

用故障录波图进行精确故障定位的研究

湖北省电力中心调度所 杨志刚

摘 要

利用故障录波图进行精确故障定位,可分为故障线路两端均录波与一端有录波两种情况,而每一种又可分为接地故障和相间故障两种。我们采用了过零技术。

对于仅一端有录波的情况,进行精确故障定位难度更大。

对于单相接地短路,利用公式(Ⅲ)和(Ⅲ-1)进行计算。

$$X = \frac{a}{k_i} \cdot \frac{U_\beta |_{i_{0\beta}=0}}{V |_{i_{0\beta}=0}} \quad (\text{Ⅲ})$$

$$a = \frac{\sin \varphi_L}{\omega L} \quad (\text{Ⅲ-1})$$

式中, X 为故障点至 β 侧母线的公里数; k_i 为电流互感器变化; $U_\beta |_{i_{0\beta}=0}$ 为在 β 侧的零序电流过零瞬间故障相相电压的瞬时值; $V |_{i_{0\beta}=0}$ 为相应瞬间在假想模拟阻抗上的压降瞬时值; φ_L 为线路正序阻抗角; ωL 为线路每公里长的电抗值。

步骤:

(1) 用故障录波图上本线路 $3i_0$ 过零点向滞后方向移动 φ_L 角度时所对应的故障相电流一次值的瞬时值, 加上 $3i_0$ 过零点向后移 φ_L 角度时所对应的 $3i_0$ 一次值的瞬时值的 k 倍, 就是我们欲求的 $V |_{i_{0\beta}=0}$, k 为零序补偿度, $k = \frac{1}{3} (k'_0 - 1)$;

(2) 在录波图上求取 $3i_0$ 过零时故障相电压的一次瞬时值, 即 $U_\beta |_{i_{0\beta}=0}$ 的值;

(3) 用 $3i_0$ 的上峰值连线与下峰值连线距离的一半画水平线(平行线), 与 $3i_0$ 曲线的交点即为 $3i_0$ 的过零点;

(4) 用线路正序阻抗角的正弦, 除以线路每公里长的电抗, 其商即为 a 值;

\dot{V}_0 和 \dot{V}_1 均超前于 \dot{V}_2 , 它们的输出可接入如图18-a所示的移相电路, 以改变输出电压的相位。

参考文献

1. 《电路基础》天津大学电工原理教研室编 1985年6月
2. 《SLYP-SLGN方向高频保护技术说明》水电部南京自动化研究所 教学安 1985年
3. 《7LSL2型高压远距离保护装置》华北电管局五十万办公室 1984年3月

(5) 将上述所求得的值与电流互感器变比一同代入公式(Ⅲ), 即可求得故障点到母线的电气距离公里数(为每公里电感或电抗是已考虑弧垂的, 则是实际公里数)。

对于相间故障, 利用公式(Ⅵ)和公式(Ⅲ-1)进行计算。

$$X = \frac{a}{k_i} \cdot \frac{U_{BC\beta} |i_{KBC\beta-0}|}{V_{BC\beta} |i_{KBC\beta-0}|} \quad (\text{Ⅵ})$$

式中数与(Ⅲ)式中相似。

步骤:

(1) 以A相电压为基准量, 在 β 侧的故障录波图上, 测量出三相电流 $\dot{I}_{A\beta}$ 、 $\dot{I}_{B\beta}$ 、 $\dot{I}_{C\beta}$ 相对于 $\dot{U}_{A\beta}$ 的相位, 并测出各自的峰峰值(一次值), 得到三相全电流, 按求负序电流的公式求出 \dot{I}_{2A} , 可得到 \dot{I}_{2A} 对 $\dot{U}_{A\beta}$ 的相对相位, 将A相电压过零点向超前方向移动($\varphi_{I_{2A}} + 90^\circ$), 就得到电流的故障分量 $i_{KBC\beta}$ 的过零点;

(2) 通过该过零点作一垂线, 垂直于 $\dot{U}_{A\beta}$ 峰峰值的连线, 与B相、C相的相电压曲线相交, 交点就是故障电流过零时B相与C相的电压瞬时值, 以B相的值减C相的值(C相值为正则减正值, 为负则减负值), 就得到 $U_{BC\beta} |i_{KBC\beta-0}|$ 的值;

(3) 在 $i_{KBC\beta}$ 过零点滞后 φ_L 处再作一垂直线, 与B相、C相全电流曲线相交, 以B相电流交点的一次值减去相应瞬间C相电流交点的一次值(乘 1Ω), 就是 $V_{BC\beta} |i_{KBC\beta-0}|$ 的值;

(4) 与前述相同求出 a ;

(5) 代入公式(Ⅵ)即可求得故障点到 β 侧母线的公里数 X (要求更精确时, 可按实际档距和弧垂修正 l_0)。

对于故障线路两端均有录波的情况, 经过计算, 可得到很精确的故障距离。

此种方法亦可用于微机故障定位装置。

前 言

在电力系统中所发生的故障, 就其数量和几率来说, 以高压和超高压输电线路所发生的故障居首。

高压输电线路和超高压输电线路, 输电距离较长, 往往穿越地形较复杂的地区, 有时还经过深山老林、悬崖峭壁地段, 巡线是有困难的。且发生故障时又往往是气候条件恶劣的时候。因而, 在输电线路发生永久性故障后, 依靠人力去全线查找故障点, 是比较困难的。这样, 就导致了事故停电时间的延长。若故障发生在重要联络线上, 则还可能对电力系统的稳定运行带来严重威胁。有一些故障是瞬时性的, 或者是重合闸成功, 或者强送成功, 但故障点就更难寻找, 而这些隐患常导致产生重复性故障, 增加事故停电的机率, 又不得不去寻找这些故障点。

解决上述问题的根本途径, 是装设带电测量的输电线路故障探测器(或故障定位装置)。然而, 输电线路故障探测器在我国还没得到普遍应用, 在我国得到普遍应用的是用来分析故障或事故的故障录波器。

