

# 接地阻抗继电器零序电流补偿系数的特点 及模拟试验方法研究

孟恒信, 阴崇智

(山西电力科学研究院, 山西 太原 030001)

**摘要:** 在剖析接地阻抗继电器零序电流补偿系数物理意义的基础上, 深入研究了阻抗型补偿系数和电阻 $k_R$ 和电抗 $k_X$ 分别补偿系数的特点及两系数之间的区别; 提出了两补偿系数之间的转换方法及转换条件; 并结合工程实际, 举例说明了圆特性和四边形特性接地阻抗继电器模拟试验的参数计算方法。

**关键词:** 零序电流补偿系数; 转换; 模拟试验

## Research of earth-fault impedance relay's zero-sequence compensation factor and commissioning tests method

MENG Heng-xin, YIN Chong-zhi

(Shanxi Electrical Power Research Institute, Taiyuan 030001, China)

**Abstract:** By analyzing the physical sense of earth-fault impedance relay's zero-sequence compensation factor, this paper researches impedance compensation factor and resistance  $k_R$  and reactance  $k_X$ , and distinguishes two factors. It also introduces the converting method and the converting condition of the two factors. Combined with the engineering practices, this paper introduces the method of calculating the parameter of circularity characteristic and quadrangle characteristic earth-fault impedance relay commissioning tests.

**Key words:** zero-sequence compensation factor; converting; commissioning test

中图分类号: TM77 文献标识码: B 文章编号: 1003-4897(2008)08-0083-04

## 0 引言

接地阻抗继电器是电网继电保护系统最常见的一种保护装置, 在高压电网应用非常广泛。要正确测量故障点到保护安装处的阻抗, 接地阻抗继电器在计算动作阻抗值时, 必须引入零序电流补偿, 如A相继电器计算阻抗用电流为 $I_A + K \cdot 3I_0$ <sup>[1, 3]</sup>,  $K$ 为零序电流补偿系数, 是一个复数。它常有两种表示形式, 一种由电阻 $k_R$ 和电抗 $k_X$ 分别补偿系数组成。另一种我们定义它为阻抗型补偿系数, 由一个模值 $k_1$ 和一个角度 $\theta$ 组成。两种补偿形式分别用于不同特性的阻抗继电器。要正确检验阻抗继电器的测量精度, 必须了解两种补偿系数的真实含义。由于介绍这方面的书籍和教材很少, 且目前微机保护校验仪多数都不同时具备这两种补偿形式的模拟, 要准确检验不同特性的继电器测量精度需更换不同的仪器, 给现场继电保护调试人员带来极大的不便。为此作者对这两种补偿系数进行较为深入的研究, 现

叙述如下。

## 1 阻抗型补偿系数和电阻、电抗分别补偿系数之间关系

阻抗型补偿系数常用在圆特性接地阻抗继电器中, 按阻抗形式补偿, 补偿后的特性仍为圆特性。电阻 $k_R$ 和电抗 $k_X$ 分别补偿系数常用在四边形特性接地阻抗继电器中, 按电阻和电抗分别补偿, 补偿后的特性有四边形特征。

### 1.1 两补偿系之间的区别

当我们做接地阻抗继电器的动作阻抗试验时, 一般都采用固定试验电流计算动作电压的方式进行。对于阻抗型补偿系数的继电器, 以A相继电器为例的动作电压计算公式为:  $U_A = I_A(1 + K) \cdot Z$ , 其中 $Z$ 为待试继电器阻抗值, 可以是0.9、1或1.05倍的整定阻抗或其它值。对于电阻和电抗分别补偿系数的继电器, 动作电压的计算公式为:  $U_A = I_A(K_R R + K_X X)$ , 其中 $R$ 和 $X$ 为待试继电器电

阻和电抗值,同样可以是0.9、1或1.05倍的整定电阻和电抗值或其它值。计算后动作电压包含有电阻上的压降和电抗上的压降,需要经过坐标变换转换成模值和角度才能输入仪器。

阻抗型补偿系数的表达形式可以有两种表示形式,即:一种为 $K_1 = k_1 e^{j\theta}$ ,指数表示形式。另一种为复数平面内的直角坐标表示形式,如 $a + jb$ 。它们之间可以相互转换,转换方法为常规的数学转换,如将指数形式转换为直角坐标形式,转换后 $K_1$ 的实部为 $a = k_1 \cos \theta$ , $K_1$ 的虚部为 $b = k_1 \sin \theta$ 。

