· 测试技术 · DOI:10. 16105/j. dxdl. 1672-6901. 202301006

高压 XLPE 电缆缓冲层烧蚀故障原因与检测关键技术

周韫捷[1], 李 海[1], 范玉军[2], 代 娜[2*]
(1. 国网上海市电力公司电缆分公司, 上海 200072; 2. 上海国缆检测股份有限公司,上海 200444)

摘 要:高压交联聚乙烯(XLPE)电缆的缓冲层因烧蚀而导致的线路故障已多次出现,其原因尚无定论。为了探究烧蚀故障的原因,从电缆阻水带缓冲层角度出发,分析了阻水带缓冲层含水率、电缆阻水类型和阻水带缓冲层电性能等因素对烧蚀故障的影响。结果表明:在电缆安装或正式使用之前,对阻水带缓冲层含水率、体积电阻、表面电阻和成品电缆缓冲层接触电阻率等方面进行检测,可减少或避免电缆缓冲层烧蚀故障的发生。

关键词:高压交联聚乙烯电缆; 缓冲层; 烧蚀; 故障原因; 检测技术
中图分类号:TM247 **文献标志码**:A **文章编号**:1672-6901(2023)01-0026-04

Analysis Ablation Failure Causes on Buffer Layer of High Voltage XLPE Cable and Key Detection Technologies

ZHOU Yunjie[1], LI Hai[1], FAN Yujun[2], DAI Na[2*]
(1. State Grid Shanghai Cable Company, Shanghai 200072, China; 2. Shanghai National Center of Testing and Inspection for Electric Cable and Wire Co., Ltd., Shanghai 200444, China)

Abstract: The lines fault caused by ablation of the buffer layer of high voltage cross linked polyethylene(XLPE) cable has occurred many times, and the reason why the defects occurred is still inconclusive. In order to explore the causes of ablation failure, from the perspective of cable water stop buffer layer, the effects of water content of water stop buffer layer, cable water stop type and electrical performance of water stop buffer layer on ablation failure were analyzed. The results showed that in order to reduce or avoid the ablation failure of cable buffer layer, four aspects of water content, volume resistance, surface resistance and contact resistance of finished cable buffer layer must be tested before cable installation or formal use.

Key words: XLPE cable; buffer layer; ablation; fault cause; detection technology

0 引 言

交联聚乙烯(XLPE)电缆因机械性能良好、安装维护方便、绝缘性能优异等诸多优点,在我国电力系统中得到了广泛应用[1-2]。国内高压 XLPE 绝缘电缆基本采用皱纹铝套的金属屏蔽结构,半导电缓冲层位于挤包绝缘线芯和金属套之间,经由缓冲带材绕包工艺制成。半导电缓冲层作为电缆内部高电位向低电位过渡、绝缘向金属接地过渡的组成单元,实现绝缘线芯轴向连续有效接地。考虑电缆在某些敷设环境中会受到水分的影响,要求缓冲层具有纵向阻水特性。

常规的皱纹铝套与缓冲层之间呈间隔线状接触,如果缓冲层选材、设计、生产或应用等环节控制不当,会导致绝缘线芯接地不良,严重的情况可表现为缓冲层表面粉状析出、铝套内表面局部腐蚀甚至绝缘屏蔽局部电蚀,直至损伤主绝缘,引发击穿故障,这成为高压电力电缆设计、制造和运行的难点和痛点。

收稿日期:2022-04-08
基金项目:国家电网有限公司总部管理科技项目资助(5200-201917070A-0-0-00)。
作者简介:周韫捷(1975—),男,硕士,高级工程师。
*通信作者:daina@ticw.com.cn

1 高压电缆缓冲层

高压电缆缓冲层由绕包在绝缘屏蔽表面的半导电带材构成,满足电缆运行中热膨胀的要求,与金属屏蔽层保持良好的电气接触。缓冲层所使用的半导电带可分为两大类:一类为非阻水半导电带,另一类为含阻水粉的阻水型半导电带,具体见表 1。

表 1 半导电带

非阻水型半导电带	阻水型半导电带
半导电无纺布带(布+布)	半导电阻水带(布+布)(阻水粉)
半导电缓冲带(布+棉)	半导电缓冲阻水带(布+棉)(阻水粉)

