

基于灰色关联的小电流接地选线研究

梁睿, 王崇林, 刘建华, 马草原, 张栋梁

(中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221008)

摘要: 在分析了现有的小电流系统单相接地故障选择性保护的基础上, 提出了一种基于灰色关联算法单相接地保护新原理。该方法利用在配电网单相接地故障时, 故障支路的零序暂态电流和非故障支路的零序暂态电流的关联程度来判别故障支路和非故障支路, 并给出了相关算法, 并进行了相应的仿真计算, 仿真和实际应用结果表明, 基于该方法选择性接地保护计算量小, 实现容易并具有很高的准确性, 且适用中性点不同接地方式的配电网。

关键词: 灰色关联; 单相接地故障; 选择性; 中性点; 配电网; 保护

Fault line detection for single-phase-to-earth faults based on improved grey relation analysis

LIANG Rui, WANG Chong-lin, LIU Jian-hua, MA Cao-yuan, ZHANG Dong-liang

(School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining & Technology, Xuzhou 21008, China)

Abstract: After analyzing the single-phase-to-earth faults selective protection principle in present small current system, a novel principle that single-phase-to-earth fault based on improved gray relation analysis is presented in this paper. While single-phase-to-earth faults taking place in the distribution system, this method utilizes the zero sequence transient current relation degree of faulted branch and normal branch to analyse and distinguish faulted branch from normal branch. The corresponding simulation and experiment are also carried out as well as the corresponding algorithm. Simulation and practical application show that single-phase-to-earth faults selective protection principle based on the method has a less calculation, great exactness and it is easy to realized. It is also adaptive to any distribution system with different grounding patterns.

Key words: gray relation; single-phase-to-earth faults; selectivity; neutral point; distribution system; protection

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)07-0017-05

0 引言

我国中低压配电网一般采用中性点不接地方式或经消弧线圈接地方式, 在这种小电流接地系统中, 单相接地故障率最高, 占配电网故障的80%以上^[1]。发生单相接地故障的故障线路可靠识别一直没有得到彻底解决, 对此国内外学者做了大量工作, 目前已经研究出的选线原理主要可以分成两大类: 基于稳态信号的故障选线原理和基于暂态信号的故障选线原理。对于前者, 主要有零序有功分量法、5次谐波电流法、零序导纳法, 电流注入法等。其中: 零序有功分量法的整定比较困难, 动作门槛值不易设定, 且受电网结构影响较大; 基于零序信号5次或以上谐波的方法虽然不受消弧线圈的影响, 但信号中谐波分量过小, 灵敏度受到很大限制; 注入信号法需要附加耦合设备, 且不能判断高阻接地和非

电弧不稳定接地故障; 零序导纳法可有效地克服接地电阻的影响, 但仍无法确保中性点经消弧线圈接地系统的准确性^[2-5]。后者主要通过提取故障信号中的高频成分实现选线, 小波分析就是其中的一种, 它靠零序电流中暂态分量的丰富信息判断故障馈线路, 特别是对瞬时突变信号和微弱信号的变化较为敏感, 能有效地提高判断的灵敏度。而接地点过渡电阻的增大将极大地降低零序电流的突变量, 稳态接地时突变量也较小, 有可能使其“漏判”。因此, 它离实际应用还较远。由于暂态过程短, 且受线路结构、参数及故障条件的影响, 暂态量算法在实用中还有待实践检验^[6-9]。另外, 采用暂态信号的大部分的单相故障选线方法都是计算量庞大, 实用起来有很大的困难。

灰色理论作为一个处理非确定性的方法, 在20世纪80年代提出, 经历二十多年的发展, 该方法已应用预测、系统控制和识别等领域。灰色关联分析作为灰色理论的一个重要组成部分, 也已在各种应

