

The Research of a Method to Select Fault Line for Power Distribution Networks Based on Transient Quantity Mutation

Lei Zhao, Jijiang Song

School of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo Shandong
Email: zhaoleisdg@163.com

Received: Oct. 7th, 2015; accepted: Oct. 26th, 2015; published: Oct. 29th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

For the single-phase grounding fault in the power distribution, a method to select fault line was proposed in the paper. Firstly, wavelet decomposition was used to transient zero-sequence current of each line after fault; then, the percentage of the low frequency energy to the total energy, which were calculated by the wavelet coefficients, was used to distinguish strong or weak fault; finally, the fault line was selected by comparing the polarities of the wavelet packet decomposition coefficient in the strong fault situation, but comparing the transient zero-sequence energy in the weak fault situation. The MATLAB simulation results show that the method is proposed has good ability to carry out the fault line. The criterion can keep the high reliability when the circuit is bus-bar, high resistance or voltage zero grounding.

Keywords

Wavelet Electric Current Grounding System, Wavelet Packet Decomposition, Transient Zero-Sequence Energy

基于暂态特征突变量的配电网故障选线方法研究

赵磊, 宋吉江

山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博
Email: zhaoleisdg@163.com

收稿日期: 2015年10月7日; 录用日期: 2015年10月26日; 发布日期: 2015年10月29日

摘要

本文对于配电网常见的单相接地故障, 提出了一种基于暂态特征突变量的综合选线方法。首先, 对故障后各线路的暂态零序电流进行小波分解; 然后, 由小波分解系数求得低频能量占总能量的百分比来区分为强故障或弱故障; 最后, 在强故障情况下采用小波包系数极性法, 在弱故障情况下采用暂态零序能量法来选择故障线路。通过MATLAB进行了大量的仿真实验, 结果表明该方法具有很好的选线能力, 即使发生母线故障、相电压过零故障, 高阻接地故障时也能正确选线。

关键词

小电流接地系统, 小波包分解, 暂态零序能量

1. 引言

我国中低压配电网常采用小电流接地方式, 主要有中性点不接地、中性点经电阻接地、中性点经消弧线圈接地三种方式[1]。对于小电流接地系统的单相接地故障, 许多学者提出了许多基于稳态工频分量的选线方法[2][3], 但当中性点经消弧线圈接地时会出现故障线路零序电流的方向与中性点的其他接地方式相反, 而使得上述方法不再适用。通过分析单相接地故障发生后的暂态过程可知: 暂态特征量是稳态特征量的几倍甚至几十倍[4]。因此, 一些文献中开始使用小波变换或小波包分解来分析故障发生后的暂态信号, 从而提出选线判据[5]-[7]。小波包算法比小波变换可以更加精细的分析信号, 更好的利用暂态的信号特征。在进行选择故障线路时产生较好的效果, 但其抗干扰能力不好, 且在母线故障、高阻故障时选线易出错。因此, 基于单一原理的选线算法往往顾此失彼, 采用多种选线原理的综合选线方法是解决选线问题的一种有效途径[8]。本文在分析单相接地故障暂态过程的基础上, 提出一种基于暂态特征突变量的综合选线算法。

2. 小电流接地系统故障暂态零序电流分析

消弧线圈接地电网发生单相接地故障后暂态过程的等效电路如图1所示[8], 图中 C 为电网的三相对地电容; L_0 为线路和电源变压器的等值电感; R_0 为等值电阻, 包括线路电阻、地电阻和故障点过渡电阻; L 、 r_0 分别为消弧线圈的电感和等效有功损耗电阻; U_0 为等效零序电压源。

由于 L 远大于 L_0 , 因此在分析过程中图1中消弧线圈支路可忽略, 在单相接地故障发生瞬间 $U_0(t)$ 相当于零序正弦电压源 $U_0(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi)$ 。则有,

$$R_0 i_c + L_0 \frac{di_c}{dt} + \frac{1}{C} \int_0^t i_c dt = U_m \sin(\omega t + \varphi) \quad (1)$$

当系统发生单相接地故障时, 流过故障线路的暂态零序电流为:

$$I_{cm} \left[\frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin(\omega t) - \cos \varphi \cos(\omega_f t) \right] e^{-\delta t} + I_{Lm} e^{\frac{t}{\tau L}} \cos \varphi \quad (2)$$

