

输电线路单端故障定位的阻抗-行波组合算法

郑秀玉¹, 丁坚勇¹, 黄娜²

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 武汉电力职业技术学院, 湖北 武汉 430079)

摘要: 为了提高输电线路单端故障定位的可靠性和精确性, 提出了集测量阻抗法与行波法于一体的阻抗-行波组合算法。由测量阻抗法粗略地计算故障点位置, 由该距离分别确定故障点反射波和对端母线反射波到达观测母线时刻的区域, 分别在相应的区域内检测故障点反射波和对端母线反射波到达观测母线的准确时刻, 并根据检测结果进行故障定位。该算法中测量阻抗法保证可靠性, 行波法提高精确性, 两者具有优势互补性。仿真试验验证了所提出的组合算法的正确性。

关键词: 故障定位; 单端; 输电线路; 阻抗; 行波; 组合算法

Impedance-traveling wave assembled algorithm of one-terminal fault location for transmission lines

ZHENG Xiu-yu¹, DING Jian-yong¹, HUANG Na²

(1. Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Wuhan Electric Power Technical College, Wuhan 430079, China)

Abstract: In order to advance the reliability and accuracy of one-terminal fault location for transmission lines, an impedance-traveling wave assembled algorithm, which combines measurement impedance method with traveling wave method, is presented. It uses method based on measurement impedance to calculate roughly fault distance. Then, time regions of reflected waves from fault point and opposite bus to detective bus are confirmed respectively through the distance. Finally, exact time of reflected wave from fault point and that of reflected wave from opposite bus to detective bus are identified respectively in corresponding regions, and fault location is implemented according to the results detected. It has complementarities of both methods, because measurement impedance method guarantees reliability and traveling wave method improves accuracy. The simulation has proved that the assembled algorithm proposed is correct.

Key words: fault location; one-terminal; transmission lines; impedance; traveling wave; assembled algorithm

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)06-0018-04

0 引言

输电线路故障定位又称故障测距, 其算法分为两类, 一类是利用线路单端电压、电流等故障信息构成测距算法, 称为单端故障定位; 另一类是利用线路双端故障信息构成测距算法, 称为双端故障定位。双端故障定位原理虽然比单端故障定位原理要准确, 但由于需要通讯设备以及双端同步采样等而很难实现^[1-2]。然而, 单端故障定位只需在每回线路一端装设故障检测装置, 不需要双端数据通讯和同步对时设备, 具有较好的经济性^[3]。因此, 准确的单端测距原理成为研究者梦寐以求的目标^[3-6]。单端故障定位又分为两类, 一类是利用工频量的定位原理, 另一类是利用暂态行波的定位原理^[6]。在资金投入方面, 前者可以利用现已投运设备, 硬件投资小, 实现容易; 后者则需要专门设备, 硬件投资大, 技术较复杂。与工频量测距算法相比, 行波法几乎不受过渡电阻和线路不对称等因素的影响, 精度优

于工频量法^[7-8]。然而, 行波法存在反射波的识别问题, 且在近区还存在无法识别反射波区域, 而近端恰好是工频法测距较准确的区段。在这意义上, 行波法与工频量法具有优势互补性^[9]。

文献[10]给出了故障定位算法的鲁棒性定义, 并对常用的五种基于工频电气量的单端故障定位算法进行了仿真, 分析和比较了这些算法的鲁棒性问题。仿真表明测量阻抗法最具鲁棒性。对于行波故障定位, 波速是必不可少的参数, 波速的准确度将直接影响定位精度。波速与线路参数有关, 而线路参数实际上是随频率变化的, 精确计算波速存在困难^[11]。

