

电力电缆脉冲电流测距法的改进

赵爱丽¹, 徐丙垠^{1,2}, 张正团¹

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049; 2. 山东科汇电气股份有限公司, 山东 淄博 255087)

摘要: 提出了一种改进的电力电缆故障脉冲电流测距法。通过在高压回路里串联电感和电阻, 限制电缆中冲击电压的上升速度, 延迟故障点击穿放电的时间, 使得加入冲击电压产生的暂态过程和故障点放电产生的暂态过程具有明显的时间差, 避免两个暂态过程的脉冲电流波形产生混叠, 解决了故障点反射脉冲难以识别的问题。数字仿真与现场试验结果证明了所提出的对脉冲电流测距法的改进是正确、可行的。

关键词: 电力电缆; 故障测距; 脉冲电流法; 延迟; ATP/EMTP 数字仿真

Improvement of impulse current method for cable fault location

ZHAO Ai-li¹, XU Bing-yin^{1,2}, ZHANG Zheng-tuan¹

(1. School of Electrical & Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;

2. Shandong Kehui Electric Company, Zibo 255087, China)

Abstract: In this paper, a new method based on impulse current method for cable fault location is designed. The fault point voltage can not be quickly increased, by adding the series inductance and resistance in the high-voltage circuit. So that this method can prolong discharge time of the fault point. And this delay will separate the discharge transient of fault point with the charge transient, and their waves will not overlap. So this method can resolve the problem that the reflected waves are difficult to identify. Both ATP/Matlab simulations and field tests verify the feasibility of this method.

Key words: cable; fault location; impulse current method; delay; ATP/EMTP digital simulation

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)24-0055-05

0 引言

电力电缆通常埋于地下, 一旦出现故障, 寻找起来十分困难, 不仅浪费了大量的人力、物力和查找时间, 而且会造成难以估计的停电损失。准确、快速、经济地查寻到电缆故障点, 对于缩短停电时间, 提高供电可靠性、减少故障修复费用具有十分重要的意义^[1]。

目前现场应用的电缆故障测距方法主要有低压脉冲法、脉冲电流法和二次脉冲法^[2]。低压脉冲法只能用于低阻故障测距, 而后两种方法主要用于在故障中占绝大多数的高阻故障^[1,3]。二次脉冲法是首先在电缆不带电的情况下向其注入一个低压脉冲, 获得故障点呈高阻状态下的脉冲反射波形。然后, 给故障电缆施加高压冲击脉冲使故障点击穿, 同时通过耦合电路再向其注入一低压脉冲, 获得故障点燃弧状态(电阻接近于零)下脉冲反射波形。将以上测得的两个脉冲反射波形进行比较, 在故障点反射脉冲到来的时刻, 二者将出现明显分叉点; 据此,

可测定故障点的距离。二次脉冲法把低压脉冲法和高压闪络技术相结合, 克服了低压脉冲法不能测量高阻故障的不足, 又保留了其波形易于识别的优点; 但该方法设备构成复杂、安全性差、制造成本高、现场使用不方便。

脉冲电流法是 80 年代初发展起来的一种电缆故障测距方法, 具有接线简单、安全可靠、成本低等优点, 受到了测试人员的欢迎。但该方法的波形较复杂, 故障点反射脉冲识别困难, 对测试人员专业水平与经验要求较高。本文的工作致力于对脉冲电流测距法进行改进, 解决其故障点反射脉冲难以识别的问题, 以促进该方法的进一步推广应用。

1 脉冲电流法及其存在的问题

脉冲电流测距法(简称脉冲电流法)是将电缆故障点用直流高压击穿, 使用仪器采集并记录下故障点击穿产生的电流脉冲波形, 通过分析故障点放电产生的脉冲电流在测量端与故障点往返一次的时间计算故障距离。

