

C Type Traveling Wave Fault Location for HVDC Grounding Lines Based on Mathematical Morphology

Pengfei Ren, Boxue Tan*, Hui Liu

School of Electrical and Electronic Engineering, Shangdong University of Technology, Zibo Shandong
Email: 1264117314@qq.com, *tanboxue@sdut.edu.cn

Received: Sep. 2nd, 2016; accepted: Sep. 27th, 2016; published: Sep. 30th, 2016

Copyright © 2016 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

On the basis of introducing the principle of C type traveling wave fault location and mathematical morphology theory, this paper proposes a C type traveling wave fault location method based on mathematical morphology according to the propagation characteristics of the pulse signal in the grounding line. Firstly, this method carries on modulus separation of propagation process of the pulse signal on line, then, it uses the morphological algorithm for wave filtering, and the forward and backward waves are separated by the gradient transform. This method not only has certain anti-interference ability, but also can accurately distinguish the moment of the first reflection pulse reaching to the measuring point. Results show that the method is not only feasible but also helpful to improve the reliability and accuracy of the fault location for high voltage DC grounding wire through simulation of PSCAD and graphics processing of MATLAB.

Keywords

The DC Grounding Wire, Mathematical Morphology, Pulse Signal, Fault Location

基于数学形态学的直流接地极引线C型行波故障测距

任鹏飞, 谭博学*, 刘 辉

山东理工大学, 电气与电子工程学院, 山东 淄博

*通讯作者。

Email: 1264117314@qq.com, *tanboxue@sdut.edu.cn

收稿日期: 2016年9月2日; 录用日期: 2016年9月27日; 发布日期: 2016年9月30日

摘要

本文在介绍C型行波测距原理和数学形态学理论的基础上, 根据脉冲信号在接地极线路上的传播特性, 提出了一种基于数学形态学的C型行波故障测距方法, 该方法首先对脉冲信号在线路上的传播过程进行模量分离, 再根据形态学算法进行滤波, 并利用梯度变换分离出正反向行波浪涌, 不仅具有一定的抗干扰性, 而且能准确地识别第一个反射脉冲到达测量点的时刻。通过PSCAD仿真验证和MATLAB图形处理表明, 该方法是可行的, 且有利于提高高压直流接地极引线故障测距的可靠性和准确性。

关键词

直流接地极引线, 数学形态学, 脉冲信号, 故障测距

1. 引言

高压直流接地极引线是整个直流输电系统中不可或缺的部分, 实时监视与准确定位接地极引线上出现的故障可提高整个直流输电工程的安全稳定运行[1]。目前已有多种方法研究应用到接地极引线故障测距中, 主要有电流差分法、阻抗法、行波法[2]。行波法由于不受线路参数分布不均匀、过渡电阻及故障类型等因素的影响, 在实际工程中得到广泛应用, 文献[3]-[5]对行波法中的A型和D型行波法及其组合方法进行了深入的研究。

C型行波故障测距方法已经在现有的直流接地极系统上得到应用, 如兴安直流和楚穗直流等, 但应用反馈信息显示, 脉冲信号虽能够很好的反映线路的故障情况, 但仍然受故障暂态行波以及系统故障发生震荡的干扰。在此基础上, 本文提出了基于数学形态学的C型行波故障测距方法, 结合了形态学滤波和梯度变换的优点, 首先通过模量变换将脉冲信号分解为零模分量和线模分量, 根据线模分量较零模分量具有稳定性高、衰减速度慢的特点, 利用形态学滤波滤除脉冲反射信号线模分量中的干扰信号, 采用双结构元素的形态学梯度变换分离脉冲信号的正反向行波浪涌, 通过算法分别获取第一个正、反向行波梯度的时刻, 计算得出故障距离。通过PSCAD仿真验证和MATLAB数据处理验证该方法, 结果显示与理论分析一致, 说明该方法具有实际应用性, 有利于提高高压直流接地极引线故障测距的精度。

2. 高压直流接地极引线C型行波测距原理

2.1. C型行波测距原理

C型行波测距法, 又称脉冲反射法[6], 其原理与A型单端行波测距法一样, 如图1所示, 不同之处在于, 脉冲反射法不利用故障点产生的暂态行波, 而是在故障后向接地极线路注入脉冲信号, 脉冲信号在线路中传播遇到阻抗不匹配点会发生折反射, 通过检测脉冲信号在发射点与故障点间往返的时间并根据脉冲的传播速度确定故障距离。

