

# 用相位重合原理构成的多相接地距离继电器

译自 I. E. E. Trans. VOL PAS-92 NO.2 1973

华中工学院电机系发配电教研组

吕继绍译 刘寿鹏校

摘要: 本文叙述一种用于多相接地故障继电器的新方法, 它是用选择几个输入量的简单重合原理来实现的。本文还讨论了它的一般工作原理、实际设计和运行效果。此种继电器对于所有单相接地故障和在同一范围内的每一种两相接地故障都能正确动作。对于两相短路和三相短路, 这种继电器是全然不动作的。像其他已报导过的同类型的继电器一样, 它有对输电线路平衡过载和功率振荡反应不灵敏的优越性。除此以外, 它对电弧故障有较大的容许误差, 以及暂态超越小, 和不易由于其他寄生信号引起不正确动作。此继电器也具有完全的方向性。

## 符 号 表

- $Q_1, Q_2, \dots, Q_n$ ——送至一个比较电路的不同输入量,  
 $a, b, c$ ——三相,  
 $V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}$ ——继电器安装地点的电压互感器付方的相(对地)电压,  
 $V_{fa}, V_{fb}, V_{fc}$ ——故障点的相(对地)电压,  
 $E_a, E_b, E_c$ ——电源的相(对地)电压,  
 $V_x, V_y, V_z$ ——继电器安装地点补偿的相(对地)电压,  
 $I_a, I_b, I_c$ ——归算到电流互感器付方的相电流,  
 $Z_L, Z_s, Z_r$ ——归算到继电器侧的线路阻抗、电源阻抗和模拟阻抗,  
 $1, 2, 0$ ——正序、负序和零序分量。当它们附于其他量后面时, 它们就代表那些量的相应序量,  
 $n$ —— $Z_{L0}/Z_{L1}$ ,  
 $K$ —— $n-1$ ,  
 $P$ —— $V_{x0}/V_{x2}$ ,  
 $m$ —— $(Z_{s0} + Z_{L0}) / (Z_{s2} + Z_{L1})$ ,  
 $\alpha$ ——两输入量 $Q_1$ 和 $Q_2$ 间的相位角,  
 $\beta_1, \beta_2$ ——相位比较的角度范围。

# 1 序 言

到目前为止,已报导过的用于接地故障保护的多相距离继电器,都工作于下列原理之一:(1)比较故障点的相序电压的幅值(文献1、2), (2)比较故障点二个补偿的相(对地)电压的相位(文献3), (3)测定三相(对地)的补偿电压的相序(文献4)。最早运用第一种原理的接地阻抗继电器是由Rao设计的(文献1)。它的缺点是对单相接地和两相接地故障有不同的保护范围。此缺点可在其量测回路装设切换装置来补救,这样将使继电器稍许复杂些。其后,Rockfeller提出一种非常简单的方案(文献2)。此方案对单相接地故障具有非常好的特性,但是对于两相接地故障,由于可能误动作,因此是无效的。所列第二种类型的原理由Bhattacharya等人提出(文献3),它是将故障点三个相(对地)的补偿电压中的任二个进行 $90^\circ$ 相位比较,它对三相中的二种单相接地故障给予了良好的特性。但对于发生在第三相与地之间的故障,这种继电器则仍然是无效的。这就需要三个这样的比较器和一个简单的逻辑回路,以使任一相对地故障时获得同样的特性。用相序检测原理制成的继电器原理简单(文献4),但单相接地时其动作区狭窄。这就使这种继电器在靠近平衡点发生电弧故障时失去作用。而且其比较器是由脉冲激励,因而这种继电器对寄生信号是较灵敏的。

本文介绍的新型简单的多相接地距离继电器是根据重合原理构成。它在保护方向发生所有单相和两相接地故障时都将正确动作,但对两相短路和三相短路则仍然不起作用。反方向故障时,此继电器不会动作,而对于带电弧的故障具有较大的容许误差。

## 2 一种根据重合原理组成的多输入量比较器

到现在为止,两输入量或多输入量的相位比较器不是对称的就是不对称的。在一般情况下,当两个正弦变量 $Q_1$ 和 $Q_2$ 间的相位角 $\alpha$ 满足条件  $-\beta_2 \leq \alpha \leq \beta_1$  (1)时,不对称的两输入量相位比较器即会使继电器动作。当 $Q_1$ 超前 $Q_2$ 时,相位角 $\alpha$ 看作为正; $Q_1$ 滞后 $Q_2$ 时, $\alpha$ 为负。角 $\beta_1$ 和 $\beta_2$ 对应于相位比较的角度范围(图1)。对于对称比较器, $\beta_1 = \beta_2 = \beta$ 。到现在为止,在大多数距离保护的应用中, $\beta_1$ 和 $\beta_2$ 都调节为 $90^\circ$ ,这种相位比较器被称为 $90^\circ$ 相位比较器。当 $\beta_1$ 和 $\beta_2$ 分别调节为 $0^\circ$ 和 $180^\circ$ 时,它被称为正弦比较器。按重合原理工作的任何相位比较器,只要其输入量保持同样的极性就会有输出。应该这样来理解,两输入量的重合比较器没有死区,这是由于没有明显的抑制。但是,加入不同的回路,可使一个重合比较器当作一个 $90^\circ$ 比较器或不对称的相位比较器用。

多输入量的对称或不对称相位比较器的作用原理和合成跳闸回路已有文章说明(文献5)。虽然两输入量的重合比较器没有不动作区,但当所有输入矢量都在 $0^\circ$ 到 $180^\circ$ 的范围以内时,多输入量的重合比较器(为了使比较器做成对称的或不对称的,无需加入任何特殊的电路)就会产生输出,因

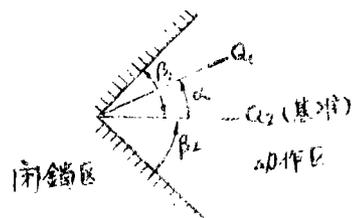


图1 相位比较器的动作区

此，现在采用的三输入量重合比较器，当其三个输入量为同极性时，将给出一个输出，而且显然它具有 $180^\circ$ 以内的动作区。用一个三输入量重合比较器获得的综合跳闸特性，可由三组两输入量的正弦比较器采用特定的联接法来获得，在附录 I 中有说明。

