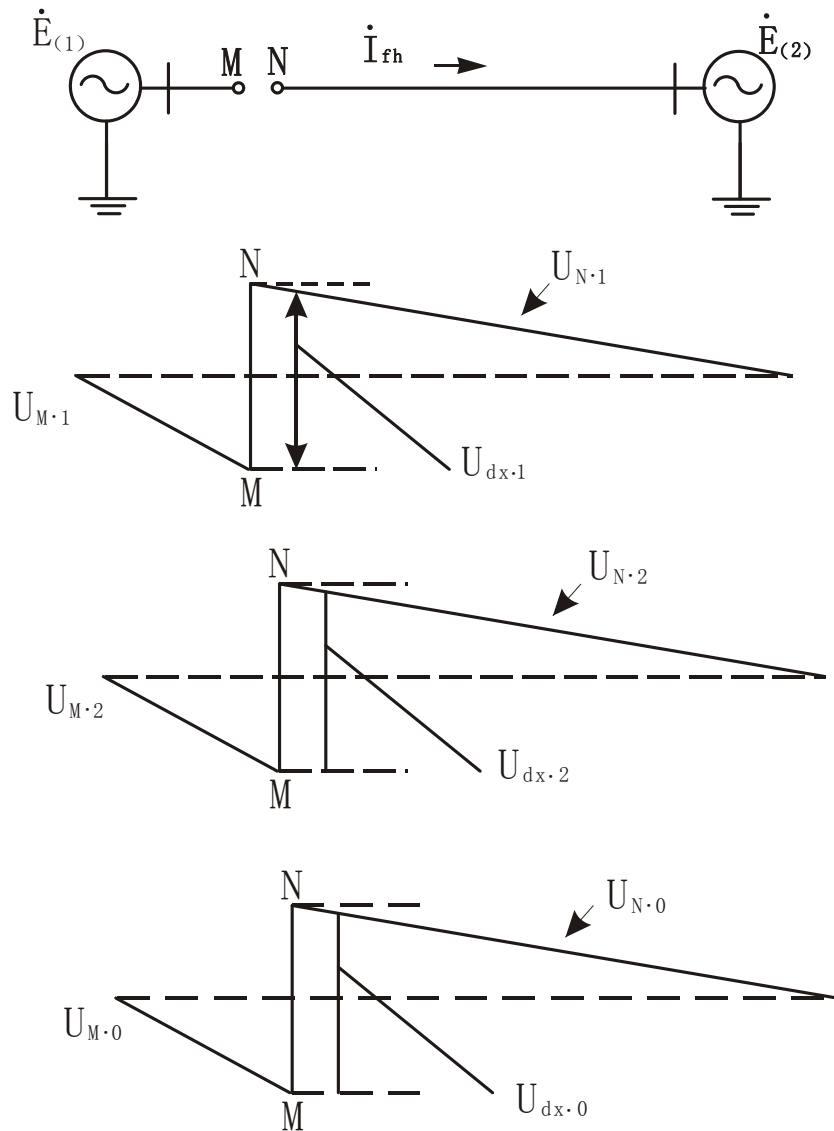


图 2-13 一相断相的电压故障分量分布图

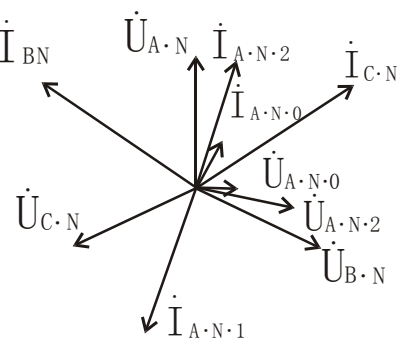
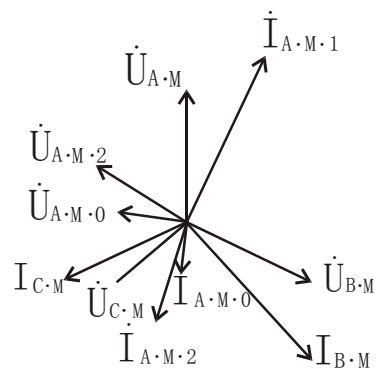
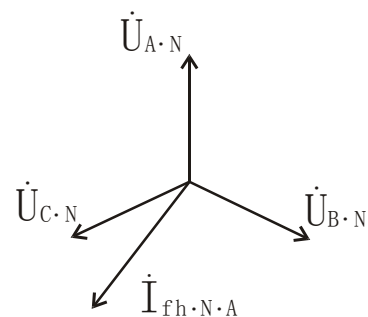
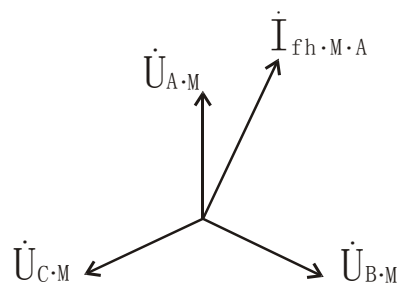
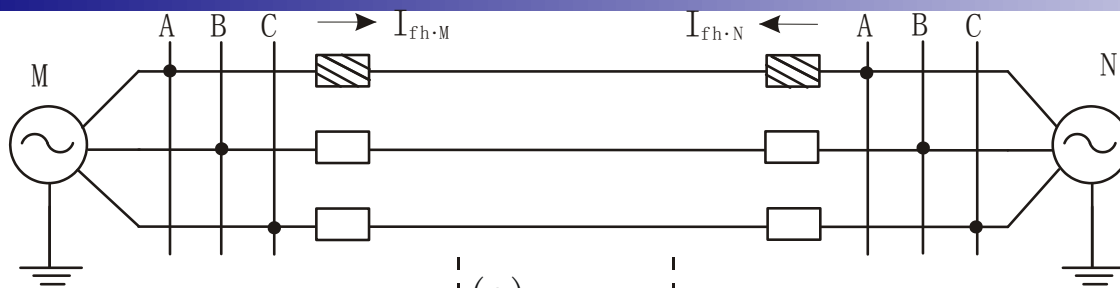
断口处各序电压故障分量为：