脉冲电流法包括直闪法和冲闪法两种具体的测试方法^[1]。图 1 (a) 为直闪法测试接线图, 用于测量闪络击穿性故障, 在用高压试验设备把电压升到一定值时故障点闪络击穿, 线性电流耦合器 L 输出第一个电流脉冲, 放电脉冲到达故障点后又被反射, 折回到仪器端产生第二个脉冲。这一过程不断进行, 直到放电过程结束, 仪器记录的脉冲电流波形如图 1 (b) 所示。图中第一个负脉冲是故障点放电脉冲到达测量点引起的, 可简单地叫做故障点放电脉冲; 第二个负脉冲是故障点反射脉冲引起的, 叫做故障点反射脉冲。它们之间的时间差 Δt 即为脉冲电流在测量端与故障点往返一次的时间, 根据 $S = v \cdot \Delta t / 2$ 可计算出故障点到测量端的距离。

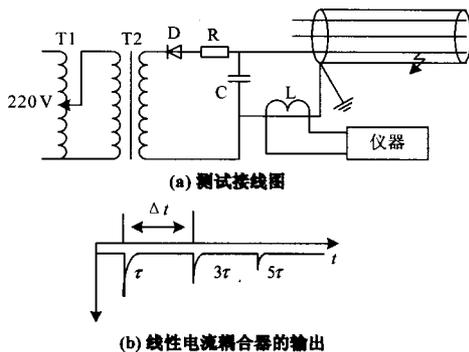


图 1 脉冲电流直闪测试法示意图

Fig.1 Impulse current impact-flash method diagram

实际上, 现场大部分故障的电阻远低于高压设备内阻, 电缆上获得电压比较小, 故障点不能形成闪络, 需使用冲击闪络法 (简称冲闪法), 其测试接线图如图2(a)所示。冲闪法与直闪法的区别是在储能电容C与电缆之间串入一球间隙G, 首先, 用直流高压对电容C充电, 当电容C上的电压足够高时, 球间隙G击穿, 电容C对电缆放电, 将高压信号施加在电缆上去。使用冲闪法时, 根据故障点击穿情况的不同会得到不同的脉冲电流波形。如果施加的高压脉冲电压足够高, 故障点在高压脉冲到达后, 经过短暂的电离时间 t_d 后即击穿放电, 产生如图2(b)所示的脉冲电流波形。图中第一个脉冲是球间隙击穿时电容对电缆放电引起的, 第二个脉冲是由故障点传来的故障放电电流脉冲以及在测量点反射脉冲迭加的结果, 其幅值是故障点放电电流脉冲的两倍 (若考虑传播损耗, 实际值要小), 以后的脉冲则是电流行波在故障点与测量点之间来回反射造成的。波形上第二个负脉冲与第三个负脉冲之间的时间差 $\Delta t = 2\tau$ 对应于电流脉冲在故障点与测量点之间往返一次所需的时间, 可用来计算故障距离。

实际应用中, 施加的高压脉冲往往不能直接使

故障点击穿, 故障点是在高压脉冲在远端反射脉冲到达后, 因承受的电压接近施加电压的两倍而击穿的。此时产生如图 2(c)所示的脉冲电流波形, 远端反射脉冲与故障点放电脉冲产生混叠, 不易确定脉冲电流从测量端到故障点往返一次的时间 Δt 。

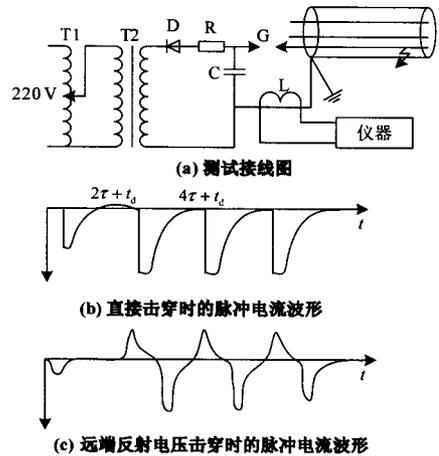


图 2 脉冲电流冲闪测试法示意图

Fig.2 Impulse current direct-flash method diagram

由此可见, 当采用冲闪测试法时, 施加电压产生的脉冲反射过程与故障点放电产生的反射过程会有叠加, 所得波形复杂、相互混叠, 分析困难, 对测距人员要求较高, 影响了脉冲电流法的推广应用。