### 3 输入量的选择

补偿的故障点三个相（对地）电压被选为重合比较器的三个输入量。发生任何不带电弧电阻的短路时，故障点a相（对地）的电压可由下式表示：

$$V_{fa} = V_{ra} - I_a Z_L \quad (\text{共同压降}) \quad (2)$$

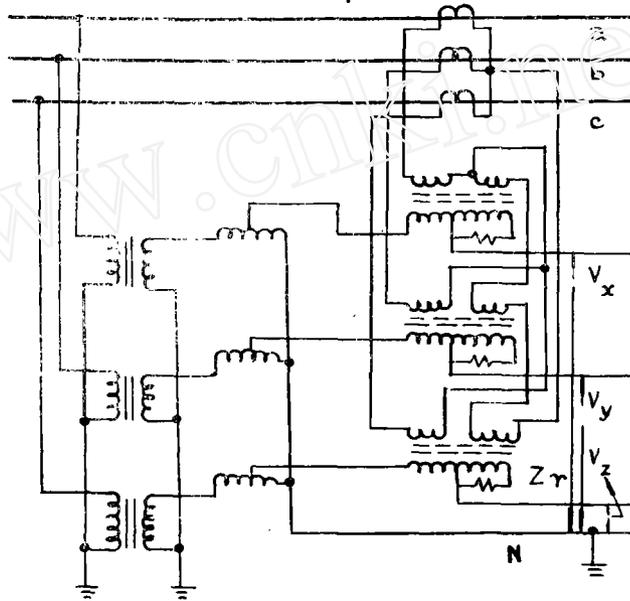


图2 继电器的量测回路

现将电流  $I_k$  和阻抗  $Z_L$  变换为它们的相序分量，且假定线路的  $Z_{L1} = Z_{L2}$ ，

$$\begin{aligned} V_{fa} &= V_{ra} - I_{a1} Z_{L1} - I_{c2} Z_{L2} - I_{a0} Z_{L0} \\ &= V_{ra} - (I_a + K I_{a0}) Z_{L1} \end{aligned} \quad (3)$$

因而，继电器安装处三个补偿的相（对地）电压应为：

$$\left. \begin{aligned} V_x &= V_{ra} - (I_a + K I_{a0}) Z_r = V_{x1} + V_{x2} + V_{x0} \\ V_y &= V_{rb} - (I_b + K I_{b0}) Z_r = a^2 V_{x1} + a V_{x2} + V_{x0} \\ V_z &= V_{rc} - (I_c + K I_{c0}) Z_r = a V_{x1} + a^2 V_{x2} + V_{x0} \end{aligned} \right\} (4)$$

式中  $Z_{L1} = Z_r$  为整定的模拟阻抗，而且

$$\begin{aligned} V_{x1} &= V_{ra1} - I_{a1} Z_r \\ V_{x2} &= V_{ra2} - I_{a2} Z_r \\ V_{x0} &= V_{ra0} - I_{a0} n Z_r \end{aligned}$$

图2示出了获得  $V_x$ 、 $V_y$ 、 $V_z$  的线路图。

## 4 各种情况下继电器运行情况的分析

重合比较器的运行情况由三个输入量的相互相位关系而定。因此，在线路上不同位置发生各种类型故障时，输入量相位的简略相位图对预测继电器是否动作是有用的。

### 4.1 正常运行情况

图3(a)和3(b)分别示出了电力系统无载和平衡负载时，输入量的相位关系。三个输入量的相位关系永远不会超过 $180^\circ$ 的宽度，因而在这种情况下，继电器永远不会动作。因此显然在输电线路发生功率振荡时，这种继电器也不会误动作。

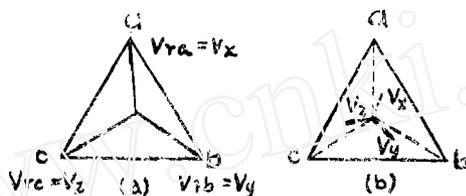


图3 输入量间的相位关系图  
(a) 无载情况，(b) 平衡负载情况。

### 4.2 单相接地故障

图4示出了被保护线路上不同位置发生a相接地故障时的相位关系图。同样，对于b相或c相接地故障， $V_y$ 或 $V_z$ 将分别按故障点的位置和电阻来改变其位置。稍许观察一下就可看到，在a相接地故障时，只要 $V_x$ 落后 $V_y$ 的相角 $Q_1 < 180^\circ$ 或超前 $V_z$ 的相角 $Q_2 < 180^\circ$ ，继电器即将动作。在b相或c相接地时也有相似的界限。对于在继电器后面（反方向）故障时，故障相的补偿电压永远不会进入规定的极限区，这就清楚地指出了继电器具有方向性。

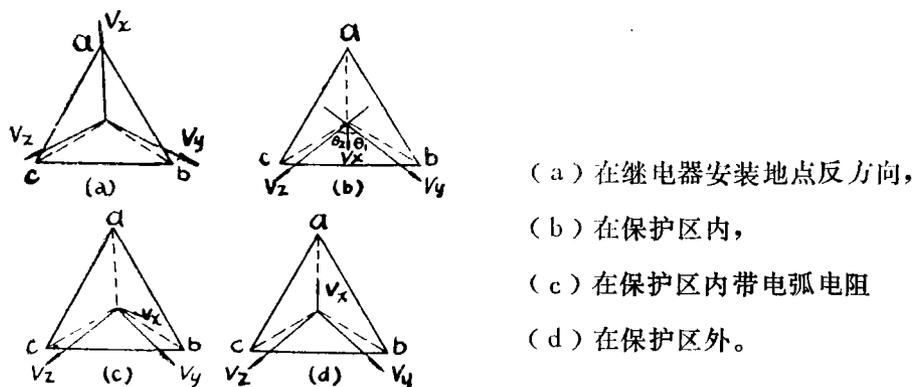


图4 单相接地故障时，输入量的相位图：

### 4.3 两相相间短路

在两相相间短路时，三个输入量中只有两个会由于故障电流而改变相位。图5示出了在线路上的不同位置发生bc两相相间短路时，三个输入量的不同相位关系图。从图中可明显看到三个输入量间的相位永远不会达到 $180^\circ$ ，因此，两相相间短路时，重合比较器将不会有任何输出。

