

# 基于对地参数跟踪测量的不接地系统单相接地故障选相研究

赵军<sup>1</sup>, 袁雪琼<sup>1</sup>, 阮琦<sup>1</sup>, 王林<sup>1</sup>, 宋雅楠<sup>1</sup>, 付超<sup>1</sup>, 张春辉<sup>2</sup>

(1. 长沙理工大学电气工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 长沙信长电力科技有限公司, 湖南 长沙 410009)

**摘要:** 通过跟踪测量对地参数, 实现中性点不接地系统单相接地故障时正确选相。不接地系统由于系统参数的不对称, 正常运行时, 将在中性点引起一定的电压偏移。当中性点基频电压变化时, 在中性点短暂投入适当阻值的电阻, 采集电阻投切前后中性点电压的幅值与相位, 实现系统对地电导和对地电容的跟踪精确测量。依据前后两次测量的对地参数以及中性点不接地时中性点的基频电压, 经过一定的计算, 选出接地故障相。Matlab 仿真表明该方法能精确测量系统对地参数, 并在单相接地故障发生时准确选出故障相。

**关键词:** 不接地系统; 对地参数; 精确测量; 在线跟踪; 高阻接地; 故障选相

## Research on single phase grounding fault phase selection based on ground parameter tracking and measurement

ZHAO Jun<sup>1</sup>, YUAN Xueqiong<sup>1</sup>, RUAN Qi<sup>1</sup>, WANG Lin<sup>1</sup>, SONG Yanan<sup>1</sup>, FU Chao<sup>1</sup>, ZHANG Chunhui<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;

2. Changsha Xinchang Electric Power Technology Co., Ltd., Changsha 410009, China)

**Abstract:** By tracking and measuring the ground parameters of the system, the correct phase selection is achieved when neutral point ungrounded system single-phase fault occurs. Because of the asymmetry of the system parameters, the neutral point of the system will produce a certain voltage shift during normal operation. When the neutral point power frequency voltage changes, by adding a resistor with appropriate resistance in the neutral point and gathering the amplitude and phase of the neutral point voltage before and after inputting resistance, accurate measurement of the system to ground conductance and to ground capacitance are achieved. According to the twice measurement of grounded parameters and the base frequency voltage of the neutral point, the grounding fault phase is selected out with calculation. Matlab simulation shows that the method can accurately measure the parameters of the system to ground and select the fault phase when the single-phase grounding fault occurs.

**Key words:** ungrounding system; grounded parameters; accurate measurement; online tracking; high resistance grounding; fault phase selection

中图分类号: TM71

文章编号: 1674-3415(2015)21-0081-05

## 0 引言

对于不接地系统, 单相接地故障选线无论是稳态法还是暂态法, 研究成果已经很多, 方法也已经较为成熟且在实际应用中取得了较好的效果<sup>[1-4]</sup>。而对于配电网单相接地选相, 研究成果不多。不接地系统发生单相接地故障时, 按规程可继续运行1~2 h。如果发生永久性故障, 故障电流的存在可能会引发人身安全。如果能选出故障相, 转移故障电流, 便能避免安全事故的发生。实际上, 现在一些矿用电站在发生单相接地故障时, 会采用故障电

流转移装置, 钳制故障点电压, 防止故障点燃弧。这就要求在故障时准确选出故障相, 否则容易造成相间接地短路故障。

对地参数的测量主要有三个方向。一是通过在中性点进行测量, 主要针对系统参数不对称电网。有研究者提出通过在中性点外接阻抗支路, 通过调节电感实现对地参数的精确测量<sup>[5]</sup>。二是偏置法, 如偏置阻抗法, 偏置阻抗法存在安全隐患且无法实现在线监测<sup>[6]</sup>。三是注入信号法, 通过电压互感器二次侧向系统注入一定频率的信号实现对地电容的精确测量<sup>[7]</sup>, 但无法测量对地电导。

一般认为发生单相接地故障时,电压最低相为故障相,实际上这种情况只在接地故障电阻较小或为金属性接地时才成立,在此情况下可通过比幅法直接选定电压最低相为故障相<sup>[8]</sup>。线路发生高阻接地时,有研究者认为在顺序情况下发生单相接地时,电压最高相的滞后相为故障相,但是没有考虑系统电导不对称的情况,在实际应用中并不可靠<sup>[8]</sup>。也有研究者通过跟踪零序电压轨迹,完成接地故障相的判定,但在工程实际中无法实现在线判定<sup>[9-11]</sup>。