为了大量地减少巡线工人的繁重体力劳动, 提高劳动效率; 为了能及时处理线路缺陷, 减少因事故停电而造成的各种损失; 为了能消除瞬时故障造成的隐患, 减少产生重

复性故障的机率，应充分利用故障录波器记录的结果来分析和计算，确定故障点。

超高压输电线是大电流接地系统，在其上发生的故障大部分是单相接地短路，它占百分之六十五以上。因而，多年来，从规程规定到实际工作，都是利用当时的计算手段，在线路模型上设置足够多的故障点，经过计算，作出金属性单相接地短路时故障电流与故障距离的函数曲线。当发生单相接地短路时，在故障录波图上测量出故障电流，再去查上述曲线，以求得故障距离，然而，实际发生的单相接地短路大多数并非金属性接地，而是经过过渡电阻短路，且过渡电阻是不固定的，因各种情况而异，故用这种非金属性单相接地短路的故障录波电流值去查金属性接地短路时的故障电流—故障距离关系曲线，显然是不合理且不科学的，其结果是很不准确的。由于过渡电阻的不稳定性，作大量的计算工作，作出许许多多的曲线，也是不现实的。所以有必要找出一种较为简单的方法，利用故障录波图较为准确地确定故障点位置。

下面介绍这种方法，即使在两端录波的情况下，如不具备计算条件，也可以用故障线路一端录波的方法进行故障定位。

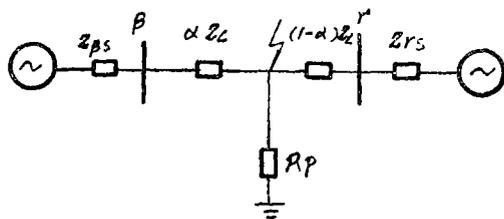
一、接地故障

(一) 故障线路两端录波

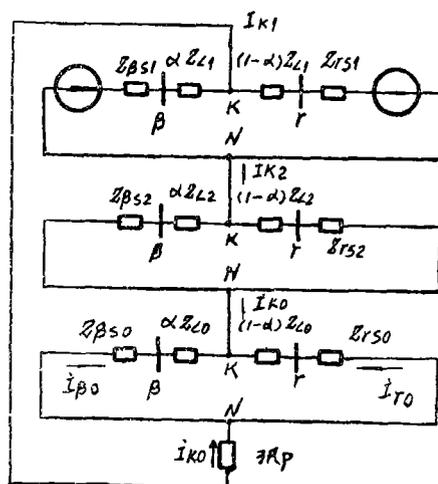
1. 两端供电单回输电线的接地故障

一个简化的两端供电的单回输电线系统如图一所示。设 β 端的系统等值阻抗为 $Z_{\beta S}$ ， r 端的系统等值阻抗为 Z_{rS} ，线路阻抗为 Z_L ，在距 β 端 αZ_L 处发生接地故障。

众所周知，单相接地短路的复合序网络为正序、负序与零序网络相串联，具体化后如图二所示，而两相接地的复合序网络为正序网络串联上负序网络与零序网络相并联的回路，其零序网络与单相接地短路时一样。



图一 两端供电单回线系统



图二 单相短路时的复合序网络

故障录波器一般只能录到 $3 \dot{I}_0$ ，故利用零序网络来分析比较有利。从图二的零序网络中可得出：

$$\begin{aligned} \dot{I}_{\beta 0} + \dot{I}_{r,0} &= \dot{I}_{K0} \\ \dot{I}_{\beta 0} &= \frac{(1-\alpha)Z_{L0} + Z_{r,s0}}{Z_{\beta s0} + Z_{L0} + Z_{r,s0}} \cdot \dot{I}_{K0} \end{aligned}$$

$$\dot{I}_{r,0} = \frac{\alpha Z_{L0} + Z_{\beta s0}}{Z_{\beta s0} + Z_{L0} + Z_{r,s0}} \cdot \dot{I}_{K0}$$

$$\frac{\dot{I}_{\beta 0}}{\dot{I}_{r,0}} = \frac{(1-\alpha)Z_{L0} + Z_{r,s0}}{\alpha Z_{L0} + Z_{\beta s0}}$$

令 $\dot{D} = \frac{\dot{I}_{\beta 0}}{\dot{I}_{r,0}}$ ，其幅值 $d = \frac{I_{\beta 2}}{I_{r,2}}$ ，将 \dot{D} 引入上式并进行整理后，可得到故障点至 β 侧的距离与线路全长的比 α 。

$$\alpha = \frac{Z_{r,s0} + Z_{L0} - \dot{D}Z_{\beta s0}}{(1 + \dot{D})Z_{L0}} \times 100\% \quad (I)$$

由于系统零序阻抗是由变压器零序阻抗与接于同母线的非故障线路的零序阻抗，侧变压器零序阻抗等并联而成，其综合阻抗的阻抗角接近线路的零序阻抗角，且两端零序电流的相角差也不易测量，故可取各相应的电抗及两端零序电流的幅值比作近似计算，其误差不会太大，此时

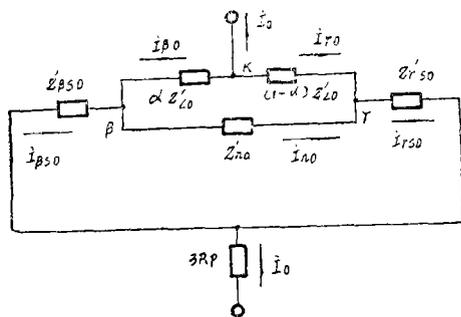
$$\alpha = \frac{X_{r,s0} + X_{L0} - dX_{\beta s0}}{(1 + d)X_{L0}} \times 100\% \quad (I-1)$$

从式 (I-1) 可看出，只要量出两端 $3 \dot{I}_0$ 的幅值，求其幅值比 d ，再算出系统零序电抗，与线路零序电抗一起代入 (I-1) 式，就可求得故障点距 β 端的距离与线路全长之比 α 的值。整个计算与接地过渡电阻无关。

