

基于低压脉冲法的电力电缆外力破坏检测技术研究

余坤¹ 赫志伟¹ 王善民² 郑宝² 陈纓³

(1. 国家开发银行西藏自治区分行, 西藏 拉萨 850000;

2. 当雄县羊易地热电站有限公司, 西藏 当雄 851500;

3. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072)

摘要: 随着城网改造工作的进一步深入, 电力电缆得到了越来越广泛的应用。电力电缆一旦出现故障, 将严重危及电网安全和人民财产的安全, 而外力破坏是造成电缆故障最主要的因素。采用 EMTP-ATP 电磁暂态仿真软件建立了不同电缆故障模型, 研究了不同频率的行波在电缆内的传播特性, 分析了不同故障、电缆接头下行波在电缆内的传播特性。研究结果表明, 该方法能够有效检测电缆外力破坏点位置。

关键词: 故障定位; 防外破; 电力电缆; 低压脉冲

Abstract: With the further development of transformation for urban power grid, power cables are more and more widely used. Once the power cable fails, it will seriously endanger the safety of power grid and people's property. The external destruction is the most important factor of cable faults. The EMTP-ATP electromagnetic transient simulation software is adopted to establish the models of different cable fault. The propagation characteristics of traveling wave with different frequency in the cable are studied, and the propagation characteristics of traveling wave in the cable connectors under different faults are analyzed. The results show that the proposed method can effectively detect the location of external destruction for power cable.

Key words: fault location; external destruction prevention; power cable; low-voltage pulse

中图分类号: TM757 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2017)04-0048-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.04.010

0 引言

随着国家对电力行业投入的进一步加大和城网改造工作的进一步深入, 电力电缆得到了越来越广泛的应用。电力电缆一旦出现故障, 将严重危及电网安全和人民财产的安全, 其故障产生的原因和故障的表现形式是多方面的^[1-2]。

电力电缆故障产生的原因主要有外力破坏、附件制造质量不合格、敷设施工质量差和电缆本体缺陷, 分别占总故障率的58%、27%、12%和3%^[1], 如图1所示。从统计数据可以看出, 外力破坏是造成电缆故障最主要的因素, 对城网线路的安全运行造成威胁^[3-5]。总结电缆受外力破坏事故, 得到主要原因因为长期受到车辆、重物等压力和冲击力作用或者城市建设中盲目的道路施工和建筑施工^[1, 3-5]。随着城市建设进度加快, 外力破坏故障与日俱增, 由于电缆外力破坏故障形式多样、随机性高、电缆敷设范围广等因素, 以往的防外力破坏工作成效不

佳^[6-9]。

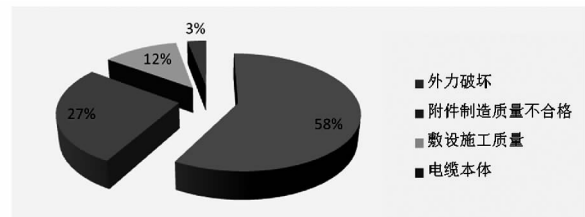


图1 电缆故障原因统计

为了确保城网电力电缆的安全运行, 减少因外力破坏而造成的故障, 提出了一种基于低压脉冲法的电力电缆外力破坏检测技术。

1 电缆模型与等效电路

计算电力电缆参数要使用分布参数电路, 如图2(a)所示, 图中 R_0 、 L_0 、 G_0 、 C_0 分别表示传输线单位长度的电阻、电感、电导和电容。电阻、电导都会引起线路上的有功功率损耗; 考虑电阻和电导影响的线路称为有损线路; 忽略导线上的电阻和电导, 线路

就变为无损线路,如图2(b)所示。

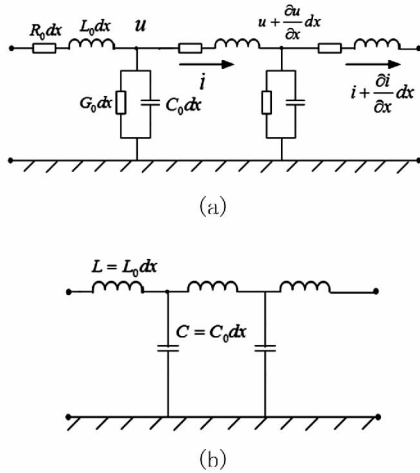


图2 电缆分布参数等效电路

对于无损线路,波阻抗 $Z_c = \sqrt{L_0/C_0}$,单位为 Ω ,其值取决于单位长度线路的电感和电容比值,与线路长度无关。对于电缆来说 L_0 较小而 C_0 较大,一般电缆的波阻抗为十几欧姆到几十欧姆不等。