2 脉冲电流法的改进

2.1 改进的脉冲电流法工作原理

为解决使用传统脉冲电流测距法时, 加压暂态与故障点放电暂态波形混叠, 反射波难以识别、不易分析的问题。本文提出了一种改进方法, 即在高压回路里串联电感和电阻, 使得故障点电压不能立刻达到击穿电压, 要经过一定时间的延时故障点才会击穿放电, 从而在时间上将加压暂态和故障点放电暂态分开, 避免了脉冲电流波形的叠加, 所得波形易于辨识。

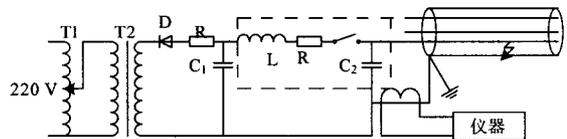


图 3 改进的脉冲电流法测试接线图

Fig.3 Principle diagram of the improved impulse current method

该方法的测试接线图如图 3 所示。该方法与传统脉冲电流法的区别在于增加了图中虚线框部分, 即串入了 R、L, 增加了脉冲电容器 C₂。其中 R、L

起限制电压上升的作用, 当给电缆加压时, 故障点的电压不能迅速上升, 从而延迟了故障点击穿放电的时间。高频脉冲电容器 C_2 对高频行波信号呈短路状态, 在故障点击穿产生的电流行波到达后, 可产生脉冲电流, 起电流取样的作用, 其次还有限制电压上升的作用。在实际测试中, 为使故障点充分放电, 获得的脉冲电流波形规范, C_2 应尽可能选较大容量的电容, 一般选 $0.1 \sim 0.2 \mu\text{F}$ 即可获得满意波形。

2.2 参数选择

由于施加高压脉冲产生暂态过程一般不到 $10 \mu\text{s}$, 因此, 如果能延时 $15 \sim 20 \mu\text{s}$ 就足以达到使加压暂态与故障点放电暂态在时间上分开的目的。通过合理的选择 R 、 L 参数, 就可得到所需延迟的时间, 从而获得较好的测试效果。

设图 3 中储能电容 C_1 的初始电压 U_0 , 故障点击穿电压为 u_d , 当电缆端电压 $u_{c2}=u_d$ 时, 故障点击穿放电。忽略电缆电阻的影响, 可得简化电路如图 4 所示。

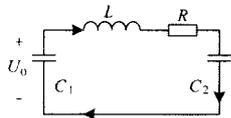


图 4 简化等效电路图

Fig.4 Simplified equivalent circuit

由图 4 知, $u_{C1} = u_R + u_L + u_{C2}$ 即

$$\frac{d^2 u_{C2}}{dt^2} + \frac{R}{L} \frac{du_{C2}}{dt} + \frac{C_1 + C_2}{C_1 C_2} u_{C2} = \frac{u_0}{LC_2} \quad (1)$$

式(1)是以 u_{C2} 为未知量的 RLC 串联电路放电过程的二阶微分方程, 可求得 u_{C2} 的表达式:

当 $R > 2\sqrt{\frac{L}{C_1} + \frac{L}{C_2}}$ 时

$$u_{C2} = -\frac{M}{2} \left(\frac{R}{L\sqrt{\Delta}} + 1 \right) \exp[(-R + L\sqrt{\Delta})t/2L] + \frac{M}{2} \left(\frac{R}{L\sqrt{\Delta}} - 1 \right) \exp[(-R - L\sqrt{\Delta})t/2L] + M \quad (2)$$

当 $R = 2\sqrt{\frac{L}{C_1} + \frac{L}{C_2}}$ 时

$$u_{C2} = -M \left(1 + \frac{R}{2L} t \right) \exp(-Rt/2L) + M \quad (3)$$

当 $R < 2\sqrt{\frac{L}{C_1} + \frac{L}{C_2}}$ 时

$$u_{C2} = -M(\cos \beta t + \frac{R}{2L} \sin \beta t) \exp(-Rt/2L) + M \quad (4)$$

