

配电网单相断线故障负序电流分析及选线

朱玲玲^{1,2}, 李长凯¹, 张华中^{1,2}, 张忠³

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 周口市供电公司, 河南 周口 466000;
3. 太康县供电局, 河南 太康 461400)

摘要: 配电网架空线路发生单相断线不接地故障因其危害性较小而长久以来一直没有受到人们的重视, 对其故障特征也没有进行清晰的阐述。分析了配电网发生单相断线故障时负序电流的一般变化规律, 为配电网断线故障选线提供了理论依据, 并提出了基于能量测度的断线故障选线新方法。ATP-EMTP 和 Matlab 仿真结果表明, 提出的保护方案具有良好的可靠性和灵敏度。

关键词: 配电网; 断线故障; 故障选线; 能量测度

Negative sequence current distributing and single-phase open-line fault protection in distribution network

ZHU Ling-ling^{1,2}, LI Chang-kai¹, ZHANG Hua-zhong^{1,2}, ZHANG Zhong³

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830000, China; 2. Zhoukou Electric Power Corporation, Zhoukou 466000, China; 3. Taikang Power Supply Company, Taikang 461400, China)

Abstract: Single-phase line-open without earth fault has been ignored for many years because its damage is not so serious and the fault hasn't explained clearly so far. The general changes of negative-sequence current distributing is discussed and theoretical basis is provided for single-phase line-open fault detection on a distribution network in this paper. And a new fault selection method is proposed based on energy measure. The simulation results of ATP-EMTP and Matlab show that the methods proposed in this paper are reliable and sensitive.

Key words: distribution network; line-open fault; fault detection; energy measure

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)09-0035-04

0 引言

电力系统中某处发生一相或两相断线时, 会直接引起三相线路电流(从断口一侧流到另一侧)和三相断口两端间电压不对称, 系统其它各处的参数仍是对称的, 这种非全相运行称为纵向故障, 而把短路故障称为横向故障^[1]。10 kV配电网架空线路易发生断线故障, 断线后兼有接地故障特征较为常见, 此类故障识别有很多方法。文献[2]根据在树型分支电网中发生单一断线兼接地故障时, 真故障点处故障位置诊断值的变化量分别与电网起端故障相及两非故障相电压电流相位差的变化量成正比; 任意两个确定频率下真故障点处故障位置诊断值的变化量分别是电源端相位测试的偏差, 据此提出识别真故障点进行故障测距的方法。文献[3]针对树形配电线路特点, 建立分布参数电路模型, 提出了将始端相量逐分支向后传递, 故障点逐分支搜索, 并利用双频法区别真伪故障点实现故障测距的方法。但对于单断线后未接地故障, 因其没有明显的故障特征且

故障分量难以采集分辨, 此类故障较难处理。文献[4]利用梯形模糊数模拟配变负荷变化范围, 进行断线后非接地故障判别和确定故障区间。本文通过计算线路滤波后的三相电流绝对值间隔0.01 s的差分, 比较其绝对值差分后的最大值和最小值之差。故障相电流绝对值差分后最大、最小值的差值在三相处理结果中是最大的, 可以初步判定故障相。将提取的负序电流和故障相电压乘积并对其进行前向积分, 将积分值作为能量测度进行故障选线。

1 负序电流分布

1.1 利用对称分量法分析单相断线故障

图1(a)中, 10 kV小电流接地系统发生单相断线故障, 把断线看作突然叠加了一个负电流源 $-i_{a0l}$ 进行分析, i_{a0l} 为正常运行时A相电流。序网图如图1(b)所示, Z_{1E} 、 Z_{2E} 分别为变压器T到断线点E线路的正序、负序阻抗; Z_{0E} 为母线V到断线点E线路的零序阻抗; Z_{1T} 、 Z_{2T} 分别为变压器T的正序、负序阻抗; Z_{1S} 、 Z_{2S} 分别为电源的正序、负序阻抗; Z_{1F} 、 Z_{2F} 、 Z_{0F} 分别为母线W到断线点F线路的正序、负序、零

