

电力电缆外护套的故障定位及监测技术

江福章

(江苏玖辰电气有限公司, 连云港 222000)

摘要: 电力电缆外护套破损后, 积水或空气等外界物质将通过破损点入侵电缆主绝缘, 威胁电缆的安全运行。本文介绍了直流电桥法、压降比较法、跨步电压法、音频法和声磁同步法等5种外护套故障定位方法及其定位原理。介绍了护层电流在外护套在线监测和故障定位的原理和应用。总结了电力电缆外护套的故障定位及监测技术, 并展望了未来发展趋势(引用文献19篇)。

关键词: 电力电缆; 外护套; 故障定位; 护套电流; 在线监测

中图分类号: TM216

文献标志码: A

文章编号: 1672-6901(2023)01-0007-05

Review on Fault Location and Monitoring Technology of Power Cable Sheath

JIANG Fuzhang

(Sanny Electric Manufacture Incorporated, Lianyungang 222000, China)

Abstract: External substances such as water and air will invade the cable main insulation and threaten the safe operation of cable when sheath of cable was damaged. The principle and method of fault location of cable sheath using DC bridge method, voltage comparison method, step-by-step voltage method, audio method and acoustic-magnetic synchronization method were introduced. Then, the principle and application of on-line monitoring and fault location of sheath based on sheath current were introduced. Finally, the fault location and monitoring technology of power cable sheath were summarized, and the future development trend was prospected (19 references cited).

Key words: power cable; sheath; fault location; sheath current; on-line monitoring

0 引言

近年来, 电力电缆在我国城市电网中的运用越来越广泛。电缆的绝缘包括外绝缘和内绝缘, 外护套属于外绝缘, 位于电缆最外层, 保证电缆的安全可靠性。

电力电缆外护套绝缘故障的主要原因包括本体缺陷、外力破坏、积水入侵和白蚁侵袭等^[1]。在电力电缆运行过程中, 电缆外护套会发生老化或遭受破坏, 其绝缘性能将会下降^[2-3]。随着时间的推移, 绝缘性能问题愈发严重, 因此, 外护套绝缘问题是电缆线路故障的重要原因之一。

外护套破损后, 金属护套将直接与大地形成回路, 使得护层电流明显增加。护层电流的增加不仅会加速金属护套的老化, 而且会加大发热量导致电缆载流量降低。金属护套长期发热造成破损后, 积水以及空气会通过破损点入侵电缆主绝缘, 很可能

造成主绝缘被击穿而引起事故, 威胁电缆的安全运行^[4-5]。因此, 定期检查电缆外护套, 并对故障点进行定位和检修, 对电缆的安全运行十分重要。

1 外护套的故障定位方法

电力电缆外护套破损点的故障定位方法根据定位精度可分为初步定位法和精确定位法。初步定位法是用来判断外护套的大概故障位置, 精确定位法是在预定位的基础上判断出外护套的精确故障位置。以上两种方法结合, 可缩短故障定位时间。

1.1 外护套的故障预定位

1.1.1 直流电桥法

理想状态下, 电缆金属护套的电阻均匀, 与长度成正比, 因此可以采用直流电桥法对故障位置进行定位。把故障相和非故障相电缆的金属护套的一端作为电桥的桥臂, 另一端则短接构成回路^[6-8], 直流电桥法原理示意图见图1。

图1中, R_1 为电桥参考电阻, Ω ; R_2 为可调电阻, Ω ; R_n 为外护套故障电阻, Ω ; L 为电缆长度, m; x 为测量端至故障点的距离, m; 设 R_0 为单位长度金属护套电阻, Ω 。

