

电缆网故障选线方法的研究

苑 舜^{1,2}, 张 磊¹, 蔡志远¹, 宋云东³

(1. 沈阳工业大学电气工程学院, 沈阳 110870; 2. 国家电监会东北监管局, 沈阳 110006;
3. 特变电工沈阳变压器集团有限公司, 沈阳 110025)

摘要: 对电缆网故障选线方法的研究一直是配电网故障研究的重点。笔者提出一种基于小波分析的暂态群体比幅比相法为主、暂态能量法为辅的故障选线法, 并运用 EMTP 数字仿真工具搭建了一个 10 kV 电缆网配电系统模型, 进行了仿真实验。仿真结果证明该法能够准确地识别故障发生时刻, 不受电压故障时刻、接地电阻大小等因素对故障选线的影响, 抗干扰能力强, 对故障线路识别率高, 仿真图形中具有明显的故障特征信息, 而且故障选线方法的主判据与辅判据具有良好的融合性, 大大提高了故障选线的准确性。

关键词: 小波分析; 故障选线; 暂态群体比幅比相; 暂态能量; 故障特征

中图分类号: TM247 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1609(2011)01-0043-06

A New Fault Line Selection Method for Cable Network

YUAN Shun^{1,2}, ZHANG Lei¹, CAI Zhi-yuan¹, SONG Yun-dong³

(1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China;

2. Northeast Bureau of State Electricity Regulatory Commission of China, Shenyang 110006, China;

3. TBEA Shenyang Transformer Group Co., Ltd., Shenyang 110025, China)

Abstract: Research of cable network fault line selection method has been the focus in the fault study of distribution system. Based on the wavelet analysis, we proposed a new fault line selection method by employing the comparison method of transient population amplitudes and phases with supplementation of the transient energy method, established a 10 kV cable network distribution system model by adopting EMTP digital simulation tools, and performed a simulation experiment. Simulation results show that the present method can accurately catch the fault moment without the influences of such factors as voltage fault time and grounding resistance on selection of fault line. Its anti-interference ability and recognition rate of the fault lines are improved, and the fault feature information is obvious in the simulation graphics. The main criteria and the supplementary criterion for fault line selection can fuse very well. Hence, the accuracy of fault line selection is improved significantly.

Key words: wavelet analysis; fault line selection; comparison of transient population amplitudes and phases; transient energy; fault feature

0 引言

随着电网中电缆线路比例不断上升, 配电网发生单相接地故障的故障零序电容电流不断增大, 长时间运行易使故障扩大成两点或多点接地短路, 弧光接地, 还会引起全系统过电压, 进而损坏设备, 破坏系统安全运行^[1]。实际电网中发生单相接地故障的几率最高, 占总故障的 80%左右^[2], 配电系统出现

的不同故障中, 大多数故障都是由单相接地故障演变而来的^[3]。为了解决系统电容电流过大所带来的诸多不利影响的问题, 中国电力系统对配电网电容电流进行了全面治理, 大多采用消弧线圈进行补偿, 对限制配电网过电压, 促使接地电弧可靠熄灭起到了很大的作用, 但也带来了一些不利的方面, 电网经消弧线圈补偿后, 故障点的残流变得非常小, 以至于线路的零序电流很小, 使得微机故障选线装置正确选线面临更大的挑战^[4]。

然而在系统发生故障瞬间,故障信号的暂态量中含有丰富的故障特征信息^[5],充分利用好这些信息无疑会大大地提高故障选线的准确率。从小波分析工具的时频局部化特点来看,小波对信号的奇异性检测非常灵敏,而且能够有效地提取各频段的故障暂态信号,很好地解决了暂态故障特征信息提取的可靠性问题,使得有条件对暂态故障信号进行更为深入的分析,准确地从中提取有利于故障选线的特征,从而提高故障选线的准确率。

1 10 kV 电缆网配电系统模型的建立

10 kV 电缆网配电系统模型见图 1,其中系统母线具有 4 条出线,中性点经消弧线圈接地。

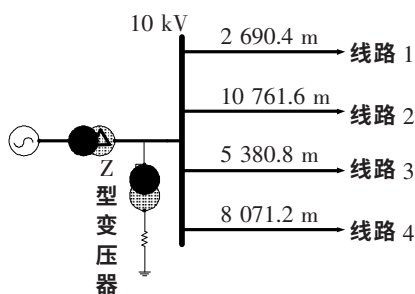


图 1 10 kV 电缆网配电系统模型

Fig.1 The model of 10 kV cable net distribution systems

EMTP 数字仿真工具搭建的 10 kV 电缆网配电系统 ATPDraw 电路图^[6-7]见图 2。电源为无穷大电源,配电变压器为 66 kV/10 kV 理想变压器,容量为 31 500 kV·A,采用 Y/△连接方式,△侧采用 Z 型变

