

# 反应单相接地短路与两相短路的距离继电器

山东工业大学 李晓明 张尔祿 王广延

**摘要** 不论电力系统发生什么类型的短路, 用一个距离继电器就能正确测量出短路点至保护安装处的距离, 是继电保护研究课题之一。本文试图用一个距离继电器反应各种类型的不对称短路。为此, 提出了一种距离继电器新判据, 并在单侧电源条件下进行了动作特性分析。分析结果表明, 这种距离继电器有很强的抗过渡电阻能力; 有明确的方向性; 用一个距离继电器能反应单相接地短路与两相短路; 而且这种距离继电器的工作原理简单、直观。

**关键词** 距离继电器 故障分析

## 1 引言

距离继电器能够测量短路点至保护安装处的电气距离, 较少或基本不受系统运行方式的影响, 在线路保护中得到广泛应用。输电线路是 A、B、C 三相系统, 目前的常规距离保护中的距离继电器不仅分为反应接地短路的接地距离继电器和反应相间短路的相间距离继电器, 而且是按相别分相设置的。因此, 距离保护装置结构比较复杂。在微机构成的数字式距离保护装置中, 一般需要先判别短路类型和短路相别, 然后选用相应的电流、电压量进行短路距离计算。如果在计算过程中, 短路类型发生变化, 微机需要转入新的程序, 对数据进行新的处理。这就消耗了许多时间。本文提出了一种新的距离继电器动作判据, 能够用一个距离继电器反应各种类型的单相接地短路和两相短路, 而且性能较以往有较大改进。

## 2 基本原理

本文提出的距离继电器的动作判据比较量为

$$U'_2 = U_2 - I_2 Z_r \quad (1)$$

$$U'_0 = U_0 - I_0 K_0 Z_r \quad (2)$$

其中:  $U'_2$ 、 $U'_0$  分别为负序与零序补偿电压;  $U_2$ 、 $U_0$  分别为保护安装处的负序与零序电压;  $I_2$ 、 $I_0$  分别为保护安装处的负序与零序电流;  $Z_r$  为距离继电器整定阻抗;  $K_0$  为比例系数, 且  $K_0 = Z_{L0}/Z_{L1}$ ,  $Z_{L1}$ 、 $Z_{L0}$  分别为线路的正序阻抗与零序阻抗。

距离继电器的动作判据表达式为

$$2 |U'_2| + |U'_0| \geq C \quad (3)$$

当上列表达式成立时, 距离继电器动作。

其中:  $C$  为常数, 且  $C = |E_n|$ ,  $E_n$  为线路额定相电压。

下面分析该距离继电器的动作特性。

输电线路正方向短路的电力系统结构如图 1 (a) 所示；反方向短路如图 1 (b) 所示。为分析问题方便，假设：系统各阻抗的阻抗角都相等，且等于  $90^\circ$ ；正序阻抗与负序阻抗相等； $Z_{m0} = K_0 Z_{m1}$ ； $Z_{n0} = K_0 Z_{n1}$ 。

### 2.1 B、C两相短路

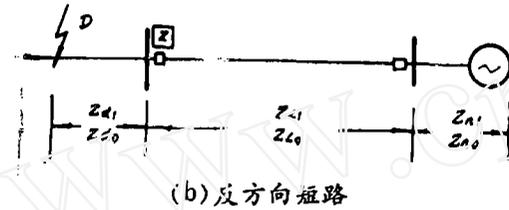
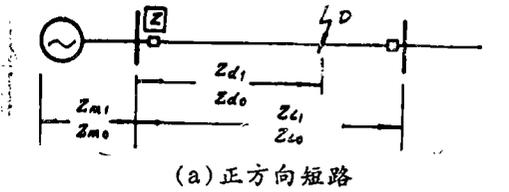


