

静态多相距离继电器

译自 I.E.E.E. Trans. Vol PAS—91 No 3 1972

浙江大学电机系发电教研组

符 号 表

- a, b, c ——三个各别相
- V_{ra}, V_{rb}, V_{rc} ——继电点电压互感器二次侧相电压
- V_{fa}, V_{fb}, V_{fc} ——故障点的相电压
- E_a, E_b, E_c ——电源的相电压
- V_x, V_y, V_z ——继电点补偿的相电压
- V_{xy}, V_{yz}, V_{zx} ——继电点补偿的线电压
- I_a, I_b, I_c ——各相电流
- Z_L, Z_s, Z_r ——线路阻抗, 电源阻抗和模拟阻抗
- 1, 2, 0 ——正序, 负序和另序分量, 当附于其他量的符号时表示这一量的相应序量。
- n —— Z_{L0}/Z_{L1}
- k —— $(n-1)$
- p —— V_{x0}/V_{x2}
- a, j 等 —— $||120^\circ, ||90^\circ$ 等
- Q_1, Q_2 ——比较器的输入量
- K_1, K_2, K_3, K_4 ——复数量
- I_1, I_2 ——系统量
- λ —— $|K_2/K_4|$
- α —— $\arg K_2/K_4$
- W —— I_2/I_1 , 即 I_2 和 I_1 的向量比
- A —— K_1/K_2 , 系复数值
- B —— K_3/K_4 , 系复数值
- K —— $|(W-A)/(W-B)|$
- β —— $\arg(W-A)/(W-B)$
- β_c ——相位比较器相角整定值
- θ ——旋转向量对基准轴线的角度

§1. 概 述

许多有关文献表明,多相距离继电器可以由下列几种方法来构成:(a)补偿的故障点相序电压的幅值比较^(1, 2), (b)补偿的故障点两线电压的相位比较⁽³⁾, 和 (c)相序测定法^(4, 5)。独有一篇文献⁽³⁾所提出的结线对一相接地是不能起保护作用的。为了克服这个缺陷, Rockeffe⁽²⁾创拟了一种接地距离继电器,它是以前补偿的故障点相序电压的幅值比较为根据的。Rao⁽¹⁾所提出的,以补偿的故障点相序电压的幅值比较为根据的结线,或测量补偿的故障点电压相序而构成的多相距离继电器⁽⁴⁾, 均能完整地保护各种不同型式的故障。但是,上述各种结线均要用复杂的静态开关电路。作者在本文中所提出的新型逻辑电路多相距离继电器,对所有并联故障均能正确反应,而不需任何开关电路。这逻辑结线在各种不同型式的故障下的行为特性已运用两输入相位比较器一般化理论加以解释,这种理论对解释单相距离继电器行为特性是一直在应用的。

§2. 提出的结线方案

要做成提出的结线方案,在继电器点需有三个补偿的电压 V_x, V_y 和 V_z 来激发三只“90°相位比较器”,以保护除 3- ϕ 故障外的其他各种故障。但是,为了保护 3- ϕ 故障,应有补偿的量 V_z 和 V_{rc} 送入另一只“90°相位比较器”。90°相位比较器可以定义为一种电路,它在两输入具 90°相位关系时有一个决定点,并且在这一点的 $\pm 90^\circ$ 相带范围内可提供输出。下节将应用两输入相位比较器一般化理论对 90°相位比较器的结线作详细的分析。

A. 输入量的导求

在任何型式的故障下,如果假定没有电弧电阻,故障点的 a 相相电压则为

$$V_{fa} = V_{ra} - I_a Z_L \quad (1)$$

式中符号,见前表所示。将 I_a 和 Z_L 以其序量来表示,则得

$$\begin{aligned} V_{fa} &= V_{ra} - I_{a1} Z_{L1} - I_{a2} Z_{L2} - I_a Z_{L0} \\ &= V_{ra} - (I_a + KI_{a0}) Z_{L1} \end{aligned} \quad (2)$$

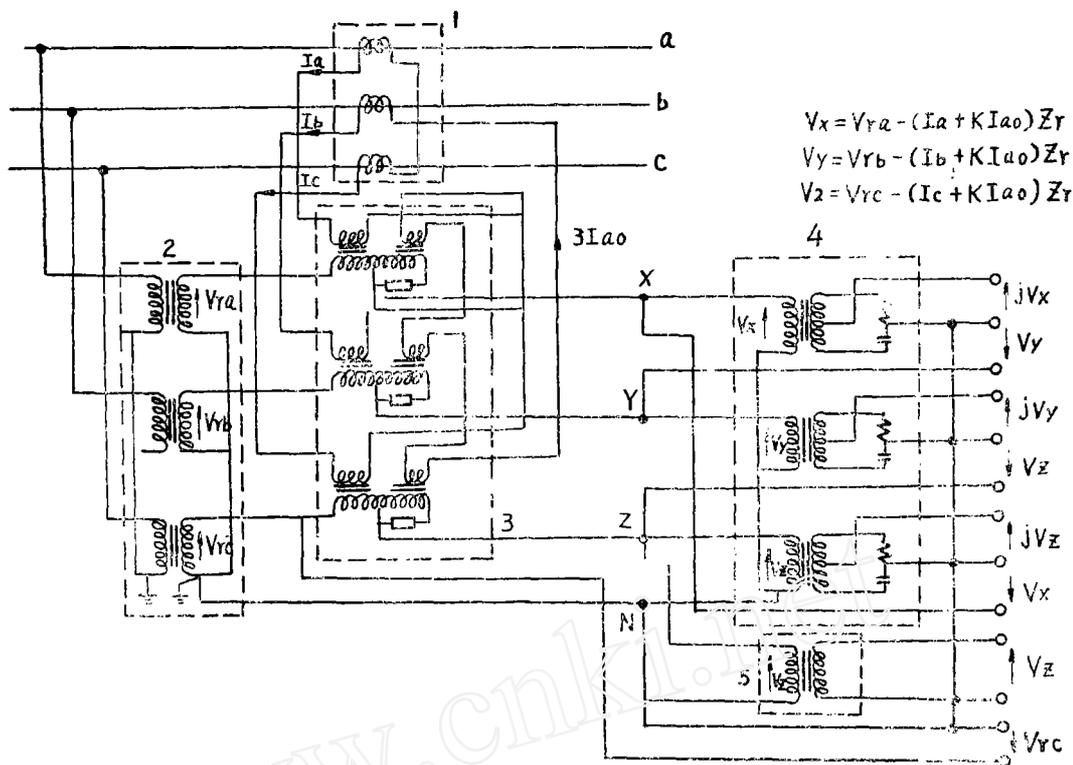
这里, $k = n - 1, n = Z_{c0}/Z_{L1}$, 并假定了线路的 $Z_{L1} = Z_{L2}$ 。因而,继电器所在处的三个补偿相电压将为