在表达式 (2)、(3)、(4) 中 $M = \frac{C_1 u_0}{C_1 + C_2}$;

$$\Delta = \frac{R^2}{L^2} - \frac{4(C_1 + C_2)}{C_1 C_2 L}; \quad \beta = \sqrt{\frac{(C_1 + C_2)}{C_1 C_2 L} - \frac{R^2}{4L^2}}$$

若取储能电容 C_1 为 $4 \mu\text{F}$, 电流取样电容 C_2 为 $0.2 \mu\text{F}$ 。则 u_{C2} 的变化与 R 、 L 及 u_0 有关, 即 R 、 L 的取值及所加初始电压大小决定故障点放电延迟的时间。表 1 给出了不同的初始电压与击穿电压时, 为获得 $15 \mu\text{s}$ 击穿延迟, 所需的几组典型 R 、 L 参数。由表 1 知若不使用电感而仅使用电阻, 所需电阻值较大, 增加了能量损耗; 若不使用电阻仅使用电感, 加压时会产生较大的冲击脉冲, 另外所需电感较大, 难以制作。二者综合考虑可取 $R=20 \Omega$ 、 $L=0.5 \text{ mH}$ 做数字仿真实验及现场试验。

表 1 不同情况下延迟 $15 \mu\text{s}$ 时的 R 、 L 参数

Tab.1 R and L parameters for $15\mu\text{s}$'s delay under different circumstances

U_0/kV	U_d/kV	R/Ω	L/mH
10	5	100	0
		0	0.6
		20	0.5
20	10	120	0
		0	0.6
		20	0.5
30	15	125	0
		0	1.0
		20	0.5
	20	60	0
		0	0.6
		10	0.5

3 数字仿真实验

3.1 仿真参数设置

本文采用 ATP/EMTP 对电缆故障进行数字仿真, 仿真模型以及测量端回路元件参数如图 5 所示。本仿真模型考虑到电缆的依频特性, 使用电缆的 JMarti 模型, 这种基于频变参数的电缆模型与实际电缆的特性非常相符, 所以该模型下的数字仿真实验更接近于实际情况。

所仿真的电缆线路长度为 1000 m , 电缆模型为 10 kV 三相交联聚乙烯铜芯电缆, 电气参数为: $R_0=6.01 \times 10^{-5} \Omega/\text{m}$, $C_0=4.72 \times 10^{-10} \text{ F/m}$ 。仿真时采样步

长 $T = 1.0 \times 10^{-8}$ s; 采样时间 $t = 3.5 \times 10^{-5}$ s。分别仿真电缆在 20 m、100 m、300 m、500 m、800 m、1 000 m 处发生单相高阻故障。

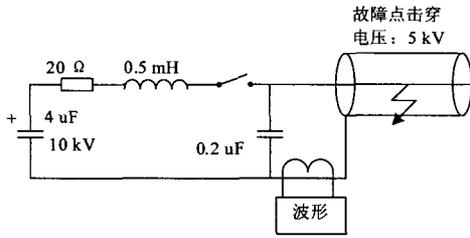


图 5 ATP/EMTP 仿真模型

Fig.5 ATP/EMTP simulation model

3.2 仿真结果及分析

图 6 为故障距离为 500 m 时的单相高阻故障的线性电流耦合器的输出波形, 由图可知电缆故障点在加电 $14 \mu\text{s}$ 后达到击穿电压时击穿放电, 放电脉冲达到测量端产生第一个负脉冲, 而电容对高频行波信号呈短路状态, 电流在测量端被全部地反射回故障点; 而故障点由于电弧短路又被完全反射回来, 达到故障点产生第二个负脉冲; 这样来回反射, 直到整个瞬态过程结束。此波形类似于直闪测试所得到的波形, 解决了波形叠加问题, 非常容易分析。由图中电流耦合器的输出知电流波从测量端到故障点往返一趟的时间为 $\Delta t = (2.175 - 1.659) \times 10^{-5}$ s。所以可计算出故障距离为:

$$L = \frac{1}{2} v \cdot \Delta t = \frac{1}{2} \times 193.8 \times 10^6 \times 0.516 \times 10^{-5} = 500.004 \text{ m}$$