图 1 电力系统示意图

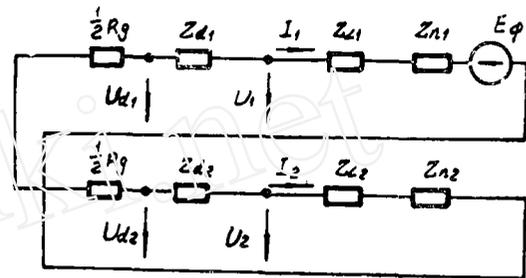
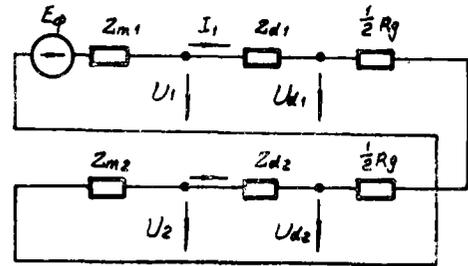


图 2 B、C两相短路复合序网

当电力系统发生 B C 两相短路时，根据故障分析的有关知识<sup>(1)</sup>，可作出故障复合序网如图 2 所示。图中的  $R_f$  为短路处的过渡电阻。

首先分析正方向短路时距离继电器的动作特性。

从图 2 (a) 可得

$$\begin{cases} E_q - I_1 (Z_{m1} + Z_{d1}) = U_{d1} \\ -I_2 (Z_{m2} + Z_{d2}) = U_{d2} \end{cases} \quad (4)$$

$$U_{d1} = U_{d2} - I_2 R_f$$

$$I_2 = -I_1$$

从式 (4) 可得

$$\begin{aligned} \frac{1}{2} E_q &= -\frac{1}{2} I_2 R_f - I_1 (Z_{m1} + Z_{d1}) \\ &= -\frac{1}{2} I_2 R_f + U_{d2} \end{aligned} \quad (5)$$

从式 (5) 可知，当  $R_f = 0$  时， $U_{d2} = \frac{1}{2} E_q$ ；当  $R_f$  从零逐渐增至无穷大时， $I_2$  逐渐减小至零， $U_{d2}$  也相应地减至零。由于  $Z_{m1}$ 、 $Z_{d1}$  的阻抗角等于  $90^\circ$ ，所以  $U_{d2}$  的变化轨迹为半圆，如图 3 所示。

电力系统发生两相短路，系统中没有零序分量。因此，距离继电器动作判据表达式变化

为

$$2 |U'_2| \geq C$$

$$\text{即 } |U'_2| \geq \frac{1}{2} |E_\phi| \quad (6)$$

从图 2 可得

$$\begin{aligned} U'_2 &= U_2 - I_2 Z_\nu \\ &= -I_2 (Z_{m1} + Z_\nu) \end{aligned} \quad (7)$$

如果整定阻抗  $Z_\nu$  的阻抗角与线路正序阻抗  $Z_{L1}$  的阻抗角相等, 则从式 (4) 和式 (7) 可知,  $U_{d2}$  与  $U'_2$  在同一条直线上。区外短路时,  $Z_\nu < Z_{d2}$ , 则  $U'_2 < U_{d2}$ , 即  $U'_2$  的端点落在  $U_{d2}$  端点的内侧, 显然有  $|U'_2| < \frac{1}{2} E_\phi$ , 距离继电器不会动作。当区内短路时,  $Z_\nu > Z_{d2}$ , 则  $U'_2 > U_{d2}$ , 即  $U'_2$  的端点落在  $U_{d2}$  的延长线上。若以原点 0 为圆心,  $\frac{1}{2} E_\phi$  为半径作圆, 该延长线与圆有一交点 A, 当  $U'_2$  的端点落在 A 点时, 距离继电器处于临界动作状态, 即

$$|-I_2 (Z_{m1} + Z_\nu)| = \frac{1}{2} E_\phi \quad (8)$$

式 (5) 与式 (8) 联立方程组求解, 得到:

$$\left(\frac{1}{2} R_g\right)^2 + (Z_{d2} + Z_{m1})^2 = (Z_{m1} + Z_\nu)^2$$

$$\text{即 } \frac{R_g^2}{4 (Z_{m1} + Z_\nu)^2} + \frac{(Z_{d2} + Z_{m1})^2}{(Z_{m1} + Z_\nu)^2} = 1 \quad (9)$$