由测距原理的示意图可知, 在中性母线M端安装脉冲发射装置, N端为接地极端, 假设在线路F处发生故障, d_{MF} 即为测量点到故障点的距离。

故障发生后在时刻 t_{M1} 向线路注入宽度为 t_1 的脉冲信号, 脉冲信号在线路中传播遇到故障点会发生反

射，脉冲反射波在时刻 t_{M2} 到达测量点，两者之间的时间延迟为 Δt ，故障距离为：

$$d_{MF} = \frac{1}{2}v\Delta t \tag{1}$$

式中， v 为脉冲行波在接地极引线上的传播速度。文献[7]给出的参考线模分量的行波波速为 $295 \text{ m}/\mu\text{s} \sim 296 \text{ m}/\mu\text{s}$ ，本文取 $v = 296 \text{ m}/\mu\text{s}$ 。

2.2. 脉冲信号在直接地极引线上的传播特性及模量分析

脉冲信号在接地极引线上传播时，脉冲信号在故障点、中性母线和接地极端发生折反射，其行波折反射过程如图 2 所示。

由图 2 可知，M 端注入的脉冲信号传播到故障点后，一部分信号发生反射向 M 端传播，另一部分发生折射向接地极 N 端传播，到达中性母线 M 端和接地极 N 端的信号都会继续发生下一次反射和折射，直到信号衰减完。因脉冲反射法属于单端行波测距，在确定故障距离时，只需要脉冲信号的发射时刻以及第一次反射脉冲到达测量端的时刻，所以图中省略了对脉冲信号在两端后续的折反射情况的描述。

在直接地极线路上传播的脉冲信号中包含零模和线模分量，采用正交变换矩阵对脉冲电压、电流进行变换，得到模量电压电流：

$$\begin{cases} u_{F0} = \frac{1}{\sqrt{2}}(u_{F1} + u_{F2}) \\ i_{F0} = \frac{1}{\sqrt{2}}(i_{F1} + i_{F2}) \end{cases} \tag{2}$$

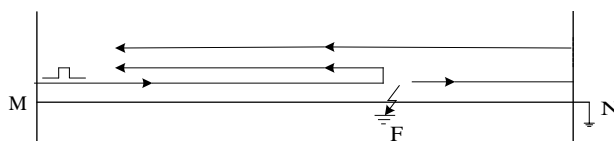


Figure 1. Schematic diagram of C type traveling wave ranging principle

图 1. C 型行波测距原理示意图

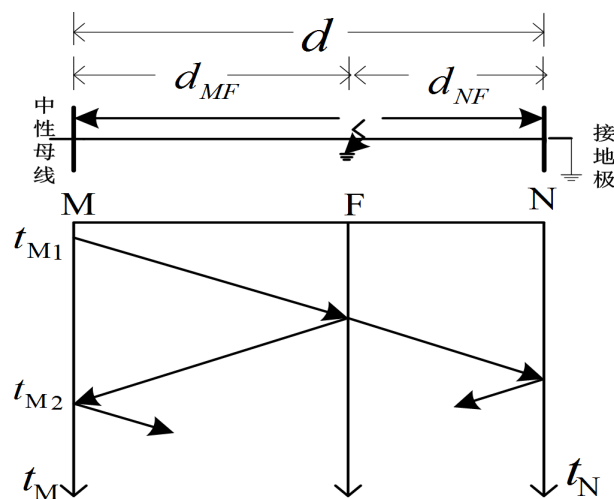


Figure 2. Schematic diagram of pulse signal propagation process

图 2. 脉冲信号传播过程示意图

$$\begin{cases} u_{Fa} = \frac{1}{\sqrt{2}}(u_{F1} - u_{F2}) \\ i_{Fa} = \frac{1}{\sqrt{2}}(i_{F1} - i_{F2}) \end{cases} \quad (3)$$

