

DOI: 10.7667/PSPC161036

小电流接地故障无功功率分析及选线新方法

潘本仁¹, 宋华茂², 张秋凤³, 熊华强¹, 俞小勇⁴

(1. 国网江西省电力公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096; 2. 中国石油大学(华东)信息与控制工程学院, 山东 青岛 266580; 3. 胜利油田胜利动力机械集团有限公司, 山东 东营 257000; 4. 广西电网有限责任公司电力科学研究院, 广西 南宁 530023)

摘要: 对于谐振接地系统的单相接地故障, 由于现场普遍存在电压互感器(PT)和电流互感器(CT)极性反接的现象, 当仅仅利用故障的暂态无功功率方向进行选线时极易发生误选。分析了 PT、CT 极性反接对故障暂态和工频无功功率的影响, 提出一种利用故障的工频无功功率对暂态无功功率进行修正再选线的新方法。即: 修正后的暂态无功功率为负值的线路为故障线路, 如果所有出线修正后的暂态无功功率都是正值则为母线接地。该方法可以忽略 PT 和 CT 的极性反接影响, 扩大了选线适用范围。仿真和现场的数据证明了该方法的可行性。

关键词: 谐振接地系统; 单相接地故障; 故障选线; 互感器极性反接; 暂态无功功率方向

Reactive power analysis and novel faulty selection method in resonant grounding system

PAN Benren¹, SONG Huamao², ZHANG Qiufeng³, XIONG Huaqiang¹, YU Xiaoyong⁴

(1. State Grid Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China; 2. College of Information and Control Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China; 3. Shengli Oilfield Shengli Power Machinery Group Co., Ltd., Dongying 257000, China; 4. Electric Power Research Institute, Guangxi Power Grid Corporation, Nanning 530023, China)

Abstract: Because of the incorrect polarity connection of voltage transformer and current transformer in field, faulty feeder selection based on transient reactive power direction leads to wrong easily when there is a single-phase earth fault in resonant grounding system. In this paper, the effect of the incorrect polarity connection of voltage transformer and current transformer on transient reactive power and power-frequency reactive power is analyzed. A novel method using the power-frequency reactive power to correct the transient reactive power for faulty feeder selection is proposed. The faulty feeder is the one which the corrected transient reactive power is negative. If all of the corrected transient reactive powers are positive, it is bus fault. The proposed method is independent of polarity connection of voltage transformer and current transformer, which enlarges the selection scope. The feasibility of the new method is verified by digital simulation and field fault data.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51477184).

Key words: resonant grounding system; single-phase earth fault; faulty feeder selection; incorrect polarity connection of transformer; transient reactive power direction

0 引言

在谐振接地系统中, 消弧线圈一般处于过补偿状态。当系统发生单相接地故障时, 由于消弧线圈的过补偿作用, 使得系统的工频量失去了基本的故

障特征, 因此, 利用稳态电气量的方法不能进行准确选线。为解决这一问题, 先后提出了许多方法, 例如利用故障信号的有功分量法^[1]、五次谐波电流法^[2]、暂态信息法^[3-11]、行波法^[12]、多源故障信息综合分析融合处理的综合法^[13]以及人工注入信号法^[14]、残流增量法^[2]、中性点并联中电阻法^[15]、小扰动法^[16]等。由于小电流接地故障中暂态信息十分丰富, 且不受消弧线圈补偿的影响, 选线精度高。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51477184); 江西省电力公司科技项目(521820150014)

因此, 暂态法选线是小电流接地故障选线技术中发展的新领域。

利用故障暂态无功功率方向(以下简称暂态功率)选线^[3-4]是暂态选线的一种典型方法。此方法不仅要求各条出线间的零序电流互感器(CT)极性一致, 还要求零序电压互感器(PT)与其对应的 CT 极性保持一致, 才能保证暂态功率方向的正确性, 从而进行正确选线。但由于传统配电线路很少用到方向保护, 现场 PT 和 CT 的安装很少考虑互感器之间的对应极性关系, 很容易由于一次侧、二次侧接线不对应造成极性反接, 使暂态功率方向计算不确定而发生误选。文献[17]分析了 PT、CT 极性反接对选线方法的影响, 但是没有展开讨论, 提出了新的算法但实现比较复杂。

