

PRTV 涂料对绝缘子串交流冰闪电压的影响

杜 轶¹, 蒋兴良¹, 林 峰², 胡建林¹, 张志劲¹, 卢 杰¹

(1. 重庆大学高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400030; 2. 湖南省电力公司, 湖南 长沙 410007)

摘要: PRTV 涂料具有良好的防污闪性能,但用于防覆冰闪络方面,国内外的相关研究还鲜有报道。根据人工气候室的试验结果,笔者分析了在覆冰期、融冰期覆冰水电导率和串长对涂有 PRTV 绝缘子串的覆冰闪络电压的影响。通过对涂有和未涂 PRTV 两种形式绝缘子串的覆冰闪络特性的分析,得出 PRTV 对于提高覆冰绝缘子闪络电压没有效果,涂 PRTV 的绝缘子串其冰闪电压约降低 10%~15%;PRTV 涂层的憎水性引起绝缘子表面覆冰状态发生变化,使得冰层与涂料表面粘附不紧密,内部存在许多微小气隙,容易产生局部放电和局部电弧,从而损坏 PRTV 涂层,导致绝缘子串泄漏电流增大。

关键词: PRTV; 覆冰; 闪络; 憎水性

中图分类号: TM852

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)02-0135-04

Effect of PRTV Coating on AC Flashover Voltage of Ice-covered Insulator Strings

DU Yuan¹, JIANG Xing-liang¹, LIN Feng², HU Jian-lin¹, ZHANG Zhi-jin¹, LU Jie¹

(1. The Key Laboratory of High Voltage and Electrical New Technology of Ministry of Education, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. Hunan Electric Power Corporation, Changsha 410007, China)

Abstract: The PRTV coating material has perfect performance of anti-pollution flashover, but for the anti-icing flashover, the research in domestic and abroad have also reported fresh. According to the test results obtained from the artificial climate chamber, the author analyzed the effects of icing-water conductivity and string length on AC flashover performance of a insulator string coated with PRTV during icing and melting regime. Comparing the insulators with or without PRTV coating, the test results show that PRTV coating material exerts no effect on increasing flashover voltage of iced insulators, and the flashover voltage of insulator strings with PRTV coating decreases by about 10%~15%. The hydrophilicity of PRTV layer changes the ice status of insulator string surface, and creates many minute airspaces in the ice layer. These airspaces are inclined to cause partial discharge and damage PRTV layer, hence to increase the leakage current of insulators.

Key words: PRTV; icing; flashover; hydrophobicity

0 引言

输电线路覆冰严重危害电网的安全运行^[1],造成了巨大经济损失。特别是 2005 年初,华中电网发生大面积冰闪事故以后,运行部门急需有一种切实可行的方法来防止绝缘子冰闪事故的发生。

覆冰降低了绝缘子的电气性能^[2],严重覆冰时其最低闪络电压比湿闪电压约低 60%^[3-5],且冰闪电压受绝缘子结构的影响不明显^[6-8]。延长冰凌桥接时间、阻隔融冰水形成闪络通道、减小泄漏电流是提高覆冰绝缘子串冰闪电压的有效方法之一^[9]。

在绝缘子表面涂覆憎水涂料可显著提高绝缘子的耐污闪能力,在相同盐密值下室温硫化硅橡胶涂料绝缘子的污闪电压是无涂料绝缘子的 2.1 倍^[10]。基于覆冰是一种特殊的污秽形式,国内工程应用部门试图采用持久性就地成型防污闪复合涂料(PRTV)涂

料来提高绝缘子串的冰闪电压,但目前国内外对此研究甚少。因此,笔者在人工气候室进行了大量的试验研究,分析、比较了 PRTV 涂料对绝缘子串冰闪电压的影响,为今后的工程应用和进一步研究提供参考。

