

基于行波模量速度差的配电网故障测距迭代算法

刘朕志¹, 舒勤¹, 韩晓言², 黄宏光¹

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 国家电网绵阳供电公司, 四川 绵阳 621000)

摘要: 提出了基于零模检测波速度与故障距离关系曲线的配电网故障测距迭代算法。针对零模检测波速度随故障距离变化较大的问题, 通过分析及仿真发现了零模检测波速度随故障距离的变化规律, 利用该规律给出了零模检测波速度的距离表达式。将此表达式结合基于零模行波分量和线模行波分量速度差的测距公式, 给出了故障测距的迭代算法, 避免了零模波速度难以确定的问题。通过 ATP 及 Matlab 对该算法进行仿真, 仿真结果证实了该方法的有效性和可靠性。

关键词: 配电网; 故障测距; 行波; 零模波速度; 迭代算法

An iterative fault location algorithm using the difference of wave velocity between zero mode component and aerial mode component of traveling wave

LIU Zhenzhi¹, SHU Qin¹, HAN Xiaoyan², HUANG Hongguang¹

(1. School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Grid Mianyang Power Supply Company, Mianyang 621000, China)

Abstract: An iterative algorithm using the relation curve between the detected zero-mode wave velocity and fault distance in distribution network for fault location is presented. About the speed instability of detected zero-mode wave, this paper finds the variation between detected zero-mode wave velocity with the fault distance by analysis and simulation, and gives the distance expression of detected zero-mode wave velocity by using the variation. By combining the expression and fault location formula based on the difference of wave velocity between zero mode component and aerial mode component of traveling wave, it gives the iteration algorithm for fault location. The iterative algorithm avoids the problem of determining the zero-mode wave velocity. The efficiency and reliability of the algorithm are verified by ATP and Matlab.

This work is supported by Sichuan Science and Technology Support Plan Project (No. 2014GZ0083).

Key words: distribution network; fault location; traveling wave; zero-mode wave velocity; iterative algorithm

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)08-0088-06

0 引言

现在配电网单相接地故障测距的行波方法主要有两类, 一类是在首端注入诊断信号的方法^[1-3], 另一类是利用故障信号暂态分量的电气特征的测距方法。后者直接利用故障信息无需额外的注入设备, 且受系统运行方式的影响较小, 成为近年来研究的热点。利用故障信号暂态分量测距方法主要分为两种, 第一种是利用故障行波初始波头到达首端的时间与该波头反射回故障点再由故障点返回首端的时

间之差来定位故障的方法^[4-9], 由于配电网具有分支较多, 结构复杂等特点, 首端检测到的故障行波中可能存在来自于其他节点的反射波, 使得来自故障点的反射波头不易识别, 因此, 这种行波法难以实际应用; 第二种是利用故障暂态行波的零模分量和线模分量的波速差及两者到达测量端的时间差来确定故障距离的方法^[10-12]。这种方法原理简单, 只需要识别出行波的线模和零模的第一个波头, 不需要反射波头因而不受分支线路的影响, 避免了上述第一种方法的缺点, 但这种方法的难点是确定零模波速度, 如何准确确定零模波速已成为此方法的研究热点。对此, 文献[10]提出了利用李氏指数(Lipschitz

指数)和零模波速度的关系曲线来确定零模检测波速度的方法, 由于这个关系曲线需要利用仿真数据或现场测试数据来计算拟合得出, 而李氏指数的计算则是通过小波变换模极大值的直线拟合得到的, 前后两次拟合增大了测距的累积误差。文献[11]提出了零模波速度的迭代算法, 其过程为首先求出故障距离与零模波速度的单调对应关系, 再结合零模波速度与频率之间的对应关系, 求出故障距离与频率之间的单调对应关系, 最后利用这三个关系反复迭代, 最终求出零模波速度。该方法需要在三个迭代公式之间多次循环迭代。

