

复合绝缘子耐电腐蚀特点及其电蚀老化区域性的差异

张福林¹, 王黎明², 陈虹丽³

(1. 保定电力修造厂, 河北 保定 071062; 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084;
3. 哈尔滨理工大学, 黑龙江 哈尔滨 150010)

The Characteristic of Electrical Corrosion-proof of Composite Insulators and Its Regional Difference of Electrical Corrosion Aging

ZHANG Fu-lin¹, WANG Li-ming², CHEN Hong-li³

(1. Baoding Power Equipment Works, Baoding 071062, China; 2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Harbin Technology and Industrial University, Harbin 150010, China)

摘要: 为了解复合绝缘子外绝缘材质电蚀老化状态和区域性的差异,对 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 耐电腐蚀机理、外绝缘材质中 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 颗粒分布状态和环境污湿因素的实际情况进行了研究。 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 颗粒分解成水蒸气、析出白色粉末状氧化铝,并催化生成二氧化碳,将使外绝缘材质逐渐微观减薄和加大表面的粗糙度,而引起电蚀老化的污湿环境因素,近期不可能得到改善,因此必然引起其电蚀老化出现区域性差异。此外,外绝缘憎水表面污珠场强变化引起的电晕也是促使电蚀老化的重要因素。
关键词: 复合绝缘子; 外绝缘材质; 耐电腐蚀; 电蚀老化; 区域性差异

中图分类号: TM862

文献标识码: A

Abstract: In order to know the electrical aging status of composite insulator and its regional difference, the electrical corrosion-proof mechanism of $\text{Al}(\text{OH})_3$, the particle distribution of $\text{Al}(\text{OH})_3$ in insulation materials and the factors of environmental contamination and humidity are studied in this article. $\text{Al}(\text{OH})_3$ will decompose into water and white powder of oxidized aluminum resulting in the thinning of insulation material and the roughening of surface. The environmental factors causing electrical corrosion such as contamination and humidity can not be improved in a short term, so the aging degree of electrical corrosion in different region will be different. In addition, the corona caused by water droplet in the hydrophobic surface is an important factor contributing to electrical corrosion.

Key words: composite insulator; external insulation material; electrical corrosion-proof; aging of electrical corrosion; regional difference

1 前言

复合绝缘子是新型结构的线路绝缘子,它特有

的防污闪性能和显而易见的优越性,打破了瓷绝缘子在线路领域内近百年的统治地位,已成为电力系统使用较多的绝缘子产品。复合绝缘子外绝缘材质的基材硅橡胶,除了具有良好的耐高低温、耐日光紫外线辐射、耐臭气、耐霉菌等性能外^[1],又由于它的材料结构强度经补强后可以提高几十倍,而弥补了强度低的弱点,完全可以满足结构机械性能的要求^[2]。其耐电蚀不高的缺点,虽然可经筛选 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 耐电腐蚀剂,以填充方式加以解决,但是因 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 特有的耐电腐蚀性能,使得长期在电场作用下的产品外绝缘表面在污湿环境下运行会直接涉及到电蚀老化问题。为此,笔者将就 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 在产品外绝缘材质填充分布特点,结合 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 颗粒耐电腐蚀过程中的物理化学变化状态,考虑到我国污湿环境气候实际情况,经理论分析和实践验证,找出产品外绝缘材质电蚀老化机理状态及其区域性电蚀老化的差异。同时也分析出产品外绝缘憎水表面污珠存在的场强变化对其绝缘表面影响的程度。

2 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 耐电腐蚀的机理

$\text{Al}(\text{OH})_3$ 又称氧化铝三水合物,是不易溶于水的两性氢氧化物。它是由硫酸铝溶液与氢氧化钠、碳酸钠或氨的作用,而得到白色凝胶颗粒状粉末。具有价格便宜、相容性好、无毒、不污染环境、易分散、稳定性好等特点,是国内外复合绝缘子外绝缘普遍采用的热塑性耐电腐蚀填充剂。 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的铝和氢氧根之间是离子键连接,而且所有氢氧根都是等价的。当填有 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的外绝缘表面出现电晕或爬电时,电晕或爬电的起弧点高温必然以热传递方式传递给 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 颗粒。当温度升至 220°C 以上时^[3], $\text{Al}(\text{OH})_3$ 颗粒将分解成 34.6%的水,析出白色粉末状氧化铝,

并吸收大量的热量而降低弧点所涉及材料表面的温度。同时分解出来的水又消耗弧点的热量而生成水蒸气,覆盖在材料表面,也起消弧降温作用。如果弧点高温直接作用到表面的硅氧烷分子,有可能促使硅氧烷分子侧链断裂而出现游离碳的残余物,这时 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 分解出来附着在表面起催化作用的白色粉末氧化铝,也促使水与其表面出现的碳的残余物发生反应,生成二氧化碳^[4],二氧化碳挥发也可以降低弧点高温,进一步电腐蚀材料表面,从而使 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 达到耐电腐蚀的目的。复合绝缘子外绝缘材质中的 $\text{Al}(\text{OH})_3$,以热分解水蒸气、析出附着在表面的白色粉末状氧化铝,及催化产生二氧化碳,来达到消弧作用的过程,属于化学反应变化不可逆转的消耗过程。这对定量填充 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 产品的外绝缘来说,随着电晕或爬电时间的延长,其 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 的消耗损失越严重。