用中广泛运用。本文在简单论述传统灰色关联分析的基础上,首次提出了基于灰色关联理论的小电流接地选线方法。

1 配电网单相接地故障模型的建立与仿真

本文利用 PSCAD (EMTDC) 仿真了小电流接地电网各种单相接地故障情况。所用的仿真模型如图 1 所示,这是一个简单的具有 5 条出线的 10 kV 系统,中性点经消弧线圈并电阻接地,消弧线圈的脱谐度可调。参数如下:电网电源侧电压等级为 35 kV,经 35 kV/10 kV, Y/d 连接的变压器对各支路供电,用电侧总负荷为 80 MVA,功率因数为 0.8,三条电缆和两条架空线,电容电流共计 45 A,假设正常工作时电网对地的不对称度为 1%。电压互感器为三相星形连接的非线性电抗组。

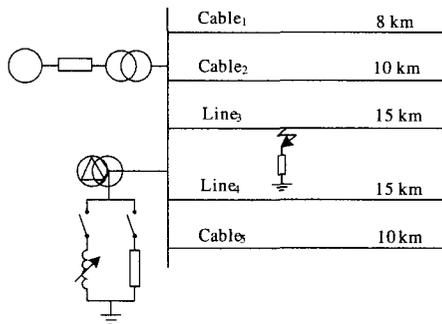


图 1 配电网单相接地故障示意图

Fig.1 Sketch map of single-phase-to-ground fault in the distribution network

分别模拟中性点经消弧线圈并电阻接地模式的金属性单相接地故障和经 100 Ω 电阻接地情况,及中性点经消弧线圈接地的某一支路的单相金属性接地故障和中性点绝缘方式的单相金属性接地故障,得到的零序电流波形图如图 2 所示。图中可见零序电流在首半波以高频信号为主,频率主要集中在 1 kHz~2 kHz,且在故障后半周期以后高频分量接近于零。从仿真的波形可直观地看出,故障支路与非故障支路的零序电流波形在故障发生的第一个周波内相似性低,而非故障支路零序电流波形之间的相似性很高^[10~12]。从单相接地的暂态过程来看,接地电流的暂态分量较其稳态值大很多倍,故障电压和故障电流暂态过程持续的时间很短,但却含有丰富的特征量。在一般情况下这时的暂态电容电流可以看成是非故障相和故障相之间电容充电电流之和,故障相放电电容电流频率高达数千赫,它是通过母线而流向故障点,衰减很快^[13]。而在非故障相中充电电容电流主要通过电源形成回路,衰减较慢,