本文分析了 PT 极性反接和 CT 极性反接给暂态功率选线方法带来的影响。在 PT 和 CT 存在反接的情况下, 分析了谐振接地系统在过补偿方式下发生单相接地故障时暂态无功功率和工频无功功率的变化规律以及误选概率。提出了一种不受 PT 和 CT 极性影响、综合利用故障时的暂态无功功率和工频无功功率进行选线的方法, 并利用实验仿真和实际故障数据对新算法进行了验证。

1 PT 和 CT 极性对暂态功率选线的影响

暂态功率选线法作为暂态选线的典型方法, 具有许多优点。它只需检测线路的暂态电压、暂态电流信息就可以确定故障线路, 无需和其他线路进行比较, 具有自具性。可以解决两出线系统接地故障问题, 检测出母线故障等。

1.1 暂态无功功率方向选线原理

当系统发生单相接地故障时, 系统的暂态无功功率方向是不同的, 健全线路的无功功率从母线流向线路, 故障线路的无功功率从线路流向母线, 因此可以通过无功功率的方向来区分故障线路和健全线路。

对于工频无功功率来说, 通过工频电流电压的幅值相位关系就可以解得无功功率的值。但是对于暂态无功功率来说, 暂态信号一般是非正弦信号, 是一系列不同频率信号的叠加, 不具备严格意义上的相位概念, 因此不能用传统意义上的功率算法。

暂态功率选线法通过对母线暂态零序电压 $u_0(t)$ 进行 Hilbert 变换, 再求其与暂态零序电流 $i_{0k}(t)$ 在暂态过程持续时间 T 内的平均功率作为该出线的暂态无功功率。采用公式(1)计算各出线暂态无功功率, 然后根据各出线暂态无功功率判断该出

线是否为故障线路。

$$Q_k = \frac{1}{T\pi} \int_0^T i_{0k}(t) \int_{-\infty}^{\infty} \frac{u_0(\tau)}{t-\tau} d\tau dt \quad (1)$$

如果 $Q_k > 0$, 表示暂态无功功率由母线流向线路, 为健全线路; 如果 $Q_k < 0$, 表示暂态无功功率由线路流向母线, 为故障线路。如果所有线路均满足 $Q_k > 0$, 可以推断出系统为母线接地故障。

1.2 PT 和 CT 极性反接对选线的影响

考虑到 PT、CT 间极性的相对性, 为分析方便, 以 PT 为参照划分 CT 反接与否, 即如果 PT 反接则认为所有 CT 极性倒置。

设在 $n(n \geq 1)$ 条出线中, CT 反接的出线数量为 n_1 , 由公式(1)计算的暂态功率为负值的出线数量为 n_2 , 显然有

$$\begin{cases} n_1 \leq n \\ n_2 \leq n \end{cases} \quad (2)$$

当不存在 CT 反接($n_1 = 0$)时, 其二次侧输出电流 i_{k2} 与线路实际故障电流 i_{k1} 成比例, 即

$$i_{k1} = Ki_{k2} \quad (3)$$

式中, K 为 CT 变比。

利用式(1)计算各出线的暂态功率。如果不存在暂态功率为负值($n_2 = 0$), 则判断为母线接地故障; 如果只有某一条出线暂态功率为负值($n_2 = 1$), 则判断为该条出线接地故障。

当有 1 条或多条出线 CT 反接($n_1 \geq 1$)时, 其二次侧输出电流 i_{k2} 与线路实际故障电流 i_{k1} 幅值仍然成比例, 但极性相反, 即

$$i_{k1} = -Ki_{k2} \quad (4)$$

CT 反接导致电流信号改变极性, 利用公式(1)计算各出线暂态无功功率, CT 反接出线暂态功率幅值不变, 但方向相反, 即判断出暂态无功功率流向与实际流向相反。此时, 某出线是否为故障线路以及其 CT 反接情况都会影响该出线的暂态功率。各出线暂态功率关系如表 1 所示。

表 1 各出线暂态功率关系

Table 1 Transient power relationship of feeders		
线路	CT 反接情况	暂态功率 Q_k
健全线路	CT 正常	>0
	CT 反接	<0
故障线路	CT 正常	<0
	CT 反接	>0

由表 1 可知, 根据暂态无功功率选线原理, 在

存在 CT 反接的情况下, 暂态功率为负值的出线可能多于 1 条($n_2 > 1$), 包括 CT 反接健全出线 and 故障出线, 选线装置将从中任选 1 条为故障线路, 即可能出现误选; 如果暂态功率为负值的出线仍然小于 2 条($n_2 < 2$), 说明故障线路 CT 反接($n_2 = 0$)或母线接地故障某一健全线路 CT 反接($n_2 = 1$), 则必然是误选。