本文通过理论研究和对零模行波传输特性的仿真分析, 研究分析零模行波检测波速度和行波频率之间的非线性关系以及零模行波检测频率与故障距离之间的单调性关系, 并最终提取出零模行波检测波速度与故障距离间的非线性关系。将此关系与基于行波模量速度差的基本算法相结合, 提出了故障测距的不动点迭代算法。该算法只需要建立出测距线路上零模检测波速度与故障距离之间的关系, 只需要一个迭代公式, 避免了故障距离对频率以及频率对速度的迭代计算, 简化了迭代过程, 提高了迭代的速度。ATP/EMTP 仿真表明, 该方法能够满足定位精度要求, 且具有一定的抗干扰能力, 不受故障初相角、故障电阻及分支线路的影响。

1 基于行波模量速度差的单端测距基本原理

对于三相配电线路, 各相之间存在着电磁耦合, 当行波沿其中的一相传播时, 三相线路之间也会产生耦合, 因此, 描述各相行波传播的波动方程也不再是独立的。根据电力系统相模转换理论, 采用合适的变换矩阵, 可以将相互耦合的向量空间转换为相互独立彼此没有耦合的模量空间。对于均匀换位线路, 常用的相模变换矩阵 \mathbf{S} 为 Clarke 变换矩阵、0、 γ 、 δ 变换矩阵、Karenbauer 变换矩阵。本文选用 Karenbauer 变换矩阵。

解耦后的模量电压满足如式(1)关系^[11]。

$$\frac{d^2 U_m}{dx^2} = \begin{pmatrix} Z_d + 2Z_s & 0 & 0 \\ 0 & Z_d - Z_s & 0 \\ 0 & 0 & Z_d - Z_s \end{pmatrix} U_m \quad (1)$$

其中: U_m 为模电压向量; Z_d 为各相自阻抗; Z_s 为导线间互阻抗。

配电网线路发生单相接地故障时, 如图 1 所示, 故障点电压突变产生的故障行波零模分量和线模分量波速度不相同, 它们到达测量端 M 的时间也不同, 可用公式表示为

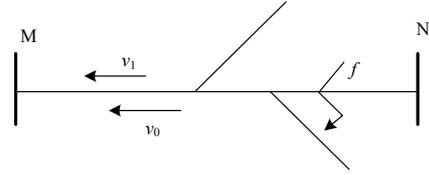


图 1 配电网模型图

Fig. 1 Model of distribution network

$$\begin{aligned} s &= v_1 t_1 \\ s &= v_0 t_0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\Delta t = t_0 - t_1$$

式中: s 为故障点到测量点的距离; v_1 为线模波速度; v_0 为零模波速度; t_1 为零模行波从故障点到测量点所用时间; t_0 为零模行波从故障点到测量点所用时间; Δt 为 t_0 与 t_1 之差。

联立式(2), 可求得利用零模行波和线模行波的速度差和到达测量端的时间差的单端测距公式为

$$s = \frac{v_1 v_0 \Delta t}{v_1 - v_0} \quad (3)$$

利用公式(3)进行故障测距, 需要确定零模波速度 v_0 、线模波速 v_1 以及线模和零模波头到达时间差 Δt 。

近年来, 行波波头到达时间的检测取得了很大的进展, 文献[10]提出的通过寻找小尺度下小波变换模极大值坐标来标定行波波头到达时刻很好地解决了行波波头的到达时间问题。

为了准确检测零模和线模行波波速度, 下面对零模和线模行波传输特性的主要影响因素进行分析讨论, 给出这些因素与零模行波波速度的关系。

2 行波传输特性分析

描述行波传播的两个重要参数分别是特征阻抗 Z_c 和传播常数 γ

$$Z_c = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (4)$$

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (5)$$

其中: R 、 L 、 G 、 C 分别为输电线路单位长度的电阻、电感、电导和电容; α 表示行波传播过程的衰减特性, 称为衰减常数; β 表示行波传播过程的相位变换特性, 称为相位常数; ω 为行波频率; G 很小, 可忽略不计; C 基本不受频率影响^[13]; 影响行波传播特性的主要是电阻 R 和电感 L 。