系统零序电抗的计算，只要考虑接于母线的接地变压器的零序电抗与母线上所有出线的线路零序电抗加上相应对端母线上所接中点接地的变压器零序电抗相并联，就可以了。

2. 两端供电平行双回线的接地故障

两端供电平行双回线的接地故障与单回线的情况既有共同点，也有其特殊点，其特殊点是要考虑双回线间的零序互感，同时两端间多



图三 平行双回线的零序网络

了一条可流过电流的道路——第二回线路。其共同点是复合序网络为正、负、零序网络的串联，用零序网络进行分析，此时的零序网络如图三所示。其中，

$$Z'_{LO} = Z_{LO} - Z_{MO} \quad (2-1)$$

$$Z'_{n0} = Z_{n0} - Z_{M0} \quad (2-2)$$

$$Z'_{\beta SO} = Z_{\beta SO} + \alpha Z_{M0} \quad (2-3)$$

$$Z'_{r SO} = Z_{r SO} + (1-\alpha) Z_{M0} \quad (2-4)$$

Z_{LO} 为故障线路的零序阻抗, Z_{n0} 为平行的另一回线路的零序阻抗, Z_{M0} 为平行双回线间的零序互感抗, $Z_{\beta SO}$ 、 $Z_{r SO}$ 为系统零序阻抗。零序网络中的电流分布如图中所示, β 、 k 、 r 三点之间由 $\alpha Z'_{LO}$ 、 $(1-\alpha) Z'_{LO}$ 、 Z'_{n0} 构成阻抗三角形连线。为便于分析, 将它化为 β 、 k 、 r 三点之间的星形连接阻抗 Z_{β} 、 Z_L 、 Z_r 。按阻抗三角形——星形变换公式可得:

$$Z_{\beta} = \frac{Z'_{n0} \cdot \alpha \cdot Z'_{LO}}{Z'_{n0} + Z'_{LO}} \quad (2-5)$$

$$Z_r = \frac{Z'_{n0} \cdot (1-\alpha) Z'_{LO}}{Z'_{n0} + Z'_{LO}} \quad (2-6)$$

按图三中设定的电流方向, 有:

$$\dot{I}_{\beta SO} = \dot{I}_{\beta 0} + \dot{I}_{n0} \quad (2-7)$$

$$\dot{I}_{r SO} = \dot{I}_{r0} - \dot{I}_{n0} \quad (2-8)$$

$$\dot{I}_{\beta SO} + \dot{I}_{r SO} = \dot{I}_0 \quad (2-9)$$

$$\text{而 } \dot{I}_{\beta SO} = \frac{Z_r + Z'_{r SO}}{Z'_{\beta SO} + Z_{\beta} + Z_r + Z'_{r SO}} \times \dot{I}_0$$

$$\dot{I}_{r SO} = \frac{Z_{\beta} + Z'_{\beta SO}}{Z'_{\beta SO} + Z_{\beta} + Z_r + Z'_{r SO}} \times \dot{I}_0$$

$$\frac{\dot{I}_{\beta SO}}{\dot{I}_{r SO}} = \frac{Z_r + Z'_{r SO}}{Z_{\beta} + Z'_{\beta SO}} \quad (2-10)$$

令 $\dot{D} = \frac{\dot{I}_{\beta SO}}{\dot{I}_{r SO}}$, 并与(2-1)至(2-8)式一起代入(2-10)式, 有:

$$\dot{D} = \frac{\dot{I}_{\beta 0} + \dot{I}_{n0}}{\dot{I}_{r0} - \dot{I}_{n0}} = \frac{\frac{(Z_{n0} - Z_{M0}) \cdot (1-\alpha) \cdot (Z_{LO} - Z_{M0})}{Z_{n0} + Z_{LO} - 2Z_{M0}} + Z_{r SO} + (1-\alpha) Z_{M0}}{\frac{(Z_{n0} - Z_{M0}) \cdot \alpha \cdot (Z_{LO} - Z_{M0})}{Z_{n0} + Z_{LO} - 2Z_{M0}} + Z_{\beta SO} + \alpha Z_{M0}}$$

$$\text{设 } Z'_{L n0} = Z'_{L0} \parallel Z'_{n0} = \frac{(Z_{n0} - Z_{M0}) (Z_{LO} - Z_{M0})}{Z_{n0} + Z_{LO} - 2Z_{M0}} \quad (2-11)$$

$$\text{则 } \dot{D} = \frac{Z'_{L n0} \cdot (1-\alpha) + Z_{r SO} + (1-\alpha) Z_{M0}}{Z'_{L n0} \cdot \alpha + Z_{\beta SO} + \alpha Z_{M0}}$$

$$\text{或 } \dot{D} (Z'_{L n0} + Z_{M0}) \alpha + \dot{D} Z_{\beta SO} = (Z'_{L n0} + Z_{M0}) (1-\alpha) + Z_{r SO}$$

$$(1 + \dot{D}) (Z'_{L n0} + Z_{M0}) \alpha = (Z'_{L n0} + Z_{M0}) + Z_{r SO} - \dot{D} Z_{\beta SO}$$

$$\alpha = \frac{1}{1 + \dot{D}} + \frac{Z_{r,SO} - \dot{D}Z_{\beta,SO}}{(1 + \dot{D})(Z'_{L_{n0}} + Z_{M0})} \quad (\text{II})$$

为便于求得故障点位置，同样可用相应的零序电抗代替各零序阻抗，作近似计算，
则

$$\alpha \approx \frac{1}{1 + \alpha} + \frac{X_{r,SO} - dX_{\beta,SO}}{(1 + d)(X'_{L_{n0}} + X_{M0})} \quad (\text{II}-1)$$