1 试验装置、试品及试验方法

1.1 试验装置和试品

试验在直径 ϕ 为 7.8 m、高 H 为 11.6 m 的人工气候试验室进行,其最低温度可达 (-45 ± 1) ,可模拟不同条件下的覆冰状况。试验电压由 500kV/2000kV·A 污秽试验变压器提供,额定电流为 4 A,最大短路电流为 75 A,符合 IEC 标准对污秽试验电源的要求^[11],试验原理接线见文^[12]。试验电压从装在人工气候室一侧的 330 kV 穿墙瓷套管引入,电压采用精度为 2%的交流电容分压器测量。

试品采用 FC-100/146 玻璃绝缘子,其结构形状见图 1,绝缘子爬电距离 L 为 320 mm。涂料采用

收稿日期: 2007-04-12; 修回日期: 2007-12-28

作者简介: 杜 轶(1973-),男,硕士研究生,从事高电压与绝缘技术研究。

PRTV, 其基本性能指标满足现有 RTV 涂料的有关标准。笔者采用涂有和未涂 PRTV 的等串长 FC 100/146 玻璃绝缘子串进行对比试验。

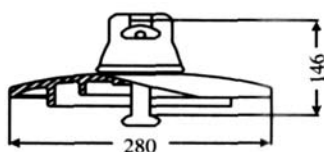


图1 试品绝缘子结构图

1.2 试验方法及过程

覆冰是一种特殊形式的污秽^[1], 但与绝缘子常规污染存在一定差异。覆冰绝缘子染污包括: 覆冰前绝缘子已经染污; 覆冰过程中染污。因此, 人工覆冰试验中绝缘子染污可采用固体涂层法^[13]和覆冰水电导率法。笔者试验模拟覆冰过程中染污, 即采用覆冰水电导率法来进行试验, 覆冰水电导率分别为 75、200、340 $\mu\text{S}/\text{m}$ (20 °C), 绝缘子为垂直布置方式, 覆冰类型为雨淞, 平均每片绝缘子的冰重为 1.1 ~ 1.2 kg, 即绝缘子已严重覆冰。为使覆冰条件相同, 试验数据具有可比性, 笔者用一水平放置在覆冰区域内的匀速转动 (1 转/min) 铜管 ($\phi 28 \text{ mm}$) 监测覆冰状态, 当铜管表面冰厚达到 10 mm 时停止覆冰。

试验分覆冰期和融冰期两个阶段进行, 覆冰期试验的原则是使绝缘子试验尽可能接近现场的冻雨条件, 闪络期间温度保持在覆冰期的温度, 相邻二次闪络间隔 3 ~ 5 min, 使上次闪络过程中形成的水膜有足够的时间冻结^[11]。融冰期试验则是在绝缘子表面覆冰达到预定要求后, 停止喷雾并继续冷冻约 15 min, 然后打开人工气候室门, 放进暖空气使冰层按要求的速度逐渐融化, 达到预定要求时即可开始加压, 相邻 2 次闪络试验的时间间隔约为 3 ~ 5 min。

笔者采用 50% 闪络电压作为特征量, 即当绝缘子串覆冰达到预定要求后, 停止喷雾, 控制环境温度, 试验准备完毕后立即采用均匀升压法连续对其进行共计 N 次闪络试验, 舍弃与平均值误差大于 10% 的 M 次试验结果, 取 (N - M) 次有效闪络电压的算术平均值作为试品的 50% 闪络电压, 并求取其标准偏差 σ , 即

$$U_{50} = \sum_{j=1}^L \frac{1}{N-M} \sum_{i=1}^{N-M} U_{fi}(j) \quad (1)$$

式中 U_{fi} 是第 i 次闪络试验电压; j 为试品绝缘子串编号, 共试验 L 串, (N - M) 不小于 5 次, L 不小于 5。

2 试验结果及分析

2.1 覆冰期和融冰期绝缘子的闪络特性

在覆冰水电导率 γ_{20} 为 340 $\mu\text{S}/\text{m}$ 时, 对两种绝缘子串分别进行了覆冰期和融冰期试验, 200、75 $\mu\text{S}/\text{m}$ 时只进行了融冰期试验, 其中 75 $\mu\text{S}/\text{m}$ 时只试验了

