

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.12.020

喷涂PRTV涂料绝缘子负极性电晕下表面电位变化特性研究

易凡^{1,2}, 杜志叶², 金颀², 田雨²

(1. 武汉地铁运营有限公司, 武汉 430033; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 武汉 430072)

摘要:喷涂PRTV涂料的绝缘子有较好的污耐受特性,能有效的防止污闪,但在高压直流电力系统中,绝缘子表面喷涂PRTV涂料会加剧表面的电荷积聚,导致绝缘子表面合成电场畸变。为了获取负极性电晕下喷涂PRTV涂料绝缘子表面静电电位变化规律,文中采用静电探头法测量了负极性电晕下陶瓷、玻璃以及喷涂PRTV涂料绝缘子的表面电位,同时模拟工程实际中多层绝缘子悬挂的工况,测量了电晕下两层绝缘子表面的电位。研究表明:电晕后玻璃和陶瓷材料的绝缘子表面电位几乎为零;而表面覆盖PRTV涂料的绝缘子容易积累电荷,表面电位的绝对值较大;喷涂PRTV涂料的绝缘子表面电荷积聚饱和时,静电电位约为-700 V,表面电位衰减趋势近似为指数衰减;当悬挂两层绝缘子时上层绝缘子表面电位绝对值较高,而上下层绝缘子电位衰减速率相当。

关键词:喷涂PRTV涂料绝缘子;表面静电电位;电位衰减规律;静电探头

Study of Surface Potential Variation Characteristics of PRTV Coating Insulators Under Negative Polar Corona Condition

YI Fan^{1,2}, DU Zhiye², JIN Qi², TIAN Yu²

(1. Wuhan Metro Operation Co., Ltd., Wuhan 430033, China; 2. School of Electrical and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The insulators sprayed with PRTV coatings have better pollution tolerance and can effectively prevent pollution flashover. But in HVDC power system, PRTV coatings will aggravate the surface charge accumulation, resulting in the distortion of the synthetic electric field on insulator surface. In order to obtain insulator sprayed PRTV coating surface electrostatic potential variation law under negative polar corona, the surface potential of ceramic, glass and sprayed with PRTV coated insulators was measured by electrostatic probe method, and the surface potential of two insulators under corona was measured. The results show that the surface potential of glass and ceramics insulators are almost zero after corona, while the insulators coated with PRTV coatings are easy to accumulate charges, and the absolute value of surface potential is larger. When the surface charge of insulators coated with PRTV coatings accumulates saturated, the electrostatic potential is about -700 V, and the attenuation trend of surface potential is approximately exponential. When two insulators are suspended, the absolute value of upper insulators surface potential is higher, and the potential decay rate of upper and lower insulators is equal.

Key words: PRTV coating insulator; surface electrostatic potential; potential dissipation law; electrostatic probe

0 引言

电晕放电是高压直流输变电工程中重点关注的问题^[1-2]。电晕放电会带来很多的危害,主要包括

电晕损失、无线电干扰、可听噪声和离子流等^[3-5]。由于直流电压极性不随时间变化,产生的电场方向恒定,电晕产生的空间电荷会在电场力的作用下积聚到电气设备绝缘结构表面,使该处的场强发生严

收稿日期:2020-06-11; 修回日期:2020-08-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51477120,51741708)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51477120,51741708).

重的畸变,加剧绝缘子局部或整体的老化。目前,关于绝缘材料表面电荷积聚的研究大多集中在3个方面,分别为绝缘表面电荷积聚特性^[6-8]、绝缘表面电荷的消散特性^[9]、以及绝缘表面电荷积聚对于闪络电压的影响^[10-11]。研究对象主要集中在气体绝缘封闭开关设备(GIS)中盆式绝缘子和GIS支柱型绝缘子,提出电极放电的自由电荷通过气体侧传导造成了绝缘表面电荷积聚现象^[12-15]。在实际运行过程中,即使电晕消失,电荷在电气设备以及绝缘子表面仍然能存在一定时间,这会对绝缘性能造成很大的威胁^[16-17]。

由于PRTV材料的憎水迁移特性,PRTV涂料可显著提高悬式绝缘子的耐污闪能力^[18-21]。在相同盐密值下,喷涂了PRTV涂料的绝缘子的污闪电压是无涂料绝缘子的2.1倍^[19],并且PRTV涂料有较长的使用寿命^[20],在环境湿润的情况下,喷涂有PRTV涂料的悬式绝缘子不容易出现水滴附着,在淋雨和凝露状态下,有PRTV涂料的绝缘子的闪络电压明显提高^[21]。由于PRTV涂料耐污闪的性能卓越,喷涂PRTV涂料的悬式绝缘子越来越广泛的运用在外绝缘中^[22]。

文中研究负极性直流电晕下,几种常见的绝缘子电荷积聚与消散过程中的电位变化特性,试验中用到的绝缘子包括玻璃材料、陶瓷材料,以及表面喷涂了PRTV涂料的绝缘子,对比喷涂了PRTV涂料的绝缘子和未喷涂PRTV涂料绝缘子表面电位变化的异同,研究绝缘子成串悬挂时,上下层绝缘子表面电位变化趋势的异同。

1 表面电位测量系统

1.1 测量系统的构成

悬式绝缘子表面电位测量系统结构图见图1。该系统由高压部分和低压部分组成,高压部分包括负极性直流电压发生器、调压器、电极支架、球电极和板电极构成,低压部分由有源静电探头、传动机构、运动控制系统、静电电位计、数据采集卡及计算机等构成,表面电位测量系统实物图见图2。