电阻、电抗分别补偿系数仅有一种表达形式,即电阻补偿系数 $k_R$ 和电抗补偿系数 $k_X$ ,它们分别按电阻和电抗分量分别补偿。电阻补偿系数 $K_R$ 和电抗补偿系数 $K_X$ 并不是补偿系数的实部和虚部,不可以采用坐标变换的方式直接转换为阻抗型补偿系数。

虽然两种补偿系数的应用对象不一样,补偿效果也有较大的差别,但是由于两补偿系数均是从原始线路参数 $R_0$ 、 $R_1$ 、 $X_0$ 、 $X_1$ 计算得来,在继电器整定阻抗处的补偿效果是一样的。如在同一条线路上使用两种不同特性的阻抗继电器,只要它们按同一原则整定,在整定点的补偿效果一样,即计算得到的动作电压是一样的,因此它们之间存在转换关系。另外,由于补偿系数与线路长度无关,试验时0.9、1或1.05倍的整定阻抗以及阻抗各段的补偿系数应是同一值,即相同的整定阻抗角情况下两补偿系数补偿效果一样。

### 1.2 两补偿系数之间的转换

设:阻抗形式补偿系数和电阻、电抗分别补偿系数分别为: $K_1 = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} = k_1 e^{j\theta}$ 和 $K_R = \frac{R_0 - R_1}{3R_1}$ 、 $K_X = \frac{X_0 - X_1}{3X_1}$ 。当已知 $K_R$ 和 $K_X$ 时,我们可以将它们作如下变换。

$$K_1 = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} = \frac{R_0 + jX_0 - (R_1 + jX_1)}{3(R_1 + jX_1)} = \frac{(R_0 - R_1) + j(X_0 - X_1)}{3(R_1 + jX_1)} \quad (1)$$

$$\text{由 } K_R = \frac{R_0 - R_1}{3R_1}, \text{ 得 } R_0 - R_1 = K_R \cdot 3R_1 \quad (2)$$

$$\text{由 } K_X = \frac{X_0 - X_1}{3X_1}, \text{ 得 } X_0 - X_1 = K_X \cdot 3X_1 \quad (3)$$

将式(2)、(3)代入式(1)得式(4)。

$$K_1 = \frac{Z_0 - Z_1}{3Z_1} = \frac{K_R \cdot 3R_1 + jK_X \cdot 3X_1}{3(R_1 + jX_1)} = \frac{K_R R_1 + jK_X X_1}{(R_1 + jX_1)} \quad (4)$$

由式(4)可以看出,假定已知电阻 $K_R$ 和电抗

$K_X$ 分别补偿系数,我们来求阻抗型补偿系数, $R_1$ 和 $X_1$ 可用保护定值单中整定阻抗 $Z_1$ 和正序阻抗角 $\varphi$ 对应的电阻和电抗值。变换结果可以是式(5)所示的两种形式,指数形式和复数平面内的直角坐标形式。

$$K_1 = \frac{K_R R_1 + jK_X X_1}{(R_1 + jX_1)} = k_1 e^{j\theta} = k_1 \cos \theta + jk_1 \sin \theta \quad (5)$$

可以看出变换过程中代入的 $R_1$ 和 $X_1$ ,若它们之间的比值不发生变化,也就是试验阻抗角不发生变化,由电阻和电抗分别补偿系数变换成阻抗型的补偿系数时,补偿系数是个恒定值,与所模拟的阻抗值的大小无关。

我们做继电器的动作阻抗试验时,经常需要检验非整定阻抗角情况下的动作阻抗,如检验继电器的圆特性或四边形特性。在检验非整定阻抗角情况下的动作阻抗时,两补偿系数的补偿效果将存在较大的差异。由式(5)还可以看出,当试验阻抗不在整定阻抗角时, $R_1$ 和 $X_1$ 的比值将发生变化,由分别补偿系数变换得到的阻抗型补偿系数 $K_1$ 也随之发生变化,即不同的试验阻抗角对应不同的 $K_1$ 系数,需逐点进行变换。

为使读者理解的更清楚一些,进一步理解接地阻抗继电器零序电流补偿系数的物理意义,正确使用微机保护校验仪,准确地模拟电力系统接地故障,提高继电保护现场调试人员对距离保护调试水平,下面举一工程实例进一步加以说明。

