

方向阻抗继电器测量阻抗及动作行为分析(下)

山东工学院 江世芳 曲青

三、两端电源单相接地故障继电器测量阻抗

(一) 正向单相(A相)接地, 故障相(A)继电器测量阻抗图(3-1)(3-2)

有关参数:

$$Z_1 = Z_{S1} + \alpha Z_L$$

$$Z_2 = Z_{S2} + (1-\alpha)Z_L$$

$$Z = Z_1 + Z_2 = Z_{S1} + Z_{S2} + Z_L$$

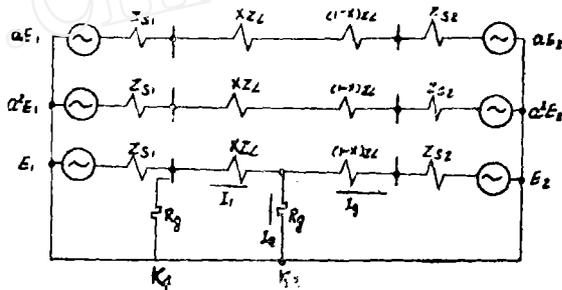
Z_{T1} Z_{T2} ——分别为另序网络系

统另序阻抗

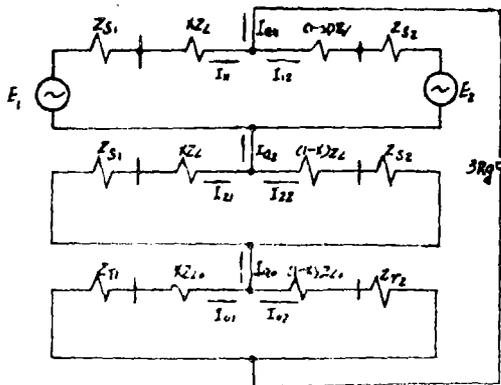
Z_{L0} ——线路另序阻抗,

$$K = \frac{Z_{L0} - Z_L}{3Z_L}$$

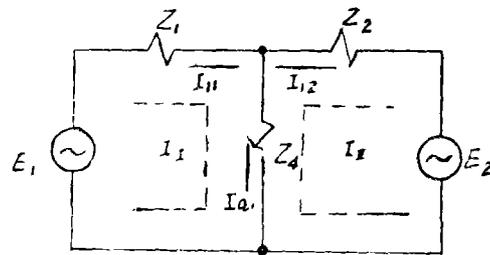
Z_{1x} Z_{2x} Z_{0x} ——分别为正、负, 另序网络组合阻抗。



图(3-1) 单相接地故障系统图



图(3-2) 单相接地故障复合序网



图(3-3) 顺序导出网络

顺序导出网络附加阻抗 (Z_{Δ})

表 III-1

	Z_{Δ}
单相接地	$\frac{Z_1 Z_2}{Z} + \frac{(Z_{T1} + X Z L_0)(Z_{T2} + (1+X)Z L_0)}{Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{L0}} + 3 R_g$
两相接地	$R_0 + \frac{(Z_2 \Sigma + R_0)(Z_D \Sigma + R_0 + 3 R_g)}{Z_2 \Sigma + Z_0 \Sigma + 2 R_0 + 3 R_g}$

由图(3-3)列方程: (k_2 为故障点)

$$\left. \begin{aligned} I_{11}(Z_1 + Z_{\Delta}) + I_{11} Z_{\Delta} &= E_1 \\ I_{11} Z_{\Delta} + I_{12}(Z_2 + Z_{\Delta}) &= E_2 \end{aligned} \right\} \quad (3-1)$$

解(3-1), 可得 I_{01} 。将 I_{01} 在各序网中分配得到:

$$\begin{aligned} \text{线路正序电流: } I_{11} = I_1 &= \frac{E_1(Z_2 + Z_{\Delta}) - E_2 Z_{\Delta}}{Z_1 Z_2 + Z Z_{\Delta}} \\ I_{12} = I_{11} &= \frac{E_2(Z_1 + Z_{\Delta}) - E_1 Z_{\Delta}}{Z_1 Z_2 + Z Z_{\Delta}} \quad (3-2) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{线路负序电流: } I_{21} &= \frac{(E_1 Z_2 + E_2 Z_1) Z_2}{(Z_1 Z_2 + Z Z_{\Delta}) Z} \\ I_{22} &= \frac{(E_1 Z_2 + E_2 Z_1) Z_1}{(Z_1 Z_2 + Z Z_{\Delta}) Z} \quad (3-3) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{线路另序电流: } I_{01} &= \frac{(E_1 Z_2 + E_2 Z_1)(Z_{T2} + (1-x)Z_{L0})}{(Z_1 Z_2 + Z Z_{\Delta})(Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{L0})} \\ I_{02} &= \frac{(E_1 Z_2 + E_2 Z_1)(Z_{T1} + x Z_{L0})}{(Z_1 Z_2 + Z Z_{\Delta})(Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{L0})} \quad (3-4) \end{aligned}$$

$$\text{故障点正序电流: } I_{01} = \frac{E_1 Z_2 + E_2 Z_1}{Z_1 Z_1 + Z Z_{\Delta}} \quad (3-5)$$

两侧线路故障电流:

$$\left. \begin{aligned} I_1 = I_{11} + I_{12} + I_{01} &= \frac{E_1(Z_2 + Z_{\Delta}) - E_2 Z_{\Delta}}{Z_1 Z_2 + Z Z_{\Delta}} + \\ &+ \frac{E_1 Z_2 + E_2 Z_1}{Z_1 Z_2 + Z Z_{\Delta}} \left[\frac{Z_2}{Z} + \frac{Z_{T2} + (1-x)Z_{L0}}{Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{L0}} \right] \\ I_2 = I_{12} + I_{22} + I_{02} &= \frac{E_2(Z_1 + Z_{\Delta}) - E_1 Z_{\Delta}}{Z_1 Z_2 + Z Z_{\Delta}} + \\ &+ \frac{E_1 Z_2 + E_2 Z_1}{Z_1 Z_2 + Z Z_{\Delta}} \left[\frac{Z_1}{Z} + \frac{Z_{T1} + x Z_{L0}}{Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{L0}} \right] \end{aligned} \right\} \quad (3-6)$$

继电器处母线电压和电流

$$\begin{aligned}
u_{11} &= u_{d1} + I_{11} \cdot xZ_L \\
&= \frac{1}{Z_1 Z_2 + ZZ_A} \left\{ (E_1 Z_2 + E_2 Z_1) Z_A + [E_1 (Z_2 + Z_A) \cdot E_2 Z_A] xZ_L \right\} \\
u_{21} &= u_{d2} + I_{21} \cdot xZ_L = \frac{1}{Z_1 Z_2 + ZZ_A} \left[(E_1 Z_2 + E_2 Z_1) \frac{Z_2 xZ_1 - Z_1 Z_2}{Z} \right] \\
u_{01} &= u_{d0} + I_{01} \cdot xZ_{L0} \\
&= \frac{(E_1 Z_2 + E_2 Z_1) \left[xZ_{L0} (Z_{T2} + (1-x)Z_{L0}) - (Z_{T1} + Z_{L0}) [(1-x)Z_{L0} + Z_{T2}] \right]}{Z_1 Z_2 + ZZ_A [Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{L0}]}
\end{aligned} \tag{3-7}$$

$$\begin{aligned}
u_f &= u_{11} + u_{21} + u_{01} \\
&= \frac{1}{Z_1 Z_2 + ZZ_A} \left\{ (E_1 Z_2 + E_2 Z_1) Z_A + [E_1 (Z_2 + Z_A) - E_2 Z_A] xZ_L \right. \\
&\quad \left. + (E_1 Z_2 + E_2 Z_1) \left[\frac{Z_2 xZ_L - ZZ_2}{Z} - \frac{Z_{T1} [Z_{T2} + (1-x)Z_{L0}]}{Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{L0}} \right] \right\} \\
I_f &= I_1 + K \cdot 3I_{01} \\
&= \frac{1}{Z_1 Z_2 + ZZ_A} \left\{ [E_1 (Z_2 + Z_A) - E_2 Z_A] \right. \\
&\quad \left. + [E_1 Z_2 + E_2 Z_1] \left[\frac{Z_2}{Z} + \frac{(Z_{T2} + (1-x)Z_{L0})(1+3K)}{Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{L0}} \right] \right\} \tag{3-8}
\end{aligned}$$