其中， $X'_{L_{n0}}$ 为考虑了零序互感的平行双回线电抗（ $X_{n0} - X_{M0}$ ）与（ $X_{L0} - X_{M0}$ ）的并联电抗，即

$$X'_{L_{n0}} = X'_{n0} \parallel X'_{L0} = \frac{(X_{n0} - X_{M0})(X_{L0} - X_{M0})}{X_{n0} + X_{L0} - 2X_{M0}} \quad (2-12)$$

$$\begin{aligned} \text{且 } \dot{D} = de^{i\theta} &= \left. \begin{aligned} & \frac{\dot{I}_{\beta c} + \dot{I}_{n0}}{\dot{I}_{r0} - \dot{I}_{n0}} e^{i\theta} \\ & \frac{\dot{I}_{\beta 0} + \dot{I}_{n0}}{\dot{I}_{r0} - \dot{I}_{n0}} \end{aligned} \right\} \quad (2-13) \end{aligned}$$

按（2-12）式求得有互感的平行双回线的并联电抗 $X'_{L_{n0}}$ ，按前述方法求得系统零序电抗，再求d值，然后代入（II-1）式，即可求得故障点位置。

根据（2-13）式，在故障录波图上求d，方法如下：

（1）用 β 侧的故障录波图，在 $3I_{\beta}$ 最大值（峰顶）处作出水平线，并作垂直线交 $3I_{n0}$ 于某一点，取（ $3i_{\beta 0}$ ）与（ $3i_{n0}$ ）的瞬时值代数之和即（ $3i_{\beta 0}$ ）半峰峰值与其峰点对应 $3i_{n0}$ （另一回线的）的瞬时值相加，若该点的 $3i_{n0}$ 为正值，则加正值，为负值则加负值。 $3i_{n0}$ 的瞬时值以其峰峰值的一半减去交点到峰顶所测值来求取，较为方便、准确；

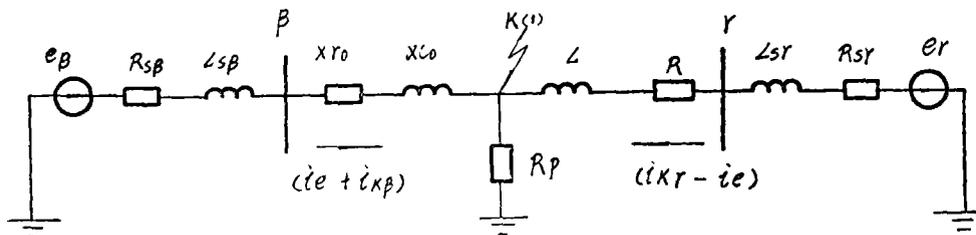
（2）用r侧的故障录波图按上述方法求得 $3i_{n0}$ 的峰峰值之半及 $3i_{n0}$ 的瞬时值，两者相减， $3i_{n0}$ 的瞬时值是正就减正的，是负的就减负的；

（3）用上面求得的两个电流值， β 侧的除以r侧的，即可得到d。

（二）故障线路一端录波

1. 两端供电单回输电线上单相接地短路

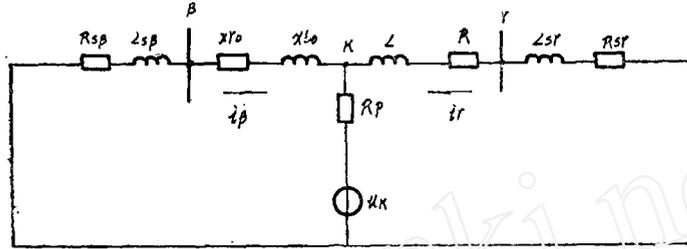
设故障点发生在距 β 端X公里处，故障线路每公里的电阻为 r_0 ，每公里的电感为 l_0 。此时系统可如图四所示。



图四 以电阻、电感表示的简化系统

将该故障系统分解为正常量和故障，用迭加原理进行分析计算，并用微分方程形式，设 u_{β} 超前 e_r ， β 侧向 γ 侧送的负荷电流为 i_r ，则正常情况下， i_{β} 在 β 至 k 点线段上产生的压降为：

$(x_r \cdot i_{\beta} + x_l \cdot \frac{di_{\beta}}{dt})$ ，加上 k 点电压 u_K 则为 β 端母线电压。故障情况可用图五表示。



图五 两端供电单回输包线单相接地时故障分量及网络

将 u_K 分解为正序、负序和零序系统， $u_{K1} = u_{K2} = u_{K0} = \frac{1}{3} u_K$ 。设故障线路每公里的零序电阻、电感与正序的关系为：

$$R_0 = k_0 R_1 \quad L_0 = k'_0 L_1$$

在正、负序网络中无 R_p ， R_p 仅出现在零序网络。则 β 端母线上故障电压分量为

$$-u_K + x_r \cdot i_{1\beta} + x_l \cdot \frac{di_{1\beta}}{dt} + x_r \cdot i_{2\beta} + x_l \cdot \frac{di_{2\beta}}{dt} + k_0 x_r \cdot i_{0\beta} + k'_0 x_l \cdot \frac{di_{0\beta}}{dt} + 3R_p(i_{0\beta} + i_{0r})$$

对于正序及负序网络，故障点两侧的阻抗角一般可认为相等，则流经两侧的正、负序电流与流过故障点的正、负序电流相位相同。

对于零序网络，由于每个发电厂或变电站（双电源的），至少还另有一回出线。一般地说，故障点两侧的零序阻抗角之差均小于 5° 。因而可近似地认为，故障点两侧的零序阻抗角相同，则流经两侧的零序电流与流过故障点的总零序电流近似同相位。

由于单相接地时 $i_{1K} = i_{2K} = i_{0K}$ ，加上上述缘由， β 端母线电压的故障分量可归纳成

$$-u_K + 2x_r \cdot i_{1\beta} + k_0 x_r \cdot i_{0\beta} + 2x_l \cdot \frac{di_{1\beta}}{dt} + k'_0 x_l \cdot \frac{di_{0\beta}}{dt} + 3R_p i_{0K}$$

