

基于频率-相位分析技术的特高压输电线路故障位置精密标定的基础研究

王柏恒¹, 姚致清², 封晓东³

(1. 许继直流输电部, 河南 许昌 461000; 2. 许昌继电器研究所, 河南 许昌 461000;
3. 国家电网公司河南许昌供电公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 故障波形在特高压输电线路传输中的衰减和畸变, 是时间差法故障定位误差的主要原因。为解决这个问题, 提出一个新的方案, 即频率-相位分析技术的长距离超高压输电线路故障定位, 并通过比较实验来说明其定位的准确及先进性。

关键词: 时间; 频率; 相位

The study for precise trouble location of UHVDC transmit electricity line on frequency-phase analysis

WANG Bai-heng¹, YAO Zhi-qing², FENG Xiao-dong³

(1.XJ Electric Ltd. HVDC Department, Xuchang 461000, China; 2.Xuchang Relay Research Institute, Xuchang 461000, China;
3.Xuchang Power Supply Company, Xuchang 461000, China)

Abstract: The attenuation and aberration of fault waveform in UHVDC transmission is the main cause to lead to the error of fault location based on time difference method. In order to resolve this question, this paper gives a new approach, power line fault location based on frequency-phase analysis, and illuminates that it's more advance and more precise than other methods by experiment.

Key words: time; frequency; phase

中图分类号: TM72; TM77

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2008)24-0001-03

0 引言

特高压输电线路故障后快速寻找故障点, 能够缩短故障修复时间, 提高供电可靠性, 减少停电损失, 是保证电网安全稳定运行的一项关键技术, 也是长期以来困扰电网运行的世界性技术难题之一。

线路故障点的标定通常采用单端行波测距原理, 即利用线路故障时在测量端检测到的第一个故障行波与故障点对侧反射波之间的延时计算测量点到故障点之间的距离; 另一种较为先进的方式是双端行波测距, 即在线路两端检测故障波形, 叠加后测量其时间之差计算故障点到线路两端测量点之间的距离。由于波形在线路中的传播特性, 在较长传输距离(尤其是特高压线路中)由于波形的衰减而

使其发生畸变, 同一故障点的波形在两端测量时不一致, 当两个波形叠加后出现错位, 致使时间差出现偏差, 这是以上两种测量方法产生较大误差的主要原因, 也是基于时间领域测量的误差要因。如图1所示。

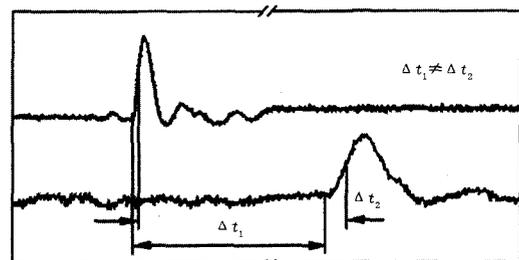


图1 基于传播特性所产生的误差

Fig.1 The error base on transmission

基金项目: 国家科技支撑计划特高压输电系统开发与示范项目课题资助(2006BAA02A30)

为了解决时间差法误差较大的问题, 这里提出一个新的方案, 即利用故障波形的频谱及相位进行

分析，从而导出故障位置。

1 实验方法

为验证新方案的可行性，这里通过一个比较实验，用数据来说明频率—相位分析技术的先进性。

1.1 电缆的处理及连接

实验选用等级为 6.6 kV 的电力电缆，首先在电缆两端约 20 cm 处分别拨去最外层的绝缘层，使电缆的半导体层露出，然后在两端约 5 cm 处再拨去半导体层，使线心露出，最后用铝箔包裹屏蔽层，图 2 所示是实验电缆的处理方法。



图 2 实验电缆的处理及连接

Fig.2 The connection and processed of testing cable

为了测量的需要，在距电缆两端 1 m 处及任意一段 20 m 处分别做以上处理，然后在电缆两端 1 m 处分别接入集线器，在处理后的另一端 19 m 处接入放电发生器，由此通过放电发生器注入放电信号，模拟故障点，放电波形通过电缆向两端运行，最后通过集线器把模拟故障波形传入数字示波器。最后由计算机软件对示波器所采集的数据分析完成。图 3 为实验接线图。