本文提出通过跟踪中性点电压变化,从而实现地参数的在线测量,电压变化时在中性点短暂投入适当阻值电阻,测量投入电阻前后中性点电压可计算出系统对地参数。电网发生单相接地故障时,只有故障相对地参数发生改变,因此提出通过准确跟踪测量系统对地参数的变化,通过计算 $\lambda$ 值,选出故障相。Matlab 仿真表明本文所提方法能准确测量对地参数并正确选相。

## 1 中性点外加电阻跟踪测量对地参数原理

中性点不接地系统正常工作时对地参数测量原理简化如图 1 所示,  $E_A$ 、 $E_B$ 、 $E_C$  为三相电源电压,  $C_A$ 、 $C_B$ 、 $C_C$  为三相对地电容,  $G_A$ 、 $G_B$ 、 $G_C$  为三相对地电导,  $R_1$  为测量电阻, K1 为电阻投切开关。

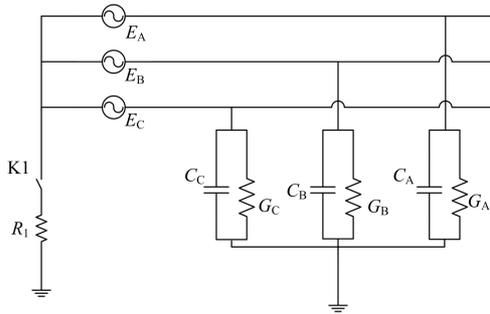


图 1 对地参数测量原理图

Fig. 1 Schematic of ground-parameter measurements

### 1.1 中性点不接地系统正常运行时对地参数计算

现实中,电网三相线路对地参数不平衡是普遍存在的,架空线路电网的不对称度通常为 0.5%~1.5%,理论极限达到 3.5%,电缆线的不对称度相比架空线要小<sup>[11]</sup>。因此配电网正常运行时,中性点将有一定的工频位移电压,中性点未接电阻时中性点电压为

$$U_0 = -\frac{Y_A E_A + Y_B E_B + Y_C E_C}{j\omega C_\Sigma + G_\Sigma} \quad (1)$$

式中:幅值为  $U_0$ ; 相位角为  $\varphi_0$ 。

投入阻值为  $R_1$  的电阻时,中性点电压为

$$U_1 = -\frac{Y_A E_A + Y_B E_B + Y_C E_C}{j\omega C_\Sigma + G_\Sigma + G_1} \quad (2)$$

式中:  $G_1 = 1/R_1$ ; 电压幅值为  $U_1$ ; 相位角为  $\varphi_1$ 。将两次测量的电压相比,有

$$\frac{U_0}{U_1} = \frac{j\omega C_\Sigma + G_\Sigma + G_1}{j\omega C_\Sigma + G_\Sigma} \quad (3)$$

由方程(3)得

$$\begin{cases} \frac{U_0}{U_1} = \sqrt{\frac{\omega^2 C_\Sigma^2 + (G_\Sigma + G_1)^2}{\omega^2 C_\Sigma^2 + G_\Sigma^2}} \\ \tan(\varphi_0 - \varphi_1) = -\frac{\omega C_\Sigma G_1}{\omega^2 C_\Sigma^2 + G_\Sigma (G_\Sigma + G_1)} \end{cases} \quad (4)$$

令  $(U_0^2 - U_1^2)/U_1^2 = k$ ,  $\tan(\varphi_0 - \varphi_1) = \psi$ ,  $a = \psi^2(k+2)^2 + k^2$ ,  $b = 2(k+2)G_1\psi^2 - 2G_1k$ ,  $c = \psi^2 G_1^2 - kG_1^2$ , 则由方程(4)可计算出对地电导

$$G_\Sigma = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (5)$$

将  $G_\Sigma$  代入方程(4)中可得

$$C_\Sigma = \frac{\sqrt{U_1^2 (G_1 + G_\Sigma)^2 - U_0^2 G_\Sigma^2}}{\omega \sqrt{U_0^2 - U_1^2}} \quad (6)$$

由式(5)、式(6)可分别求出系统对地电容和对地电导。

### 1.2 中性点不接地系统发生单相接地故障时对地参数计算

中性点不接地系统发生单相接地故障后,其等效测量电路如图 2 所示,设 C 相某馈线发生单相接地故障。故障时对地电容为  $C'_C$ ,对地电导为  $G'_C$ ,对地导纳为  $Y'_C$ ,投入中性点电阻前后中性点电压幅值分别为  $U'_0$ 、 $U'_1$ ,相位分别为  $\varphi'_0$ 、 $\varphi'_1$ ,测得对地电导为  $G'_\Sigma$ 、对地电容为  $C'_\Sigma$ 。