$$\Delta U_{dxA1} = -\dot{I}_{dx1} \cdot X_{\Sigma 1} \quad (2-36)$$

$$\Delta U_{dxA2} = -\dot{I}_{dx2} \cdot X_{\Sigma 1} \quad (2-37)$$

$$\Delta U_{dxA0} = -\dot{I}_{dx0} \cdot X_{\Sigma 1} \quad (2-38)$$

断相后，电流、电压向量关系如图 2-14 所示。断相和不对称短路时各序的电流及电压的关系如表 2-2



(a)
一次接线, 设
两侧母线线电压
同相位

(b)
断相前的
向量

$\dot{I}_{fh \cdot M \cdot A}$ 与 $\dot{I}_{fh \cdot N \cdot A}$
相位相反

(c)
断相后母
线上的向量

$\dot{I}_{A \cdot M \cdot 1}$ 与 $\dot{I}_{A \cdot N \cdot 1}$ 相
位相反,
 $\dot{I}_{A \cdot M \cdot 2}$ 与 $\dot{I}_{A \cdot N \cdot 2}$ 相
位相反,
 $\dot{I}_{A \cdot M \cdot 0}$ 与 $\dot{I}_{A \cdot N \cdot 0}$ 相
位相反,

断相时和不对称短路时的各序的电流间和电压间的关系表（边界条件）

序 号↵	断线或短路↵				故障点电流或电压的关系式↵	
	断线↵		短路↵		电流↵	电压↵
1↵ 2↵ 3↵	一相↵ <u>断线</u> ↵	A↵	两相↵	B 和 C↵	$I_1 + I_2 + I_0 = 0$	$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 = \dot{U}_0$
		B↵	短路↵	C 和 A↵	$a^2 I_1 + a I_2 + I_0 = 0$ ↵	$a^2 \dot{U}_1 = a \dot{U}_2 = \dot{U}_0$ ↵
		C↵	接地↵	A 和 B↵	$a I_1 + a^2 I_2 + I_0 = 0$	$a \dot{U}_1 = a^2 \dot{U}_2 = \dot{U}_0$
4↵ 5↵ 6↵	两相↵ <u>断线</u> ↵	B 和 C↵	一相↵	A↵	$I_1 = I_2 = I_0$	$\dot{U}_1 + \dot{U}_2 + \dot{U}_0 = 0$
		C 和 A↵	短路↵	B↵	$a^2 I_1 = a I_2 = I_0$ ↵	$a^2 \dot{U}_1 + a \dot{U}_2 + \dot{U}_0 = 0$ ↵
		A 和 B↵	接地↵	C↵	$a I_1 = a^2 I_2 = I_0$	$a \dot{U}_1 + a^2 \dot{U}_2 + \dot{U}_0 = 0$
7↵ 8↵ 9↵	↵	↵	两相↵ 短路↵	B 和 C↵ C 和 A↵ A 和 B↵	$I_1 + I_2 = 0$ ↵ $a^2 I_1 + a I_2 = 0$ ↵ $a I_1 + a^2 I_2 = 0$	$\dot{U}_1 = \dot{U}_2$ ↵ $a^2 \dot{U}_1 = a \dot{U}_2$ ↵ $a \dot{U}_1 = a^2 \dot{U}_2$

附注：表中关系式是以 A 相为基准列出的

2-2 两相断相计算:

断相的等值序网如图 2-15 断相点的各序综合电流计算如下式, 上标 (1.1) 表示两相断线:

$$\dot{I}_{dx \cdot 1}^{(1.1)} = \frac{\dot{E}_{(1)} - \dot{E}_{(2)}}{X_{\Sigma 1} + X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}} \quad (2-39)$$

断线前, 在负荷电流作用下:

$$\dot{E}_{(1)} - \dot{E}_{(2)} = \dot{I}_{fh} \cdot X_{\Sigma 1}$$
$$\dot{I}_{dx \cdot 1}^{(1.1)} = \frac{\dot{I}_{fh} \cdot X_{\Sigma 1}}{X_{\Sigma 1} + X_{\Sigma 2} + X_{\Sigma 0}} \quad (2-40)$$

$$\dot{I}_{dx \cdot 1}^{(1.1)} = \dot{I}_{dx \cdot 2}^{(1.1)} = \dot{I}_{dx \cdot 0}^{(1.1)}$$