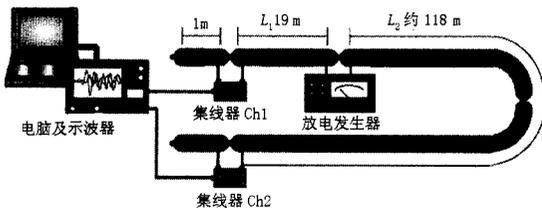


图 3 实验接线图

Fig.3 The wiring diagram

由于两端路径差的缘故，尽管是同一故障波形其在示波器里所显示的形态并不完全相同，路径长一端的由于频率衰减等原因波形有所变形。如图 1 所示。

1.2 波形传播速度的导出

由于电信号在电缆内的传播速度与空气中不同，加上电力电缆所特有的频率衰减特性，所以线路故障波形必有其特定运行速度。这里通过实验导出其运行速度，首先在电缆一端的 19 m 处注入放电信号，然后通过示波器在 Ch1 处进行采样。如图

4 所示，示波器首先获取 19 m 处的第一波放电波形，然后是第二波的反射波到达。读取放电波形的第一波和第二波的峰值所对应的时间，取其时间差 Δt 通过下面的公式 (1) 计算导出波形在电缆中的运行速度 v 。

$$v = 2 L_1 / \Delta t \tag{1}$$

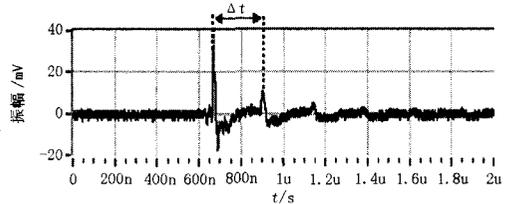


图 4 Ch1 获取的放电波形第一波和第二波的时间差

Fig.4 The difference of time between the 1st discharge wave and the 2nd discharge wave which measured from CH1

2 解析方法

对于上面实验所取得的数据，首先考虑在 time domain (时间领域) 利用时间差法进行解析，然后采用频率—相位分析法，在 frequency domain (频率领域) 通过相位差法来解析数据。

2.1 时间领域的解析

时间差法的故障位置标定比较简单，顾名思义即利用时间和速度之积等于距离。其标定的方法是，在 Ch1 和 Ch2 两端分别取模拟故障信号波形的第一波的振幅的 10%、50%、peak (100%)，利用两个波形的时间差导出故障距离。

公式 (2) 两段电缆的长度差，即 $\Delta L = L_2 - L_1$

$$\Delta L = \Delta t_{12} \times v \tag{2}$$

这里： Δt_{12} 是 Ch1 和 Ch2 所取信号波形的时间差。

而 $L = L_1 + L_2$ ，由此可以导出：

$$L_1 = (L - \Delta L) / 2$$

$$L_2 = (L + \Delta L) / 2$$

从而在电缆两端都可以判断故障位置。

2.2 频率领域的解析

频率—相位分析法故障定位有违于传统的概念，是一种利用频谱分析及波形的相位差来标定故障位置的新方法。其解析过程为，从 Ch1 和 Ch2 两端分别抽取模拟故障信号波形的第一波信号，利用高斯分布函数及窗函数除去信号中的杂波，对主波形进行一系列的信号处理，这样可有效提取故障信号波形的特征。然后对处理过的波形进行傅里叶变换、

利用频率及相位进行分析, 从而导出故障位置。

下面的公式(3)即是故障距离的标定计算式:

$$x = \left[L - \frac{\Delta\phi}{2\pi f} v \right] \div 2 \quad (3)$$

这里: x 为故障距离; L 为线路总长; $\Delta\phi$ 为 Ch1 和 Ch2 两端故障信号相位差; f 是解析频率; v 是波形传播速度。

2.2.1 解析中窗函数的幅值对标定精度的影响

由于频谱的解析是取故障信号的部分波形进行傅里叶变换, 此时取出的数据多少完全由窗幅决定, 幅窄数据少, 影响相位分解及频谱精度致使测距误差较大; 而幅宽则数据多, 反射及杂波的影响较大, 也会造成测距精度不高。因此适合的幅宽对故障位置的精密标定尤为重要。图 5 为窗函数幅宽对标定精度的影响。

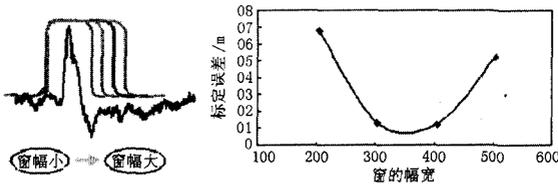


图 5 窗函数的幅宽对标定精度的影响

Fig.5 The relation between the width of windows function and demarcated precision