以 $n=5$ 为例。1) 母线接地时: $1 \leq n_1 \leq 5$, 将选择其中一个 CT 反接的出线为故障线路, 必定误选; 2) 出线接地时: ① $n_1 = 1$ 且为故障线路 CT 反接, 所有出线暂态功率大于零, 判断为母线接地, 必定误选; ② $1 \leq n_1 \leq 4$ 且故障线路 CT 反接, 则只有 CT 反接的健全线路暂态功率小于零, 将从中随机选择故障线路, 必定误选; ③ $2 \leq n_1 \leq 5$ 且故障线路 CT 极性不反接, 则 CT 反接健全线路和故障线路的暂态功率均小于零, 将从中随机选择故障线路, 误选概率为 $n_1/(n_1+1)$ 。

因此, 仅利用暂态无功功率的方法受 PT、CT 极性反接情况的影响, 选线可靠性降低。

1.3 PT 和 CT 反接时暂态功率方向法的误选概率

设各出线 CT、PT 极性反接的概率为 p_1 、 p_2 , 母线接地故障占单相接地故障总数的比例为 p_3 , 则对于有 n 条出线的系统, 采用暂态无功功率方向的方法进行选线时发生线路误选的概率 p_0 为

$$p_0 = 1 - p_3 \left[p_2 p_1^n - (1 - p_2)(1 - p_1)^n \right] - \sum_{k=1}^{n-1} C_{n-1}^k \left[(1 - p_3)(1 - p_1)^{n-k-1} p_1^k \left(\frac{p_1 p_2}{n-k} + \frac{(1-p_1)(1-p_2)}{k+1} \right) \right] \quad (5)$$

由于现场 PT、CT 极性是随机连接的, 所以反接的概率可以认为是一样的, 取 $p_1 = p_2 = p$; 而且母线接地的概率比较低, 取 $p_3 = 0$, 上式可以简化为

$$p_0 = 1 - \sum_{k=1}^{n-1} C_{n-1}^k \left[(1-p)^{n-k-1} p^k \left(\frac{p^2}{n-k} + \frac{(1-p)^2}{k+1} \right) \right] \quad (6)$$

则线路误选的概率 p_0 随 PT、CT 极性反接概率 p 和出线数量 n 的变化如图 1 所示。随着线路的增多, 误选概率总体增大。 n 一定时, p_0 关于 $p=0.5$ 对称(体现极性的相对性); $p \in [0, 0.5]$ 时, p_0 单调递增; 而 $p \in [0.5, 1]$ 时, p_0 单调递减; $p=0.5$ 时, 对应各出线 PT、CT 极性为随机状态, 误选概率最大。

当 $p=0.5$ 时, 暂态功率方向法的最大误选概率随出线数量 n 的变化如表 2 所示。

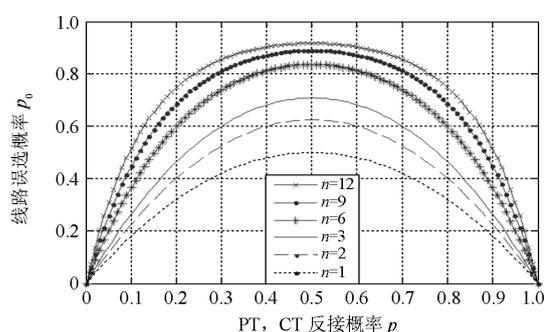


图 1 暂态无功功率方向法误选概率

Fig. 1 Failure probability of faulty feeder selection for method based on transient reactive power direction

表 2 不同出线暂态功率方向法误选的最大概率

Table 2 Maximum failure probability of faulty feeder selection of different feeders for methods based on transient reactive power direction

出线数	1	2	3	6	9	12
暂态功率方向法	0.500	0.625	0.708	0.836	0.889	0.917

综上所述, 当仅仅利用故障的暂态无功功率进行选线, 且 PT、CT 极性存在反接时, 极易出现误选, 且误选概率很大, 影响不能忽略。由于选线装置误选有可能导致系统带故障运行时间加长, 引起系统设备损坏, 甚至可能进一步引起更严重的接地故障。