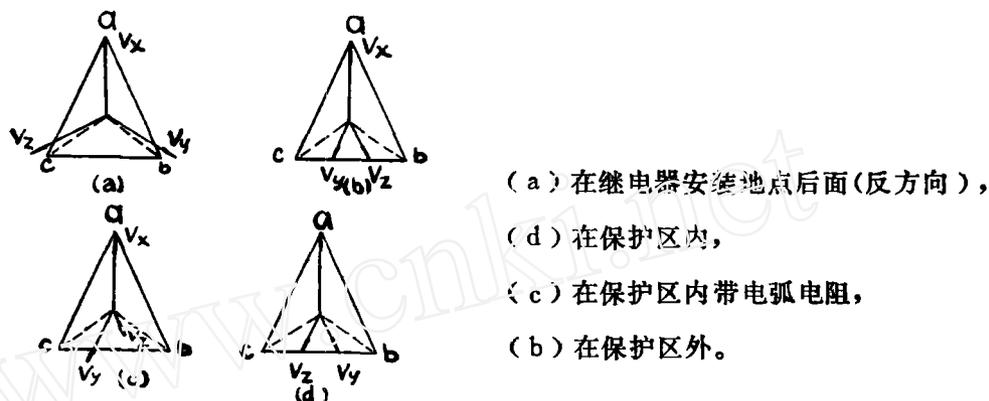


图5 发生两相相间短路时，输入量的相位图：

### 4.4 两相接地故障

图6示出了在输电线路不同位置发生bc两相接地故障时输入量的相位关系。在此情况，当故障点位置改变时， $V_x$ 的位置可以被认为接近不变，而主要的相位移发生在 $V_y$ 和 $V_z$ 。加之， $V_y$ 和 $V_z$ 彼此间的相互位置仍然可以看作和对称故障一样( $I_b = I_c$ )。因而其动作角的极限将规定如下。因为三个矢量都在 $180^\circ$ 的范围之内， $V_y$ 应超前 $V_x$ 角 $\theta < 180^\circ$ 或滞后 $V_x$ 角 $\theta < (180^\circ - \theta_s)$ 而 $V_z$ 应滞后 $V_x$ 角 $\theta < 180^\circ$ 或超前 $V_x$ 角 $\theta < (180^\circ - \theta_s)$ ，在所有情况下考虑 $V_y$ 超前 $V_z$ 以 $\theta_s$ 。对于ca两相接地和ab两相接地故障，其动作角的极限，可用相似的方法来确定。对于反方向故障， $V_y$ 和 $V_z$ 仍然在上述界限以外，因此，重合比较器将不动作。所以此继电器也有方向性。

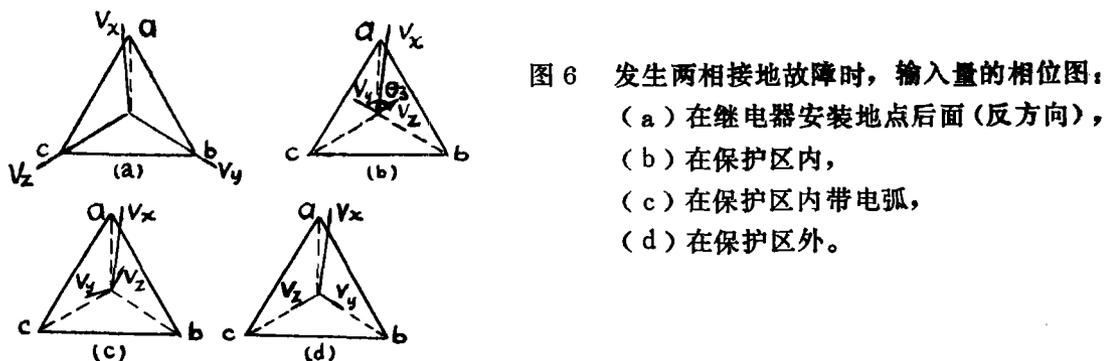


图6 发生两相接地故障时，输入量的相位图：

#### 4.5 三相短路

如果发生三相短路，所有输入量的相位变化都相同。所以和平衡负载情况一样，三个输入量不会重合。因而，在此情况下，继电器不会动作。

#### 4.6 全特性

在单相接地和两相接地故障时，继电器的平衡点特性已经根据附录 I 的等效正弦比较器原理在附录 III 中导出，而且用阴影线描绘在图 7 和图 8 上。

在两种情况下的正方向故障特性曲线都穿过继电器整定范围  $Z_r$ ，但包含有阻抗平面的第三和第四象限的一大块面积。从这些图上可能得到继电器没有方向性的结论，但这个结论是错误的，因为其特性方程只假定在动作方向故障，而不适用于反方向故障。第二和第三象限本来就是理论性的，因为在此情况下，线路阻抗认为是负的，实际上由于不同相供电，存在一个小的负电阻是可能的。对于使用串联电容时，第四象限是恰当的。因此，只是第一象限的特性是较为重要。对于反方向故障，其特性方程则全然不同，它示于附录 III，且其特性全部在第三和第四象限内。两相接地故障的特性和故障点的位置有关，特别是在  $Z_{s1}$  和  $Z_{L1}$  的值可比时。实际测出的曲线表明，非常靠近继电器安装地点故障时，继电器的特性会扩大且包括补偿阻抗  $Z_r$  端点。而且在整定动作区外故障时，其特性又会缩小，且会离开补偿阻抗  $Z_r$  的端点。但是这些都不应该误解为继电器的动作区扩大或缩小，就像故障一移至整定区，继电器就自行调整。在另一方面，对保护在平衡点上的电弧故障，它是有帮助的，好像其特性扩大了一点点。

在两种情况下的正方向故障特性曲线都穿过继电器整定范围  $Z_r$ ，但包含有阻抗平面的第三和第四象限的一大块面积。从这些图上可能得到继电器没有方向性的结论，但这个结论是错误的，因为其特性方程只假定在动作方向故障，而不适用于反方向故障。第二和第三象限本来就是理论性的，因为在此情况下，线路阻抗认为是负的，实际上由于不同相供电，存在一个小的负电阻是可能的。对于使用串联电容时，第四象限是恰当的。因此，只是第一象限的特性是较为重要。对于反方向故障，其特性方程则全然不同，它示于附录 III，且其特性全部在第三和第四象限内。两相接地故障的特性和故障点的位置有关，特别是在  $Z_{s1}$  和  $Z_{L1}$  的值可比时。实际测出的曲线表明，非常靠近继电器安装地点故障时，继电器的特性会扩大且包括补偿阻抗  $Z_r$  端点。而且在整定动作区外故障时，其特性又会缩小，且会离开补偿阻抗  $Z_r$  的端点。但是这些都不应该误解为继电器的动作区扩大或缩小，就像故障一移至整定区，继电器就自行调整。在另一方面，对保护在平衡点上的电弧故障，它是有帮助的，好像其特性扩大了一点点。

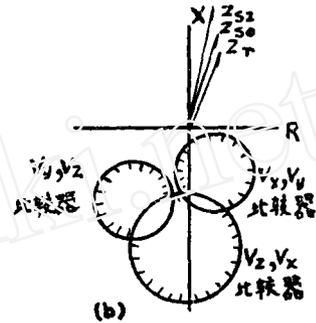
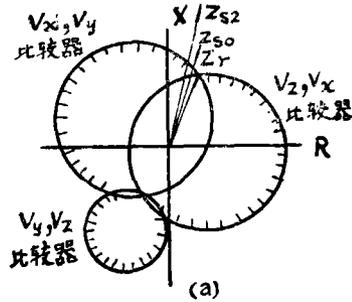


图 7 单相接地故障时，继电器在阻抗平面上的特性：  
(a) 正方向故障，  
(b) 反方向故障。

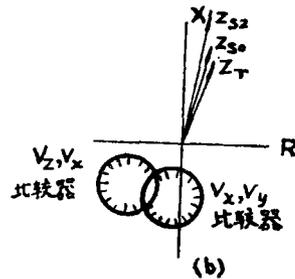
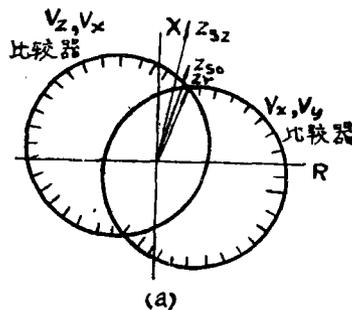


