

电缆缓冲层电阻变化、电容电流分布和运行的研究

严有祥¹, 欧阳本红², 郑建康³, 李浩浩⁴, 王伟^{5*}

(1. 国网厦门供电分公司, 厦门 361000; 2. 中国电力科学研究院, 武汉 430074; 3. 国网西安供电分公司, 西安 710025; 4. 上上电缆股份有限公司, 宜兴 214200; 5. 国网电力科学研究院, 武汉 430074)

摘要: 高压电力电缆的故障中, 发现大量电缆缓冲层烧蚀现象。而这种烧蚀伴随着因电容电流集中引起的温度升高。从电缆线路接地方式出发, 通过理论计算和模拟电缆结构样品试验, 了解运行时皱纹铝套下缓冲层表面的电容电流分配变化, 分析试验数据, 找出电缆运行时缓冲层烧蚀的原因。试验结果可为电缆运检工作提供故障分析手段。

关键词: 缓冲层; 电容电流; 烧蚀; 接地方式

中图分类号: TM203

文献标识码: A

文章编号: 1672-6901(2022)04-0035-06

Research on Resistance Change, Capacitance Current Distribution and Operation of Cable Buffer Layer

YAN Youxiang¹, OUYANG Benhong², ZHENG Jiankang³, LI Haohao⁴, WANG Wei^{5*}

(1. Xiamen Power Supply Company, Xiamen 361000, China; 2. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China; 3. Xi'an Power Supply Company, Xi'an 710025, China; 4. Shang Shang Cable Co., Ltd., Yixing 214200, China; 5. State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: In the fault of high voltage power cable, a large number of erosion phenomenon of cable buffer layer is found. This erosion is accompanied by an increase in temperature due to concentration of capacitance current. In this paper, based on the grounding mode of cable line, through theoretical calculation and simulation test of cable structure sample, the change of capacitance current distribution on the surface of buffer layer under wrinkle aluminum sheath was understood, the test data were analyzed, and the reason of erosion was found out to provide fault analysis means for cable operation and inspection.

Key words: buffer layer; capacitance current; erosion; grounding mode

0 引言

高压电缆材料及结构的选择对电缆的长期可靠使用影响巨大。近年来, 电缆缓冲层在运行中出现烧蚀现象就是其最典型的问题。众所周知, 电缆缓冲层是由导电无纺布加防水粉组成的, 由于材料性质特性的变化、生产工艺的不同, 材料表现出的结构特性千差万别。电缆运行时, 电容电流的出现和分布变化, 不同接地方式运行下电容电流的集中方式也不同, 如果在电流集中点上, 材料的温升超过了基材的耐温极限, 就可能出现烧蚀现象。

本工作在文献[1]的基础上, 从电缆缓冲层的组成特性、皱纹铝套接地方式和模拟电缆运行等方面研究烧蚀的相关性条件。通过制作大量的含有各种缓冲层结构的模型电缆和实际电缆样品, 对模型

电缆、实际电缆样品, 进行相关材料的试验, 揭示了电缆皱纹铝套内, 缓冲层外表面电容电流的分布。从试验结果数据分析看, 证明了文献[1]中理论计算的情况和实际检测情况相吻合, 且这种电容电流的分布与电缆皱纹铝套的接地方式有关系。

1 模型、计算及试验分析

1.1 模型及等值电路

图1和图2分别表示金属套和缓冲层全部接触和部分接触时的模型, 其中皱纹铝套的热胀冷缩较内部的绝缘材料的小, 它们之间必须设计一定的间隙, 而这个间隙又阻断了电气连接, 所以需采用具有可压塑功能的导电无纺布缓冲层来满足热胀冷缩的结构要求。根据上述电缆缓冲层的材料、结构、施加电压情况, 以及电缆结构的分析, 将金属套和缓冲层接触点分成两种极端情况, 图1是金属套接触缓冲层; 图2为金属套不接触缓冲层。图1和图2中的箭头方向代表绝缘电容电流的流向。