振荡频率也较低。

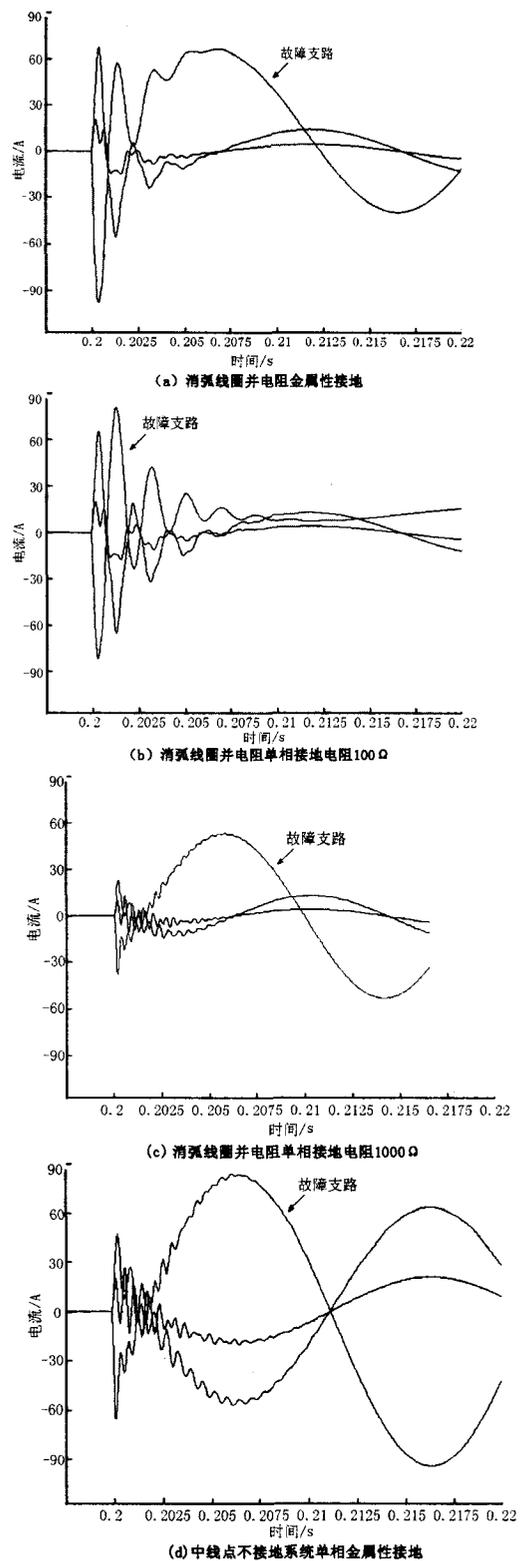


图 2 各种情况下单相接地故障时故障支路和非故障支路零序电流波形

Fig.2 Waves of fault branch and normal branch when single-phase-to-ground fault occurs in all kinds of conditions

2 灰色关联理论基础

灰色系统理论提出的灰色关联分析方法可在不完全的信息中, 对所分析的各因素, 通过一定的数据处理, 在随机的因素序列间, 找出它们的关联性。所谓灰色关联分析是基于行为因子序列的微观或宏观几何接近, 以确定和分析因子间的影响程度或因子对主行为的贡献测度而进行的一种分析方法。灰色关联是指事物之间不确定性关联, 或系统因子与主行为因子之间的不确定性关联。它根据因子之间发展态势的相似或相异程度来衡量因素间关联程度^[14]。

假设有两个数列, 一是 $X_i(t)$ (代表母序列或称为参考序列), 另外一个为 $X_j(t)$ (代表子序列或称为比较序列)。若两条曲线、分别代表两事物在某一变量 (时刻 t) 下的变化过程, 则相近性指包含曲线间零阶斜率差 $d_0 = X_i(t) - X_j(t)$ 信息的量。这样, 在传统灰色关联分析中, 关联系数定义如下

$$\xi_{ij}[X_i(t), X_j(t)] = \frac{\min |X_i(t) - X_j(t)| + \rho \max |X_i(t) - X_j(t)|}{|X_i(t) - X_j(t)| + \rho \max |X_i(t) - X_j(t)|} \quad (1)$$

式 (1) 中, 分辨系数设为 0.5, 即 $\rho = 0.5$ 。得到参考数列 X_i 和比较数列 X_j 的关联度, 定义如下:

$$r_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \xi_{ij}[X_i(t), X_j(t)] \quad (2)$$

其中: r_{ij} 表示参考数列 r_i 和比较数列 r_j 之间的关联程度。所有的 r_{ij} 组成一个矩阵, 称为关联度矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} 1 & r_{12} & r_{13} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & 1 & r_{23} & \cdots & r_{2n} \\ r_{31} & r_{32} & 1 & \cdots & r_{3n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{n1} & r_{n2} & r_{n3} & \cdots & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

3 基于灰色理论的小电流接地选线

传统意义上的单相接地故障综合选线, 不管是利用稳态信号还是暂态信号, 都是努力寻找故障支路和非故障支路的信号奇异性, 忽略了故障支路与非故障支路以及它们之间的关联性, 本文就是利用灰色关联理论找出支路间的关联性, 从而从关联性的强弱来找出故障支路。