式中： u_{F0} 、 i_{F0} 为零模电压、电流； u_{Fa} 、 i_{Fa} 为线模电压、电流； u_{F1} 、 u_{F2} 为线路始端测得的两线电压； i_{F1} 、 i_{F2} 为线路始端测得的两线电流。

零模分量在传播过程中特性有所不同，零模分量在传播过程中会发生严重的衰减和畸变，且传播速度不稳定；线模分量的衰减和畸变程度较小，同时传播速度相对稳定[7]。因此，本文采用线模电压电流进行进一步的分析。

3. 基于数学形态学的测距算法

3.1. 基本理论

数学形态学始于1964年，基本思想是利用一定形态的结构元素去量度和提取图像中的对应形状，进而对图像进行分析和识别[8]。应用形态学算法可简化图像数据，不改变图像的基本形状特点，并除去其中的干扰因素，属于非线性分析方法，对波形的处理仅在时域中进行，且算法只有加减法和取极值计算，因而处理后的信号不存在相位移和幅度衰减的问题，能够准确的显示波形的主要特征，并抑制非相关部分及噪声干扰信号。

腐蚀、膨胀、开启和闭合是数学形态学的最基本的四个运算，基于这四种运算可推导和组合各种数学形态学使用算法。

(1) 腐蚀、膨胀运算

腐蚀运算的实现基于数学形态学中填充结构元素的概念，这个填充过程则由一个基本的欧氏空间内的平移运算确定，因而集合 A 被集合 B (结构元素)腐蚀的定义为：

$$A \ominus B = \{x : B + x \subset A\} \quad (4)$$

式中： \ominus 表示腐蚀运算， \subset 表示子集关系。

膨胀是腐蚀的对偶运算，定义为补集的腐蚀，则集合 A 被集合 B 膨胀定义为：

$$A \oplus B = [A^c \ominus (-B)]^c \quad (5)$$

式中： \oplus 表示膨胀运算， A^c 表示 A 的补集。

腐蚀是使得输出图像的像素值是输入图像邻域中的最小值，即去掉图像中小于结构元素的部分，将图像变小；膨胀的作用与腐蚀的作用恰恰相反，它将图像中小于结构元素孔洞或者图像边缘的凹槽部分填充，扩大了图像。

(2) 开、闭运算

电力系统中实际采样所得的电压、电流信号一般为—维信号，也称灰度图像。对灰度腐蚀和膨胀这两个基本算子的有序组合可构造二值开运算和二值闭运算。

二值开运算是先对信号先腐蚀再膨胀的方法，定义为：

$$(f \circ g)(n) = ((f \ominus g) \oplus g)(n) \quad (6)$$

式中： \circ 表示开运算。

二值闭运算是开运算的对偶运算，采用对信号先膨胀再腐蚀的方法，定义为：

$$(f \bullet g)(n) = ((f \oplus g) \ominus g)(n) \quad (7)$$

式中： \bullet 表示闭运算。

开运算可以使信号轮廓光滑，并去掉毛刺和孤立点，锐化了角，本文利用开运算的这个特性取得信号中的奇异点。闭运算是通过填平信号小沟，弥合孔洞和裂缝的处理，使得谷底噪声在信号中滤除。通过选择结构元素的宽度和结构以及运算的不同组合可以达到滤波、消噪、边缘检测等不同目的。

3.2. 形态学滤波和梯度变化[9] [10]