收稿日期: 2021-07-08

作者简介: 严有祥(1964—), 男, 教授级高工。

* 通信作者: 1390046667@qq.com

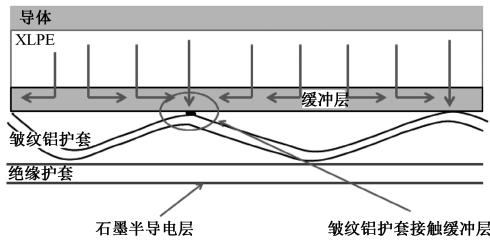


图1 金属套接触缓冲层

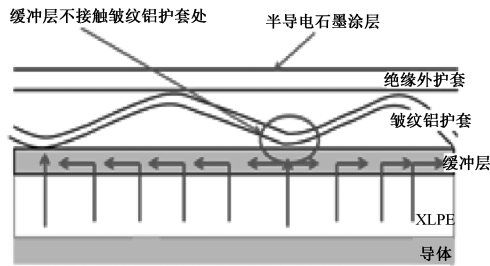


图2 金属套不接触缓冲层

上述模型结构的等值电路,见图3。从理论上分析缓冲层结构可以用一个电阻(R)进行代替;电缆绝缘层可以认为是一个电容(C);本应出现的绝缘屏蔽层参数,由于电阻很小,因而忽略不计;金属套电阻更小,也忽略不计。

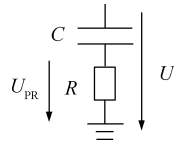


图3 缓冲层等值电路

1.2 分电压计算

根据电路原理,施加在缓冲层上的分电压 \dot{U}_{PR} 就可以由式(1)进行计算:

$$\dot{U}_{PR} = 2j\pi fCU / (1/R + j2\pi fC) = 2\pi \times f \times C \times U / [(1/R)^2 + (2\pi \times f \times C)^2] + j2\pi fCU/R / [(1/R)^2 + (2\pi \times f \times C)^2] \quad (1)$$

式中: C 为等值电容,pF; f 为工作电压频率,Hz; U 为施加在电缆上的运行电压,V。

代入已知条件:操作波的频率为 1×10^3 Hz;单位长度电缆的电容为 200 pF。

故障点的面积根据实际图片判断宽 $t = 1$ mm,长为五分之一圆弧,如果电缆绝缘屏蔽层外直径为 $D = 80$ mm,则烧蚀面积 S 表示为

$$S = \frac{\pi \times D}{5} t = 50.2 \text{ mm}^2 \quad (2)$$

将数据带入公式(1),得

$$|\dot{U}_{PR}| = \sqrt{a^2 + b^2} = 2.587 \text{ V}$$

式中: a 为 $|\dot{U}_{PR}|$ 实部; b 为 $|\dot{U}_{PR}|$ 虚部。根据 $U_p =$

$KU_0^{[1]}$,可知 $U_{oR} = 2.94 \text{ V}$ 。

从操作波公式^[2-5]可知,作用在缓冲层上的分量数学表达式为

$$U_{PR} = U_{oR} (e^{-t/T_a} - e^{-t/T_b}) = 2.94 (e^{-t/80.2 \times 10^{-6}} - e^{-t/305.4 \times 10^{-6}}) \quad (3)$$

1.3 缓冲层受热计算

根据热平衡方程^[5]:

$$J = C \times m (T - T_0) \quad (4)$$

假设电缆周围的环境温度为 $20 \text{ }^\circ\text{C}$,在绝热条件下, $0 \sim 2500 \text{ } \mu\text{s}$ 范围内,操作波过程中缓冲层上产生的热量应满足下列公式:

$$\int_0^{2500} \frac{U_{PR}^2(t)}{R} dt = \int_{T_0}^T CmSdT \quad (5)$$

式中: $S = d \times t$; t 为烧蚀点宽,mm;金属套波峰宽为 $d = 10 \text{ mm}$;阻水带单位面积质量 $m = 240 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$;缓冲层电阻 $R = 1000 \text{ } \Omega$;将已知数据代入式(5),得到操作波电压下缓冲层的表面温度 $T = 441 \text{ }^\circ\text{C}$ 。用同样方法计算,工频电压,即: $U_{oR} = 1.47 \text{ V}$,一个周期内,缓冲层接触点的温度约达到 $94 \text{ }^\circ\text{C}$ 。从缓冲层的特性参数可知,该温度属于缓冲层的正常运行温度,但如果电流集中到一点,温度会增至正常运行时的50.2倍以上(即将 $S = \frac{\pi \times D}{5} t = 50.2 \text{ mm}^2$ 面积上的电流集中到一个单位面积上),理论上可达到 $4718.8 \text{ }^\circ\text{C}$,这足以破坏缓冲层基材、金属套内表面及绝缘屏蔽层外表面。