传输线上的电压和电流以波的形式传播,实际上分布参数线路上任一点电压、电流值是许多向两个不同的方向传播的电压、电流波数值的代数和。这些电压、电流波以一定的速度运动,因此称为行波^[10]。把传输线上运动方向与规定方向一致的行波叫入射波,运动方向与规定方向不一致的行波叫反射波。入射波和反射波沿着各自的流向,振幅呈指数规律衰减,这是传输线上分布电阻和分布电导消耗电磁波能量的必然结果。

行波在输电线中传播,遇到阻抗不匹配点时,会发生折反射现象。行波的反射程度可用发生反射的阻抗不匹配点的反射电压(电流)与入射电压(电流)之比来表示,比值称为反射系数^[10]。同理,可定义折射系数。如图3所示,设有一波阻抗为 Z_1 的线路1与另一波阻抗为 Z_2 的线路2在节点A相连,当行波到达节点A即发生折反射。折射波通过节点A向线路2方向传播,反射波自节点A返回向线路1方向传播。

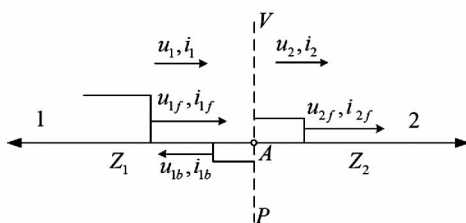


图3 行波折反射示意图

行波在不同故障时的折反射情况如表1所示。

表1 不同故障的行波折反射情况

故障类型	等效阻抗	电压反射系数	电流反射系数	波形特征
断线	$Z_2 \rightarrow \infty$	1	-1	电压加倍,电流变零
高阻	$Z_2 < Z_1$ 且 $Z_2 \approx Z_1$	0	约为0	电压、电流反射很小
低阻	$Z_2 < Z_1$	$> -1, < 0$	$> 0, < 1$	电压、电流反射波极性相反
短路	$Z_2 = 0$	-1	1	电压变零,电流加倍

2 行波在电缆内传播特性仿真及试验分析研究

采用电磁暂态软件 EMTP - ATP 对不同频率的行波在电缆中的传播特性进行仿真分析。低压脉冲法是向电缆中注入低压脉冲,脉冲的选择关系到反射波形的清晰度、幅值大小、畸变程度等。因此,选择以下几个参数进行仿真:

1) 脉冲形状: 正弦半波,这是由于脉冲电压行波中含有大量的高频分量,脉冲电压行波宽度越窄,上升沿越陡,则高频分量越大,引起的衰减和畸变越大;

2) 脉冲幅值: 选择 12 V 发射脉冲可以满足行波在电缆中传播和防外破测距的需要。

2.1 脉冲宽度对测试的影响

脉冲总有一定的时间宽度,假定为 τ ,则在 τ 时刻以内传播来的反射脉冲会与发射脉冲相重叠,无法区分发射和反射脉冲,因此就不能测出故障点距离,即出现了测量盲区。假设脉冲发射宽度是 $0.5 \mu s$,电缆波速度为 $160 m/\mu s$,其测量盲区就是 $40 m$ 。仪器发送脉冲愈宽,测量盲区愈大。从减小盲区的角度看,发射脉冲越小越好,但脉冲愈窄,它所包含的高频成分愈丰富,而线路高频损耗大,会使反射脉冲幅值过小,波形畸变严重,影响远距离故障的测量效果。为解决这一问题,可以把发射脉冲宽度划分成不同的宽度,根据测量距离的远近来选择脉冲宽度:测量距离愈远,脉冲愈宽。