2 综合暂态与工频功率方向的选线方法

2.1 PT 和 CT 极性反对接工频无功功率的影响

在谐振接地系统中, 由于消弧线圈一般处于过补偿状态, 故障线路是由线路流向母线的工频感性电流, 和健全线路由母线流向线路的工频容性电流可以认为流向是相同的。在消弧线圈全补偿状态或者欠补偿状态且补偿电流与系统对地电容电流差值小于故障线路本身的电容电流时, 故障线路和健全线路都是由母线流向线路的工频容性电流。因此, 根据工频功率计算公式可知故障线路和健全线路的工频功率的流向是一样的。

采用式(7), 计算出各出线工频无功功率。

$$Q_{ks} = UI \sin \theta \quad (7)$$

式中, θ 为工频电压电流的相角差。

当不存在 CT 反接($n_1 = 0$)时, 其二次侧电流幅值极性正常。因此, 利用式(7)可知所有线路的工频功率流向是一致的, 为正值。

当有 1 条或多条出线 CT 反接($n_1 \geq 1$)时, 其二次侧电流幅值不变但极性相反。因此, 利用式(7)可知, 反接出线的工频功率幅值不变但极性相反。

当 CT 极性情况不确定时, 根据工频功率计算

公式, 各出线工频功率关系如表 3 所示。

表 3 各出线工频功率关系

线路	CT 反接情况	工频功率 Q_{ks}
健全线路	CT 正常	>0
	CT 反接	<0
故障线路	CT 正常	>0
	CT 反接	<0

由表 3 可以看出, 当 CT 无反接($n_1 = 0$)时, 所有出线工频功率均为正值; 当 CT 有反接($n_1 \geq 1$)时, 则反接出线工频功率为负值, 而未反接出线仍然为正值。因此, 工频功率方向只与 CT 是否反接有关, 而与是否为故障线路无关。

2.2 暂态无功功率方向选线新方法

当出线 CT 极性无反接时, 所有出线的工频无功功率为正; 当某出线 CT 极性反接时, 该出线的暂态无功功率和工频无功功率同时改变符号(同时乘以-1), 工频无功功率必定为负。因此, 无论 CT 极性是否反接, 用工频无功功率符号函数乘以暂态无功功率, 将使暂态无功功率保持本来数值, 进而可利用修正后的暂态无功功率进行选线。

利用式(1)计算各个出线的暂态无功功率 Q_k , 并利用式(7)计算工频无功功率 Q_{ks} , 则修正后的暂态无功功率可以表示为

$$Q_{kf} = \text{sign}(Q_{ks})Q_k \quad (8)$$

当 CT 极性情况不确定时, 各出线暂态功率、工频功率以及修正后的暂态功率如表 4 所示。

表 4 暂态无功功率与工频无功功率关系

Table 4 Relationship of transient reactive power and power-frequency reactive power of feeders

线路类型	CT 极性	暂态功率	工频功率	修正后的暂态功率
故障线路	正常	<0	>0	<0
	反接	>0	<0	<0
健全线路	正常	>0	>0	>0
	反接	<0	<0	>0

由表 4 可以看出, 无论 CT 反接情况如何, 健全线路修正后的暂态功率为正值; 而故障线路修正后的暂态功率为负值, 因而可以利用修正后的暂态无功功率进行正确选线。

2.3 综合暂态与工频功率方向选线法的实现流程

1) 选线判据

如果某出线修正后的暂态无功功率 $Q_{kf} > 0$, 则该出线为健全线路; 如果某出线修正后的暂态无功功率 $Q_{kf} < 0$, 则该出线为故障线路; 如果所有出线

修正后的暂态功率 $Q_{kf} > 0$, 则为母线接地。

2) 实现流程

(1) 通过数字滤波器对各条出线的零序电压和零序电流进行滤波, 分别提取其工频分量和特征频段内^[3]的暂态分量。

(2) 计算各出线暂态无功功率 Q_k 和工频无功功率 Q_{ks} , 确定修正后的暂态无功功率 Q_{kf} 。

(3) 确定故障出线。如果 $Q_{kf} > 0$, 则认为该线路为健全线路; 如果 $Q_{kf} < 0$, 则认为该线路为故障线路。如果所有线路修正后的暂态无功功率均满足 $Q_{kf} > 0$, 则认为是母线接地故障。

3 选线算法验证

在 ATP 中搭建电压等级为 10 kV 的谐振接地系统并对其单相接地故障仿真, 分别改变故障线路、故障发生位置、过渡电阻和故障初相角大小以及各种不同线路的 CT 极性反接等相关故障条件, 进行了多次仿真试验, 并用所得仿真数据对新算法进行验证, 本文方法均可正确选线。