它加上正常分量，则为 β 端母线的总电压

$$u_{\beta} = x_r \cdot i_{1\beta} + x_l \cdot \frac{di_{1\beta}}{dt} + 2x_r \cdot i_{1\beta} + k_0 x_r \cdot i_{0\beta} + 2x_l \cdot \frac{di_{1\beta}}{dt} + k'_0 x_l \cdot \frac{di_{0\beta}}{dt} + 3R_p i_{0K}$$

取 $i_{0\beta}$ 或 i_{0K} 过零点时的 u_{β} 值（瞬时值），此时因 $i_{0\beta} = i_{0K} = 0$ ，有：

$$u_{\beta} \Big|_{i_{0\beta}=0} = x \left[r_0 i_{1\beta} + l_0 \frac{di_{1\beta}}{dt} + 2l_0 \frac{di_{1\beta}}{dt} + k'_0 l_0 \frac{di_{0\beta}}{dt} \right] \Big|_{i_{0\beta}=0} \quad (2-14)$$

如果我们在电流互感器二次侧接入一个模拟阻抗，并进行零序补偿。模拟阻抗的电阻分量为 $a r_0$ ，电感分量为 $a l_0$ ，其阻抗角即为线路阻抗角 φ_L 。零序补偿度为 k ，即在零序电流回路接入的电阻分量为 $k a r_0$ ，电感分量为 $k a l_0$ ，则其总压降为：

$$V = \frac{a}{k_i} \left[r_{0i} i_e + L_0 \frac{di_e}{dt} + 2r_{0i} i_{1\beta} + r_{0i} i_{0\beta} + 3kr_{0i} i_{0\beta} + 2L_0 \frac{di_{1\beta}}{dt} + L_0 \frac{di_{0\beta}}{dt} + kL_0 \frac{d3i_{0\beta}}{dt} \right]$$

取补偿系数 $k = \frac{1}{3} (k'_0 - 1)$, 取 $i_{0\beta}$ 过零时的 V 值, 由前述原因, 可得:

$$V \Big|_{i_{0\beta}=0} = \frac{a}{k_i} \left[r_{0i} i_e + l_0 \frac{di_e}{dt} + 2l_0 \frac{di_{1\beta}}{dt} + k'_0 l_0 \frac{di_{0\beta}}{dt} \right] \Big|_{i_{0\beta}=0} \quad (2-15)$$

式(2-14)除以式(2-15), 得:

$$\frac{u_{\beta}}{V} \Big|_{i_{0\beta}=0} = \frac{X k_i}{a},$$

$$X = \frac{a}{k_i} \cdot \frac{u_{\beta} \Big|_{i_{0\beta}=0}}{V \Big|_{i_{0\beta}=0}} \quad (III)$$

其中 k_i 为电流互感器变化。

$$\text{令 } \sqrt{(ar_0)^2 + (al_0\omega)^2} e^{j\varphi_L} = 1\Omega e^{j\varphi_L},$$

等式左边 $\sqrt{(ar_0)^2 + (al_0\omega)^2} e^{j\varphi_L}$

$$= \sqrt{(ar_0)^2 + (al_0\omega)^2} \cdot \cos\varphi_L + j\sqrt{(ar_0)^2 + (al_0\omega)^2} \cdot \sin\varphi_L$$

$$= ar_0 + ja l_0 \omega$$

等式右边

$$1\Omega e^{j\varphi_L} = 1\Omega \cos\varphi_L + j1\Omega \sin\varphi_L$$

$$\text{则 } a = \frac{\sin\varphi_L}{\omega l_0} \quad (III-1)$$

ωl_0 即为每公里长的线路电抗值。

录波图上故障相的全电流 $i_{0\beta}$, 乘以 $1\Omega e^{j\varphi_L}$, 加上 $3i_{0\beta} k_M e^{j\varphi_L}$ 就是 V 值。故障相的全电流 $i_{0\beta}$ 向前移相 φ_L , 再求取 $3i_{0\beta}$ 过零时的值, 与 $3i_{0\beta}$ 过零点向后移 φ_L 时的故障相电流瞬时值相等; $3i_{0\beta} k_M e^{j\varphi_L}$ 在 $i_{0\beta}$ 过零时的值, 与 $3i_{0\beta}$ 过零点后移 φ_L 时 $3i_{0\beta}$ 的瞬时值乘以 k 相等。亦即, 用 $3i_{0\beta}$ 过零点后移 φ_L 角度时所对应的故障相电流一次值的瞬时值, 加上 $3i_{0\beta}$ 过零点后移 φ_L 角度时所对应的 $3i_{0\beta}$ 一次瞬时值的 k 倍, 就是我们要求的 $V \Big|_{i_{0\beta}=0}$ 的值, 在录波图上求取 $3i_{0\beta}$ 过零时故障相电压的一次瞬时值, 即 $u_{\beta} \Big|_{i_{0\beta}=0}$ 的值。

将所求得的 a 、 $u_{\beta} \Big|_{i_{0\beta}=0}$ 、 $V \Big|_{i_{0\beta}=0}$ 、 k_i 代入式(III), 即可求得故障点至 β 侧母线的公里数。

2. 两端供电平行双回线上的单相接地短路

这里不再推导公式, 仍可用公式(III)进行计算。所不同的是, $V \Big|_{i_{0\beta}=0}$ 的值等于上面所求得之值再减去 $3i_{0\beta}$ 过零点后移 90° 时所对应的平行健康线路流过的 $3i_{0\beta}$ 一次瞬时值的 k_M 倍, k_M 为零序互感补偿度(系数)。若 $3i_{0\beta}$ 一次瞬时值为负时, 应减负数。

3. 两相接地

按两相短路计算。

二、相间故障

(一) 两相短路两端录波

两相短路时，其复合序网络为正序网络与负序网络相并联，负序电流等于正序电流，这是众所周知的。为消除故障过渡电阻对故障定位的影响，在两端录波情况下，可借助负序网络中负序电流的分配来精确定位故障点。单回线路情况下，其负序网络与图二中的负序网络相同，且与零序网络相似；双回线路情况下，其负序网络与图三中的零序网络相似。