1.4 缓冲层热重分析

采用 TAG-DSC 热重分析试验方法分析缓冲层的温度变化情况,检测实际缓冲层烧蚀点材料经受温度变化的过程。分别选择同一缓冲层中烧蚀孔处以及外观完好处的两处样本进行分析,在平衡温度 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,以 $10 \text{ }^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 速率进行升温,直到温度达 $700 \text{ }^\circ\text{C}$ 为止。得到缓冲层烧蚀孔处以及外观完好处的两处样本的热重变化,见图4。

由图4(a)可知,在 $160 \text{ }^\circ\text{C}$ 附近的峰代表的是材料失去结晶水的过程,而在此处,只有铝材氧化反应形成 Al_2O_3 才会有结晶水存在,正是在这个温度下,其结晶水失去造成一个吸收峰。图4中,在 $423 \text{ }^\circ\text{C}$ 均有一个吸收峰,它代表的是聚丙烯结晶区完全分解吸收峰,在缓冲层烧蚀孔内,由于聚丙烯无纺布结构的结晶已经在烧蚀过程中分解了,剩余数量有限,所以它的吸收峰明显小,这也说明这里的聚丙烯无纺布被严重烧蚀。

由试验结果可以看出:缓冲层经受过约 $423 \text{ }^\circ\text{C}$

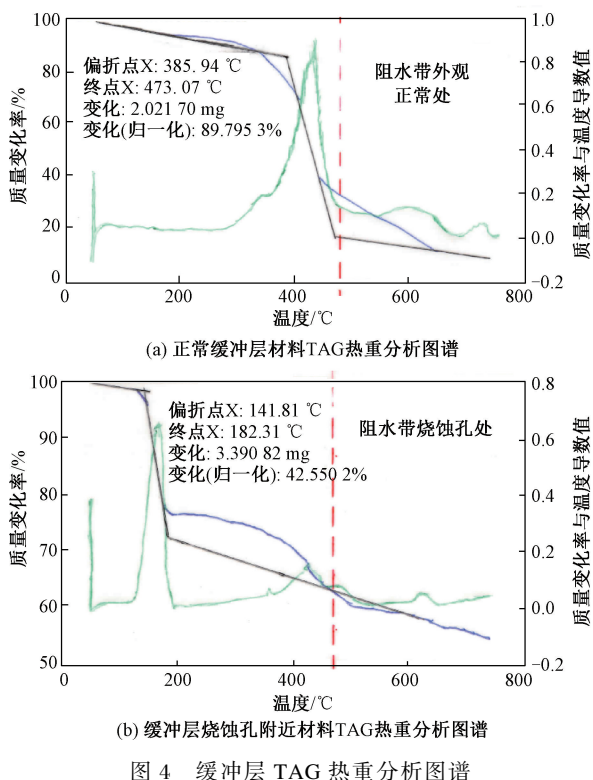


图4 缓冲层 TAG 热重分析图谱

的高温,这一温度和理论计算的结果处在一个数量级范围,说明前述的理论计算可真实反映电缆烧蚀的过程。

2 电缆模拟样品

2.1 样品选择

用于模拟试验的样品,必须选择一个最佳缓冲层结构方案。在试验前,首先对需要研究的现有电缆缓冲层结构和可能的新型结构进行梳理,所选择的电缆结构既要满足不再发生缓冲层烧蚀,在电缆运行期间,也要求缓冲层的电阻始终都处于较低的数值^[6-9]。在实际使用中,电缆的缓冲层结构有很多种组合,通过大量的分析,本工作选择了常用的几种以及可能实现的缓冲层结构作为模拟电缆样品。

2.2 模拟试样

图5是制备的模拟试验样品,当电缆外屏没有铜带时,由于外屏电阻的存在,随着长度的增加,外屏的电阻将变得很大,当万用表两根接线分别与铝护套和外屏连接时,电流只在很小段区域流通,即便电缆再长,采用这种方法,电流只在其中的很小一段内存在,由于长度短,缓冲层的并联电阻较少,其值相对较大,且不随电缆长度的增加而变化。因此,在制作样品时在绝缘屏蔽上紧绕一层铜箔作为一个电极,求取的是这段电缆上缓冲层的平均值。