$$\left. \begin{aligned} V_x &= V_{ra} - (I_a + KI_{a0}) Z_r = V_{x1} + V_{x2} + V_{x0} \\ V_y &= V_{rb} - (I_b + KI_{b0}) Z_r = a^2 V_{x1} + a V_{x2} + V_{x0} \\ V_z &= V_{rc} - (I_c + KI_{c0}) Z_r = a V_{x1} + a^2 V_{x2} + V_{x0} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中, $Z_{L1} = Z_r$, 为模拟阻抗整定值, 而

$$V_{x1} = V_{ra1} - I_{a1} Z_r, \quad V_{x2} = V_{ra2} - I_{a2} Z_r, \quad V_{x0} = V_{ra0} - I_{a0} n Z_r$$

图 1 表示得到 V_x, V_y 和 V_z 的电路。



1. 主电流互感器 2. 电压互感器
3. 电抗变压器 4. 90° 移相器
5. 隔离变压器

图 1 多相距离继电器的测量电路

B. 一般化理论在多相距离继电器上的应用

如果 V_x 和 V_y 为正弦比较器的输入，则在采用 90° 相位比较器时要得到阻抗平面上同样的特性，两个输入中的一个输入应当移相 90°。因而 90° 相位比较器的两输入为 jV_x 和 V_y 。

(1) 当 a 相接地和 b-c 相故障（接地或不接地）时继电器的始动特性方程两输入之比为

$$\begin{aligned} \frac{jV_x}{V_y} &= \frac{j(V_{x_1} + V_{x_2} + V_{x_0})}{a^2 V_{x_1} + a V_{x_2} + V_{x_0}} \\ &= e^{j120^\circ} \frac{V_{x_1}/V_{x_2} + (1+p)}{V_{x_1}/V_{x_2} + (a^2 + ap)} \end{aligned} \quad (4)$$

这里， $p = V_{x_0}/V_{x_2}$ ，为一复数。

方程式(4)与附录I中方程式(1,a)相似,将两式加以比较,可得

$V_{x_1}/V_{x_2}=W$, $A=- (1+p)$ 和 $B=- (a^2+ap)$, 同时 $\beta=\beta_c-\alpha=90^\circ-210^\circ=-120^\circ$, 因此,按附录方程式(1,C),可得 V_{x_1}/V_{x_2} 轨迹的向量形式为

$$\begin{aligned} \frac{V_{x_1}}{V_{x_2}} &= - (a^2+ap) + \frac{- (1+p) + (a^2+ap)}{2} \operatorname{cosec}(-120^\circ) \left| \frac{90^\circ+120^\circ}{\theta} \right. \\ &\quad \left. + \left| \frac{(a^2+ap) - (1-p)}{2} \operatorname{cosec}(-120^\circ) \right| \frac{\theta}{\theta} \right. \\ &= a^2p + |1-ap| \frac{\theta}{\theta} \end{aligned} \quad (5)$$

(2) 当 b 相接地和 c-a 两相故障(接地或不接地)时继电器的始动特性方程

在这些故障时,可以看出 V_{x_0} 保持与上述 a 相接地故障所得的同样的角度,而 V_{x_1} 和 V_{x_2} 则要正向转过 120° 和 240° 。因此,在 V_x 和 V_y 表示式中以 aV_{x_1} 代替 V_{x_1} , $a^2V_{x_2}$ 代替 V_{x_2} , 即得

$$\begin{aligned} \frac{jV_x}{V_y} &= \frac{j(aV_{x_1}+a^2V_{x_2}+V_{x_0})}{V_{x_1}+V_{x_2}+V_{x_0}} \\ &= \frac{(V_{x_1}/V_{x_2}) + (a+a^2p)}{(V_{x_1}/V_{x_2}) + (1+p)} e^{j210^\circ} \end{aligned} \quad (6)$$

再用附录I方程式(1,C),并加以简化,可得 V_{x_1}/V_{x_2} 轨迹的向量形式为

$$\frac{V_{x_1}}{V_{x_2}} = ap + |1-a^2p| \frac{\theta}{\theta} \quad (7)$$

(3) 当 C 相接地和 a-b 两相故障(接地或不接地)时继电器始动特性方程

从 a 相接地故障时所得的相应数值来看,这时 V_{x_0} 角度仍不变,而 V_{x_1} 和 V_{x_2} 则要正向转过 240° 和 120° 。这样,在 V_x 和 V_y 表示式中以 $a^2V_{x_1}$ 代 V_{x_1} , aV_{x_2} 代 V_{x_2} , 即得 90° 相位比较器的输入之比为

$$\begin{aligned} \frac{jV_x}{V_y} &= \frac{j(a^2V_{x_1}+aV_{x_2}+V_{x_0})}{aV_{x_1}+a^2V_{x_2}+V_{x_0}} \\ &= \frac{(V_{x_1}/V_{x_2}) + (a^2+ap)}{(V_{x_1}/V_{x_2}) + (a+a^2p)} e^{j210^\circ} \end{aligned} \quad (8)$$