## 2 典型参数零序补偿系数计算及微机保护校验仪现状

### 2.1 500 kV 线路典型参数<sup>[2]</sup>

$$R_1 = 0.0208 \text{ } \Omega/\text{km}, R_0 = 0.1148 \text{ } \Omega/\text{km};$$

$$x_1 = 0.2822 \text{ } \Omega/\text{km}, x_0 = 0.7190 \text{ } \Omega/\text{km},$$

### 2.2 零序补偿系数计算

#### 2.2.1 阻抗型补偿系数

##### 1) 指数表示形式计算

$$K_1 = \frac{z_0 - z_1}{3z_1} = \frac{0.1148 + j0.7190 - (0.0208 + j0.2822)}{3 \times (0.0208 + j0.2822)} = 0.526 e^{-j8^\circ}$$

$$k_1 = 0.526, \theta = -8^\circ \quad (1)$$

##### 2) 直角坐标表示形式

$$K_1 = 0.526 \cos(-8^\circ) + j0.526 \sin(-8^\circ) = 0.521 - j0.073 \quad (2)$$

#### 2.2.2 电阻和电抗分别补偿系数

$$K_R = \frac{R_0 - R_1}{3R_1} = \frac{0.1148 - 0.0208}{3 \times 0.0208} = 1.506$$

$$K_X = \frac{X_0 - X_1}{3X_1} = \frac{0.719 - 0.2822}{3 \times 0.2822} = 0.516 \quad (3)$$

### 2.3 两补偿系数之间的转换

$$K_1 = \frac{K_R \cdot R_1 + jK_X \cdot X_1}{(R_1 + jX_1)} = \frac{1.506 \times 0.0208 + j0.516 \times 0.2822}{(0.0208 + j0.2822)} =$$

$$0.526e^{-j8^\circ}$$

变换中用了正序每 km 参数,若用整定阻抗参数变换也可以得到同样的结果。可以看出通过变换得到的阻抗补偿系数与上述计算结果一样。

### 2.4 常用微机保护校验仪现状

奥地利OMICRON和博电新力PW系列微机保护校验仪同时具备这两种补偿系数的输入方式,且这两种校验仪还同时具备有 $Z_0/Z_1$ 补偿系数的输入。博电校验仪指数形式输入时,补偿角度不能为负值,需转换为正角度,如 $-8^\circ$ 需输入 $352^\circ$ 。广州昂立ONLY和新加坡VENUS微机保护校验仪输入形式一样,均只有阻抗型补偿系数的直角坐标输入形式。其它一些厂家校验仪未作统计。

## 3 接地阻抗继电器整定试验实例

### 3.1 圆特性继电器试验

如接地阻抗继电器整定阻抗为 $10\ \Omega$ 、阻抗角为 $85.8^\circ$ ,零序电流补偿系数用上述参数。在做A相继电器动作边界试验时,固定电流幅值为 $1\text{ A}$ ,在 $85.8^\circ$ 下模拟故障和在 $0^\circ$ 模拟故障计算得到的A相动作电压一样的,均为 $15.23\text{ V}$ ,电流相角随模拟故障的相角变化而变化。

1) 如在 $85.8^\circ$ 阻抗角下模拟A相故障,A相动作电压为:

$$\begin{aligned} U_A &= (I_A + K3I_0)Z = (1 + K)I_A Z = \\ &= (1 + 0.521 - j0.074) \times 1 \times 10e^{j85.8^\circ} = \\ &= 1.523e^{-j2.76^\circ} \times 10e^{j85.8^\circ} = 15.23e^{j83.04^\circ} \text{ V} \end{aligned}$$

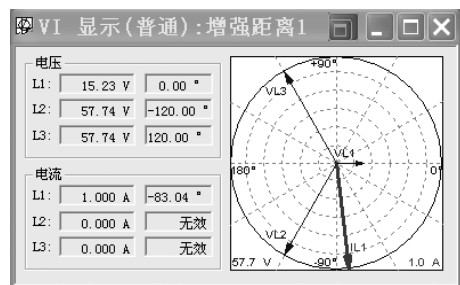
一般我们以A相电压为参考相位,A相电流相位为 $-83.04^\circ$ 。用OMICRON校验仪模拟时,仪器自动计算的电流、电压幅值和相位见图1(a)。