3 外绝缘材质憎水表面污珠的电晕

复合绝缘子的防污性能是由外绝缘硅橡胶材质特有的憎水性和憎水迁移性决定的。大气污湿环境下的污液以凝集球状的水珠散落在外绝缘的憎水表面。在复合绝缘子运行过程中,沿着外绝缘表面方向分布的场强及空间结构的场强将直接作用在散落分布的污珠上,导致污珠场强有所改变。产品的空间结构场强作用在伞裙上、下表面的污珠上,只改变污珠顶点处的场强,对污珠四周的场强影响不大。而对杆径护套表面污珠的作用与外绝缘表面分布场强的作用类似,将改变污珠四周的场强。沿外绝缘表面方向分布的场强将增大污珠四周的场强,尤其是污珠边缘间的三重连接处。清华大学用 ANSYS 有限元软件计算绝缘子表面污珠的电场分布,细化求解,并通过与电压、电流及各种控制信号之间快速同步的高速数字摄影机的验证认为,该处的场强约为该部位初始分布场强的 2.5~4 倍,污珠数量增多时,污珠局部场强增加明显,甚至有可能达到该处初始分布场强的 4~8 倍。同时又结合紫外线观测仪,准确监测到复合绝缘子外绝缘表面污珠电晕起始场强应在 5 kV/cm (峰值)左右或稍小^[5]。据所掌握的国内外复合绝缘子端部场强的设计水平,在污湿环境下必然有相当部分外绝缘表面污珠出现电晕,而同时受产品空间场强和外绝缘表面方向分布的场强作用的护套表面污珠的电晕较为严重。此外,伞裙下表面污珠所具有的使其脱离表面的张力和本身的重力作用,促使污珠向球形趋势发展,由此在污湿环境下,污珠的电晕时间自然会长一些,电晕腐蚀表面更严重。据黑龙江牡丹江电业局、河北衡水供电局、浙江送变电公司等地区的现场多次反映,在污湿环境下运行的复合绝缘子,经常在杆塔下听见“吱…吱…”的声音,这就是

复合绝缘子外表面污珠电晕发出的声音。

4 外绝缘材质表面电腐蚀老化特点

复合绝缘子外绝缘材质中的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 是以机械压力强行填入胶料内,采用机械混练方式使表面以二维取向排列包裹粘附硅氧烷分子的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 颗粒^[3],在胶料内硅氧烷分子间随机性分布着,再经硫化,把胶料中硅氧烷分子交链成三维网状分子结构,使产品外绝缘形成整体。目前,国内外复合绝缘子基本上都选用 2 μm 粒径左右的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 作为外绝缘材质的耐电腐蚀剂。 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 颗粒在外绝缘材质所占的空间体积约为 40%。复合绝缘子在污湿环境下的运行过程中,外绝缘材质中随机分布的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 颗粒的化学分解是不可逆自耗性质的耐电腐过程。从微观角度来看,必然在外绝缘表面出现比网状硅氧烷分子断面直径大 2 000 多倍的电腐蚀痕迹,也损失了外绝缘表面层 40%的空间体积,破坏了外绝缘表面硅氧烷分子网状结构的完整性。随着表面电晕或电弧腐蚀时间的延长,相应表面深处的氢氧化铝颗粒起作用,这不但加大了表面电腐蚀的深度,而且还会涉及到不完整表面的硅氧烷分子网状结构。这时,热量使网状硅氧烷分子间吸引作用减弱,链间出现不可逆的位移,促使硅氧烷分子发生分解。当热分解的热能达到硅氧烷分子最低碳硅键的键合能时,硅氧烷分子侧链断裂,并逐渐促使硅氧烷分子裂解,破坏表面的不完整硅氧烷分子网状结构。如此不断地电腐蚀下去,必将在外绝缘厚度减小的同时,又因 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 颗粒随机性分散分布而加大了表面出现凹凸不平的程度。

5 外绝缘表面电蚀老化状况及危害

复合绝缘子在污湿环境下运行时,沿外绝缘表面出现的爬电电流、污珠电晕和高场强的金具端部污秽空气起晕,都将直接电腐蚀外绝缘材质表面,造成电蚀老化。对于沿表面出现的泄漏爬电腐蚀,因爬电距离长,在伞裙上、下表面引起的电流密度小,表面电腐蚀程度微弱,长时间才能显现出来。对于表面污珠电晕的电腐蚀,由于重力作用,在伞套各结构表面所凝集的污珠形态各异^[6],其电腐蚀程度有所不同。在伞裙下表面易形成不易浸润表面的球形污珠,其电晕时间长而引起表面电蚀腐蚀较为明显。贵州安顺地区运行 3 年多的复合绝缘子,其受日光直接照射的伞裙上表面虽然颜色变浅,但基本完好;而背光的伞裙下表面却都明显变白,并伴随表面粗糙度明显增大。广东佛山运行 5~6 年的复合绝缘子,在背光的伞裙下表面都呈现轻微的粉化性痕迹。北京地区运行近 10 年的各种电压等级的复合绝缘子,受

