

DOI: 10.7667/PSPC152122

电缆单端故障测距的阻抗-行波组合法

彭浩¹, 沈兴来², 陈奎¹

(1. 中国矿业大学信电学院, 江苏 徐州 221116; 2. 徐州供电局, 江苏 徐州 221116)

摘要: 单端故障行波测距的关键在于准确识别故障反射波头与对端母线反射波头。为更准确识别行波波头, 提出一种新型阻抗-行波组合法。先由阻抗法粗略计算故障位置, 并考虑实际误差, 为行波法寻找波头缩小范围, 得到多个测距结果。再根据故障反射波头与对端母线反射波头之间相互制约的关系对结果进行筛选, 选择最符合条件的一组, 同时确认两个波头的到达时间, 根据时间点计算故障距离。此法利用两波头间的特定关系, 同时找到两个波头, 比只查找单个波头更准确, 更不易出错。经 Matlab 和 ATP-EMTP 仿真验证, 方案可行。

关键词: 阻抗法; 单端行波法; 小波变换; 故障测距; 组合法

Impedance-traveling wave assembled method of cable single-terminal fault location

PENG Hao¹, SHEN Xinglai², CHEN Kui¹

(1. School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;
2. Xuzhou Power Supply Company, Xuzhou 221116, China)

Abstract: The key of single terminal fault location is to identify the fault point reflected wave and the opposite bus reflected wave. In order to identify the wave accurately, a new method combined with impedance measurement and wave, is presented. The impedance measurement method can calculate the location roughly. According to the actual error, the range for wave tip can be narrowed. Then the relationship between fault reflected wave and opposite bus reflected wave can be used to find the time of wave tip. The fault distance can be calculated by the time and the wave velocity. This method finds two wave tips at the same time and the tip time restrict each other, which is more accurate than finding one wave tip only. Matlab and ATP-EMTP simulation results show the method is reliable.

Key words: impedance measurement method; single terminal travelling wave method; wavelet transform; fault location; combined method

0 引言

准确定位输电线路故障, 可以降低寻找故障点的难度, 减少停电时间。对减少经济损失、保障人民生活水平有重要意义。

行波测距法分为双端法和单端法。双端法在线路两端设置测量点, 通过故障初始行波到达两端的时间差实现测距, 优点是测距精度高, 操作简单, 缺点是依赖精确的 GPS 同步时钟, 而且两端都要有测量装置, 造价较高。相比之下, 单端法只在一端设置测量点, 不受通信条件限制, 成本较双端法低, 若能保证测距精度, 单端法将更有优势^[1-3]。单端法的关键在于准确分辨各个波头对应的反射行波, 但如何准确分辨波头, 一直是一个难题。测量阻抗法自提出以来, 已经大量应用在各种故障测距装置中,

虽然其准确性不高, 但有较高的鲁棒性, 可以用来初步确定故障点的大致范围。而行波测距较为精确, 若能结合两者特点, 便可以实现更精确的故障测距。

文献[4]提出依据阻抗法与行波法的组合提升测距精度, 并分析了识别波头的各种情况, 但如何准确识别波头依然是个难点; 文献[5]提出了先用行波法测得多组数据, 再用单端阻抗法筛选的方法, 但数据组较多时计算量大易出错; 文献[6]利用小波变换模极大值的极性区分故障点和对端母线反射行波, 该方法理论上可行, 但在多个模极大值中通过极性辨别比较困难; 文献[7]提出的组合方法通过神经网络学习得到零模及线模波速, 得到大致距离, 再结合小波分析实现测距, 方法理论上可行, 但神经网络训练时需要大量的故障数据, 而电力线路的故障数据不可能很多, 使该法受到局限。

基于以上分析, 本文提出一种阻抗法与行波法组合的故障测距新方法, 通过引入实际误差缩小寻找波头的范围并获取多组数据, 利用故障反射波与对端母线反射波相互制约的关系筛选出最符合的一组, 两个波头同时得到确认, 避免了只寻找单一波头时可能出现的误差, 提高了测距精度。