序阻抗; Z_{1f} 、 Z_{2f} 、 Z_{0f} 分别为负荷的正序、负序、零序阻抗; Z_0 、 Z_1 、 Z_2 分别为系统零序、正序、负序总的阻抗;断线后故障点的正序、负序、零序电流 \dot{i}_1 、 \dot{i}_2 、 \dot{i}_0 分别^[1]为:

$$\dot{i}_1 = -\dot{i}_{a|0|} \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0}} \times \frac{1}{Z_1} + \dot{i}_{a|0|} \quad (1)$$

$$\dot{i}_2 = -\dot{i}_{a|0|} \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0}} \times \frac{1}{Z_2} \quad (2)$$

$$\dot{i}_0 = -\dot{i}_{a|0|} \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_0}} \times \frac{1}{Z_0} \quad (3)$$

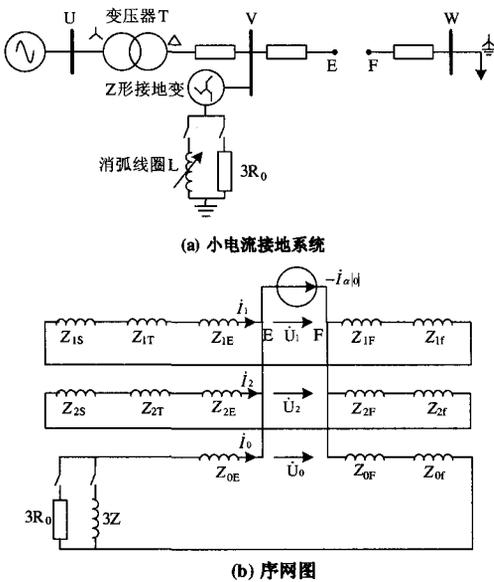


图1 小电流接地系统 A 相断线故障的序网图
Fig.1 Sequence network interconnection for A-phase line-open fault on a distribution network

由图 1(b)可见, 当 10 kV 母线 V 不接地时

$$\dot{i}_1 = -\dot{i}_{a|0|} \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} + \dot{i}_{a|0|} \quad (4)$$

$$\dot{i}_2 = -\dot{i}_{a|0|} \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (5)$$

$$\dot{i}_0 = 0 \quad (6)$$

1.2 单相断线故障负序电流的分布

电力线路正常运行时, 三相电压对称, 线路三相负荷基本平衡, 系统中的负序电流很小。发生单相断线故障以后, 改变了原来的网络结构, 破坏了

系统的三相对称性, 电网中的负序电流会突增。通过与正常运行时电流数据的对比分析可知, 故障后线路的负序电流变化显著, 而健全线路的负序电流相比之下变化很小。要寻找线路的故障特征, 应主要分析系统中的负序电流。

小电流接地系统单相断线故障示意图如图 2 所示, 其对应的负序等效电路如图 3 所示。图中 Z_{2S} 为系统负序阻抗; Z_{21} 为正常线路 1 的负序阻抗; Z_{2nE} 为故障线路 n 母线到断线点 E 的负序阻抗; Z_{2nF} 为故障线路 n 断线点 F 到负荷的负序阻抗; Z_{21f} 为线路 1 上负荷的负序阻抗; Z_{2nf} 为故障线路 n 上负荷的负序阻抗; i_{2S} 为系统的负序电流; i_{21} 为线路 1 的负序电流; i_{2nE} 为故障线路 n 断线点 E 到母线的负序电流; i_{2nF} 为故障线路 n 断线点 F 到负荷的负序电流。故障点产生的负序电流流向电源和负载。流向电源负序电流和流向非故障线路负序电流的比值为

$$\alpha = \frac{Z_{21} + Z_{21f}}{Z_{2S}} \quad (7)$$

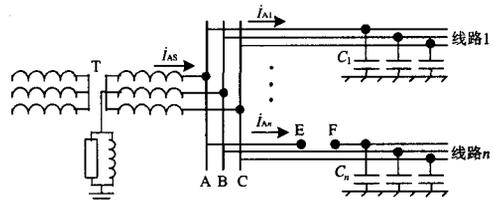


图2 小电流接地系统单相断线故障
Fig.2 Single-phase line-open fault on a distribution network

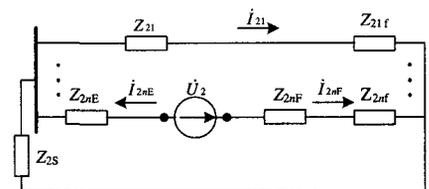


图3 单相断线故障时负序电流分布
Fig.3 Negative sequence current distribution figure for single-phase line-open fault