当电缆外屏绕包铜带后,此时测量的缓冲层电



图5 模拟试验样品

阻是整根试样上缓冲层电阻的并联值,其值很小,且随着电缆长度的增加而减小。测量模拟试样参数的试验接线示意图见图6。

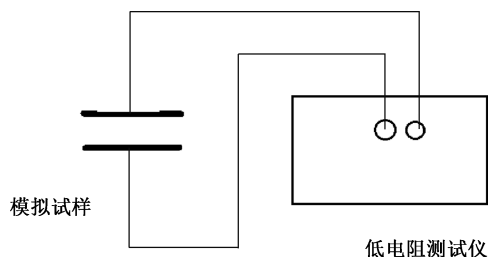


图6 测量模拟试样参数的试验接线示意图

试验用试样的缓冲层结构组合见表1。

2.3 实际电缆线路试样

模拟试验按文献[10]中的方法进行:取一段110 kV 电缆,长度为378 m,电容为 $0.23 \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$;再取一段220 kV 电缆,电容为 $0.252 \mu\text{F} \cdot \text{km}^{-1}$,长度为20 m,这两段电缆的局部放电、耐压性能均合格。电缆两端分别剥掉30 cm 外护套,使铝护套露出,再用直径4 mm 钻头分别在铝护套波峰、波谷打孔,通过面积 1.5 mm^2 的导线紧接缓冲层,但和皱纹铝套不接触,形成测量电极。

2.4 试验数据

通过对模拟试样进行预定的注水、改变所施加的压力和变换样品所处的环境温度,测量模拟试样获得了表1~表3的试验数据。

为进一步验证不同电缆结构电缆电阻及电缆不同工作温度下半导电缓冲层的电阻变化,尽量减小试验过程中温度波动影响,分别取不同结构的短段电缆样品,测试在不同温度下的电阻,结果见表4。

在模拟电缆线路上变换接地点方式(单端和双端接地)测量的 $1.5, 3.5 \text{ mm}^2$ 铜接地线上的电容电流,结果见表5和表6。

表1 模拟试样缓冲层结构和试验结果

序号	缓冲层结构	取样长度/ m	环境温度/ ℃	常温下,测试电阻/ Ω	70℃时,测试 电阻/Ω	铝护套长度/ cm
1	铜带+缓冲层+4层金丝布	1	28.5	1.1	0.6	56
2	铜带+缓冲层+3层金丝布	1	31	0.8	0.55	63
3	铜带+缓冲层+2层金丝布	1	28.5	1.2	0.5	68
4	铜带+缓冲层+1层金丝布	1	32	1.2	0.4	77
5	铜带+缓冲层	1	28.5	25	20	55
6	缓冲层+4层金丝布	1	32	130	140	93
7	缓冲层+3层金丝布	1	28.5	110	140	90
8	缓冲层+2层金丝布	1	32	100	230	90
9	缓冲层+1层金丝布	1	32	150	160	67
10	缓冲层	1	28.5	100	110	107
11	缓冲层+4层金丝布	13	32	96~160	—	1 300
12	缓冲层+3层金丝布	13	32	120	—	1 300
13	缓冲层+2层金丝布	13	32	130	—	1 300
14	缓冲层+1层金丝布	13	32	130	—	1 300
15	缓冲层	13	30.5	130	—	1 300
16	铜带+丁基带+4层金丝布	1	32	1.2	1	47
17	铜带+丁基带+3层金丝布	1	32	1.6	0.7	45
18	铜带+丁基带+2层金丝布	1	32	2	1.2	27
19	铜带+丁基带+1层金丝布	32	1.7	0.9	75	—
20	铜带+丁基带	1	28.5	0.2	0.2	80
21	丁基带+4层金丝布	1	31	120	240	100
22	丁基带+3层金丝布	1	32	140	230	96
23	丁基带+2层金丝布	1	32	160	230	106
24	丁基带+1层金丝布	1	32	160	220	105
25	丁基带	1	28.5	300	330	102
26	丁基带+4层金丝布	13	32	120	—	1 300
27	丁基带+3层金丝布	13	32	160	—	1 300
28	丁基带+2层金丝布	13	32	140	—	1 300
29	丁基带+1层金丝布	13	32	130	—	1 300
30	丁基带	13	32	400	—	1 300