故障相 (A 相) 继电器测量阻抗:

$$\begin{aligned}
Z_{fA} &= \frac{u_f}{I_f} = \frac{\left[Z_2 + \frac{E_2 Z_1}{E_1} \right] Z_A + \left[(Z_2 + Z_A) - \frac{E_2 Z_A}{E_1} \right] xZ_L}{\left[(Z_2 + Z_A) - \frac{E_2 Z_A}{E_1} \right]} \\
&\quad + \frac{\left[Z_2 + \frac{E_2 Z_1}{E_1} \right] \left[\frac{Z_2 \cdot xZ_L - Z_1 Z_2}{Z} - \frac{Z_{T1} [Z_{T2} + (1-x)Z_{L0}]}{Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{L0}} \right]}{\left[(Z_2 + Z_A) - \frac{E_2 Z_A}{E_1} \right]} \\
&\quad + \frac{\left[Z_2 + \frac{E_2 Z_1}{E_1} \right] \left[\frac{Z_2}{Z} + \frac{(Z_{T2} + (1-x)Z_{L0})(1+3K)}{Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{L0}} \right]}{\left[(Z_2 + Z_A) - \frac{E_2 Z_A}{E_1} \right]}
\end{aligned} \tag{3-9}$$

根据式 (3-9), 由计算机算出在单相接地情况下, 故障相继电器测量阻抗轨迹, 如图 (3-4)。

(1) 关于两端电源经过渡电阻发生单相接地短路时, 测量阻抗轨迹的分析基本上与三相短路时类似, 故从略。

(2) 关于确定继电器反映过渡电阻能力的分析, 已在前面分析过。

(二) 正向短路时 (A 相), 非故障相 (B、C 相) 继电器测量阻抗

采用接地阻抗继电器作为单相重合闸选相元件时, 研究非故障相阻抗继电器动作行为是必要的。当 A 相接地故障时, 非故障相 (B 相、C 相) 阻抗继电器测量阻抗表达式, 可参照式 (3-9), 将相应电压、电流对称分量分别乘以算子 a^2 、 a 即得:

$$Z_{1B} = \frac{a^2 \left[Z_2 + \frac{E_2}{E_1} Z_1 \right] Z_{\Delta} + a^2 \left[(Z_2 + Z_{\Delta}) - \frac{E_2}{E_1} Z_{\Delta} \right] X Z_L}{a^2 \left[(Z_2 + Z_{\Delta}) - \frac{E_2}{E_1} Z_{\Delta} \right]}$$

$$+ \frac{\left[Z_2 + \frac{E_2}{E_1} Z_1 \right] \left[\frac{a(Z_2 X Z_L - Z_1 Z_2)}{Z} - \frac{Z_{T1} [Z_{T2} + (1-x) Z_{L0}]}{Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{L0}} \right]}{\left[Z_2 + \frac{E_2}{E_1} Z_1 \right] \left[\frac{a^2 Z_2}{Z} + \frac{[Z_{T2} + (1-x) Z_{L0}] (1+3K)}{Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{L0}} \right]} \quad (3-10)$$

$$Z_{1C} = \frac{a \left[Z_2 + \frac{E_2}{E_1} Z_1 \right] Z_{\Delta} + a \left[(Z_2 + Z_{\Delta}) - \frac{E_2}{E_1} Z_{\Delta} \right] X Z_L}{a \left[(Z_2 + Z_{\Delta}) - \frac{E_2}{E_1} Z_{\Delta} \right]}$$

$$+ \frac{\left[Z_2 + \frac{E_2}{E_1} Z_1 \right] \left[\frac{a^2 (Z_2 X Z_L - Z_1 Z_2)}{Z} - \frac{Z_{T1} [Z_{T2} + (1-x) Z_{L0}]}{Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{L0}} \right]}{\left[Z_2 + \frac{E_2}{E_1} Z_1 \right] \left[\frac{a^2 Z_2}{Z} + \frac{[Z_{T2} + (1-x) Z_{L0}] (1+3K)}{Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{L0}} \right]} \quad (3-11)$$

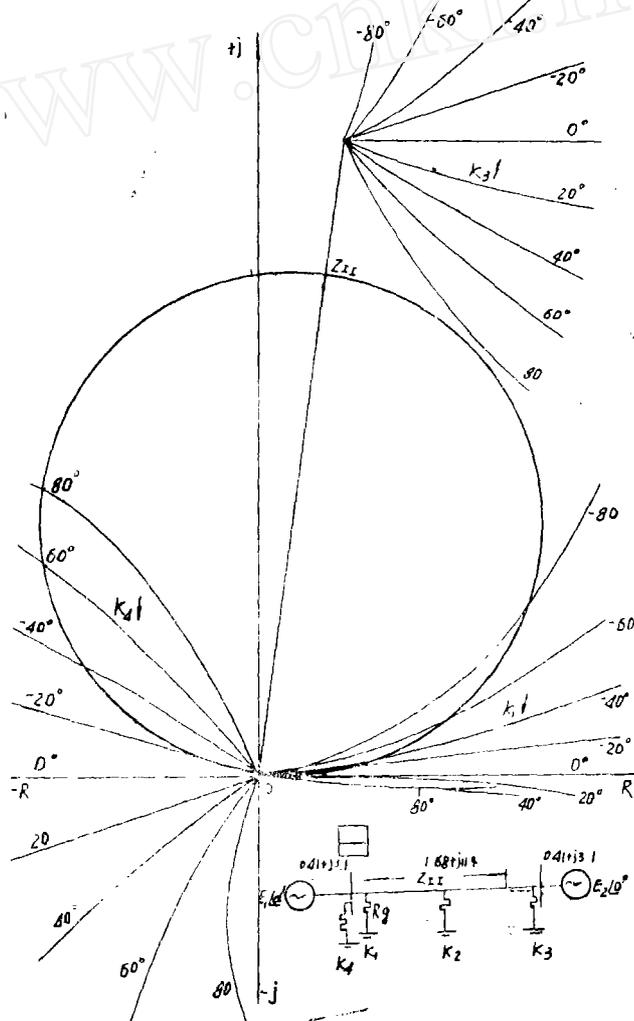
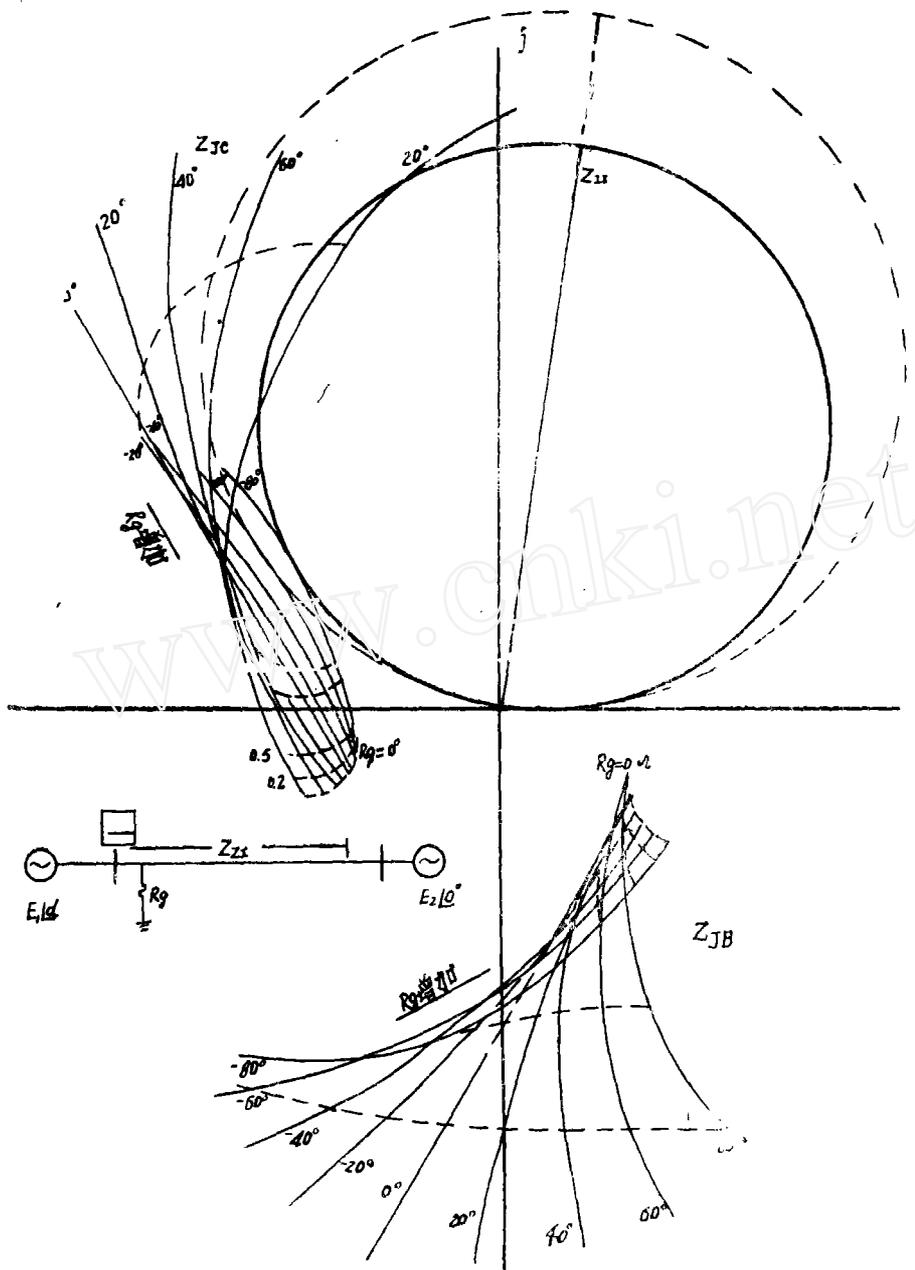