$$(2-41)$$

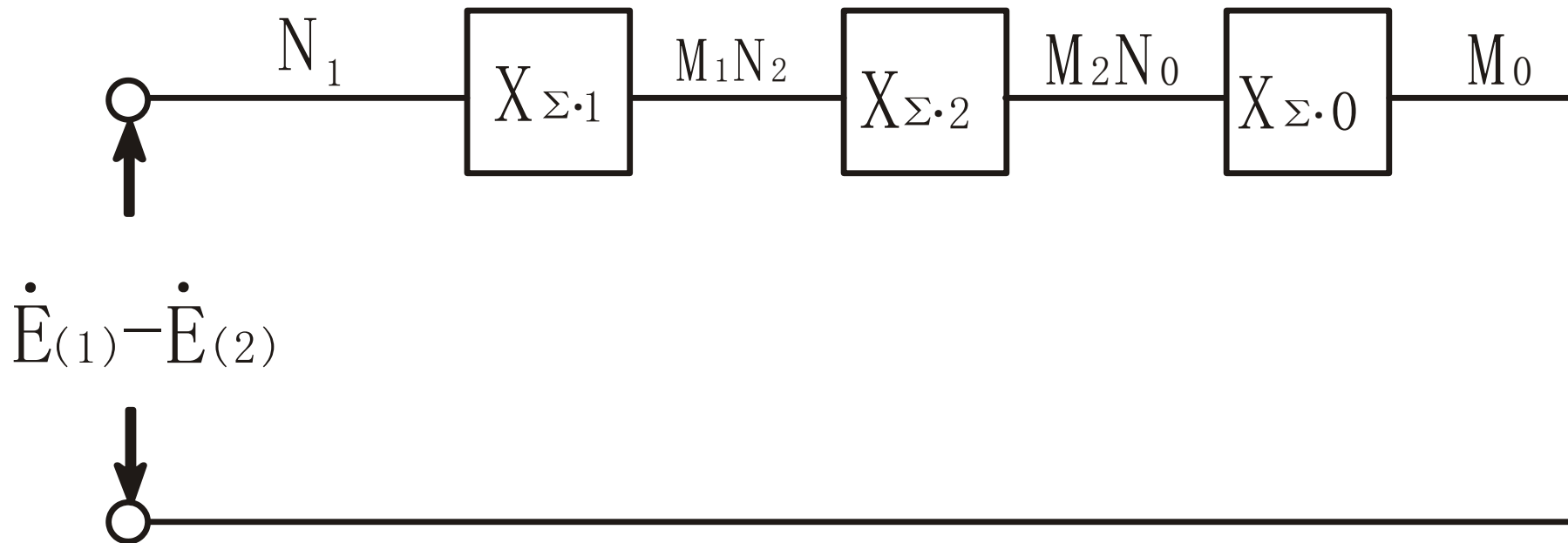


图2-15 两相断相序网图

- 可见两相断线的复合等效网络和计算公式与单相接地短路相似，但前者阻抗应用纵向综合阻抗，后者则应用横向综合阻抗。式中符号与计算要求与一相断相计算同。
- 断相点各序电流的故障分量为：

$$\dot{I}_{dx.1}^{(1.1)'} = \dot{I}_{dx.1}^{(1.1)} - \dot{I}_{fh} = -\dot{I}_{fh} \frac{X_{\Sigma.2} + X_{\Sigma.0}}{(X_{\Sigma.1} + X_{\Sigma.2} + X_{\Sigma.0})}$$

$$\dot{I}_{dx.2}^{(1.1)} = \dot{I}_{dx.0}^{(1.1)} = \dot{I}_{fh} \frac{X_{\Sigma.1}}{X_{\Sigma.1} + X_{\Sigma.2} + X_{\Sigma.0}}$$

- 各序电流向量如图 2-16 所示。

- 断相点各相全电流为：

$$\dot{I}_{dx \cdot A}^{(1.1)} = \dot{I}_{dx \cdot 1}^{(1.1)} + \dot{I}_{dx \cdot 2}^{(1.1)} + \dot{I}_{dx \cdot 0}^{(1.1)}$$

$$\dot{I}_{dx \cdot B}^{(1.1)} = a^2 \dot{I}_{dx \cdot 1}^{(1.1)} + a \dot{I}_{dx \cdot 2}^{(1.1)} + \dot{I}_{dx \cdot 0}^{(1.1)}$$

(2-44)

$$\dot{I}_{dx \cdot C}^{(1.1)} = a \dot{I}_{dx \cdot 1}^{(1.1)} + a^2 \dot{I}_{dx \cdot 2}^{(1.1)} + \dot{I}_{dx \cdot 0}^{(1.1)}$$

(2-45)

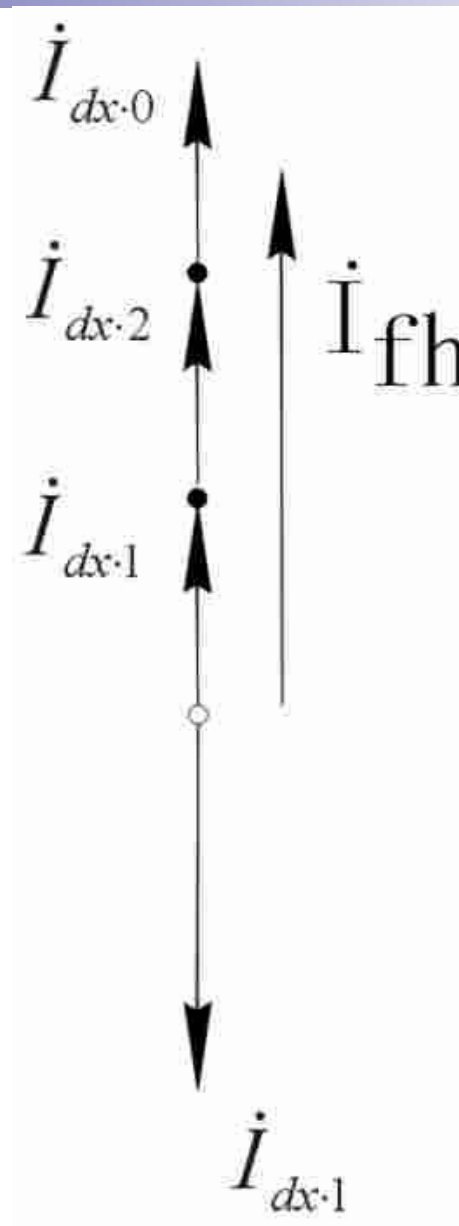


图 2-16 各序电流向量图

- 各序中的各分支电流故障分量，按其序网的支路电抗反比分布。
- 断相点断口两侧的各序电压：

$$\Delta U_{dx.1} = \dot{I}_{dx.1}^{(1.1)} \cdot X_{\Sigma.1} = \frac{\dot{I}_{fh} \cdot X_{\Sigma.1} \cdot (X_{\Sigma.2} + X_{\Sigma.0})}{X_{\Sigma.1} + X_{\Sigma.2} + X_{\Sigma.0}} \quad (2-47)$$

$$\Delta U_{dx.2} = \dot{I}_{dx.2}^{(1.1)} \cdot X_{\Sigma.2} = \frac{\dot{I}_{fh} \cdot X_{\Sigma.1} \cdot X_{\Sigma.2}}{X_{\Sigma.1} + X_{\Sigma.2} + X_{\Sigma.0}} \quad (2-48)$$

$$\Delta U_{dx.0} = \dot{I}_{dx.0}^{(1.1)} \cdot X_{\Sigma.0} = \frac{\dot{I}_{fh} \cdot X_{\Sigma.1} \cdot X_{\Sigma.2}}{X_{\Sigma.1} + X_{\Sigma.2} + X_{\Sigma.0}} \quad (2-49)$$