公式 (1) 考虑的关联度只是考虑事物间静态的

差值之间的关联, 而从仿真的曲线可以看出, 如果从动态的角度考虑, 如从波形曲线的变化率和斜率入手, 利用曲线的几何形状变化趋势的相识性来进行关联度的计算。其中典型代表是绝对关联度:

$$\xi_{ij}[X_i(t), X_j(t)] = \frac{1}{1 + |X_i'(t) - X_j'(t)|} \quad (4)$$

则参考数列 X_i 和比较数列 X_j 的关联度:

$$r_{ij} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \frac{1}{1 + |X_i'(t) - X_j'(t)|} \quad (5)$$

假设变电站母线有 n 条出线, 假设标号分别为 1, 2, ..., n , 从馈线出口处零序电流互感器取得故障零序电流, 则各出线零序电流为 i_0, i_1, \dots, i_n 。基于灰色理论的小电流接地选线其基本做法就是故障发生时刻以后一个周期内对各支路进行高速采样, 可以用零序电压升高作为启动信号, 假定采样频率 12 kHz, 可获得各支路在不同时刻的同步采样电流序列,

$$i_0(t) = \{i_0(0), i_0(1), \dots, i_0(m)\},$$

$$i_1(t) = \{i_1(0), i_1(1), \dots, i_1(m)\},$$

...

$$i_n(t) = \{i_n(0), i_n(1), \dots, i_n(m)\}.$$

利用公式 (5) 计算各支路间的灰色关联度, n 支路需计算 C_n^2 次, 即可得获得类似于公式 (3) 的矩阵^[15],

$$R = \begin{bmatrix} 0 & r_{12} & r_{13} & \cdots & r_{1n} \\ r_{21} & 0 & r_{23} & \cdots & r_{2n} \\ r_{31} & r_{32} & 0 & \cdots & r_{3n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ r_{n1} & r_{n2} & r_{n3} & \cdots & 0 \end{bmatrix}$$

从矩阵 R 可知, 其中每一元素 r_{ij} 表示两支路间的关联程度, 所以可以计算出, 各支路与其他支路的平均关联度:

$$\bar{R}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1, j \neq i}^n r_{ij} \quad (6)$$

则计算出哪条支路平均关联度最小, 则该支路即为故障支路。

4 实验数据分析

在中性点经消弧线圈并电阻接地的方式下调节

消弧线圈在全补偿、过补偿 15%和欠补偿 15%情况下,支路 Line₃ 分别直接接地、经 200 Ω 和 100 Ω 接地得到九个关联矩阵,假设单相接地故障发生在

零序电压幅值的最大值时刻,利用公式(6)计算各支路的平均关联度,结果如表 1。

表 1 中性点经消弧线圈并电阻接地故障时各支路平均关联度计算结果

Tab.1 The average relation results of every branch in single-phase-to-ground fault occurs with neutral point grounded by arc-supression coil and a parallel resistance system

			\bar{R}_1	\bar{R}_2	\bar{R}_3	\bar{R}_4	\bar{R}_5	结果
消弧线圈并小电阻接地	全补偿	金属性接地	0.695 57	0.673 28	0.534	0.693 5	0.634 5	Line3
		接地电阻 200	0.776 4	0.783 4	0.456 9	0.739 4	0.761	Line3
		接地电阻 1k	0.702 3	0.783	0.538 2	0.719 8	0.706 5	Line3
	欠补偿	金属性接地	0.698 8	0.640 4	0.580 6	0.683 5	0.674 5	Line3
		接地电阻 200	0.739	0.734	0.483 6	0.735 8	0.727 8	Line3
		接地电阻 1k	0.710 4	0.735 5	0.521 1	0.753 4	0.712 2	Line3
	过补偿	金属性接地	0.696 78	0.658 2	0.566 3	0.689 2	0.690 4	Line3
		接地电阻 200	0.716 4	0.703 4	0.618 3	0.713 4	0.720 9	Line3
		接地电阻 1k	0.725 3	0.732 7	0.618 9	0.725 4	0.728 1	Line3