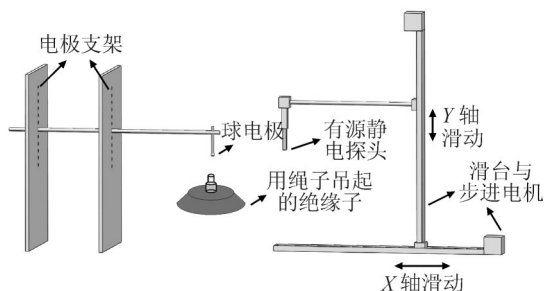


图1 表面电位测量系统结构图

Fig. 1 Surface potential measurement system structural picture



图2 表面电位测量系统实物图

Fig. 2 Surface potential measurement system photo

实验中,球电极直径为2 cm,与高压部分调压器相连,以施加高压产生电晕,实验桌面牢靠接地,以模拟工程实际中的悬式绝缘子下方的地面。运动控制系统由步进电机、步进电机驱动器以及多轴运动控制器组成,多轴运动控制器控制4台步进电机运动从而控制Kelvin探头位置,使探头始终保持与被测量绝缘子表面平行,探头与被测材料表面距离保持在5 mm左右,实现对整个悬式绝缘子径向扫描,有源静电探头与静电电位计相连,通过数据采集卡将采集到的电位信号输入至计算机,LabVIEW平台自动保存测量结果。其中,有源静电探头型号为1017AE,静电电位计型号为244 A,其量程为 ± 3 kV,与静电探头相匹配,探头尺寸为9 mm $\times$ 9 mm,静电探头与被测表面平行,相距5 mm左右。

1.2 表面电位测量步骤

文中所有实验均在封闭房间内进行的,实验过程中温度在7.4~11.7℃之间,湿度在58%~78.4%之间,PM2.5的浓度在40~154 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间。实验前,先用无水乙醇将待测试品表面擦拭干净,去除待测试品表面的灰尘和残余静电电荷,以免对实验结果造成影响。在悬式绝缘子表面径向电位测量过程中,绳子穿过绝缘子钢帽上端的孔,使绝缘子悬挂起来,绝缘子与桌面水平,距离桌面的距离固定为28 cm。使球电极在正对悬式绝缘子中间钢帽区域的上方,将球电极调整到合适的高度上,对球电极施加一定数值的负极性直流电压,使球电极发生电晕放电,一定时间后停止加压,撤去球电极。开启静电电位计和LabVIEW记录平台,运行事先编入多轴运动控制器的程序,通过修改程序完成对绝缘子径向多次重复的电位测量,获得悬式绝缘子表面的电位分布情况和衰减情况。由于表面电位与表面电荷密度近似成线性关系,因此文中通过悬式绝缘子表面电位的分布和衰减特性来模拟表面电荷的大致分布和消散特性^[23]。

通过编写不同的程序控制静电探头的移动,测

量悬式绝缘子表面径向电位的值。根据悬式绝缘子尺寸的不同,在表面等间距的选择9-13个点,让静电探头循环测量每个点的电位值,保证每次测量探头停留2 s,每次循环得到一组表面的电位值,在单次测量过程中,忽略电荷消散对悬式绝缘子表面电位分布和幅值的影响。当测得的悬式绝缘子表面的静电电位在100 V左右时,即可认为表面电荷基本消散完毕。由于此时的电荷密度小,后面残存的电荷很难消散,故不去研究。由于喷涂PRTV涂料的悬式绝缘子,积聚电荷的能力强,电荷消散的慢,所以一般测量30-40组,整个过程耗时接近30 min。

2 相关试品介绍

2.1 PRTV 涂料防污闪机理

PRTV 涂料具有良好的憎水性及憎水迁移性,同时具有一定的憎油性和优秀的不粘性^[24]。在恶劣气候条件下,沿潮湿、脏污的绝缘子表面会出现连续水膜而发生闪络。当喷涂PRTV涂料后,由于涂料具有憎水迁移性,使污层表面也具有憎水性,在遇到雾、露、毛毛雨等潮湿天气后,污秽层很难润湿,即使吸附少许水分,也仅仅以不连续的小水珠的形式存在,而不会被浸润、连片,形成成块的水膜^[25],从而抑制了泄漏电流及局部电弧的产生和发展,能够显著提高绝缘子的耐污闪电压^[26]。

绝缘子表面PRTV涂料的主要目的是提高绝缘子的耐污闪能力,除此之外还可以提高绝缘子在淋雨、凝露等状态下的闪络电压^[25]。

2.2 实验中的绝缘子试品

为了研究喷涂PRTV涂料对电荷积聚的影响,选择的实验绝缘子材料为陶瓷、玻璃以及喷涂了PRTV涂料的陶瓷和玻璃。绝缘子的型号均是工程实际中常用到的型号,实验用绝缘子的实物图见图3,每种悬式绝缘子的型号尺寸见表1。测量5种绝缘子电晕条件后表面的径向电位,拟合电位衰减曲线。

3 不同悬式绝缘子负极性电晕下径向电位测量结果

3.1 玻璃绝缘子和陶瓷绝缘子电晕条件后表面电位分布情况

对XWP6-70陶瓷绝缘子加压50 kV,持续3 min,测量绝缘子表面电位分布情况,测得的电位分布见图4。从绝缘子边缘处5 mm处记为第1个点,依次向里编号,每隔5 mm取一个测点(文中绝缘子都采用这种方法编号),纵坐标是测量的表面电位的幅值,每隔一段时间测量一次表面对应点的电