7、13 两种串长。得出的 50% 闪络电压与串长的关系见图 2。

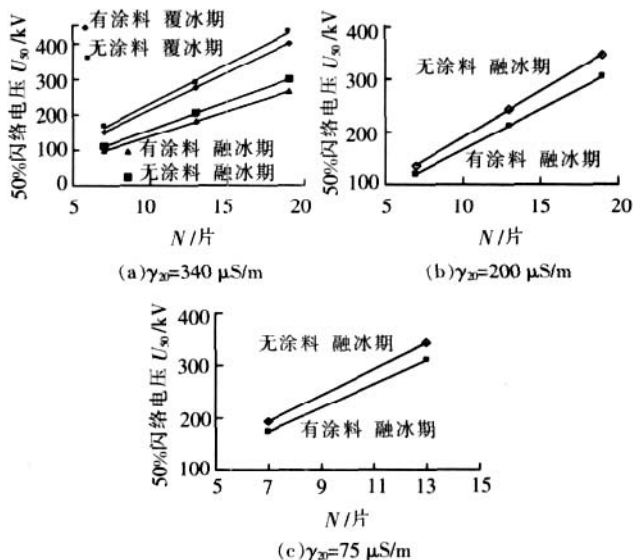


图2 覆冰绝缘子串 U_{50} 与串长的关系

由图 2 可看出:

(1) 无论是覆冰期还是融冰期, 无论是涂有 PRTV 的绝缘子串还是没有涂 PRTV 的绝缘子串, 其冰闪电压与串长基本呈线性关系。

(2) $\gamma_{20}=340 \mu\text{S}/\text{m}$ 时, 对于普通串, 在相同覆冰条件下, 覆冰期的闪络电压比融冰期高。串长为 7、13、19 片时, 覆冰期比融冰期的闪络电压分别高出 51.2%、42.1%、45.5%。对于有 PRTV 的绝缘子串, 在相同覆冰条件下, 覆冰期的闪络电压也比融冰期高。串长为 7、13、19 片时, 覆冰期比融冰期的闪络电压分别高 54.7%、52.3%、51.5%。

(3) 在相同覆冰条件下, 普通串的闪络电压比有 PRTV 的闪络电压高。 $\gamma_{20}=340 \mu\text{S}/\text{m}$ (见图 2(a)), 覆冰期绝缘子串片数分别为 7、13、19 片时, 普通串闪络电压比有 PRTV 的分别高 10.5%、5.4%、8.5%。在融冰期, 普通串的闪络电压比有 PRTV 的闪络电压分别高 13.1%、12.9%、13.0%。在融冰期, 当串长为 7、13、19 片且 $\gamma_{20}=200 \mu\text{S}/\text{m}$ 时 (见图 2(b)), 普通串的闪络电压仍然比有 PRTV 的高 12.9%、14.3%、13.9%; 当串长为 7、13 片且 $\gamma_{20}=75 \mu\text{S}/\text{m}$ 时 (见图 2(c)), 普通串的闪络电压也比涂有 PRTV 的高 11%、10.9%。

由试验结果拟合可得: $\gamma_{20}=340 \mu\text{S}/\text{m}$ 时覆冰绝缘子闪络电压与串长 N 的关系为

$$U = aN + b \quad (2)$$

式 (2) 中 a 为与覆冰量、绝缘子结构、污秽程度等有关的常数, 见表 1。

从表 1 可知, 无论是覆冰期还是融冰期, 当覆冰量相同, 串中各绝缘子伞裙空气间隙全部被冰凌桥接后, 除高压端第 1 片下表面外, 其他绝缘子的电位分布基本按电阻分布, 因此, 两种覆冰绝缘子串的闪

表1 $\gamma_{20}=340 \mu\text{S}/\text{m}$ 时的 a, b 值

绝缘子串	状态	a	b
无 PRTV	覆冰期	22.3	8.0
有 PRTV		20.8	6.0
无 PRTV	融冰期	15.7	0.9
有 PRTV		13.9	0.7