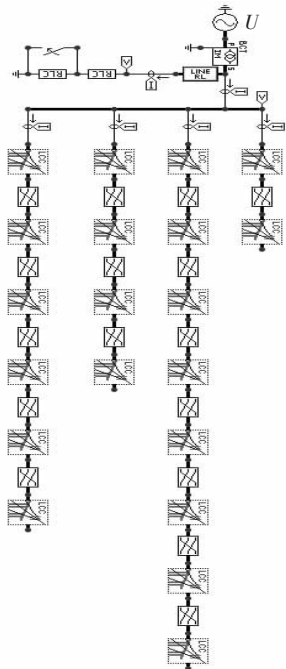


图 2 10 kV 电缆网配电系统 ATPDraw 电路图

Fig.2 Simulation model of EMTP

压器模拟中性点,采用 5%过补偿方式。系统母线上具有 4 条出线,长度分别为 2 690.4 m、10 761.6 m、5 380.8 m、8 071.2 m,分别由若干个 LCC 模块组成,每个 LCC 模块代表缆长 1 345.2 m,及其对应的电容电流为 2 A。

2 两种选线方法的介绍

2.1 群体比幅比相法

群体比幅法是为了克服小电流接地单相接地电容电流随机性,避免接地电阻、运行方式、电压水平和负荷的影响而提出的。通过比较前 3 个最大电流的相位,来确定故障线路(和其他 2 条线路相反),或母线接地(3 个电流同向),简称为 3C 方案^[8-9]。

群体比幅比相的原理是首先进行零序电流幅值的比较,当系统中任何一条线路发生单相接地故障时,故障线路上的零序电流等于非故障线路电流之和,即故障线路零序电流幅值最大,笔者从总线路中选出 3 个幅值较大的作为候选。3 个幅值较大的零序电流按幅值大小顺序排列分别为 I_1, I_2, I_3 。然后再在此基础上进行相位比较,选出电流方向与其他线路相位相反的线路,该零序电流所在的线路即为故障线路^[10],否则为母线故障。

该法在一定程度上克服了 CT 等不平衡带来的影响,因排队后去掉了幅值小的电流,在一定程度上避免了干扰造成的相位误差,克服了受系统运行方式、长短线、接地电阻的影响,是较理想的方式。但是当系统的中性点经消弧线圈接地时,由于消弧线圈对故障线路电流的补偿作用,此时群体比幅比相算法就不适用了,这使稳态的群体比幅比相算法的使用受到限制。

2.2 能量法

在中性点经消弧线圈接地系统中,系统发生单相接地故障后,接地点的电容电流得到消弧线圈感性电流的补偿,故障线路零序电流和健全线路零序电流的大小和方向有可能趋于一致,这就影响了稳态选线方法的准确性。但由于电网中的电容和电感存储能量而不消耗能量,则零序电流与电压乘积在整数倍工频周期内的积分值就是零序电流中阻性分量所消耗的能量。此能量具有零序阻性能量的特点,可以作为选线的判据^[11]。

定义线路 j 的零序暂态能量为

$$W_j = \int_0^T u_0 i_0 dt \quad j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式(1)中, n 为系统线路条数; u_0 为线路始端的零序电压暂态量; i_0 为第 j 条线路零序电流暂态量; T 为电网工频周期。

根据零序电流的参考方向和零序阻性电流的特点, 可得故障线路的能量为负, 健全线路的能量为正, 且故障线路的能量绝对值最大。因此可以根据能量大小或能量方向判别法来进行故障选线^[12]。然而中性点经消弧线圈接地系统在发生单相接地故障时, 由于故障线路零序电流得到消弧线圈感性电流的补偿, 可能出现倒相, 使得基于暂态能量方向法判别失效。