图 (3-4) 单相接地短路, 故障相 (A) 继电器测量阻抗条件: $|E_1| = |E_2|$, $\varphi_{ZS1} = \varphi_{ZS2} = \varphi_Z$



图(3-5) 在线路正向出口短路时(A相),非故障相继电器测量阻抗条件: $|E_1| = |E_2|$ 、 $\varphi_{zs1} = \varphi_{zs2} = \varphi_L$

根据式(3-10)(3-11)由计算机算出,在线路出口($x=0$)、中分点($x=0.5$)处发生单相接地故障时,非故障相继电器,(B相、C相)测量阻抗轨迹。见图(3-5)(3-6)。结论如下:

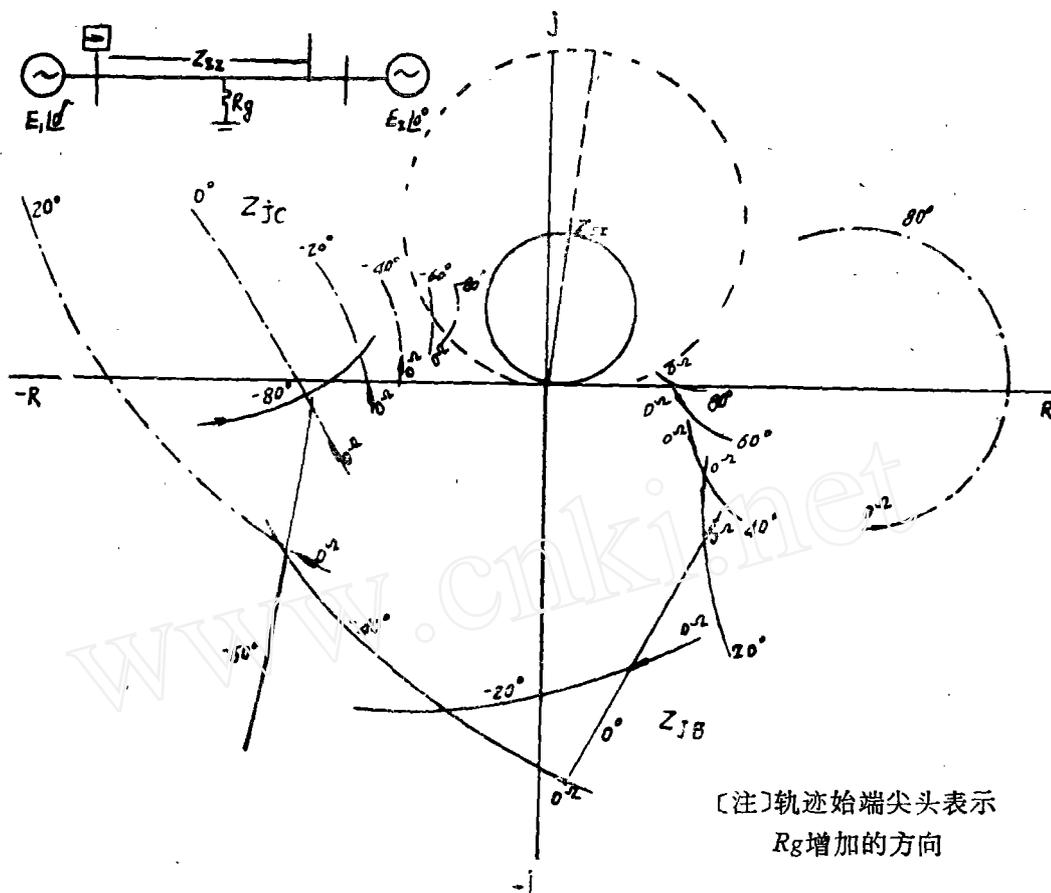


图 (3-6) 在线路中分点处 A 相短路, 非故障相继电器测量阻抗
条件: $|E_1| = |E_2|$ 、 $\varphi_{ZS1} = \varphi_{ZS2} = \varphi_L$

(1) 当空载线路短路时, 非故障相继电器测量阻抗轨迹接近一直线。随着电势角增加和过渡电阻增加, 在线路出口或近距离故障时, 作为受电侧, 非故障相 C 相继电器误动的可能性较大; 作为送电侧, C 相继电器测量阻抗轨迹出现扭变, 在过渡电阻值较大时, 也可能进园。

还应指出, 由于 C 相继电器测量阻抗轨迹非线性, 当 R_g 在某值时进园, 随着 R_g 增加, 其轨迹又逸出园外。落在园内时导致继电器误选相。当然, 继电器误选相还与电势角大小, 过渡电阻值, 整定值等因素有关。对 C 相继电器最易误动的条件是 $R_g = 3 \sim 6$ 欧。而金属性接地 ($R_g = 0$), 继电器误动的可能性不大, 因为测量阻抗处于第三象限。

对于 B 相继电器可能误动条件是在线路中部发生 A 相金属性接地, 但在出口故障时, B 相继电器误动的可能性较小。

(2) 故障点位置对非故障相继电器动作行为的影响。

随着短路距离增加,见图3-6,作为送端,B相继电器测量阻抗轨迹逐渐由第二象限移向第一象限,误动的可能性增加。当在线路末端故障时,B相、C相继电器测量阻抗轨迹基本同时进园。区别在于Rg的数值不同,B相误动是在Rg=0,而C相是在某一数值范围内。

总之,随着短路距离增加,非故障继电器测量阻抗轨迹在阻抗平面上分布在很广的区域。靠近保护按装处短路时,继电器误动的可能性大一些。

(3) 线路长度(或运行方式)对非故障相继电器动作行为的影响

如前分析表明,在线路始端故障时,非故障相继电器误动可能性增大。为此,以线路出口短路为例,电势角为60°,计算出在不同线路长度下继电器误动时的整定值,

表 III-2

线路阻抗/电源阻抗($\frac{Z_L}{Z_{S1}}$)	2.5	4.9	11
继电器误动时的整定值:(Zz)	11欧	11.8欧	误动
Z_z/Z_L	2.7	0.98	误动