在配电网中, 系统高压侧负序阻抗折算到低压侧时数值很小, 并且随着电网的增大, 系统的负序阻抗随之变小。10 kV 配电网大多为辐射结构, 经实际元件参数对比可知, 系统负序阻抗及负荷负序阻抗一般都呈感性, 每条线路负荷的负序阻抗值很大, 是系统负序阻抗的近百倍^[5], 即 $Z_{21} \gg Z_{2S}$, $Z_{2nE} \gg Z_{2S}$, $Z_{2nF} \gg Z_{2S}$; 另外, 由于每条线路长度一般都小于 20 km, 自身负序阻抗较小, 而每条馈线负荷的负序阻抗却很大, 远大于馈线自身的负序阻抗, 即 $Z_{21f} \gg Z_{21}$, $Z_{2nf} \gg Z_{2nE}$, $Z_{2nf} \gg Z_{2nF}$ 等。因此, 接地故障产生的负序电流大部分由故障点经故障线路流向

电源, 非故障线路的负序电流相对很小。定义负序电流参考方向由母线指向电源或馈线。单相断线故障发生后, 故障相电压升高, 且与故障线路的负序电流方向相反。另一方面, 系统负序阻抗及负荷负序阻抗一般都呈感性, 且系统负序电抗比负序电阻大数倍, 故障线路的负序电流 i_{2n} 与系统的负序电流 i_{2s} 反向; 非故障线路的负序电流 i_{21} 与故障相电压 \dot{U}_A 的相位差小于 90° , 与系统的负序电流 i_{2s} 相位一致。

此外, 负序电流在所用变压器及配电变压器中, 会被畸变为一组串联的负序奇次谐波源。其中三次谐波电流因系统的三相对称性, 只能在三角形闭合回路中流通, 而不会出现在 10 kV 线路电流中。故负序网中的谐波电流主要由 5, 7, 11 次等非三倍奇次谐波, 它们的幅值在时间轴上都是先突变后衰减, 各次谐波的次数越高幅值越小^[6]。断线故障的暂态谐波量都在 29 次以内^[7], 可选用 FIR 数字滤波器, 通频带为 (50 Hz, 1 450 Hz), 通过 DFT 算法对周期信号进行谐波分析, 对滤波后的谐波数据进行前向积分, 这种算法对单一次数谐波瞬时值, 结果是其幅值的线性函数, 频率越高那么放大的倍数就越大。则基波半波长就是各次谐波幅值的线性叠加, 可将故障特征放大, 提高此保护方案的灵敏度。

因此, 可根据单相断线故障时各线路负序电流低频谐波量及故障线路的电压进行选线。

2 单相断线故障保护

2.1 单相断线故障选线判据

1) 当线路负序电流模值大于整定值时分析馈线 n , 按躲开其它馈线单相断线故障在馈线 n 上产生的负序电流 i'_{2n} 进行整定: $I_{zd} = k_1 |i'_{2n}|$, 其中 k_1 为可靠系数。

2) 定义流出母线的电流方向为正, 取流向系统即发电机或变压器的负序电流为极化电流, 取被保护线路的负序电流为比较电流, 当比较电流与极化电流方向相反时, 判定为正向故障。因为单相断线故障时, 故障线路的负序电流方向为线路流向母线, 非故障线路的负序电流方向为母线流向线路。考虑一定的灵敏度范围, 动作判据为

$$135^\circ \leq \arg \frac{i'_{2s}}{i_2} \leq 225^\circ \quad (8)$$

3) 通过计算线路滤波后的三相电流绝对值间隔 0.01 s 的差分, 比较其绝对值差分后的最大值和最小值之差。因为线路发生单相断线故障以后, 故障相的电流会降低至零。故障相电流绝对值差分后最大、最小值的差值在三相处理结果中是最大的, 可以初步判定故障相, 并启动保护。然后取半个周波