此法的优点是不受负荷谐波源和暂态过程的影响, 从理论上解决了传统方法选线准确率的问题; 此外接地过渡电阻越大, 利用暂态能量法的保护裕度越大。因此, 该方法在线路末端过渡电阻较大的情况下能准确地选线。能量法的缺点是当过渡电阻很小, 尤其是金属性接地故障时, 该法可能会导致误判, 而且受噪声的影响较大, 影响接地选线的灵敏度。

3 新型选线方法的研究

3.1 选线方法的提出

单相接地故障产生的暂态电流是稳态电流的几倍到几十倍, 利用暂态电流信号的选线方法灵敏度较高且不受消弧线圈的影响。中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障将经历一个复杂的暂态过渡过程, 其暂态特征蕴含了丰富的故障信息。因此, 对暂态信号的识别、处理和利用是实现暂态原理选线以克服稳态选线方法不足的关键所在。传统的信号分析是建立在傅里叶变换的基础之上的, 由于傅里叶分析使用的是一种全局变换, 要么完全在时域, 要么完全在频域, 因此无法表述信号的时频局部性质, 而这种性质恰恰是非平稳信号最根本、最关键的性质。

小波分析作为一种新型的时频分析工具, 提供了解决问题的办法。小波分析在时域、频域同时具有良好的局部化性质^[13], 使得它比傅里叶分析及短时傅里叶分析更为精确可靠, 并使得具有奇异性、瞬时性的故障信号检测也变得更加准确。它的出现让笔者有条件对暂态故障信号进行更为深入的分析, 准确地从中提取有利于故障选线的特征^[14-15], 从而提高故障选线的准确率。

笔者基于群体比幅比相法和能量法原理, 提出一种基于小波分析的暂态群体比幅比相法为主, 暂态能量法为辅的选线方法。通过大量的仿真研究工作, 发现暂态群体比幅比相法对低阻接地故障选线的成功率极高, 对高阻接地故障而言, 易受电压接地时刻及干扰等因素的影响, 会导致误判。然而暂态能量大小法弥补了这一点缺陷, 当系统发生高阻接地

故障时, 故障线路的暂态能量最大, 且在幅值上相对暂态群体比幅比相法大的多, 选线率高, 因此可以作为判断系统出线故障的辅助判据。另外, 暂态能量方向法对母线接地故障的选线准确率极高, 可作为系统母线故障的辅助判据。这样对于中性点经消弧线圈接地系统而言, 就避免了倒相对故障选线的误判问题。

该法的主辅判据具有良好的融合性和互补性, 不受电压故障时刻、接地电阻大小及中性点接地方式的影响, 可以作为系统故障选线的一种有效判据。

3.2 故障选线数据的提取及故障时刻的确定

在故障发生前, 笔者通过实时采集作为选线启动条件的零序电压以及作为故障分析条件的零序电流数据, 并以规定时间段数据依次存储在存储器中供计算之用, 考虑到存储器内存大小的有限性, 笔者将计算过的无故障信息数据予以擦除, 这样就可以不停地循环检测系统数据。通过零序电压是否超过规定的阈值来规定故障选线的启动条件, 为了更加准确地辨识系统是否发生故障, 将根据实际系统对作为故障选线启动条件的零序电压设置 2 个阈值, 当系统零序电压超过第一个阈值时, 将此刻之前的 2 个工频周期数据和之后的 4 个工频周期数据提取出来, 并再次计算所提取数据的零序电压值是否超过第二个阈值, 一旦超过, 就启动故障选线装置提取故障零序电流数据, 并进行故障选线分析。

通过上述分析提取到了故障零序电流数据, 接下来将对故障发生时刻进行确定。小波分析法对故障时刻的奇异点的检测非常有效, 但对于高阻接地故障而言, 尤其是对电压过零并高阻接地故障, 由于暂态信息量少, 小波系数值小, 小波重构时易受到边界效应的影响, 因此对奇异性检测十分不利, 难以准确确定故障发生时刻。为了消除边界效应的影响, 笔者将提出一种算法可以精确地解决故障发生时刻的准确性问题。设零序电压值超过第一个阈值所对应的采样点为 ω_1 , 其对应时间为 t_1 。利用 db4 小波对系统第一条线路的零序电流进行 4 层分解, 并提取 t_1 时刻前后各半个工频周期时间内的第一尺度系数, 进行模值取大, 将其最大值对应的采样点记为 ω_2 , 那么故障发生时刻 $t_2 = 0.000\ 05 \times (\omega_1 + \omega_2 - 199) \text{s}$ 。