按前面完全一样的方法处理,轨迹 V_{x_1}/V_{x_2} 的向量形式为

$$\frac{V_{x_1}}{V_{x_2}} = p + |1-p| \frac{\theta}{\theta} \quad (9)$$

由方程式(5),(7)和(9)可作出除 3- φ 故障(这时,继电器是不动作的)外其他

各种故障下的始动特性。为了得到各种不同故障时在阻抗平面上的特性， V_{x1} ， V_{x2} 和 p 值要用系统阻抗来表示，然后代入上述三个方程式的任一式中。附录 3 列出单相接地和两相故障（接地或不接地）在阻抗平面上的特性方程式，并清楚地示出其中所有关系。图 2、3 和 4 表示所述继电器在正反向故障时阻抗平面上的特性。在图 4，a—b 两相接地故障特性（正向和反向）未能示出，因为取 $p = 1 \angle 0^\circ$ （这是作出两相接地故障特性几何图形所用的数值）代入方程式 (A-3c)，圆的半径变为零，而 Z_L 变成等于 Z_r ，在图 4—a 所示的阻抗平面上，这只是一点。同样，如将同样的 p 值代入方程式 (A-31)，则 Z_{11} 变成等于 $-Z_r$ ，这也只是一点。

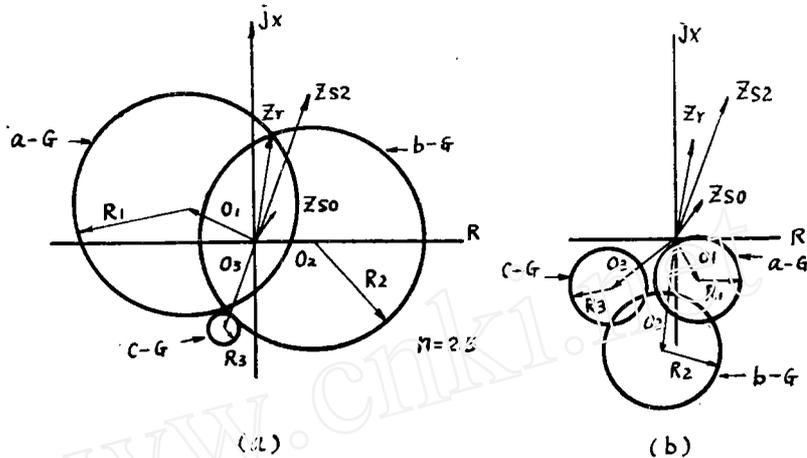


图 2 a 正向单相接地故障时继电器的特性
2 b 反向单相接地故障时继电器的特性

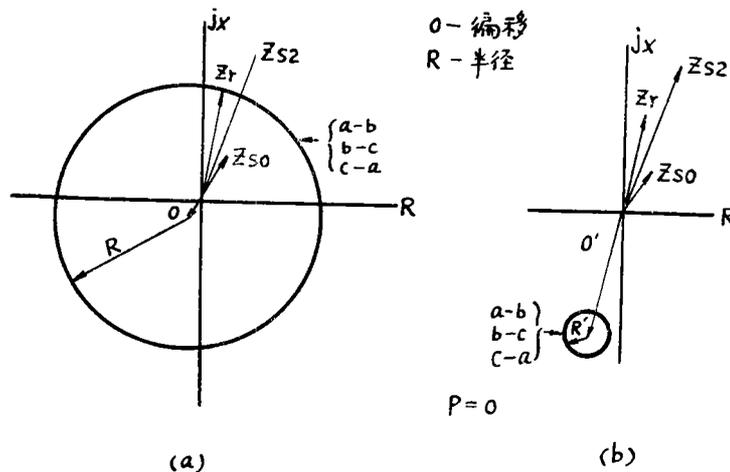


图 3 a 正向两相故障时继电器的特性
3 b 反向两相故障时继电器的特性

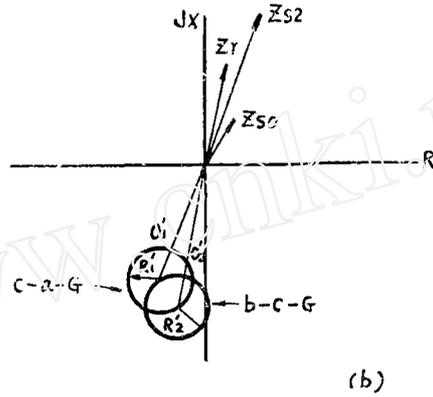
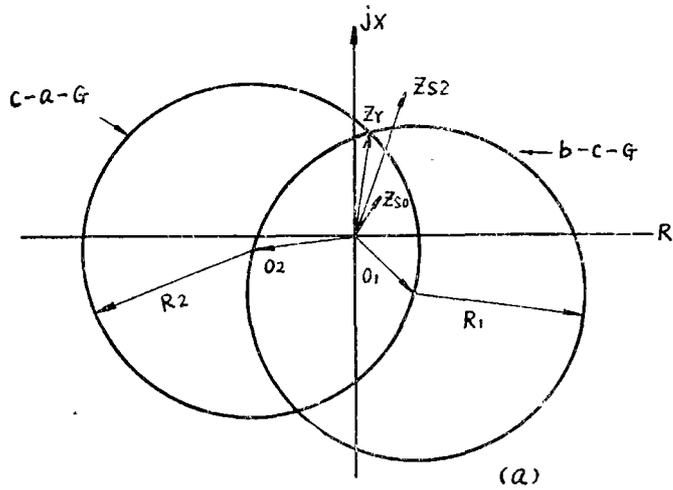


图 4 a 正向两相接地故障时继电器的特性
4 b 反向两相接地故障时继电器的特性

C. 三相故障（正向故障）

上述多相距离继电器对 3-φ 故障是不能起保护作用的。为了保护 3-φ 故障，90° 相位比较器两输入应分别采取 V_z 和 V_{rc} 。因此

$$\begin{aligned} \frac{V_z}{V_{rc}} &= \frac{V_{rc} - (I_c + KI_{a0})Z_r}{V_{rc}} \\ &= \frac{V_{rc}/(I_c + KI_{a0}) - Z_r}{V_{rc}/(I_c + KI_{a0})} \end{aligned} \quad (10)$$