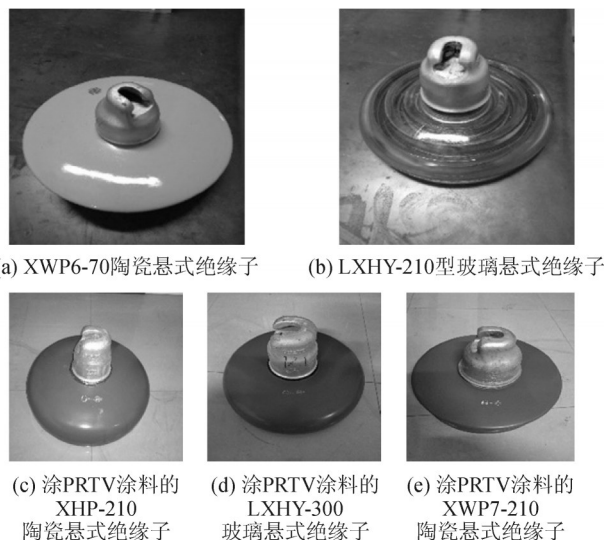


图3 不同尺寸悬式绝缘子的实物图

Fig. 3 Different sizes suspension insulators photo

表1 实验所用到的悬式绝缘子对应参数表

Table 1 Parameters table of suspension insulators used in the experiment

悬式绝缘子 型号	公称直径D/ mm	结构高度H/ mm	公称爬电距离 L/mm
XWP6-70	255	146	450
LXHY-210	170	320	540
XHP-210	170	300	450
LXHY-300	195	320	550
XWP7-210	170	330	545

位。发现绝缘子表面电位很低,且在短时间内,电位没有衰减的趋势。由于表面电位与表面电荷密度近似成线性关系,可以判断绝缘子表面电荷密度很低,且在一定的时间内电荷没有消散的趋势。同时测量绝缘子钢帽的电位接近为0,说明绝缘子钢帽上没有积聚电荷。

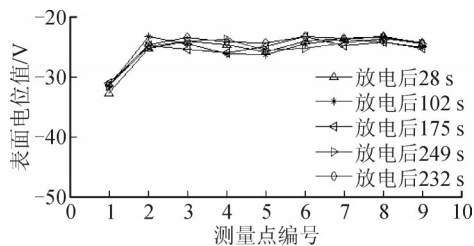


图4 电晕后XWP6-70陶瓷绝缘子表面电位分布

Fig. 4 Surface potential distribution of XWP6-70 ceramic insulator after corona

对LXHY-210型玻璃绝缘子加压50 kV,持续3 min,测量绝缘子表面电位分布情况,测得电位分布见图5。与陶瓷绝缘子表面电荷分布情况类似,绝缘子表面电荷积聚的很少,且在一定的时间内电荷没有消散的趋势,绝缘子钢帽的电位接近为0,钢帽上没有电荷积聚。

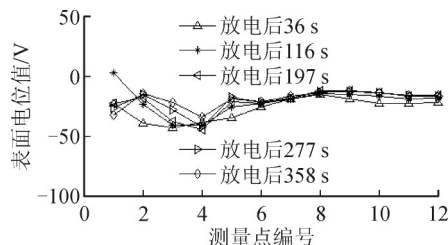


图5 电晕后LXHY-210型玻璃绝缘子表面电位分布

Fig. 5 Surface potential distribution of LXHY-210

glass insulator after corona

在工程中,陶瓷和玻璃材料的绝缘子都经常使用到的,对于这两种材料对应的绝缘子,在高压直流输电中,表面是不容易积聚电荷的,不会导致其沿面闪络特性下降。

3.2 喷涂PRTV涂料的绝缘子电晕条件后表面电位分布情况

XHP-210陶瓷绝缘子为钟罩型,对喷涂PRTV涂料的XHP-210陶瓷绝缘子加压50 kV,持续3 min,测量绝缘子表面电位分布情况,选不同时间点测量20组,绘制表面静电电位随时间衰减的曲线。绝缘子表面电位分布见图6,测量点表面静电电位随时间衰减曲线见图7,同时测量绝缘子钢帽的电位接近为0。

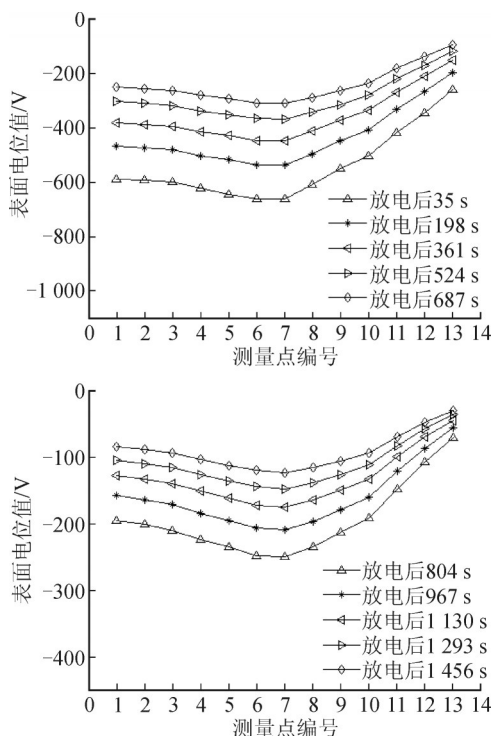


图6 电晕后涂PRTV涂料的XHP-210瓷绝缘子表面电位分布

Fig. 6 Surface potential distribution of XHP-210 ceramic insulator coated with PRTV coating after corona

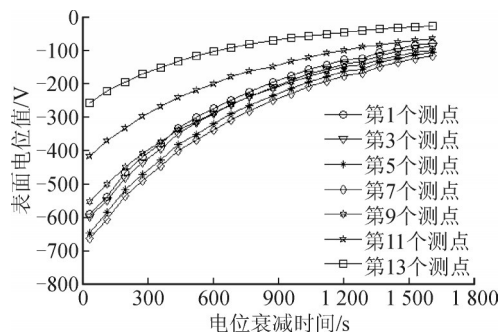


图7 涂PRTV涂料的XHP-210瓷绝缘子表面测量点表面静电电位随时间衰减曲线

Fig. 7 The decay curve of surface electrostatic potential of XHP-210 porcelain insulator coated with PRTV coating with time