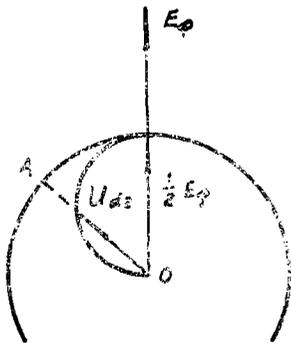


图 3  $U_{d2}$  的变化轨迹

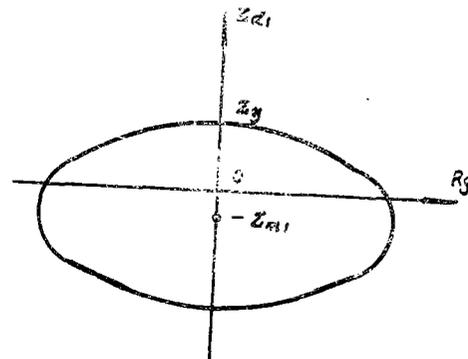


图 4 距离继电器在两相短路时的支接阻抗特性

若以  $R_g$  为横坐标,  $Z_{d1}$  为纵坐标, 根据式 (9) 作出距离继电器在两相短路时的动作区如图 4 所示。这是一个长轴为  $2 (Z_{m1} + Z_\nu)$ , 短轴为  $(Z_{m1} + Z_\nu)$ , 椭圆中心在  $(0, -Z_{m1})$  的椭圆。可见, 该距离继电器有很强的抗过渡电阻能力!

当电力系统发生反方向 BC 两相短路时, 其故障复合序网如图 2 (b) 所示。与正方向短路时的分析方法类似, 同样可得: 当  $R_g$  从零增至无穷大时,  $U_{d2}$  的变化轨迹如图 3 所示。从图 2 (b) 可得

$$U_{d2} = I_2 (Z_{d2} + Z_{L2} + Z_{m2}) \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
 U'_2 &= U_2 - I_2 Z_\beta \\
 &= I_2 (Z_{12} + Z_{n2} - Z_\beta) \quad (11)
 \end{aligned}$$

根据继电保护常识, 一般  $0 < Z_\beta < 2(Z_{11} + Z_{n1})$ 。因此, 不论  $Z_{d2}$  等于多少, 总有  $U'_2 < U_{d2}$ , 当然  $U'_2 < \frac{1}{2}E_\bullet$ 。可见, 反方向两相短路距离继电器不动作, 有明确方向性。