收稿日期: 2022-09-15

作者简介: 江福章(1976—), 男, 高级工程师。

E-mail: 289634887@qq.com

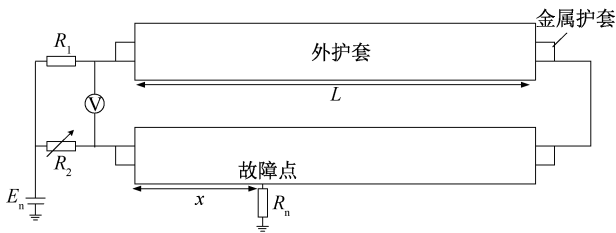


图1 直流电桥法的原理示意图

调节电阻 R_2 使电桥平衡,由于金属护套电阻与长度成正比:

$$\frac{[L + (L - x)] \times R_0}{x \times R_0} = \frac{R_1}{R_2} \quad (1)$$

可解得

$$x = \frac{2 \times L}{1 + R_1/R_2} \quad (2)$$

由式(2)即可计算得出外护套的大概故障位置。

电桥法操作方便,计算简单,但需要电缆长度原始资料,受外护套损坏情况影响大,测量精度低。

目前,针对电桥法存在的问题有以下几种改进方法:①金属护套单位长度电阻 R_0 与连接线接触电阻数值上相近,计算时容易出现误差,测量时可采取截面积较大的电缆作为连接线来减小接触电阻;②电缆外护套完全击穿直接接地的概率比较低,一般情况下外护套故障电阻 R_n 均比较大,为提高仪器测量的稳定性,应从低灵敏度逐步提高;③电桥平衡容易受到直流电源的干扰,可采用内含高频、高压、直流源和高灵敏度检流计的高压电桥一体机减小干扰。

1.1.2 压降比较法

压降比较法有双回路接线和三回路接线两种接线方式^[9],见图2。开关处于节点1时为通路 α ,开关处于节点2时为通路 β 。

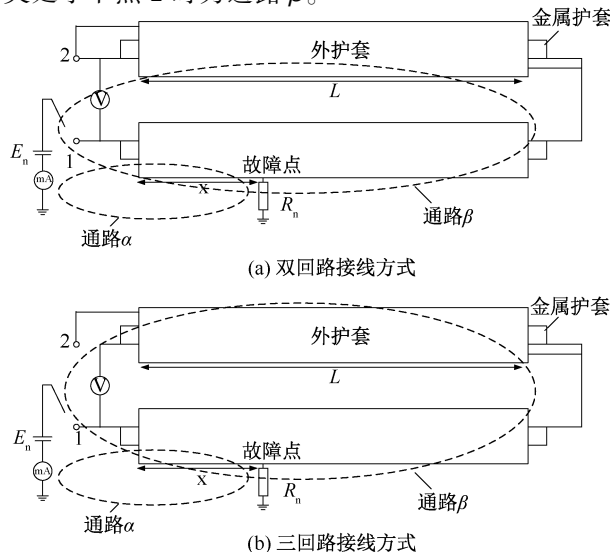


图2 压降比较法的原理图

采用双回路接线定位时,先使用通路 α ,调节电源 E_n 使得电流为 I ,记录电压 U_1 。然后,使用通路 β ,调节 E_n 使得 $I_2 = I_1 = I$,记录电压 U_2 。利用式(3)、式(4)可计算出测量端至故障点的距离 x 。

$$\begin{cases} U_1 = I \times R_0 \times x \\ U_2 = I \times R_0 \times [L + (L - x)] \end{cases} \quad (3)$$

可解得

$$x = \frac{2 \times L \times U_1}{U_1 + U_2} \quad (4)$$

采用三回路接线时,操作同理,利用式(5)可以计算出测量端至故障点的距离。

$$x = \frac{L \times U_1}{U_1 + U_2} \quad (5)$$

压降比较法、直流电桥法的优缺点基本相同,操作简单,但受环境因素影响大,精度受连接线的接触电阻影响较大,仅适用于外护套故障点的初步定位。

1.2 外护套的故障精确定位

采用初步定位法找出电缆外护套故障的大概位置后,配合精确定位法便可测出外护套故障的精确定位。精确定位法有跨步电压法、音频法和声磁同步法等。

1.2.1 跨步电压法

跨步电压法是目前应用最广泛且有效的精确定位法。由于外护套故障点处的金属护套直接接地,在电缆金属护套上施加直流电压时,该故障点的电流将呈辐射状流出^[7]。故障点两侧电压极性相反,跨步电压法原理示意图见图3。