3.3 选线步骤

1) 利用 db4 小波将故障信号进行 4 层分解, 确定系统发生接地故障的时刻, 提取 4 条线路故障时刻前后各半个工频周期上的各尺度系数。

2) 对上述所提取的各条线路的第一尺度系数求和, 利用暂态幅值大小法选出幅值和最大的 3 条线

路,再对所选的 3 条线路的第四尺度系数进行相位比较,利用故障线路与非故障线路相位关系选出故障线路,相位相反则判为故障线路,相位相同则判为母线故障。

3) 计算 4 条出线的能量,利用暂态能量大小法对暂态群体比幅比相法所判的故障出线进行验证,能量最大的为故障线路;利用暂态能量方向法对暂态群体比幅比相法所判的母线故障进行验证,方向相同则判为母线故障。

4) 比较暂态群体比幅比相法与暂态能量法的选线结果,若二者选线的结果一致则选线成功,否则选线失败。其故障选线流程图见图 3。

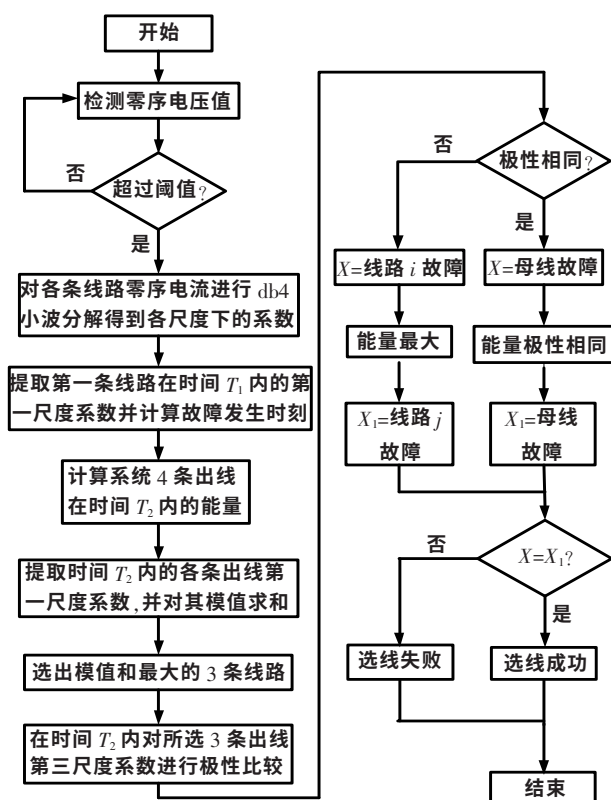


图 3 故障选线流程图

Fig. 3 The flow chart of faulty line selection

4 仿真实验分析

T_1 表示零序电压值超过设定的第一个阈值时所对应时刻的前后各半个工频周期时间; T_2 表示故障发生时刻前后各半个工频周期的时间; $i=1,2,3,4;j=1,2,3,4$ 。

仿真实例 1: 系统在消弧线圈过补偿 5% 的情况下,第一条出线 A 相在距离母线 2 690.4 m 处发生接地故障,即线路的末端发生故障,电压过零,故障时刻设定为 0.02 666 s,负荷功率因素为 90%,过渡电阻为 10 Ω 。在时间 T_2 内,利用暂态幅值大小法选