2) 在 $0^\circ$ 阻抗角下模拟故障

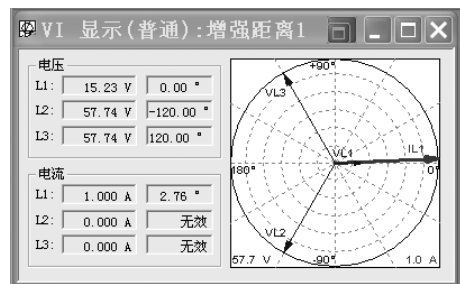
$$\begin{aligned} U_A &= (I_A + K3I_0)Z = (1 + K)I_A Z = \\ &= (1 + 0.521 - j0.073) \times 1 \times 10e^{j0^\circ} = \\ &= 1.523e^{-j2.76^\circ} \times 10 = 15.23e^{-j2.76^\circ} \text{ V} \end{aligned}$$

若以A相电压为参考相位,则A相电流相位为 $2.76^\circ$ 。用OMICRON校验仪模拟时,仪器自动计算的电流、电压幅值和相位见图1(b)。可以看出仪器自动计算结果与手动计算完全一致。注意不是所有的

仪器厂家的都能做到这一点。



(a)



(b)

图1 圆特性A相接地阻抗继电器动作电流电压模拟

Fig.1 Circularity characteristic A phase earth-fault impedance relay acting current and voltage

### 3.2 四边形特性继电器试验

由于电阻和电抗分别补偿程度不一样。在不同的试验阻抗角情况下,经 $R_1$ 和 $X_1$ 分别补偿后的阻抗值是不一样的。如整定原则和参数仍和上述继电器一样,则 $K_R = 1.506$ 、 $K_X = 0.516$ 。做A相继电器动作试验时,固定电流幅值为 $1\text{ A}$ ,在不同试验阻抗角下模拟故障,计算得到的A相动作电压不一样。如在 $85.8^\circ$ 下模拟故障,补偿后的电阻和电抗为:

$$R = (1 + 1.506)10 \cos 85.8^\circ = 1.83\ \Omega,$$

$$X = (1 + 0.516)10 \sin 85.8^\circ = 15.12\ \Omega, \text{ 对应的阻抗为:}$$

$Z = 15.23e^{j83.08^\circ}$ 。补偿后的阻抗与电流的乘积为动作电压,  $U_A = I_A \cdot Z = 15.23e^{j83.08^\circ} \text{ V}$ 。以A相电压为参考相位,则A相电流相位为 $-83.08^\circ$ 。同样计算 $60^\circ$ 、 $30^\circ$ 、 $0^\circ$ 阻抗角下的动作电压分别为:  
 $18.14e^{j46.36^\circ}$ 、 $22.97e^{j19.27^\circ}$ 和 $25.04e^{j0^\circ}$ 。

校验仪自动计算的电流、电压幅值和相位如图2所示。

可以看出,仪器自动计算的结果与我们手动计算的结果完全一致。

通过上面的模拟试验实例还可以看出,在整定阻抗角( $85.8^\circ$ )两种阻抗继电器的模拟结果是一样的;阻抗型补偿,补偿后的阻抗模值在不同试验

阻抗角下保持不变, 模拟试验电流的角度随试验阻抗角变化而变化; 电阻和电抗分别补偿, 模拟试验阻抗角为  $90^\circ$  时, 电阻补偿系数不起作用, 补偿量由  $K_X$  决定, 模拟试验阻抗角为  $0^\circ$  时, 电抗补偿系数不起作用, 补偿量由  $K_R$  决定, 模拟试验阻抗角为  $90^\circ \sim 0^\circ$  之间时, 补偿量由  $K_R$  和  $K_X$  决定。手动计算补偿量时, 可以采用电阻和电抗分别计算补偿量, 再用补偿后电阻和电抗计算出阻抗, 阻抗乘以电流即得试验电压。