于是，在这情况下， $A = Z_r$ ， $B = 0$

$$\alpha = 0^\circ \quad W = V_{rc} / (I_c + KI_{a0})$$

$$\beta = \beta_c - \alpha = 90^\circ$$

利用附录 I 方程式 (1, C), 经简化后可得

$$\frac{V_{rc}}{(I_c + KI_{a0})} = \frac{Z_r}{2} + \frac{Z_r}{2} \angle 0 \quad (11)$$

在 3-φ 故障下, $V_{rc} / (I_c + KI_{a0})$ 变成 Z_{L1} 。因此, 始动方程为

$$Z_{L1} = \frac{Z_r}{2} + \frac{Z_r}{2} \angle 0 \quad (12)$$

如图 5 所示。

三相故障 (反向故障)

反向故障情况下的始动特性可以用 $-Z_r$ 代 Z_r 来求得, 因而特性圆的方程为

$$Z_{L1} = -\frac{Z_r}{2} - \frac{Z_r}{2} \angle 0 \quad (13)$$

这表示继电器是有方向性的。顺便可以指出, 这继电器在 C 相接地故障时也可正确动作, 而有同样的特性, 如图 5 所示。

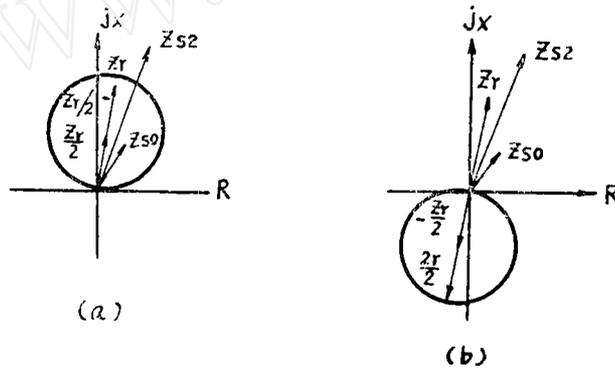


图 5 a 正向三相故障时继电器的特性
5 b 反向三相故障时继电器的特性

D. 多相距离继电器的逻辑电路

从图 2、3 和 4 显然可以看出, 当以 jV_x 和 V_y 作为输入送入一只 90° 相位比较器时, 除 C 相接地和 a-b 两相接地故障外, 它对其他各种型式的故障均能正确反应。同样可以证明, 如果送入另一只 90° 相位比较器的输入为 jV_y 和 V_z 的话, 则除 a 相接地和 b-c 两相接地故障外, 它对其他各种型式的故障均能正确反应。同理, 以 jV_z 和 V_x 为输入的另一 90° 相位比较器, 除 b 相接地和 c-a 两相接地故障外, 也可正确反应其他各种型式的故障。将

上述三只 90° 相位比较器的输出送至一个“或”门，就可构成一只组合的多相距离继电器，它将可正确动作于所有单相接地和两相(接地或不接地)故障，而且继电器完全是具有方向性的。为了对付 $3-\varphi$ 故障，可将另一输入为 V_z 和 V_{rc} 的 90° 相位比较器的输出也送到同一“或”门。整体电路如图 6 所示。图 7 表示这电路在各种不同型式故障时的综合特性。

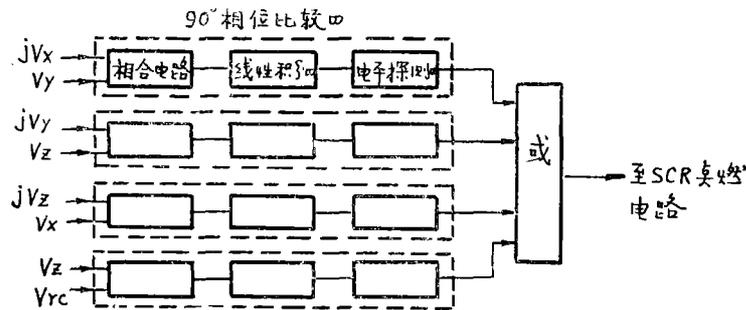


图 6 组合多相距离继电器的概要电路

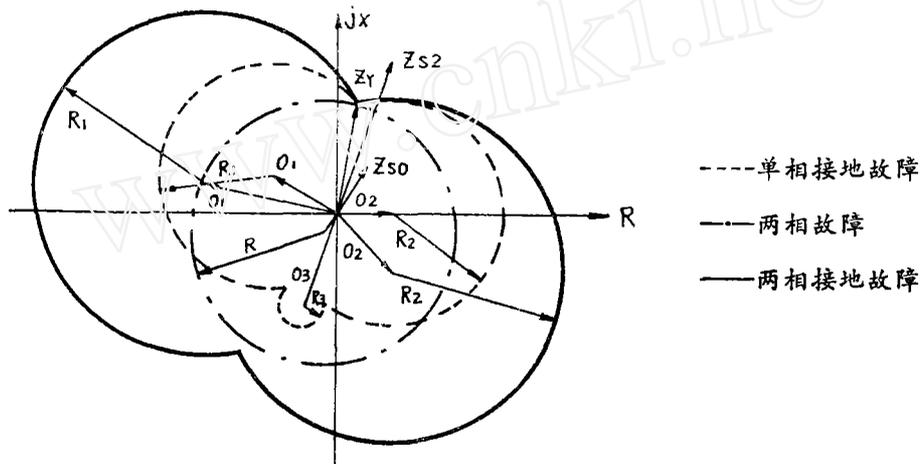


图 7 各种不同型式正向故障下组合多相距离继电器的特性

§ 3. 实验电路和试验结果

构成多相距离继电器， 90° 相位比较器是不可缺少的，同时改进相位比较器可以借助晶体管电路。有关文献(6、7)表明有三种基本方法，即：(a) 方波瞬时比较⁽⁷⁾；(b) 脉冲比较方式⁽⁷⁾；和(c) 方波平均比较⁽⁶⁾，这是(a)的一种改进。

在本文所用的这种 90° 相位比较器中，两个输入 jV_x 、 V_y 等量是在重合电路中进行比较的，并在两输入信号正负半周波上测量重合极性的持续时间，以防止由于一个信号的不对称