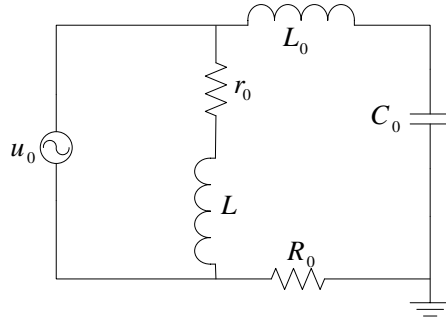


Figure 1. Equivalent circuit of single-phase ground fault transient current

图 1. 单相接地故障暂态电流等值电路

其为暂态电感电流 i_L 和暂态电容电流 i_c 之和。

$$i_c = i_{\cos} + i_{\text{cst}} = I_{cm} \left\{ \left[\frac{\omega_f}{\omega} \sin \varphi \sin t - \cos \varphi \cos(\omega_f t) \right] e^{-\delta t} + \cos(\omega t + \varphi) \right\} \quad (3)$$

$$i_L = I_{Lm} \left[\cos \left(\omega e^{-\frac{t}{\tau_L}} \right) - \cos(\omega t + \varphi) \right] \quad (4)$$

式中, I_{cm} 为电容电流峰值; I_{Lm} 为电感电流的峰值; ω_f 为暂态震荡分量的角频率; $\delta = 1/\tau_c$ 为震荡分量的衰减系数(τ_c 为回路时间常数); τ_L 为电感所在回路的时间常数。 φ 为故障时电压初相角; ω 为正常情况下的电源频率。

当线路发生单相接地故障时, 故障点处会存在衰减很快的暂态电容电流分量和衰减较慢的暂态电感电流分量。当接地故障发生在相电压最大处时, 暂态接地电流为 $i = I_{cm} \frac{\omega_f}{\omega_0} e^{-\delta t}$, 则有, $\frac{i}{I_{cm}} = \frac{\omega_f}{\omega_0}$, 说明: 暂态电容电流分量的最大值是暂态电感电流的几倍甚至几十倍。由于消弧线圈电感的限流作用使得在故障刚刚发生时消弧线圈不能及时的补偿, 因此, 暂态电容电流决定了故障和非故障线路的暂态零序电流。理论分析表明, 暂态电容电流的自由振荡频率为 300~3000 Hz, 衰减很快, 持续时间一般为 0.5~1 周期[8]。当故障发生在相电压过零附近时, 故障和非故障线路的电流主要也是暂态电感电流(直流分量和工频分量), 此时暂态零序电流能量集中在低频段。

3. 选线原理

3.1. 特征频带的分析

在对暂态零序电流信号进行分析的过程中, 在特征频带内的故障线路与非故障线路的区分度更加明显, 有利于选择故障线路。文献[9]给出了一种由线路参数粗略确定特征频带的一种方法, 即特征频带为 (f_L, f_H) 。其中, $f_L = \frac{1}{2\pi\sqrt{3L \sum_{i=1, i \neq q}^n C_i}}$ 为电缆和架空线路串联谐振的最大值(C_q 为所有线路中最大的电

容值); $f_H = \min(f_{1i}, f_{2i})$, $f_{1i} = \frac{1}{4l_{1i}\sqrt{L_{01i}C_{01i}}}$, $f_{2i} = \frac{1}{4l_{2i}\sqrt{L_{02i}C_{02i}}}$ (f_{1i} , f_{2i} 分别为非故障线路架空线部分和电缆部分的串联谐振频率, l_{1i} 、 L_{01i} 、 C_{01i} 和 l_{2i} 、 L_{02i} 、 C_{02i} 分别为架空线路和电缆线路的线路参数)。

这样可初步确定特征频带的大体范围, 为后续小波分析和小波包分解的尺度提供参考。

3.2. 强、弱故障情况区分的原理

文献[10] [11]提出的强、弱故障情况区分依据分别是低频分量电流占全电流的百分比和基于传统能量法计算低频能量占总能量的百分比。本文采用小波分析方法提取低频段(0~125 Hz)和其他频带的小波分解系数,并由以下公式来计算小波能量。

$$E_L = [A_j(k)]^2 \quad (5)$$

$$E_{\text{总}} = E_L + \sum_{j=1}^J [D_j(k)]^2 \quad (6)$$

式中, E_L 、 $E_{\text{总}}$ 分别为小波低频能量和小波总能量; $A_j(k)$ 为第 J 层的小波分解低频系数; 为 $\sum_{j=1}^J [D_j(k)]^2$ 各层小波分解高频系数能量和(其中 $j=1, 2, \dots, J$)。

