

# 单相接地时阻抗式选相元件的动作行为

北 义

在220千伏大电流接地系统中，采用单相重合闸方式是提高安全供电能力的一种有效措施。为了得到预期的效果，正确选择和整定选相元件是一个重要问题。

对选相元件来说，要求它在本线路发生单相接地故障时：(1)故障相的元件应该可靠动作；同时(2)非故障相的元件必须可靠地不动作。

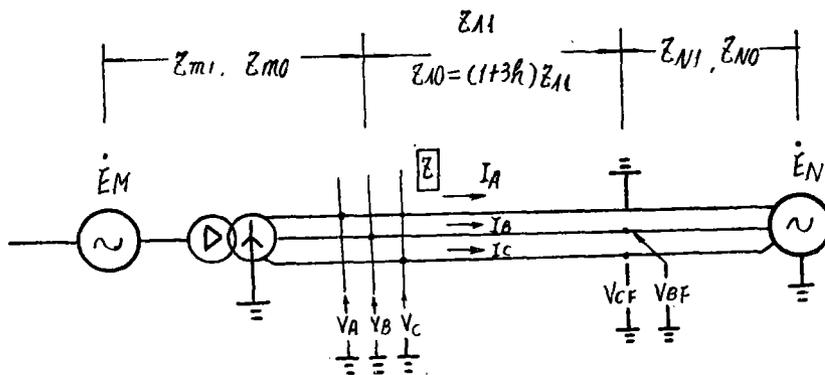
一般说来，选相元件只担当选择故障相而不担当区别故障区间的任务，所以它并不一定需要具有方向性。

目前，比较广泛采用的是用零序电流补偿的相电流和同相电压作为输入量的阻抗元件作选相元件。这种接线方式的故障相元件，在线路发生单相接地、两相接地短路以及三相短路接地（或不接地）等故障的时候，都能够比较准确地反应到故障点的距离，因而具有良好的选择故障相别的功能。

为了消除出口接地故障时阻抗元件的动作死区，可以采用多种方法，例如：(1)以零序电压或非故障相电压作为辅助的极化电压；(2)用带偏移特性的阻抗元件；(3)用带记忆作用的方向阻抗元件。

无论采用上述方法的那一种，对保证故障相选相元件在出口单相接地故障时的可靠工作都是有效的。但是必须同时注意的是：(1)单相接地时非故障相的工作行为如何？(2)是否也能保证消除两相接地短路时的电压死区？

这里只就单相接地时用本相电压作极化电压〔(2)与(3)方式〕构成的阻抗式选相元件的动作行为作一简要分析。



假定系统正序阻抗等于负序阻抗

$\dot{E}_M$ ,  $\dot{E}_N$ : 两端系统的等价电源电势。

$Z_{m1}$ ,  $Z_{m0}$ : 本端系统到继电器按装处的等价正序与零序阻抗。

$Z_{e1}, Z_{e0}$ : 由继电器按装处到接地故障点的线路正序与零序阻抗。

$Z_{N1}, Z_{m0}$ : 由接地故障点到对端系统的等价正序及零序阻抗。

$E_f$ : 故障点的故障前瞬间 A 相电压。

$V_{1f}, V_{2f}, V_{0f}$ : 故障后的故障点正序, 负序及零序电压。

$V_{Af}, V_{Bf}, V_{Cf}$ : 故障后的故障点 A 相, B 相及 C 相电压。

$V_A, V_B, V_C$ : 继电器按装处的故障后 A 相, B 相及 C 相电压。

$I_A, I_B, I_C, I_0$ : 故障后流过继电器的 A 相, B 相, C 相及零序电流。

$I_N$ : 故障前流过继电器的电负荷流。

$I_{1f}, I_{2f}, I_{0f}$ : 由系统流入故障点的总正序, 总负序及总零序电流

$Z_{1\Sigma}, Z_{0\Sigma}$ : 由故障点看到系统的综合正序及综合零序阻抗。

$$k = \frac{1}{3} \left( \frac{Z_{e0}}{Z_{e1}} - 1 \right): \text{选相元件零序电流补偿系数。}$$

