

# “接地—相间切换式方向阻抗继电器” 动作特性的分析

山东工学院 孙茂林

我国有些高压输电线路上应用着“接地—相间切换式方向阻抗继电器”，它的优点是结构简单，只用一套方向阻抗元件通过电压接线的切换可组成接地距离保护与相间距离保护，用以切除线路的接地与不接地的各种类型故障。但是由于接地相间的切换也产生了一些新问题，本文通过对“接地—相间切换式方向阻抗继电器”动作特性的分析指出这些问题，以便现场的同志合理地使用这种保护，避免可能发生的拒动与误动，提高继电保护的可靠性，保证安全供电。

## （一）接线方式：

高压输电线路上大量故障的统计表明：接地故障比较多，相间故障比较少。为了正确地快速地切除各种类型的接地故障，“接地—相间切换式方向阻抗继电器”正常作接地距离运行，只有出现两相短路时，才将它切换至相间距离运行，用以切除两相短路，及由两相短路引起的三相短路。因而它的接线方式为：

正常及接地短路时

$$\frac{U_{\phi}}{I_{\phi} + K3I_0}$$

相间短路时

$$\frac{\frac{1}{2}U_{\phi-\phi}}{I_{\phi}}$$

以A相阻抗继电器为例，正常接入电压为 $U_A$ ，发生两相短路时，将 $U_A$ 切换成 $\frac{1}{2}U_{AB}$ 。其电流回路不切换，接 $I_A + K3I_0$ ，当 $I_C = 0$ 时，即 $I_A$ 。

## （二）动作特性：

“接地—相间切换式方向阻抗继电器”作接地距离运行时，因其接线方式为 $U_{\phi} / I_{\phi} + K3I_0$ ，因而能正确地反映各种类型的接地故障及三相短路。

当切换至相间距离运行时，由于它的接线方式变为 $\frac{1}{2}U_{\phi-\phi} / I_{\phi}$ ，这就带来了一些新问题，使它的动作特性具有下列特点：

（1）两相短路的测量阻抗受非故障相电流的影响。

以AB两相短路为例，在AB两相短路时继电器的测量阻抗为：

$$Z_{AB}^{(2)} = \frac{\dot{U}_{AB}}{\dot{I}_A} = \frac{\dot{I}_A - \dot{I}_B}{\dot{I}_A} Z_1 = \left( 1 + \frac{\dot{I}_C}{2\dot{I}_A} \right) Z_1 \dots\dots (1)$$

(1)式表明：两相短路的测量阻抗受非故障相电流的影响，它在数值上不等于保护按装处至短路点的正序阻抗，在相位上它的相位角不等于线路阻抗角。

在(1)式中令  $K = \frac{I_C}{I_A}$ ，K表示非故障相电流与故障电流数值比的一半。

$\varphi_{AC}$ 表示  $\dot{I}_C$ 与  $\dot{I}_A$ 的相位差角，

则(1)式可写成下列形式：

$$Z_{AB}^{(2)} = (1 + Ke^{j\varphi_{AC}}) Z_1 = Ae^{j\beta} Z_1 \dots\dots (2)$$

式中A为阻抗倍数，它等于两相短路的测量阻抗  $Z_{AB}^{(2)}$ 与线路阻抗  $Z_1$ 的数值比， $\beta$ 为阻抗转角，它等于  $Z_{AB}^{(2)}$ 与  $Z_1$ 的相角差。

由图1可得：

$$A = \sqrt{(1 + K\cos\varphi_{AC})^2 + K^2\sin^2\varphi_{AC}} \dots\dots (3)$$

$$\beta = \arctg \frac{K\sin\varphi_{AC}}{1 + K\cos\varphi_{AC}} \dots\dots (4)$$

(3)式及(4)式表明：两相短路的阻抗倍数A及阻抗转角 $\beta$ 不仅与K有关而且与 $\varphi_{AC}$ 有关，这就是说不仅与非故障相电流的大小有关，而且与非故障相电流的相位有关。下面分别四种情况讨论 $\varphi_{AC}$ 的变化范围，从而确定 $\beta$ 及A的变化规律。