出的 3 条出线及第四尺度高频系数见图 4, 能量见图 5。

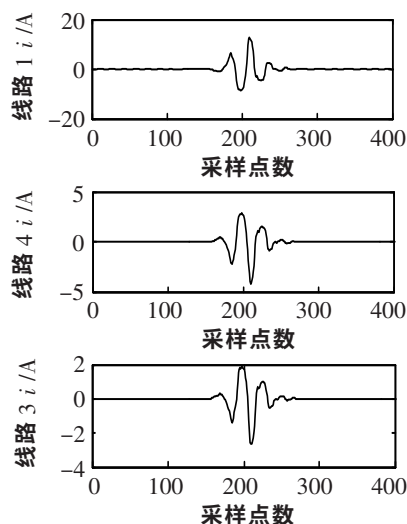


图 4 第四尺度高频系数

Fig.4 The high frequency coefficients of the fourth measure

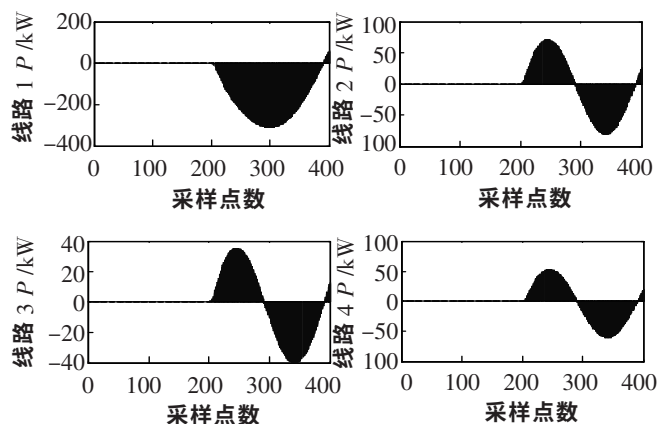


图 5 系统各条出线暂态能量

Fig.5 The transient energy of the different stages

A 相电压在 0° 经 10 Ω 过渡电阻发生接地故障时,从图 4 明显看出线路 1 与线路 4、线路 3 的极性相反,图 5 看出线路 1 的能量最大,而且线路 1 与其他 3 条线路的能量变化趋势不一致,因此确认线路 1 发生故障。

仿真实例 2: 系统在消弧线圈过补偿 5% 的情况下,第一条出线 C 相在距离母线 8 071.2 m 处发生接地故障,故障时刻设定为 0.028 33 s,负荷功率因素为 90%,过渡电阻为 5 000 Ω 。在时间 T_2 内,利用暂态幅值大小法选出的 3 条出线及第四尺度高频系数见图 6,能量见图 7。

C 相电压在 90° 经 5 000 Ω 过渡电阻发生接地故障时,从图 6 可以明显地看出线路 2 的极性与线路 3、线路 4 的极性相反,从图 7 可以看出线路 2 的能量最大,而且线路 2 与其他线路能量的变化趋势不一致,因此确认线路 2 发生故障。

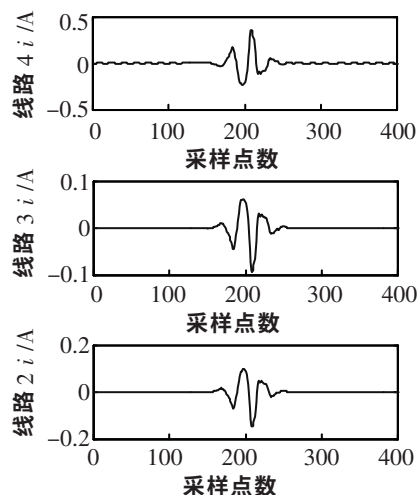


图6 第四尺度高频系数

Fig.6 The high frequency coefficients of the fourth measure

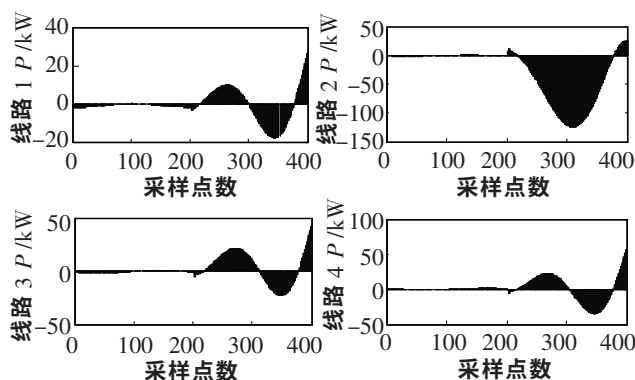


图7 第四尺度高频系数

Fig.7 The high frequency coefficients of the fourth measure

仿真实例3: 系统在消弧线圈过补偿5%的情况下, 母线B相发生接地故障, 故障时刻设定为0.031 67 s, 负荷功率因素为90%, 金属性接地。在时间 T_2 内, 利用暂态幅值大小法选出的3条出线及第四尺度高频系数见图8, 能量见图9。