因此，在两端供电单回线路两相短路情况下，故障点的位置由公式(IV)、(IV-1)或(IV-2)、(IV-3)确定，它们可由负序网络导出。

$$\alpha = \frac{Z_{r,s2} + Z_{L2} - \dot{D}Z_{\beta s2}}{(1 + \dot{D})Z_{L2}} \times 100\% \quad (V)$$

$$\dot{D} = \frac{\dot{I}_{\beta 2}}{\dot{I}_{r2}} = d e^{i\theta} \quad (V-1)$$

$$\alpha = \frac{X_{r,s2} + X_{L2} - dX_{\beta s2}}{(1 + d)X_{L2}} \times 100\% \quad (V-2)$$

$$d = \frac{I_{m\beta 2}}{I_{mr2}} \quad (V-3)$$

各侧负序电流的求取，要求首先测出各侧三相电流的幅值与相位，例如BC相间短路时，在录波图上用读数放大镜读出每相电流幅值，以A相为基准相，A相电流为零度，量出B相电流和C相电流峰点对A相电流峰点的角度，即为B相电流和C相电流相对于A相电流的相位，按对称分量分解法的公式

$$\dot{I}_2 = \frac{1}{3} (\dot{I}_A + a^2 \dot{I}_B + a \dot{I}_C)$$

求得两端负序电流，再求取 \dot{D} 或 d ，然后代入(V)或(V-2)式求取 α 。

对于两端供电双回输电线上的一回线发生两相短路情况下，故障点的位置由公式(V)或(V-1)确定，它们可由相应的负序网络导出。

$$\alpha = \left[\frac{1}{1 + \dot{D}} + \frac{Z_{r,s2} - \dot{D}Z_{\beta s2}}{(1 + \dot{D})Z_{L_{n2}}} \right] \times 100\%$$

$$Z_{L_{n2}} = Z_{L2} // Z_{n2} = \frac{Z_{L2} \cdot Z_{n2}}{Z_{L2} + Z_{n2}} \quad (V)$$

$$\dot{D} = \frac{\dot{I}_{\beta 2} + \dot{I}_{n2}}{\dot{I}_{r2} - \dot{I}_{n2}} = d e^{i\theta}$$

$$\alpha = \left[\frac{1}{1+d} + \frac{X_{r,s2} - dX_{\beta s2}}{(1+d)X_{L,n2}} \right] \times 100\%$$

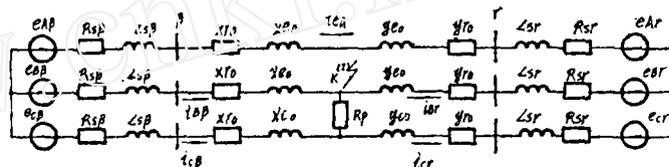
$$X_{L,n2} = X_{L2} \parallel X_{n2} = \frac{X_{L2} \cdot X_{n2}}{X_{L2} + X_{n2}}$$

$$d = \frac{|\dot{i}_{\beta 2} + \dot{i}_{n2}|}{|\dot{i}_{r2} - \dot{i}_{n2}|} \quad (V-1)$$

故障线路两端负序电流的求取，方法与单回线相同，健康线路流过的负序电流，求取方法亦相同。各侧的以该侧非故障相为基准相，β侧的求 $\dot{i}_{\beta 2}$ 为最大时 (90°) \dot{i}_{n2} 的值，然后相加，γ侧的求 \dot{i}_{r2} 为最大时 \dot{i}_{n2} 值，然后相减（代数运算）。所得二值相除，前者除以后者就可得到 d 值。再代入公式 (V-1)，求 α。

(二) 两相故障一端录波

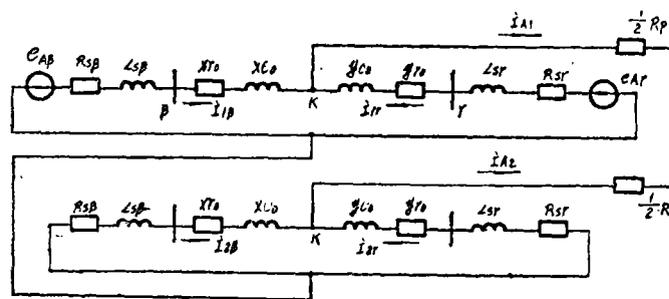
一次系统接线如图六所示，设为 BC 两相经过渡电阻短路。



图六 BC 两相经过渡电阻短路的三相系统接线

根据资料 (1) 可作出其复合序网络如图七所示。

其中，两侧的系统阻抗电阻分量为 $R_{s\beta}$ 、 R_{sr} ，电感为 $L_{s\beta}$ 、 L_{sr} ，故障点离 β 侧母线 X 公里，离 γ 侧母线 y 公里，两侧电势为 e_β 、 e_r 、 e_β 超前 e_r ，短路点过渡电阻为 R_p ， $r.l.$ 为线路每公里的电阻与电感。



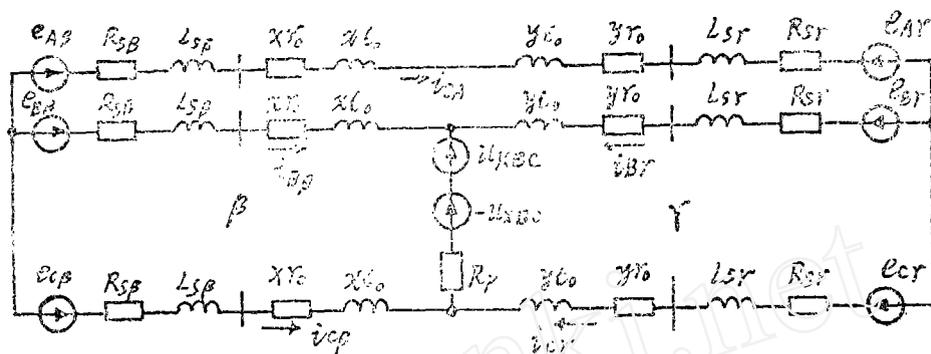
图七 经过渡电阻 BC 两相短路的复合序网络

由图七复合序网络可见，过渡电阻并不影响故障点两侧阻抗角（或电流相位）。一般地说，故障点两侧的正序或负序阻抗的阻抗角是基本相同的，亦即，可认为故障点两侧的正序或负序电流的相位基本上是相同的。而故障分量