由此可见,当 Z_{S1} 不变, Z_L 越大, Z_L/Z_S 越大,而继电器误动时定值范围越短,即 Z_z/Z_L 越小。所以,用于长线路,而两侧电势角较大时,用作选相元件的接地阻抗继电器可能误选相。

(三) 反向单相(A相)接地故障,故障期(A相)继电器测量阻抗

图(3-1)中 k_4 点故障,令 $x=0$,由图(3-1)(3-2)得

$$u_{I_a} = I_a \cdot R_g^* = \frac{3R_g(E_1Z_2 + E_2Z_1)}{Z_1Z_2 + ZZ_\Delta} \quad (3-12)$$

$$\begin{aligned} I_{I_a} &= I_2 + K3I_{02} \\ &= \frac{I}{Z_1Z_2 + ZZ_\Delta} \left\{ \left[E_2(Z_1 + Z_\Delta) - E_1Z_\Delta \right] \right. \\ &\quad \left. + \left[E_1Z_2 + E_2Z_1 \right] \left[\frac{Z_1}{Z} + \frac{Z_{T1}(1+3K)}{Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{L0}} \right] \right\} \end{aligned} \quad (3-13)$$

$$\begin{aligned} Z_{I_a} &= - \frac{u_{I_a}}{I_{I_a}} \\ &= - \frac{3R_g \left(Z_2 + \frac{E_2}{E_1} Z_1 \right)}{\left[\frac{E_2}{E_1} (Z_1 + Z_\Delta) - Z_\Delta \right] + \left[Z_2 + \frac{E_2}{E_1} Z_1 \right] \left[\frac{Z_1}{Z} + \frac{Z_{T1}(1+3K)}{Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{L0}} \right]} \end{aligned} \quad (3-14)$$

根据式(3-14)由计算机计算出故障相继电器测量阻抗,见图(3-4)中 k_4 点故障。

由于继电器引入健全相电压减小误动的可能性,如我院高频闭锁距离装置中的接地阻抗元件,是两健全相电压(如 u_B, u_C)经电阻分压引入到记忆回路。经过动模大量

试验, 在两侧电势角为 60° 时而不误动。

(四) 反向单相(A相)短路, 非故障相(B相、C相)继电器动作行为

图(3-1)中 k_4 点故障, 令 $x=0$, 利用式(3-7)母线电压对称分量 u_{11}, u_{21}, u_{01} 分别乘以 a^2, a 得到 u_{1B}, u_{1C} 。利用式(3-2)(3-3)(3-4)电流对称分量 I_{12}, I_{22}, I_{02} 分别乘以 a^2, a , 得到 I_{1B}, I_{1C} 。化简整理后, 得到反向故障时非故障相继电器测量阻抗:

$$Z_{1B} = - \frac{a^2 \left(Z_2 + \frac{E_2}{E_1} Z_1 \right) Z_\Delta - \left(Z_2 + \frac{E_2}{E_1} Z_1 \right) \left[\frac{a_1 Z_1 Z_2}{Z} + \frac{Z_{T1}(Z_{L0} + Z_{T2})}{Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{L0}} \right]}{a^2 \left[\frac{E_2}{E_1} (Z_1 + Z_\Delta) - Z_\Delta \right] + \left(Z_2 + \frac{E_2}{E_1} Z_1 \right) \left[\frac{a Z_1}{Z} + \frac{Z_{T1}(1+3K)}{Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{L0}} \right]} \quad (3-15)$$

$$Z_{1C} = - \frac{a \left(Z_2 + \frac{E_2}{E_1} Z_1 \right) Z_\Delta - \left(Z_2 + \frac{E_2}{E_1} Z_1 \right) \left[\frac{a^2 Z_1 Z_2}{Z} + \frac{Z_{T1}(Z_{L0} + Z_{T2})}{Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{L0}} \right]}{a \left[\frac{E_2}{E_1} (Z_1 + Z_\Delta) - Z_\Delta \right] + \left(Z_2 + \frac{E_2}{E_1} Z_1 \right) \left[\frac{a^2 Z_1}{Z} + \frac{Z_{T1}(1+3K)}{Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{L0}} \right]} \quad (3-16)$$

根据式(3-15)(3-16)由计算机算出非故障相继电器测量阻抗轨迹。见图(3-7)。

(1) 当电源作为受端, B相继电器较C相易误动。当电势角为 -60° , B相继电器误动时, 其整定值是 $Z'_{s1} = 20.5$ 欧($Z_z/Z_L = 1.7$); 而C相误动时其正定值 $Z''_{z1} = 47.5$ 欧($Z_z/Z_L = 4$)。显然, 在相同整定值范围内(如: $Z_z = 20.5$ 欧)B相继电器误动, C相不误动。而且, 金属性短路($R_g = 0$)容易误动。随着 R_g 增加, 继电器测量阻抗轨迹移向园外, 减少误动可能性。