行波波速由相位常数 β 决定, 即行波波速为

$$v = \frac{\omega}{\beta} \quad (6)$$

忽略电阻和电导对波速度的影响, 可将式(6)简

化为

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (7)$$

行波衰减快慢由衰减系数 α 决定, 忽略电导 G , 由式(5)可计算得到衰减系数为

$$\alpha \approx \frac{RC}{2\sqrt{LC}} \quad (8)$$

由于线路中存在着集肤效应(交变电流通过导体时, 由于感应作用引起导体截面上电流分布不均匀, 愈近导体表面电流密度越大)和邻近效应(当高频电流在两导体中彼此反向流动或在一个往复导体中流动时, 电流会集中于导体邻近侧流动的一种特殊的物理现象), 使得线路电阻 R 随着频率 ω 的增大而增大, 线路电感 L 则随着频率 ω 的增大而减小^[14], 电感 L 为频率 ω 的函数, 可表示为

$$L = g(\omega) \quad (9)$$

由式(7)和式(9)可以得到:

$$v = \frac{1}{\sqrt{g(\omega)C}} \quad (10)$$

因而, 行波波速度随着频率 ω 的增大而增大。

下面仿真验证频率对电感以及波速的影响, 以 10 kV 配网线路常用的架空导线 LGJ-240 为模型, 使用 Matlab 中 Power GUI 组件对 10 kV 架空线路仿真计算分别得到了各频率 ω 下的零序(零模)电感 L_0 和正序(线模)电感 L_1 及零模波速和线模波速, 分别如图 2、图 3 所示。

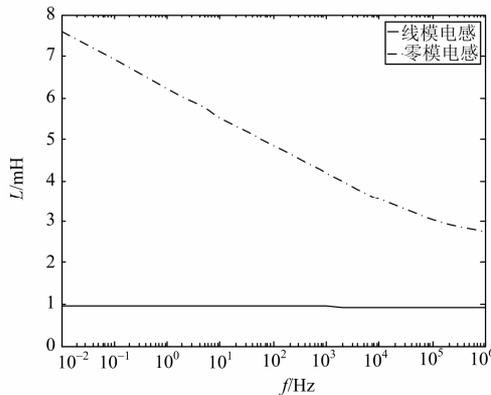


图 2 电感的频率特性

Fig. 2 Frequency characteristics of inductance

图 2 表明, 零序电感 L_0 随频率的增大而迅速单调减小, 尤其在低频部分, 减小的更为剧烈, 而正序电感 L_1 随频率的增大只有略微的单调减小。

由式(10)和图 3 可知, 在模域中, 零模行波波速度 v_0 随频率 ω 的增大而单调增大得较为明显, 而线模行波波速度 v_1 随频率 ω 的增大而只有略微增