而实际故障距离为 500 m, 所测相对误差为 0.0008%。

同时用该方法对不同的故障距离做仿真计算, 表 2 为计算结果, 结果说明该测距方法所测故障距离的相对误差不超过 $\pm 2\%$, 并且与实际故障距离误差不得超过 1 m。

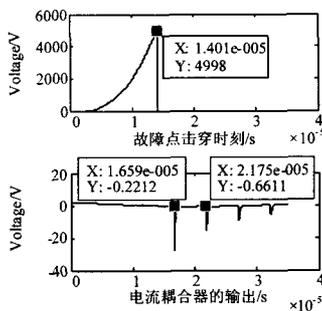


图 6 单相高阻故障时脉冲电流波形图

Fig.6 Simulation waveform of linear current coupler for single phase high impedance fault

表 2 不同故障距离时 ATP/EMTP 仿真结果

Tab.2 ATP/EMTP simulation results of different fault distance

故障距离/m	时间 $\Delta t / \mu\text{s}$	计算距离/m	误差/(%)
20	0.21	20.349	1.745
100	1.03	99.807	-0.193
300	3.10	300.390	0.130
500	5.16	500.004	0.001
800	8.26	800.394	0.049
1000	10.34	1 001.946	0.195

4 现场试验验证

为了进一步验证该方法的可行性得到实际的测试结果, 进行了实际测试。实测时按照图 3 的测试接线图连接电路, 线性电流耦合器 L 的输出接 T-905 电缆故障测距仪的输入, 可以直接从 T-905 的显示屏上得到故障距离及测试波形图。本实验使用的是长 500 m 的交联聚乙烯绝缘电力电缆, 型号为 YJV-8.7/10kV 3×185 mm; 储能电容器 C_1 选用 $2 \mu\text{F}$ 的电力电容器, 可产生电流信号的电容器 C_2 选用 $0.2 \mu\text{F}$ 的高频脉冲电容器; 使用 T-301 电缆测试高压信号发生器产生直流高压。

本实验对不同值的电感及电阻对测量结果的影响进行了深入的研究, 得到了各参数的最佳配置。试验结果说明串联的电感值 L 越大, 故障点击穿前延时期的电流上升越缓慢, 波形越平稳; 串联的电阻值越大, 向被测电缆加压瞬态的冲击脉冲越小。图 7 为选取 $L=0.5 \text{ mH}$ 、 $R=20 \Omega$, 实际故障距离为 143 m 时, T-905 电缆故障测距仪显示屏上所得波形, 并显示故障距离为 142.8 m。图中加压时刻产生第一个冲击负脉冲, 之后经过了 $16 \mu\text{s}$ 的延时, 故障点电压才能达到了击穿电压, 击穿放电, 电流波到达测量端产生第二个脉冲, 此脉冲在测量端与故障点来回反射, 所以可根据第二个和第三个脉冲的时间差得到故障距离。图中, 故障点反射脉冲有一小的正脉冲出现, 这是由于电容器本身及测试电缆存在杂散电感 L_S ; L_S 一般只有几个微亨, 但对高频行波信号却是不能忽略的。

图 8 为使用传统脉冲电流法所测得的波形, 第一个脉冲是球间隙击穿时电容对电缆放电引起的, 第二个脉冲是故障点放电脉冲, 第三个脉冲是故障点反射脉冲。所以可由第二个脉冲和第三个脉冲计算出故障距离。