2.2.2 波形传播速度与频率的关系

利用频率-相位差法定故障位置有个量很重要, 即传播速度。然而, 电力电缆具有频率衰减的特性, 其波形传播速度与频率有着十分密切的关系, 不同频率的波形具有不同的传播速度, 因此在解析过程中必须考虑其影响。图 6 所示为故障波形通过傅里叶变换所求得的传播速度与频率的依存关系。从图中可以看出波形传播速度在低频段差值很大, 而在高频段比较平稳, 信号解析过程中采用合适的频率相当重要。

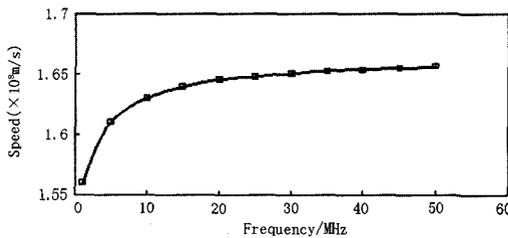


图 6 波形的传播速度与频率的依存关系

Fig.6 The relation between the wave's speed and frequency

2.2.3 信号处理前后的相位差

频率-相位差解析中另一个更为重要的量是相

位差, 它是整个解析的核心。正确的相位差可以使标定精度非常高, 因此获取准确的相位差十分重要。由于获取的原始信号中存在各种各样的杂波, 直接导出相位差会有很大误差, 从而影响测距精度。所以要取得正确的相位差必须对故障波形进行一系列的信号处理, 以除去杂波抽取纯正的故障信号。图 7 (a)、(b) 所示的为信号处理前后相位差和频率的关系。

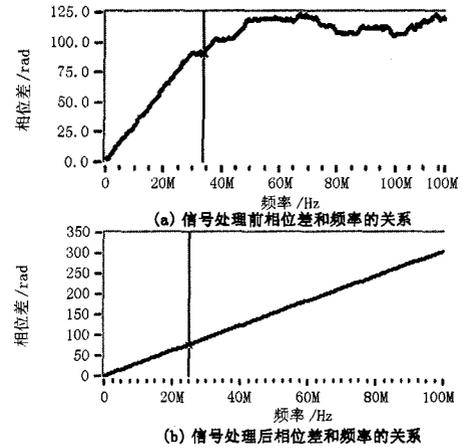


图 7 信号处理前后相位差和频率的关系

Fig.7 The relation between the phase difference and frequency before the signals processing or after the signals processing

3 解析结果及结论

图 8 所示总长为 137 m 左右的电缆, 在一端 19 m 处注入放电脉冲的标定误差。Time domain 的时间差法解析是采用两端采样脉冲振幅的 10%、50%、100% 三点故障位置标定, 其 19 m 侧标定误差最大约 1 m、最小约 0.5 m 左右; Frequency domain 的频率、相位差法解析的场合, 利用和时间差法相同的波形数据, 选取适合的频率范围 15±5 MHz 加之窗函数合适的窗幅, 解析结果最小误差为 0.1 m 左右。

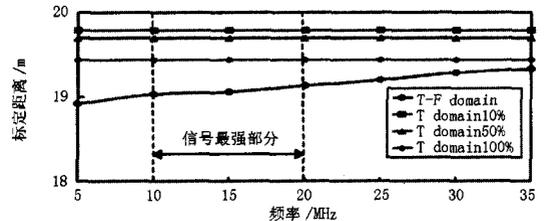


图 8 实验结果

Fig.8 The test result

实验结果表明, 行波时间差法的故障位置标定其最小误差为 2.63%, 而频率-相位差法位置标定最小误差为 0.05%, 测距精度大为提高。此次实验的电缆长为百米以上, 结果证明频率-相位差解析法

(下转第 13 页 continued on page 13)

Expansion Planning[C]. Brazil: 2000.

[8] Hobbs B F, Inon J, Stoft S E. Installed Capacity Requirements and Price Caps: Oil on the Water, or Fuel on the Fire?[J]. The Electricity Journal, 2001, 14: 23-34.

[9] 丁伟, 李星梅. 电力市场中发电项目投资风险研究[J]. 现代电力, 2006, 23(3): 84-88.

DING Wei, LI Xing-mei. Research on Investment Risk of Electricity Generation Project in Electricity Market[J]. Modern Electric Power, 2006, 23(3): 84-88.