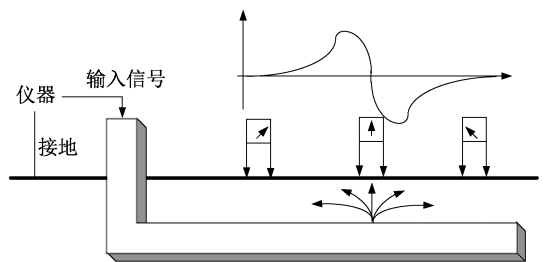


图3 跨步电压法原理示意图

使用仪器沿着外护套测量,当两个探针位于故障点左端时,指针往右偏;当两个探针位于故障点右端时,指针往左偏;当故障点刚好位于两个探针中点时,指针指向中间,此时即可定位出外护套故障点的精确位置。

1.2.2 音频法

对于埋地敷设的电缆,当地面为水泥路面或比较干燥时,检流计探针插入地下难度较大,将无法采用跨步电压法。音频法改进了这一缺点,仪器不需要与地面或电缆直接接触。音频法的原理示意图见

图4^[4,10],将电缆金属护套的一端接入音频信号发生器,另一端接地,在地面上使用探针沿着电线路径进行查找,记录音频信号的幅值达到最大值后突然急速下降的位置,将其作为电缆外护套故障点精确位置。

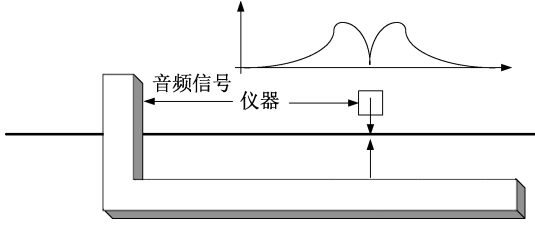


图4 音频法原理示意图

音频法的优点是电压低,仪器可以不直接接触外护套,直接在地面上进行测试。但是,音频法对故障点位置的判别比跨步电压法繁琐,且容易受到外部环境的干扰。

1.2.3 声磁同步法

声磁同步法是为原始的故障定位方法^[11],其原理示意图见图5,该方法利用故障点闪光声音信号和磁信号的最小传播时间差来进行故障定位。探针所检测时间差越小,说明离故障点越近,当时间差最小时,该位置则为电缆外护套的故障点精确位置。

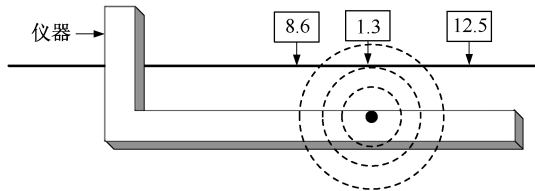


图5 声磁同步法原理示意图

该方法存在一定的局限性:①若电缆所处环境复杂,噪声容易对声音信号产生影响,使用该方法应选择夜间噪声较小时;②该方法容易破坏外护套,加剧外护套破损,投运时间较长的电缆不宜使用。

2 外护套故障实时监测

基于护层电流的故障定位方法原来只适合定时检修或故障后的定位,无法实现电缆外护套的实时监测。近年来,随着电缆外护套感应电压和护层电流法的发展,结合在线监测元件和专家诊断系统,现已可实现外护套故障的实时监测和快速诊断。

2.1 护层电流的在线监测

电缆护层电流的在线监测是故障定位系统的基础^[12],在线监测系统主要是通过护层电流的监测值和系统设定数据的比较来判断护套故障的大概电缆段或大概位置^[13],相当于故障的初步定位。

金属护套接地会使得护层电流增大^[14],因而护层电流监测可作为电缆早期故障监测的一种手段,防止电缆绝缘层由外至内逐渐恶化。目前,通过计算护层电流来判断外护套异常程度有两种方法^[15],第一种方法是利用环流比(接地线电流幅值与导体电流幅值之比)的大小来判断环流异常;第二种方法则是采用实际电流与理想电流差来判断。

对于监测出的环流比(接地线电流与导体电流之比)大于3%时,可判断该段电缆存在故障。对于接地方式为单端接地的电缆,环流与距离成一定比例增加(单点故障),可以判断出故障点的大概位置。但是,如果故障是同相位多点故障,采用环流比将无法判断故障点位置。