1 阻抗法测距

阻抗法测距的原理如图 1 所示。

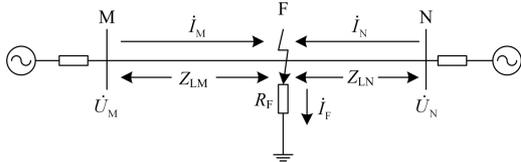


图 1 阻抗法原理图

Fig. 1 Impedance measurement method

根据文献[8], 阻抗法测距公式

$$X_{FM} = (X_M - \frac{R_M \tan \varphi_L - X_M}{\tan \varphi_L \cot \beta - 1}) / X_{11} \quad (1)$$

式中: R_M 和 X_M 是测量端电压和电流相除的实部和虚部; X_{11} 为线路单位长度正序电抗; $\beta = \arg(\dot{I}_{FM} / \dot{I}_M)$, 其中 \dot{I}_M 为故障电流, \dot{I}_{FM} 为故障分量电流, 且 $\dot{I}_M = \dot{I}_L + \dot{I}_{FM}$, \dot{I}_L 为正常情况电流; φ_L 为线路正序阻抗角。此公式忽略了故障分量电流和故障支路电流的相位差, 因此会造成一定误差^[8]。根据文献[4], 在任何故障情况下, 测距误差最大都不会超过 10%, 因此在之后的行波测距中波头的误差时间为

$$\delta_t = \frac{10\%L}{v} \quad (2)$$

式中: L 为线路全长; v 为行波波速。

虽然该法准确性不高, 但其鲁棒性强, 故用来粗略测定故障点距离。

2 基于小波分析的单端行波测距

2.1 小波变换模极大值

发生故障后的输电线路, 其暂态行波具有突变性、奇异性等特点。传统的傅里叶变换只能描绘整个时间段内频率的特性, 是一种全局变换, 无法反映出特定时间段或频率段的情况, 从而丢失了分析故障的有用信息, 造成较大误差。而小波分析可以在时域和频域同时局部化, 能较好地检测突变点。

小波变换的模极大值常被用来检测信号的奇异性, 其定义如下:

设 $W_\psi f_{(s,x)}$ 是信号 $f_{(t)}$ 的小波变换, 在尺度 s 下,

若对于任意 x , $x \in (x_0 - \delta, x_0 + \delta)$

$$|W_\psi f_{(s,x)}| \leq |W_\psi f_{(s,x_0)}| \quad (3)$$

则 x_0 成为小波变换在尺度 s 下的模极大值点,

$W_\psi f_{(s,x)}$ 为小波变换的模极大值。

小波变换的模极大值点与暂态行波的突变点一一对应, 若将对暂态行波信号的分析转化为对信号小波变换模极大值的分析, 可大大简化分析和计算过程^[9-11]。

2.2 单端行波法

单端行波法只在线路的一端设置测量点。故障发生后, 故障点产生暂态行波向两端传播, 最先到达测量端的波头为故障初始行波, 其后有故障点反射行波及对端母线反射行波, 单端测距法即根据故障初始行波与其后二者之一的的时间差测距^[12-13], 如图 2 所示。