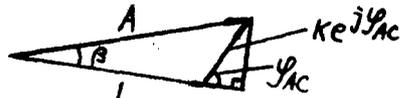


图 1

i) 送有功送无功：

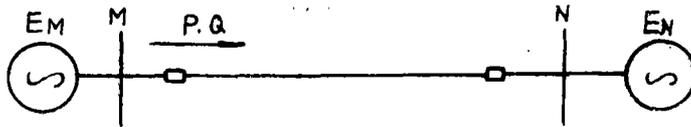


图 2

图2表示简化系统图，保护安装在线路M侧， $\dot{E}_M$ 为M侧等效电势，送功率即M侧向N侧输送功率，受功率则相反。

在送有功送无功时， $\dot{I}_C$ 与  $\dot{I}_A$ 的相位关系如图3所示，在图中 $\varphi_C$ 表示  $\dot{E}_{MC}$ 与  $\dot{I}_C$ 的相位差角， $\varphi_A$ 表示  $\dot{E}_{MA} - \dot{E}_{MB}$ 与  $\dot{I}_A$ 的相位差角，由图3可得：

$$\varphi_{AC} = \varphi_A - 30^\circ + 120^\circ - \varphi_C = \varphi_A - \varphi_C + 90^\circ \dots\dots (5)$$

送有功送无功时因  $90^\circ > \varphi_c > 0$

故  $\varphi_A + 90^\circ > \varphi_{AC} > \varphi_A$

将  $\varphi_{AC}$  代入 (3)、(4) 两式可得：在  $K < 1$  (一般  $K$  总小于 1) 的条件下，阻

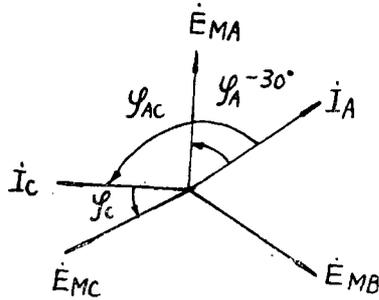


图 3

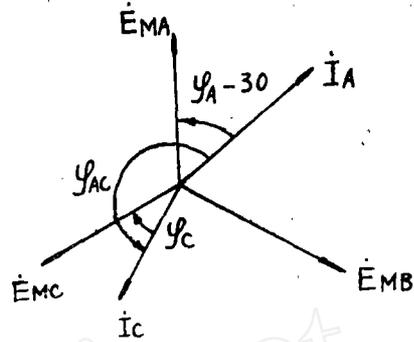


图 4

抗转角  $\beta$  为正，阻抗倍数  $A$  可能小于 1 也可能大于 1，负荷电流愈大， $K$  愈大， $\beta$  愈大。

ii) 送有功受无功：

由图 4 可得： $0^\circ > \varphi_c > -90^\circ$

代入 (5) 式得： $\varphi_A + 180^\circ > \varphi_{AC} > \varphi_A + 90^\circ$   $\varphi_{AC}$  在二、三象限，因而  $\beta$  可正可负，阻抗倍数  $A$  一般小于 1。

iii) 受有功受无功：

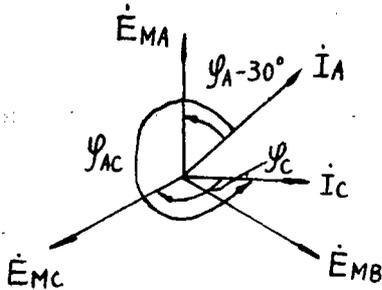


图 5

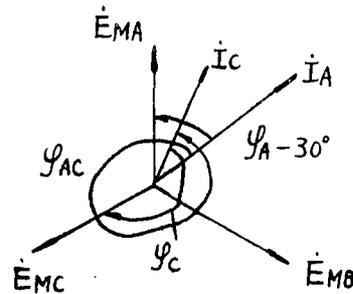


图 6

由图 5 可得： $-90^\circ > \varphi_c > -180^\circ$

代入 (5) 式得： $\varphi_A + 270^\circ > \varphi_{AC} > \varphi_A + 180^\circ$

$\varphi_{AC}$  在三、四象限，因而在  $K < 1$  的条件下阻抗转角  $\beta$  为负，阻抗倍数  $A$  可能大于 1，也可能小于 1， $K$  愈大  $\beta$  愈大。

iv) 受有功送无功：

由图 6 得： $-180^\circ > \varphi_c > -270^\circ$

代入(5)式得  $\varphi_A + 360^\circ > \varphi_{AC} > \varphi_A + 270^\circ$

$\varphi_{AC}$ 在四、一象限,因而阻抗转角可正可负,阻抗倍数大于1。

根据以上分析可得以下结论:由于非故障相电流的影响,产生了阻抗转角 $\beta$ 及阻抗倍数A,在送有功送无功的线路侧 $\beta$ 为正,在受有功受无功的线路侧 $\beta$ 为负,在送有功受无功的线路侧一般 $A < 1$ ,在受有功送无功的线路侧 $A > 1$ 。