$a, a^2$ : 运算符  $e^{j120^\circ}, e^{-j120^\circ}$  的符号。

$C_1, C_0$ : 流过继电器的正序、零序电流与系统流入故障点总正序, 总零序电流之比, 即分流系数。

在线路发生 A 相金属接地时, 在故障点具有下列电压电流关系:

$$V_{AF} = 0$$

$$I_{1f} = I_{2f} = I_{0f} = \frac{E_f}{2Z_{1\Sigma} + Z_{0\Sigma}}$$

$$V_{1f} = E_f - I_{1f}Z_{1\Sigma}, \quad V_{2f} = -I_{2f}Z_{1\Sigma}, \quad V_{0f} = -I_{0f}Z_{0\Sigma}$$

$$V_{BF} = a^2 E_f + (Z_{1\Sigma} - Z_{0\Sigma}) I_{1f}$$

$$V_{CF} = a E_f + (Z_{1\Sigma} - Z_{0\Sigma}) I_{1f}$$

此时, 在选相元件按装处的各相电压:

$$V_A = (I_A + 3k I_0) Z_{e1}$$

$$V_B = V_{BF} + (I_B + 3k I_0) Z_{e1}$$

$$V_C = V_{CF} + (I_C + 3k I_0) Z_{e1}$$

流过选相元件的电流为故障总电流的分流与故障前负荷电流之和:

$$I_B + 3k I_0 = a^2 I_N + [(1 + 3k) C_0 - C_1] I_{1f}$$

$$I_C + 3k I_0 = a I_N + [(1 + 3k) C_0 - C_1] I_{1f}$$

各相选相元件所见阻抗:

$$Z_A = \frac{V_A}{I_A + 3k I_0} = Z_{e1}$$

$$\begin{aligned} Z_B &= \frac{V_B}{I_B + 3k I_0} \\ &= \frac{a^2 E_f + (Z_{1\Sigma} - Z_{0\Sigma}) I_{1f}}{a^2 I_N + [(1 + 3k) C_0 - C_1] I_{1f}} + Z_{e1} \\ &= \frac{a^2 E_f / I_{1f} + (Z_{1\Sigma} - Z_{0\Sigma})}{a^2 \frac{I_N}{I_{1f}} + (1 + 3k) C_0 - C_1} + Z_{e1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= \frac{\sqrt{3} Z_{1\Sigma} e^{-j90^\circ} + \sqrt{3} Z_{0\Sigma} e^{-j150^\circ}}{a^2 \frac{I_N}{I_{1f}} + (1+3k) C_0 - C_1} + Z_{e1} \\
&= \frac{\sqrt{3} Z_{1\Sigma} e^{j90^\circ} + \sqrt{3} Z_{0\Sigma} e^{j150^\circ}}{a \frac{I_N}{I_{1f}} + (1+3k) C_0 - C_1} + Z_{e1}
\end{aligned}$$

由 $Z_B$ 与 $Z_C$ 的表示式可见，它们与故障点，系统结线及送电方式有关，但无论如何，在其他条件已定时，当出口发生接地故障时，即 $Z_{e1} = 0$ 时， $Z_B$ 及 $Z_C$ 所见阻抗为最小，只分别就下述两种情况予以简要说明：

1. 单电源，故障前线路无负荷电流，对端中性点不接地：

此时， $I_N = 0$ ， $Z_{1\Sigma} = Z_{m1}$ ， $Z_{0\Sigma} = Z_{m0}$ ， $C_0 = C_1 = 1$ ，故：

$$Z_B = \frac{1}{\sqrt{3}k} (Z_{m1} e^{-j90^\circ} + Z_{m0} e^{-j150^\circ}) + Z_{e1}$$

$$Z_C = \frac{1}{\sqrt{3}k} (Z_{m1} e^{j90^\circ} + Z_{m0} e^{j150^\circ}) + Z_{e1}$$