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{i}_{k\beta 1} = a^2 \dot{i}_{1\beta} + a \dot{i}_{2\beta} \\ \dot{i}_{k\beta 2} = a \dot{i}_{1\beta} + a^2 \dot{i}_{2\beta} \\ \dot{i}_{k\beta 0} = \dot{i}_{k\beta 1} - \dot{i}_{k\beta 2} \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \dot{i}_{kr 1} = a^2 \dot{i}_{1r} + a \dot{i}_{2r} \\ \dot{i}_{kr 2} = a \dot{i}_{1r} + a^2 \dot{i}_{2r} \\ \dot{i}_{kr 0} = \dot{i}_{kr 1} - \dot{i}_{kr 2} \end{array} \right. \quad (3-1)$$

因而 $\dot{i}_{k\beta 0}$ 与 $\dot{i}_{kr 0}$ 的相位基本相同。

对于图六，我们在短路过渡电阻支路中串入两个相位差 180° 的电势其值为故障前k点B相与C相间的电压差 u_{KBC} 与 $(-u_{KBC})$ ，这对电路没有丝毫影响，它如图八所示。



图八 等效电路—迭加原理的应用

采用迭加原理，先考虑 u_{KBC} 、 $e_{A\beta}$ 、 $e_{B\beta}$ 、 $e_{C\beta}$ 、 $e_{A\gamma}$ 、 $e_{B\gamma}$ 、 $e_{C\gamma}$ 诸电势的共同作用 $(-u_{KBC})$ 短接，这就是正常运行情况，前面我们已经设 e_{β} 超前 e_{γ} ，则负荷电流从 β 侧流向 γ 侧。在负荷电流作用下， β 母线BC相间电压的正常分量用微分方程形式表示为：

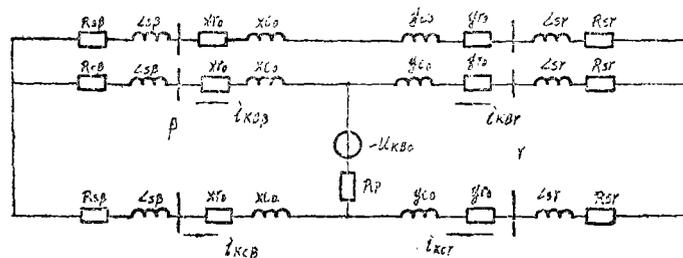
$$u'_{BC\beta} = (i_{eB} - i_{eC})x_{\gamma 0} + x_{l 0} \frac{d(i_{eB} - i_{eC} + u_{KBC})}{dt}$$

$$= i_{eBC}x_{\gamma 0} + x_{l 0} \frac{di_{eBC}}{dt} + u_{KBC 0} \quad (3-2)$$

式中， i_{eB} 、 i_{eC} 分别为流过B、C相的负荷电流，而

$$i_{eBC} = i_{eB} - i_{eC}$$

现在再考虑 $(-u_{KBC})$ 一个电势单独作用于系统，而图八中其他所有电势均短接的情况，此为故障分量作用的情况，如图九所示。



图九 故障分量等值电路

图中， $i_{K\beta B}$ 、 $i_{K\beta C}$ 、 $i_{K\gamma B}$ 、 $i_{K\gamma C}$ 分别为两侧B、C相流过的故障电流分量。 β 侧母线BC相间电压的故障分量用微分方程的形式表示为

$$u''_{BC\beta} = (i_{K\beta B} - i_{K\beta C})x_{\gamma 0} + x_{l 0} \frac{d(i_{K\beta B} - i_{K\beta C})}{dt} + [(i_{K\beta B} - i_{K\beta C}) + (i_{K\gamma B} - i_{K\gamma C})]R_{\beta} - u_{KBC}$$

$$= i_{KBC\beta} X r_0 + x l_0 \frac{di_{KBC\beta}}{dt} + (i_{KBC\beta} + i_{KBCr}) R_p - u_{KBC} \quad (3-3)$$

正常分量与故障分量相加, 即可得到β侧母线BC相间在故障情况下的全电压

$$u_{BC\beta} = i_{cBC} X r_0 + i_{KBC\beta} X r_0 + x e_0 \frac{di_{cBC}}{dt} + x l_0 \frac{di_{KBC\beta}}{dt} + (i_{KBC\beta} + i_{KBCr}) R_p \quad (3-4)$$

由(3-1)式可知 $i_{KBC\beta}$ 与 i_{KBCr} 的相位基本相同。而式(3-4)中必须消去过渡电阻项, 才能测得准, 故取 $i_{KBC\beta}$ 过零时的 $u_{BC\beta}$ 值。

$$u_{BC\beta} \Big|_{i_{KBC\beta}=0} = (i_{cBC} X r_0 + x l_0 \frac{di_{cBC}}{dt} + x l_0 \frac{di_{KBC\beta}}{dt}) \Big|_{i_{KBC\beta}=0} \quad (3-5)$$

即取电流的故障分量过零时的β母线BC相间残压值。

与单相接地故障时一样。如果在CT二次侧接入一个模拟阻抗, 其电阻分量为 $a r_0$, 电感分量为 $a l_0$, 按相接入, 则电流在其上产生电压降 $V_{BC\beta}$,

$$V_{BC\beta} = (i_{cBC} a r_0 + a l_0 \frac{di_{cBC}}{dt} + i_{KBC\beta} a r_0 + a l_0 \frac{di_{KBC\beta}}{dt}) \frac{1}{k_i} \quad (3-6)$$