当电源作为送端, C相继电器较B相易误动。

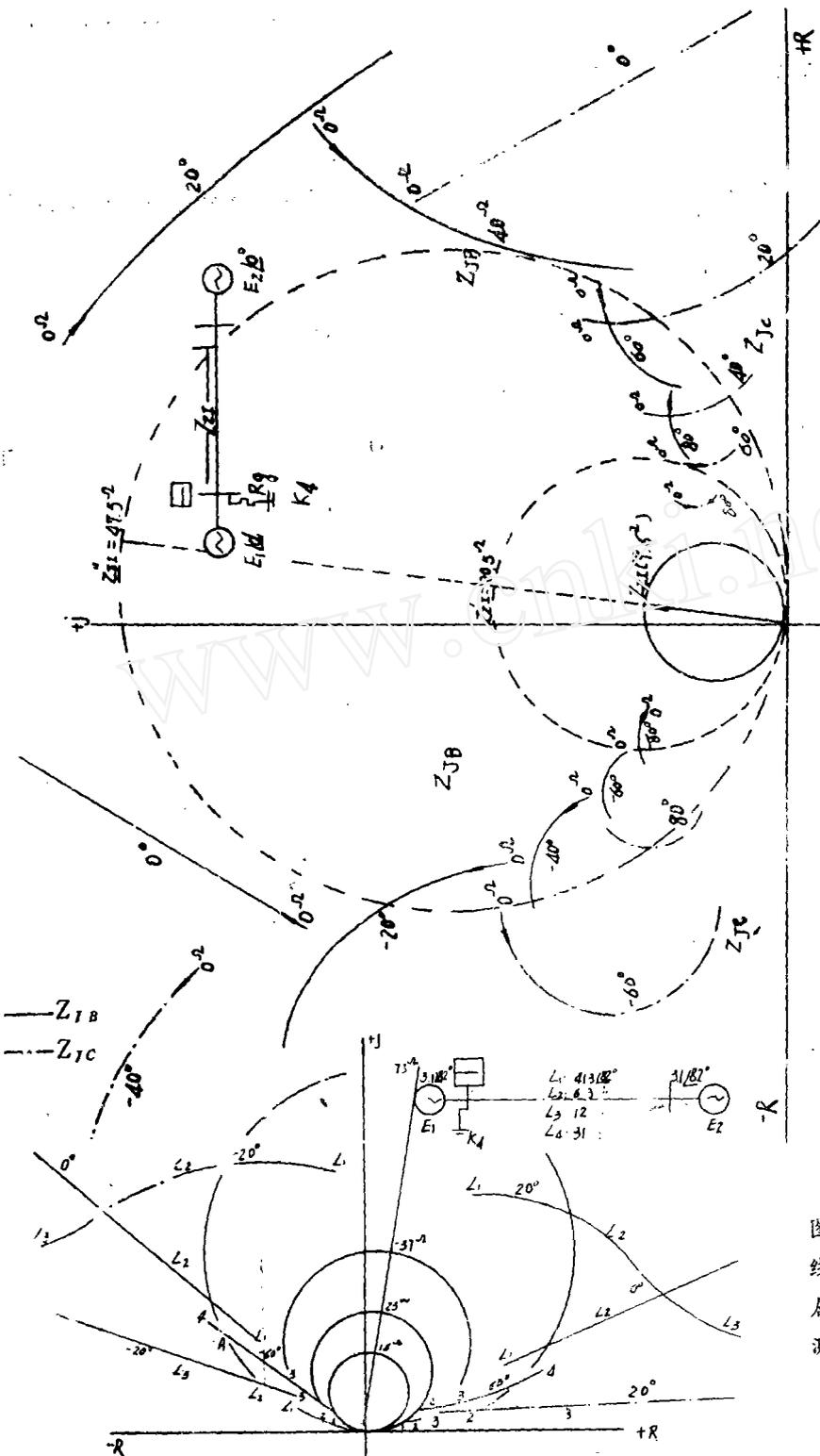
(2) 由于线路长度变化(或运行方式), 对非故障相继电器动作行为的影响。

在电源阻抗不变时, 选择四种线路参数进行计算, 以分析当A相金属性短路时, 对非故障相继电器动作行为影响。由图(3-8)可见, 随着线路长度减少(Z_L/Z_{s1} 减小)和电势角增大, 在反向单相接地故障时, 继电器测量阻抗趋向原点, 误动的可能性增加; 而且, 随着电势角增大, 不论是送电侧还是受电侧测量阻抗轨迹(Z_{1B}, Z_{1C})趋于重合。

表Ⅲ-3列出, 当电势角在 $\pm 60^\circ$ 时, 非故障相继电器误动时继电器定值,

表Ⅲ-3

	L_1	L_2	L_3	L_4
Z_L/Z_{s1}	2.3	3.0	4.9	11
Z_z	$3.9Z_L$	$3.7Z_L$	$3Z_L$	$1.2Z_L$



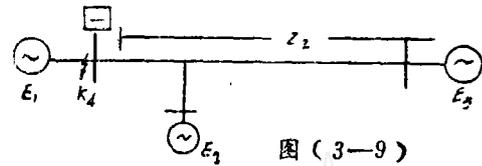
图(3-7)
 反向A相故障,非故障相(B,C相)继电器测量阻抗
 $|E_1| = |E_2|$
 $|\varphi_{Z_{J1}}| = \varphi_{Z_{J2}} = \varphi_L$

图(3-8) 不同线路长度,反向金属性短路时继电器测量阻抗

由表Ⅲ—3说明, 对于 L_1 , ($Z_L/Z_{S1}=2.3$), 继电器定值大于 $3.9Z_L$ 时, 非故障继电器都要误动。对应不同线路长度有不同的定值。因此, 为了可靠起见, 阻抗继电器正方向整定值应不大于上述被保护线路阻抗与末端电端阻抗之和(Z_L)的倍数。必须指出, 在一般情况下, 用选取合适的阻抗定值的方法以消除反向出口故障, 非故障相误动是困难的。因此, 必须采取其他措施防止误动。特别是对于具有分支电源的线路, 一般要求继电器具有相当大的整定值, 而且分支电源与电源 E_1 很近, 如图(3—9)。在这种情况下, 继电器反向故障往往导致非故障相继电器误动。

(五) 系统变压器中性点接地方式对继电器动作行为的影响。

改变系统中性点接地方式, 不仅影响到负序电流数值, 同时也改变了它的分布状况, 给接地阻抗继电器带来如下影响:

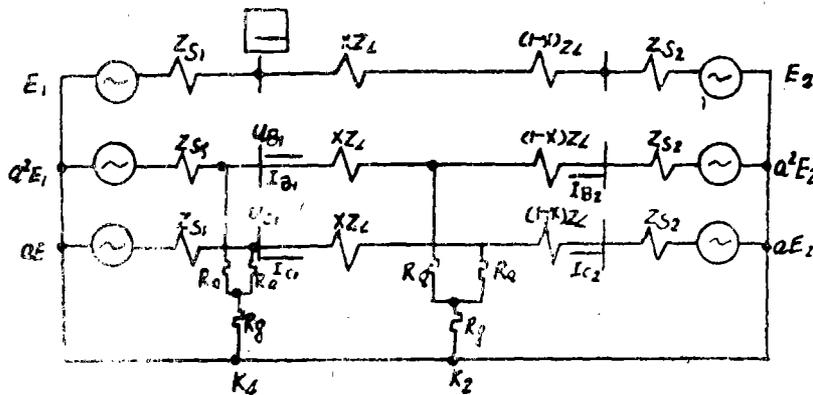


(1) 系统另序阻抗增加, 对正向短路时故障相(A相)继电器动作行为没有显著影响。对反向短路时, 故障相(A相)继电器所感受的过渡电阻在数值上减少, 角度上有所增大。就一般而言, 角度增加时, 进园的可能性大。但是, 由于幅值减少, 所以难以估计出误动的可能性。

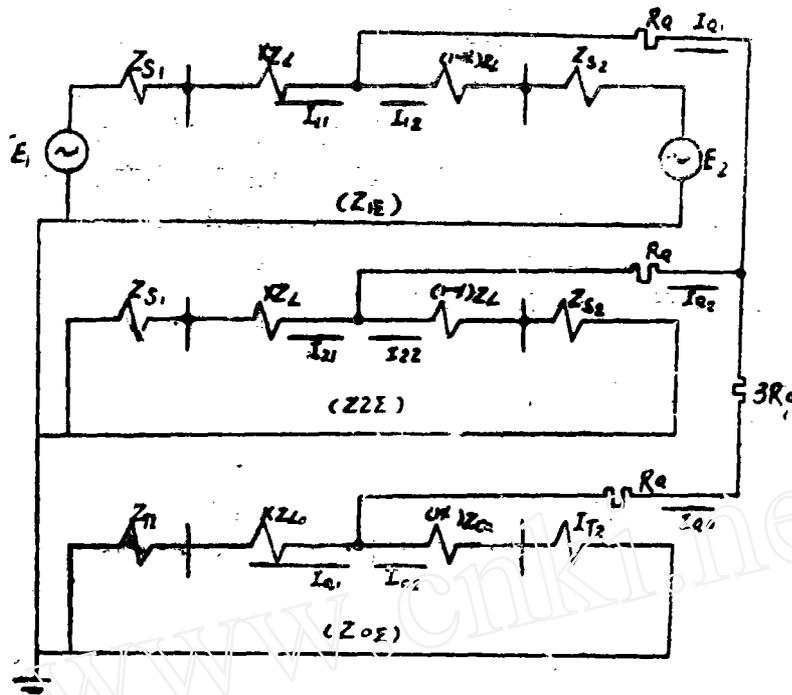
(2) 系统为阻抗增加, 正向短路时, 减少了非故障继电器误动的可能性, 提高了接地阻抗继电器作为选相元件时的选相能力。对反向短路时, 增加了非故障继电器误动的可能性。

四、两端电源两相接地故障时继电器测量阻抗

(一) 正向两相接地短路时(BC相), 继电器测量阻抗。



图(4—1) 两相接地短路系统图



图(4-2) 两相接地短路复合序网

有关参数：负序网络组合阻抗： $Z_{2\Sigma} = \frac{Z_1 Z_2}{Z}$

另序网络组合阻抗： $Z_{0\Sigma} = \frac{(Z_{T1} + XZ_{L0})(Z_{T2} + (1-x)Z_{L0})}{Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{L0}}$

附加阻抗： Z_{Δ} 见〔表 III-1〕

根据图(3-3)列方程，得到故障点正序电流分量和线路两侧正序电流，

I_{01}, I_{11}, I_{12} 由图(4-2)