2.1.1 断线故障

首先对电缆断线情况进行仿真,仿真模型如图4所示。仿真模型由电源、开关、电缆 LCC、电压探

头 V_1 组成。开关和低压交流电源配合产生正弦半波脉冲,电压探头记录了脉冲在电缆中的传播过程。

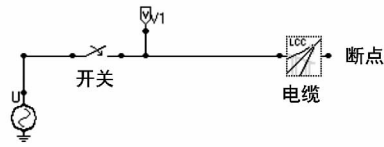


图4 电缆断线仿真模型

设断路点距测量端(首端)的距离为 1 000 m,脉冲在电缆中的传播速度为 $v = 1.7 \times 10^8$ m/s,行波在电缆中来回传播一次的时间为

$$\tau_{\max} = \frac{1\,000 \times 2}{1.7 \times 10^8} = 11.8 \mu\text{s} \quad (1)$$

为避免发射脉冲和反射波叠加出现测量盲区,发射脉冲脉宽最大为 11.8 μs 。

在电缆中加幅值为 12 V、脉宽不等的正弦脉冲半波,仿真结果如图 5 所示。

图中的第 1 个脉冲是发射脉冲,幅值为 12 V,第 2 个脉冲是首次反射脉冲,后续脉冲波是发射脉冲在电缆中不断来回反射形成的。

由图 5 可知,随着脉宽的增大,首次反射脉冲幅值越大,说明脉宽越大,频率越小,脉冲在电缆中传播的损耗越小。但并不是脉宽越大越好,由图 5 (c)、图 5 (d) 可以看到,脉宽较大时,脉冲波形开始整体上升,趋于稳定的脉冲越来越大,这是由于发射和反射脉冲的叠加造成的。

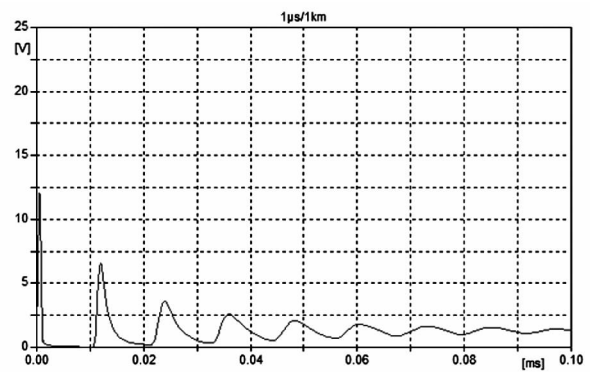
表 2 不同频率脉冲在电缆中的行波数据

脉宽 / μs	首次反射脉冲幅值 / V	前两个脉冲起点间隔 / μs	前两个脉冲波头间隔 / μs
1	6.5	11.4	11.5
4	16.5	11.6	11.8
8	20.5	11.7	11.8
12	22.0	11.9	12.0

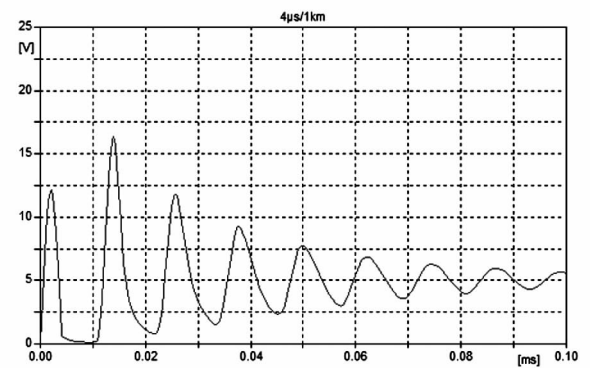
由表 2 可知,发射脉冲脉宽越小,行波衰减越大;脉宽越大,衰减越小,且行波趋于稳定的值越大。前两个脉冲(发射脉冲、首次反射脉冲)起点和波头之间的时间间隔和理论计算值基本吻合,因此,可以通过波形测得断点距离。由式(1)可知,脉冲往返一次所用时间约为 11.8 μs ,因此通过波头时间间隔测得的误差更小。