当 $i_{KBC\beta}$ 过零时,

$$V_{BC\beta} \Big|_{i_{KBC\beta}=0} = \frac{a}{k_i} (i_{cBC} r_0 + l_0 \frac{di_{cBC}}{dt} + l_0 \frac{di_{KBC\beta}}{dt}) \Big|_{i_{KBC\beta}=0} \quad (3-7)$$

式(3-5)除以式(3-7), 得:

$$\frac{u_{BC\beta} \Big|_{i_{KBC\beta}=0}}{V_{BC\beta} \Big|_{i_{KBC\beta}=0}} = \frac{k_i X}{a}$$

$$X = \frac{a}{k_i} \cdot \frac{u_{BC\beta} \Big|_{i_{KBC\beta}=0}}{V_{BC\beta} \Big|_{i_{KBC\beta}=0}} \quad (VI)$$

此结果与单相接地时完全相似, 其中 a 值与单相接地一样, 不再推导, 即

$$a = \frac{\sin \varphi_L}{\omega l_0} \quad (III-1)$$

故障录波图录的是全电流, 且是B相、C相分开的, 没有录故障分量, 如何求取电流的故障分量过零点, 是首要任务。

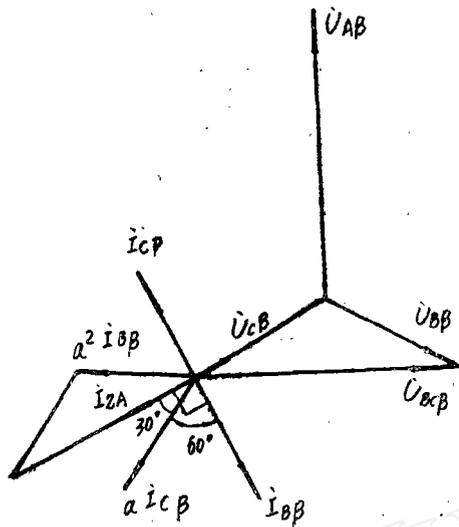
BC相间短路时, 不考虑负荷电流的影响, 其向量关系如图十所示, B相电流滞后BC电压一个角度, C相电流与B相电流差 180° 。现在我们以A相为基准相, 求A相的负序电流 \dot{I}_{2A} , 按公式有:

$$\dot{I}_{2A} = \frac{1}{3} (a^2 \dot{I}_{B\beta} + a \dot{I}_{C\beta})$$

即 $\dot{I}_{B\beta}$ 向超前方向旋转 240° , $\dot{I}_{C\beta}$ 向超前方向旋转 120° , 再进行矢量相加并除以三。

$\dot{I}_{B\beta}$ 旋转 240° , 就超前 $\dot{I}_{C\beta}$ 60° ; $\dot{I}_{C\beta}$ 旋转 120° , 就滞后 $\dot{I}_{B\beta}$ 60° 。旋转后得到的两个矢量之间夹角为 60° 。而幅值上 $|\dot{I}_{B\beta}| = |\dot{I}_{C\beta}|$, 则 \dot{I}_{2A} 处于分角线上, $30^\circ + 60^\circ$

$= 90^\circ$, 故A相的负序电流滞后 $\dot{I}_{B\beta}$ 的角度为 90° , 所以, A相负序电流 \dot{I}_{2A} 的过零点向超前方向移 90° , 就是电流故障分量 $i_{KBB\beta}$ 的过零点。



图十 两相短路矢量关系

计算分析步骤如下:

(1) 以A相电压为基准量,在 β 侧的故障录波图上,测量出三相电流 $\dot{I}_{A\beta}$ 、 $\dot{I}_{B\beta}$ 、 $\dot{I}_{C\beta}$ 相对于 $\dot{U}_{A\beta}$ 的相位,并测出各自的峰峰值[已换算至一次侧的。如果是二次值,则公式(Ⅶ)中就不要再除以CT变比 k_i] ,就得到了三相全电流,按求负序电流的公式求出 \dot{I}_{2A} 就得到了A相负序电流相对于A相电压的相位,在A相电压过零时,加上 \dot{I}_{2A} 的相位再加 90° 即将A相电压过零点向超前方向移动 $(\varphi_{I_{2A}} + 90^\circ)$,就得到电流故障分量 $i_{KB\beta}$ 的过零点;

(2) 在 $i_{KB\beta}$ 过零点作一垂直于录波各量峰峰值连线—水平线—的线,交B、C相电压曲线各一点,即为B、C相电压的瞬时值(一次),以B相的值减去C相的值(是正就减正值,是负就减负值) ,就得到 $i_{KB\beta}$ 过零时BC相间电压的瞬时值 $u_{BC\beta}|_{i_{KB\beta}=0}$;

(3) 上述的垂直线向滞后方向移动线路阻抗角 φ_L 度,即在 $i_{KB\beta}$ 过零点滞后 φ_L 角度处再作一垂线,交B相与C相电流曲线各一点,以B相电流此点的一次值减去该瞬时C相电流的一次值(乘 1Ω) ,就是 $V_{BC\beta}|_{i_{KB\beta}=0}$ 的值;

(4) 用线路正序阻抗角的正弦值;除以线路每公里长的电抗值,其商就是 a 值;

(5) 将上述三个值及CT变比 k_i 代入公式(Ⅶ) ,就可求得BC两相短路时故障点到 β 侧母线的公里数 X 。

(三) 两相接地短路一端录波

可完全按照两相短路一端录波的方法求取,证明从略。

(四) 三相短路

当三相对称短路时,可直接以相电压除相电流求阻抗的方法找出故障点。

当发现录波图上没有对称三相短路之处,而是非对称三相短路,可按上述两相短路的方法求取故障点。

三、注意事项

1. 为测量精确起见,故障录波图应放大 $5 \sim 10$ 倍;
2. 幅值测量可用原图借助故障录波图读数放大镜求取;
3. 尽量选用大电源侧的故障录波图或靠近故障点一侧的故障录波图。

参考文献 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СЕТЕЙ
Г.И. АТАБЕКОВ