从图7中可以看出,相比于不喷涂PRTV涂料的陶瓷绝缘子,喷涂了PRTV涂料之后,绝缘子表面积聚电荷的能力变强,电荷更容易积聚在绝缘子表面。同时,可以看出靠近绝缘子钢帽处的点表面电荷难以积聚,同时绝缘子边缘处的电荷密度也不如中间部分电荷密度高,表面电位分布呈现“勺子型”。从图7可以看出,远离绝缘子钢帽的测点表面静电电位的衰减具有一致性,表面电位衰减曲线趋势几乎相同,近似为一个指数衰减。取远离绝缘子钢帽的第1、5、11、和靠近绝缘子钢帽的第12个测点,一共4个测点的表面电位数据,记为 U_1 、 U_2 、 U_3 、 U_4 ,用指数函数进行曲线拟合, t 为放电结束后经历的时间, s 。拟合结果为:

$$U_1 = -209.7 e^{-0.644 3t} \quad (1)$$

$$U_2 = -251.9 e^{-0.591 9t} \quad (2)$$

$$U_3 = -156.6 e^{-0.6t} \quad (3)$$

$$U_4 = -78.35 e^{-0.728 t} \quad (4)$$

远离钢帽的3点的电压 U_1 、 U_2 、 U_3 随时间衰减速度具有一致性。靠近绝缘子钢帽点电压 U_4 ,由于受绝缘子钢帽的影响,电压衰减的更快一些。由于表面电位衰减趋势近似为指数形式,结合绝缘材料表面电荷消散的3种途径,可以判断绝缘子表面电荷消散以体消散为主。

为进一步研究PRTV涂料对陶瓷绝缘子表面电荷积聚的影响,选取喷涂PRTV涂料的3层伞耐污型陶瓷绝缘子XHP-210,对喷涂PRTV涂料的XHP-210陶瓷绝缘子加压50 kV,持续3 min,测量绝缘子表面电位分布情况,绘制表面电位随时间衰减曲线。其中缘子片表面电位分布见图8,绝缘子表面测量点表面静电电位随时间衰减曲线见图9,放电结束后,绝缘子钢帽的电位接近为0。

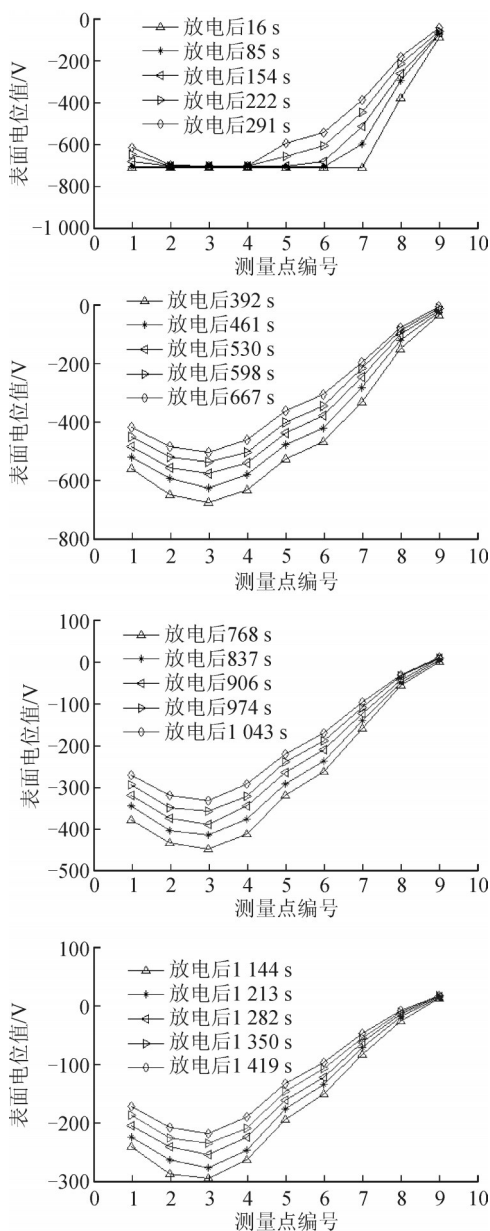


图8 电晕后涂PRTV涂料的XWP7-210陶瓷绝缘子表面电位分布

Fig. 8 Surface potential distribution of XWP7-210 ceramic insulator coated with PRTV coating after corona

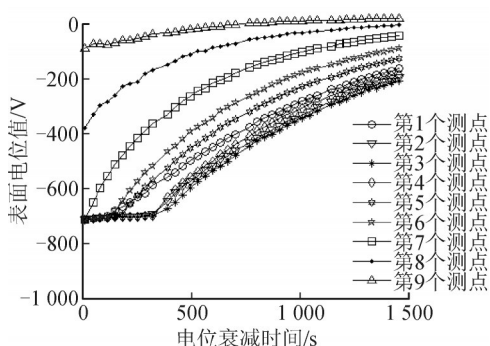


图9 涂PRTV涂料的XWP7-210陶瓷绝缘子表面测量点表面静电电位随时间衰减曲线

Fig. 9 Time-dependent attenuation curve of surface electrostatic potential at measuring points of XWP7-210 ceramic insulator coated with PRTV coating