将 1.1 节中分析得到的式(1)~式(6)中各参数做相应替换,解得

$$\begin{cases} \frac{U'_0}{U'_1} = \sqrt{\frac{\omega^2 C'^2_\Sigma + (G'_\Sigma + G_1)^2}{\omega^2 C'^2_\Sigma + G'^2_\Sigma}} \\ \tan(\varphi'_0 - \varphi'_1) = -\frac{\omega C'_\Sigma G_1}{\omega^2 C'^2_\Sigma + G'_\Sigma (G'_\Sigma + G_1)} \end{cases} \quad (7)$$

令  $(U'^2_0 - U'^2_1)/U'^2_1 = k'$ ,  $\tan(\varphi'_0 - \varphi'_1) = \psi'$ ,  $a' = \psi'^2 \times (k' + 2)^2 + k'^2$ ,  $b' = 2(k' + 2)G_1\psi'^2 - 2G_1k'$ ,

$c' = \Psi'^2 G_1^2 - k' G_1^2$ , 则由方程(7)可计算出对地电导

$$G'_\Sigma = \frac{-b' + \sqrt{b'^2 - 4a'c'}}{2a'} \quad (8)$$

将  $G'_\Sigma$  代入方程(8)得

$$C'_\Sigma = \frac{\sqrt{U_1'^2 (G_1 + G'_\Sigma)^2 - U_0'^2 G_\Sigma'^2}}{\omega \sqrt{U_0'^2 - U_1'^2}} \quad (9)$$

由式(8)、式(9)可分别求出单相接地故障情况下系统对地电容  $C'_\Sigma$  和对地电导  $G'_\Sigma$ 。

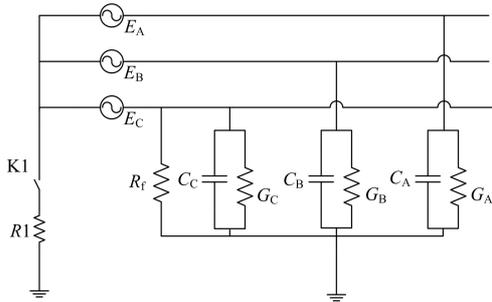


图2 单相接地故障测量电路图

Fig. 2 Circuit diagram of single-phase ground fault measurements

### 1.3 对地参数跟踪测量

中性点不接地系统运行方式的改变或者系统线路故障都会引起系统对地参数的变化, 参数的变化最终反映在中性点电压的改变上。系统正常时, 由于系统参数并不完全对称, 因此可通过中性点电压的变化跟踪测量系统对地参数。中性点电压变化时启动测量装置, 利用 1.1、1.2 节的测量方法, 即可实现对地参数的跟踪测量。

## 2 单相接地故障选相原理

图3为对地电容为  $0.3 \mu\text{F}$ , 不考虑系统对地电导且系统完全平衡情况下,  $10 \text{ kV}$  中性点不接地系统 C 相接地故障时三相电压及中性点电压随过渡电

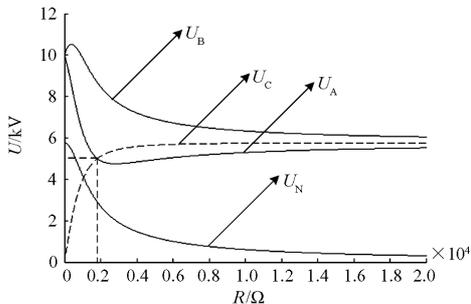


图3 电压随过渡电阻变化趋势图

Fig. 3 Tendency chart of voltage vs. transition resistance

阻变化趋势图。图中虚线为故障相, 由图可知故障电阻不足  $2000 \Omega$  时, 电压最低相已不再是故障相。

配单网发生单相接地故障时, 只有故障相对地参数发生改变, 通过准确跟踪测量出系统对地参数后, 可利用每两次测量数据结合中性点电压, 判断出单相接地故障相。实际上, 通过对前面的分析可以知道, 若中性点电压发生变化, 在电压变化前由式(1)可得

$$Y_A E_A + Y_B E_B + Y_C E_C = -U_0 (j\omega C_\Sigma + G_\Sigma) \quad (10)$$

电压发生变化后有

$$Y'_A E'_A + Y'_B E'_B + Y'_C E'_C = -U'_0 (j\omega C'_\Sigma + G'_\Sigma) \quad (11)$$