国内高压电缆受日本技术路线影响,金属护套

以皱纹铝护套为主。1998 年开始出现了缓冲层纵向阻水的要求,起初是采用进口的带材,采用阻水带加金属丝布的结构,该方法价格昂贵。从 2004 年开始阻水带实现了国产化生产。从 2007 年开始,为了降低成本,研发了采用蓬松棉的厚阻水带(半导电缓冲阻水带),并取消了金属丝布。关于阻水型半导电带占整个半导电带的比例情况,调研了国内 3 家知名的带材供应商,具体情况见表 2。

表 2 阻水型半导电带销量占比

供应商	阻水型半导电带占半导电带(含阻水和非阻水)的比例/%
A	80.0~90.0
B	98.0~98.5
C	98.7

对国内 25 家主要的高压电缆制造商生产的 110 kV 和 220 kV 两个电压等级的高压电缆进行了问卷调研,对纵向阻水(缓冲层为阻水型半导电带)和非纵向阻水(不使用阻水型半导电带)电缆占比进行了统计,结果见表 3。

表 3 国内生产的纵向阻水与非纵向阻水电缆占比统计结果

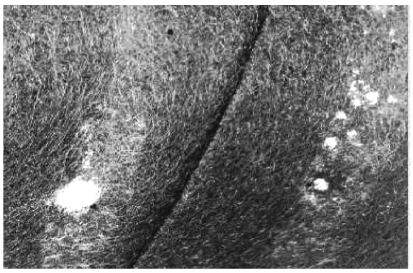
供应商序号	纵向阻水型占比/%	非纵向阻水型占比/%	供应商序号	纵向阻水型占比/%	非纵向阻水型占比/%
1	100	0	14	100	0
2	80	20	15	100	0
3	100	0	16	100	0
4	90	10	17	60	40
5	50	50	18	100	0
6	100	0	19	80	20
7	100	0	20	100	0
8	100	0	21	70	30
9	100	0	22	100	0
10	100	0	23	100	0
11	100	0	24	80	20
12	100	0	25	100	0
13	20	80	—	—	—

由表 3 可知,国内生产的高压电缆缓冲层结构主要是以纵向阻水型为主,大部分厂家生产的高压电缆采用纵向阻水型结构。

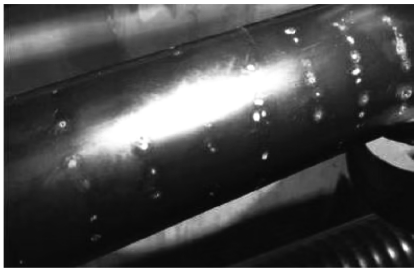
2 高压 XLPE 电缆缓冲层烧蚀故障原因

2.1 缓冲层含水率的影响

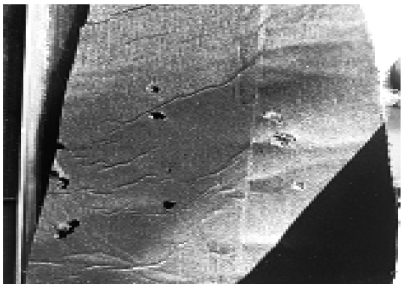
高压 XLPE 电缆缓冲层均具有阻水性能,出现烧蚀现象的电缆其共性特征是,电缆的金属套为皱纹铝套,并且缓冲层中含阻水型半导电缓冲带,多数有受潮的迹象。阻水型半导电缓冲带阻水粉析出和烧蚀现象见图 1。



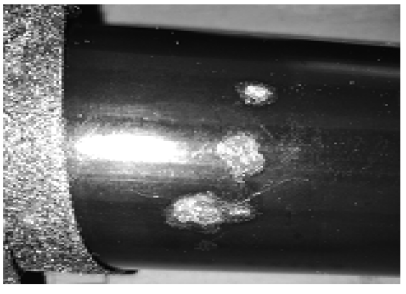
(a) 含白色灼伤点的阻水带



(b) 绝缘屏蔽层表面白色灼伤点



(c) 阻水带被击穿



(d) 屏蔽层被烧蚀

图 1 阻水型半导电缓冲带阻水粉析出和烧蚀现象

图 1(a)中,阻水带受潮后阻水粉析出,放电形成白色灼伤点,受含白色灼伤点的阻水带影响,图 1(b)所示的白色灼伤点积聚在电缆屏蔽层表面。图 1(c)中所示的阻水带受潮后放电被击穿,从而造成图 1(d)所示的电缆屏蔽层出现烧蚀现象。

本工作采用 JB/T 10259—2014《电缆和光缆用阻水带》中规定的含水率的测试方法,对上海国网施工中的 60 个样品的电缆缓冲层含水率进行了检测,结果见表 4。