[10] De Vries L J. Securing the Interest in Electricity Generation Market[D]. Amsterdam: Delft University of Technology, 2004.

[11] 臧宝锋, 胡汉辉, 王建兴. 电力市场条件下的发电投资均衡[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(2): 41-44.

ZANG Bao-feng, HU Han-hui, WANG Jian-xing. Investment Equilibrium in Power Generation of Electricity Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 41-44.

[12] 马歆. 对中国电力投资中存在问题的思考[J]. 特区经济, 2006, 210(7): 35-36.

MA Xin. Thinking of the Problem in China Power Investment[J]. Special Zone Economy, 2006,210(7): 35-36.

[13] Doorman G. Capacity Subscription and Security of Supply in Deregulated Electricity Markets. SINTEF Energy Research, 2003.

[14] Jaffe A B, Felder F A. Should Electricity Markets have a Capacity Requirement? If so, How Should it be Priced?[J]. The Electricity Journal, 1996, 9(10): 52-60.

[15] Rochlin C. Resource Adequacy Requirement, Reserve Margin, and the Public Goods Argument[J]. The Electricity Journal, 2004, 17(3): 52-59.

[16] Jaffe A B, Felder F A. Should electricity Markets Have a Capacity Requirement? If so, How Should it be Priced?[J]. The Electricity Journal, 1996, 9(10): 52-60.

收稿日期: 2008-03-15; 修回日期: 2008-08-24

作者简介:

刘国跃(1962-), 男, 博士研究生, 研究方向为能源与电力经济. E-mail:junguoia@126.com

(上接第 3 页 continued from page 3)
的有效和先进性, 而在电缆长为数百公里甚至数千公里的特高压输电线路中, 由于故障波形长距离的运行、其衰减更为严重, 频率-相位解析法的优势则更为明显。

参考文献

[1] Sachse W, Pao Y H. On the determination of phase and group velocities of depressive waves in solid” [J].J. of Applied Physics, Vol. 49, pp. 4320-4327 (1978).

[2] Rokhlin S I, et al.. Real Time Study of Frequency Dependence of Attenuation and Velocity of Ultrasonic Waves During the Curing Reaction of Epoxy Resin[J]. J. of Acoustic Society of Am. , Vol. 79, pp. 1786-1793 (1986).

[3] 川田 昌武. 電磁波空間位相差法を用いた非接触部分放電検出法 [J]. 電気学会論文誌, Vol.115, No.10, 1168-1173 頁, 1995 年.

[4] 犬塚 博 他: “電力ケーブル故障点探査における信号処理による精度改善” T.IEE Japan, Vol.120-B, No.11, 1416-1423 頁 2000.

收稿日期: 2008-11-05

作者简介:

王柏恒(1966-), 男, 硕士, 工程师, 长期从事高压直流输电电控制系统方面的研究; E-mail:wangbaiheng@xjgc.com
姚致清(1960-), 男, 本科, 高级工程师, 从事电力系统保护与控制研究;
封晓东(1962-), 男, 高级工程师, 长期从事电网运行、检修及生产管理工作。

(上接第 7 页 continued from page 7)

FU Chen-zhao, JI Sheng-chang, et al. Study of Thermal Circuit Model for the Cable Ttransformer Coil Based on Finite Element Method[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(2): 1-3.

[14] 曹惠玲, 王增强, 等. 坐标组合法对直埋电缆与土壤界面温度场的数值计算[J]. 电工技术学报, 2003, 18(3): 59-63.

CAO Hui-ling, WANG Zeng-qiang, et al. Numerical Computation of Temperature Distribution of Underground Cables and Soil with Combinatorial Coordinates[J]. Transactions of China Electro technical Society, 2003, 18(3): 59-63

[15] 梁永春, 李彦明, 柴进爱, 等. 地下电缆群稳态温度场和载流量计算新方法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(8):

185-189.

LIANG Yong-chun, LI Yan-ming, CAI Jin-ai, et al. A New Method to Calculate the Steady-State Temperature Field and Ampacity of Underground Cable System[J]. Transactions of China Electro technical Society, 2007, 22(8): 185-189.

收稿日期: 2008-07-16; 修回日期: 2008-10-06

作者简介:

徐元哲(1962-), 男, 博士, 教授, 主要从事电力设备故障诊断的研究; E-mail:xuyuanzhe@263.com
王乐天(1982-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力设备故障诊断的研究。