若发生单相接地故障, 故障发生前后只有故障相的对地参数发生变化其值为  $j\omega\Delta C + \Delta G_\Sigma = j\omega(C'_\Sigma - C_\Sigma) + (G'_\Sigma - G_\Sigma)$ , 令

$$\lambda = \frac{U_0 (j\omega C_\Sigma + G_\Sigma) - U'_0 (j\omega C'_\Sigma + G'_\Sigma)}{j\omega\Delta C + \Delta G_\Sigma} \quad (12)$$

由式(10)~式(12)可知, 若 B 相发生接地故障, 则有  $\lambda = E_B$ 。因此只要能够跟踪测量电压变化前后中性点电压幅值与相位, 计算出系统对地参数, 依据式(12)便可判断单相接地故障的发生并准确选出接地故障相。

对于有单相负载的配电网, 单相负载电路的投切同样会使得单相负载所在相对地参数发生变化, 而其他两相则保持不变, 此时按照式(12)将会误认为单相接地故障的发生并选出故障相。单相负载的投切, 相较于单相接地故障状态, 其明显不同之处在于, 系统发生高阻接地情况时, 其系统对地绝缘电阻仍将远小于系统投切线路时的对地绝缘电阻。由式(8)可得系统对地绝缘电阻  $R_\Sigma = 1/G_\Sigma$ , 通过测量系统最大工作方式下的对地绝缘电阻  $R_{\text{MIN}}$ , 若电压变化后测得  $R'_\Sigma < R_{\text{MIN}}$ , 此时方可判定系统发生单相接地故障。因此在存在单相负载的电网中, 应当结合式(8)、式(12), 综合判断单相接地故障的发生并正确选相。

## 3 仿真验证

利用 Matlab/Simulink 软件模拟  $10 \text{ kV}$  配电网不接地系统。采用  $10 \text{ kV}$  理想电压源, 以集中电容和集中电导替代线路分布参数, 且选用三相并联 RLC 模型, 系统频率设置为  $50 \text{ Hz}$ 。共设置 4 组出线, 每组出线对地电导设置为  $13 \text{ M}\Omega$ , 对地电容分别为  $0.3 \mu\text{F}$ 、 $0.4 \mu\text{F}$ 、 $0.5 \mu\text{F}$ 、 $0.3 \mu\text{F}$ 。为模拟系统参数不对称, 在 A 相上并联一个  $26 \text{ M}\Omega$  电导和  $0.1 \mu\text{F}$  的电容量; 在 B 相上并联一个  $26 \text{ M}\Omega$  电导和  $0.05 \mu\text{F}$  的电容量。系统正常运行时对地总电容为  $4.65 \mu\text{F}$ , 系

统对地电导为  $1.0 \mu\text{s}$ 。中性点接入阻值为  $1000 \Omega$  的电阻。通过开关 K2 控制电阻在  $0.1 \text{ s}$  投入,  $0.2 \text{ s}$  退出,  $0.6 \text{ s}$  再投入,  $0.8 \text{ s}$  退出; 设置单相接地故障发生时间为  $0.2 \sim 0.8 \text{ s}$ , 分别模拟系统经  $10\ 000 \Omega$ 、 $50 \Omega$  过渡电阻接地情况。

图 4 为基于 Matlab/Simulink 仿真软件的中性点不接地系统模型电路图。图 5 为 A 相经  $4000 \Omega$  接地故障电阻时三相电压仿真波形图, 由图 5 可知故障相 A 相电压反而比非故障相 B 相电压高, 非故障相 C 相电压最高。仿真所得数据如表 1 至表 3 所示, 其中表 2 分别对应表 3 中的故障顺序, 各表中电压均为幅值。