(1) 形态学滤波

开闭运算共有的基本特性是低通特性，可通过组合构成不同的形态学滤波功能，其中结构元素的尺寸和形状要根据信号的特点来确定，进而对滤波效果和变换形式产生一定影响。

Marago 定义的形态开-闭(Open-closing)滤波器和闭-开(Close-opening)滤波器如下：

开-闭滤波器：

$$[(f)oc(g)](n) = (f \circ g \bullet g)(n) \quad (8)$$

闭-开滤波器：

$$[(f)co(g)](n) = (f \bullet g \circ g)(n) \quad (9)$$

形态学滤波算法对信号的处理仅在时域中完成，即对信号进行加减运算和取极值运算，其中的关键之处是选取合适的结构元素，进而取得最好的滤波效果。

(2) 形态学梯度变换

根据腐蚀和膨胀的低通特性，组合运算可以构成形态学梯度变换，公式为：

$$G_{RAD}(f) = (f \oplus g)(x) - (f \ominus g)(x) \quad (10)$$

形态学梯度变换作用于图像时可提取图像的边缘信息，而当其作用于电力信号时且选取扁平结构元素时能够取得信号的局部极大和极小值，其运算结果受结构元素的选取。

(3) 基于形态学滤波和梯度变换的测距原理

脉冲信号在发生故障的直流接地极线路上传播时，遇到波阻抗不连续点处发生反射、折射，在折反射过程中的脉冲波形的叠加会导致波形发生突变。形态学梯度变换能够明显感知电力信号中的突变点，以此为依据可辨别脉冲信号在遇到故障点后的脉冲信号突变点。

文献[11]在数学形态学滤波和梯度变换的基础上，提出的具有双结构元素的新的形态学梯度变换算法的定义如下：

$$\rho_{g^+}(x) = ((\rho \circ g_1 \bullet g_1) \oplus g_2^+)(x) - ((\rho \circ g_1 \bullet g_1) \ominus g_2^+)(x) \quad (11)$$

$$\rho_{g^-}(x) = ((\rho \circ g_1 \bullet g_1) \oplus g_2^-)(x) - ((\rho \circ g_1 \bullet g_1) \ominus g_2^-)(x) \quad (12)$$

$$\rho_g(x) = \rho_{g^+}(x) + \rho_{g^-}(x) \quad (13)$$

式中： x 表示实际运用中被处理信号的定义域， g_1 表示用于滤波的结构元素， g_2 表示用于形态学梯度的结构元素。

该算法将形态学滤波和梯度变换相结合，不但能提取脉冲信号突变点的起始时刻或“上”、“下”边沿，同时能分辨反射脉冲信号的波头极性。根据脉冲初始信号和第一个反射脉冲行波的极性及其关系判断发生故障类型，同时根据算法获得第一个脉冲反射信号突变点的时刻，公式(14)是通过第一个正向脉冲行波计算故障距离，公式(15)是通过第一个反向脉冲行波计算障距离，通过公式(16)求取平均值获得最终故障距离，实现故障定位。

$$d_{MF1} = \frac{1}{2}v(t_{M21} - t_{M1}) \quad (14)$$

$$d_{MF2} = \frac{1}{2}v(t_{M22} - t_{M1}) \quad (15)$$

$$d_{MF} = \frac{1}{2}(d_{MF1} - d_{MF2}) \quad (16)$$

式中, t_{M21} 、 t_{M22} 分别为第一个正、反向脉冲行波波头时刻。

4. 仿真分析

4.1. 仿真模型的搭建和参数设置

为模拟直流接地极引线运行特性, 本文利用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 建立高压直流接地极线路模型, 如图 3 所示。直流接地极 G1、G2 是高压直流输电系统不可或缺的部分, 本文将以直流接地极 G1 为例开展直流接地极引线故障测距仿真试验。

图 3 中的交流电源为 AC₁、AC₂, 为 500 kV 电压等级, 并采用直流工程中常见的定功率输电控制模式, T₁-T₄ 为变压器, HB₁-HB₄ 为换流桥, H₁ 为平波电抗器, C 和 L 构成谐波滤波器, R 为接地极接地电阻, 电阻值为 0.3 Ω。

参数设置: 直流输电线路 L = 400 km, 接地极线路 D₁ 和 D₂ 长度都为 100 km, 在 M 处安装脉冲发射装置以及检测装置作为故障线路和非故障线路的测量点, 系统仿真频率为 1 MHz。

4.2. 故障仿真实验验证

4.2.1. 直流接地极双极运行方式

目前, 世界上已投运的 HVDC 系统几乎都采用双极运行方式, 此方式下两极的直流电压和直流电流均相等, 两极的输送功率也相等, 理论上接地极线路电压为 0, 运行条件好, 系统损耗小, 可靠性高, 但实际运行中, 由于换流变压器阻抗以及触发角等偏差, 两极中的电流不是绝对相等的, 接地极中有不平衡电流流过, 线路中存在较小的电压。