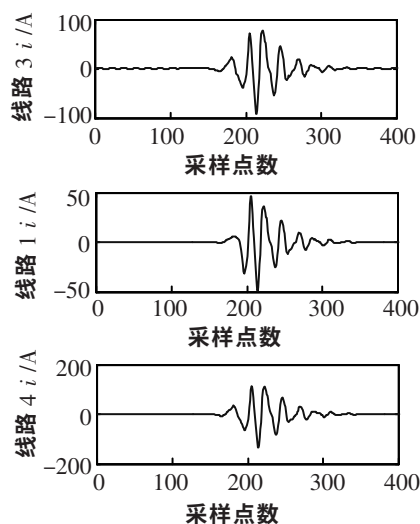


图8 第四尺度高频系数

Fig.8 The high frequency coefficients of the fourth measure

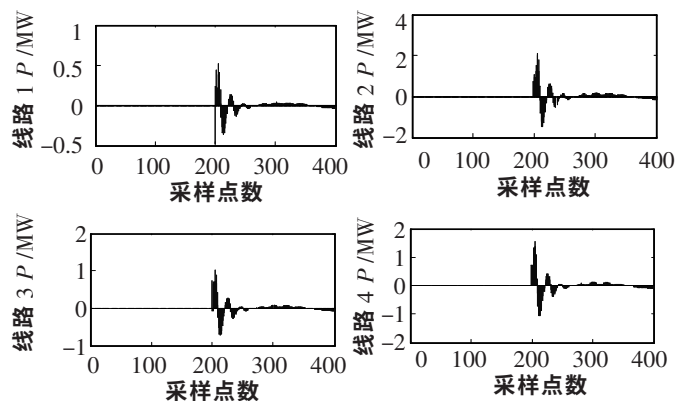


图9 第四尺度高频系数

Fig.9 The high frequency coefficients of the fourth measure

电压在 60° 发生金属性接地故障时, 从图8可明显地看出所选的线路3、线路1和线路4的极性相同, 从图9可看出4条线路的能量变化趋势趋向一致, 根据对数据的分析, 4条线路的能量均为负值, 因此确认母线发生故障。

5 结论

通过对两种方法的分析研究, 并在此基础上提出了基于小波分析暂态群体比幅比相法为主, 暂态能量法为辅的新型选线方法。通过大量的仿真实验结果分析, 确认该方法具有以下优点:

- 1) 该方法相对稳态选线法稳态量小所造成的选线困难而言, 能够充分利用丰富的故障暂态信息进行选线。
- 2) 能够克服电压过零附近发生接地故障和接地过渡电阻大小等因素给故障选线带来的困难。
- 3) 选线方法的主判据与辅助判据具有良好的融合性, 在仿真实验图形上二者又具有明显的走线趋势, 易于对比。
- 4) 从暂态能量图中可看出系统各条线路故障信号的能量变化趋势, 即使故障信号受到干扰而导致选线误判, 也可以从能量图中的走线趋势上判出故障线路。

参考文献:

- [1] 束洪春. 配电网故障选线 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.
SHU Hong-chun. Fault line selection of distribution power system [M]. Beijing: China Machine Press, 2008.
- [2] 崔国亮, 宋巍, 张福生. 利用暂态特征分析小电流接地故障选线的方法[J]. 机电工程技术, 2007(12): 76.
CUI Guo-liang, SONG Wei, ZHANG Fu-sheng. Study on faulty circuit selection in small current neutral grounding power system based on transient characteristic [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2007 (12): 76.