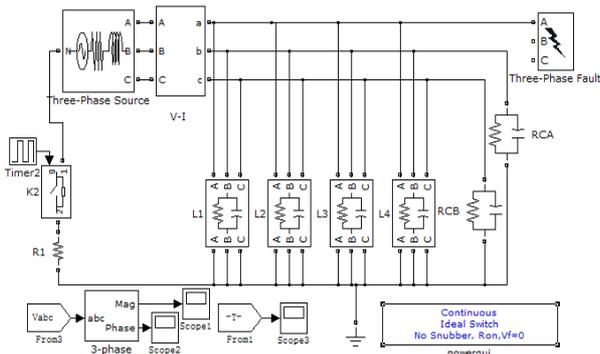


图 4 模拟仿真电路图

Fig. 4 Analog circuit simulation

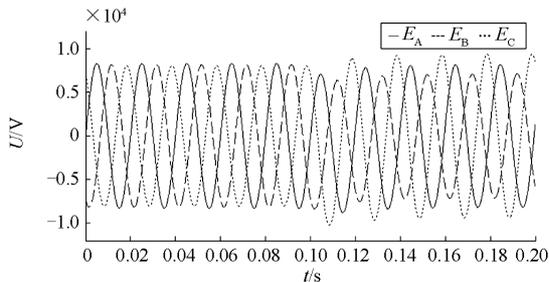


图 5 三相电压仿真波形图

Fig. 5 Three-phase voltage simulation waveforms

分析表 1 数据可知, 在中性点短暂投入  $1000 \Omega$  的电阻可测量系统对地参数, 仿真中电容误差为  $0$ , 电导误差为  $1.4\%$ , 具有非常高的精度。由表 3 可知, 仿真结果  $\lambda$  的值就是故障发生相电源的幅值与相位。通过仿真证明了本文提出方法对地参数测量的精确性及故障选相的正确性。

表 1 系统正常运行时对地参数测量

Table 1 System to ground parameters measurement during normal operation

$R_f/\Omega$	$U_0$		$U_1$		电容/ $\mu\text{F}$	电导/ $\mu\text{s}$
	V	度	V	度		
1000	152.174	89.969	125.531	124.350	4.650	0.986

表 2 故障时系统对地参数

Table 2 System to ground parameters when fault

$R_f/\text{k}\Omega$	$U_0$		$U_1$		电容/ $\mu\text{F}$	电导/ $\mu\text{s}$
	V	度	V	度		
10	709.400	93.940	567.874	126.989	4.65	100.99
	499.486	-10.773	399.836	22.276	4.65	101.00
	499.127	-161.306	399.5487	-128.257	4.65	101.00
	8153.984	175.822	7767.627	176.201	4.639	20000
0.05	8137.373	55.890	7751.804	56.088	4.646	20000
	8137.350	-64.245	7751.782	-64.047	4.646	20000

表 3 故障参数计算

Table 3 Fault parameter calculation

$R_f/\text{k}\Omega$	$U_A/\text{V}$	$U_B/\text{V}$	$U_C/\text{V}$	故障相	$\lambda$	
					幅值	相位
10	6844.4	7327.7	12709.9	A	8164.6	0.00
	8807.8	8147.0	7586.8	B	8168.5	-119.98
	7847.9	8656.2	8014.4	C	8164.3	120.00
0.05	604.4	13806.7	14410.5	A	8164.5	0.00
	14420.7	594.9	13825.9	B	8164.9	-120.00
	13816.9	14401.5	585.2	C	8168.2	119.99

由仿真可以看出, 经  $50 \Omega$  过渡电阻接地时, 在中性点投入电阻前后中性点电压相位变化非常小, 在实际应用中可能会造成测量误差。而且在接地故障电阻较小时, 投入电阻将会引起故障点电流进一步增大, 可能会引起燃弧。因此在实际应用中, 当过渡电阻小于一定值时, 直接选最低相, 当过渡电阻大于临界值时再采用本文提出的方法。

#### 4 应用问题分析与解决措施

应用本文提出的方法进行故障选相, 关键在于对地参数的准确测量, 由第 1、2 章节中的推导过程可知, 对地参数以及  $\lambda$  的计算过程中不存在省略项, 因此理论测量精度非常高。但是考虑到系统正常运行时中性点位移电压较小, 在实际运用时可能存在以下几种情况造成较大测量误差以至于选相结果不正确。

(1) 系统正常运行时中性点电压远小于故障时电压, 此时采用大变比电压互感器时, 测得系统正常时中性点电压可能存在较大误差, 从而使计算结果不准确。

(2) 正常运行时中性点电压较小, 中性点投入大电阻时, 由于电压的改变不明显, 可能因此造成测量误差。

(3) 由于对地电导远小于在中性点投入电阻的电导, 因此所投切电阻的温漂、钝化等因素造成电阻自身的测量误差, 将对电导测量结果产生较大影响。

考虑以上几点,可采用以下方法减小测量误差。

1) 当大变比电压互感器测得中性点电压较小时,此时可投入小变比电压互感器测量精确电压值,减小测量误差。2) 中性点投入的大电阻采用小电阻串联的形式,中间接分接开关,根据中性点电压的大小选择投入适当阻值的电阻,使之满足测量要求。3) 中性点投切的电阻支路,设计阻值自矫正电路,使得每次测量前更新电阻自身阻值。