图 8 两相接地故障时，继电器在阻抗平面上的特性：  
(a) 正方向故障，  
(b) 反方向故障。

### 5 实际的继电器方案

双重比较方法被用以研究三输入量的相位重合比较器。实际结线的方框图示于图 9(a) 由量测回路来的三个输入量在供电给重合电路之前的部份被省略。特地用一个正重合和一个

负重合组成二个分开的重合回路以代替一个推挽式单重合回路，因为后者的输入量每次过零点的附近都存在固有死区。三个施密特触发器用特殊的方式联接在量测回路的后面，以获得  $V_x$ 、 $V_y$  和  $V_z$  各自的明显的零位交点，以便使用一般的逻辑回路。当量测回路没有输入信号或输入信号电压为正半周时，每一施密特触发器的输出晶体管都接通（导通）。只有当输入信号电压为负半周时，它们才断开（截止）。即使二个半周的持续时间不一样，这也是有效的。第一个与门连于三个施密特触发器的输出晶体管。按照常规逻辑，当所有三个输入都存在（即导通）时，与门动作，所以这就表示三个输入的正周期重合。非或门也连于三个施密特触发器的输出晶体管。按照同样的逻辑，只有当所有输入都截止时，非或门才动作。因此，它的动作表示三个输入的负周期重合。此回路示于图 9 (b)。脉冲展宽用的是单稳态电路。它们在准稳态时动作约需 15 毫秒。利用后面一个与门回路使其进行二重比较。用它以防止在一次电流回路和（或）电压回路的暂态过程中，由于不对称的电流波引起的超越。

附带要注意的是，当由于线路两端断开，量测回路输出端没有信号出现时，与回路是正重合而给出连续的输出。连于它的脉冲展宽回路亦保持同样的连续输出。但不会给出有效的跳闸信号，因为非或门回路同与之联在一起的脉冲展宽回路现在仍然保持不动状态。甚至在任一端的开关闭合之后，这种情况仍保持不变，除非表明在那附近的接地故障的三个补偿的相（对地）电压输入重合是负的。在正常的系统中，两个重合回路都保持不动作的状态，就像没有发生这种重合一样。

## 6 设计和性能

为了得到电流补偿，要使用带气隙的三线圈变压器。主电流互感器的次级线电流和零序电流在每个变压器中都同相的电压互感器的次级电压偶合在一起。试验时  $K$  值调整为 1.5，因而  $n$  的实用值为 2.5。带气隙的变压器次级有中间抽头。模拟阻抗被跨接在次级线圈的一半上。它的大小和相角都可自由调整。其相角可作四级调节：70°、75°、80° 和 85°，而其大小则近似地可在 0.8 到 1.5 欧之间变化。主电压互感器的次级线圈接到三个自耦变压器上，用以细调继电器安装点的电压。

采用与施密特触发器并联的二极管限幅器，以保持三个输入到比较器的电压不超过 4 伏的规定极限。实际继电器的半导体电路由 12 伏直流电源操作。为了运行可靠，二极管逻辑门被用于带级联晶体管放大级的重合比较器。为了确定继电器的特性，收集了一条 132 仟伏输电线路的典型数据。该线路采用钢芯铝绞线（A.C.S.R），导线具有 7 股钢芯和 54 股铝线，每股绞线的直径为 0.11 吋，线路的几何均距（GMD）为 10 呎。它选用了所设计的继电器

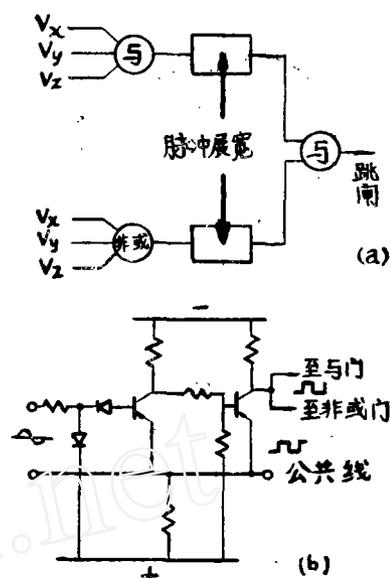


图 9 (a) 继电器的方框图，  
(b) 连接在比较器前面的削波和施密特触发电路。

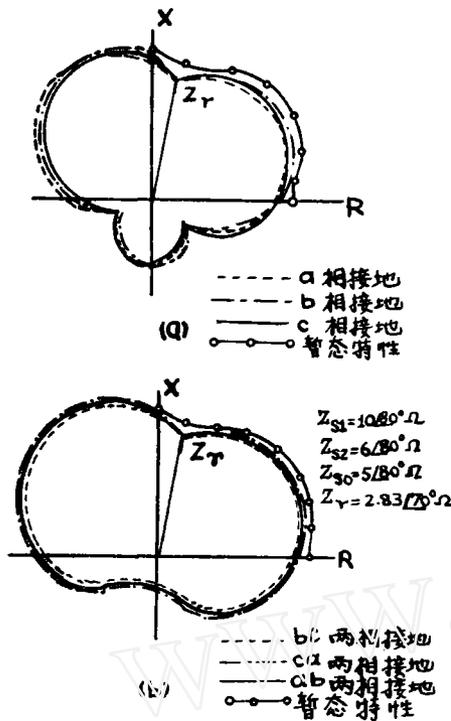


图10 不同故障的实验极化特性曲线：  
(a) 单相接地故障，  
(b) 两相接地故障。

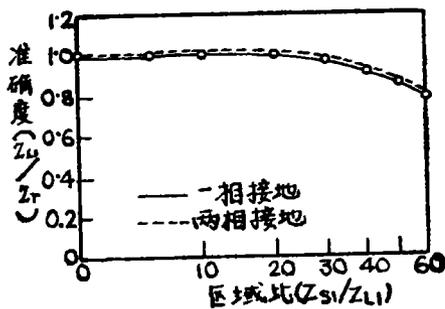


图11 (a) 不同故障时区域比 ( $Z_{s1}/Z_{L1}$ ) 对准确度 ( $Z_{L1}/Z_r$ ) 的关系曲线

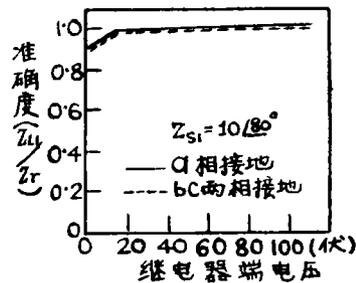


图11 (b) 不同故障时继电器端电压对准确度的关系曲线。

态和暂态电流，同时保持电压互感器付方的电压和第2项试验的情况一样，继电器完全稳定。

只有当阻抗整定在第一象限时，才获得动态特性。图11(a)的区域比( $Z_{s1}/Z_{L1}$ )对准确度的特性曲线指出，电源的阻抗从零开始到相当高的数值(150欧)，继电器的准确度都是满意的。图12指出，合闸角靠近 $0^\circ$ 和 $180^\circ$ 时，暂态超越是比较大的，但显然由于采用双重比