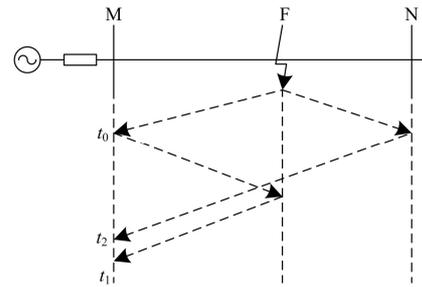


图 2 单端行波法测距原理

Fig. 2 Single terminal travelling wave location

$$v\Delta t_1 = 2x \quad (4)$$

$$v\Delta t_2 = 2(L-x) \quad (5)$$

式中: x 为故障点距离; L 为线路全长; Δt_1 为故障反射波头到达时间与故障初始行波波头时间差; Δt_2 为对端母线反射波头与故障初始行波波头时间差。

3 阻抗-行波组合法测距

阻抗法测到的初始距离一般和实际故障点有较大误差, 因此在阻抗法测距后需要结合行波法得到更精确的结果。组合法测距的步骤如图 3 所示。

1) 通过阻抗法的测距式(1), 粗略测出故障大致距离 X 。

2) 将 X 代入式(4)、式(5), 求得故障点反射行波与初始行波时间差 ΔT_1 , 对端母线反射行波与初始行波时间差 ΔT_2 。

3) 结合小波模极大值, 引入实际误差 δ_t , 可知对应波头模极大值 T_1 、 T_2 必定满足

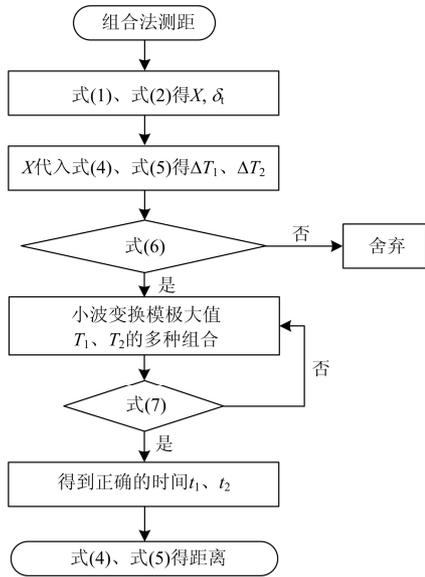


图 3 流程图

Fig. 3 Flow chart

$$\begin{cases} t_0 + \Delta T_1 - 2\delta_i < T_1 < t_0 + \Delta T_1 + 2\delta_i \\ t_0 + \Delta T_2 - 2\delta_i < T_2 < t_0 + \Delta T_2 + 2\delta_i \end{cases} \quad (6)$$

t_0 为初始波头到达时间^[14-15]。正确的两个模极大值对应的时间与初始行波的时间差应满足

$$\Delta t_1 + \Delta t_2 = \frac{2L}{v} \quad (7)$$

4) 一般满足式(6)的有多组模极大值, 根据式(7)在多个组合中筛选出最接近条件的, 得到两个新时间点 t_1, t_2 。

5) 代回式(4)、式(5), 求取平均值, 即为测距结果。

4 仿真分析

本文采用 ATP-EMTP 软件仿真^[14-15], 电压等级 110 kV, 线路 MN 全长 20 km。假设 A 相接地短路, 故障点距测量端 9 km, 接地电阻 10 Ω, 采样频率为 1 MHz, 故障发生时间为 0.008 s, 仿真时间 0.02 s, 如图 4 所示。

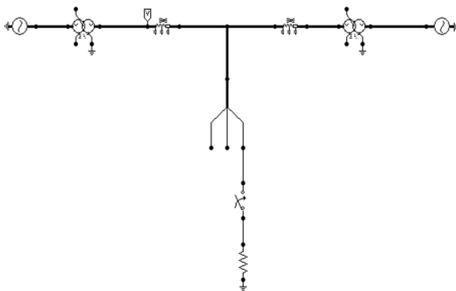


图 4 电缆故障仿真模型

Fig. 4 Cable fault simulation model

线路结构参数为

$$\begin{aligned} R_1 &= 0.0279 \Omega/\text{km}, R_0 = 0.279 \Omega/\text{km} \\ L_1 &= 0.88 \text{ mH}/\text{km}, L_0 = 3.1 \text{ mH}/\text{km} \\ C_1 &= 0.0133 \mu\text{F}/\text{km}, C_0 = 0.00857 \mu\text{F}/\text{km} \end{aligned}$$

行波速度取 $2.96 \times 10^8 \text{ m/s}$

1) 非故障时, 采集 A 相的正常电流; 故障后, 采集测量端 A 相电压、电流。对采集的数据傅里叶变换并由阻抗法测距式(1)得到故障大致距离 $X = 8.654 \text{ km}$; 由式(2)得 $\delta_i = 6.7568 \times 10^{-6} \text{ s}$ 。

2) 将 X 代入式(4)、式(5), 求得故障点反射行波与初始行波时间差 $\Delta T_1 = 5.847 \times 10^{-5} \text{ s}$, 对端母线反射行波与初始行波时间差 $\Delta T_2 = 7.662 \times 10^{-5} \text{ s}$ 。