大, 近似不变, 因而在实际使用中可近似认为线模行波波速度是稳定不变的。

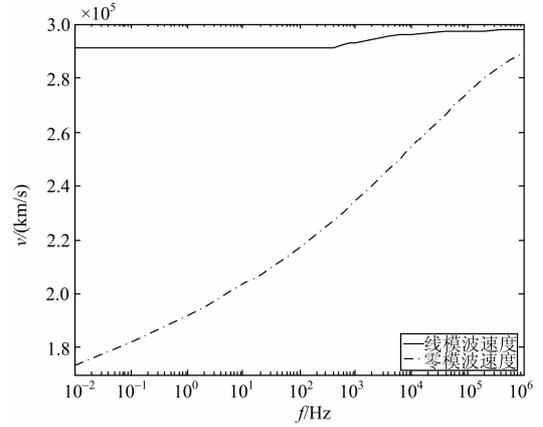


图 3 波速度的频率特性

Fig. 3 Frequency characteristics of wave velocity

行波传输的另一个问题是衰减问题, 由以上分析可知, 频率越高, 线路电感越小, 电阻 R 越大, 结合式(8)可知, 频率 ω 越高, 行波衰减常数 α 越大, 行波衰减速度越快。在模域中, 零模行波波头类似于阶跃信号, 所以和阶跃信号一样, 其各频率分量中, 频率越大, 幅值越小; 且零模行波在传播过程中的衰减快慢与频率的大小也呈现出正相关的关系, 即频率越大, 衰减越快, 因此零模行波高频分量不仅幅值小, 而且衰减快。可知, 若对任一行波波头, 取频率为 0 Hz 的频率分量的幅值为参考, 将幅值为其 1/1 000 的频率分量定义为该波头的最高频率分量 ω_c 。那么在故障测距中, 初始行波不变时, 即各频率分量的初始幅值不变时, 故障距离 s 越远, 行波波头到达时刻行波最高频率分量 ω_c 必定越小, 二者之间必定存在单调递减的关系^[14], 此关系可表示为

$$\omega_c = h(s) \quad (11)$$

当故障初相角或过渡电阻变化时, 故障初始行波的幅值也会相应的变化, 但在故障点发生同类型故障时, 零模波头突变的过程并不会变化, 即波头的形状并未发生变化, 波头中各频率分量幅值的比例关系也不会变化。说明故障初相角或过渡电阻不影响式(11)的成立。

由零模波速度和频率之间的关系式(10)结合式(11)可知, 不同的故障距离下零模行波的检测波速度是不同的, 且故障距离越远, 零模的检测波速度越小。零模行波检测波速度和故障距离之间的单调关系可表示为

$$v_0 = \frac{1}{\sqrt{g(h(s))C_0}} \triangleq f(s) \quad (12)$$

零模检测波速度的变化特性如图 4 所示。

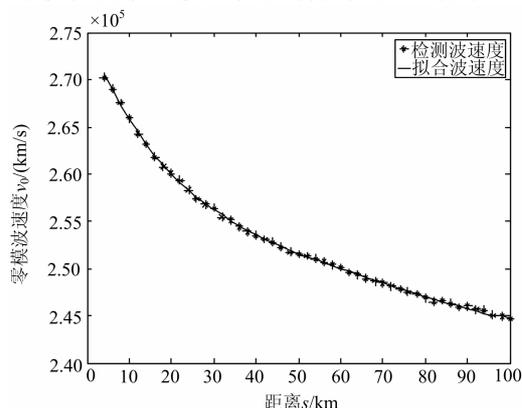


图 4 零模检测波速度的变化特性

Fig. 4 Change characteristics of detected zero mode wave velocity

式(12)表明零模检测波速度仅与故障距离和线路分布参数有关, 在线路结构和分布参数确定的情况下仅与故障距离有关。故障初相角和接地电阻的改变首先影响的是故障初始波的幅值, 由行波传输规律可知, 初始波幅值的改变不会影响行波的传输规律^[15], 所以可不考虑二者对波速的影响, 即对于给定的线路参数, 影响波速的只有距离这一个参数。本文通过大量的仿真, 也证实了零模波速度 v_0 和故障距离 s 之间具有良好的单调性关系, 但此单调关系的函数解析式难以准确给出。本文选用基于最小二乘法的多项式拟合法给出比较精确的表达式。

3 迭代算法测距原理

将式(2)、式(12)联立起来可以得到

$$s = f(s) \left(\frac{s}{v_1} + \Delta t \right) \quad (13)$$

在 $f(s)$ 通过拟合给出表达式时, 式(13)给出了不动点迭代算法的迭代公式为

$$s_{k+1} = f(s_k) \left(\frac{s_k}{v_1} + \Delta t \right) \quad (14)$$

式中, 任取 $s_0 > 0$ 为初始条件, 以 $|s_{k+1} - s_k| < \varepsilon (\varepsilon > 0)$ 为迭代终止条件, 即可求出故障距离 s 。