内负序电流与故障相电压的乘积对时间的积分值即为能量测度。故障点能量测度定义为:

$$W = \int i_2 u_{\text{故障相}} \quad (9)$$

故障线路的能量测度的大小大于非故障线路, 二者符号相反: 前者为负, 后者为正。通过比较线路暂态能量的大小和方向即可进行断线选线。动作判据为: 按躲开其它馈线单相断线故障的最大能量测度 $|W_{2q}|$ (q 表示任意非故障出线) 进行整定, 即 $W_{zd} \leq k_w |W_{2q}|_{\max}$, k_w 为可靠系数, 取负值, 经反复验证, 一般取 $-10 \sim -20$ 。

2.2 故障选线判据比较

通常, 单相断线故障时, 负序电流大, 保护判据 1)、2) 灵敏度高, 但很难和单相接地故障区分开来。由于单相接地故障时, 故障相电压降低, 能量测度数量级只有 10^5 , 与非故障出线同; 而单相断线故障时, 故障相电压升高; 能量测度数量级为 10^7 , 所以, 断线的能量测度要远远高于接地故障, 判据 3) 可使断线故障与接地故障区分。

3 仿真

采用 ATP-EMTP 和 Matlab 仿真软件对 10 kV 配电网进行仿真分析, 采样频率为 5 kHz , 见图 4 所示。根据中性点接地方式的不同、补偿度的不同及故障点的不同和负荷的不同等几十种情况, 分别计算了负序电流的大小、方向及基于负序电流的能量测度。取得了大量的数据, 由于篇幅有限, 仅选取部分数据与波形列图 5 中。

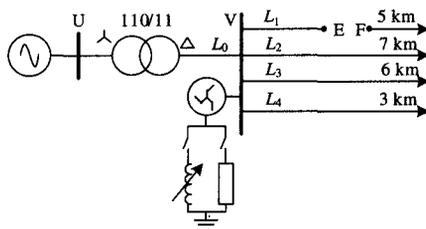
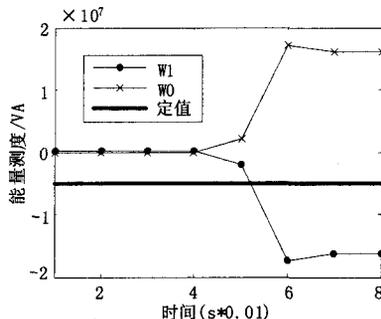
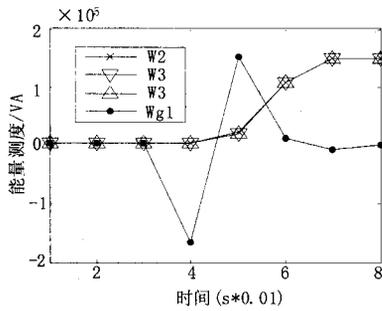


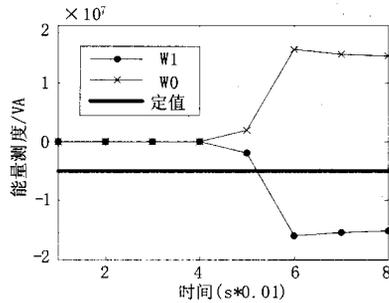
图4 中性点非有效接地的 10 kV 配电网
Fig.4 The 10 kV distribution network of the neutral non-effectively grounded



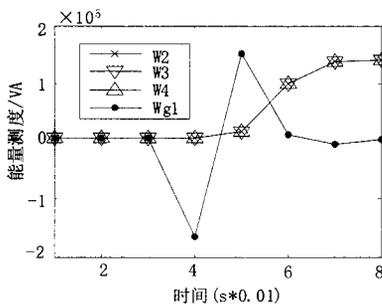
(a) 10 kV 侧不接地, L_1A 相断线时, 故障线路 L_1 和进线 L_0 的能量测度



(b) 10 kV 侧不接地, L_1 A 相断线时, 非故障线路 L_2 、 L_3 、 L_4 的能量测度



(c) 10 kV 侧经消弧线圈接地, 补偿度为 10%, L_1 A 相断线时, 故障线路 L_1 和进线 L_0 的能量测度



(d) 10 kV 侧经消弧线圈接地, 补偿度为 10%, L_1 A 相断线时, 非故障线路 2、3、4 的能量测度和线路 L_1 A 相接地故障时, 线路 1 的能量测度