## 2.2 A相接地短路

当电力系统发生A相接地短路时, 可作出故障复合序网如图5所示。

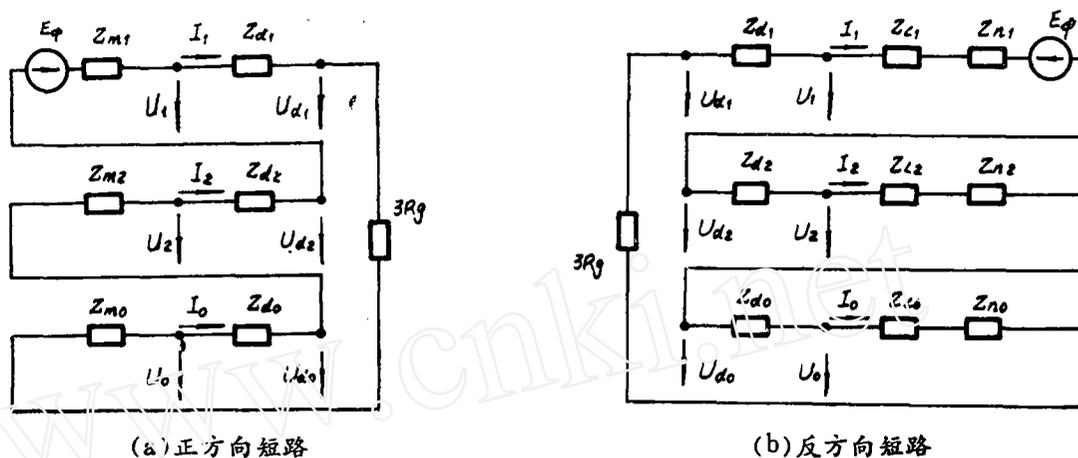


图5 A相接地短路复合序网

首先分析正方向短路时距离继电器的动作特性。从图5(a)可得

$$\left. \begin{aligned}
 E_\bullet - I_1 (Z_{m1} + Z_{d1}) &= U_{d1} \\
 -I_2 (Z_{m2} + Z_{d2}) &= U_{d2} \\
 -I_0 (Z_{m0} + Z_{d0}) &= U_{d0} \\
 U_{d1} + U_{d2} + U_{d0} &= 3 I_0 R_g \\
 I_1 = I_2 = I_0
 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

从式(12)可得

$$\begin{aligned}
 E_\bullet &= -2 U_{d2} - U_{d0} + 3 I_0 R_g \\
 &= U_d + 3 I_0 R_g \quad (13)
 \end{aligned}$$

其中,  $U_d = -2 U_{d2} - U_{d0}$

从式(13)可知, 当  $R_g = 0$  时,  $U_d = E_\bullet$ ; 当  $R_g$  从零逐渐增至无穷大时,  $U_d$  相应地逐渐减至零。由于系统阻抗角等于  $90^\circ$ , 所以  $U_d$  的变化轨迹为半圆, 如图6所示。

从图5(a)可得

$$\begin{aligned}
 U'_2 &= U_2 - I_2 Z_\beta \\
 &= -I_2 (Z_{m1} + Z_\beta) \quad (14)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U'_0 &= U_0 - I_0 K_0 Z_\beta \\
 &= -I_0 (Z_{m0} + K_0 Z_\beta) \quad (15)
 \end{aligned}$$

由于假设系统各阻抗的阻抗角相等, 因此从式(12)、(14)、(15)可知:  $U_{d2}$ 、 $U_{d0}$ 、 $U'_2$ 、 $U'_0$ 同相位。式(3)可变换成如下形式

$$|2U'_2 + U'_0| \geq |E_0| \quad (16)$$

当电力系统发生区外短路时,  $Z_f < Z_{d1}$ , 从式(12)、(14)、(15)可知,  $U'_2 < U_{d2}$ ,  $U'_0 < U_{d0}$ 。因此  $2U'_2 + U'_0 < U_{d2}$ , 当然  $|2U'_2 + U'_0| < |E_0|$ , 距离继电器不会动作。当发生区内短路时,  $Z_f > Z_{d1}$ , 同理可知,  $U'_2 > U_{d2}$ ,  $U'_0 > U_{d0}$ 。因此  $2U'_2 + U'_0 > U_{d2}$ , 即相量  $2U'_2 + U'_0$  的端点在  $U_{d2}$  的延长线上。若以  $O$  点为圆心,  $E_0$  为半径作圆, 交延长线于  $A$  点。当  $2U'_2 + U'_0$  的端点落在  $A$  点时, 为距离继电器的临界动作状态。把式(14)、(15)代入式(16)得到临界动作方程:

$$|E_0| = |2I_2(Z_{m1} + Z_f) + I_0(Z_{n0} + K_0 Z_f)| \quad (17)$$

由于假设  $Z_{n0} = K_0 Z_{m1}$ , 这样, 式(13)与式(17)联立方程组求解, 得到

$$\frac{R_f^2}{\left[ \frac{(2 + K_0)(Z_{m1} + Z_f)}{3} \right]^2} + \frac{(Z_{d1} + Z_{m1})^2}{(Z_{m1} + Z_f)^2} = 1 \quad (18)$$

以  $R_f$  为横坐标,  $Z_{d1}$  为纵坐标, 根据式(18)作出距离继电器的动作区如图7所示。这是一个长轴为  $(2 + K_0)(Z_{m1} + Z_f) / 3$ , 短轴为  $Z_{d1} + Z_f$ , 椭圆中心在  $(0, -Z_{m1})$  的椭圆。可见, 距离继电器有很强的抗过渡电阻能力。