下面证明式(13)满足不动点迭代收敛的如下条件: 对于非线性方程 $x = \varphi(x)$, 设迭代函数 $\varphi(x)$ 在 $[a, b]$ 上连续, 且满足

(1) 当 $x \in [a, b]$ 时, $a \leq \varphi(x) \leq b$;

(2) 存在一正数 L , 满足 $0 < L < 1$, 且 $\forall x \in [a, b]$,

有 $|\varphi'(x)| \leq L$;

则方程 $x = \varphi(x)$ 在 $[a, b]$ 内有唯一解 x^* , 且对任意初

值 $x_0 \in [a, b]$, 迭代法 $x_{k+1} = \varphi(x_k)$ 均收敛于 x^* 。

令 $\varphi(s) = f(s) \left(\frac{s}{v_1} + \Delta t \right)$, 故障线路长度为 l , 不难看出, 在区间 $[0, l]$ 上必有 $0 \leq \varphi(s) \leq l$ 。

对 $\varphi(s)$ 求导得到

$$\varphi'(s) = f'(s) \left(\frac{s}{v_1} + \Delta t \right) + \frac{1}{v_1} f(s) \quad (15)$$

对式(15)等号的右端, 在国际单位制下, 行波速度的单位为 m/s , $f(s)$ 和 v_1 的数量级为 10^8 , 时间的单位为 s , 长度的单位为 m , 配电网线路长度一般不超过 100 km , 故时间 $\left(\frac{s}{v_1} + \Delta t \right)$ 的数量级为

10^{-4} ; 由图 4 零模检测波速度与故障距离关系曲线可知, 在故障距离低于 40 km 时, 曲线的斜率的数量级为 10^3 , 故障距离大于 40 km 时, 曲线的斜率的数量级为 10^2 , 故 $f'(s)$ 的数量级为 10^2 或 10^3 。由于零模波速度和故障距离为单调递减关系, 故有 $f'(s) < 0$, 很容易得到 $-1 < f'(s) \left(\frac{s}{v_1} + \Delta t \right) < 0$; 由零

模波速度小于线模波速度可知 $0 < \frac{1}{v_1} f(s) < 1$ 。由此

可得 $|\varphi'(s)| < 1$, 由不动点迭代定理可知, 对任意选取的迭代初始值 $c \in [0, l]$, 此迭代过程必定收敛于故障距离 s 。

4 仿真分析

仿真模型如图 5 所示, 测量装置在首端 M 端, 导线型号选用 LGJ—240, 直径 2.16 cm , 导线直流电阻为 $0.1181 \Omega/\text{km}$, 土壤电阻率设置为 $\rho = 100 \Omega \cdot \text{m}$, 线间距为 0.8 m , 导线档距中央离地高度 7 m 。线路在 0.04 s 时刻发生故障, 采样率为 10 MHz 。小波变换选用具有一阶消失矩的 3 阶中心 B 样条小波。

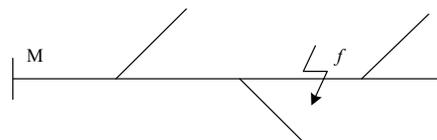


图 5 配电网结构示意图

Fig. 5 Distribution network structure scheme

首先建立与实际线路参数相吻合的线路模型, 以图 5 为例, 设置不同的故障距离, 用小波变换分别检测出零模波头到达时刻, 计算出不同故障距离下的零模波速度, 表 1 给出了不同故障距离下零模波头到达时刻及零模检测波速度的仿真计算结果。