(2)由两相短路引起的三相短路的测量阻抗不等于保护安装处至短路点的正序阻抗。

$$Z_{AB}^{(3)} = \frac{1}{2} \frac{\dot{U}_{AB}}{\dot{I}_A} = \frac{1}{2} \frac{\dot{I}_A - \dot{I}_B}{\dot{I}_A} Z_1 = \frac{\sqrt{3}}{2} e^{j30^\circ} Z_1 \dots\dots (6)$$

(6)式表明:由两相短路引起的三相短路(以下简称三相短路)的测量阻抗在数值上变小了 $\frac{\sqrt{3}}{2}$ 倍,在相位上超前 $Z_1 30^\circ$ ,即它的阻抗倍数为 $\frac{\sqrt{3}}{2}$ ,它的阻抗转角为 $30^\circ$ 。

应当指出在频率稳定,非突然短路的条件下,对园特性较好的方向阻抗继电器,三相短路的测量阻抗 $Z_{AP}^{(3)}$ 恰落在以 $Z_1$ 为直径的特性园周上,如图7所示。

(3)送有功送无功线路侧的阻抗继电器躲负荷的能力大大下降,重负荷线路有可能导致阻抗继电器误动。

若用 $Z_{f\phi}$ 表示 $\frac{1}{2} U_{\phi-\phi} / I_{\phi}$ 接线的阻抗继电器的测量的负荷阻抗,用 $Z_{f\phi-\phi}$ 表示 $U_{\phi-\phi} / I_{\phi-\phi}$ 接线的阻抗继电器的测量的负荷阻抗,则

$$Z_{f\phi} = \frac{\sqrt{3}}{2} e^{j30^\circ} Z_{f\phi-\phi} \dots\dots (7)$$

即 $\frac{1}{2} U_{\phi-\phi} / I_{\phi}$ 接线与 $U_{\phi-\phi} / I_{\phi-\phi}$ 接线相比,阻抗继电器测量的负荷阻抗在数值上变小了 $\frac{\sqrt{3}}{2}$ 倍,在相位上超前 $30^\circ$ 。

对装在送有功送无功线路侧的方向阻抗继电器,因负荷阻抗角多小于 $40^\circ$ ,负荷阻抗正转 $30^\circ$ 的结果就是向最大灵敏线方向靠近 $30^\circ$ ,而其阻抗数值又变小了 $\frac{\sqrt{3}}{2}$ 倍,这两个因素都是使负荷阻抗容易进园。对于重负荷线路,在外部两相短路或相邻线路操作引起切换继电器动作时,有可能导致阻抗继电器误动,从而造成保护误动,如图8所示。

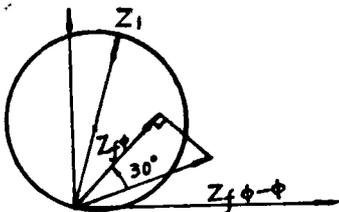


图 8

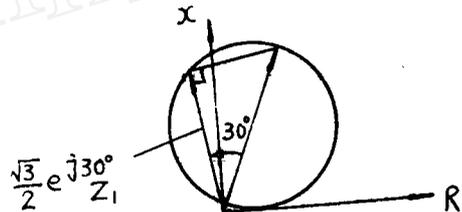


图 7

个因素都是使负荷阻抗容易进园。对于重负荷线路,在外部两相短路或相邻线路操作引起切换继电器动作时,有可能导致阻抗继电器误动,从而造成保护误动,如图8所示。

(4)频率变化时保护区变化,躲负荷能力变化。

i) 方向阻抗继电器的频率特性:

为了保证方向阻抗继电器动作具有明确的方向性，通常引入适当大小的插入电压，由插入电压与工作电压的线性组合组成极化电压，在极化电压回路中都设有谐振电路，因而对频率很敏感，在系统频率偏离极化回路相位谐振频率时，极化电压与工作电压产生了相角差  $\delta$ ，此时方向阻抗继电器的动作阻抗为：

$$Z_L = \frac{Z_b}{\cos \delta} \cos(\varphi_b - \varphi_L - \delta) \dots\dots (8)$$