本文还选择了多组实际故障数据对新方法进行验证, 虽然现场系统和理想系统仿真模型相比存在各种各样的噪声干扰信号, 但是利用本文提出的新方法进行选线, 结果仍然全部正确, 选线的可靠性并不受影响。为了和文献[17]选线方法进行对比, 本文选取相同的实例进行算法验证。

仍以文献[17]某供电企业 10 kV 架空电缆混合线路系统的单相接地故障为例。首先根据零序电流幅值比较法选出 4 条零序电流幅值较大的出线, 分别记为 F1、F2、F3、F4, 其中, F4 为故障线路, F1 和 F3 的零序 CT 极性反接, 各出线零序电压电流波形如图 2 所示。

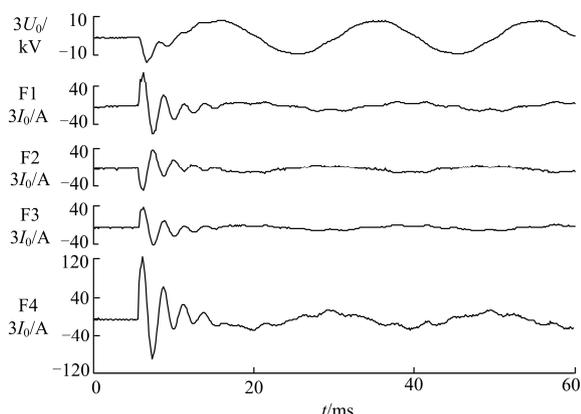
根据图 2 所示的故障电流电压波形, 利用式(1)计算各出线暂态无功功率, 利用式(7)计算工频无功功率, 最后根据式(8)计算修正后的暂态无功功率, 如表 5 所示。

由表 5 可以看出, 如果仅仅利用暂态无功功率进行选线^[3], 将从出线暂态无功功率为负值的 F1、

表 5 各出线暂态功率和工频功率

Table 5 Transient reactive power and power-frequency reactive power of feeders

出线	F1	F2	F3	F4
暂态无功功率/kvar	-46.5	31.0	-28.4	-74.8
工频无功功率/kvar	-16.4	13.3	-9.3	29.3
修正后的暂态无功功率/kvar	46.5	31.0	28.4	-74.8



错误!

图2 故障零序电压电流波形

Fig. 2 Faulty voltage and currents waveform

F3 和 F4 中任选一条为故障线路, 误选概率高达 66.7%。但是根据本文提出的新算法, 利用修正后的暂态无功功率, 只有 F4 线路为负值, 就可以正确选择 F4 为故障线路。

4 结论

利用故障暂态无功功率进行故障选线, 此方法不受消弧线圈补偿的影响, 但受现场普遍存在的 PT 和 CT 极性反接或不确定的影响, 使得暂态无功功率计算错误, 容易发生误选, 且误选概率随出线数量的增加而增加。

对于过补偿、全补偿以及欠补偿时补偿电流与系统电容电流的差值小于故障线路本身的电容电流时的谐振接地系统, 可以利用工频无功功率的方向函数对暂态无功功率的方向进行修正, 求出修正后的暂态无功功率。如果修正后的暂态无功功率为正值, 那么该线路为健全线路; 如果修正后的暂态无功功率为负值, 那么该线路为故障线路; 如果所有出线修正后的暂态无功功率都为正值, 则为母线接地故障。

本文方法克服了 PT、CT 极性不确定对利用暂态无功功率方向选线的影响, 提高了暂态选线技术的可靠性和适用性。仿真结果和现场实际故障数据都验证了新方法正确可行。

参考文献

[1] 牟龙华. 零序电流有功分量方向接地选线保护原理[J]. 电网技术, 1999, 23(9): 60-62.
MU Longhua. Principle of selective grounding fault protection based on active component direction of zero sequence current[J]. Power System Technology, 1999,