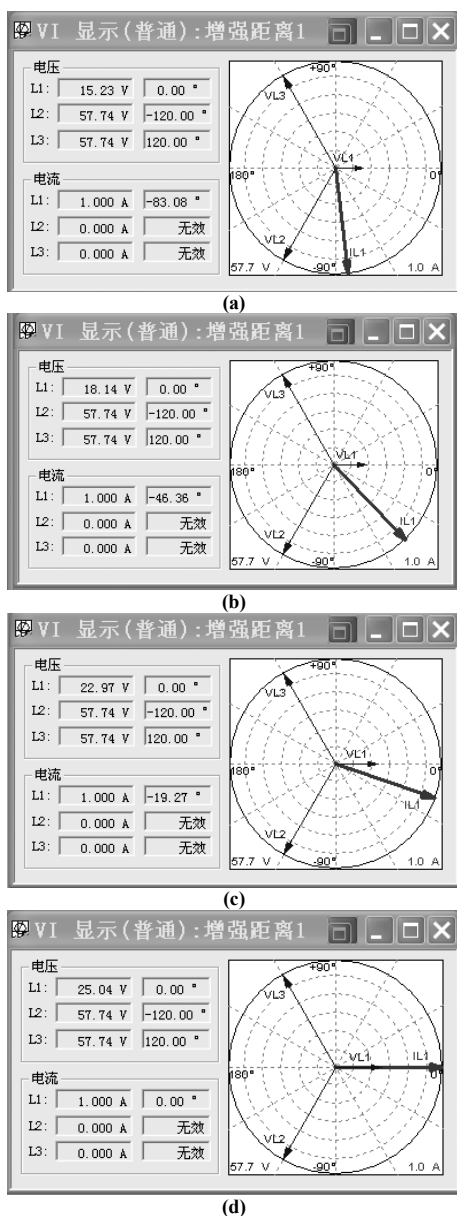


图2 四边形特性A相接地阻抗继电器动作电流电压模拟  
Fig. 2 Quadrangle characteristic A phase earth-fault impedance relay acting current and voltage

### 3.3 非整定阻抗角下两种模拟试验方法的转换

由于试验阻抗不在整定阻抗角时, 需逐点进行变换, 下面在以上工程实例介绍一下它们的转换方法。

整定阻抗仍用前面的定值, 整定阻抗为  $10 \Omega$ 、阻抗角为  $85.8^\circ$  零序电流补偿系数  $K_I = 0.526e^{-j8^\circ}$  或  $K_R = 1.506$ 、 $K_X = 0.516$ , 固定电流幅值为  $1A$ 。

前面已经介绍, 采用分别补偿计算得到  $60^\circ$  模拟时阻抗角时的动作电压为:  $U_A = 18.14e^{j46.36^\circ} V$ 。

若我们用的是一台只有阻抗型补偿系数的校验仪器, 需要进行如下转换。即转换公式中的需要代入对应  $60^\circ$  模拟阻抗角时的  $R_I$  和  $X_I$  值。

$$K_I = \frac{K_R \cdot R_I + jK_X \cdot X_I}{(R_I + jX_I)} = \frac{1.506 \times 10 \cos 60^\circ + j0.516 \times 10 \sin 60^\circ}{(10 \cos 60^\circ + j10 \sin 60^\circ)} = 0.875e^{-j29.3^\circ} = 0.763 - j0.428$$

代入上述参数计算得到的阻抗型补偿系数动作电压为:

$$U_A = (1 + K) I_A Z = (1 + 0.763 - j0.428) \times 1 \times 10e^{j60^\circ} = 18.14e^{j46.36^\circ} V$$

可以看出, 补偿系数经转换后计算的动作电压是完全一样的。

## 4 结束语

综合上面的分析比较及模拟试验实例可以看出, 虽然两种零序补偿系数形式不同、应用条件和补偿特点也不同, 但在规定条件下是可以实现转换的, 两者之间的转换是科学有效的。在工程试验中, 使用只有阻抗型补偿系数输入的仪器可以准确地完成四边形阻抗继电器的精度测试。

## 参考文献

- [1] 刘万顺. 电力系统故障分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
- [2] 姚李孝. 基于Matlab/Simulink 的高压输电线路故障定位的仿真研究[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 56-59. YAO Li-xiao. Fault Location Simulation for High Voltage Power Transmission Line Based on Matlab/Simulink[J]. Power System Technology, 2005, 29(10): 56-59
- [3] 赵晓明. 500 kV 线路距离保护零序补偿系数分析及在校验中的应用[J]. 浙江电力, 2005, (5): 20-23.