从图8、9可以看出,绝缘子中部有几个点电荷积聚趋于饱和,对于电荷积聚的饱和点,表面的静电电位约为700 V,电位变化趋势也是先保持不变,然后开始呈现指数衰减。将试验结果和涂PRTV涂料的XHP-210型陶瓷悬式绝缘子对比,两种绝缘子形状不同,一个是钟罩型,一个是3层伞形,两种绝缘子在同样的加压试验环境下,由于绝缘子形状不一样,导致绝缘子沿面场分布不一样,也就造成了电晕后电荷积聚情况有明显的区别,在相同的环境下,3层伞形绝缘子表面更容易积聚电荷,电晕放电结束时,表面相应静电电位的绝对值要高一些。

选择绝缘子中间区域的测点,第6、7、8个测点,将这3个测点电位记为 U_5 、 U_6 、 U_7 ,用指数函数进行曲线拟合, t 为放电结束后经历的时间,s。拟合结果为:

$$U_5 = -807e^{-0.001446t} \quad (5)$$

$$U_6 = -709.7e^{-0.001962t} \quad (6)$$

$$U_7 = -382e^{-0.002518t} \quad (7)$$

靠近绝缘子钢帽的第9个测点,表面电荷不容易积聚,且很快消散。至于其他离绝缘子钢帽较远的点,电压随时间衰减速度具有一致性,表面电位经过1500 s后基本衰减完毕。

为研究喷涂PRTV涂料后,玻璃绝缘子表面电荷积聚特性的变化,对涂PRTV涂料的LXHY-300玻璃绝缘子加压50 kV,持续3 min,球电极放电结束后,测量绝缘子表面的静电电位,绘制表面电位随时间衰减曲线。其中绝缘子表面电位分布见图10,绝缘子表面测量点表面静电电位随时间衰减曲线见图11,同时测量绝缘子钢帽的电位接近为0。

选绝缘子中间区域的测点,第5、7、9个测点,记这3点的电位为 U_8 、 U_9 、 U_{10} ,用指数函数进行曲线拟合, t 为放电结束后经历的时间,s。拟合结果的表达式为:

$$U_8 = -736.9e^{-0.0005581t} \quad (8)$$

$$U_9 = -737.1e^{-0.0005422t} \quad (9)$$

$$U_{10} = -723.1e^{-0.0005442t} \quad (10)$$

靠近绝缘子钢帽的第12个测点,表面电荷不容易积聚,且很快消散。至于其他离绝缘子钢帽较远的点,电压随时间衰减速度具有一致性。将试验结果和喷涂PRTV涂料的XHP-210型陶瓷悬式绝缘子对比,发现电晕后两种绝缘子表面静电电位基本相同,这是由于两种绝缘子表面是同一种PRTV涂料,对电荷积聚的影响相同。但是,两种绝缘子电位衰减的速度明显不同,前一种绝缘子表面电位经过1500 s就基本衰减完毕,但后一种绝缘子表面电荷要经过2300 s才会逐渐衰减完毕,电荷消散速率明

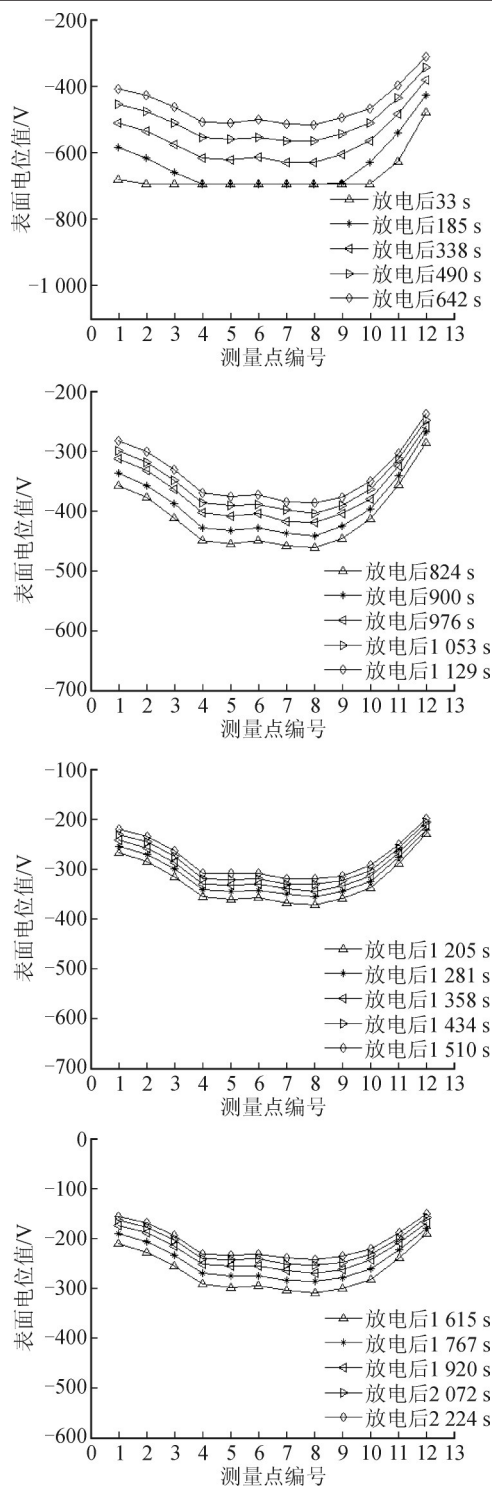


图10 电晕后涂PRTV涂料的LXHY-300玻璃绝缘子表面电位分布

Fig. 10 Surface potential distribution of LXHY-300 glass insulator coated with PRTV coating after corona