仿真采用双极运行方式, 以单线接地故障为例, 过渡电阻为 1 Ω, 设故障距离 20 km, 故障起始时间为 0.5 s, 故障持续时间为 0.2 s, 在 $t_{M1} = 0.55$ s 注入幅值为正 48 V 的单极性脉冲, 脉冲时窗宽度 $t = 16 \mu\text{s}$, 脉冲的选择参考文献[12]。文中形态学算法的结构元素宽度取为 4, 将 PSCAD 仿真得到的波形经 MATLAB 处理后的波形如图 4 所示, 图 4 中 0 μs 时刻代表脉冲发射时刻 0.55 s, 波形持续时间为 0.55 s~0.552 s。

图 4(a)和图 4(b)分别是施加脉冲信号后, 故障线路和非故障线路脉冲电压、电流的波形; 图 4(c)表示经模量分离后的脉冲信号线模电压、电流; 图 4(d)是线模电压经分离得出的脉冲信号电压正、反向行波。由图 4 可看出, 经过模量分离后, 脉冲发射信号被抵消, 图中的第一个正、反向行波即脉冲信号在故障点的反射信号, 信号突变点即所需的反射信号时刻, 易于观察确定。第一个正向行波突变时刻为 133 μs, 由公式(12)计算得出故障距离为 19.684 km; 第一个反向行波突变时刻为 136 μs, 由公式(13)计算得出故障距离为 20.128 km, 则由式(14)得出最终故障距离为 19.906 km。

接地电阻为 1 Ω 时, 利用基于数学形态学的 C 型行波故障测距方法得到的不同故障距离的测距结果如表 1 所示。

4.2.2. 仿真结果分析

通过对高压直流接地系统双极运行方式进行故障仿真, 结果显示, 基于数学形态学的 C 型行波测距方法能够准确可靠的获得第一个脉冲信号反射波到达测量点的时刻, 从而实现故障的准确定位。但脉冲

时窗宽度的选择对测距结果有一定的影响，在近测量点故障时，脉冲信号在折反射过程中会产生盲区，从而无法进行故障定位。

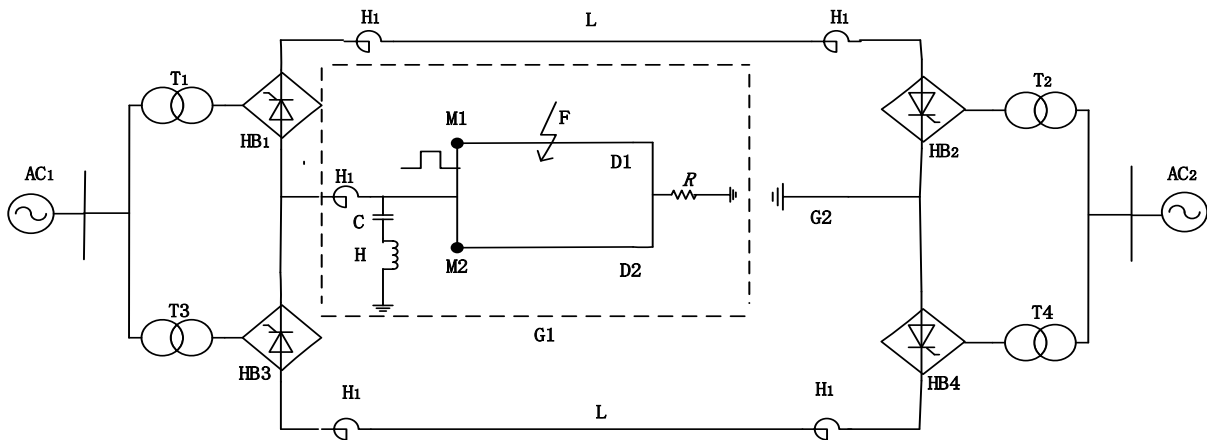
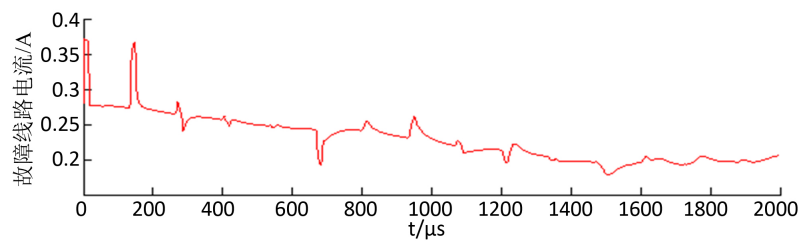
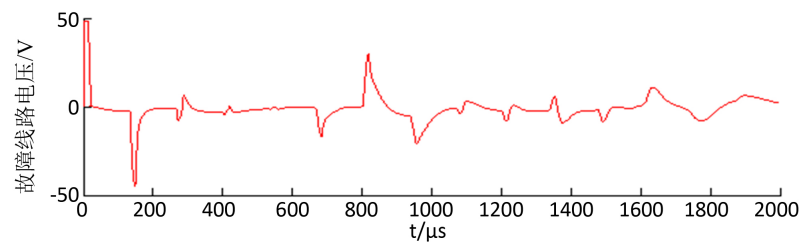
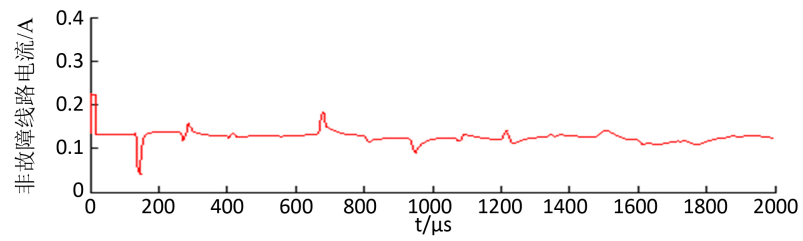
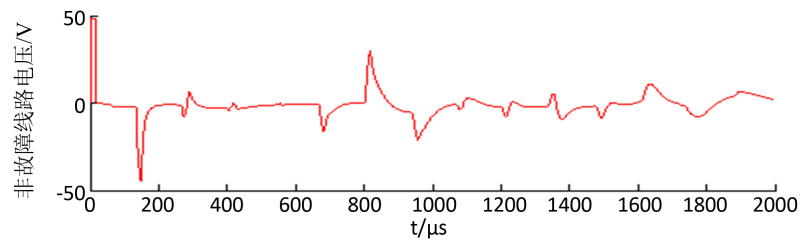