若假定 $\angle Z_{m1} = \angle Z_{m0} = 90^\circ$ ，则当 $Z_{e1} = 0$ 时，

$$Z_{BO} = \frac{1}{\sqrt{3}k} [ |Z_{m1}| - |Z_{m0}| e^{-j60^\circ} ]$$

$$Z_{CO} = \frac{1}{\sqrt{3}k} [ -|Z_{m1}| - |Z_{m0}| e^{j60^\circ} ]$$

由此可见，在出口发生单相金属性接地时：

B相选相元件所见阻抗是位于第四象限的一个很小的阻抗， $Z_{m0}/Z_{m1}$ 愈小时，该向量愈向正实轴靠近。

而C相选相元件所见阻抗乃是位于第三象限的一个很小的阻抗，当 $Z_{m0}/Z_{m1}$ 愈小时，该向量也愈向负实轴靠近。

这就说明，如果选相元件带偏移特性，就很容易引起非故障相元件的误动作。但如果辅之以饱和式的零序电流补偿，在出口接地故障时，因为零序电流大， $k$ 值变小， $Z_{BO}$ 、 $Z_{CO}$ 增大，可能有利于躲开误动作。不过它的计算和试验要比较复杂。

2. 故障前线路带负荷：

这时，

$$I_N = \frac{\dot{E}_M - \dot{E}_N}{Z_{m1} + Z_{e1} + Z_{N1}}$$

$$E_f = \frac{Z_{N1} \dot{E}_M + (Z_{m1} + Z_{e1}) \dot{E}_N}{Z_{m1} + Z_{e1} + Z_{N1}}$$

当 $\dot{E}_M/\dot{E}_N$ 变化时， $Z_B$ 和 $Z_C$ 的轨迹将分别是在阻抗平面上的两个圆。它们的详尽计算，在作定量分析的时候，有时是有用的。但负荷的影响可以近似地考虑如下：

无论送端和受端，都可以认为 $I_{1f}$ 落后 $E_m$ 的相角接近 $90^\circ$ 。在送端， $I_N$ 落后 $\dot{E}_M$ 的相角祇有几十度（例如不超过 $45^\circ$ ），在受端，可以认为 $I_N$ 与 $E_m$ 差 $180^\circ$ 左右。

因此，在送端， $a^2 \frac{I_N}{I_{1f}}$ 向量中将出现 $-j$ 的分量，其影响乃使 $Z_{BO}$ 由第四象限

向正实轴靠近。而在受端， $a^2 \frac{I_N}{I_{1f}}$  中将有在  $-(+j)$  的分量，其影响乃使  $Z_{BO}$  离开正实轴。同时在受端的  $a \frac{I_N}{I_{1f}}$  向量中，必有  $-(+j)$  分量，结果使  $Z_{CO}$  由第三象限向负实轴靠近，而在送端的  $a \frac{I_N}{I_{1f}}$  中的  $(\pm j)$  分量将较受端为小，其影响于  $Z_{CO}$  者较受端为小。

从上所述，考虑到一般选择选相元件的最大灵敏角接近于线路阻抗角，因而可以得到如下结论：

(1) 送端 B 相与受端 C 相的选相元件在 A 相出口接地时，由于故障前负荷电流的影响，比在无负荷情况下还要容易误动作。

(2) 当选相元件的最大灵敏角大于线路阻抗角但小于  $90^\circ$  时，有利于躲开非故障相选相元件的误动作，特别对方向阻抗式选相元件是如此。

用带记忆作用的方向阻抗元件作选相元件还可以有比较好的保护弧光电阻的动态功能，也可以兼用高频闭锁保护中的方向判别元件。它的整定阻抗角一般可以放在  $80^\circ$  左右或稍大，就可以保证有很好的选相性能。所以在东北系统中得到了普遍采用。

带偏移特性的选相元件，不仅容易引起非故障相的误动作，而且由于这种元件不带记忆作用，在线路出口接地时，动作时间很慢，不能符合快速切除故障的要求。