而可能出现于 (a) 和 (b) 的暂态越区。标准的输出脉冲在 jV_x , V_y 等为相同极性时为正, 而相反极性时为负。重合电路的输出脉冲送至线性积分器, 其输出脉冲为正时线性地上升, 而在极性相反时则以同样速率下降。当积分器输出超出某一预定值时, 电平探测器 (司密脱触发器) 便触发和送出跳闸信号至最后的跳闸回路, 在积分器输出下降到低于预定值时, 电平探测器就复归。

作者采用了方波平均比较的原理, 因为三种方法在稳态下虽然没有基本的差别, 但在动态情况下, (a)(b) 两类比较器由于它们是瞬时动作的关系, 本能地要容易反应系统暂态和其他的假信号, 而且其测量准确度不牺牲一点动作速度是不可能保持的。可以证明⁽⁶⁾, 方波平均比较方法的相位比较器本质上是不受暂态影响的, 而其最小动作时间约为 10ms。

对多相距离继电器已经进行了下列一些试验:

(1) 从母线投拉空载线路, 结果继电器是完全稳定的。

(2) 对不同型式的故障作出了继电器的静态极特性, 如图 8 所示。曲线和所述情况是一致的。

(3) 在单相接地故障下进行稳态试验, 得到“准确度” (Z_{L1}/Z_r) 与“继电器端电压”的关系曲线, 如图 9 所示。在其他型式的故障下, 特性亦同。

(4) 在各种不同故障下进行暂态试验所得到“准确度” (Z_{L1}/Z_r) 与“继电器端电压”的关系曲线表明, 在电流波形含有最大的直流偏移时最大的暂态越区约为 2%。电抗变压器本身就是暂态滤波器, 而所用的又是不受暂态影响的 90° 相位比较器, 因此, 这样微小的越区可能是由于 90° 移相装置所造成的。而且继电器在故障发生于线路阻抗的平衡点上时具有一个暂态延时。

(5) 对继电器还进行了反向故障试验, 将稳态和暂态电流以同正常电流相反方向通入电抗变压器, 而电压互感器二次侧端电压则仍保持与 (3) 试验的一样。结果, 继电器是完全稳定的。

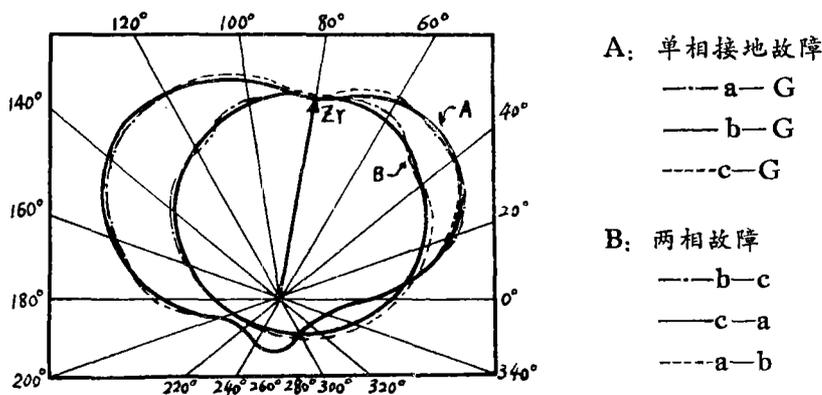


图 8 a 正向单相接地故障和两相 (不接地) 故障时实验的极特性

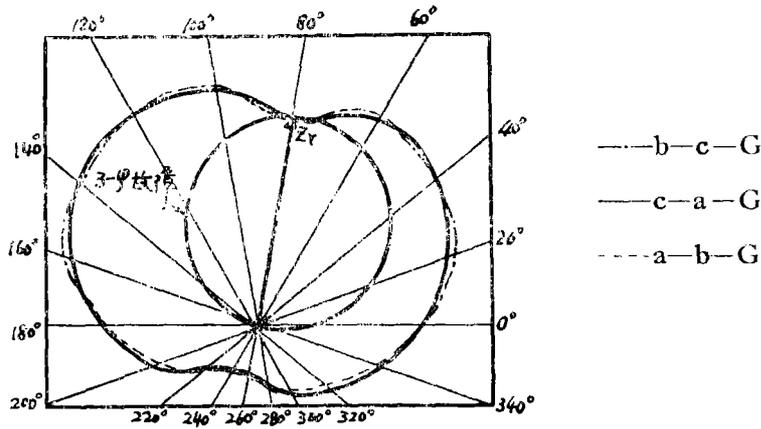


图 8 b 两相接地故障和三相故障时实验的极特性

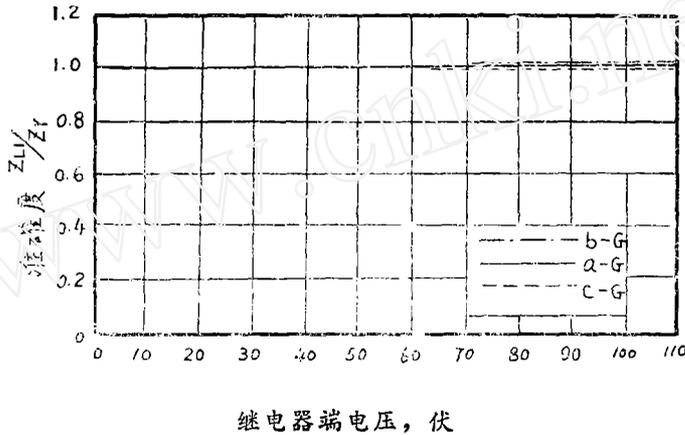


图 9 单相接地故障（正向的）下“准确度 Z_{L1}/Z_r ”与“继电器端电压”的关系曲线

§ 4 . 结 论

(1) 一直应用于单相距离继电器的两输入相位比较器一般化理论, 也可以成功地运用于以两输入比较器相位比较方法发展而来的多相距离继电器, 以说明其在阻抗平面上的静态特性。

(2) 采用方波平均比较原理而不受暂态影响的 90° 相位比较器和简单的逻辑电路, 可以构成一个适应各种并联故障的多相距离继电器。

(3) 从多相距离继电器特性曲线可以了解, 如果单相接地而有正常电弧电阻存在的话,

这种继电器也不会误动作。

(4) 如果采用任何静态的正弦型比较器或霍尔晶体管比较器⁽⁵⁾以代替 90° 晶体管型相位比较器, 就可不需要对其中一个输入进行 90° 移相, 从而节省了 90° 移相装置, 而这装置可能就是暂态误差的根源。