## 5 结论

本文提出通过跟踪测量对地参数的变化,并根据前后两次测量的参数以及不投入电阻时中性点电压的幅值与相位,通过一定的计算出单相接地故障相。采用本文提出的方法准确选出故障相,指导消弧柜等其他装置正确动作,防止误操作造成故障扩大,提高装置可靠性。由于需要测量中性点电压,因此该方法适用于具有一定不平衡度的不接地系统。

## 参考文献

- [1] 高志鹏,张慧芬,孙旭娜. 注入半波直流的小电流接地故障选线定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 139-145.  
GAO Zhipeng, ZHANG Huifen, SUN Xuna. A method of fault line selection and fault point location with half-wave DC injection in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 139-145.
- [2] 李震球,王时胜,吴丽娜. 一种谐振接地系统电弧高阻接地故障选线新方法及其仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 44-49.  
LI Zhenqiu, WANG Shisheng, WU Lina. A new method and simulation for arcing high-impedance-grounding fault line selection in resonant grounded system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 44-49.
- [3] 李斌,束洪春. 基于瞬时实功率和瞬时虚功率的谐振接地系统单相接地选线新方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 183-190.  
LI Bin, SHU Hongchun. A new integration method of fault line detection in resonant earthed system based on instantaneous real power and instantaneous virtual power[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 183-190.
- [4] 贾清泉,石磊磊,王宁,等. 基于证据理论和信息熵的消弧线圈接地电网融合选线方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 191-197.  
JIA Qingquan, SHI Leilei, WANG Ning, et al. A fusion method for ground fault line detection in compensated power networks based on evidence theory and information entropy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 191-197.
- [5] 赵国栋,梁睿,江夏进. 一种附加阻抗法在测量配电网

- 对地参数中的应用[J]. 电测与仪表, 2014, 51(8): 65-68.  
ZHAO Guodong, LIANG Rui, JIANG Xiajin. The application of an additional impedance method in measuring grounded parameters of power distribution network[J]. Electric Measurement & Instrumentation, 2014, 51(8): 65-68.
- [6] 李晓波,苗晓鹏,桑振华,等. 基于偏置阻抗法的配电网电容电流测量新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 22-26.  
LI Xiaobo, MIAO Xiaopeng, SANG Zhenhua, et al. A new capacitive current measurement method of the distribution network based on bias impedance[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 22-26.
  - [7] 宋晓燕,孙岩洲,宋紫嫣,等. 基于零序 PT 二次侧注入信号的配电网电容电流测量新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 134-138.  
SONG Xiaoyan, SUN Yanzhou, SONG Ziyang, et al. A new method of distribution network capacitive current measurement based on injecting signals into the secondary side of the zero sequence PT[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 134-138.
  - [8] 秦光培. 单相接地时电网各电压变化规律及其应用[J]. 昆明理工大学学报, 1998, 23(5): 13-18.
  - [9] 徐波,张建文,蔡旭,等. 电网不对称条件下小电流接地系统接地相辨识[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 175-182.  
XU Bo, ZHANG Jianwen, CAI Xu, et al. Grounding phase determination in non-effective grounding systems in case of unsymmetrical voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 175-182.
  - [10] 刘宝稳,王崇林,李晓波. 不对称电网不完全接地故障零序电压轨迹及应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(28): 4959-4967.  
LIU Baowen, WANG Chonglin, LI Xiaobo. Analysis and application of zero-sequence voltage of single phase ground fault asymmetrical system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(28): 4959-4967.
  - [11] 李晓波,刘宝稳,王崇林. 谐振接地系统零序电压轨迹及精确控制方法[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2669-2674.  
LI Xiaobo, LIU Baowen, WANG Chonglin. Zero-sequence voltage locus of resonant grounded system and its accurate control[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2669-2674.

收稿日期: 2015-01-19; 修回日期: 2015-04-29

作者简介:

赵军(1989-),男,硕士研究生,研究方向为配电网故障处理、配电网防雷与接地技术;E-mail: zjcsust@163.com

袁雪琼(1991-),女,硕士研究生,研究方向为单相接地故障处理、过电压与接地技术。

(编辑 姜新丽)