器作为保护。线路阻抗角接近 $70^\circ$ ，50英里长的正序阻抗(归算到一次侧)经计算为37.7欧。 $Z_r$ 的对应值为2.83欧，电流互感器的变比为500/5，电压互感器的变比为132千伏/110伏。

继电器做了一系列的试验，其结果如下：

1、发生所有单相接地和两相接地故障时，继电器在阻抗平面上的静态和动态极化特性(示于图10a和b)。

2、所有单相接地和两相接地故障时，区域比( $Z_{s1}/Z_{L1}$ )对准确度( $Z_{L1}/Z_r$ )的关系曲线示于图11(a)。同样，a相接地和bc两相接地故障时，准确度对继电器端电压的关系曲线示于图11(b)。

3、用低功率因数的感性电流和容性电流激励和去激励继电器作稳定试验。在此两种情况下，继电器都是稳定的。

4、暂态超越对合闸角的关系曲线(示于图12)。

5、最大的继电器动作时间和故障点至继电器安装地点距离的关系曲线(示于图13)。

6、继电器还做了反方向故障试验，试验方法是在带气隙的变压器通以和正常电流反向的稳

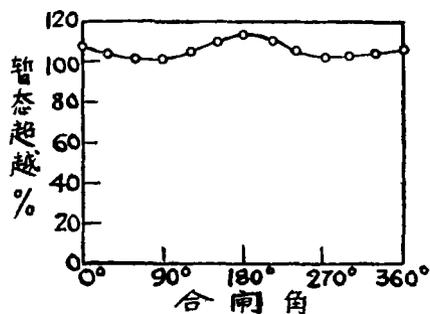


图12 故障点电压的合闸角对暂态超越 %的关系曲线。

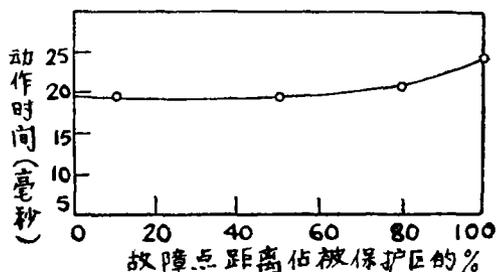


图13 故障点的距离对继电器动作时间的关系曲线。

较，它是可以被控制的。继电器的动作时间，对整个保护区内的故障基本上是常数。此时间是在线路不同地点发生永久性短路，从末级与门回路在两个连续的跳闸讯号之间测得，很明显，测到的是继电器的最大动作时间。故障类型对测出的动作时间没有表现出明显的影响。除跳闸装置外，静态继电器本身的直流消耗约0.2瓦。

## 7 结 论

这种继电器的工作原理和性能清楚地证实了，对于输电线路接地故障的继电器，采用多输入量相位比较的重合比较器是适宜的。

(1) 本文揭示了一种利用重合原理的多相接地距离继电器，它对所有单相接地和两相接地故障都能正确动作，但在两相和三相短路时不会动作。

(2) 一种由两输入量比较器组成而发展的多输入量比较器的精确等效电路，有助于预示在发生不同类型故障时继电器的稳态特性。

(3) 和有关文献(文献3)比较，本装置的比较器和 $90^\circ$ 相位移回路的数目已大量减少，它是以两相短路时不动作为代价。

(4) 当故障类型改变时，本方案都不需要任何用于跳闸或闭锁的切换装置。量测回路也简单，而且同一补偿阻抗可始终保持在回路中。

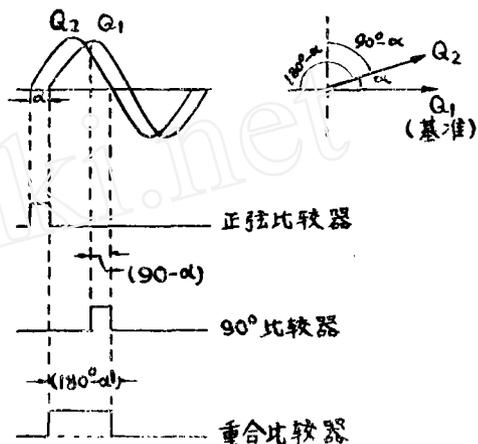
(5) 这里应用了瞬时相位比较原理。但不需要电平检测器，由于在重合的持续时间内没有干扰的影响。这就完全消除了由于电平检测器或相位比较器( $90^\circ$ 相位比较器必需的)维护不正确而使继电器产生超越的可能性。以相序检测为基础的继电器(文献4)需要脉冲形成回路。但本线路完全消除了脉冲装置，所以继电器很少由于寄生电压信号引起不正确动作。

(6) 如同其他多相继电器一样，这种继电器对所有被保护的故障都有同样的保护区，且是十分稳定。对于反方向故障和线路上的功率振荡它不会动作。它对电弧电阻的允许值是很大的。

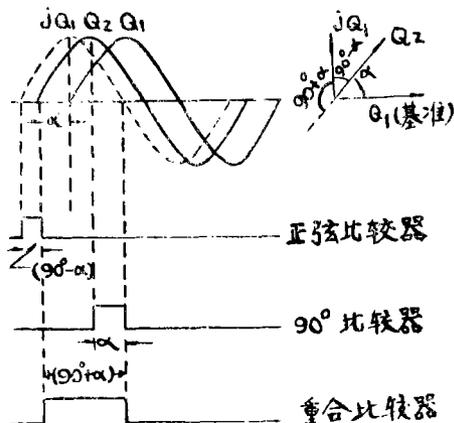
正在研究使本方案能反应两相和三相短路，而又不失其简易性。

多输入量重合比较器的等效两输入量方案

示于图A-1的两个矢量 $Q_1$ 和 $Q_2$ 是相位比较器的两输入量。从而一个电磁式正弦比较器（即感应杯比较器）产生一个 $Q_1 Q_2 \sin\alpha$ 的转矩输出。相似地，一个电磁式 $90^\circ$ 比较器产生一个 $Q_1 Q_2 \cos\alpha$ 的转矩输出。虽然实际上，正弦比较器产生的输出持续 $\alpha$ ， $90^\circ$ 比较器产生的输出持续 $90^\circ - \alpha$ 和重合比较器产生的输出持续 $180^\circ - \alpha$ ，可是在静态比较器中，它们都保持同一名称。加于前两种比较器的限制区如下。对于正弦比较器，它永远是从超前矢量开始量测，它的动作限制区变为 $0^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ 。同样，对于 $90^\circ$ 比较器，它的动作限制区是 $-90^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ 。但对于重合比较器就没有这样的限制区，因为除了 $\alpha = 180^\circ$ 以外，它永远存在着两个输入量的重合。附带地从图A-2可以看到，如果一个输入量转 $90^\circ$ ，即以 $jQ_1$ 和 $Q_2$ 作为两个输入量，则正弦比较器的输出将持续 $(90^\circ - \alpha)$ ，而同时 $90^\circ$ 比较器的输出将持续 $\alpha^\circ$ 。于是可以说，一个以 $Q_1$ 和 $Q_2$ 作为输入量的正弦比较器，与一个以 $jQ_1$ 和 $Q_2$ 作为输入量的 $90^\circ$ 比较器将产生同样的特性。再者，在同样的输入量的情况下，一个重合比较器产生的输出持续角，是正弦比较器产生的输出持续角的补角。