显要慢一些。两种绝缘子形状都是钟罩形的,不同之处在于绝缘子本身的材料,一种是陶瓷本体外面喷涂PRTV涂料,另一种是玻璃本体外面喷涂PRTV涂料,这由于陶瓷和玻璃本体的体积电阻率和表面电阻率有差别,导致两种绝缘子表面电荷的消散速率有明显的区别,也就导致了电位衰减速率的差异。

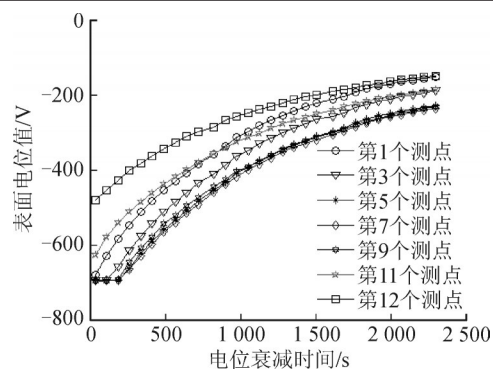


图11 涂PRTV涂料的LXHY-300玻璃绝缘子表面测量点表面静电电位随时间衰减曲线

Fig. 11 Electrostatic potential decay curve of measuring points on the surface of LXHY-300 glass insulator coated with PRTV

4 负极性电晕下双层喷涂PRTV涂料的绝缘子表面电位变化特性研究

实际工况中,绝缘子并不是单片应用于电力系统中的,而是多片相互连接构成绝缘子串,绝缘子串整体用于电力系统,起到支撑和绝缘作用。因此有必要进行试验研究存在双层悬式绝缘子时,上层绝缘子和下层绝缘子电位变化特性。选择喷涂PRTV涂料的XHP-210型陶瓷悬式绝缘子作为研究对象,将涂PRTV涂料的XHP-210陶瓷悬式绝缘子片按照工程实际悬挂情况两层,绝缘子悬挂两层的实物图见图12。球电极加压50 kV产生电晕,持续时间3 min,结束后等时间间隔测量绝缘子上下两层的电位分布和衰减情况,图形见图13。



图12 悬挂双层绝缘子实物图

Fig. 12 Physical drawings of suspended double insulators

对电位随时间的衰减趋势用单指数函数拟合,其中 U 的单位为V, t 的单位为s。对下层的绝缘子选择第1,5个测点拟合的函数,分别将电位值记为 U_1 、 U_2 :

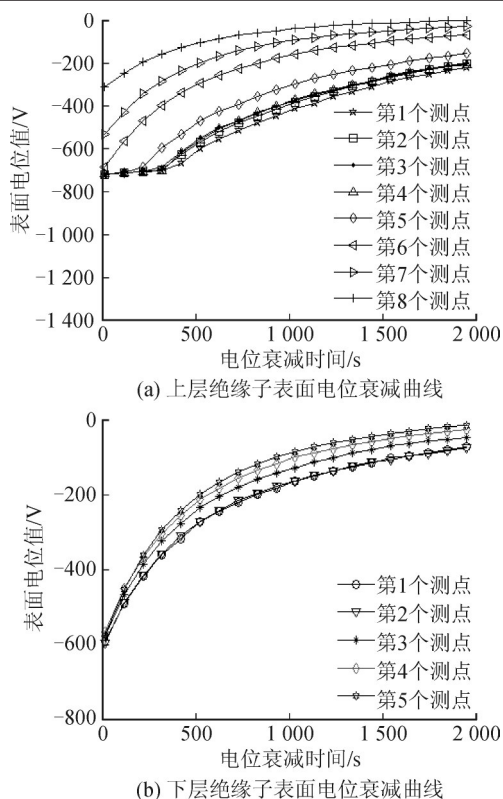


图13 上下层绝缘子表面电位衰减曲线

Fig. 13 Surface potential decay curve of upper and lower insulators

$$U_1 = -555.2e^{-0.001173t} \quad (11)$$

$$U_2 = -566.7e^{-0.001906t} \quad (12)$$

对上层的绝缘子选择第2,4,8个测点,分别将电位值记为 U_3 、 U_4 、 U_5 拟合的函数为:

$$U_3 = -791.1e^{-0.0006863t} \quad (13)$$

$$U_4 = -788.5e^{-0.000701t} \quad (14)$$

$$U_5 = -314.7e^{-0.002101t} \quad (15)$$

从图形和拟合曲线可以分析出,当悬挂双层绝缘子时,下层绝缘子表面也会积聚空间电荷,从而有静电电数值,但总体上层绝缘子的静电电位的绝对值会更大,电晕结束后下层绝缘子初始的表面静电电位的绝对值比上层绝缘子低大约17%,这是由于球电极加压时,上下两层绝缘子表面电场强度差异导致的。而由于上下层绝缘子材料相同,绝缘子表面电荷消散又是以体消散为主的,所以电荷消散趋势几乎相同,上下层绝缘子都要经过1500s,表面电荷才消散完毕。

5 结论

通过文中的研究,可得出以下结论:

1)玻璃绝缘子和陶瓷绝缘子表面都不容易积聚电荷,但喷涂PRTV涂料的玻璃和陶瓷绝缘子表面

都容易积聚电荷。工程中为了防止绝缘子积污,会在绝缘子表面喷涂PRTV涂料,这种做法可以抑制污闪,但也会带来绝缘子表面电荷积聚问题。

2)喷涂PRTV涂料的绝缘子,靠近绝缘子钢帽处的表面区域电荷难以积聚,静电电位较低,同时绝缘子边缘处的静电电位不如中间部分静电电位高,绝缘子表面静电电位分布呈现“勺子型”。远离钢帽处的绝缘子表面电位衰减曲线趋势几乎相同,近似为一个指数衰减,表面电荷消散途径主要为体传导消散,涂PRTV涂料绝缘子表面电荷积聚饱和时,表面静电电位的幅值为-700V左右。