复合序网得： $I_{01} + I_{02} + I_{00} = 0$

$$I_{02} = -I_{01} \frac{Z_{0\Sigma} + R_g + 3R_g}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 2R_g + 3R_g} \quad I_{00} = -I_{01} \frac{Z_{22} + R_g}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 2R_g + 3R_g}$$

$$I_{21} = I_{02} \frac{Z_2}{Z} \quad I_{22} = I_{02} \frac{Z_1}{Z} \quad (4-1)$$

$$I_{01} = I_{00} \frac{Z_{T2} + (1-x)Z_{L0}}{Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{L0}} \quad I_{02} = I_{00} \frac{Z_{T1} + XZ_{L0}}{Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{L0}} \quad (4-2)$$

线路故障相电流：(见图 4-1)

$$I_{B1} = a^2 I_{11} + a I_{21} + I_{01} \quad I_{C1} = a I_{11} + a^2 I_{21} + I_{01} \quad (4-3)$$

$$I_{B2} = a^2 I_{12} + a I_{22} + I_{02} \quad I_{C2} = a I_{12} + a^2 I_{22} + I_{02} \quad (4-4)$$

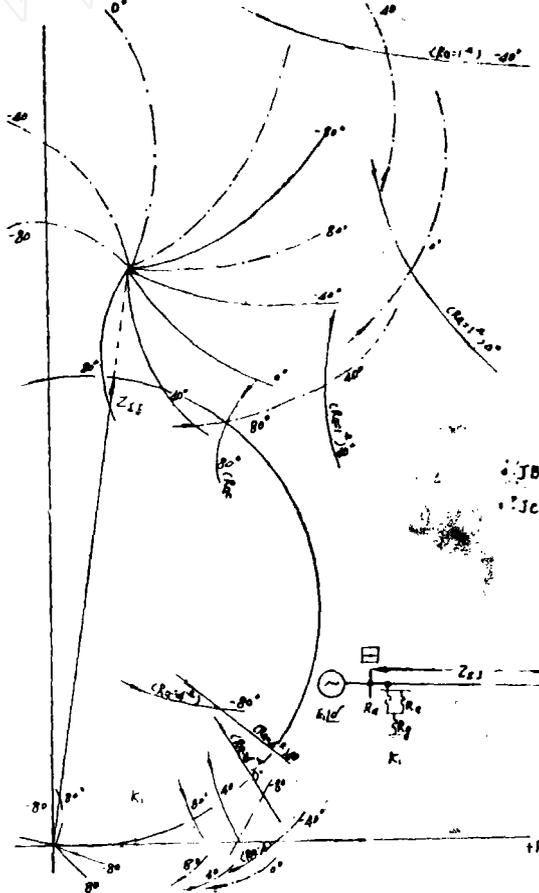
根据式(4-1)~(4-4)可求得线路正向任意点两相接地短路，故障相(BC相)继电器测量阻抗分别为：

$$Z_{JB} = \frac{u_{B1}}{I_{B1} + K \cdot 3I_{01}} = XZ_L + \frac{a^2 I_{01} R_g + a I_{02} R_g + I_{00} (R_g + 3R_g)}{I_{B1} + K \cdot 3I_{01}}$$

$$= XZ_L + \frac{\left[Z_2 + \frac{E_2}{E_1} Z_1 \right]}{a^2 \left[(Z_2 + Z_{\Delta}) - \frac{E_2}{E_1} Z_{\Delta} \right] - \left[Z_2 + \frac{E_2}{E_1} Z_1 \right]} \cdot \frac{\left[a^2 R_a - \frac{a R_a (Z_{0\Sigma} + R_a + 3R_g) + (R_a + 3R_g)(Z_{2\Sigma} + R_a)}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 2R_a + 3R_g} \right]}{\frac{a Z_2 (Z_{0\Sigma} + R_a + 3R_g)}{Z (Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 2R_a + 3R_g)} + \frac{[Z_{T2} + (1-x)Z_{L0}][Z_{2\Sigma} + R_a][1+3K]}{(Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{L0})(Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 2R_a + 3R_g)}} \quad (4-5)$$

$$Z_{IC} = \frac{u_{c1}}{I_{c1} + K \cdot 3I_{01}} = XZ_L + \frac{aI_{01}R_a + a^2I_{02}R_a + I_{00}(R_a + 3R_g)}{I_{c1} + K \cdot 3I_{01}}$$

$$= XZ_L + \frac{\left[Z_2 + \frac{E_2}{E_1} Z_1 \right]}{a \left[(Z_2 + Z_{\Delta}) - \frac{E_2}{E_1} Z_{\Delta} \right] - \left[Z_2 + \frac{E_2}{E_1} Z_1 \right]} \cdot \frac{\left[aRa - \frac{a^2 Ra (Z_{0\Sigma} + R_a + 3R_g) + (R_a + 3R_g)(Z_{2\Sigma} + R_a)}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 2R_a + 3R_g} \right]}{- \left[Z_2 + \frac{E_2}{E_1} Z_1 \right] \left[\frac{a^2 Z_2 (Z_{0\Sigma} + R_a + 3R_g)}{Z (Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 2R_a + 3R_g)} + \frac{[Z_{T2} + (1-x)Z_{L0}][Z_{2\Sigma} + R_a][1+3K]}{(Z_{T1} + Z_{T2} + Z_{L0})(Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 2R_a + 3R_g)} \right]} \quad (4-6)$$



图(4-3) 正向(K, K₃)两相接地短路时,继电器测量阻抗

$$|E_1| = |E_2|,$$

$$\varphi_{ZS1} = \varphi_{ZS2} = \varphi_L \quad K_1$$

点: $R_a = 0; 4^\circ; K_3$ 点:

$Ra = 0; 1^\circ;$

(图中示出 I 段特性圆,

整定阻抗 $Z_{ZL} = 0.8Z_L$)

两相经过渡电阻短路,过渡电阻是由电弧电阻(R_a)和杆塔接地电阻(R_g)组成。由于过渡电阻影响的因素多,变化范围大,难以精确计算。据分析,相间电弧电

阻起始值一般不超过 5 欧,且电阻值不受对侧电流助增的影响,但经过一定时间后,由于电弧伸长而阻值增大。杆塔综合接地阻抗,当有避雷线时,一般不超过 3 欧,避雷线绝缘时,一般在 5 欧以内,它不随时间变化,但要考虑对侧电流助增影响。(见文献 2)。本文基于过渡电阻不是单值的,将 R_a 、 R_g 分开考虑,即在计算时先确定 R_g 为某一阻值,将 R 作为变量,利用计算机循环计算,从而得到大量曲线簇,即可得到在确定的 R 、 R_g 数值时的继电器测量阻抗。这样,阻抗继电器测量阻抗轨迹是故障位置,两侧电势角,接地电阻 (0, 0.5, 1, 2, 3 欧), 电弧电阻 (0, 0.2, 0.5, …, 8, 10 欧)

四个变量的函数。由计算机计算得到在线路始端,末端发生两相接地短路时,继电器测量阻抗轨迹,见图 (4-3)。结论如下:

(1) 在不计电弧电阻 (R_a) 时,当 δ 角在很大的范围变化时,领前相 (B 相) 继电器对故障点的接地电阻将感受为容性。作为发端,随着 δ 由 0° 向 80° 变化,则 B 相继电器所感受的故障点接地电阻就逐渐转向纯容性;作为受端 ($0 \rightarrow -80^\circ$),随着角度增大,逐渐转向纯阻性。因此,在末端短路时,将导致 B 相继电器可能出现超范围误动。例如,作为送端 B 相继电器,在电势角为 40° , $R_g = 2$ 欧时,继电器测量阻抗可以进园,并超范围达 20%;如果电势角和接地电阻增大,这种超范围现象还会严重。

滞后相 (C 相) 继电器对接地电阻感受为感性。作为发端 ($0 \rightarrow 80^\circ$),随着 δ 角度增大则转向电阻性;作为受端 ($0 \rightarrow -80^\circ$),随着 δ 角度增大则转向负阻性。将导致 C 相继电器的正向保护范围大大缩短,在保护范围末端短路,该相继电器可能拒动。随着故障点位置改变,上述性质会有数量差异,但基本趋向是一致的。