日光直接照射的伞裙上表面的颜色虽然没有明显改变,但所有背光的产品伞裙下表面颜色都明显变浅。这些都充分说明,运行的复合绝缘子伞裙下表面出现老化现象,其污珠电晕腐蚀起主要作用。同时也可以证明,运行的复合绝缘子外绝缘表面污珠电晕老化远远大于日光紫外线照射的老化程度。复合绝缘子的护套表面较易形成的球状污珠,在运行中的空间电场及表面爬电电场的双重作用下,污珠电晕腐蚀也较为明显。护套表面电蚀老化所出现的凹凸不平容易积污,这对爬电电流密度较大的护套表面,会出现局部发热现象。广东佛山运行5~6年的复合绝缘子局部护套部位温升有差别就是较明显的例子。长时间护套表面的电蚀老化会减小外绝缘厚度,这将危及保护芯棒的性能。浙江北绍线所使用的进口500 kV复合绝缘子就是因为护套电腐蚀而造成的事故。此外,金具端部的高场强引起污秽空气起晕的电蚀老化将更为严重。对定型金具端部来说,起晕场强主要取决于空气污湿度的变化,随着空气中污秽物浓度或湿度的加大,起晕场强越来越低,相应的电蚀表面时间越长。局部电蚀老化程度逐渐加深,破坏性越严重。天津电力局拆下的运行4~5年的220 kV复合绝缘子,在产品高压端的护套上出现颜色较深的电蚀现象;浙江兰窑线运行近4年的500 kV复合绝缘子,在产品高压端靠金具附近的护套上有明显电晕老化痕迹;江苏省苏州供电局在对变电站电气绝缘设备定期检查过程中,发现复合绝缘变电设备靠高压端的金具四周边缘部位有不同程度电晕腐蚀痕迹;浙江省从国外进口的多台复合绝缘设备就是因靠金属端部四周绝缘表面发生较深电蚀老化损坏而退出运行的。

6 外绝缘表面电蚀老化区域性的差异

复合绝缘子运行过程中外绝缘所出现的电蚀老化,既有 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 颗粒自耗性耐电蚀过程的固有问題,又有大气下污湿的直接原因。 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 耐电蚀过程是导致外绝缘材质电蚀老化最关键的、也是最根本的原因。如以增量来提高外绝缘耐电蚀老化性能,从理论上分析是可行的,但实际上因受外绝缘材质的综合性能指标及填充混练工艺的限制,不可能有太大的改变。引起电蚀老化的污秽物和区域

性湿度将直接影响到产品外绝缘老化的差异。

我国长江以南大部分地域,常年空气湿度较高。复合绝缘子长年在这种污湿环境下运行,其绝缘表面电蚀老化程度必然比其它地区的产品严重。笔者曾对一种配方相同的混练工艺生产的复合绝缘子进行过观察,在长江以南地区运行3年产品的表面电蚀比在华北地区运行10年的产品要严重的多,这说明复合绝缘子电蚀老化有区域性的差别。这种差别只是电蚀老化程度的区别,不能认为复合绝缘子在潮湿地区不能使用。因此,有必要尽快研究出新的外绝缘材质耐电蚀填充剂,以延长这些地区运行的复合绝缘子的电蚀老化寿命。

7 结语

(1) $\text{Al}(\text{OH})_3$ 是以热分解水蒸气,析出白色粉末状氧化铝,并催化生成二氧化碳的自耗过程来达到耐电蚀的目的。

(2)复合绝缘子憎水表面的污珠在电场作用下产生电晕,腐蚀材料表面。

(3)约占40%空间体积的随机分布的 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 颗粒,其自耗性质的耐电蚀过程,将不断使绝缘厚度减小,并加大表面出现凹凸不平的程度。

(4)在污湿环境中,污珠电晕腐蚀对外绝缘表面电蚀老化起主要作用。

(5)复合绝缘子表面电蚀老化有区域性的差异。

参考文献:

- [1] 张福林. 硅橡胶合成绝缘子外绝缘抗老化性能综述 [J]. 中国电力, 1996(6):42-45.
- [2] 张福林. 合成绝缘子外绝缘表面抗撕裂强度性能的研究 [J]. 华北电力技术, 1996(12):17-20.
- [3] 梁星宇, 王梦蛟. 橡胶手册 [M]. 北京: 化学工业出版社, 1992.
- [4] 谢 丰. 低电压常用塑料耐漏电起痕性能试验研究 [J]. 低压电器, 1991(3): 7-9.
- [5] 王绍武. 污秽地区有机外绝缘特性的研究 [D]. 清华大学博士学位论文, 2001.
- [6] 张福林. 复合绝缘子伞套绝缘结构表面憎水性能特点分析 [J]. 电瓷避雷器, 2002(2): 3-5.

作者简介:张福林(1943-),男,黑龙江省哈尔滨市人,教授级高级工程师,从事复合绝缘子工艺研究和复合绝缘子系列产品的开发工作。

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!