2-3 两侧电源并列时开关三相不同时合闸计

算

计算公式同断相计算中各式，但应用 $E(1)-E(2)$ 计算，当取 $E(1)=E(2)$ 时

$$\dot{E}_{(1)} - \dot{E}_{(2)} = 2\dot{E} \sin \frac{\delta}{2} \quad (2-50)$$

$$\dot{E}_{(1)} \quad \dot{E}_{(2)}$$

式中： δ ——为 ， 之间的夹角。

δ 的取值，对于非同期合闸，取最大值 $\delta=180^\circ$ ，对检查同期合闸则按实际整定角度代入计算，对于准同期合闸一般角度最小，约为 $15^\circ \sim 20^\circ$ 。

2-4 单侧电源带负荷的开关三相不同时合闸计算

计算公式同断相计算中各式，但取 $E_{(2)}=0$ 。

2-5 大电流接地系统的不对称充电

在大电流接地系统中，当开关向线路充电时，若一相或两相先合，这时也产生不对称。对一些保护需要计算。

对一相接通：取电容的正序和负序电纳 $b_1=b_2$

$$\dot{I}_0 = \frac{-E_x}{\frac{1}{jb_1L} + \frac{1}{jb_2L} + \frac{1}{jb_0L}} = -E_x \cdot j \frac{b_1b_0}{b_1 + 2b_0} \cdot L$$

(2-51)

对两相接通：取 $b_1=b_2$

$$\begin{aligned} \dot{I}_0 &= \frac{-E_x}{\frac{1}{jb_1L} + \frac{1}{j(b_2+b_0)L} + \frac{1}{jb_0L}} \cdot \frac{\frac{1}{jb_2L}}{\frac{1}{jb_2L} + \frac{1}{jb_0L}} \\ &= -E_x \cdot j \frac{b_1 \cdot b_0}{2b_1 + b_0} \cdot L \end{aligned} \quad (2-52)$$

式中： E_x —— 系统相电势

b_1 、 b_2 、 b_0 —— 分别为线路的正序、负序电纳和对地的零序电纳。

220kV 线路， $b_1=b_2=2.7 \times 10^{-6}$ （1/ 欧姆·公里）， $b_0=1.9 \times 10^{-6}$ （1/ 欧姆·公里）

110kV 线路， $b_1=b_2=2.05 \times 10^{-6}$ （1/ 欧姆·公里）， $b_0=1.5 \times 10^{-6}$ （1/ 欧姆·公里）

L —— 充电线路长度（公里）

按上两式计算分析，开关一相先接通较开关两相接通的 I_0 大。因此，实

24/4/用上计算定值时通常按（2-51）计算。

第三节

- 在电力系统中，当传输功率超过一定限度或发生突然变化时（如短路后、甩负荷、电机的加速或减速等情况），电源间出现摆动（电流、电压、频率等）叫做系统振荡，不失步的振荡叫周步振荡，失步的振荡叫非周步振荡，振荡的结果，或是再拉入同部，或是系统解列。

系统振荡计算

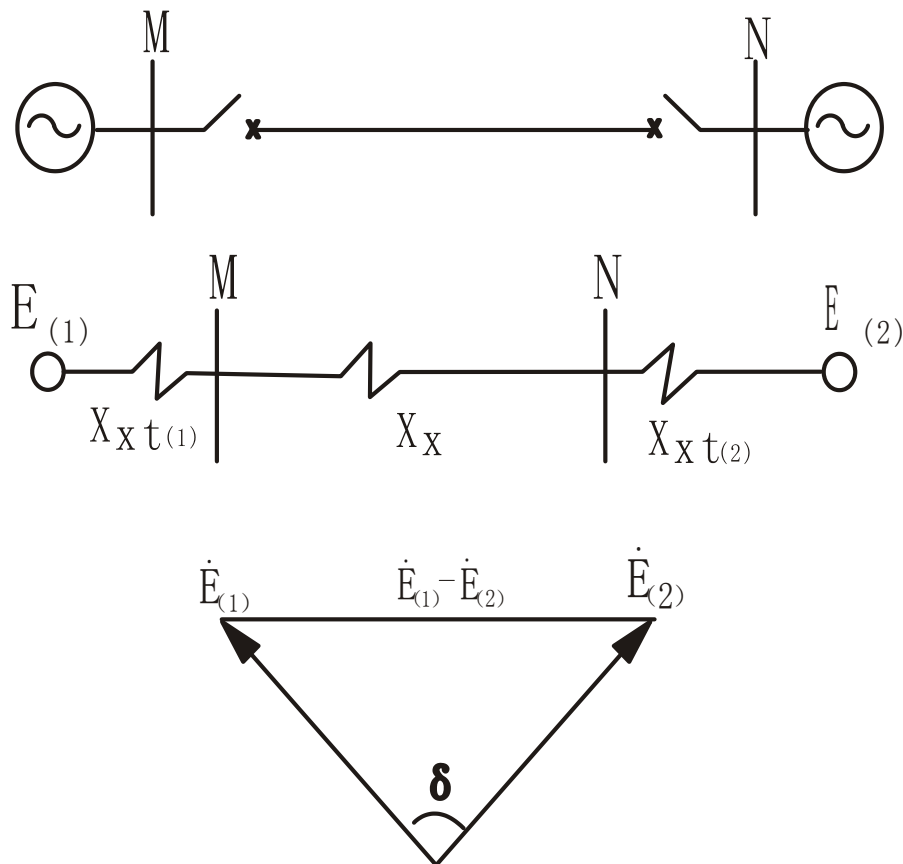


图 2-17 系统振荡的说明图

- 如图 2-17，系统发生振荡后，各种参量都在变化，其特征有：

（1）电势间的夹角 δ 在一定范围内往复摆动。通过各个设备的电流由大到小的周期性变化，其最大值有时比短路值还大。各点的电压由高到低的变化。在振荡中心处的电压最低可能到零。