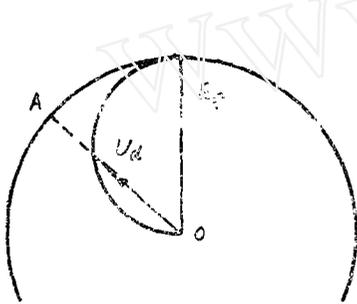


图6  $U_d$  的变化轨迹 ( $R=0 \rightarrow \infty$ )

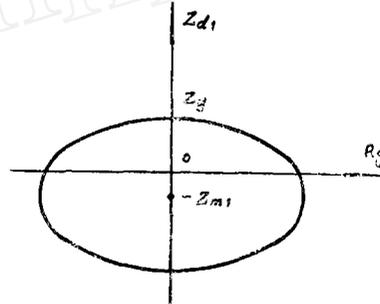


图7 距离继电器在单相接地短路时的支接阻抗特性

当电力系统发生反方向 A 相接地短路时, 其故障复合序网如图 5 (b) 所示。与正方向短路时的分析方法类似, 同样可得: 当  $R_f$  从零增至无穷大时,  $U_d$  的变化轨迹如图 6 所示。从图 5 (b) 可得

$$\begin{aligned} U_{d2} &= I_2 (Z_{d2} + Z_{l2} + Z_{n2}) \\ U_{d0} &= I_0 (Z_{d0} + Z_{l0} + Z_{n0}) \\ U'_2 &= U_2 - I_2 Z_f \\ &= I_2 (Z_{l2} + Z_{n2} - Z_f) \\ U'_0 &= U_0 - I_0 K_0 Z_f \\ &= I_0 K_0 (Z_{l1} + Z_{n1} - Z_f) \end{aligned} \quad (19)$$

从式(19)可知, 只要  $0 < Z_f < 2(Z_{l1} + Z_{n1})$ , 不论  $Z_{d1}$  等于多少, 总有  $U'_2 < U_{d2}$ ,

$U'_1 < U_{d1}$ , 当然  $|2U'_2 + U'_0| < |E_v|$ 。可见, 反方向单相接地短路距离继电器不会动作, 有明确方向性。

### 2.3 B、C两相接地短路

本文提出的距离继电器在两相接地短路时的动作行为分析比较复杂。这里仅通过  $R_f = 0$  这种特殊条件下的讨论, 对该距离继电器在两相接地短路时的动作特性有初步的了解。