2.1.2 低阻故障

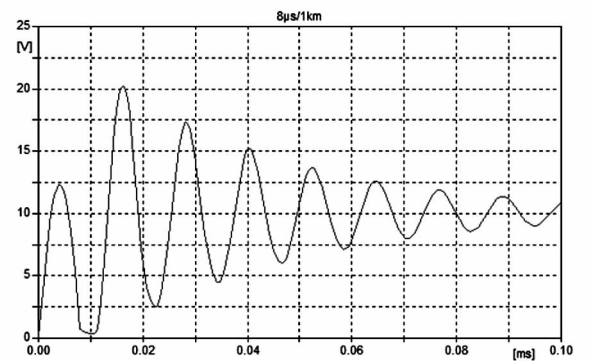
对于低阻故障,脉冲在末端反射系数为负数,首端反射系数为 1,因此,反射脉冲会出现正负交替现象。图 6 为电缆发生低阻故障的仿真图。由图 6 可



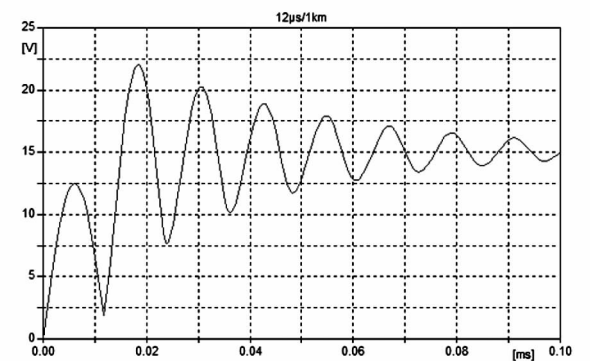
(a)



(b)

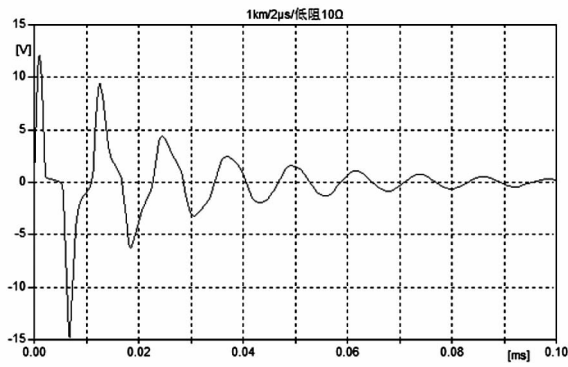


(c)

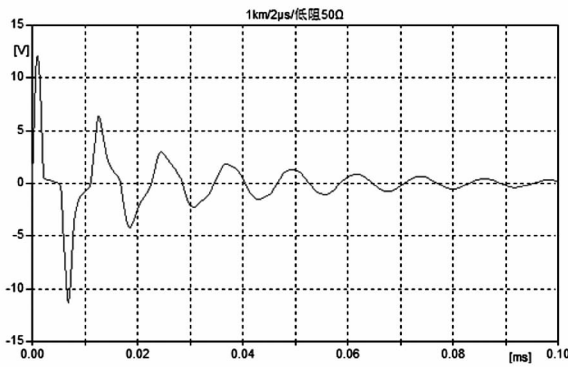


(d)

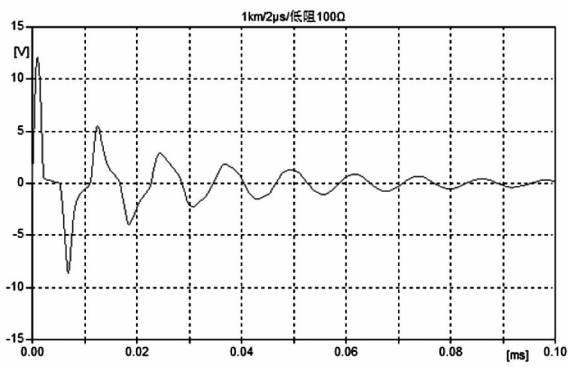
图 5 不同频率的脉冲在定长度电缆中的传播特性



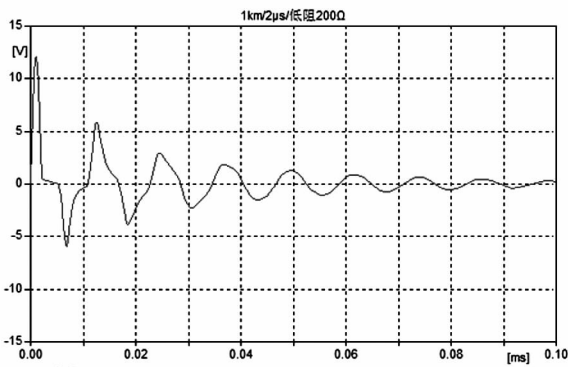
(a)