故障定位技术的关键问题是可靠性和精确性。本文综合考虑输电线路单端故障定位的可靠性和精确性, 提出了一种集测量阻抗法与行波法于一体的阻抗-行波组合算法。

1 单端阻抗-行波组合算法

本文所提到的单端阻抗-行波组合算法包括测

量阻抗法和行波法^[12]。

1.1 测量阻抗法

测量阻抗法根据测量阻抗、线路正序阻抗和测量端电流消去过渡电阻, 求得故障距离^[13-14]。

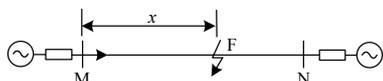


图1 三相电力系统故障图

Fig.1 Fault diagram of three-phase power system

如图1所示, 根据测量阻抗法, 故障距离可以由式(1)计算得出。

$$x = (X_M - \frac{R_M \times \text{tg} \varphi_L - X_M b}{a \times \text{tg} \varphi_L - b}) / X_{11} \quad (1)$$

式中: x 为故障距离; X_{11} 为线路单位长度正序电抗; φ_L 为线路正序阻抗角; $a + jb = \dot{I}_{Mf} / \dot{I}_M$; $R_M + jX_M = \dot{U}_M / \dot{I}_M$ 为距离保护的测量阻抗; \dot{I}_{Mf} 为故障分量电流, \dot{I}_M 和 \dot{U}_M 分别为测量电流和测量电压。

在测量阻抗法中, 假设了故障点电流 \dot{I}_f 与故障分量电流 \dot{I}_{Mf} 之间的相位差为零, 不可避免地导致一定故障定位误差。该算法虽然不具有很高的准确性, 但是具有很强的鲁棒性, 可以用来确定故障点的粗略范围^[10]。

1.2 行波法

输电线路某处发生故障时, 由故障点产生的故障行波沿输电线路分别向观测母线和对端母线传播。因为阻抗不连续, 向观测母线传播的故障行波到达观测母线被反射并向故障点传播, 到达故障点后又反射并再次到达观测母线; 而向对端母线传播的故障行波到达对端母线很有可能被反射并穿越故障点到达观测母线。如图2所示, 线路长度为 L , t_0 为故障发生的时刻, t_1 、 t_2 和 t_3 分别为故障初始行波、故障点反射波和对端母线反射波到达观测母线的时刻。

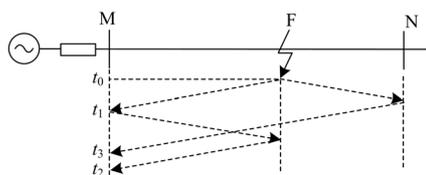


图2 故障行波传播图

Fig.2 Diagram of fault traveling wave propagation

大量仿真表明: 在任何故障情况下, 测量阻抗法最大定位误差在10%以内^[14]。因此故障点的真实距离一定在 $(x - 10\%L, x + 10\%L)$ 范围内。定

义 t_M 、 t_N 和 δ_t 分别表示当故障距离为 x 时对应的故障行波到达观测母线 M 的所需时间, 当故障距离为 x 时对应的故障行波到达对端母线 N 的所需时间和 10%L 距离误差对应的时间误差, 其表达式如下:

$$\begin{cases} t_M = \frac{x}{v} \\ t_N = \frac{L - x}{v} \\ \delta_t = \frac{10\%}{v} L \end{cases} \quad (2)$$

式中: v 表示行波的准波速, 由线路参数计算得到, 或此前由式(4)所测波速对原波速修正得到。

以故障初始行波到达 M 端母线的时刻 t_1 为时间参考, 则故障点反射波到达 M 端母线的时刻 t_2 在 $(t_1 + 2t_M - 2\delta_t, t_1 + 2t_M + 2\delta_t)$ 范围内, 对端母线反射波到达 M 端母线的时刻 t_3 在 $(t_1 + 2t_N - 2\delta_t, t_1 + 2t_N + 2\delta_t)$ 范围内。

1) 若可以检测到 t_2 和 t_3 , 则联立方程组为^[11]:

$$\begin{cases} v'(t_1 - t_0) = x' \\ v'(t_2 - t_0) = 3x' \\ v'(t_3 - t_0) = 2L - x' \end{cases} \quad (3)$$