23(9): 60-62.
[2] 束洪春. 配电网故障选线[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
[3] 薛永端, 徐丙垠, 冯祖仁, 等. 小电流接地故障暂态方向保护原理研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 51-56.
XUE Yongduan, XU Bingyin, FENG Zuren, et al. The principle of directional earth fault protection using zero sequence transients in non-solid earthed network[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 51-56.
[4] 薛永端, 徐丙垠, 冯祖仁. 基于 Hilbert 变换的非正弦电路无功及瞬时无功功率定义[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(12): 35-39.
XUE Yongduan, XU Bingyin, FENG Zuren. Average and instantaneous reactive power of non-sinusoidal circuit based on Hilbert transformation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(12): 35-39.
[5] 刘谋海, 方涛, 姜运, 等. 基于暂态主频分量相关性分析的故障选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 74-79.
LIU Mouhai, FANG Tao, JIANG Yun, et al. A new correlation analysis approach to fault line selection based on transient main-frequency components[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 74-79.
[6] 王铭, 王宏伟, 赵义明. 模极大值均方根比在配网暂态接地故障选线中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(17): 50-54.
WANG Ming, WANG Hongwei, ZHAO Yiming. Application research for the root mean square ratio of modulus maxima in the distribution network transient fault line selection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 50-54.
[7] 闫光太, 梁甲文, 王新涛, 等. 利用暂态幅值故障测度的谐振电网故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 64-68.
YAN Guangtai, LIANG Jiawen, WANG Xintao, et al. A fault selection method for resonant grounding system based on transient amplitude fault measure[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 64-68.
[8] 张姝, 何正友, 王玘, 等. 暂态零序电荷-电压特征与支持向量机结合的谐振接地系统故障选线研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 71-78.
ZHANG Shu, HE Zhengyou, WANG Qi, et al. Fault line selection of resonant grounding system based on the characteristics of charge-voltage in the transient zero sequence and support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(12): 71-78.
[9] 陈博博, 屈卫锋, 杨宏宇, 等. 小电流接地系统单相接

- 地综合电弧模型与选线方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(16): 1-7.
- CHEN Bobo, QU Weifeng, YANG Hongyu, et al. Research on single phase grounding arc model and line selection for neutral ineffective grounding system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(16): 1-7.
- [10] 赖平, 周想凌, 邱丹. 小电流接地系统暂态电流频率特性分析及故障选线方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 51-57.
- LAI Ping, ZHOU Xiangling, QIU Dan. Research on transient-current frequency analysis and faulty line detecting method in indirectly grounding power system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 51-57.
- [11] 穆世霞, 田青, 曹苒, 等. 线路综合故障电磁暂态建模与仿真[J]. 陕西电力, 2015, 43(5): 5-49.
- MU Shixia, TIAN Qing, CAO Ran, et al. Electromagnetic transient modeling and simulation for line integrated fault[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(5): 45-49.
- [12] 毕见广, 董新洲, 周双喜. 基于两相电流行波的接地选线方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(19): 17-22.
- BI Jianguang, DONG Xinzhou, ZHOU Shuangxi. Fault line selection based on two-phase current traveling wave[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(19): 17-22.
- [13] 简金宝, 王媛媛, 曾祥君, 等. 基于系统聚类分析的馈线接地保护[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 111-116.
- JIAN Jinbao, WANG Yuanyuan, ZENG Xiangjun, et al. Earth fault feeder detection based on hierarchical clustering analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 111-116.
- [14] 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.
- [15] 明志强, 许虎. 经消弧线圈接地系统的中电阻快速选线方法[J]. 电网技术, 2009, 33(12): 112-114.
- MING Zhiqiang, XU Hu. Method of fast grounding fault line selection with arc-suppression coil and median resistor[J]. Power System Technology, 2009, 33(12): 112-114.
- [16] 邹浩斌, 胡少强, 刘利平, 等. 基于小扰动原理的单相接地选线装置[J]. 继电器, 2007, 35(2): 20-24.
- ZOU Haobin, HU Shaoqiang, LIU Liping, et al. Single-phase grounding selected-line equipment based on small disturbance theory[J]. Relay, 2007, 35(2): 20-24.
- [17] 薛永端, 张秋风, 颜廷纯, 等. 综合暂态与工频信息的谐振接地系统小电流接地故障选线[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(24): 80-85.
- XUE Yongduan, ZHANG Qiufeng, YAN Tingchun, et al. Faulty feeder identification based on combined transient and power-frequency components in resonant grounded system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(24): 80-85.

收稿日期: 2016-07-09; 修回日期: 2016-10-08

作者简介:

潘本仁(1983—), 男, 硕士, 高工, 从事继电保护及配
电自动化技术研究工作; E-mail: pbr168@163.com

宋华茂(1988—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方
向为电力系统故障监测; E-mail: songhuamao814@126.com

张秋风(1984—), 女, 硕士, 研究方向为电力系统故障
监测, 继电保护。E-mail: 714755114@qq.com

(编辑 魏小丽)