JB/T 10259—2014 中要求阻水带含水率不大于 7%,表 4 的测试结果显示,63% 的样品的阻水带含水率大于 7%。阻水带缓冲层在电缆的加工和使用

过程中都引入了水分,成为了电缆缓冲层烧蚀的隐患。

表 4 缓冲层含水率

样品编号	含水率/%	样品编号	含水率/%
1	7	31	8
2	8	32	10
3	9	33	10
4	12	34	10
5	6	35	7
6	4	36	11
7	9	37	9
8	10	38	7
9	6	39	8
10	7	40	11
11	6	41	10
12	8	42	7
13	7	43	11
14	7	44	8
15	9	45	8
16	7	46	7
17	5	47	16
18	10	48	15
19	8	49	10
20	6	50	7
21	6	51	15
22	7	52	8
23	4	53	10
24	4	54	14
25	5	55	9
26	7	56	12
27	7	57	13
28	3	58	8
29	12	59	8
30	7	60	9

2.2 电缆阻水类型的影响

电缆防水主要考虑沿着电缆导体方向及沿着电缆径向透过电缆外护层的渗水。因此,可采用电缆径向防水和纵向阻水的结构[3]。目前典型的高压电缆结构,无论是皱纹铝套结构、平铝套结构,还是铝塑复合套等结构,都是金属套密封型结构,都具备径向阻水的功能,也就是说,在不遭到破坏的情况下,即使处在有水的环境也不影响电缆的正常使用。

从理论上讲,纵向阻水型高压电缆在遭到故障破坏时,由于具备纵向阻水功能,可以减少更换电缆的长度。在实际应用中,北京、上海、广州等电网用户根据电缆的使用环境,给出如下结论:

(1)北方地区较为干燥,电缆隧道中大多数情况下是没有水的,隧道电缆线路也不会受到外力破坏,电缆故障率很低,电缆故障后进水的案例极少,国网北京市电力公司近十年来没有发生因为电缆铝套受损导致的进水情况。

(2)上海的高压电缆主要敷设在排管里面,一些排管中会有水,但是电缆铝套内进水的情况很少。抢修时若发现电缆故障处有进水的情况,通常的处理方式是在临近的工井处切断电缆进行检查,并做接头处理。

(3)广东地区电缆浸泡在水中的情况较为常见。相对来讲,电缆接头是该地区防水的薄弱环节,水从接头保护盒处流进电缆铝套内的情况较为常见,一般是从接头保护盒处进水或电缆遭到破坏进水,纵向阻水型电缆虽有一定的阻水功能,但难免有空气中的水分子会进入其中,最终会导致阻水粉析出而造成隐患。

因此,从电缆选型是否需要阻水性能的角度做了如下总结和建议:

(1)高压电缆的阻水性能分为径向阻水和纵向阻水两种。应根据实际需求进行选型。一般而言,对于运行环境不是直接浸泡在水中的情况,推荐选择型号为 YJLW03 或 YJLW02 的径向阻水型电缆,而无须选择型号为 YJLW03-Z 或 YJLW02-Z 的纵向阻水型电缆。

(2)制造企业对径向阻水型电缆和纵向阻水型电缆在缓冲层结构上应有所区分,径向阻水型电缆不选用含阻水粉的带材。另外,绕包带材的层数和厚度对载流量的影响也不容忽视。

(3)即便是选择纵向阻水型电缆,由于电缆导体基本不具备阻水功能,在发生故障时,水很有可能从故障处通过导体流入,从而使金属套内的阻水型半导电缓冲层失去了作用,因此应慎用纵向阻水型电缆。

(4)推进包括铝塑复合套在内的其他金属套类型电缆的设计、研发、标准化等工作,扩大平铝套的推广应用,积累运行经验,力争将来国内有多种形式的电缆金属套结构并存,为用户提供更多的选择。

2.3 缓冲层电性能的影响

中国机械行业标准 JB/T 10259—2014《电缆和光缆用阻水带》中规定,半导电缓冲层阻水带的体积电阻率不大于 $1\times10^5\ \Omega\cdot cm$[4],而国家标准 GB/T 11017.2—2014 中规定,110 kV 电缆阻水带的体积电阻率与绝缘屏蔽层的体积电阻率标准不大于 $5\times10^4\ \Omega\cdot cm$[5]。这两个标准存在较大差别,且均只考虑了体积电阻率的原始值,由于阻水带缓冲层在电缆的加工和使用过程中都有可能引入水分,因此还须