由该方法计算低频能量和总能量,并求得小波低频能量与总能量的比值,当该比值大于 0.5 时,则认为是弱故障情况;反之,则认为是强故障情况。

3.3. 基于小波包系数极性法的选线原理

在强故障情况下采用小波包系数极性法进行选线。小波包具有很好的频域特性,对故障发生后各出线的零序电流进行合理的小波包分解得到每条出线在各节点(每个节点对应一个频带)的小波包分解系数,小波包系数的极性即为相应频段的零序电流的极性。

在特征频带内小波包系数极性体现的更为明显,基于上述特征频带的分析,此处利用公式(7)计算出能量最大的节点,即为特征频带对应的节点。

$$\varepsilon = \sum_n [\omega_k^j(n)]^2 \quad (7)$$

式中, $\omega_k^j(n)$ 表示小波包分解第 (j, k) 节点处的系数为各线路(包括母线)设置计数装置并令初值为零,为提高该选线方法的抗干扰能力,在能量最大节点处提取各线路零序电流的小波包分解系数(每个节点中含有 n 个系数),并按照小波包系数的极性分为两组,认为数目少的一组为可能故障线路,使其对应计数器加 1,直到分析完第 n 个小波包分解系数,此时各线路对应计数器数值最大的即为故障线路。

3.4. 基于暂态零序能量的选线原理

在弱故障情况下采用暂态零序能量法进行选线。在零序故障附加网络中,由于电感和电容不消耗能量,因此,零序电压和零序电流在一定时间内的积分就是零序电流阻性分量消耗的能量。

定义各出线的零序能量表达式为:

$$W_j(t) = \int_0^t u_0(\tau) i_{0j}(\tau) d\tau \quad (8)$$

定义消弧线圈的零序能量表达式为:

$$W_L(t) = \int_0^t u_0(\tau) i_{0L}(\tau) d\tau \quad (9)$$

定义母线的零序能量表达式为:

$$W_{bus}(t) = \int_0^t (i_{01}(\tau) + \dots + i_{0j}(\tau) + \dots + i_{0n}(\tau) + i_{0L}(\tau)) u_0(\tau) d\tau \quad (10)$$

由零序能量的特性[12]可知: 故障线路的零序能量小于零, 而非故障线路的零序能量大于零, 当故障发生在出线上时, 母线零序能量值为零, 故障线路零序能量值小于零且绝对值最大。当母线故障时, 母线零序能量等于所有线路零序能量的总和。

在实际选线装置中, 来自三相电流互感器不对称引起的零序电流是影响选线准确性的重要方面。为消除此不平衡电流的影响, 本文构造了暂态纯故障分量, 方法如下:

$$i_{0jp} = i_{0j(1)} - i_{0j(-1)} - i_{0j(6)} \quad (11)$$

$$u_{0p} = u_{0(1)} - u_{0(-1)} - u_{0(6)} \quad (12)$$

式中, $i_{0j(1)}$ 、 $u_{0(1)}$ 、 $i_{0j(-1)}$ 、 $u_{0(-1)}$ 、 $i_{0j(6)}$ 、 $u_{0(6)}$ 分别为线路 j 零序电流和零序电压在故障发生后的第一周期、故障前一周期和故障后稳态的数据。

利用暂态纯故障分量结合能量计算的公式(8)~(10)可计算各出线、母线、消弧线圈线路的暂态零序能量, 结合不同故障情况下零序能量的特点来确定故障线路。

4. 选线算法步骤

基于上述选线算法的原理, 其实现步骤如下:

- a) 故障发生后, 采集母线零序电压和各线路零序电流的数据。
- b) 采用 db6 小波对故障后一周期的各出线零序电流进行小波分解, 用分解后得到的小波系数计算小波低频能量占总能量的比例来区分故障情况(强故障或弱故障)。
- c) 当为强故障时, 采用小波包系数极性法选择故障线路。具体是, 利用 db6 小波包对各出线零序电流进行小波包分解, 并用小波包分解系数构造小波包能量来确定能量最大的节点(特征频带)。在特征频带内利用故障线路与非故障线路小波包分解系数极性相反, 结合计数器选择计数器数值最大的为故障线路。
- d) 当为弱故障时, 采用暂态零序能量法选择故障线路。利用故障发生前一周期、故障发生后一周期和故障后的稳态的零序电压和零序电流, 构造暂态纯零序故障分量, 进而求得各线路的暂态零序能量, 用于选择故障线路。即当母线暂态零序能量为零时, 各出线中极性与其他线路相反且绝对值最大的为故障线路; 当母线的暂态零序能量最大且等于所有线路暂态零序能量之和时, 判断为母线故障。