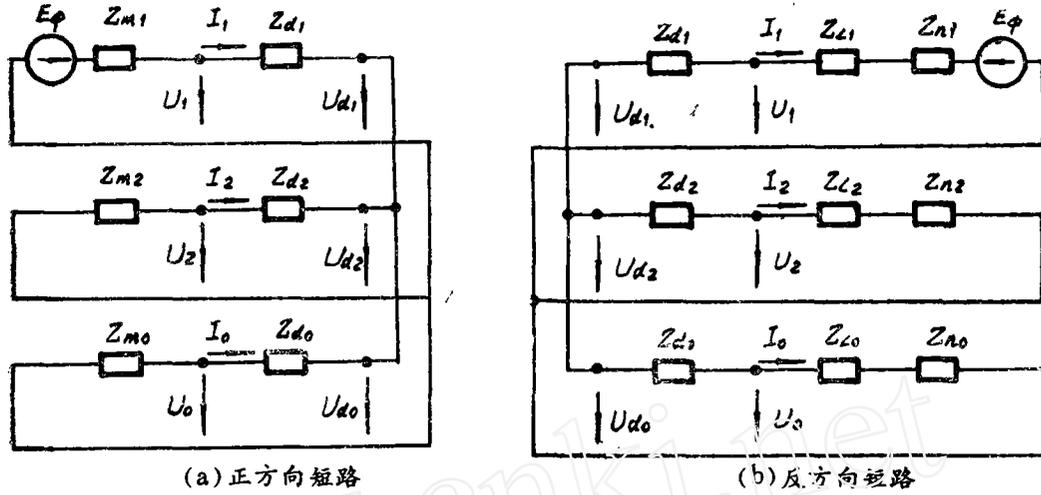


图 8 B、C两相接地短路复合序网

当电力系统发生 B、C两相接地短路时, 可作出故障复合序网如图 8 所示。

首先分析正方向短路时距离继电器的动作特性。从图 8 (a) 可得

$$\left. \begin{aligned} E_v - I_1 (Z_{m1} + Z_{d1}) &= U_{d1} \\ -I_2 (Z_{m2} + Z_{d2}) &= U_{d2} \\ -I_0 (Z_{m0} + Z_{d0}) &= U_{d0} \\ U_{d1} &= U_{d2} = U_{d0} \\ I_1 &= -I_2 - I_0 \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

从式 (20) 可得

$$E_v = 2 U_{d2} + \frac{1}{K_0} U_{d0} = \left( \frac{2K_0 + 1}{K_0} \right) U_{d2} \quad (21)$$

从图 8 (a) 可得

$$\begin{aligned} U'_2 &= U_2 - I_2 Z_f \\ &= -I_2 (Z_{m1} + Z_f) \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} U'_0 &= U_0 - I_0 K_0 Z_f \\ &= -I_0 (Z_{m0} + K_0 Z_f) \end{aligned} \quad (23)$$

考虑到  $U'_0$  与  $U'_2$  同相位, 把式 (21)、(22)、(23) 代入式 (3) 并化简, 得到

$$\frac{Z_{m1} + Z_f}{Z_{m1} + Z_{d1}} \geq \frac{2K_0 + 1}{3K_0}$$

再变换为

$$Z_{d1} \leq \frac{K_0 - 1}{2K_0 + 1} Z_{m1} + \frac{3K_0}{2K_0 + 1} Z_g \quad (24)$$

一般  $K_0 \approx 3.5$ , 式 (24) 成为

$$Z_{d1} \leq 0.3125Z_{m1} + 1.3125Z_g \quad (25)$$

当短路点的距离满足式 (25) 时, 距离继电器动作。式 (25) 说明, 当电力系统发生两相接地短路时, 距离继电器有较大的稳态超越; 而且, 稳态超越的大小与  $Z_{m1}$  的大小有关, 换句话说, 与运行方式有关。

下面分析反方向短路时, 距离继电器的动作行为。从图 8 (b) 可得

$$\left. \begin{aligned} E_g + I_1 (Z_{d1} + Z_{l1} + Z_{n1}) &= U_{d1} \\ I_2 (Z_{d2} + Z_{l2} + Z_{n2}) &= U_{d2} \\ I_0 (Z_{d0} + Z_{l0} + Z_{n0}) &= U_{d0} \\ U_{d1} &= U_{d2} = U_{d0} \\ I_1 &= -I_2 - I_0 \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

从式 (26) 可得

$$E_g = 2U_{d2} + \frac{1}{K_0} U_{d0} = \left( \frac{2K_0 + 1}{K_0} \right) U_{d2} \quad (27)$$

从图 8 (b) 可得

$$\begin{aligned} U'_2 &= U_2 - I_2 Z_g \\ &= \frac{Z_{l1} + Z_{n1} - Z_g}{Z_{d1} + Z_{l1} + Z_{n1}} U_{d2} \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} U'_0 &= U_0 - I_0 K_0 Z_g \\ &= \frac{Z_{l0} + Z_{n0} - K_0 Z_g}{Z_{d0} + Z_{l0} + Z_{n0}} U_{d0} \end{aligned} \quad (29)$$

考虑  $U'_0$  与  $U'_2$  同相位, 把式 (27)、(28)、(29) 代入式 (3), 化简后得到

$$\frac{Z_{l1} + Z_{n1} - Z_g}{Z_{d1} + Z_{l1} + Z_{n1}} \geq \frac{2K_0 + 1}{3K_0}$$

再变换为

$$\frac{K_0 - 1}{3K_0} (Z_{l1} + Z_{n1}) \geq \frac{2K_0 + 1}{3K_0} Z_{d1} + Z_g \quad (30)$$