表2 半导体电阻水带注水前后体积电阻率的结果

试样	注水量/mL	体积电阻率/(Ω·cm)	
		注水前	注水后
1	0	4 923.2	—
2	1	4 905.5	67 826.12
3	2	5 015.2	83 525.26

表3 半导体电阻水带在不同压力下体积电阻率的结果

压力/kg	注水量1 m时, 体积电阻率/(Ω·cm)
1	3 595.5
2	2 896.6
3	2 009.5
4	1 582.6

表4 不同样品不同温度下缓冲层电阻

缓冲层结构	不同温度下缓冲层电阻/Ω					
	30℃	60℃	70℃	80℃	90℃	100℃
缓冲带	100	140	130	220	260	800
缓冲带+2层金布	120	130	120	130	520	1 200
铜带+缓冲带	44.6	31.5	11.2	7.7	5.1	4.1
铜带+缓冲带+2层金布	1.9	1.7	1.6	1.1	1.0	1.0
铜带+缓冲带+4层金布	1.3	1.0	0.9	0.7	0.7	0.6
铜带+丁基带+1层金丝布	1.5	1.1	0.5	0.4	0.5	0.4
铜带+丁基带+4层金丝布	1.7	1.3	1.3	1.0	0.7	0.6

2.5 试验现象和说明

表1中,序号20铜带+丁基带模拟试样在常温

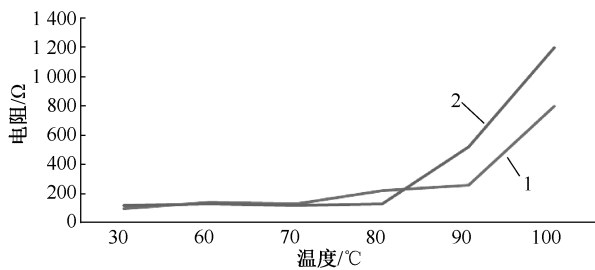
表5 模拟 ZC-YJLW03-Z-64/110 kV 1×800 378 m 电缆小电极上的电容电流(接地线上电流密度)

样号	接地线截面积/mm ²	开孔位置	接地线位置	不同电压测试的电容电流(接地线上电流密度)/mA [/(mA·mm ⁻²)]					
				10 kV	20 kV	30 kV	40 kV	50 kV	64 kV
1	1.5	波峰	单端	0.14 (0.093 33)	0.27 (0.18)	0.43 (0.286 7)	0.53 (0.353 3)	0.66 (0.44)	0.83 (0.553)
2	1.5	波峰	两端	0.07 (0.046 7)	0.12 (0.08)	0.18 (0.12)	0.24 (0.16)	0.36 (0.24)	0.5 (0.333)
3	1.5	波谷	两端	0.15 (0.1)	0.28 (0.186 7)	0.46 (0.306 7)	0.58 (0.386 7)	0.78 (0.52)	0.92 (0.613)
4	3.5	波谷	两端	0.16 (0.045 7)	0.27 (0.077 1)	0.42 (0.12)	0.45 (0.128 6)	0.6 (0.171 4)	0.7 (0.2)
5	3.5	波谷	单端	0.24 (0.068 7)	0.49 (0.14)	0.7 (0.2)	0.98 (0.28)	1.2 (0.342 9)	1.45 (0.414)

表6 模拟 ZA-YJLW03-Z-127/220 kV 1×2 500 20 m 电缆小电极上的电容电流(接地线上电流密度)

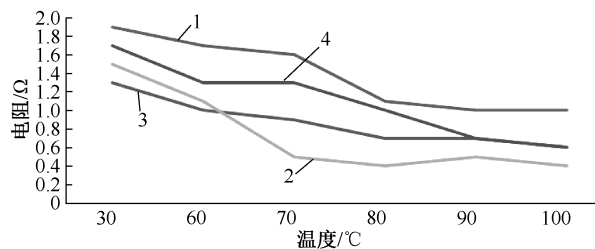
样号	接线材料	接地线截面积/mm ²	开孔位置	接地线位置	不同电压测试电容电流(接地线上电流密度)/mA [/(mA·mm ⁻²)]					
					10 kV	20 kV	30 kV	40 kV	50 kV	64 kV
1	铜	1.5	波峰	单端	0.04 (0.026 7)	0.09 (0.047 4)	0.14 (0.093 3)	0.19 (0.126 7)	0.24 (0.16)	0.29 (0.193)
2	铜	1.5	波峰	两端	0.02 (0.013 3)	0.03 (0.02)	0.05 (0.033 3)	0.06 (0.04)	0.08 (0.053 3)	0.1 (0.067)
3	铜	1.5	波谷	两端	0.04 (0.026 7)	0.07 (0.046 7)	0.11 (0.073 3)	0.15 (0.1)	0.18 (0.12)	0.22 (0.147)
4	铜	1.5	波谷	单端	0.04 (0.026 7)	0.08 (0.053 3)	0.12 (0.08)	0.16 (0.106 7)	0.2 (0.133 3)	0.25 (0.167)