(2) 计及电弧电阻 (R_a) 时,继电器测量阻抗轨迹偏离在复平面上故障点的位置。而且,随着故障距离增加、 R_a 的增加,偏离的位置也越远,将可能导致继电器拒动。特别在被保护范围末端故障时,继电器动态特性园扩大范围不会很大,拒动的可能性会更大些。而在线路始端故障时,一则测量阻抗偏离故障点距离较少,再则由于继电器动态园扩大范围较大,因 R_a 而引起继电器拒动的可能性将会小些。

(二) 反向两相接地短路时,继电器测量阻抗。

图 (4-1) 中 K_1 点 BC 相接地故障。令 $x = 0$

$$Z_1 = Z_{S1} \quad Z_2 = Z_{S2} + Z_L \quad Z = Z_{S1} + Z_{S2} + Z_L$$

$$Z_{\Delta} = R_a + [(Z_{2x} + R_a) // (Z_{0x} + R_a + 3R_g)]$$

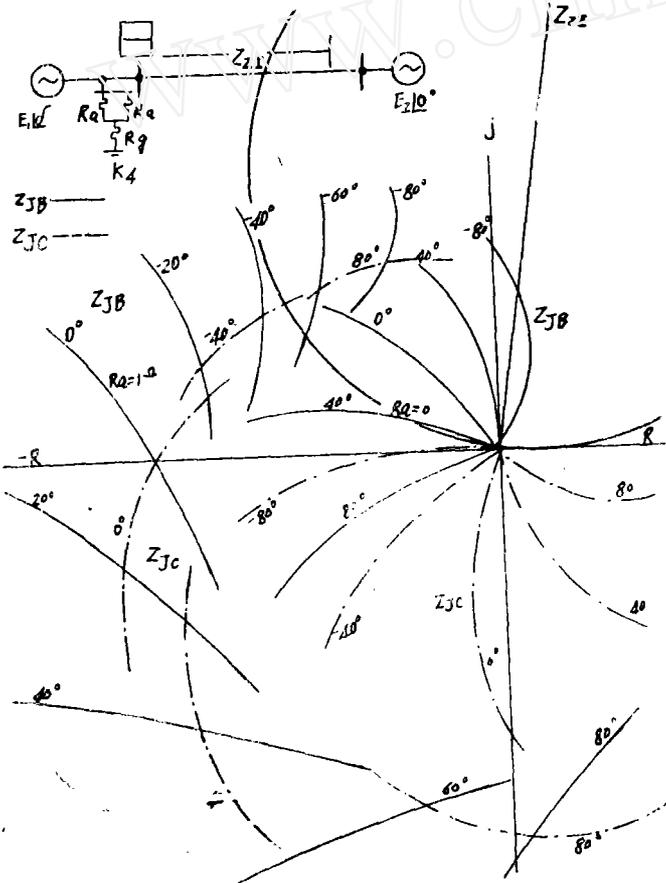
(式中 Z_{2x} , Z_{0x} 有关项 $x = 0$)

类似式 (4-5) (4-6) 推导,求得反向出口两相接地短路时,故障相的继电器测量阻抗分别为:

$$\begin{aligned} Z_{J,B} &= - \frac{u_{B1}}{I_{B2} + K \cdot 3I_{02}} = - \frac{a^2 I_{a1} R_a + a I_{a2} R_a + I_{a0} (R_a + 3R_g)}{I_{B2} + K \cdot 3I_{02}} \\ &= - \frac{\left[Z_2 + \frac{E_2}{E_1} Z_1 \right]}{a^2 \left[\frac{E_2}{E_1} (Z_1 + Z_{\Delta}) - Z_{\Delta} \right] - \left[Z_2 + \frac{E_2}{E_1} Z_1 \right]} \end{aligned}$$

$$\left[\frac{a^2 R_o - \frac{a R_o (Z_{0\Sigma} + R_o + 3Rg) + (R_o + 3Rg)(Z_{2\Sigma} + R_o)}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 2R_o + 3Rg}}{\frac{a Z_1 (Z_{0\Sigma} + R_o + 3Rg)}{Z(Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 2R_o + 3Rg)} + \frac{Z_{T1}(Z_{2\Sigma} + R_o)(1+3K)}{(Z_T + Z_{T2} + Z_{L0})(Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 2R_o + 3Rg)}} \right] \quad (4-7)$$

$$\begin{aligned} Z_{1c} &= -\frac{U_{C1}}{I_{C2} + K \cdot 3I_{02}} \\ &= -\frac{a I_{a1} R_o + a^2 I_{a2} R_o + I_{a0} (R_o + 3Rg)}{I_{C2} + K \cdot 3I_{02}} \\ &= -\frac{\left[Z_2 + \frac{E_2}{E_1} Z_1 \right]}{a \left[\frac{E_2}{E_1} (Z_1 + Z_{\Delta}) - Z_{\Delta} \right] - \left[Z_2 + \frac{E_2}{E_1} Z_1 \right]} \\ &= \left[\frac{a R - \frac{a^2 R_o (Z_{0\Sigma} + R_o + 3Rg) + (R_o + 3Rg)(Z_{2\Sigma} + R_o)}{Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 2R_o + 3Rg}}{\frac{a^2 Z_1 (Z_{0\Sigma} + R_o + 3Rg)}{Z(Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 2R_o + 3Rg)} + \frac{Z_{T1}(Z_{2\Sigma} + R_o)(1+3K)}{(Z_{T1} + 2Z_{T2} + Z_{L0})(Z_{2\Sigma} + Z_{0\Sigma} + 2R_o + 3Rg)}} \right] \quad (4-8) \end{aligned}$$



根据式(4-7)(4-8)由计算机算得继电器测量阻抗轨迹。见图(4-4)，结论如下：

(1) 如果不计相间电弧(R)，继电器反向静态园经过坐标原点时，作为受端，领前相(B相)继电器测量阻抗可能进园，随着电势角增加，误动可能性更大。作为送端，当线路空载或电势角不大时，且接地电阻不大时，测量阻抗将部分地落在园内，可能误动。如果，因为外部极化使得继电器静态特性上抛，误动的可能性会减小。是否误动，取决于继电器的特性。

滞后相(C相)测量阻抗轨迹处于第三、四象限，不会引起反向误动。

图(4-4) 反向两相接地短路时，继电器(B、C相)测量阻抗轨迹。

(1) $R_c = 0, 1$ 欧

(2) 图中所示继电器反向静态特性圆,

$$Z_{z1} = 9.6 \text{ 欧}$$

(3) $|E_1| = |E_2|, \varphi_{z_{s1}} = \varphi_{z_{s2}} = \varphi_L$

(2) 如果计及相间电弧电阻 (R), 继电器测量阻抗轨迹将偏离原点。而且, 随着阻值增加偏离越远。由此可见, 电弧电阻将少了反向故障时, 故障相继电器误动的可能性。对于发端, 当 $R_c = 1$ 欧, 继电器不会误动; 作为受端, 也只有当电势角很大时, 才有误动可能性。

(三) 关于相间电弧电阻 (R) 和接地电阻 (R_g) 影响的估计;

图 (4-5) 示出在线路中点正向故障, R 、 R_g 对继电器测量阻抗轨迹的影响。

当 $R = 2$ 欧, 测量阻抗轨迹偏离阻抗平面上故障点的位置较远, 随着 R 增加, 偏离越远, 容易引起拒动。当 $R_g = 2$ 欧, 测量阻抗轨迹偏离较小。在同样条件下, R_c 比 R_g 对测量阻抗影响大些, 从防止继电器拒动这一点来看, 因 R 的存在带来不利因素。但是, 对于反向出口与正向末端故障, 由于 R_c 存在使得测量阻抗轨迹偏离故障点 (见图 4-4), 从防止继电器反向出口误动, 及正向末端故障越范围进而误动来看, 带来有利因素。

由图 (4-3), 图 (4-5) 可见, 随着短路距离增加, R 和 R_g 的影响也愈加显著。还须指出, 由于弧光电阻 R 值在短路故障初始瞬间是较小的, 随着故障持续时间增长而增大, 因此, 对于长距离超高压输电线路如果采用快速阻抗元件, 则 R 的影响将是较小的。