(下转第 94 页 continued on page 94)

事故情况下,可由集中监控中心先将主要故障信息立即汇报调度,同时通知相关操作队立即赶赴现场进行检查,操作队到达现场后将直接与相关调度联系。

#### 4.4 规章制度的制订

在分工方面,集中监控中心与操作队之间的分工和责任应划分明确,减少模糊职责概念,各司其职,减少推诿扯皮现象,各自包好自己的责任田。

在值班制度方面,可根据监控中心和操作队的实际地理位置,采用部分值班人员白班制,以加强工作繁忙时间的值班力量等,改善单一的三班倒运行值班方式,提高人员的值班时效性,减少强制性无工作值班时间,提高人员值班效率。如集中监控中心每班2人,白天工作繁忙期间可以增加2~3人,加上站长技术员等,值班力量可达到7~8人,足以满足监控、传动、新站接入等诸多工作需要。

#### 4.5 专业化管理的加强

由于少人管理多站,应聘用专业公司处理站内繁杂事务,提高值班员值班集中度。操作队主要负责设备的操作、巡视、事故处理和一二次设备卫生的正常维护等。其它一些诸如卫生保洁、绿化、照明、上下水系统、变电站门卫和车辆等非生产类的维护都是交由专业公司处理。这样,处理此类的工作比较好统一标准,统一管理,也使运行人员从繁忙杂乱的非生产性工作中解脱出来,有更多的精力来处理生产类的工作。

#### 4.6 通讯的重要性

建立集中监控中心后,该中心负责着区域内众多变电站的远方运行监控,因此,应进一步完善和强化通讯通道的管理,监控中心与变电站之间的通讯宜采用双通道模式,自动切换,确保信号上送下达畅通。

### 5 结束语

变电站集中监控与操作队分设化的管理模式是缓解和解决目前电网发展所带来的一些矛盾的有效管理方法。这种模式使供电企业提出的“减员增效”目标得以成功实现,提高了运行人员值班的实效性和值班效率,在经济发达地区已经取得了明显的经济效益和社会效益,非常值得我们借鉴。同时我们在决定采用一种管理方案时,一定要与当地实际情况结合起来,及时调整思维方式,使管理模式更优化,少走弯路,并在人力与资金投入方面减少不必要的浪费和重复。

收稿日期:2007-08-16; 修回日期:2008-01-13

作者简介:

王修庞(1977-),男,工程师,主要从事超高压变电管理与运行;E-mail:wangxiupang@yahoo.com.cn

罗虎(1975-),男,主要从事超高压变电管理与运行;

李朝阳(1961-),女,主要从事超高压变电管理与运行。

(上接第86页 continued from page 86)

ZHAO Xiao-ming. Analysis of Earth Fault Compensation Factor in Digital Distance Relay and Its Application for Testing[J]. Zhejiang Electric Power, 2005, (5): 20-23.

- [4] 黄少锋,王增平.微机保护中接地距离保护的检验方法[J].继电器,1995,23(3):19-22.

(上接第90页 continued from page 90)

#### 参考文献

- [1] 王梅义.四统一高压线路继电保护原理设计[M].北京:水利电力出版社,1987.  
WANG Mei-yi. Design of Principle of "Four Standardizations" Relay Protection in High-voltage Line[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1987.
- [2] 国家电力调度通信中心.电力系统继电保护规定汇编(第二版)[M].北京:中国电力出版社,2000.  
State Electric Power Dispatch and Communication Center. The Collection of Provision of Electric Power System Relay Protection, Second Edition[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.

收稿日期:2007-09-05; 修回日期:2007-09-26

作者简介:

孟恒信(1953-),男,本科,从事电力系统继电保护试验与研究工作;E-mail:mhx4739@163.com

阴崇智(1969-)男,研究生,从事电力系统继电保护试验与研究工作。

- [3] PSL601(G)数字式线路保护装置技术说明书[Z].南京:国电南京自动化股份有限公司,2004.

- [4] The Technology Instructions of Model PSL-601(G) Digital Electric Power Line Protection Equipment[M]. Nanjing: Guodian Nanjing Automation Co., Ltd, 2004.

收稿日期:2007-08-21; 修回日期:2007-11-13

作者简介:

上官帖(1958-),男,教授级高工,从事专业技术管理工作;E-mail:sgtnc@163.com

湛争鸣(1957-),男,硕士研究生,从事继电保护专业技术工作;

熊华强(1972-),男,工程师,从事继电保护专业技术工作。