(5) 因为在 90° 相位比较器中极性相合的持续时间是在信号两个半波上测量的, 所以继电器特性的越区可以减小, 不然, 它就可能由于电流波形中的 D.C 偏移而出现。

(6) 本文重要之点是在其理论申述和实验引证: 利用继电器点相电压和经过模拟阻抗的电流所适当补偿的同样电压之间的相位移而构成的接地距离继电器, 可以正确反应单相接地以及两相接地或不接地的故障。

附录 1 两输入比较器的一般化理论

令 I_1 和 I_2 为继电器点的两个系统量。经适当变换之后, 可以得到两个量 Q_1 和 Q_2 。

$$Q_1 = K_1 I_1 - K_2 I_2$$

$$Q_2 = K_3 I_1 - K_4 I_2$$

这里, K_1, K_2, K_3 和 K_4 都是复数, 用以将 I_1 和 I_2 移相和改变幅值。这些变换是在测量元件中执行的, 从而得出 Q_1 和 Q_2 , 送入比较器。这样,

$$\begin{aligned} \frac{Q_1}{Q_2} &= \frac{K_1 I_1 - K_2 I_2}{K_3 I_1 - K_4 I_2} = \frac{K_2}{K_4} \frac{(I_2/I_1) - (K_1/K_2)}{(I_2/I_1) - (K_3/K_4)} \\ &= \lambda e^{j\alpha} \frac{W - A}{W - B} \quad (1-a) \\ &= \lambda K e^{j(\alpha+\beta)} \quad (1-b) \end{aligned}$$

式中各个符号, 已说明于前。A, B, λ , α 等数值在具体的 K_1, K_2, K_3 和 K_4 一经指定后, 就全部固定了。W 值和系统量 I_1 和 I_2 有关。从方程式 (1, b) 可知, 对 Q_1 和 Q_2 可以比较相位或比较幅值, 以形成两种比较器, 即相位比较器和幅值比较器。

相位比较所得的一般特性。

参照图 A-1, OP 和 OQ 代表参量 A 和 B, 其方向如箭头所示。令 T' 为平面上任意一点, 则 PT' 代表向量 $\lambda e^{j\alpha} (W - A)$, 而 QT' 代表向量 $(W - B)$, 它们是从 Q_1 和 Q_2 推演出来加于相位比较器上的两个量。显然, 如果相位比较器的角度整定在 $\pm\beta_c$, 则 T' (两个比较参量的交点) 轨迹将为两个对称于 PQ 的圆弧, 如图中虚线所示。主要的是 W 的特性曲线, 要得到这特性, 可将向量 PT' 按顺时针方向转过一个角度 α , 交割于向量 $(W - B)$ 于 T 点。向量 PT 表示向量 $(W - A)$ 的方向, 而 T 点为向量 W 的端点, OT 则代表向量 W。这样, 当 T' 以比较器角度 $+\beta_c$ 在 PQ 上面描绘出圆弧 $PT'Q$ 时, W 就在 PQ 上面描绘出圆弧 PTQ。同样, 当 T' 以比较器角度 $-\beta_c$ 在 PQ 的另一侧描出另一对称的圆弧时, W

将在 PQ 下面描出另一不对称的圆弧，如图中实线所示。对比较器任一固定的角度整定值来说，不同的 α 值可得 W 各对不同的不对称圆弧。当 $\alpha = 0$ 时， T' 和 T 的轨迹都是对称的圆弧 $PT'Q$ 。如果 $\beta_c = \pm 90^\circ$ ，这是 90° 相位比较器的动作判据，则 T' 的轨迹将是一个以 PQ 为直径的圆，而 W 的轨迹则是以 PQ 为弦的另一个圆，显然在不同的 α 值下，这些圆的圆心都是在 PQ 的垂直平分线上（见图 A-2）。

以图 A-2 所示的 W 圆轨迹来说，其方程式以向量形式表示将为

$$W = B + \frac{A-B}{2} \operatorname{cosec} \beta |90^\circ - \beta + \frac{A-B}{2} \operatorname{cosec} \beta | \theta \quad (1-c)$$

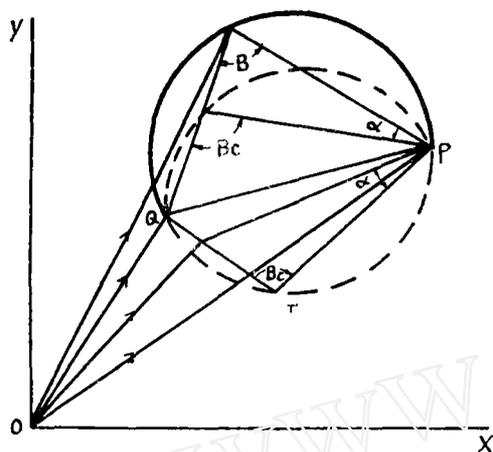


图 A-1 相位比较器所得的一般特性

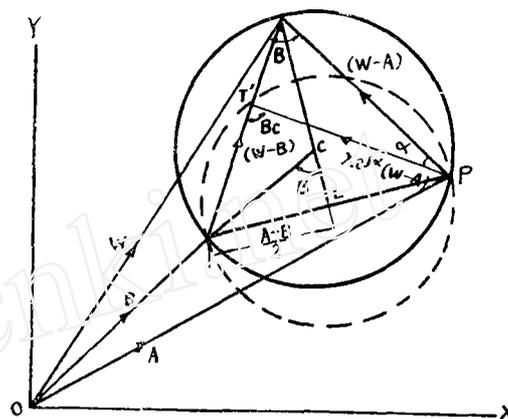


图 A-2 90° 相位比较器所得的圆特性

附录 2 在各种不同故障情况下的 V_{x1} V_{x2} 和 V_{x0} 值 (以 a 相为基准)