下测试电阻为 0.2 Ω,当温度升至 70 ℃时电阻仍为 0.2 Ω,这说明随温度变化丁基橡胶带的接触电阻大小没有变化,现有电缆缓冲层结构的接触电阻试验结果见图 7、图 8。由图 7~图 8 可以看到,当电缆运行温度升高后,在 70~80 ℃区间接触电阻迅速升高。



1—缓冲带; 2—缓冲带+2层金布

图7 样品无铜带时缓冲层电阻随温度变化趋势



1—铜带+缓冲带+2层金布; 3—铜带+缓冲带+4层金布;
2—铜带+丁基带+1层金布; 4—铜带+丁基带+4层金布

图8 样品有铜带时缓冲层电阻随温度变化趋势

在半导电丁基带加金布结构的缓冲层接触电阻试验中,电缆运行温度范围内缓冲层接触电阻均处于几种样品接触电阻最小的状态。

从表 5 和表 6 可以看到,电缆的接地方式和电

极面积对接触点的电容电流的分布有影响。

3 结果与讨论

3.1 半导体缓冲层烧蚀受热

从理论计算获知,电缆缓冲层在操作过电压作用下,电容电流集中点的一个小区域中会产生很高的温度(理论计算值 441 ℃,实测值 423 ℃),这一温度远高于缓冲层材质结构的耐热温度,缓冲层在操作波作用的时间内结构中的结晶体融化到整体分解,而造成这个温度下的电流只有不到 1 A。

实际测量的温度和理论计算的温度非常接近,原因可能是在理论计算的假设阶段,认为电容电流产生的温升向周围介质的散热可以忽略不计,但实际上存在散热,只是由于缓冲层是由聚丙烯纤维构成,而聚丙烯纤维是一个绝缘体,散热很小。虽然纤维上包裹着导电炭黑,但其厚度非常薄,散热也是有限的。这里的散热主要是红外线辐射散热,且散热并不迅速,因此,理论计算和实际测量值才这么接近。

3.2 电缆缓冲层结构

由表 4 可知,在模拟的各种样品中,发现只有一层半导体丁基橡胶带加一层金丝布的缓冲层结构的接触电阻,在各个温度下均较为稳定地维持在 1 Ω 以下。而现有电缆纯防水半导体无纺布结构的缓冲层中,各个温度运行下的电阻高于 100 Ω,金丝布加半导体无纺布带构成的缓冲层电阻更高,可以解释为金丝布的铜含量较低,且直径较小,再加上半导体无纺布,最终造成电阻较大。

3.3 电容电流的流向

由表5中样号1和样号2数据、样号4和样号5数据可知:110 kV、378 m 电缆在接地点面积相同的情况下,单端接地在测量的接地点电容电流明显大于双端接地时的电容电流,有几乎2倍的关系,且波谷电流是波峰电流的2倍,说明当双端接地时,电容电流满足从波峰向两边的波谷处铝护套接触的位置流动(见图1)。由表6也可以看到:220 kV、20 m 的电缆用同样方法所得的试验数据也有这样的表现形式,但由于电缆较短,这种现象不是很明显,这说明接地点的相对距离影响了电容电流的分布。表6中220 kV 电缆在单端和双端接地的情况下,两个电容电流几乎相等。而220 kV 绝缘中的电容电流,由于其绝缘厚度几乎是110 kV 电缆绝缘厚度的一倍(110 kV 绝缘厚度16 mm, 220 kV 绝缘厚度24 mm),所以考虑在电极面积不同的情况下,220 kV 电缆的电容电流是110 kV 的1.72倍,说明在电压相等时接地点单位长度上的电流 $I_{220}/I_{110} \approx 1.72$,但在表5中,没有看到这样的电流倍数,表现的结果是110 kV 电缆在单点接地和双端接地时,接地电流均比220 kV 电缆大。110 kV 电缆和220 kV 电缆在 1.5 mm^2 接地线中的电容分别为 1.987×10^{-15} 、 $1.67 \times 10^{-15} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ 。按照理论计算,用式(1)对110 kV 电缆结构计算可得这片缓冲层的电阻相当于 $2.08 \text{ M}\Omega$ (64 kV, 0.83 mA); 220 kV 电缆的接触电阻为 $8.64 \text{ k}\Omega$ (64 kV, 0.29 mA),可见此次试验用的110 kV 和220 kV 电缆的缓冲层接触电阻是非常大的。