式中  $Z_L$  表示在  $\varphi_L$  方向的测量阻抗。

由 (8) 式所确定的动作特性为以  $\frac{Z_b}{\cos \delta} e^{-j\delta}$  为直径，以  $Z_b$  为弦的圆，在  $\delta$  变化时为以  $Z_b$  为公共弦以  $\frac{Z_b}{\cos \delta} e^{-j\delta}$  为直径的一族圆。因而方向阻抗继电器的频率特性

具有以下特点：

① 系统频率偏离极化回路相位谐振频率时，出现  $\delta$  角，动作特性圆变大，直径变大  $\frac{1}{\cos \delta}$  倍。

② 多数方向阻抗继电器在频率降低时  $\delta$  为正，特性圆顺时针旋转  $\delta$  角，频率升高时  $\delta$  为负，特性圆反时针旋转  $\delta$  角。 $\delta$  为频率的增函数即  $\Delta f \uparrow \delta \uparrow$ ，其具体函数关系由极化回路参数确定。

③ 频率变化时，阻抗元件转移阻抗角  $\phi_b$  方向的保护区  $Z_b$  不变；在小于  $\phi_b$  侧频率下降时保护区增长，在大于  $\phi_b$  侧频率下降时保护区缩短。

其频率特性图 9 所示。

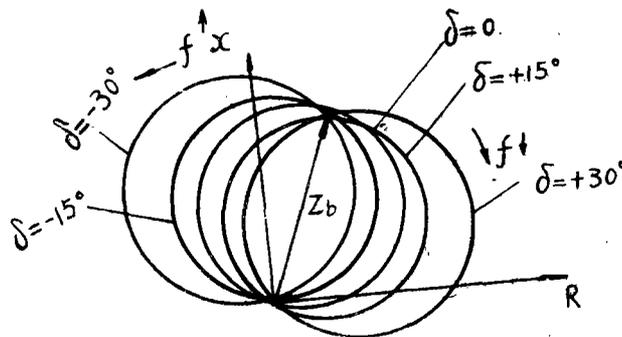


图 9

ii) 频率变化时，作相间距离运行的“接地——相间切换式方向阻抗继电器”动作特性具有以下特点：

① 对装在送有功送无功线路侧的切换式方向阻抗继电器，在频率降低时，由于特性圆变大，且顺时针方向旋转，故躲负荷能力还要大大下降，负荷阻抗更易进圆，更容易导致误动。在频率升高时，由于圆逆时针旋转，躲负荷能力有所增强。

② 由于三相短路的测量阻抗超前线路阻抗角  $30^\circ$ ，在线路阻抗角等于阻抗元件转移

阻抗角  $\phi_s$  的条件下, 超前  $\phi_s 30^\circ$ , 在系统频率降低时, 特性园顺时针旋转, 三相短路的保护区要缩短, 有可能导致在区内故障时阻抗继电器拒动, 在系统频率升高时, 特性园扩大并反时针旋转, 因而三相短路的保护区增长, 有可能导致在区外故障时。阻抗继电器误动。应当指出在系统频率变化较大时, 三相短路的保护区变化较大, 如图10所示。在图10中用Z表示额定频率时三相短路的保护区,  $Z = \frac{\sqrt{3}}{2} e^{j30^\circ} Z_b$ ;  $Z'$  表示频率降低  $\Delta f$  时三相短路的保护区,  $Z' < Z$ ,  $Z''$  表示频率升高  $\Delta f$  时三相短路的保护区,  $Z'' > Z$ 。

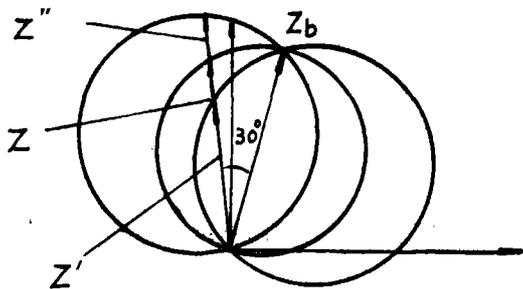


图 10

(5) 在线路正方向发生两相短路或三相短路(在0.1秒记忆时间内)时, 插入电压取自健全相的切换式方向阻抗继电器, 保护区伸长, 系统阻抗与线路阻抗的比愈大, 伸长愈多。