Figure 3. Simulation model of HVDC system

图 3. 直流输电系统仿真模型



(a)



(b)

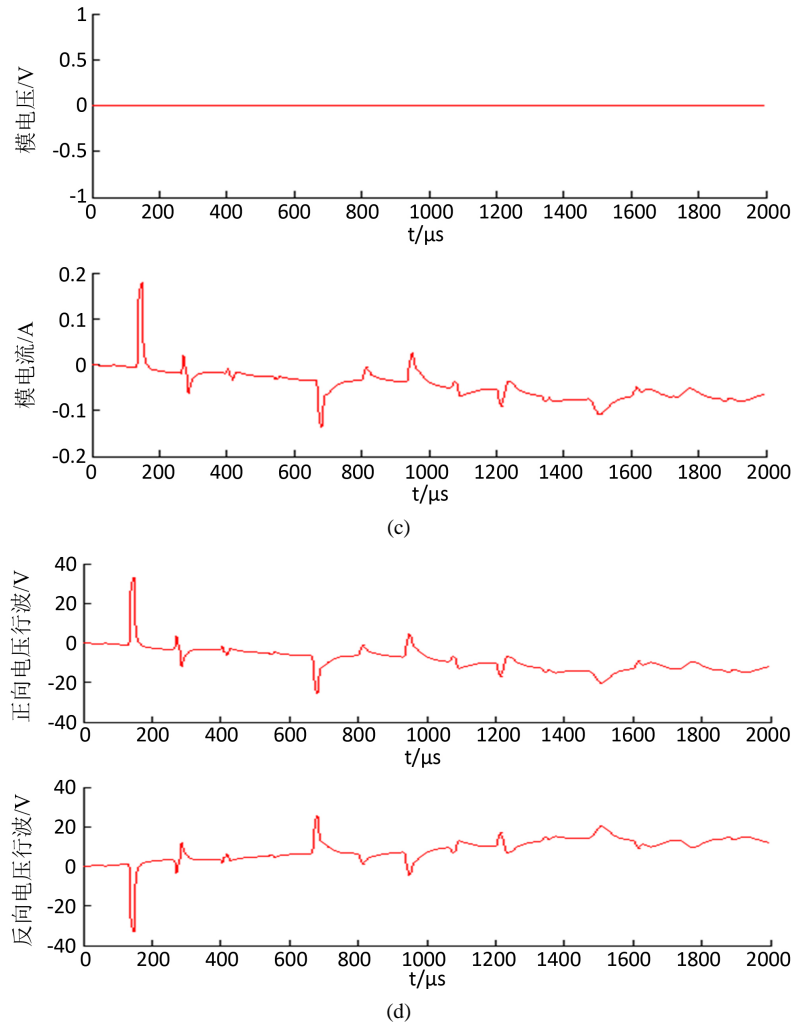


Figure 4. Single line grounding fault pulse waveform in bipolar operation mode; (a) the impulse voltage and current of the fault line; (b) the impulse voltage and current of the non fault line; (c) voltage and current of linear mode; (d) positive and negative traveling wave of pulse voltage

图 4. 双极运行方式单线接地故障脉冲波形; (a) 故障线路脉冲电压、电流; (b) 非故障线路脉冲电压、电流; (c) 线模电压、电流; (d) 脉冲电压正、反向行波

Table 1. Results of C type traveling wave fault location in bipolar operation mode

表 1. 双极运行方式 C 型行波测距结果

故障距离(km)	第一个正向行波波头到达时刻(μs)	第一个反向行波波头到达时刻(μs)	故障距离(km)	绝对测距误差(km)
5	31	34	4.81	0.19
10	65	68	9.842	0.158
20	133	136	19.906	0.094
50	336	339	49.95	0.05
75	506	509	75.11	0.11
99	667	670	98.938	0.062

5. 结语

本文对 C 型行波测距方法及数学形态学的相关理论做了介绍, 结合了脉冲反射法简单可靠与数学形态学的优点, 提出了基于数学形态学的 C 型行波测距新方法, 利用 PSCAD 和 MATLAB 仿真验证表明, 采用形态学算法不仅能够去除一定的干扰, 而且能够辨识行波浪涌波头的极性, 并提取第一个正反向脉冲反射电压行波波头的起始时刻, 实现了直流接地极线路的故障测距, 故障测距的可靠性与准确性都有提高。

参考文献 (References)

- [1] 陈平. 输电线路现代行波故障测距及其应用研究[D]: [博士学位论文]. 西安: 西安交通大学, 2003.
- [2] 钟小垒. 基于行波原理的直流输电系统接地极引线故障测距[D]: [硕士学位论文]. 淄博: 山东理工大学, 2012.
- [3] 王奎鑫, 陈平, 祝成, 等. 输电线路组合行波测距方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 82-86.
- [4] 郝洪民, 陈平, 梁凤强, 等. 直流接地极线路组合行波故障测距方法[J]. 国网技术学院学报, 2015, 18(4): 6-10.
- [5] 蔡永梁, 张楠, 冯鹤, 等. 基于行波原理直流输电系统接地极线路故障测距系统设计[J]. 南方电网技术, 2011, 5(2): 48-50.
- [6] 迟震. 脉冲反射法电缆综合故障定位研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2013.
- [7] 黄雄, 王志华, 尹项根, 等. 高压输电线路行波测距的行波波速确定方法[J]. 电网技术. 2004, 28(19): 34-37.
- [8] 崔屹. 图形处理与分析 - 数学形态学方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [9] 张怿宁, 王彩芝, 李京, 等. 基于数学形态学的直流接地极线路单端行波故障测距[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(1): 74-78.
- [10] 孙学茜, 陈平, 李书领, 等. 基于数学形态学的 HVDC 线路单端行波测距算法[J]. 山东理工大学学报(自然科学版), 2011, 25(4): 104-107.
- [11] Ha, S.G., Yu, I.K. and Park, M. (2007) PSCAD/EMTDC-Based Simulation of Wind Power Generation System. *Renewable Energy*, **32**, 105-117.
- [12] 李保生. 基于时域脉冲反射原理的电线电缆精确测长技术研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安电子科技大学, 2010.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: sg@hanspub.org