(b)



(c)



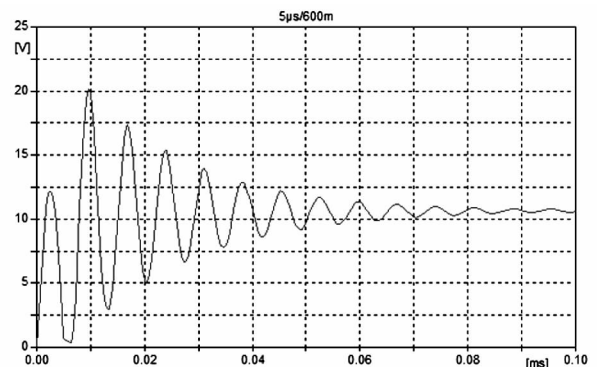
(d)

图6 电缆低阻故障时的脉冲传播波形

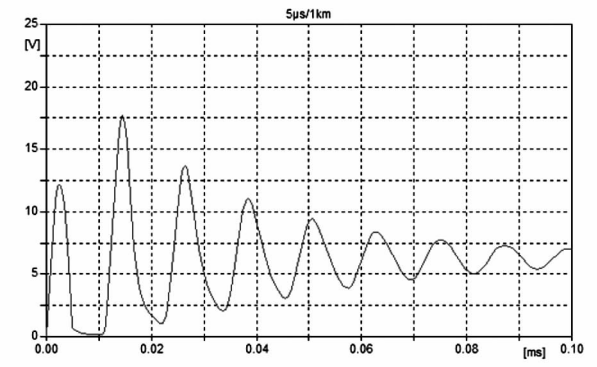
知,反射脉冲出现正负交替现象,和理论分析吻合。而且随着低阻故障值越来越大,首次反射脉冲幅值越来越小,这是因为低阻故障等效阻抗和电缆本体阻抗越来越接近,反射系数越来越小。

2.2 固定频率的行波在不同长度的电缆中的传播特性

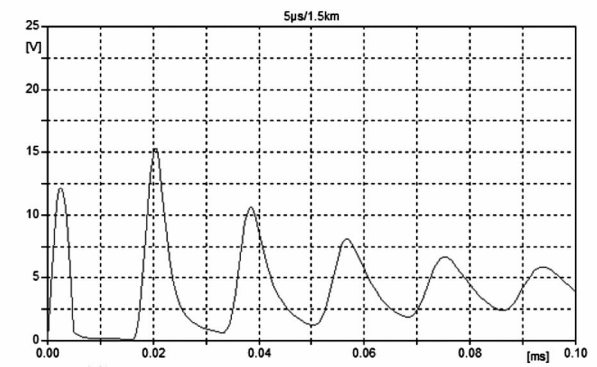
当发射脉冲脉宽一定时,电缆断点位置不同也会引起脉冲波形的不同,断线故障仿真结果如图7所示。由于传播损耗的存在,电缆越长,首次反射脉冲幅值越小。从图7中还可以看出,断点越远,各反射脉冲波头之间距离越大,脉冲波头越容易识别,这与电缆越长,脉冲在电缆中的传播时间越长相对应。



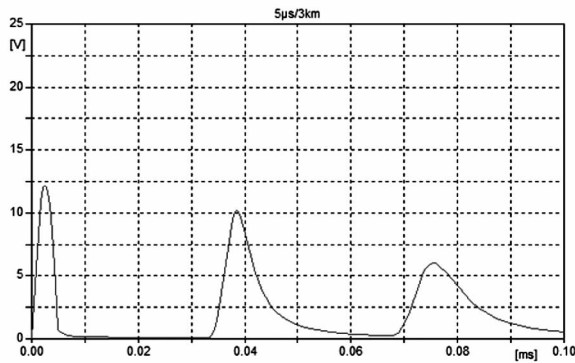
(a)