图 5 线路 L_1 单相断线时, 10 kV 配电网的能量测度仿真曲线

Fig.5 Energy measure trajectory for A-phase line-open fault on line 1 of the 10 kV distribution grid

图 5 中, W_i 为线路 L_i 的能量测度($i=0、1、2、3、4$); W_{g1} 为线路 L_1 A 相金属性接地的能量测度; 定值 $W_{zd}=-5 \times 10^7$ VA。

比较图 5 中的(a)和(b)、(c)和(d), 故障线路 L_1 的能量测度 W_1 是非故障线路 $L_2、L_3、L_4$ 的能量测度 $W_2、W_3、W_4$ 近似 100 倍, 且方向相反, 因此, 采用基于负序电流的能量测度选线具有较高的准确度; 进线 L_0 的能量测度 W_0 和非故障线路 $L_2、L_3、L_4$ 的能量测度 $W_2、W_3、W_4$ 比值约等于负载负序阻抗与电源负序阻抗之比, 且方向一致, 与故障线路 L_1 的能量测度 W_1 方向相反, 容易区分。线路 L_1 发生单相接地故障时的能量测度 W_{g1} 有一定的波动, 但数值很小, 可见单

相接地故障不会引起保护误动。比较图 5 中的四张图, 10 kV 侧经消弧线圈接地与否, 不会影响保护方案的可靠性。

4 结论

本文对小电流接地系统单相断线故障时负序电流的分布进行了研究, 提出了基于负序电流和故障相电压的能量测度保护。并对单相断线故障产生的负序电流分布进行了详细的仿真分析。基于负序电流的能量测度断线保护具有如下特点:

(1) 单相断线故障产生的负序电流由故障点流向整个系统, 其中绝大部分经故障线路流向电源。故障线路负序电流远大于非故障线路, 方向与故障相电压相位和与流向系统的负序电流方向都相反。

(2) 单相断线故障产生的负序电流在系统中的分配不受中性点接地方式的影响, 能量测度保护原理可以适合各种中性点接地方式。

(3) 故障线路的能量测度和非故障线路的能量测度正负相反, 大小相差很大。故障线路的能量测度是整个系统最大负值, 所提保护方案能可靠动作。

(4) 断线故障的暂态谐波量主要为低次, 利用谐波数据进行前向积分算法, 提高了保护方案的灵敏度。

(5) 线路上已存在的谐波量, 可提高保护的可靠性。

(6) 单相断线故障和单相接地故障的能量测度相差很大, 在接地故障时所提保护方案不会误动。

(7) 此保护具有很高的可靠性和灵敏度。

本文首次对基于负序电流馈线断线保护进行了理论分析。该技术有待于进一步研究, 以满足现场实际运行要求。

参考文献

[1] 李广琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
 LI Guang-qi . Electric Power System Transient Analysis[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995.

[2] 韩凤玲, 王毅, 许承斌, 等. 树型分支电网单相断线兼接地故障特征[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1998, 30(2): 16-20.
 HAN Feng-ling, WANG Yi, XU Cheng-bin, et al. Fault Features of Line Break with Short-circuit for Tree-type Distribution Line[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1998, 30(2): 16-20.

[3] 贾文超, 陈娟, 许承斌, 等. 基于双频法的树形配电线路单相断线兼接地故障诊断[J]. 电力系统自动化, 1999, 11(2): 20-24.

(下转第 43 页 continued on page 43)

此提出了取消零序保护 I、II 段, 保留 III、IV 段的整定原则。

2) 分析了相间和接地距离保护整定原则的异同, 根据实际计算结果提出两者可以合并为统一整定原则, 采用同样的定值, 从而减少整定计算量。

目前, 上述方案在西北 330~750 kV 电网已应用近两年, 从未发生任何因原则简化引起的保护误、拒动事故, 系统运行良好, 并且极大地解放了整定工作人员, 减小了定值执行压力。西北 330~750 kV 主网零序保护未来还将进一步采用反时限方案, 随着西北 750 kV “外向型、规模型、送外型” 电网建设的快速推进, 简化原则将会在西北电网发挥更大的效益和作用。