式中: v' , t_0 和 x' 为未知数, 分别表示实际行波的真实速度, 故障发生时间和故障距离。由方程组(3)求解得:

$$\begin{cases} x' = \frac{t_2 - t_1}{t_2 + t_3 - 2t_1} L \\ v' = \frac{2L}{t_2 + t_3 - 2t_1} \end{cases} \quad (4)$$

2) 若可以检测到 t_2 而检测不到 t_3 , 则联立方程组为:

$$\begin{cases} v(t_1 - t_0) = x' \\ v(t_2 - t_0) = 3x' \end{cases} \quad (5)$$

由方程组(5)求得故障距离为:

$$x' = \frac{1}{2}(t_2 - t_1)v \quad (6)$$

3) 若可以检测到 t_3 而检测不到 t_2 , 则联立方程组为:

$$\begin{cases} v(t_1 - t_0) = x' \\ v(t_3 - t_1) = 2(L - x') \end{cases} \quad (7)$$

由方程组(7)求得故障距离为:

$$x' = L - \frac{1}{2}(t_3 - t_1)v \quad (8)$$

4) 若 t_2 和 t_3 均不能被检测到, 即单端行波故

障定位算法无效，则以测量阻抗法为准。

2 仿真试验

为了验证算法的正确性，本文采用 EMTWorks 建立了一个线路长度 300 km 电压等级 500 kV 工频 50 Hz 的仿真模型（如图 1 所示）。线路采用频率相关模型进行仿真，更接近实际，可信度更高。线路参数：双分裂相导线，间隔 45.7 cm，外直径为 4.07 cm，内直径为 1.11 cm，直流电阻为 0.032 4 Ω/km，水平距离为 ±6.096 m、0 m，垂直距离为 29.65 m、33.77 m 和 29.65 m；两根避雷线均为实心导线，其直径为 0.98 cm，直流电阻为 1.621 6 Ω/km，水平距离为 ±3.9319 m，垂直距离为 39.06 m；大地回路地电阻为 100 Ω/m。由线路参数可以利用 EMTWorks 计算得到行波线模波速和 50 Hz 对应的线路正序、零序参数，如表 1 和表 2 所示。

表 1 行波线模波速

Tab.1 Velocity of aerial mode traveling wave

| | | | | |
|---------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| f/MHz | 0.25 | 0.50 | 1.00 | 2.00 |
| $v/(10^5\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$ | 2.977 7 | 2.978 2 | 2.978 6 | 2.978 9 |

表 2 50 Hz 对应的线路正序、零序参数

Tab.2 Line parameters of positive/zero sequence corresponding to 50 Hz

| | | | | | |
|--------------|-----------------|-------------------|--------------|-----------------|-------------------|
| r_1/Ω | l_1/mH | $c_1/\mu\text{F}$ | r_0/Ω | l_0/mH | $c_0/\mu\text{F}$ |
| 0.017 056 | 0.921 69 | 0.012 54 | 0.155 38 | 3.759 7 | 0.006 61 |

高压输电线路的绝大多数故障是单相接地短路，而且这种故障时过渡电阻相对比较大，给测量阻抗法带来相对较大误差。因此，下面以距母线 M 为 100 km 处经 30 Ω 过渡电阻发生 A 相接地短路

为例阐述定位过程。

设置采样频率为 10 kHz，采集 10 个工频周期。非故障情况时，采集 A 相电流；故障情况时，采集母线 M 处 A 相电压、电流和零序电流。首先，对采集的数据进行傅立叶变换并由式 (1) 计算出故障距离 $x = 96.296 \text{ km}$ 。取 0.25~2 MHz 频段的平均波速 $v = 2.97835 \times 10^5 \text{ km/s}$ 为准波速，由式 (2) 得到 $t_M = 323.32 \mu\text{s}$ 、 $t_N = 646.64 \mu\text{s}$ 和 $\delta_1 = 100.73 \mu\text{s}$ 。