根据此仿真计算结果利用基于最小二乘法的 5 次多项式拟合零模检测波速度与故障距离的关系表达式, 表示成式(12)的形式。

表 1 不同故障距离下零模检测波速度

Table 1 Detected zero mode wave velocity in different

fault distance		
故障距离/km	波速度/ ($\times 10^4$ km/s)	到达时刻/s
4	27.027 1	0.040 014 8
12	26.431 7	0.040 045 4
20	25.974 2	0.040 077 1
28	25.688 1	0.040 108 9
36	25.459 7	0.040 141 4
44	25.272 8	0.040 174 1
52	25.120 8	0.040 207 0
60	24.979 2	0.040 240 2
68	24.835 6	0.040 273 8

然后由实际线路的故障波提取出线模行波和零模行波的到达时间差 Δt , 利用上述提出的故障距离的不动点迭代公式(14)计算故障距离。需要说明的是, 对于不同的故障测距线路, 需要重新建立模型, 并重复上述步骤。不同故障距离下的测距结果如表 2 所示, 迭代算法中取 $\varepsilon = 1 \times 10^{-8}$ 。

表 2 迭代算法测距结果

Table 2 Results of fault location with iterative algorithm

故障距离/km	测量距离/km	相对误差%
4.65	4.67	0.43
7.25	7.28	0.41
13.65	13.57	0.59
25.85	25.68	0.66
47.35	47.29	0.13

从表 2 可以看出, 基于零模测量波速度与故障距离关系曲线的迭代算法计算出的故障距离与实际故障距离基本一致, 测距误差能够满足实际应用的要求。

为考察本算法的实用性, 本文仿真了不同故障接地电阻和故障初相角下故障测距情况, 仿真结果如表 3、表 4。故障初相角为 0 时, 故障电压为 0, 故无法检测出故障波。

表 3 不同接地电阻时测距结果

Table 3 Results of fault location in different grounding

resistance			
接地电 阻/ Ω	故障距 离/km	测量距 离/km	相对误差%
10	13.5	13.51	0.07
200	14.5	14.32	1.24
500	24.5	24.73	0.94
1 000	32.6	32.48	0.36
2 000	38.5	38.74	0.62

表 4 不同故障初相角时测距结果

Table 4 Results of fault location at different

initial phase of fault			
故障初 相角/ $^\circ$	故障距 离/km	测量距 离/km	相对误差%
30	12.5	12.41	0.72
45	17.5	17.57	0.40
60	22.5	22.48	0.09
75	27.5	27.34	0.58
90	32.5	32.63	0.40

表 3、表 4 表明了故障接地电阻和故障初相角对测距结果影响可以忽略, 和理论分析的结果相一致。

5 结论

本文分析了配电网单相接地故障中影响零模行波传输变化的因素, 发现了零模检测波速度与故障距离之间的单调关系, 利用此单调关系给出了零模检测波速度的距离表达式。将此表达式与基于线模行波分量和零模行波分量的速度差的测距公式相结合, 提出了配电网故障测距的迭代算法。此迭代算法避免了利用故障信息再次计算零模波速度的问题, 降低了测距难度, 且迭代过程简单, 速度较快。通过 ATP 和 Matlab 仿真验证了该方法的可靠性。

参考文献

- [1] 戚宇林, 成艳, 杨以涵. 35 kV 配电网单相接地故障综合定位方法[J]. 电网技术, 2008, 32(10): 38-42.
QI Yulin, CHENG Yan, YANG Yihan. A compositive fault location method for single-phase earth fault in 35 kV distribution network[J]. Power System Technology, 2008, 32(10): 38-42.
- [2] 于盛楠, 鲍海, 杨以涵. C 配电线路故障定位的实用方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28): 86-90.
YU Shengnan, BAO Hai, YANG Yihan. Practicalization of fault location in distribution lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(28): 86-90.
- [3] 李配配, 黄家栋, 赵永雷. 基于双端不同时测距的配电网单相接地故障定位研究[J]. 电力科学与工程, 2011, 27(8): 20-23.
LI Peipei, HUANG Jiadong, ZHAO Yonglei. Research on the location of single-phase ground fault in distribution network based on two-terminal and asynchronous method[J]. Electric Power Science and Engineering, 2011, 27(8): 20-23.
- [4] 赵化时, 姚李孝, 柯丽芳, 等. 配电网选线和测距新方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(16): 6-11.
ZHAO Huashi, YAO Lixiao, KE Lifang, et al. A novel method for fault line selection and location in distribution