（2）电流、电压出现两次最大值或最小值之间的时间叫振荡周期。随系统具体情况不同，振荡周期也不同。

（3）系统振荡时所有电气仍是对称的，不出现负序、零序分量。

3-1 振荡过程的电气计算

振荡电流的计算，由图 2-17 可写出：

$$I_{zhd} = \frac{\dot{E}_{(1)} - \dot{E}_{(2)}}{j[X_{xt(1)} + X_x + X_{xt(2)}]} \quad (2-53)$$

式中： $\dot{E}_{(1)}$ ， $\dot{E}_{(2)}$ ——分别为两侧系统的相电势。

一般可取 $E_{(1)} = E_{(2)} = E$ ，设 $E_{(1)}$ 超前 $E_{(2)}$ 为 δ 角，则

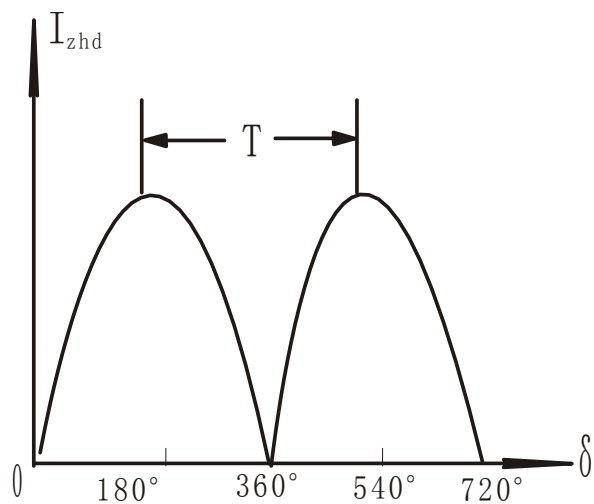
$$I_{zhd} = \frac{E(e^{j\delta} - 1)}{jX_{\Sigma}} \quad (2-54)$$

当取电流绝对值时

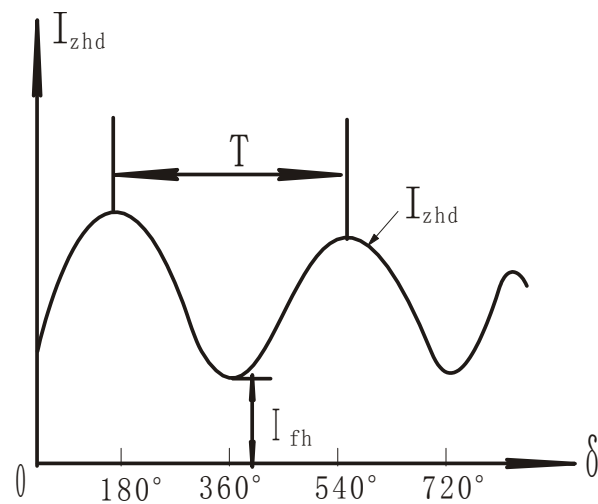
$$|I_{zhd}| = \left| \frac{2E \sin \frac{\delta}{2}}{X_{\Sigma}} \right| \quad (2-55)$$

X_{Σ} ——为两侧系统的串联总电抗。

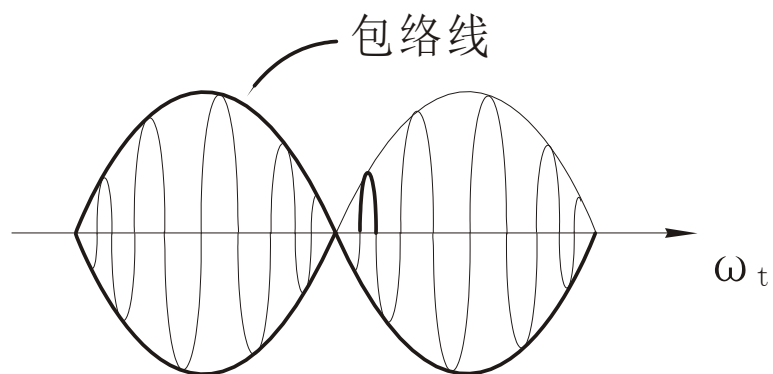
当 $\delta=180^\circ$ ，时， I_{zhd} 达到最大值。各支路中的电流按支路正序电抗反比分配。振荡电流见图 2-18 所示。当有负荷电流时，其总电流为负荷电流与振荡电流之和。



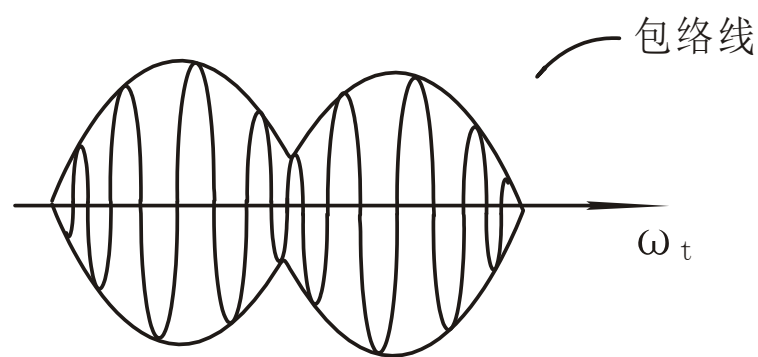
(a) 无负荷电流情况下的振荡电流图



(b) 有负荷电流情况下的振荡电流图



(C) 无负荷电流时电流波形



(D) 有负荷电流时波形

各点电压计算：当振荡在 δ 角时，任一点的电压值 U_p ，可由图 2-17 用作图法求得。也可用下公式计算：

$$U_p = E \sqrt{\cos^2 \frac{\delta}{2} + \left(\frac{2 \cdot X_{pF}}{X_{\Sigma}} \cdot \sin \frac{\delta}{2} \right)^2}$$