设置故障时刻为 0 ms 处，采样频率为 2 MHz，采集 0.5 个工频周期。采集三相电流，对其进行相模变换和小波分析（如图 3 所示），根据模极大值获取时刻 $t_1 = 336.0 \mu\text{s}$ ，并且在 (777.68, 118.60) 和 (1424.32, 1827.24) 范围内分别检测 $t_2 = 1007.5 \mu\text{s}$ 和 $t_3 = 1679.0 \mu\text{s}$ 。由式 (4) 计算得到 $t_0 = 0.25 \mu\text{s}$ ， $v' = 2.9784 \times 10^5 \text{ km/s}$ ， $x' = 100.000 \text{ km}$ ；由式 (6) 计算得到 $t_0 = 0.25 \mu\text{s}$ ， $x' = 99.998 \text{ km}$ ；由式(8)计算得到 $t_0 = 0.115 \mu\text{s}$ ， $x' = 100.004 \text{ km}$ 。

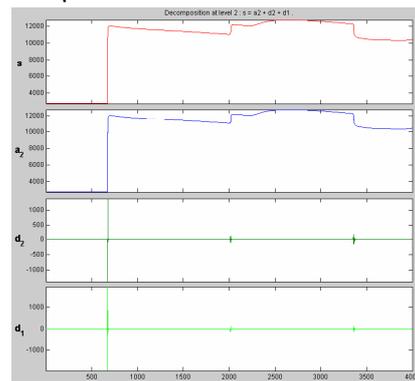


图 3 小波分析

Fig.3 Wavelet analysis

表 3 A 相接地短路故障定位结果

Tab.3 Results of fault location when single phase-to-ground faults occur

| 故障距离/km | 过渡电阻/Ω | 测量阻抗法/km | 测量阻抗法误差/% | 行波法/km | 行波法误差/m |
|---------|--------|----------|-----------|--------------------------|---------|
| 30 | 3 | 29.654 | 0.115 | 29.932 (t_2) | 68 |
| | 30 | 28.929 | 0.357 | 30.015 ($t_2 \& t_3$) | 15 |
| | 300 | 23.003 | 2.332 | 30.013 (t_3) | 13 |
| 100 | 3 | 97.925 | 0.692 | 99.975 ($t_2 \& t_3$) | 25 |
| | 30 | 96.296 | 1.235 | 100.000 ($t_2 \& t_3$) | 0 |
| | 300 | 91.648 | 2.784 | 99.950 ($t_2 \& t_3$) | 50 |
| 200 | 3 | 193.400 | 2.200 | 200.042 ($t_2 \& t_3$) | 42 |
| | 30 | 192.900 | 2.367 | 199.930 ($t_2 \& t_3$) | 70 |
| | 300 | 189.430 | 3.523 | 200.080 (t_3) | 80 |
| 270 | 3 | 260.270 | 3.243 | 270.070 ($t_2 \& t_3$) | 70 |
| | 30 | 259.510 | 3.497 | 269.960 ($t_2 \& t_3$) | 40 |
| | 300 | 257.970 | 4.010 | 269.990 (t_3) | 10 |

改变故障距离、时刻、类型和过渡电阻，重复

上述过程得到一系列定位结果。两相短路和三相短

路时, 相间过渡电阻一般比较小, 给测量阻抗法带来相对较小误差, 并且故障点反射程度相对明显。限于篇幅, 本文仅给出了 A 相接地短路故障定位结果, 如表 3 所示。从结果中可以得到一个共同的特性: 测量阻抗法误差随距离增加而增大, 随过渡电阻增大而增大, 但误差在 10% 之内; 本文提出的组合法具有较高的可靠性, 且在单端行波故障定位算法有效情况下定位误差在 100 m 之内。

3 结论

输电线路精确故障定位一直是电力系统亟待解决的难题, 快速准确的故障定位对电力系统具有极为重要的意义。本文综合考虑输电线路单端故障定位系统的可靠性和精确性, 提出了一种集测量阻抗法与行波法于一体的阻抗-行波组合法。该算法中测量阻抗法保证故障定位的可靠性, 行波法提高定位精度, 两者具有优势互补性。仿真试验验证了该算法的正确性。