3)绝缘子表面积聚电荷后,涂PRTV涂料的陶瓷绝缘子经过1500s表面电位衰减完毕,但涂PRTV涂料的玻璃绝缘子要经过2300s表面电位才会衰减完毕,这主要是由玻璃和陶瓷的表面电阻率和体积电阻率差距导致的。

4)当在负极性电晕下悬挂双层绝缘子时,下层绝缘子表面也会积聚空间电荷,电晕结束后下层绝缘子初始的表面静电电位的绝对值比上层绝缘子低大约17%,上层的静电电位值高一些。而由于上下层绝缘子材料相同,所以电荷消散趋势几乎相同。

参考文献:

- [1] 张文亮,郭剑,陆家榆,等.我国特高压直流电晕笼的结构参数与设计原则[J].中国电机工程学报,2009,29(28):1-5.
ZHANG Wenliang, GUO Jian, LU Jiayu, et al. Structure parameters and design principle of UHVDC corona cage in china[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(28): 1-5.
- [2] 刘阳,崔翔,卢铁兵,等.湿度对绞线正极性电晕电流脉冲及其无线电干扰影响的实验[J].电工技术学报,2015,30(3):79-89.
LIU Yang, CUI Xiang, LU Tiebing, et al. Experimental investigation of humidity impact on positive corona current pulse and its radio interference of stranded conductors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 79-89.
- [3] 陈勇,万启发,霍锋,等.1000kV交流输电线路导线的电晕特性[J].高电压技术,2007,33(11):43-45.
CHEN Yong, WAN Qifa, HUO Feng, et al. Corona characteristics of conductors for 1000 kV AC transmission lines [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(11): 43-45.
- [4] NAYSK S K, THOMAS M J. An integro-differential equation technique for the computation of radiated EMI due to corona on HV power transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 488-493.
- [5] 黄道春,阮江军,文武,等.特高压交流输电线路电磁

- 环境研究[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 6-11.
- HUANG Daochun, RUAN Jiangjun, WEN Wu, et al. Study on electromagnetic environment of UHV AC transmission lines[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 6-11.
- [6] IMANO A M. Accumulation of surface charges on the particle con-taminated spacer surface in compressed gas under impulse voltage stress[J]. Journal of Electrostatics, 2004, 61(1): 1-19.
- [7] WANG Qiang, ZHANG Guixin, WANG Xinxin, et al. Surface charge accumulation phenomenon at the gas-solid interface under DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 594-598.
- [8] FANG Z, FOURACRE R A, FARISH O. Investigations of surface charging of DC insulator spacers[C]//IEEE Conference on Electrical Insulation Dielectric Phenomena (CEIDP). San Francisco, USA: IEEE, 1996: 149-152.
- [9] KUMARA S, MA B, SERDYUK Y V, et al. Surface charge decay on HTV silicone rubber: Effect of material treatment by corona discharges[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(6): 2189-2195.
- [10] 高宇, 门业堃, 杜伯学, 等. 表面电荷对典型聚合物绝缘材料直流闪络电压的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1474-1480.
- GAO Yu, MEN Yekun, DU Boxue, et al. Effect of surface charge on DC flashover voltage of typical polymer insulating materials[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1474-1480.
- [11] KUMARA S, ALAM S, HOQUE I R, et al. DC flashover characteristics of a polymeric insulator in presence of surface charges[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(3): 1084-1090.
- [12] 王强, 张贵新, 王新新. 直流电压下气固交界面表面电荷积聚现象的实验分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 594-598.
- WANG Qiang, ZHANG Guixin, WANG Xinxin. Experimental analysis on the accumulation of surface charge on the surface of gas-solid interface under DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 594-598.
- [13] 王邸博, 唐炬, 刘凯. 直流高压下GIS支柱绝缘子表面电荷积聚特性[J]. 高电压技术, 2015, 41(9): 3073-3081.
- WANG Dibo, TANG Ju, LIU Kai. Surface charge accumulation characteristics of GIS post insulators under DC high pressure[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(9): 3073-3081.
- [14] 张贵新, 张博雅, 王强, 等. 高压直流GIL中盆式绝缘子表面电荷积聚与消散的实验研究[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1430-1436.
- ZHANG Guixin, ZHANG Boya, WANG Qiang, et al. Experimental study on surface charge accumulation and dissipation of basin insulators in high voltage DC GIL[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1430-1436.
- [15] 张博雅, 王强, 祁喆, 等. 直流电压下聚合物表面电荷测量方法及积聚特性[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(24): 6664-6676.
- ZHANG Boya, WANG Qiang, QI Zhe, et al. Measurement method and accumulation characteristics of polymer surface charge under DC voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(24): 6664-6676.
- [16] 韦晓星, 游传榜, 刘婉莹, 等. 换流站液体硅橡胶复合外套材料老化与性能恢复[J]. 电瓷避雷器, 2018(5): 145-149.
- WEI Xiaoxing, YOU Chuanbang, LIU Wanying, et al. Aging and property recovery of liquid silicone rubber composite coat material in converter station[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018(5): 145-149.
- [17] 李兴, 张骁萌, 石延辉, 等. 基于傅立叶变换红外光谱测试的硅橡胶老化分析[J]. 电瓷避雷器, 2019(5): 216-222.
- LI Xing, ZHANG Xiaomeng, SHI Yanhui, et al. Aging analysis of vulcanized silicone rubber based on fourier transform infrared spectroscopy[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(5): 216-222.
- [18] 孙磊, 吴文海, 柯坚, 等. 基于可见光图像的铁路接触网绝缘子污秽状况检测[J]. 电瓷避雷器, 2019(5): 240-244.
- SUN Lei, WU Wenhai, KE Jian, et al. Detection of contamination of railway catenary insulator based on visible light image[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(5): 240-244.
- [19] 杜轶, 蒋兴良, 林峰, 等. PRTV涂料对绝缘子串交流冰闪电压的影响[J]. 高压电器, 2008, 44(2): 135-138.
- DU Yuan, JIANG Xingliang, LIN Feng, et al. Effect of PRTV coating on AC flashover voltage of insulator strings[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(2): 135-138.
- [20] 冯宝, 王干军, 邓威. 喷涂PRTV涂料玻璃绝缘子串染污外绝缘特性研究[J]. 南方电网技术, 2014, 8(5): 42-46.
- FENG Bao, WANG Ganjun, DENG Wei. Study on characteristics of insulation coating glass insulator on polluted PRTV[J]. South Power Grid Technology, 2014, 8(5): 42-46.
- [21] 张真涛, 李思熹, 张凡奇. PRTV涂料防污闪应用及效果红外检测[J]. 河南电力技术, 2016(10): 47-50.
- ZHANG Zhentao, LI Sixi, ZHANG Fanqi. Application and infrared detection of anti fouling flash for PRTV coatings[J]. Henan Electric Power Technology, 2016(10): 47-50.
- [22] 吴光亚, 陈原, 张胜才, 等. 绝缘子用常温固化硅橡胶防污闪涂料的应用[J]. 电力设备, 2007(10): 22-26.
- WU Guangya, CHEN Yuan, ZHANG Shengcai, et al. Application of constant temperature solidified silicone rubber antifouling coating for insulators[J]. Power Equipment, 2007(10): 22-26.
- [23] 邢照亮, 茹佳胜, 黄印, 等. 直流电晕下环氧绝缘材料