选线流程图如图 2 所示。

5. 建模与仿真

利用 MATLAB 对中性点经消弧线圈接地的系统进行建模仿真, 仿真模型如图 3 所示。该系统为有四回出线的 110 kV/10 kV 的变电站系统, 其中线路 1 和线路 2 为架空线路长度分别为 10 km 和 8 km, 线路 3 为电缆—架空线电缆部分长为 2 km, 架空线部分长为 6 km, 线路 4 为纯电缆线路长为 4 km。架空线路的参数为: 正序电阻和零序电阻为 0.17 Ω /km、0.23 Ω /km; 正序电感和零序电感为 1.36 $\times 10^{-3}$ H/km、3.872 $\times 10^{-3}$ H/km; 正序电容和零序电容为 6.1 $\times 10^{-8}$ F/km、2.276 $\times 10^{-8}$ F/km。电缆线路的参数为正序电阻和零序电阻为 0.024 Ω /km、0.196 Ω /km; 正序电感和零序电感为 5.16 $\times 10^{-4}$ H/km、3.98 $\times 10^{-4}$ H/km; 正序电容和零序电容为 3.08 $\times 10^{-7}$ F/km、2.03 $\times 10^{-7}$ F/km。消弧线圈采用 10% 的过补偿度。则消弧线圈电感值为 1.7304 H, 消弧线圈电阻值为 54.6731 Ω 。由采样定理[13], 本文采用 8 kHz 的采样频率, f_L 为 108.824 Hz, f_H 为 2130.48 Hz。因此对各线路零序电流进行 6 层小波分解, 强故障情况下对各出线进行 5 层小波包分解。

当线路 1 的中间发生高阻接地, 故障合闸角为 0 度, 短路点过渡电阻为 1000 Ω 时, 采集故障发生后一周期的各出线零序电流, 并用 db6 小波进行 6 层小波分解, 然后利用公式(5) (6)计算得到低频小波能量