参考文献

- [1] Javad Sadeh, Hasjsaid N, Ramkbar A M, et al. Accurate Fault Location Algorithm for Series Compensated Transmission Lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15 (3): 1027-1033.
- [2] 覃剑, 陈祥训, 郑键超, 等. 利用小波变换的双端行波测距新方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 6-10.
QIN Jian, CHEN Xiang-xun, ZHENG Jian-chao, et al. New Method of Two Terminal Fault Location Technique Using Wavelet Transforms[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(8): 6-10(in Chinese).
- [3] Tamer Kawady, Jurgen Stenzel. A Practical Fault Location Approach for Double Circuit Transmission Lines Using Single End Data[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(4): 1166-1173.
- [4] 覃剑, 彭莉萍, 王和春. 基于小波变换技术的输电线路单端行波故障测距[J]. 电力系统自动化, 2005, 29 (19): 62-65, 86.
QIN Jian, PENG Li-ping, WANG He-chun. Single Terminal Methods of Traveling Wave Fault Location in Transmission Line Using Wavelet Transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 62-65, 86(in Chinese).
- [5] 徐青山, LAI L L, 陈锦根, 等. 输电线路单端行波故障测距新算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (15): 21-25.
XU Qing-shan, LAI L L, CHEN Jin-gen, et al. Novel and Comprehensive Countermeasures for Single Terminal Fault Location of Transmission Lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(15): 21-25(in Chinese).
- [6] 哈恒旭, 张保会, 吕志来. 高压输电线路单端测距新原理探讨[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (2): 42-45, 49.
HA Heng-xu, ZHANG Bao-hui, Lü Zhi-lai. A Novel Principle of Single-ended Line Fault Location[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (2): 42-45, 49(in Chinese).
- [7] Thompson Adu. A New Transmission Line Fault Locating System[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16(4): 498-503.
- [8] Zhang D J, Wu Q H, Zhang J F, et al. Accurate Fault Location Based on Transient Extraction Using Mathematical Morphology[J]. Electronics Letters, 2002, 38(24): 1583-1585.
- [9] Carlos Aguilera, Eduardo Orduña, Giuseppe Rattá. Adaptive Non-communication Protection Based on Traveling Waves and Impedance Relay [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(3): 1154-1162.
- [10] 陈铮, 董新洲, 罗承沐. 单端工频电气量故障测距算法的鲁棒性[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2003, 43 (3): 310-313, 317.
CHEN Zheng, DONG Xin-zhou, LUO Cheng-mu. Robustness of One-terminal Fault Location Algorithms Based on Power Frequency Quality[J]. Journal Tsinghua Univ: Natural Science Edition, 2003, 43 (3): 310-313, 317(in Chinese).
- [11] 蒋涛, 陆于平. 不受波速影响的输电线路单端行波故障测距研究[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(12): 29-32.
JIANG Tao, LU Yu-ping. Study of Fault Locating Based on Single Traveling Waves Avoiding Wave Speed Influence[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(12): 29-32(in Chinese).
- [12] ZHENG Xiu-yu, LI Xiao-ming, DING Jian-yong, et al. Study on Impedance-traveling Wave Assembled Algorithm in One-terminal Fault Location System for Transmission Lines[J]. IEEE DRPT, 2008:1723-1726.
- [13] Sant M T, Paithankar Y G. On line Digital Fault Locator for Overhead Transmission Line[J]. IEE Proceedings, 1979, 126 (11): 1181-1185.
- [14] DONG Xin-zhou, CHEN Zheng, HE Xuan-zhou, et al. Optimizing Solution of Fault Location[A]. in: IEEE Power Engineering Society Summer Meeting[C]. 2002.1113-1117.

收稿日期: 2009-07-23; 修回日期: 2009-12-09

作者简介:

郑秀玉(1982-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: xyzheng_wuhu@163.com

丁坚勇(1957-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事电力系统辨识与控制、电力系统可靠性等方面的科研和教学工作;

黄娜(1983-), 女, 工学硕士, 助教, 从事电力系统相关的科研和教学工作。