(b)



(c)



(d)

图7 固定频率的行波在电缆切割点不同时的传播特性

不同行波的数据对比如表3所示。经理论计算和表3数据进行对比可知,首次反射脉冲和发射脉冲间隔与理论计算值基本吻合,而通过波头测量断点距离误差更小,和不同频率脉冲在电缆中传播的仿真结果一致。

表3 固定频率的行波在电缆切割点不同时的行波数据

电缆长度 /km	首次反射脉冲幅值/V	前两个脉冲起点间隔/ μ s	前两个脉冲波头间隔/ μ s
0.6	20.0	7.2	7.5
1.0	17.5	11.3	11.7
1.5	15.0	17.5	17.9
3.0	10.1	34.2	35.5

2.3 接头对行波传播的影响

对有接头的电缆进行了仿真,结果如图8所示,可知,电缆接头在仿真波形上能反映出来,但其对整个行波波形的影响较小,不影响故障的判别。

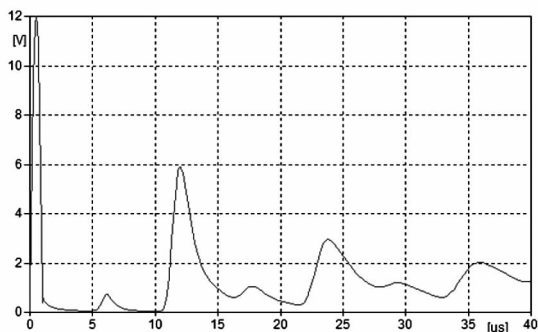


图8 有接头的电缆仿真波形

3 结论

采用低压脉冲法研究了电力电缆外力破坏检测技术,分析了行波频率、不同故障、电缆接头对行波

在电缆内的传播特性,得到以下结论:

- 1) 电缆断路故障时反射波形与发射波形极性相同,采用发射脉冲波头与首个反射脉冲波头的的时间间隔可以对断点进行定位;
- 2) 低阻故障时,反射脉冲会出现正负交替现象,并且接地电阻越大首次反射脉冲幅值越小;
- 3) 行波检测可以检测出电缆接头位置,且不影响故障的判别。

参考文献

- [1] 朱启林,李仁义,徐丙垠. 电力电缆故障测试方法与案例分析[M]. 北京: 机械工业出版社,2015.
- [2] 柏海峰,陈建. 35 kV 电缆头故障分析及处理[J]. 四川电力技术,2011,34(3): 73-74.
- [3] 扈斐,王佳琦. 配电网电缆外力破坏故障原因分析及防范措施探讨[J]. 科技创新与应用,2015(33): 186.
- [4] 邓杰文. 10 kV 电力电缆遭受外力破坏的原因分析及防治措施[J]. 科技资讯,2010(12): 143.
- [5] 卞佳音,曾国华. 电力电缆遭受外力破坏的原因及防范措施[J]. 电气应用,2008(21): 96-99.
- [6] 张桂燕. 电缆运行中防止外力破坏的措施[J]. 高压技术,2001(S1): 24-25.
- [7] 田国锋,符奥,杨振田,等. 城区电力电缆防外力破坏探讨[J]. 山东电力技术,2014(4): 66-68.
- [8] 李永林,郑振东. 配电系统电力电缆外力破坏的防护[J]. 胜利油田职工大学学报,2009(1): 75-76.
- [9] 谭康. 地下电缆防外力破坏监控中的振动信号识别[D]. 广州: 华南理工大学,2012.
- [10] 古树平,陈奇志,谢建,等. 基于行波的电力电缆故障测距组合方法研究[J]. 四川电力技术,2010,33(5): 19-22.

作者简介:

余坤(1987),工程师,主要从事电力和新能源的技术管理和评审工作;

赫志伟(1982),硕士研究生、高级工程师,主要从事电力、新能源的技术管理与评审工作;

王善民(1979),本科、工程师,主要从事电力和能源的技术管理工作。

(收稿日期:2017-06-13)