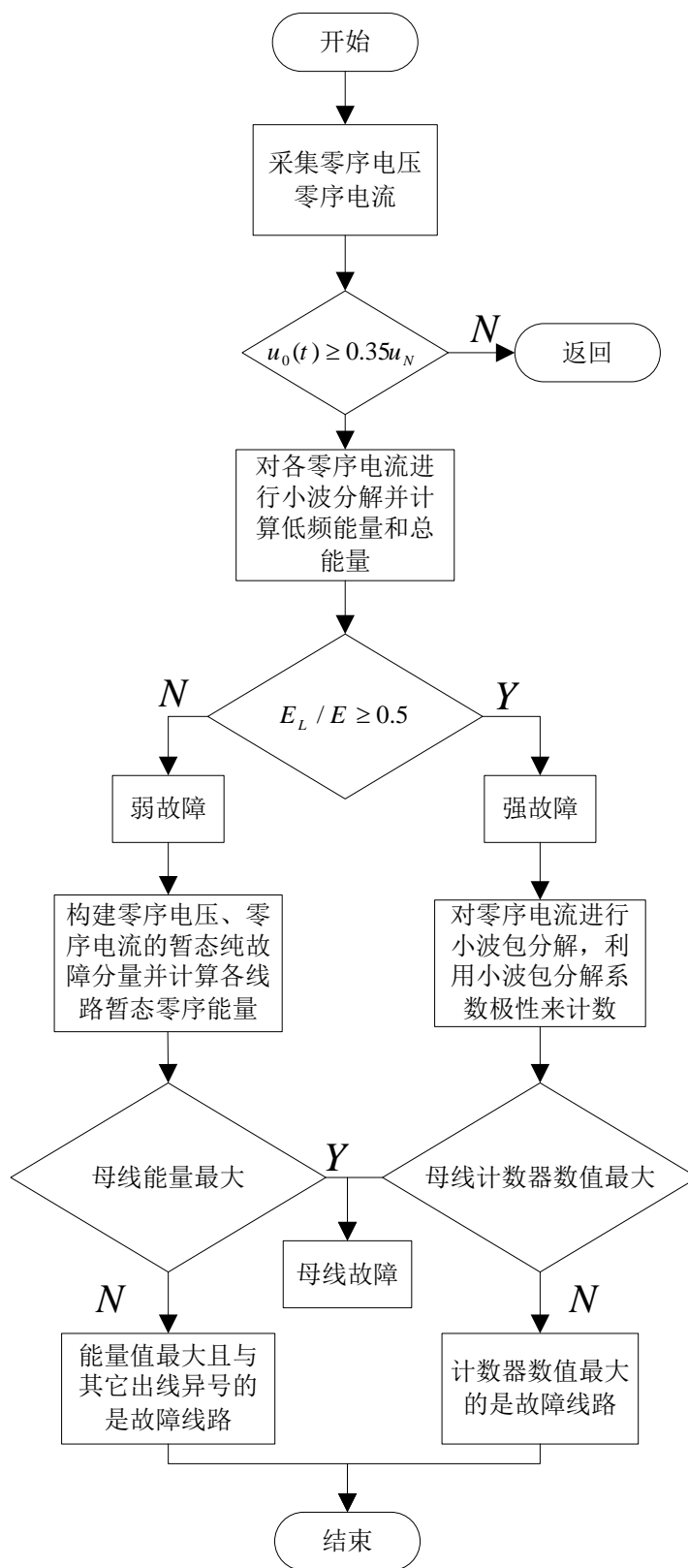


Figure 2. Flowchart of line selection

图 2. 选线流程图

和小波总能量分别为 1.7344×10^3 、 2.2309×10^3 ，低频能量占总能量的百分比为 0.7775，即判断为弱故障情况。利用构造的暂态纯故障分量和公式(8)(9)(10)求得各出线、母线和消弧线圈之路的暂态零序能量为：

$$[-2.3356 \times 10^6, 301.8710, 802.3712, 1.1572 \times 10^3, -3.4070 \times 10^{-9}, 2.3334 \times 10^6]$$

当母线发生故障，故障合闸角为 0 度，故障点过渡电阻为 1000Ω 时，求得小波低频能量占总能量的百分比为 0.4455，即判断为强故障情况。因此，利用 db6 小波包对母线及各出线进行 5 层小波包分解，利用公式(7)求得(5,1)的小波能量最大，对应频带为(125 Hz, 250 Hz)，采用计数器得到的选线结果如表 1 所示。