为了验证此算法的正确性,又分别在消弧线圈接地的实验,实验及计算结果如表 2、表 3 所示。接地和中性点不接地两种方式进行不同接地阻值

表 2 中性点经消弧线圈接地故障时各支路平均关联度计算结果

Tab. The average relation results of every branch in single-phase-to-ground fault occurs with neutral point grounded by arc-supression system

			\bar{R}_1	\bar{R}_2	\bar{R}_3	\bar{R}_4	\bar{R}_5	结果
消弧线圈接地	全补偿	金属性接地	0.585 7	0.574 5	0.434	0.572 2	0.608 5	Line3
		接地电阻 200	0.684 6	0.653 8	0.481 2	0.660 9	0.632 5	Line3
		接地电阻 1 k	0.701 5	0.692 6	0.534 7	0.692 3	0.686 7	Line3
	欠补偿	金属性接地	0.678 1	0.668 1	0.520 1	0.665 3	0.645 7	Line3
		接地电阻 200	0.673 7	0.681 9	0.503 2	0.681 4	0.690 3	Line3
		接地电阻 1 k	0.705 7	0.715 4	0.572 3	0.718 2	0.706 5	Line3
	过补偿	金属性接地	0.663	0.648 1	0.572 5	0.674 5	0.681 7	Line3
		接地电阻 200	0.687 5	0.645 1	0.566 8	0.640 3	0.666 2	Line3
		接地电阻 1 k	0.636 3	0.677 4	0.602 3	0.678 4	0.689 3	Line3

表 3 中性点绝缘接地故障时各支路平均关联度计算结果

Tab.3 The average relation results of every branch in single-phase-to-ground fault occurs with neutral-isolated system

			\bar{R}_1	\bar{R}_2	\bar{R}_3	\bar{R}_4	\bar{R}_5	结果
绝缘	金属性接地	0.578 9	0.530 4	0.467 8	0.570 8	0.592 9	Line3	
	接地电阻 200	0.563 8	0.518 7	0.493 4	0.576 5	0.566 8	Line3	
	接地电阻 1k	0.585 4	0.583 9	0.513 7	0.593 5	0.601 8	Line3	

从表 2、表 3 可以看出,无论是消弧线圈接地还是中性点绝缘电网,通过灰色关联相关算法,仿真计算结果都显示故障支路与非故障支路有较大的差距,而且无一错选,并且从仿真的结果看出,随着接地阻值的增加,故障支路与非故障支路的关联

程度也有所增加。

5 结论

本文根据配电系统单相接地故障的特征和零序电流波形故障支路和非故障支路关联程度的强弱,

首次提出了基于灰色理论的小电流接地选线方法, 并利用 PSCAD, Matlab 仿真验证了其正确性和可行性。该方法以零序电压为启动信号, 通过高速 AD 采样和简单的运算就能获得结果, 它不象传统算法需要比较零序电压和零序电流的相位关系, 且计算量小, 大大改进了以往基于暂态理论的选线方法, 具有很大的可行性。从仿真计算的结果表明采用, 在各种条件下都能快速准确的得到各支路间的平均关联度, 并且此方法已经在 6 kV 和 10 kV 的中性点经消弧线圈接地的配电网有初步应用, 反馈情况表明, 该方法实现的选线准确性好, 速度快, 是一种切实可行的办法。