(2-56)

式中： δ —— 为计算的角度。

X_{pF} —— 为任一点距电抗中心点（即图 2-20 中 F 点）

的一段电抗值。

X_{Σ} —— 为两侧系统串联总电抗。各点、电压的变化如

图 2-19 所示

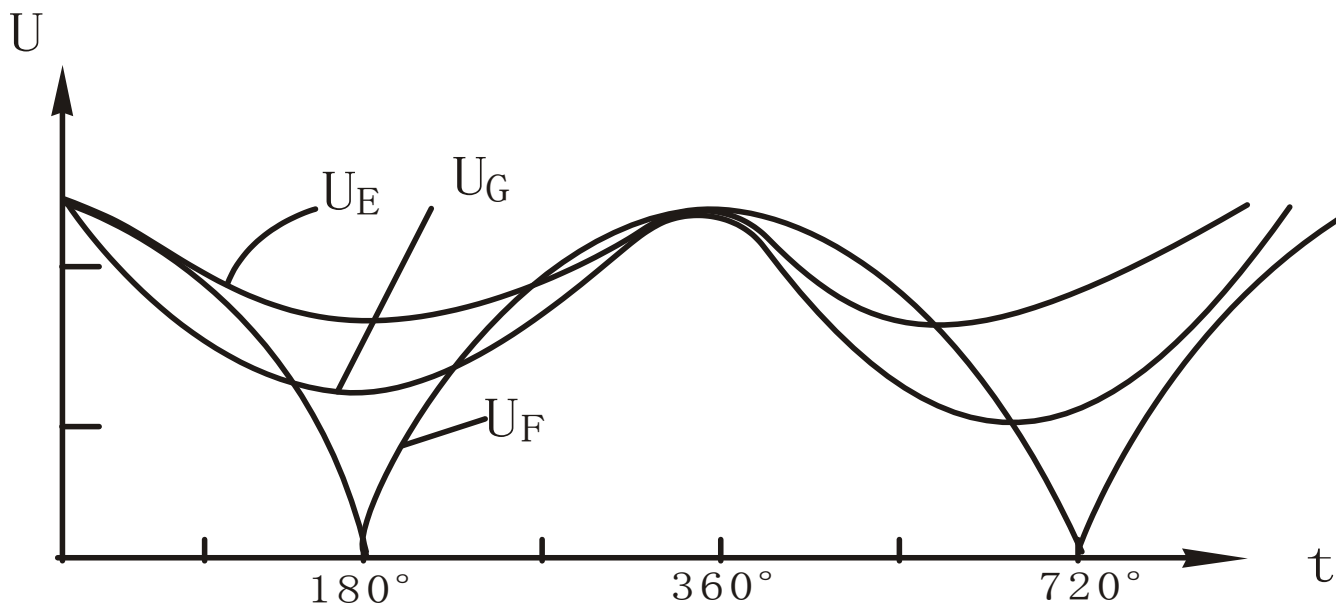


图 2-19 (a) 振荡中各点电压变化

各段电压降为：

Fp 段：
$$\dot{U} = \dot{I}_{zhd} \cdot X_x''$$

OF_x' 段：
$$\dot{U} = \dot{I}_{zhd} \cdot X_x'$$

MO 段：
$$\dot{U} = \dot{I}_{zhd} \cdot X_{xt(1)}$$

PN 段：
$$\dot{U} = \dot{I}_{zhd} \cdot X_{xt(2)}$$

MN 段：
$$\dot{U} = \dot{I}_{zhd} \cdot (X_{xt(1)} + X_x' + X_x'' + X_{xt(2)}) = \dot{E}_{(1)} - \dot{E}_{(2)}$$