3) 对数据相模变换后进行小波分析, 得初始行波到达时间 $t_0 = 0.008030 \text{ s}$; 反射行波与对端母线反射行波模极大值必满足式(6), 即位于 $[0.008075, 0.008102]$ 和 $[0.008093, 0.008120]$ 之间, 由此可以找到多个模极大值组合。又两个模极大值对应的时间需满足式(7), 据此在多个组合中筛选最合适的一组 t_1, t_2 。

由图 5 可得到数据如表 1 所示。

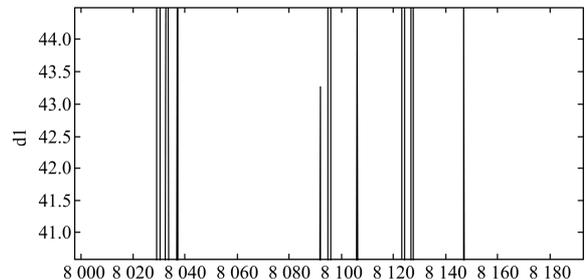


图 5 小波变换尺度 1 下的模极大值

Fig. 5 Wavelet transform maximum at scale 1

表 1 9 km 处故障各波头与初始行波时间差

Table 1 Slowness between mutation tip and initial tip when fault occurs at 9 km

组别	波头到达时刻	与初始行波时间差
1'	0.008 091	0.000 061
1''	0.008 096	0.000 066
2'	0.008 104	0.000 074

由表 1 可知 $1' + 2' = 0.000135$, $1'' + 2' = 0.000140$, 又模极大值间必须满足式(7)即 $\Delta t_1 + \Delta t_2 = \frac{2L}{v} = \frac{2 \times 20 \times 10^3}{2.96 \times 10^8} = 0.000135 \text{ s}$, 可以得出 $1'$ 与 $2'$ 的组合是最接近条件的两个模极大值点。得到新的时间点 $t_1 = 0.008091 \text{ s}$, $t_2 = 0.008104 \text{ s}$ 。

1) 将新得到的 t_1, t_2 代入式(4)、式(5),

$$x_1 = \frac{1}{2}v(t_1 - t_0) = 9.028 \text{ km}$$

$$x_2 = L - \frac{1}{2}v(t_2 - t_0) = 9.048 \text{ km}$$

求取两个距离的平均值,即为故障点距离

$$x = \frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{9.028 + 9.048}{2} = 9.038 \text{ km},$$

与实际故障距离误差为 0.038 km。

不同故障点的仿真结果如表 2 所示。

表 2 不同故障点的仿真结果

Table 2 Simulation results of different fault points

d/km	t_0/ms	t_1/ms	t_2/ms	x/km	l/km
6	8.021	8.061	8.116	5.930	5.752
9	8.030	8.091	8.104	8.964	8.654
11	8.037	8.111	8.098	10.962	10.623
14	8.049	8.143	8.089	13.996	13.639

表中: d 为故障距离; t_0 为故障初始行波到达时间; t_1 为故障反射行波到达时间; t_2 为对端母线反射行波到达时间; x 为组合法测距结果; l 为阻抗法测距结果。

该方法通过阻抗法获取故障的粗略距离,并结合实际经验将误差考虑在内,为之后的行波波头识别划出范围。结合小波分析准确识别突变点的特性,确认各个暂态行波波头的到达时间,同时识别故障点反射波与对端母线反射波,依据两者的关系多次筛选模极大值得到正确的时间点。由于两波头相互制约,故不会因识别了错误的单一波头而得到错误结果,提高了测距的精确性。

5 结论

本文提出的方法组合了阻抗法和基于小波分析的单端行波法,阻抗法鲁棒性强,虽误差较大,却可用于初步定位。而小波分析能准确识别行波突变点,使行波法精确性较高,因此可依据故障反射行波与对端母线反射行波到达时间之间相互制约、相互验证的特定关系,在多个模极大值中找到对应的时间点。相比依据模极大值的极性与幅值识别波头的方法更为准确,令故障测距结果更精确。

本文线路结构较为单一,对于更复杂的多分支线路以及电缆—架空线混合线路,有待进一步研究验证。

参考文献

[1] 何军娜,陈剑云,艾颖梅,等. 电力系统行波测距方法及其发展[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 148-154.