参考文献

- [1] 要涣年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
YAO Huan-nian, CAO Mei-yue. Power System Oscillation Grouding[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.
- [2] 郝金陵, 袁振海. 基于小波-神经网络的小电流接地选线的研究[J]. 电测与仪表, 2007, 44(11): 1-5.
HAO Jin-ling, YUAN Zhen-hai. Study on Line Selection of Grounded Fault in Non-effectively Earthed System Based on Wavelet & Neural Network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2007, 44(11): 1-5.
- [3] 陈炯聪, 齐郑, 杨奇逊. 基于模糊理论的小电流单相接地选线装置[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(8): 88-91.
CHEN Jiong-cong, QI Zheng, YANG Qi-xun. A Fault Line Detection Device for the Non-solidly Grounded System Based on Fuzzy Set Theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(8): 88-91.
- [4] 张帆, 潘贞存, 张慧芬, 等. 基于零序电流暂态极大值的小电流接地选线新判据[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(4): 45-48.
ZHANG Fan, PAN Zhen-cun, ZHANG Hui-fen, et al. New Criterion of Fault Line Selection in Non-solidly Earthed Network Based on the Maximum of Zero Sequence Transient Current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(4): 45-48.
- [5] 薛永端, 冯祖仁, 徐丙垠, 等. 基于暂态零序电流比较的小电流接地选线研究[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(9): 48-53.
XUE Yong-duan, FENG Zu-ren, XU Bing-yin, et al. Earth Fault Protection in Non-solidly Earthed Network Based on Transient Zero Sequence Current Comparison[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(9): 48-53.
- [6] 贾清泉, 杨以涵, 杨奇逊. 应用证据理论实现配电网单相接地故障选线保护[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(21): 35-38.
JIA Qing-quan, YANG Yi-han, YANG Qi-xun. Application of DS Evidence Theory to Single-phase-to-ground Fault Line Detection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(21): 35-38.
- [7] 王艳松, 张萌萌. 基于暂态分量的配电网单相接地故障选线新方法[J]. 中国石油大学学报, 2006, 30(3): 135-139.
WANG Yan-song, ZHANG Meng-meng. A Novel Method of Fault Line Selection by Transient Component for Single-phase to Ground Fault in Distribution Networks[J]. Journal of China University of Petroleum, 2006, 30(3): 135-139.
- [8] 吴振升, 杨学昌, 桂俊峰. 基于分形的配电网接地故障分支识别方法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2007, 47(4): 470-473.
WU Zhen-sheng, YANG Xue-chang, GUI Jun-feng. Distinguishing Ground Faults in Different Feeders of Power Distribution Networks Using Fractal Information[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2007, 47(4): 470-473.
- [9] 杨松林, 王梦恕, 周晓敏. 灰色关联分析在竖井冻结壁/窗口事故处理中的应用[J]. 煤炭学报, 2005, 30(4): 467-471.
YANG Song-lin, WANG Meng-shu, ZHOU Xiao-min. Application of Grey Correlative Analysis for Disposal of the Freezing Wall/window Accident[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(4): 467-471.
- [10] 杨晓辉, 蔡旭. 分形理论在中压电网故障辨识中的应用[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(4): 59-64.
YANG Xiao-hui, CAI Xu. Application of Fractal Theory in the Fault Classification for Distribution Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(4): 59-64.
- [11] 赵慧梅, 张保会, 段建东, 等. 一种自适应捕捉特征频带的配电网单相接地故障选线新方案[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 41-46.
ZHAO Hui-mei, ZHANG Bao-hui, DUAN Jian-dong, et al. A New Scheme of Faulty Line Selection with Adaptively Capturing the Feature Band for Power Distribution Networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 41-46.
- [12] 王崇林, 梁睿, 刘建华, 等. 基于变耦电抗法的新型消弧线圈[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(20): 81-85.
WANG Chong-lin, LIANG Rui, LIU Jin-hua, et al. New Type Arc Suppression Coil Based on Changing Magnetic Coupling to Adjust Inductance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(20): 81-85.
- [13] 陈奎, 唐轶, 孟庆海. 谐振接地电网单相接地故障选线研究[J]. 中国矿业大学学报, 2006, 35(1): 104-108.