用对称分量法，可以很容易算出各种不同故障下的 V_{x1} 、 V_{x2} 和 V_{x0} 等数值。这些数值可分列如下。

a 相接地故障（正向的）

$$V_{x1} = \frac{E_{a1}(Z_{s2} + 2Z_{L1} - Z_r + Z_{s0} + Z_{L0})}{(Z_{s1} + Z_{s2} + Z_{s0}) + (2Z_{L1} + Z_{L0})} \quad (A-1)$$

$$V_{x2} = \frac{-E_{a1}(Z_{-2} + Z_r)}{(Z_{s1} + Z_{s2} + Z_{s0}) + 2(Z_{L1} + Z_{L0})} \quad (A-2)$$

$$V_{x0} = \frac{-E_{a1}(Z_{s0} + nZ_r)}{(Z_{s1} + Z_{s2} + Z_{s0}) + (2Z_{L1} + Z_{L0})} \quad (\text{A-3})$$

a 相接地故障 (反向的)

在反向故障时, 电力系统的故障电流将相反。这会引发电抗变压器二次侧模拟阻抗两端电压反向。因而

$$V_{x1} = V_{ra1} + I_{a1}Z_r = \frac{E_{a1}(Z_{s2} + 2Z_{L1} + Z_r + Z_{s0} + Z_{L0})}{(Z_{s1} + Z_{s2} + Z_{s0}) + (2Z_{L1} + Z_{L0})} \quad (\text{A-4})$$

$$V_{x2} = V_{ra2} + I_{a2}Z_r = \frac{-E_{a1}(Z_{r2} - Z_r)}{(Z_{s1} + Z_{s2} + Z_{s0}) + (2Z_{L1} + Z_{L0})} \quad (\text{A-5})$$

$$V_{x0} = V_{ra0} + I_{a0}nZ_r = \frac{-E_{a1}(Z_{s0} - nZ_r)}{(Z_{s1} + Z_{s2} + Z_{s0}) + (2Z_{L1} + Z_{L0})} \quad (\text{A-6})$$

b-c 两相故障 (正向的)

$$V_{x1} = \frac{E_{a1}(Z_{s2} + 2Z_{L1} - Z_r)}{(Z_{s1} + Z_{s2} + 2Z_{L1})} \quad (\text{A-7})$$

$$V_{x2} = \frac{E_{a1}(Z_{s2} + Z_r)}{(Z_{s1} + Z_{s2} + 2Z_{L1})} \quad (\text{A-8})$$

b-c 两相故障 (反向的)

$$V_{x1} = \frac{E_{a1}(Z_{s2} + 2Z_{L1} + Z_r)}{(Z_{s1} + Z_{s2} + 2Z_{L1})} \quad (\text{A-9})$$

$$V_{x2} = \frac{E_{a1}(Z_{s2} - Z_r)}{(Z_{s1} + Z_{s2} + 2Z_{L1})} \quad (\text{A-10})$$

b-c 两相接地故障 (正向的)

$$V_{x1} = \frac{E_{a1}(Z_{s0} + Z_{L0})(Z_{s2} + 2Z_{L1} - Z_r)}{M} + \frac{E_{a1}(Z_{s2} + Z_{L1})(Z_{L1} - Z_r)}{M} \quad (\text{A-11})$$

$$V_{x2} = \frac{E_{a1}(Z_{s0} + Z_{L0})(Z_{s2} + Z_r)}{M} \quad (\text{A-12})$$

$$V_{x0} = \frac{E_{a1}(Z_{s2} + Z_{L1})(Z_{s0} + nZ_r)}{M} \quad (\text{A-13})$$

b-c 两相接地故障 (反向的)

$$V_{x1} = \frac{E_{a1}(Z_{s0} + Z_{L0})(Z_{s2} + 2Z_{L1} + Z_r)}{M} + \frac{E_{a1}(Z_{s2} + Z_{L1})(Z_{L1} + Z_r)}{M} \quad (\text{A-14})$$

$$V_{x2} = \frac{E_{a1}(Z_{s0} + Z_{L0})(Z_{s2} - Z_r)}{M} \quad (A-15)$$

$$V_{x0} = \frac{E_{a1}(Z_{s2} + Z_{L1})(Z_{s0} - nZ_r)}{M} \quad (A-16)$$

式中, $M = (Z_{s0} + Z_{L0})(Z_{s2} + 2Z_{L1} + Z_{s1}) + (Z_{s1} + Z_{L1})(Z_{s2} + Z_{L1})$ 。

应当指出, 正向故障时的 Z_{s1} , Z_{s2} 等数值显然是反向故障时的 Z_{s1} , Z_{s2} 等数值不同的, 但是在图 2, 3 和 4 几何作图中却取为相等。

附录 3 阻抗平面上的继电器特性

要得到各种不同故障下阻抗平面上的始动特性, 只需将附录 2 中所列的适当 V_{x1} , V_{x2} 和 V_{x0} 代入方程式 (5)(7) 和 (9) 中某一相应的方程式。下面列出各种不同故障时的特性方程。

(i) a 相接地故障 (正向的)

$$Z_{L1} = \frac{Z_r - Z_{s2} - Z_{s0}}{(2+n)} + \frac{-(Z_{s2} + Z_r)}{(2+n)} a^2 p + \frac{-(Z_{s2} + Z_r)}{(2+n)} |1 - ap| \underline{0} \quad (A-17)$$

这里, $p = \frac{Z_{s0} + nZ_r}{(Z_{s2} + Z_r)}$; $n = Z_{L0}/Z_{L1}$ 。(见图 2-a)。

(ii) a 相接地故障 (反向的)

$$Z_{L1} = \frac{-(Z_r + Z_{s2} + Z_{s0})}{(2+n)} - \frac{(Z_{s2} - Z_r)}{(2+n)} a^2 p - \frac{(Z_{s2} - Z_r)}{(2+n)} |1 - ap| \underline{0} \quad (A-18)$$

这里, $p = (Z_{s0} - nZ_r)/(Z_{s2} - Z_r)$ 。(见图 2-b)。

(iii) b 相接地故障 (正向的)

$$Z_{L1} = \frac{(Z_r - Z_{s2} - Z_{s0})}{(2+n)} - \frac{(Z_{s2} + Z_r)}{(2+n)} ap - \frac{(Z_{s2} + Z_r)}{(2+n)} |1 - a^2 p| \underline{0} \quad (A-19)$$