若电缆外护套出现多相故障,则可以通过三相的金属护套环流来判断^[16],三相多点故障部分监测数据见表1。表1中故障点距离给定,如故障类型ABC中,C相故障点最远,A相故障点最近。

表1 三相多点故障部分监测数据 A

故障类型	I_A	I_B	I_C
AAA	4.3	2.3	2.3
AAB	5.2	7.1	2.3
ABC	4.0	6.0	7.1

该方法具有以下特点:①通过环流比大于3%来判断故障相,然后定位故障位置;②故障相越多,环流比越大;③同相出现多点故障时,无法通过环流比定位故障位置。

对于交叉互联电缆,同相单点故障,其环流比数据见图6和表2。

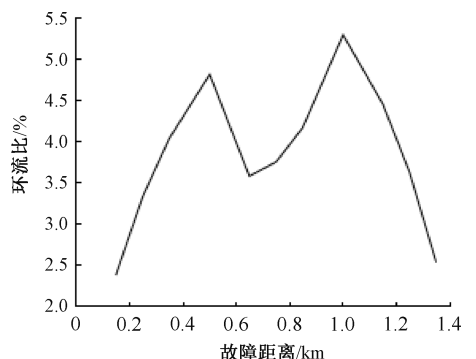


图6 交叉互联环流比与故障距离的关系

环流比与故障距离的关系曲线呈“M”形,环流比在3.5%~4.5%范围内时,会出现4点同值的情况,无法根据环流比来判断故障点的具体位置。此时环流比数据已不足以满足绝缘监测要求,必须引入电流相位监测。

利用护层电流差值来监测环流变化则解决了上

述问题^[17]。每个接地箱均安装了工频电流传感器来监测环流数据,工频电流传感器位置示意图7,图中椭圆形为传感器安装位置,A、B、C分别代表对应交叉互联箱,R代表接地电阻。

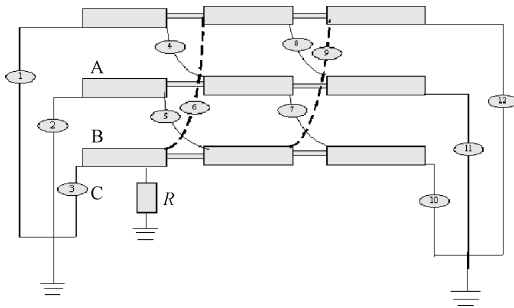


图7 工频电流传感器位置示意图

利用式(6)和(7)计算出电流突变率(ρ),式中, I_s' 为实际护层电流, I_s 为理想护层电流, I 为负荷电流。

$$\Delta I_s' = |I_s' - I_s| \quad (6)$$

$$\rho = \Delta I_s' / I \quad (7)$$

对比两端突变率,若突变率数值基本一致,则可

判断该段电缆外护套存在故障。这种方法与环流比的区别在于,护层电缆差值法除了接地线有传感器,接地箱也有传感器,通过增加数据量来判断故障位置,但不能识别故障精确位置。

此外,引入 k_1, k_2, k_3 来对比不同接地箱里的护层环流比也可以为监测系统提供参考数据^[18],计算式为

$$k_1 = \left| 1 - \frac{I_1' \times I_6}{I_1 \times I_6'} \right| \quad (8)$$

$$k_2 = \left| 1 - \frac{I_2' \times I_4}{I_2 \times I_4'} \right| \quad (9)$$

$$k_3 = \left| 1 - \frac{I_3' \times I_5}{I_3 \times I_5'} \right| \quad (10)$$

式中, $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5, I_6$ 分别为第一个和第二个交叉互联箱A、B、C三相的理想护层电流; I_1', I_2', I_3' 为第二个交叉互联箱A、B、C三相的实际护层电流。

可利用 k 的大小关系协助环流差进行故障定位,交叉互联电缆故障环流监测诊断见表2。

表2 交叉互联电缆故障环流监测诊断^[18]