图A-1.以 $Q_1$ 和 $Q_2$ 为输入量的各种比较器动作持续时间的波形图解



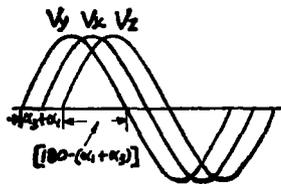
图A-2.以 $jQ_1$ 和 $Q_2$ 为输入量的各种比较器动作持续时间的波形图解

多输入量重合比较器的分析

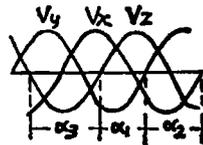
从三个正弦比较器可得到一组等效的两输入量检测装置。其法如下：

输入量	动作区
$V_x, V_z$	$V_x$ 超前 $V_z$ 角 $\alpha_1$ 其中 $0 \leq \alpha_1 \leq 180^\circ$
$V_z, V_y$	$V_z$ 超前 $V_y$ 角 $\alpha_2$ 其中 $0 \leq \alpha_2 \leq 180^\circ$
$V_y, V_x$	$V_y$ 超前 $V_x$ 角 $\alpha_3$ 其中 $0 \leq \alpha_3 \leq 180^\circ$

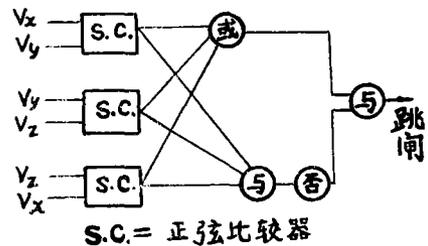
当在被保护区内发生a相接地和bc两相接地故障时，其电压波形图示于图A-3。从动作限制区可以看到， $V_z V_y$ 比较器不能动作。而其他两个比较器则在总持续角 $(\alpha_1 + \alpha_3)$ 范围内动作。另一方面，重合比较器将产生持续角 $[180^\circ - (\alpha_1 + \alpha_3)]$ 的输出。当a相大电弧接地故障时，只有 $V_x V_z$ 正弦比较器在持续角 $\alpha_1$ 期间产生输出。重合比较器的输出将包括 $(180^\circ - \alpha_1)$ 的区域。对于其他相接地故障的类似分析表明，重合比较器的持续输出角是一个正弦比较器的持续输出角或两个正弦比较器持续输出角之和的补角。在两相短路的情况下，从图A-4可清楚地看到重合比较器没有输出，和所有上述三个正弦比较器都有输出，其持续角的和为 $360^\circ$ 。如此，可以推断，当所有三个正弦比较器都有输出时，重合比较器就没有输出。再者，在正常情况下，无论是重合比较器还是假定的正弦比较器都不产生任何输出。那么，一个三输入量的重合比较器可以看作如同一个三正弦比较器组，当任一个或两个正弦比较器动作时，它就动作；而当所有正弦比较器都动作或没有一个动作时，它就保持不动。从上面的讨论，就跳闸特性来说，一个三输入量的重合比较器的等效回路可以推演如图A-5所示。只有考虑到两个回路的全部输出特性，其等效性才是有效的，因为它们都是以两组比较器之间的补角关系为基础的。为达到完全的等效性，必须假定正弦比较器的输出应保持至少一个周波，而且在跳闸后还有输出。另外，与门和或门应作为描述逻辑相乘和联合特性的数学函数，以分别代替物理门电路。



图A-3、a相接地和bc相接地故障时的波形图



图A-4、两相短路时的波形图



图A-5、利用正弦比较器的三输入量重合比较器的等效回路

## 附录 II

### 在不同故障情况下，故障点的相序电压值

以a相为参考相，在故障情况下 $V_{x1}$ 和 $V_{x2}$ 的值用公式表示如下：  
单相接地故障（正方向）

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

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

单相接地故障（反方向）

$$V_{x1} = \frac{E_{a1}(Z_{s2} + 2Z_{L1} + Z_r + Z_{s0} + Z_{L0})}{(Z_{s1} + Z_{s2} + Z_{s0}) + (2Z_{L1} + Z_{L0})} \quad (A-3)$$

$$V_{x2} = \frac{-E_{a1}(Z_{s2} - Z_r)}{(Z_{s1} + Z_{s2} + Z_{s0}) + (2Z_{L1} + Z_{L0})} \quad (A-4)$$

两相接地故障（正方向）

$$V_{x1} = \frac{E_{a1}(Z_{s0} + Z_{L0})(Z_{s2} + 2Z_{L1} - Z_r)}{M} + \frac{E_{a1}(Z_{s2} + Z_{L1})(Z_{L1} - Z_r)}{M} \quad (A-5)$$

$$V_{x2} = \frac{E_{a1}(Z_{s0} + Z_{L0})(Z_{s2} + Z_r)}{M} \quad (A-6)$$

两相接地故障（反方向）

$$V_{x1} = \frac{E_{a1}(Z_{s0} + Z_{L0})(Z_{s2} + 2Z_{L1} + Z_r)}{M} + \frac{E_{a1}(Z_{s2} + Z_{L1})(Z_{L1} + Z_r)}{M} \quad (A-7)$$

$$V_{x2} = \frac{E_{a1}(Z_{s0} + Z_{L0})(Z_{a2} - Z_r)}{M} \quad (A-8)$$

其中  $M = (Z_{s0} + Z_{L0})(Z_{s2} + 2Z_{L1} + Z_{s1}) + (Z_{s1} + Z_{L1})(Z_{s2} + Z_{L1})$

## 附 录 Ⅲ

### 继电器的平衡点特性

在文献 3 中，当  $jV_x$  和  $V_y$  供电给  $90^\circ$  相位比较器时，借助于两输入量比较器的综合原理，可推演出三个比较器的方程式。从示于附录 1 的推论中，这是很明显的，如果  $V_x$  和  $V_y$  供电给正弦比较器，同样的一组方程式将是适用的。取 a 相为参考相（abc 相序），被推演的比较器方程式是：