分析表明: 插入电压取自健全相的方向阻抗继电器, 当系统发生两相短路时, 动作特性与以  $Z_b$  为直径的阻抗园有较大区别, 在正方向短路时, 特性园变大, 变成一下移园, 其直径为  $Z_b + K Z_y$ ,  $Z_b$  为系统阻抗,  $K$  为一与极化回路参数有关的系数, 如图 11 所示。从图 11 可看出: 在  $\phi_s$  方向保护区不变, 在偏离  $\phi_s$  方向保护区伸长。

在图 11 中园 A 表示以  $Z_b$  为直径的园, 园 B 为正方向两相短路的阻抗特性园。

三相短路在 0.1 秒记忆时间内其阻抗园与两相短路相同, 在 0.1 秒后记忆电压消失, 其阻抗园变为以  $Z_b$  为直径的园。

图中  $Z^{(3)}$  表示三相短路的保护区,

$\Delta Z^{(3)}$  表示三相短路 0.1 秒内保护区伸长的范围,

$Z^{(2)}$  表示两相短路的保护区,

$\Delta Z^{(2)}$  表示两相短路保护区伸长的范围。

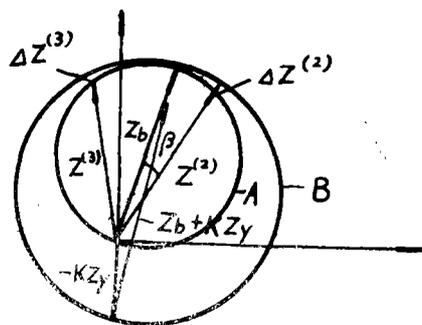


图 11

因而插入电压取自健全相的切换式方向阻抗继电器, 在两相短路及三相短路时具有以下特点:

在两相短路时, 由于非故障相电流的影响, 测量阻抗多偏离  $\phi_s$  方向, 保护区伸长, 如图 11 中所示, 它影响距离保护速动段及延时段定值(即 I 段、II 段定值)主要影响 I 段定值, 会导致区外故障保护误动。

三相短路在0.1秒记忆时间内，因测量阻抗超前 $\phi_0 30^\circ$ ，保护区伸长，它仅影响I段定值。

系统阻抗愈大，保护区变化愈大。

(6) 在系统频率偏离极化回路相位谐振频率时，发生正方向两相短路，由于阻抗园变为变大了的下移园，此大园直径再变大 $\frac{1}{\cos \delta}$ 倍，并旋转 $(-)\delta$ 角(如图12

所示)，而切换式方向阻抗继电器的两相短路的测量阻抗因受非故障相电流的影响偏离 $\phi_0$ ，一个阻抗转角 $\beta$ ，因而保护区变化，它的规律如下：

对送有功送无功线路侧， $\beta$ 为正，在频率升高时保护区伸长。

对受有功受无功线路侧， $\beta$ 为负，在频率降低时保护区伸长。

负荷愈大，系统阻抗愈大，频率变化愈大则保护区变化愈大。

应当指出三相短路在频率变化时的阻抗特性园，在0.1秒记忆时间内与两相短路的阻抗园相同，因而保护区的变化比0.1秒记忆消失后要大。

图12中A表示以 $Z_0$ 为直径的阻抗园，B'表示在频率降低到某一频率时两相短路的阻抗园。

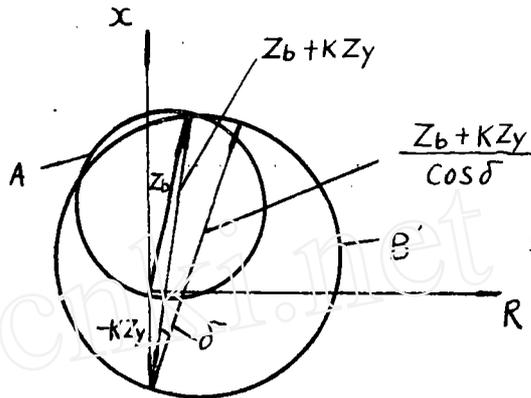


图 12

### (三) 建 议

i) “接地——相间切换式方向阻抗继电器”可以应用在频率变化较小，系统阻抗较小的轻负荷的110KV输电线路路上。

ii) 对频率变化较大的110KV输电线路，要进行保护区的校核，若该切换式方向阻抗继电器的频率特性较好，在频率变化的范围内，保护区在允许范围内变化，也可应用。

iii) 对系统阻抗较大的短线路，也要进行保护区的校核，若保护区的伸长在允许范围内，也可应用。

iv) 对重负荷的110KV线路及220KV输电线路，最好只作接地距离运行，再增设一套相间距离保护。