考虑环境影响下阻水带是否满足电性能要求。

除了半导电缓冲层自身的电性能外,还需要考虑电缆皱纹铝套内的半导电缓冲层的接触电阻率。研究发现,发生烧蚀故障的电缆半导电缓冲层接触电阻率较正常电缆大了近十倍。所以接触电阻率可作为一个检测手段来衡量电缆的质量。接触电阻率为一段成品电缆皱纹铝套内的半导电缓冲层接触电阻与对应绝缘屏蔽表面积的乘积,在一定温度和湿度条件下,其数值稳定,能直接反映皱纹铝套内表面与绝缘屏蔽外表面的电接触性能。测试方法:取 1.5 m 长电缆成品,进行机械校直,分别设置高压极、屏蔽极和测试极,在样品两端的绝缘屏蔽表面设置高压极,在样品两端的半导电缓冲层表面设置屏蔽极,在样品表面露出铝套的一段设置测试极,半导电缓冲层测试仪与样品连接。电源正极连接高压极,并与样品导体等位连接,电源负极连接屏蔽极,测试端口连接测试极。

3 高压 XLPE 电缆缓冲层检测关键技术

为了减少或避免电缆缓冲层烧蚀现象的发生,在电缆安装或正式使用之前,须对电缆缓冲层进行检测,综合高压 XLPE 电缆缓冲层烧蚀故障原因分析,需要对阻水带含水率、阻水带体积电阻、阻水带表面电阻和成品电缆缓冲层接触电阻率等进行测试。

目前,阻水带含水率、阻水带体积电阻率和阻水带表面电阻率的检测方法是根据 JB/T 10259—2014《电缆和光缆用阻水带》中的规定进行检测。目前,成品电缆缓冲层接触电阻率还没有相关的国家标准、行业标准和团体标准,国家电线电缆质量检验检测中心制定了相关的技术规范《额定电压 110 kV 及以上交联聚乙烯绝缘皱纹铝套电力电缆半导电缓冲层电接触性能评价方法》,可用于成品电缆缓冲层接触电阻率的测试。

4 结束语

造成高压 XLPE 电缆缓冲层烧蚀故障的原因有以下几个方面:

(1)阻水带缓冲层的含水率。空气中的水分子会进入阻水带缓冲层,导致阻水粉析出而形成隐患。

(2)电缆阻水类型。发生故障时,水有可能从故障处通过导体流入,从而使金属套内的阻水型半导电缓冲层失去作用,因此应慎用含阻水带缓冲层的纵向阻水型电缆。

(3)阻水带缓冲层体积电阻率、表面电阻率以及电缆皱纹铝套内的半导电缓冲层接触电阻率的增加是缓冲层发生放电的潜在因素。

根据电缆缓冲层故障产生原因,需检测电缆缓冲层接触电阻率、缓冲层表面电阻、缓冲层体积电阻率和缓冲层使用前后的含水率。

参考文献:

[1] 王伟. 交联聚乙烯绝缘电力电缆技术基础[M]. 西安:西北工业大学出版社,2011.

[2] THUE W A. Electrical power cable engineering [M]. BocaRaton:CRC Press,1998.

[3] 刘彦军,郑金香,宋冬冬,等. 电缆径向防水和纵向阻水结构分析及应用[J],发输变电,2020(6):5-7.

[4] 中国机械行业 电缆和光缆用阻水带:JB/T 10259—2014[S]. 北京:机械工业出版社,2014.

[5] 中国国家标准化管理委员会. 额定电压 110 kV(U_m = 126 kV)交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件第二部分:电缆:GB/T 11017.2—2014[S]. 北京:中国标准出版社,2014.

(上接第 21 页)

[9] 顾春飞,栗雪松,谢书鸿,等. 基于超低损耗、大有效面积 G.654 光纤的深海无中继海光缆研制[C]//第四届全国海底光缆通信技术研讨会论文集,北京:人民邮电出版社,2017:242-248.

[10] 刘红亮,王红霞,俞志贤. 层绞式海底光缆抗压扁性能研究[J]. 光通信研究,2012(1):38-40.

[11] 周杰. 基于光缆类型的光纤余长影响参数的研究[J]. 才智,2013(10):235-236.

[12] 李万盟. 光缆中光纤的余长设计与控制[J]. 光纤技术,1998(5):7-9.