故障位置	ρ_1	ρ_2	ρ_3	ρ_4	ρ_5	ρ_6	k_1	k_2	k_3
A1-C2-B3 回路	<0.3	<0.3	<0.3	>0.3	<0.3	>0.3	<0.3	<0.3	<0.3
B1-A2-C3 回路	<0.3	<0.3	>0.3	<0.3	>0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3
C1-B2-A3 回路	>0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	>0.3	<0.3	<0.3	<0.3
第一个交叉互联箱	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>1	>1	>1
第二个交叉互联箱	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	<1	<1	<1

2.2 护层电流的故障定位

在直接接地的金属护套和大地之间接入高频脉冲信号,脉冲信号沿着金属护套传播最终和大地形成一个回路,通过传感器进行耦合,利用原波与反射波的时间差计算出故障点的位置,发送给实时定位系统^[17,19],环流故障定位原理见图8。

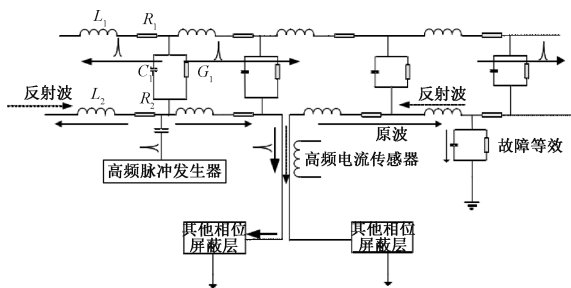


图8 环流故障定位原理图^[17]

图8中, L_1 为电缆线芯等效电感,H; R_1 为电缆线芯等效电阻, Ω ; L_2 为屏蔽层等效电感,H; R_2 为屏蔽层等效电阻, Ω ; C_1 为电缆主绝缘的等效电容,F; G_1 为电缆主绝缘的导纳,S。

高频脉冲电流信号通过主绝缘和外绝缘进行传播,当外护套破损时,线路图可等效看成电容与电阻的并联,高频波将此故障点反射,对比原波和反射波的时间差 Δt ,可利用式(11)计算出测量端至故障点的距离(x),其中波速(v)可以利用已知电缆的长度计算。

$$x = 0.5 \times v \times \Delta t \quad (11)$$

这种方法的定位精准性不如1.2节中外护套的故障精确定位,但其优点是可以在线监测,适用于外护套故障的预警和初步定位。

3 总结与展望

本文对电力电缆的外护套故障定位及监测技术进行了综述,总结和展望如下:

(1)外护套的故障定位方法已比较成熟。其中直流电桥法和跨步电压法的应用最多,而且适用的范围较广,近年的研究主要是针对现有方法进行改进,未来的研究应集中在仪器精度的提高;

(2)利用金属护层电流对电缆外护套进行实时

监测和故障定位是当前的发展趋势,但是,护层电流监测对外护套多点故障的定位仍没有很好的解决办法。未来的研究可对多点故障进行试验和仿真,利用大数据技术建立故障数据库以实现突破;

(3)在线监测系统精确定位装置设计已经有相关研究,但其定位精度和抗干扰能力仍须提高;

(4)神经网络和专家系统在外护套在线监测的应用鲜有报道,可集成到外护套在线监测系统中,提高故障诊断的精度,提高工作效率。

参考文献:

[1] 罗俊华,邱毓昌,杨黎明. 10 kV 及以上电力电缆运行故障统计分析[J]. 高电压技术, 2003, 29(6):14-16.
[2] 吴娜. 110 kV 电缆外护套故障类型分析与对策探讨[J]. 中国新技术新产品, 2015(10):25-26.
[3] 涂娜,张旭. 电缆外护套特性及其故障对状态检测影响的研究[C]//2010年(苏州)电力电缆状态检修技术交流会论文集. 上海:中国电机工程学会, 2010:305-308.
[4] 崔江静,梁芝培. 高压电缆非金属外护套故障测寻方法[J]. 中国电力, 2001, 34(2):61-63.
[5] 刘毅刚,许继葵. 高压电缆外护套故障及其对策[J]. 高电压技术, 2001, 27(增刊 1):38-39.
[6] 何文辉. 110 kV 电缆外护套故障查找方法及防范措施[J]. 科技视界, 2015(5):305-306.