- system[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(16): 6-11.
- [5] 梁睿, 靳征, 刘建华. 基于故障特征频率的单端行波测距新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 7-13.
LIANG Rui, JIN Zheng, LIU Jianhua. A new single-ended traveling waves fault location method based on characteristic frequency[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 7-13.
- [6] 位韶康, 陈平, 姜映辉. 一种不受波速影响的单端行波测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 77-81.
WEI Shaokang, CHEN Ping, JIANG Yinghui. A single-ended traveling wave ranging method avoiding wave speed influence[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 77-81.
- [7] 姚李孝, 赵化时, 柯丽芳, 等. 基于小波相关性的配电网单相接地故障测距[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(1): 71-74.
YAO Lixiao, ZHAO Huashi, KE Lifang, et al. Single-phase grounding fault locating based on wavelet correlation for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(1): 71-74.
- [8] 季涛. 利用电磁式电压互感器实现小电流接地系统行波故障定位和选相[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 173-178.
JI Tao. Study of the fault location and fault phase position selection based on traveling waves using electromagnetic voltage transformer in neutral non-effective grounding system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 173-178.
- [9] BORGHETTI A, BOSETTI M, SILVESTRO M D, et al. Continuous-wavelet transform for fault location in distribution power networks: definition of mother wavelets inferred from fault originated transients[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 380-388.
- [10] 张帆, 潘贞存, 张慧芬, 等. 树型配电网单相接地故障行波测距新算法[J]. 中国电机工程报, 2007, 27(28): 46-52.
ZHANG Fan, PAN Zhencun, ZHANG Huifen, et al. New algorithm based on traveling wave for location of single phase to ground fault in tree type distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(28): 46-52.
- [11] 唐金锐, 尹项根, 张哲, 等. 零模检测波速度的迭代提取及其在配电网单相接地故障定位中的应用[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 202-211.
TANG Jinrui, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Iterative extraction of detected zero-mode wave velocity and its application in single phase-to-ground fault location in distribution networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 202-211.
- [12] 徐敏, 蔡泽祥, 刘永浩, 等. 基于宽频信息的高压直流输电线路行波故障测距方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 260-265.
XU Min, CAI Zexiang, LIU Yonghao, et al. A novel fault location method for HVDC transmission line based on the broadband travelling wave information[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 260-265.
- [13] 李永庄, 林集明, 曾邵华. 电力系统电磁暂态计算理论[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [14] 李友军, 徐丽娜. 电力系统接地短路故障中零模分量的依频关系分析[J]. 电力系统保护与控制, 2007, 35(15): 4-8.
LI Youjun, XU Lina. Relationship between earth mode surge and frequency on power system earth fault[J]. Power System Protection and Control, 2007, 35(15): 4-8.
- [15] 李学生, 盛洪江. 基于波速影响的零模行波研究[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(6): 93-97.
LI Xuesheng, SHENG Hongjiang. Study of zero-mode traveling wave based on influence of wave velocity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(6): 93-97.

收稿日期: 2014-06-21; 修回日期: 2014-12-01

作者简介:

刘朕志(1988-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统信号检测与处理, 现代信号处理; E-mail: 897793471@qq.com

舒勤(1958-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统故障检测、现代信号处理、智能电网;

韩晓言(1965-), 男, 博士, 高工, 从事超高压输变电研究和电力系统管理和研究。

(编辑 葛艳娜)