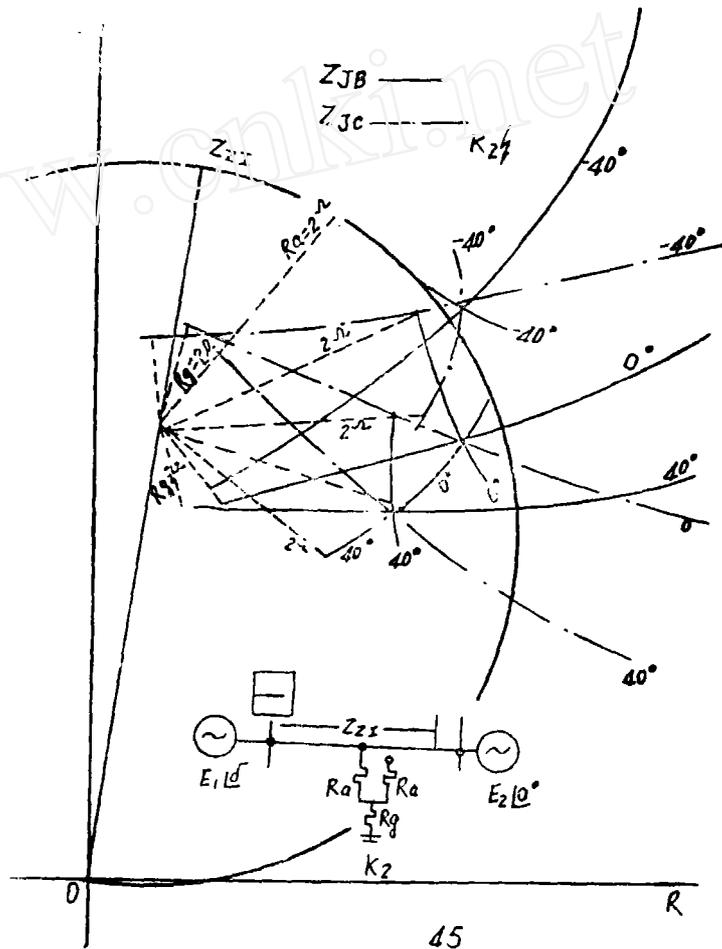
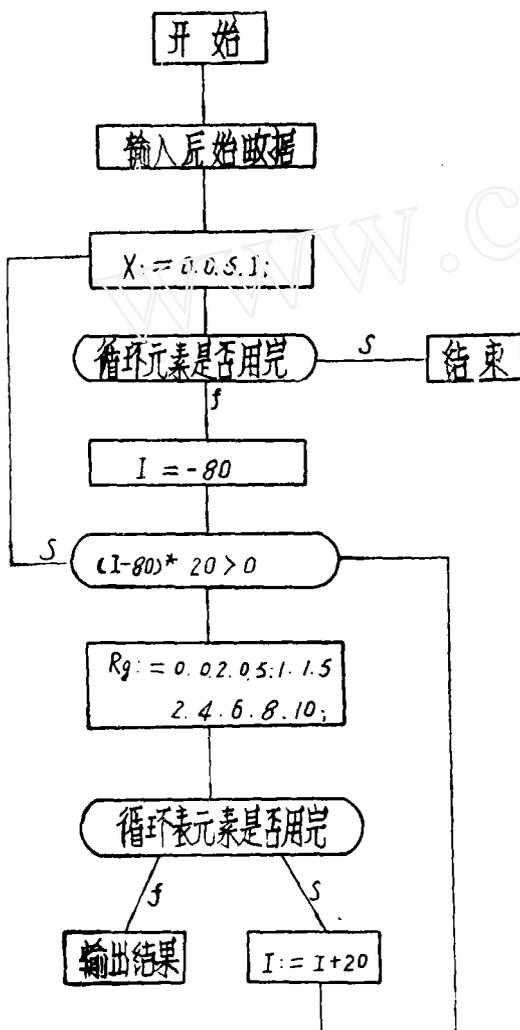


图 (4-5) 线路中点正向两相接地故障

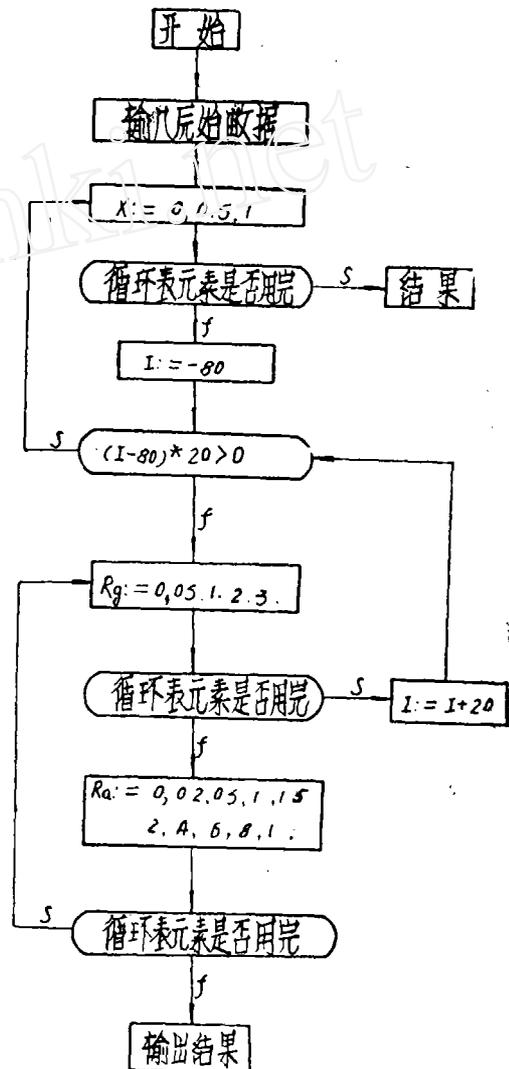
通过以上分析可见，过去，在分析经过渡电阻两相接地故障时，基于某些原因，往往将相间电弧电阻略掉。如果 R 在两相接地故障时又能存在的话，显然，略去 R 来分析保护行为，特别是对于慢速动作或Ⅱ段阻抗继电器来说是不合适的。

五、各种短路故障时，阻抗继电器测量

阻抗计算机程序方框图：



图(5-1) 三相短路、两相短路、单相短路源程序方框图



图(5-2) 两相接地短路源程序方框图

结 论

(1) 本文针对两端电源经过渡电阻发生各种短路时, 求出适用相间方向阻抗继电器和接地方向阻抗继电器测量阻抗数学模型, 据此编出源程序, 用它可以适用两端电源系统并计及电势角和过渡电阻变化时, 对方向阻抗继电器的测量阻抗及其动作为进行计算与分析。

(2) 通过对实际两端电源系统进行计算, 可以得到如下结果:

1. 可以估计被保护线路正向各种短路故障, 特别是出口短路时, 阻抗继电器能够允许的最大过渡电阻值。
2. 可以估计被保护线路末端短路时, 由过渡电阻引起继电器超越范围。
3. 在各种反向短路故障时, 可以得到继电器反向误动的条件和误动区域。
4. 接地方向阻抗继电器用作重合闸选相元件, 当被保护线路正向和反向出口发生单相接地故障, 在电势角和过渡电阻变化时, 可以初步估计非故障相继电器误动的条件, 及误动时阻抗继电器定值范围。

参 考 文 献

1. 方丽清、王能桂、朱景云: “500KV线路保护试验” 继电器 1979, № 3
2. 袁季修: “短路故障时过渡阻抗的计算及对继电保护的影响”。
河北电力勘测设计院 1979, 8月
3. “POWER-SYSTEM STUDIES FOR THE DETERMINATION OF DISTANCE-PROTECTION PERFORMANCE”
P. I. E. E 1972, vol 119
4. “DISCRIMINATIVE PERFORMANCE OF DISTANCE PROTECTION UNDER FAULT OPERATING CONDITIONS”
P. I. E. E 1968, vol 115
5. С. А. УЛЬЯНОВ: “ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ”
1964年