参考文献

- [1] 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 Dispatching and Communication Center. Power System Relay Protection Rules Collection, Second Edition[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.
- [2] 西北电力调度通信中心保护处. 2004年西北电网整定计算方案[Z]. 2004.
Dept of Protection Relay, Northwest Electric Power Dispatching and Communication Center. Relay Setting Coordination Scheme of Northwest Electric Power Grid in 2004[Z]. 2004.
- [3] 陈祥文, 柳焕章. 超高压线路简化整定计算的原则和方法[J]. 电网技术, 2007, 35(1): 11-14.
CHEN Xiang-wen, LIU Huan-zhang. Rules and Methods for Simplifying Setting Calculation of Protections of Extra-high Voltage Transmission Line[J]. Power System Technology, 2007, 35(1): 11-14.
- [4] 廖晓玉, 张太升, 等. 继电保护整定计算的简化[J]. 继电器, 2003, 31(8): 27-30.
LIAO Xiao-yu, ZHANG Tai-sheng, et al. Simplify Calculation of Line Protection Settings[J]. Relay, 2003, 31(8): 27-30.
- [5] 杨奕. 超高压电网后备保护的配置及整定中的一些问题[J]. 继电器, 2001, 29(3): 16-19.
YANG Yi. Some Problems in Setting and Arrangement of Backup Protection for UHV Power Network[J]. Relay, 2001, 29(3): 16-19.
- [6] 王广学, 俸玲, 李晓娟. 电力系统输电线路接地距离保护整定计算研究[J]. 电网技术, 2002, 26(2): 49-53.
WANG Guang-xue, FENG Ling, LI Xiao-juan. Research on Setting Calculation of Grounding Distance Protection Transmission Line[J]. Power System Technology, 2002, 26(2): 49-53.
- [7] 王梅义. 电网继电保护应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
WANG Mei-yi. The Utility of Power System Network Relay Protection[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [8] 程晓平. 简化距离保护整定计算方法[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(10): 48-50.
CHENG Xiao-ping. Discussion on Simplified Setting Calculation for Distant Protections[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(10): 48-50.
- 收稿日期: 2008-06-13; 修回日期: 2008-07-15
- 作者简介:
黄莹 (1971-), 女, 高级工程师, 工学硕士, 从事电力系统继电保护方面的工作; E-mail: huangy@nw.sgcc.com.cn
粟小华 (1961-), 男, 高级工程师, 工学硕士, 从事电力系统继电保护方面的工作。
- (上接第 38 页 continued from page 38)
- JIA Wen-chao, CHEN Juan, XU Cheng-bin, et al. Fault Diagnosis for Line-open with Line-to-ground on Radial Distribution Network by Method of Double Frequency Diagnosis[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 11(2): 20-24.
- [4] 屈刚, 李长凯. 配电网架空线路断线故障定位[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(12), 35-38.
QU Gang, LI Chang-kai. Simulative Study on Steady-state Performance of DFIG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(12), 35-38.
- [5] 李福寿. 中性点非有效接地电网的运行[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
LI Fu-shou. The Operation of Power Grid with Ineffectively Grounded[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1993.
- [6] 马珂. 中性点非直接接地系统中暂态谐波故障选线新原理的研究(硕士学位论文)[D]. 西安: 西安交通大学, 2003.
MA Ke. Research of the New Theory is About Fault Line Selection in the Neutral Non-effectively Grounded System Using Harmonic Transient Current, Thesis[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2003.
- [7] 屈刚. 乌鲁木齐 10 kV 配电网架空线路断线检测(硕士学位论文)[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2006.
QU Gang. Overhead Transmission Line-open Fault Detection in Urumqi 10 kV Distribution Network, Thesis[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2006.
- 收稿日期: 2008-06-15; 修回日期: 2008-09-01
- 作者简介:
朱玲玲 (1980-), 女, 硕士, 研究方向为配电网电力系统自动化; E-mail: zhulingling1980@126.com
李长凯 (1949-), 男, 副教授, 研究方向为电气工程与系统开发, 从事电力系统的教学和研究工作;
张华中 (1979-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护。