- [3] 闫晓茹. 电缆故障选线与定位方法的研究[D]. 西安:西安科技大学, 2005.
YAN Xiao-ru. Study of cable fault line selection and location method[D]. Xi'an: Xi'an University of Science and Technology, 2005.
- [4] 李景禄. 实用配电网技术[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2006.
LI Jing-lu. Practical distribution network technology[M]. Beijing: China Water Power Press, 2006.
- [5] 周海玲. 小波分析在电力系统故障选线中的应用[D]. 济南:山东大学, 2007.
ZHOU Hai-ling. Application of wavelet analysis power system fault line selection[D]. Jinan: Shandong University, 2007.
- [6] 韩丽娜, 杨志坚, 李 虎. ATP-EMTP 在 500 kV 配电系统中的应用[J]. 电测与仪表, 2005(12): 16.
HAN Li-na, YANG Zhi-jian, LI Hu. Application of electromagnetic transients program in the power system [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2005 (12): 16.
- [7] DOMMEL H W. EMTPT heory book[M]. USA: Bonneville Power Administration, 1986.
- [8] 沈洪涛. 基于故障暂态信息的小电流接地系统接地选线新方法的研究[D]. 济南:山东大学, 2005.
SHEN Hong-tao. Study on the new method of grounding line based on fault transient information of small current grounding system[D]. Jinan: Shandong University, 2005.
- [9] 王 凤. 配电系统接地故障的信号注入检测法的分析与研究[D]. 保定:华北电力大学, 2007.
WANG Feng. Analysis and research of the signal distribution system ground fault of signal injection detection[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2007.
- [10] 吴艳辉. 基于零序电流基波暂态分量极性的小电流单相接地故障选线方法 [J]. 中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十四届学术年论文集(中册), 2008: 1532-1535.
WU Yan-hui. Small current transient single-phase fault line selection method based on zero sequence current component of fundamental polarity [C]// China's Electric Power System and Automation College Twenty-fourth Annual Meeting Proceedings, 2008: 1532-1535.
- [11] 何奔腾, 胡为进. 能量法小电流接地选线原理[J]. 浙江大学学报(自然科学版), 1998, 32(4): 451-456.
HE Ben-teng, HU Wei-jin. A new principle to detect the grounded line in a neutral point indirectly grounded power system based on the energy function[J]. Journal of Zhejiang University(Natural Science), 1998, 32(4): 451-456.
- [12] 吴军基, 杨 敏, 杨 伟, 等. 暂态高频分量能量法小电流接地故障选线[J]. 电力自动化设备, 2004(6): 14-15.
WU Jun-ji, YANG Min, YANG Wei, et al. Fault line detection using transient high frequency energy for small current grounding system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(6): 14-17.
- [13] ALIN A. Subband and wavelet transforms [M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1996.
- [14] CHAARI O, MNICHEL M, BROUAYE F. A new tool for the resonant grounded power distribution system relaying[J]. IEEE Trans. on PWRD, 1996, 11(3): 1301-1308.
- [15] BI Yan-qiu, ZHAO Jian-guo, ZHANG Da-hai. Single-phase-to-ground fault feeder detection based on transient current and wavelet packet[C]//2004 International Conference on Power System Technology, Singapore, 2004: 936-940.

苑 舜(1963—),男,教授,博士生导师,主要从事电力设备管理与诊断技术等方面的研究。

(上接第 42 页)

- WU Tian-ming, XIE Xiao-zhu, PENG Bin. Matlab power system design and analysis [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2004.
- [10] 方春恩, 林 蔓, 李 伟, 等. 基于 WLMS 算法的高压断路器可控开断故障电流研究 [J]. 高压电器, 2009, 45(6): 40-43.
FANG Chun-en, LIN Man, LI Wei, et al. Investigation on controlled fault current interruption of high voltage circuit breaker based on WLMS algorithm [J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(6): 40-43.
- [11] 林湘宁, 刘 沛. 基于相关分析的故障序分量选相元件 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 36-41.
LIN Xiang-ning, LIU Pei. A superimposed phase selector based on symmetrical components and correlation analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 36-41.
- [12] 索南加乐, 张健康. 故障分量提取及故障选相的新方法 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(16): 45-49.
SUONAN Jia-le, ZHANG Jian-kang. A new method for fault components extraction and fault phases selection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(16): 45-49.
- [13] 成敬周, 张 举. 一种适用于暂态保护的模糊故障选相新方案[J]. 继电器, 2004, 22(11): 4-8.
CHENG Jing-zhou, ZHANG Ju. A novel scheme to fuzzy faulted phase selection applied to transient protection [J]. Relay, 2004, 22(11): 4-8.
- [14] 段建东, 张保会. 基于暂态量的超高压输电线路故障选相[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 3-5.
DUAN Jian-dong, ZHANG Bao-hui. Transient-based faulty phase selection in EHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 3-5.
- [15] KEZUNOVIC M, RIKALO I. Detect and classify faults using neural nets [J]. 44 IEEE Computer Applications in Power, 1996(12): 42-47.
- [16] OMAR A, YOUSSEF S. New algorithm to phase selection based on wavelet transforms power delivery [J]. IEEE Transactions on Volume, 2002(10): 908-914.

母秀清(1985—),女,硕士研究生,研究方向为智能化电器。

方春恩(1975—),男,博士,副教授,主要从事智能化电器方面研究。