(见图 2-a 所示)。

(iv) b 相接地故障 (反向的)

$$Z_{L1} = \frac{-(Z_r + Z_{s2} + Z_{s0})}{(2+n)} - \frac{(Z_{s2} - Z_r)}{(2+n)} ap - \frac{Z_{s2} - Z_r}{(2+n)} |1 - a^2 p| \underline{0} \quad (A-20)$$

(见图 2—b 所示)。

(V) c 相接地故障 (正向的)

$$Z_{L1} = \frac{(Z_r - Z_{s2} - Z_{s0})}{(2+n)} - \frac{(Z_{s2} + Z_r)}{(2+n)} p - \frac{(Z_{s2} + Z_r)}{(2+n)} |1-p| \underline{|\theta|} \quad (\text{A-21})$$

(见图 2—a 所示)。

(vi) c 相接地故障 (反向的)

$$Z_{L1} = -\frac{(Z_r + Z_{s2} + Z_{s0})}{(2+n)} - \frac{(Z_{s2} - Z_r)}{(2+n)} p - \frac{(Z_{s2} - Z_r)}{(2+n)} |1-p| \underline{|\theta|} \quad (\text{A-22})$$

(见图 2—b 所示)。

(vii) 两相故障 (正向的)

在方程式 (5), (7) 和 (9) 的任一方程式中, 令 $p=0$, 以 V_{x1} 和 V_{x2} 表示的始动特性方程将为

$$\frac{V_{x1}}{V_{x2}} = 1 \underline{|\theta|} \quad (\text{A-23})$$

将两相故障时的 V_{x1} 和 V_{x2} 代入上式, 即得

$$Z_{L1} = \frac{Z_r - Z_{s2}}{2} + \frac{Z_r + Z_{s2}}{2} \underline{|\theta|} \quad (\text{A-24})$$

(见图 3—a 所示)。

(viii) 两相故障 (反向的)

$$Z_{L1} = -\frac{(Z_r + Z_{s2})}{2} + \frac{Z_{s2} - Z_r}{2} \underline{|\theta|} \quad (\text{A-25})$$

(见图 3—b 所示)。

(ix) b—c 两相接地故障 (正向的)

$$Z_{L1} = \frac{(m+1)Z_r - mZ_{s2}}{(1+2m)} + \frac{m(Z_{s2} + Z_r)}{(1+2m)} a^2 p + \frac{m(Z_{s2} + Z_r)}{(1+2m)} |1-ap| \underline{|\theta|} \quad (\text{A-26})$$

(见图 4—a 所示, 取 $p=1 \underline{|\theta|}$, 式中 $m=(Z_{s0} + Z_{L0})/(Z_{s2} + Z_{L1})$)

$$p = (Z_{s0} + nZ_r)(Z_{s2} + Z_{L1}) / (Z_{s2} + Z_r)(Z_{s0} + Z_{L0})$$

(x) b—c 两相接地故障 (反向的)

$$Z_{L1} = \frac{-(m+1)Z_r - mZ_{s2}}{(1+2m)} + \frac{m(Z_{s2} - Z_r)}{(1+2m)} a^2 p + \frac{m(Z_{s2} - Z_r)}{(1+2m)} |1 - ap| \underline{0} \quad (\text{A-27})$$

(见图 4—b 所示, 取 $p = 1 \mid \underline{0^\circ}$)。式中 $p = (Z_{s0} - nZ_r)(Z_{s2} + Z_{L1}) / (Z_{s2} - Z_r)(Z_{s0} + Z_{L0})$ 。

(xi) c—a 两相接地故障 (正向的)

$$Z_{L1} = \frac{(m+1)Z_r - mZ_{s2}}{(1+2m)} + \frac{m(Z_{s2} + Z_r)}{(1+2m)} ap + \frac{m(Z_{s2} + Z_r)}{(1+2m)} |1 - a^2 p| \underline{0} \quad (\text{A-28})$$

(见图 4—a 所示, 取 $p = 1 \mid \underline{0^\circ}$)。

(xii) c—a 两相接地故障 (反向的)

$$Z_{L1} = \frac{-(m+1)Z_r - mZ_{s2}}{(1+2m)} + \frac{m(Z_{s2} - Z_r)}{(1+2m)} ap + \frac{m(Z_{s2} - Z_r)}{(1+2m)} |1 - a^2 p| \underline{0} \quad (\text{A-29})$$

(见图 4—b 所示, 取 $p = 1 \mid \underline{0^\circ}$)。

(xiii) a—b 两相接地故障 (正向的)

$$Z_{L1} = \frac{(m+1)Z_r - mZ_{s2}}{(1+2m)} + \frac{m(Z_{s2} + Z_r)}{(1+2m)} p + \frac{m(Z_{s2} + Z_r)}{(1+2m)} |1 - p| \underline{0} \quad (\text{A-30})$$

(xiv) a—b 两相接地故障 (反向的)

$$Z_{L1} = \frac{-(m+1)Z_r - mZ_{s2}}{(1+2m)} + \frac{m(Z_{s2} - Z_r)}{(1+2m)} p + \frac{m(Z_{s2} - Z_r)}{(1+2m)} |1 - p| \underline{0} \quad (\text{A-31})$$

在 $p = 1 \mid \underline{0^\circ}$ 时, (A—30) 和 (A—31) 所代表的园都缩成为一点, 因为其半径缩成为零。

所看到的另一重要之处是, p 的数值只有在两相接地故障时才与保护段内的故障位置有关。因而, 继电器的园特性是按被保护线路上不同故障位置而变的。对所有其他并联故障来说, 则不会出现这种情况, 因为 p 值与沿线的故障位置有关。

可以证明, 对 p , Z_{s2} , Z_{s0} 和 n 的实际数值来说, 各种不同故障的特性园或绕过原点或通过原点, 表示对很接近的故障的动作。同时还可以证明, 继电器是完全有方向性的。