不同故障条件下的选线情况如表 2 所示。

由表 2 可得：在各种故障情况该综合选线方法均能够正确选择故障线路。

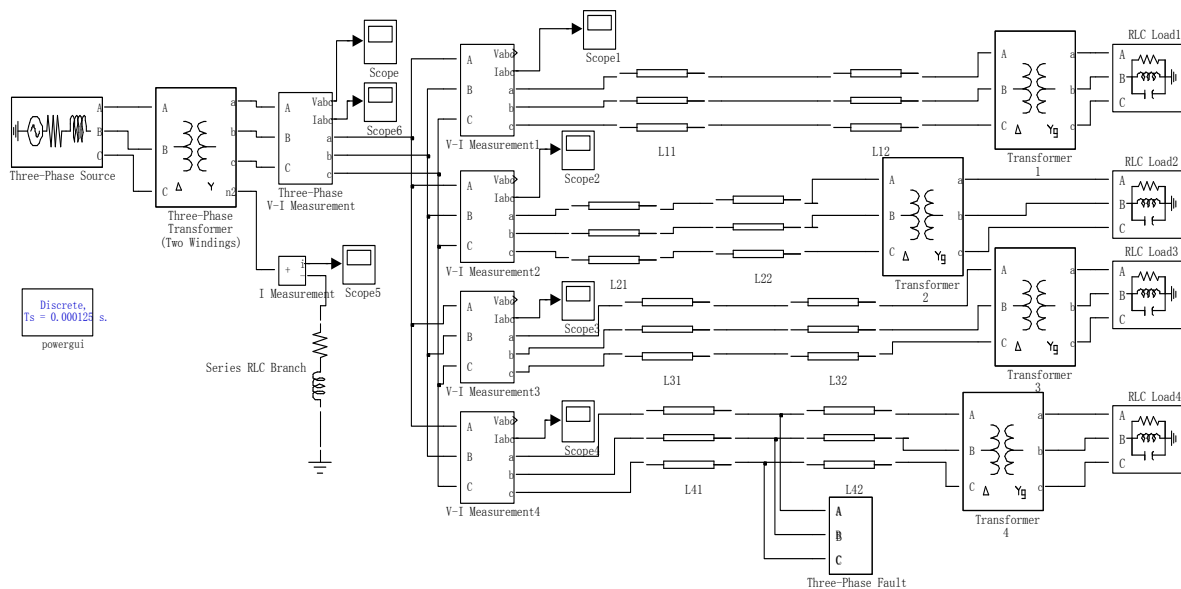


Figure 3. MATLAB simulation model of select fault line

图 3. MATLAB 故障选线仿真模型

Table 1. The value of every counter

表 1. 各线路计数器数值

线路 1	线路 2	线路 3	线路 4	母线	选线结果
1	0	0	0	6	正确

Table 2. Result of faulty line selection

表 2. 不同故障条件下的选线情况

故障线路	故障特征	故障类型	能量统计(弱故障)或计数器数值统计(强故障)	选线结果
线路 1	50 90	强	12, 3, 0, 0, 2	正确
	1000 0	弱	$-2.34e6, 3.01e2, 8.02e2, 1.16e3, -3.41e-9, 2.33e6$	正确
线路 3	50 90	强	0, 0, 13, 1, 2	正确
	1000 0	弱	$5.56e2, 4.17e2, -2.41e6, 1.65e3, -1.95e-9, 2.4e6$	正确
线路 4	50 90	强	0, 0, 2, 12, 3	正确
	1000 90	弱	$3.54e5, 2.84e5, 8.45e5, -1.03e6, -1.61e-8, 4.57e5$	正确
母线	100 90	强	0, 0, 2, 0, 4	正确

6. 总结

本文通过对故障发生后的各线路暂态零序电流进行小波分解, 并利用小波分解系数求得小波低频能量占总能量的比例来区分强故障和弱故障, 在强、弱故障情况下分别采用小波包分解系数极性法和暂态零序能量法来判断选取故障线路。整个选线方法的处理过程中采用了一些抗干扰的数据处理措施, 提高了选线准确性。通过在各种复杂情况下的仿真, 证明了该综合选线方法具有很好的选线能力。

参考文献 (References)

- [1] 贺家李, 李永丽, 董新洲, 等 (2010) 电力系统继电保护原理. 第四版, 中国电力出版社, 北京.
- [2] 曾祥君, 尹项根, 张哲, 等 (2001) 配电网接地故障负序电流分布及接地保护原理研究. *中国电机工程学报*, **21**, 84-88.
- [3] 唐轶, 陈奎, 陈庆, 等 (2005) 导纳互差之绝对值和的极大值法小电流接地选线研究. *中国电机工程学报*, **25**, 49-54.
- [4] 要焕年, 曹月梅 (2000) 电力系统谐振接地. 中国电力出版社, 北京.
- [5] 薛永端, 冯祖仁, 徐丙垠, 等 (2003) 基于暂态零序电流比较的小电流接地选线研究. *电力系统自动化*, **27**, 48-53.
- [6] 张帆, 潘贞存, 张慧芬, 等 (2006) 基于零序电流暂态极大值得小电流接地选线新判据. *电力系统自动化*, **30**, 45-48.
- [7] 贾清泉, 窦春霞, 张华, 等 (2007) 配电网单相故障多频带奇异最选线方法. *电力系统自动化*, **31**, 74-77.
- [8] 贾清泉 (2007) 非有效接地电网选线保护技术. 国防工业出版社, 北京.
- [9] 潘露, 吕艳萍, 于芳, 等 (2007) 基于相频特性与多频待分析的小电流接地系统故障选线. *电力系统自动化*, **31**, 76-84.
- [10] 徐靖东, 张保会, 尤敏, 等 (2009) 基于暂态零序电流特征的小电流接地选线装置. *电力系统自动化设备*, **29**, 101-105.
- [11] 陈凯, 肖遥, 慕娇娇, 等 (2013) 改进暂态特征突变变量的小电流接地系统选线仿真研究. *电气开关*, **5**, 24-28.
- [12] 田书, 何金朋, 聂赫 (2012) 基于暂态零序能量的配电网故障选线方法研究. *工矿自动化*, **1**, 51-54.
- [13] 陈皓 (2007) 微机继电保护原理与算法仿真. 中国电力出版社, 北京.