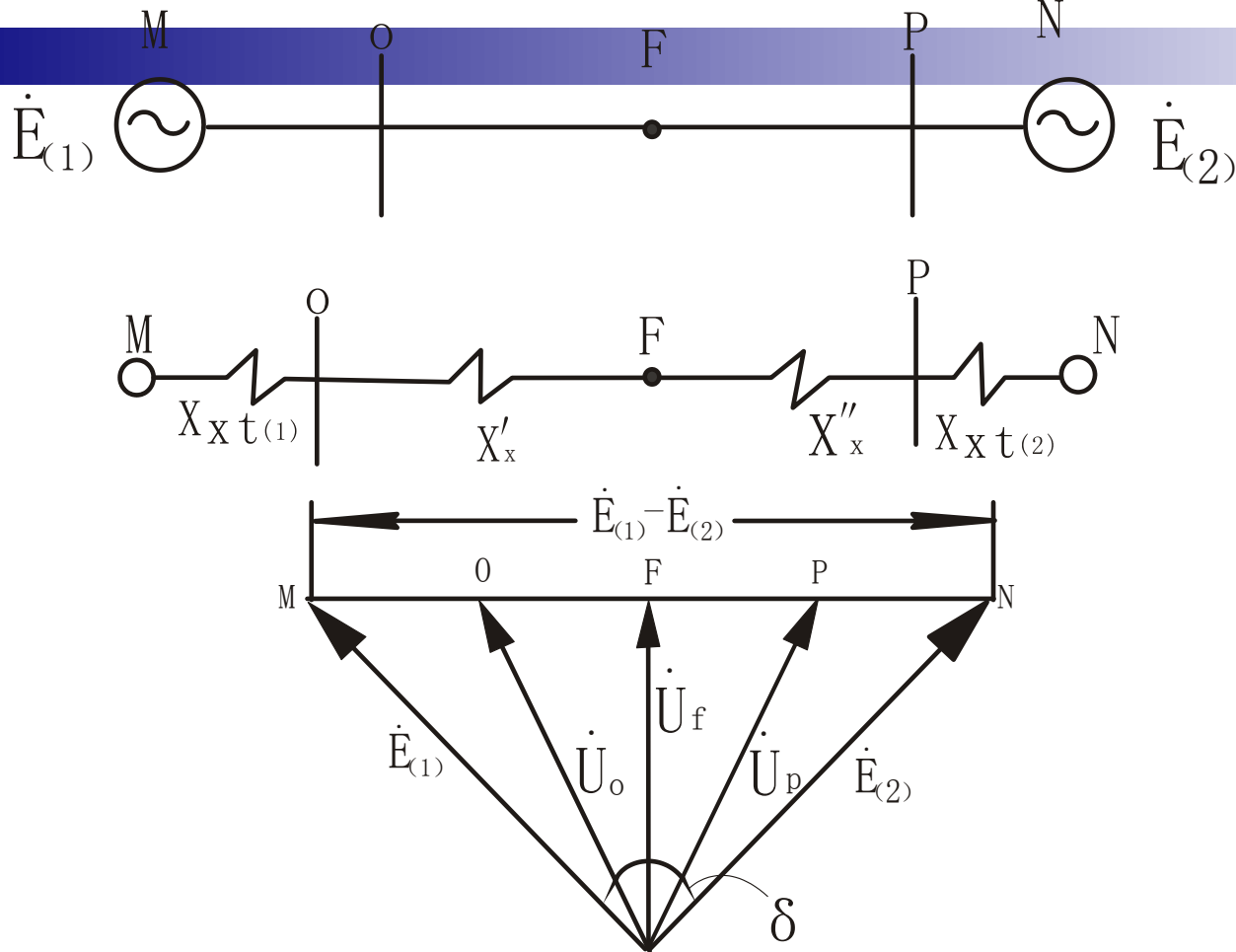


图 2-19 (b) 振荡中各点电压计算

系统中振荡中心的电压值最低，且不受 δ 角的影响。当 $\delta=180^\circ$ 时，振荡中心位于 F 处，且电压等于零。此时，任一点的电压 $U_p = I_{\text{zhd}} \cdot X_{\text{pk}}$

振荡周期的计算:

$$T = \frac{1}{f_1 - f_2} = \frac{1}{f_{cp}}$$

式(2-57)中: f_1 、 f_2 —— 分别为两侧电源在振荡时的频率。
 f_{cp} —— 为振荡频率差。

由振荡录波图计算振荡周期, 用下式:

$$T = \frac{f_{zq}}{50Hz}$$

式(2-58)

式(2-58)中: f_{zq} —— 由录波图查得。电压波形由某一最低处至另一个最低处间的周波数。即一个振荡周期

的周波数。

- 振荡周期的大小，与两侧电源功率剩缺有关，即两侧之间输送功率愈大，周期愈小；输送功率愈小，周期愈大。一般振荡周期约在 $0.15 \sim 3\text{s}$ 之间。常见的振荡周期在 $0.15 \sim 1\text{s}$ 。周期较小说明系统处于非同期过程；周期较长说明是振荡初始或系统接近于再同期。

3-2 振荡情况下的短路电流计算

如图 2-20，当 D 点短路时，因 F 母线电压降的很低，可能引起，夹角摆开较大至发生振荡。

振荡时短路支路中的短路电流将随之变化。

如图 2-21 所示。在 t_1 点保护动作，在 t_2 点保护返回，如保护整定的时间小于 $t_2 - t_1$ 时，可以跳闸，否则保护只能往复动作而不能跳闸。

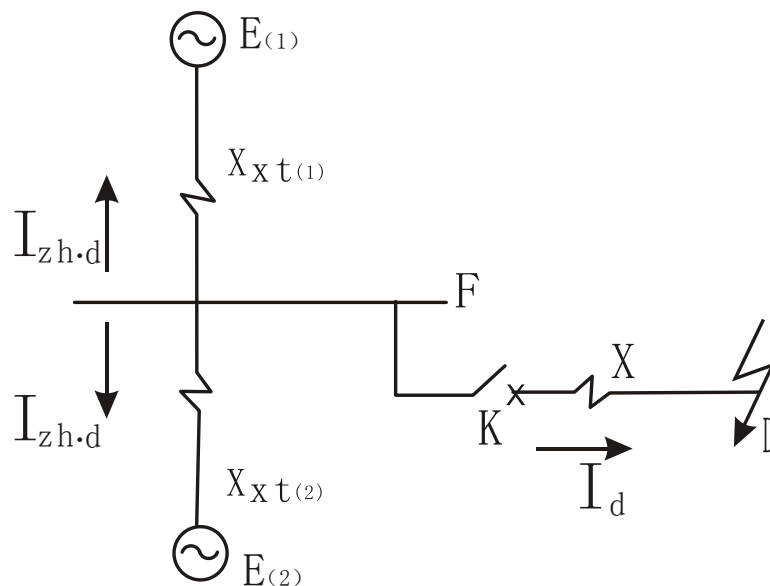


图2-20 振荡又发生短路的系统情况

这种情况可能发生在 $E(1)$ 为大系统， $E(2)$ 为一电厂（或电机）向系统送出功率很大，而保护的整定时限又较长时。对于速动和时限速动保护一般可不考虑这个问题。