对于 a 相和 bc 相接地故障：

$$V_{x1}/V_{x2} = a^2 p + |1 - ap| \angle \theta \quad (A-9)$$

对于 b 相和 ca 相接地故障：

$$V_{x1}/V_{x2} = ap + |1 - a^2 p| \angle \theta \quad (A-10)$$

对于 c 相和 ab 相接地故障：

$$V_{x1}/V_{x2} = P + |1 - P| \angle \theta \quad (A-11)$$

其中  $a = 1 \angle 120^\circ$  和  $a^2 = 1 \angle 240^\circ$ 。所有这些轨迹自然都是园。

对于  $(V_y, V_z)$  和  $(V_z, V_x)$  正弦比较器，这三个方程式将是通用的，但要分别以 b

相和c相作为参考相。为了保持a相作为三者共同的参考相， $V_{x1}$ 、 $V_{x2}$ 和P都必须进行适当的相位移，以获得修改后的方程式，由于相位移不是a就是 $a^2$ ，比较器的特性依然是同样的方程式，但对于不同的故障要按下表选用。

对于不同故障各种正弦比较器的特性方程式

故障类型	方程式A-9	方程式A-10	方程式A-11
a相和bc相接地故障	$(V_x, V_y)$ 正弦比较器	$(V_z, V_x)$ 正弦比较器	$(V_y, V_z)$ 正弦比较器
b相和ca相接地故障	$(V_y, V_z)$ 正弦比较器	$(V_x, V_y)$ 正弦比较器	$(V_z, V_x)$ 正弦比较器
c相和ab相接地故障	$(V_z, V_x)$ 正弦比较器	$(V_y, V_z)$ 正弦比较器	$(V_x, V_y)$ 正弦比较器

发生单相接地和两相接地两种故障时，上述三个正弦比较器至多只有两个会同时动作。因此，全部跳闸范围将由方程式A-9、A-10和A-11描绘的三个圆所组成，它们的交点通常在零点。所以任何接地故障的全特性都是相同的。这种结论对于两相接地也是适合的。

### 单相接地故障

当发生a相接地故障时， $(V_x, V_y)$ 正弦比较器或 $(V_z, V_x)$ 正弦比较器将动作，或两者均将动作。而 $(V_y, V_z)$ 正弦比较器将保持不动。当反方向故障时，则没有一个正弦比较器会动作。代入附录II中 $V_{x1}$ 、 $V_{x2}$ 和 $V_{x0}$ 的值，特性变为

$(V_x, V_y)$ 正弦比较器——

正向故障：

$$Z_{L1} = \frac{Z_r - Z_{s2} - Z_{s0}}{2+n} - \frac{Z_{s2} + Z_r}{2+n} \cdot a^2 p - \frac{Z_{s2} + Z_r}{2+n} |1 - ap| \angle \theta \quad (A-12)$$

反向故障：

$$Z_{L1} = -\frac{Z_r + Z_{s2} + Z_{s0}}{2+n} - \frac{Z_{s2} - Z_r}{2+n} \cdot a^2 p - \frac{Z_{s2} - Z_r}{2+n} |1 - ap| \angle \theta \quad (A-13)$$

$(V_y, V_z)$ 正弦比较器——

正向故障：

$$Z_{L1} = \frac{Z_r - Z_{s2} - Z_{s0}}{2+n} - \frac{Z_{s2} + Z_r}{2+n} \cdot P - \frac{Z_{s2} + Z_r}{2+n} |1 - P| \angle \theta \quad (A-14)$$

反向故障：

$$Z_{L1} = -\frac{Z_r + Z_{s2} + Z_{s0}}{2+n} - \frac{Z_{s2} - Z_r}{2+n} \cdot P - \frac{Z_{s2} - Z_r}{2+n} |1 - P| \angle \theta \quad (A-15)$$

$(V_z, V_x)$ 正弦比较器——

正向故障：

$$Z_{L1} = \frac{Z_r - Z_{s2} - Z_{s0}}{2+n} - \frac{Z_{s2} + Z_r}{2+n} \cdot a p - \frac{Z_{s2} + Z_r}{2+n} |1 - a^2 p| \angle \theta \quad (A-16)$$

反向故障：

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

令  $V_x = 0$ ，由方程式 (A-12) 和 (A-16) 描绘的圆周穿过  $Z_r$ 。它们亦会包围座标原点。方程式 (A-14) 描绘的圆周在阻抗平面的第三象限内。在正方向故障时，继电器在阻抗平面上的静态极特性将是由方程式 (A-12)、(A-14) 和 (A-16) 描绘的三个圆周组成。圆的轨迹示于图 7 (a)、(b)。

### 两相接地故障

当 bc 两相接地故障时，( $V_y$ 、 $V_z$ ) 正弦比较器也不会动作。其他两个正弦比较器当然会依次或一起动作。将  $V_{x1}$  和  $V_{x2}$  的适当值代入方程式 (A-9) 至 (A-11) 就可获得继电器在阻抗平面上的特性。

( $V_x$ 、 $V_y$ ) 正弦比较器——

正向故障：

$$Z_{L1} = \frac{(m+1)Z_r - mZ_{s2}}{1+2m} + \frac{m(Z_{s2} + Z_r)}{1+2m} \cdot a^2 p + \frac{m(Z_{s2} + Z_r)}{1+2m} |1 - ap| \angle \theta \quad (A-18)$$

反向故障：

$$Z_{L1} = -\frac{(m+1)Z_r + mZ_{s2}}{1+2m} + \frac{m(Z_{s2} - Z_r)}{1+2m} \cdot a^2 p + \frac{m(Z_{s2} - Z_r)}{1-2m} |1 - ap| \angle \theta \quad (A-19)$$

( $V_y$ 、 $V_z$ ) 正弦比较器——

正向故障：

$$Z_{L1} = \frac{(m+1)Z_r - mZ_{s2}}{1+2m} + \frac{m(Z_{s2} + Z_r)}{1+2m} \cdot P + \frac{m(Z_{s2} + Z_r)}{1+2m} |1 - P| \angle \theta \quad (A-20)$$

反向故障：

$$Z_{L1} = -\frac{(m+1)Z_r + mZ_{s2}}{1+2m} + \frac{m(Z_{s2} - Z_r)}{1+2m} \cdot P + \frac{m(Z_{s2} - Z_r)}{1+2m} |1 - P| \angle \theta \quad (A-21)$$

( $V_z$ 、 $V_x$ ) 正弦比较器——

正向故障：

$$Z_{L1} = \frac{(m+1)Z_r - Z_{s2}m}{1+2m} + \frac{m(Z_{s2} + Z_r)}{1+2m} \cdot a p + \frac{m(Z_{s2} + Z_r)}{1+2m} |1 - a^2 p| \angle \theta \quad (A-22)$$