当式 (30) 成立时, 距离继电器将动作。式 (30) 说明, 当反方向短路的短路点靠近保护安装处, 并且距离继电器的整定阻抗比较小时, 距离继电器可能误动。除此特殊条件, 一般情况下, 距离继电器有明确方向性。

### 3 说明几点

3.1 本文在  $K_{bc}^{(2)}$ 、 $K_A^{(1)}$ 、 $K_{bc}^{(1)}$  这三种类型的短路条件下, 讨论了具有新判据的距离继电器的动作特性。其他类型的短路, 特殊相不是 A 相,  $U'_2$  与  $U'_0$  将不同相位。但是, 由于式 (3) 是对  $U'_2$  与  $U'_0$  分别取绝对值 (相量的幅值) 后相加, 因此, 本文讨论的结果同样适合其他各种不对称短路。 (下转 36 页)

5.1 检测系统的重要品质指标之一就是其实时响应特性和实时处理速度。因为牵涉到时间测量精度完成。而应用程序的效率和速度则是保证该指标的重要手段之一。另一方面,程控电源的快速响应,同样也为系统的时间测量精度提供了保证。

5.2 系统的干扰问题是个非常突出的问题,特别是我们所使用的单板机属于计算机的早期产品,从它的内部结构到工艺分布还不能充分满足生产车间这个较比复杂现场的使用。如果这个问题解决不好,功能再强也不过是沙堆上的建筑物,系统的干扰比较复杂,不同的情况要分别对待。从系统方案的初始设计,到每个元器件的接线方式都将抗干扰贯穿始终,硬件上以抗拒干扰,使其不能进入计算机系统、干扰主要器件为目的,软件上以防范干扰、躲避干扰为手段。为此系统在软、硬件上采取了有力的措施。使系统运行可靠、工作稳定。

## 6 结 论

此项目1988年6月通过了由苏州市科委召开的有关专家技术鉴定。鉴定会上一致认为该系统检测精度高、数据处理速度快,操作安全、方便等优点,能完成对DS—30时间继电器的校验。在此方面填补了行业空白,有良好的推广意义。

此检测台投入车间使用四年之久,一直稳定可靠,从而有效地保证了产品质量。

(上接20页)

3.2 三相对称短路没有负序与零序分量,因此,具有新判据的距离继电器不能反应三相短路。当然,电力系统发生全相振荡,本距离继电器也不会误动。

3.3 当电力系统发生两相接地短路时,本文在 $R_g = 0$ 条件下分析出,具有新判据的距离继电器有较大的稳态超越和存在反方向可能误动问题。进一步分析后可以知道, $R_g$ 从零开始增大,稳态超越范围与反方向误动情况一般不会增大;当 $R_g$ 增至无穷大时,则短路类型转变成两相短路,也就不存在稳态超越与反方向误动问题了。

3.4 本文在单侧电源条件下进行距离继电器动作特性分析。在双侧电源条件下,使用同样的方法,也可进一步作出分析。初步分析表明,两相短路与单相接地短路都不会因对侧电源的影响而产生稳态超越和失去方向性。

3.5 解决两相接地短路时的稳态超越,是一件必须做的工作。实际上,对距离继电器动作判据作进一步改进,或者增加辅助措施,稳态超越问题是可以克服的。这将在其他文章中加以论述。

## 4 结 论

本文提出的具有新判据的距离继电器工作原理简单、直观。抗过渡电阻能力很强,有明确方向性。只要采取适当措施,解决两相接地短路时的稳态超越问题,就能用一个距离继电器正确反应各种不对称短路的距离。从而简化了继电保护装置结构,提高了性能。

### 参 考 文 献

- [1] 华北电力学院编。电力系统故障分析。北京:电力工业出版社,1979年12月。
- [2] 朱声石。高压电网继电保护原理与技术。北京:电力工业出版社,1981年。
- [3] 李晓明。具有新判据的多相补偿距离继电器。山东工业大学学报,1989年,第1期。