4 结束语

根据上述计算和试验,高压电缆的缓冲层中的电容电流分布和电阻变化有以下几个特点:

(1) 高压电缆缓冲层中流动的电流虽然很小,但由于集中于很小的面积上,造成温度升高很大,实际测量和理论计算充分证实了这一点。

(2) 高压电缆线路在运行时,电缆线路的接地

方式会影响到电容电流的分布,造成电流的进一步集中,金属套单点接地的电容电流几乎是双端接地的1倍。但对于短段电缆而言,这一特性表现得不明显。

(3) 在高压电缆在模拟试验中,模拟电极上的电容电流小于理论计算的电容电流,原因在于绝缘屏蔽层串联的电阻在作用,该电阻达到几百千欧。

(4) 根据试验得到的结果,高压电缆缓冲层结构中以半导电丁基橡胶带加金布的效果最好,它能保证电缆在运行温度下始终保持在较低的接触电阻之下,而且半导电丁基橡胶带没有裸露的导电炭黑,不会和铝产生电化学反应,提高了电缆运行的可靠性。

参考文献:

- [1] 王伟,欧阳本红,徐明忠,等. 电缆缓冲层烧蚀初步分析[J]. 电线电缆,2019(5):33-35.
- [2] 赵刚,朱启动,陈文真. 操作波的参数计算方法[J]. 高压电器,2001,37(2):9-11.
- [3] 付艳红,马耐祥. 正极性操作波作用下介质表面闪络的发展特性[J]. 高压电器,1986(3):9-11.
- [4] 王伟,张静,郑建康,等. 合闸时陡波过程对中间接头击穿特性的影响[J]. 电线电缆,2018(5):26-31.
- [5] IEC 42 (secretariat) 102. IEC1083-2. Digital recorders for measurements in high impulse tests Part 2: Evaluation of software used for the determination of the parameters of impulse waveform [S]. Paris:IEC,1996.
- [6] 程守洙,江之水. 普通物理学:第4册[M]. 北京:人民教育出版社,1961.
- [7] 赵健康,樊友兵. 高压电缆阻水缓冲层工艺和设计研究[J]. 电线电缆,2010(3):17-21.
- [8] 张侠. 一种新型电缆半导电电阻水带[J]. 电线电缆,2008(3):33-35.
- [9] 李晨振,李洪泽,陈杰,等. 高压XLPE 电缆缓冲层放电问题分析[J]. 电力工程技术,2018,37(2):61-66.
- [10] 张涵. 电缆缓冲层放电特性的研究[J]. 北京:电子技术与软件工程师,2015(6):241-242.
- [11] 张仁宇,陈昌渔,王昌长. 高压试验技术[M]. 北京:清华大学出版社,2009.

(上接第34页)

- [3] 王伟,欧阳本红,徐明忠,等. 电缆缓冲层烧蚀现象初步分析[J]. 电线电缆 2019(5):5-10.
- [4] 赵健康,樊友兵. 高压电缆缓冲层的设计与工艺研究[J]. 电线电缆,2010(3):17-21.
- [5] 全国纺织品标准化技术委员会. 纺织品 非织造布试验方法 第3部分:断裂强力和断裂伸长率的测定:GB/T 24218.3—2010[S]. 北京:中国标准出版社,2011.
- [6] 全国橡胶与橡胶制品标准化技术委员会. 橡胶物理试验方法试样制备和调节通用程序:GB/T 2941—2006[S]. 北京:中国标准出版社,2007.
- [7] 全国电线电缆标准化技术委员会. 电缆和光缆用阻水带:JB/T 10259—2014[S]. 北京:机械工业出版社,2014.