- HE Junna, CHEN Jianyun, AI Yingmei, et al. Fault location methods based on traveling wave theory for power system and its development[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 148-154.
- [2] 徐铭铭,肖立业,林良真. 基于零模行波衰减特性的配电线路单相接地故障测距方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(14): 397-404.
- XU Mingming, XIAO Liye, LIN Liangzhen. A fault location method for the single-phase-to-earth fault in distribution system based on the attenuation characteristic of zero-mode traveling wave[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(14): 397-404.
- [3] 耿建昭,王宾,董新洲. 利用单相跳闸后信息的输电线路单相接地单端精确测距方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 184-193.
- GENG Jianzhao, WANG Bin, DONG Xinzhou. A novel one-terminal single-line-to-ground fault location algorithm in transmission line using post-single-phase-trip data[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 184-193.
- [4] 郑秀玉,丁坚勇,黄娜. 输电线路单端故障定位的阻抗-行波组合法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 18-21.
- ZHENG Xiuyu, DING Jianyong, HUANG Na. Impedance-traveling wave assembled algorithm of one-terminal fault location for transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 18-21.
- [5] 卢继平,黎颖,李健,等. 行波法与阻抗法结合的综合单端故障测距新方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(23): 65-69.
- LU Jiping, LI Ying, LI Jian, et al. Non-communication fault locating of transmission line based on traveling wave and impedance method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(23): 65-69.
- [6] 马丹丹,王晓茹. 基于小波模极大值的单端行波故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(3): 55-59.
- MA Dandan, WANG Xiaoru. Single terminal methods of traveling wave fault location based on wavelet modulus maxima[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(3): 55-59.
- [7] 梁睿,孙式想. 单端行波故障测距的组合方法研究[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 699-706.
- LIANG Rui, SUN Shixiang. A combined method for single-ended traveling wave fault location[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 699-706.
- [8] 刘琨,董新洲. 单端电气量组合故障测距方法的适用性分析[J]. 广东电力, 2012, 25(6): 9-14.

- LIU Kun, DONG Xinzhou. Applicability analysis on combined fault location algorithm based on single terminal data[J]. Guangdong Electric Power, 2012, 25(6): 9-14.
- [9] 姚海燕, 张静, 留毅, 等. 基于多尺度小波判据和时频特征关联的电缆早期故障检测和识别方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 115-123.
- YAO Haiyan, ZHANG Jing, LIU Yi, et al. Method of cable incipient faults detection and identification based on multi-scale wavelet criterions and time-frequency feature association[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 115-123.
- [10] 刘晓明, 赵洋, 曹云东, 等. 基于小波变换的交流系统串联电弧故障诊断[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 10-17.
- LIU Xiaoming, ZHAO Yang, CAO Yundong, et al. Series arc fault diagnosis based on wavelet transform in AC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 10-17.
- [11] 许勇, 牛永会, 郭宁明, 等. 新型输电线路故障测距系统的研制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 119-125.
- XU Yong, NIU Yonghui, GUO Ningming, et al. Development of the new fault location system based on Qnet[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 119-125.
- [12] 黄子俊, 陈允平. 基于小波变换模极大值的输电线路单端故障定位[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(2): 10-14.
- HUANG Zijun, CHEN Yunping. Non-communication fault locating of transmission line based on wavelet modulus maxima[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(2): 10-14.
- [13] 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): 76-81.
- 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): 76-81.
- [14] 邱太洪, 王俊波, 李国伟, 等. 高频脉冲电流法在XLPE 电缆终端带电测试中的应用[J]. 高压电器, 2015(5): 99-103.
- QIU Taihong, WANG Junbo, LI Guowei, et al. Application of high frequency pulse current method in live detection of XLPE cable terminal[J]. High Voltage Apparatus, 2015(5): 99-103.
- [15] 陈根, 唐焱, 王新桥. 基于 ATP 的高压电缆金属护套多点接地故障仿真[J]. 高压电器, 2014, 50(4): 49-53.
- CHEN Gen, TANG Yan, WANG Xinqiao. Simulation of multipoint grounding faults in metal sheath of high-voltage cable based on ATP[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(4): 49-53.

收稿日期: 2015-12-07; 修回日期: 2016-04-21

作者简介:

彭浩(1993-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电缆故障诊断. E-mail: ph5798819@qq.com

(编辑 葛艳娜)