- 步研究[J]. 高压电器, 2007, 43(6): 409-415.
- LI Xuefeng, HUANG Chengjun, QIAN Yong, et al. Preliminary investigation of trend analyzing method for partial discharge[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(6): 409-415.
- [20] 王晓蓉, 杨敏中, 严璋. 电力设备局部放电测量中抗干扰研究的现状和展望[J]. 电网技术, 2000, 24(6): 41-45.
- WANG Xiaorong, YANG Minzhong, YAN Zhang. Review and prospect of rejecting interference in partial discharge measurement of power equipment[J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 41-45.
- [21] 李天云, 杨梅, 周喜超, 等. 基于小波变换和数学形态学的局部放电信号分析方法[J]. 电网技术, 2007, 31(6): 56-60.
- LI Tianyun, YANG Mei, ZHOU Xichao, et al. Method of partial discharge signal analysis based on wavelet transform and mathematical morphology[J]. Power System Technology, 2007, 31(6): 56-60.
- [22] 黄建华, 桂峻峰, 陈锡阳, 等. 局部放电的极坐标谱图及模式识别[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 97-101.
- HUANG Jianhua, GUI Junfeng, CHEN Xiyang, et al. Polar spectrum of partial discharge and pattern recognition[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 97-101.
- [23] 郑重, 谈克雄, 高凯. 局部放电脉冲波形特性分析[J]. 高电压技术, 1999, 25(4): 15-17.
- ZHENG Zhong, TAN Kexiong, GAO Kai. Pulse shape characteristic analysis of partial discharge signals[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(4): 15-17.
- [24] 李军浩, 韩旭涛, 刘泽辉, 等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2583-2601.
- LI Junhao, HAN Xuntao, LIU Zehui, et al. Review on partial discharge measurement technology of electrical equipment[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2583-2601.
- 管兮远(1994—), 男, 硕士, 主要从事支柱绝缘子试验方法的研究工作(E-mail: 2581264251@qq.com).
- 梅红伟(1979—), 男, 博士, 讲师, 硕士生导师, 主要从事高电压与绝缘技术、输变电设备状态评估、流注放电理论等方面的研究工作(通信作者)(E-mail: mei.hongwei@sz.tsinghua.edu.cn).
- 王黎明(1963—), 男, 博士(后), 现主要从事高电压外绝缘、输变电设备电晕、电磁环境及电工新技术的研究。

(上接第 155 页)

- 的表面电荷特性[J]. 智能电网, 2016, 4(11): 1104-1108.
- XING Zhaoliang, RU Jiasheng, HUANG Yin, et al. Surface charge characteristics of epoxy insulating materials under DC corona[J]. Smart Grid, 2016, 4(11): 1104-1108.
- [24] 范玲. 输电线路喷涂 PRTV 涂料对提高绝缘子串污闪电压的效果分析[J]. 电子测试, 2016(3): 110-113.
- FAN Ling. Analysis of the effect of sprayed PRTV coatings on transmission lines to increase the flashover voltage of insulator strings[J]. Electronic Test, 2016(3): 110-113.
- [25] 张东东, 张志劲, 蒋兴良, 等. 典型悬式绝缘子风洞直流积污特性与分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(19): 4636-4645.
- ZHANG Dongdong, ZHANG Zhijin, JIANG Xingliang, et al. Characteristics and analysis of DC pollution in typical suspension insulators wind tunnel[J]. Journal of Electrical Technology, 2018, 33(19): 4636-4645.
- [26] 袁超, 唐梦颖, 赵凯强, 等. 可溶物成分对 XWP_2-70 绝缘子串污闪特性的影响[J]. 高压电器, 2016, 52(3): 118-122.
- YUAN Chao, TANG Mengying, ZHAO Kaiqiang, et al. Influence of soluble substance on the pollution flashover characteristics of XWP_2 - 70 insulator string[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(3): 118-122.
- 易凡(1995—), 男, 硕士, 研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail: yifan10101546@qq.com)。