可以得到:根据本文算法,变压器励磁涌流时的波形相关系数绝对值不大于0.6;变压器内部故障电流时的波形相关系数绝对值不小于0.8.这样就可以判断出励磁涌流和内部故障电流。

5 结论

文章对变压器励磁涌流和内部故障进行深入研究,在以前的波形相关系数理论的基础上,提出了一种最大代数和法来确定波形相关数据窗的起始数据点。并充分利用该数据窗波形的大小、形状和变化率等多种涌流特征量,进一步确定波形相关系数的计算表达式。本文的算法在理论上说,可快速正确、灵敏地识别各种形式的励磁涌流,模拟算例已证实了这点。

参考文献

- [1] 何奔腾,徐习东.波形比较法变压器差动保护原理[J].中国电机工程学报,1998,18(6):395-398.
HE Ben-teng,XU Xi-dong.Protection Based on Wave Comparison[J]. Proceedings of the CSEE, 1998,18(6): 395-398.
- [2] 林湘宁,刘世明,等.几种波形对称法变压器差动保护原理的比较研究[J].电工技术学报,2001,16(4):44-49.
LIN Xiang-ning, LIU Shi-ming, et al. Study on Comparisons Among Some Waveform Symmetry Principle Based Transformer Differential Protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001,16(4):44-49.
- [3] 毕大强,张项安,等.基于非饱和区域波形相关分析的励

磁涌流鉴别方法[J].电力系统自动化,2006,30(6):16-20.

- BI Da-qiang,ZHANG Xiang-an, et al.Correlation Analysis of Waveforms in Non-saturation Zone Based Method to Identify Magnetizing Inrush in Transformer[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(6): 16-20.
- [4] 许正亚.几个励磁涌流新判据分析[J].电力自动化设备,2002,22(1):23-28.
XU Zheng-ya. Analysis on Several New Criteria of Inrush Current[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002,22(1):23-28.
- [5] 宋芸,乐秀璠,等.励磁涌流鉴别方法在变压器保护中的应用[J].继电器,2002,30(10):85-89.
SONG Yun,LE Xiu-fan, et al.The Application of Inrush Current Identification Method in Transformer Protection[J].Relay, 2002, 30(10):85-89.
- [6] 林湘宁,刘沛,等.利用改进型波形相关法鉴别励磁涌流的研究[J].中国电机工程学报,2001,21(5):56-60.
LIN Xiang-ning,LIU Pei, et al.Study for Identification of the Inrush Based on Improved Correlation Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(5):56-60.

收稿日期:2008-05-28; 修回日期:2008-07-04

作者简介:

杜玲(1982-),女,研究生,从事数学与信息科学教学工作;E-mail: duling000@126.com

李波(1981-),男,硕士研究生,从事电力系统继电保护工作。

(上接第21页 continued from page 21)

CHEN Kui,TANG Yi, MENG Qing-hai. Detecting Single-phase-to-ground Faulted Feeder in Resonant Grounded Power Distribution System[J]. Journal of China University of Mining &Technology, 2006,35(1): 104-108.

- [14] 吕干云,程浩忠,翟海保,等.基于改进灰色关联分析的变压器故障识别[J].中国电机工程学报,2004,24(10):121-126.
Lü Gan-yun, CHENG Hao-zhong, ZHAI Hai-bao, et al. Fault Diagnosis of Power Transformer Based on Improved Grey Relation Analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2004,24(10):121-126.
- [15] 张慧芬,潘贞存,田质广.基于可辨识矩阵的单相接

地故障选线新方法[J].中国电力,2006,39(11):33-36.

ZHANG Hui-fen, PAN Zhen-chun, TIAN Zhi-guang. Discernable Matrix Method Based Method for Selecting Single Phase Grounding Feeder[J]. Electric Power, 2006,39(11):33-36.

收稿日期:2008-05-18; 修回日期:2008-06-30

作者简介:

梁睿(1981-),男,讲师,博士研究生,研究方向为供电安全、智能电器在电力系统的应用;E-mail: cumtlr@126.com

王崇林(1957-),男,博士,教授,博士生导师,从事供电安全、配网自动化等方面的研究。