[7] 熊必凤,唐超,王谦,等. 电力电缆外护套故障定位研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2016, 41(8):138-144.
[8] 夏永辉. 高压电缆外护套故障查测及修复方法[J]. 电气应用, 2012(6):49-52.
[9] 郑晓泉,阎春雨,孙希斌,等. 高压 XLPE 电缆护层绝缘故障及检测技术[J]. 电线电缆, 2004(4):29-32.
[10] 许东升,田凤兰,赵珩,等. 电力电缆故障现场测距方法的研究与应用[J]. 高压电器, 2009, 45(5):136-140.
[11] 余阳澄. 110 kV 电缆故障测寻技术研究与应用[D]. 广州:华南理工大学, 2013.
[12] 洪娟. 高压电缆金属护层环流在线监测系统的研究和应用[D]. 北京:华北电力大学, 2013.
[13] 杨静,朱晓岭,董翔,等. 基于护层电流的高压电缆故障在线监测和诊断[J]. 高电压技术, 2016, 42(11):3616-3625.
[14] 杜伯学,李忠磊,张锴,等. 220 kV 交联聚乙烯电力电缆接地电流的计算与应用[J]. 高电压技术, 2013, 39(5):1034-1039.
[15] 牛海清,王晓兵,蚁泽沛,等. 110 kV 单芯电缆金属护套环流计算与试验研究[J]. 高电压技术, 2005, 31(8):15-17.
[16] 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(4):49-53.
[17] 詹威鹏. 高压电缆金属护套故障实时定位系统研究[D]. 广州:华南理工大学, 2015.
[18] 袁燕岭,周灏,董杰,等. 高压电力电缆护层电流在线监测及故障诊断技术[J]. 高电压技术, 2015, 41(4):1194-1203.
[19] 蔡坤强,兰生,章婧. 基于环流法的电缆外护套绝缘在线监测系统的设计[J]. 电力学报, 2014(1):56-61.

“绝缘与护套材料”专题报道征稿启事

在新一轮科技革命和产业变革的大背景下,“十四五”应运而生,国家坚持创新在我国现代化建设全局中的核心地位,把科技自立自强作为国家发展的战略支撑,大力发展新一代信息技术、高端装备、绿色环保以及航空航天、海洋装备等战略性新兴产业。这些领域的发展都会给电缆及电缆料行业带来巨大的新机遇,为加快解决以绝缘材料为代表的装备制造领域“卡脖子”问题,国内针对绝缘与护套材料的核心技术、批量制备工艺技术、新产品配方设计等方面开展了大量研究。

为展示该领域的最新研究进展和发展趋势,共享最新技术成果,《电线电缆》编辑部将于 2023 年第 4 期推出“绝缘与护套材料”专题报道,热忱欢迎相关领域高校、科研院所和企业科研技术人员踊跃投稿。

一、专题征稿范围(包括但不限于)

(1)工业柔性电缆用聚酯弹性体、氟塑料、聚氨酯的研制;

(2)低介质损耗的聚合物绝缘料和特种性能护套料的研发;

(3)轨道交通机车电缆用薄壁绝缘和护套料的

研发;

(4)阻燃剂材料及阻燃协效技术研究;

(5)电缆料制造过程智能化技术研究。

二、投稿要求

本专题同时征集综述性、研究性及应用类文章。综述性文章要求能总结上述领域的研究现状并提出前瞻性的发展方向;研究性文章要求能反映上述领域的最新研究成果,数据详实、方法新颖、结果可靠;应用性文章要求具有实际推广价值。

三、截稿日期

2023 年 5 月 25 日

四、投稿方式

投稿请登录《电线电缆》在线投审稿系统(<http://dxdl.cbpt.cnki.net>),完成注册后在线投稿。来稿请用 word 排版,并在稿件中注明“绝缘与护套材料专题投稿”。

五、联系方式

联系人:贾竹青

电话:021-65494605-296

邮箱:wirecable@secr.com