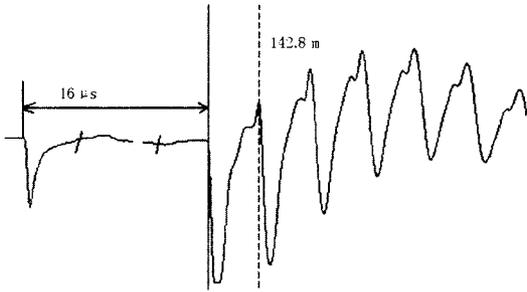


图7 改进的脉冲电流法实测波形

Fig.7 Measured waveform of the improved impulse current method

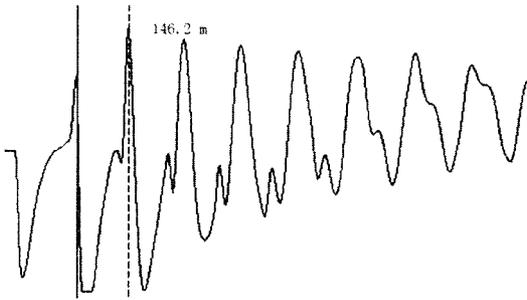


图8 传统脉冲电流法实测波形

Fig.8 Measured waveform of the traditional impulse current method

比较这两种方法下所测得的波形可知,使用本文所提出的方法可把加压暂态与故障点放电暂态过程分开,所得波形简单、易分辨,测距精度较高。

5 结论

本文所提出的对脉冲电流法的改进,通过延迟故障点击穿放电的时间,使冲击电压脉冲和故障点放电产生的脉冲不再叠加在一起,解决了传统脉冲电流法波形复杂,故障点反射波难以识别的问题,数字仿真与现场试验进一步验证了该方法的可行性。该方法促进了脉冲电流法的进一步推广应用。

参考文献

- [1] 徐丙垠,李胜祥,陈宗军.电力电缆故障探测技术[M].北京:机械工业出版社,1999.
- [2] 徐丙垠,李京,陈平等.现代行波测距技术及其应用[J].电力系统自动化,2001,27(23):62-65.
XU Bing-yin,LI Jing,CHEN Ping,et al.Modern Fault Location Techniques Based on Fault Generated Travelling Waves and Their Applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001,27(23):62-65.

- [3] 朱云华,艾芊,陆锋.电力电缆故障测距综述[J].继电器,2006,34(14):81-87.
ZHU Yun-hua,AI Qian,LU Feng.Survey of Power Cable Fault Location[J].Relay, 2006,34(14):81-87.
- [4] 董新洲,葛耀中,徐丙垠.利用暂态电流行波的输电线路故障测距研究[J].中国电机工程学报,1999,19(4):77-81.
DONG Xin-zhou,GE Yao-zhong,XU Bing-yin.Research of Fault Location Based on Current Travelling Waves[J]. Proceedings of the CSEE, 1999,19(4):77-81.
- [5] 赖晓峰.电力电缆故障测距方法的研究[J].云南电力技术,2006,34(5):15-17.
- [6] 牟龙华,刘建华.电力电缆故障测距方法的基本工作原理[J].继电器,1999,27(4):24-26,31.
MOU Long-hua,LIU Jian-hua.Basic Work Rinciple of Cable Fault Location[J].Relay, 1999,27(4):24-26,31.
- [7] 鹿洪刚,覃剑,陈祥训,等.电力电缆故障测距综述[J].电网技术,2004,28(20):58-63.
LU Hong-gang,TAN Jian,CHEN Xiang-xun,et al. Overview of Power Cable Fault Location[J]. Power System Technology, 2004,28(20):58-63.
- [8] 李骏,范春菊.基于小波分析的电力电缆行波故障测距[J].继电器,2005,33(14):15-18, 91.
LI Jun,FAN Chun-ju.Research of Electrical Cable Travelling Wave Fault Location Based on Wavelet Analysis[J].Relay, 2005,33(14):15-18, 91.
- [9] Steiner J P, Weeks W L, Ng H W. An Automated Fault Location System[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992,7(2):967-978.
- [10] Khorashadi-Zadeh H, Hosseini-Naveh S.An Accurate Fault Locator for Cable Transmission Using ANN[J]. IEEE,2004:901-904.
- [11] Li M H, Zhou M G. Research on Surge Arc Prolongation Device for Power Cable Fault Location[J]. IEEE, 2005:38-41.
- [12] SUN Jian-tao, WEN Xi-shan. Traveling Wave Fault Location for Power Cables Based on Wavlet Transform[J].IEEE, 2007:1283-1287.

收稿日期:2008-11-25; 修回日期:2008-12-23

作者简介:

赵爱丽(1983-),女,研究生,主要从事电力电缆故障测距方面的研究与学习;E-mail: zhaailizal@163.com.

徐丙垠(1961-),男,教授,主要研究方向为电力线路故障监测及配电网自动化技术。