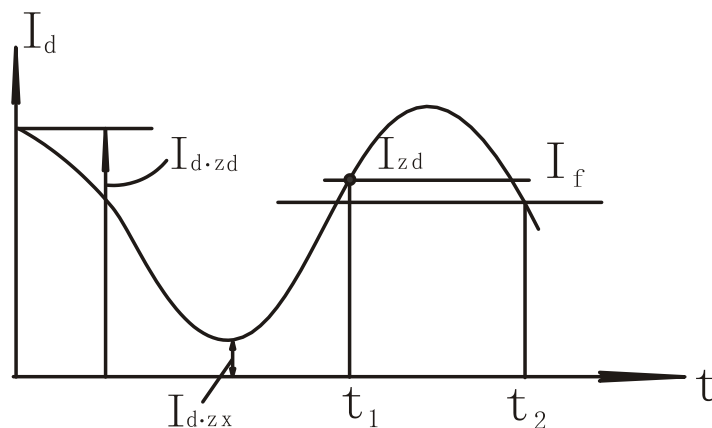


图 2-21 振荡情况下，短路支路中的电流变化

振荡过程中短路支路的短路电流变化的计算按图 2-20 所示网络，计算如下式：

$$^{(2-59)} \dot{I}_d = \frac{\dot{E}_\Sigma}{X_\Sigma + X}$$

式中：

$$^{(2-60)} \dot{E}_\Sigma = \frac{\dot{E}_{(1)} \cdot X_{xt(2)} + K \dot{E}_{(2)} \cdot X_{xt(1)}}{X_{xt(1)} + X_{xt(2)}}$$

$$^{(2-61)} X_\Sigma = \frac{X_{xt(1)} \cdot X_{xt(2)}}{X_{xt(1)} + X_{xt(2)}}$$

$E_{(1)}$, $E_{(2)}$ 为相电势。当电压较高时取 $K=1.1$ ，或取

$K=1.05$ 。一般取 $E_{(1)} = E_{(2)}$ ：

$$\dot{E}_{(2)} = \dot{E}_{(1)} \angle \delta = \dot{E}_{(1)} e^{j\delta}$$

时，
则

$$\dot{E}_{\Sigma} = \frac{E_{(1)} \cdot X_{xt(2)} + E_{(1)} e^{j\delta} \cdot X_{xt(1)}}{X_{xt(1)} + X_{xt(2)}}$$

(2-62)

式中： δ 为， 的夹角，一般对短路初时取 $\delta=0^\circ$ ， 摆角最大时 $\delta=180^\circ$ ， 如欲画出 $I_d=f(\delta)$ 曲线，可取 δ 为任意角度下进行计算。

当取电流绝对值时，（ 2-59 ）式可改写为：

$$I_d = \frac{E_{\Sigma}}{X_{\Sigma} + jX_{\Sigma}} \quad (2-63)$$

3-3 振荡对各种保护的影响

系统发生振荡后，电流、电压、阻抗以及频率等电气量都在随时间变化。反应这些量的保护在振荡中都有可能动作。各电气量的变化情况如图 2-22 所示。F 点为振荡中心。以 M 点装设的保护来分析，在 δ_1 至 δ_2 间，电流保护、电压保护及阻抗保护都能动作，若保护整定时间小于其能动作的时间，则保护将要误动跳闸。保护能动作的角度差可按保护定值用下式计算：

$$\left| I_{zhd} \right| = \left| \frac{2E \sin \frac{\delta}{2}}{X_{\Sigma}} \right| = I_{set} \quad (2-64)$$

图 2-22 示振荡下的各种保护反应情况的分析：

分析方法：

例如分析电流保护，首先计算各种角度下之振荡电流，然后画出电流与角度的关系曲线，并将电流保护定值标上。并代入（2-64）式求出 δ_1 、 δ_2 角度差，再按振荡周期求出保护能启动的时间。最后由已知的电流保护整定时间与保护启动时间比较，便可判断该保护能否误动。

高
整定时间。
为了避免误动作或是提高整定电流值，或是提

其他保护可参照上述方法进行分析。

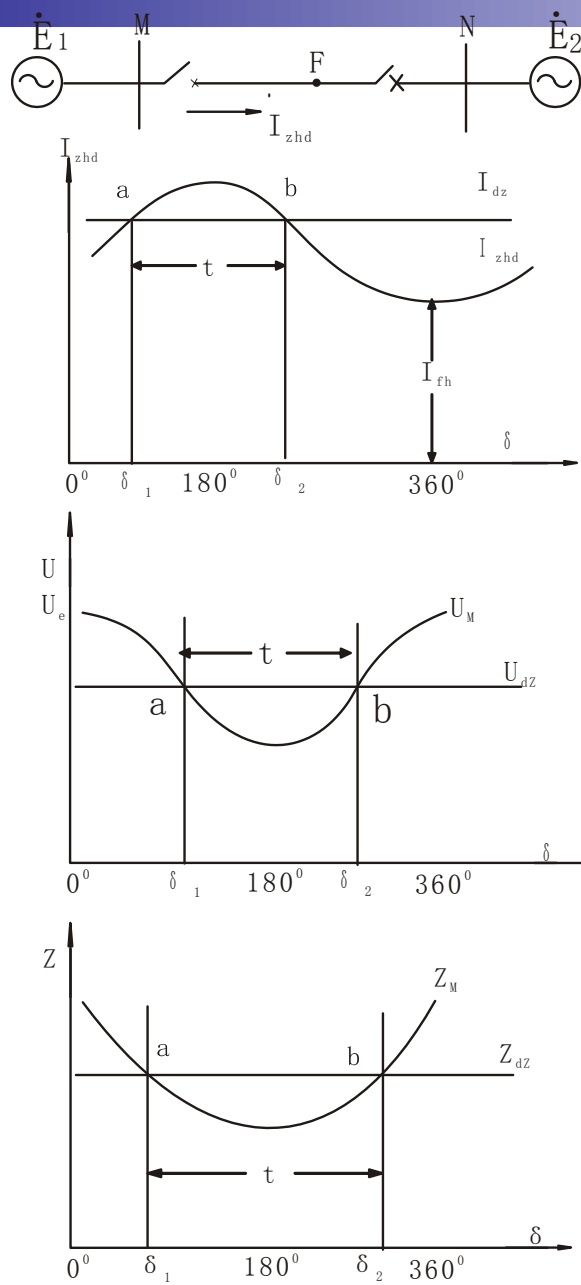


图2-22 振荡下的各种保护反应情况