反向故障：

$$Z_{L1} = -\frac{(m+1)Z_r + mZ_{s2}}{1+2m} + \frac{m(Z_{s2} - Z_r)}{1+2m} \cdot a p + \frac{m(Z_{s2} - Z_r)}{1+2m} |1 - a^2 p| \angle \theta \quad (A-23)$$

令  $P = 1 \angle 0^\circ$ ，对于在平衡点的故障，方程式 (A-20) 和 (A-21) 将分别变为  $Z_r$  和  $-Z_r$  的两点。再者，对于在平衡点的故障， $V_y = V_z = 0$ ，即  $V_{x1}/V_{x2} = 1$ ；从这里可以看到，在正方向故障时，由方程式 (A-18) 和 (A-22) 所描绘的圆周会穿过  $Z_r$ 。所有圆周的图解示于图 8 (a)、(b)。

### 参 考 文 献

1. Rao, T.S.M.—“Polyphase and sequence network protection of electrical power system”、—Ph.D. Thesis, Submitted in Manchester College of Science and Technology, Manchester—1959.

2. Rockfeller, G.D.—“Zone packaged ground distance relay—I, Principle of Operation”—Trans. I.E.E.E., PAS, Vol. 85, No. 10, Oct. 1966, P. 1021-44.

3. Bhattacharya, D. Basu, S.K., Bose, K.P. and Patra, S.P., —“A static polyphase distance relay”—Paper accepted for publication in I.E.E.E., Transactions, PAS, Paper No. 71, TP563-PWR.

4. Gupta, S.C.—“Static polyphase distance relay scheme for the protection of transmission lines”—Ph.D. Thesis, submitted in Roorkee university (India) Nov. 1969.

5. Humpage, W.D. and Sabberwal, S.P.—“Developments in phase comparison techniques for distance protection”—Proc. I.E.E., 1965, Vol. 112, No. 7, PP. 1383-94.

## 讨 论

Narain G. Hingorani:

作者提出了一种继电器,它差不多综合了对线路接地距离继电器的全部质量要求,还包括一种设计,这种设计简单、稳定、严格、较不易漂移,在系统暂态过程中不会误动作和只有一个周波的检测时间。为了证明该继电器的质量,作者提出了和在实验室能得到的一样的证据,对尚未在实际系统进行现场试验的这种最佳设计还不能完全令人信服。我觉得像大量细致的大学工作一样,一个相位检测器(Ph.D)的最后成品,论文和记录或两者都已很好地完成。但尚未看到继电器本身的一次现场试验和最后应用。

M. Ramamoorthy:

作者对多相接地距离继电器利用了一种非常有趣和简单的概念。其逻辑回路所用的元件比现有的所有方案都少。由于利用双重比较,直流偏置效应被消除了但不能消除寄生信号的影响。这是所有高速相位比较方案的共同缺点。在单相接地故障时,如果由于接地阻抗大,中性点位移至电压三角形面积以外,讨论者也应该像作者一样来对该继电器的特性进行讨论。这种情况在参考文献1的第283面图6.9(a)中有说明。在这种情况下,补偿电压要适应相位重合的准则是困难的。该文提出的数学分析中,作者忽略了故障前的电流。如果两端电压之间的相角很大,对于所有的内部接地故障,其极性的重合是否都能保证。在该文中给出的试验结果是针对一条幅射线路的。在参考文献2中,讨论者利用从各补偿电压导出的电压幅值 $V_{x'1} = V_{x1}$ 和 $V_{x'2} = V_{x2} + KV_{x0}$ (对于所有多相短路,  $K=0$ ),对多相距离继电器的性能进行了分析。如果作者能对两个方案的有关特征进行评价,讨论者定将表示感谢。照实说来,借助于一个切换继电器的方案较能免除暂态的影响和除三相短路外的所有故障都能动作。

## 参 考 文 献

1. Protective relays • Theory and Practice. A.R. Van C. Warrington Book, Vol. 1 C and H 1962.

2. M. Ramamoorthy, N.S. Moorthy. “Mathematical analysis of a polyphase distance relay.” Submitted for I E E E winter power meeting 1973.

S.Choudhuri, S.k.Basu and S.P.Patra:

作者要感谢Hingorani博士和Ramamoorthy博士对本文的有益的和有价值的评论。非常感谢Hingorani所作的评论。由于还没有在国内进行现场试验,本文就已在I E E E上发表了,所以本方案得到广泛的传播。如果生产者希望将此继电器的样品以进行现场试验,作者将非常高兴地供给其详图。

关于寄生信号而使瞬动型相位比较器不正确动作的问题,作者和Ramamoorthy博士的意见相同。对于本方案只要利用普通的比较式闭锁,这种不正确动作就可避免,但这种继电器的动作时间就较长。对于具有高接地阻抗的系统,继电器的量测回路装有一个次级变压器,它在每一继电器的输入量中减去电压 $K' I_{a0} \cdot Z_{n0}$ 即使系统的中性点移至电压三角形的外面,这也会防止电压互感器次级中性点位移。于是在接地故障时,继电器不会不正确动作。在本文的分析部份没有考虑故障前的负荷和线路两端的分支线供电,支持这些分析就没有实际效果,由于没有设备,要考虑这些情况就要装备起来。一般地说,故障前的平衡负载以及从一个电站传输到另一电站的大功率都将使继电器安装地点的电压,在送端者滞后其电源电压,而在受端者超前其电源电压。假使安装在线路两端的继电器在故障前没有负载时调整好,则当发生任意故障时,送端的继电器将超越,而受端的继电器将缩小动作区。这可以用改变模拟阻抗的相角来防止,即对于缩小动作区的继电器少滞后些,而对于会超越的继电器则多滞后些。

不知道讨论者所说方案的详图,精确地评论其两个方案的有关特征是有些困难的。然而可以做出下列一般的评论:

(a)、讨论者描述的一个方案非常相似于在本文参考文献1中的世所公认的方案以及示于讨论者参考文献1中的方案。

(b)、在发生所有相间故障时,由于切换继电器的存在,这种方案的动作将会延缓。

(c)、这种相序滤过器比利用补偿电压( $V_x$ 、 $V_y$ 、 $V_z$ 等)的电路的准确性要差些,因为相序滤过器引起的误差将随加于它的负载的增加而增加。为免除相序滤过的这个障碍,Rockfeller提出了“动作区固定的接地距离继电器”。

(d)、虽然这样方案不会反应短暂的寄生信号,但由于相序滤过器电路中的电容和电感的存在,会妨碍这种继电器方案的动态性能。除此以外,在 $V_{x'1}$ 和 $V_{x'2}$ 幅值比较之前加入向量 $V_{x2}$ 和 $K V_{x0}$ 时,应该注意到这样的事实,即负序和零序滤过器会在输出量引进不同的相位移。作者热望更多地了解讨论者提出的方案。

我们再一次感谢讨论者宝贵的评论。