络电压与串长基本呈线性关系。

在覆冰期,普通串的平均闪络电压为 22.3kV/片, PRTV 串的平均闪络电压为 20.8kV/片,即普通串比 PRTV 串的每片闪络电压约高 7.2%。

在融冰期,普通串的平均闪络电压为 15.7kV/片,而 PRTV 串的平均闪络电压为 13.9kV/片,即普通串比 PRTV 串的单片闪络电压约高 12.9%。可见,相比覆冰期而言,在融冰期,涂有 PRTV 的绝缘子每片闪络电压下降的更多一些。

再由式(2)拟合 $\gamma_{20}=200 \mu\text{S}/\text{m}$ 时融冰期的闪络电压与串长 N 的关系,可得相应的 a, b 值见表 2。

表2 $\gamma_{20}=200 \mu\text{S}/\text{m}$ 时的 a, b 值

绝缘子串	状态	a	b
无 PRTV	融冰期	17.6	13.3
有 PRTV		15.3	12.9

由表 2 可知: $\gamma_{20}=200 \mu\text{S}/\text{m}$ 时,在融冰期,普通串平均每片的闪络电压为 17.6kV,比 PRTV 串 15.3kV/片高出了 15%。

2.2 闪络电压与覆冰水电导率的关系

研究结果还表明,覆冰水电导率与冰闪特性有直接关系,随着冰水电导率的增加,绝缘子的冰闪电压将下降,两者之间的关系可用式(3)进行表示

$$U=A \gamma^{-n} \quad (3)$$

式中 A 为常数, γ 为覆冰水电导率, $\mu\text{S}/\text{m}$; n 为覆冰水电导率影响特征指数。

串长为 7、13 片的两种绝缘子串融冰期闪络电压与覆冰水电导率的关系见图 3,用式(3)对图中曲线进行拟合,得到 A、n 值见表 3。

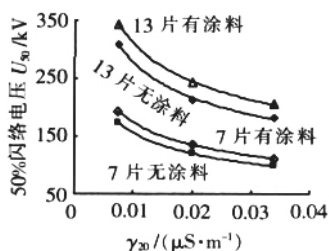


图3 闪络电压与覆冰水电导率的关系

表3 拟合所得的 A、n 值

绝缘子形式	串长	A	n
无 PRTV	7片	32.12	0.367
有 PRTV	7片	27.17	0.379
无 PRTV	13片	64.12	0.342
有 PRTV	13片	53.69	0.356

由图 3 和表 3 可知:

(1) 覆冰绝缘子串闪络电压与覆冰水电导率呈负的幂指数关系,覆冰水电导率的影响特征指数 n 与绝缘子类型、串长等有关系。

(2) 覆冰水电导率对不同材料覆冰绝缘子串闪络电压的影响是不同的。在同等条件下, n 值越大,则覆冰水电导率的影响就越大。因此,对于同等串长的两种覆冰绝缘子串,有 PRTV 的闪络电压受覆冰水电导率的影响比普通串的要大。

3 PRTV 涂料对覆冰及闪络过程的影响

3.1 对覆冰过程的影响

在覆冰开始 1~2h 内,由于其憎水性的作用,过冷却水滴不易附着在有 PRTV 的绝缘子上,覆冰速度较未涂 PRTV 的慢,在涂料表面形成颗粒状的不连续冰层,与涂料表面粘结的也不如玻璃表面紧密,存在极微小的气隙,并且过冷却水滴易于流向伞裙边缘冻结成冰凌,即对于覆冰开始阶段,覆冰时间较短的情况下 PRTV 对于减少覆冰和延缓覆冰有一定的作用。

但也是由于 PRTV 具有憎水性,覆冰 2h 以后, PRTV 绝缘子表面被这种多气隙的颗粒状冰覆盖,增加了绝缘子表面的粗糙度,从而更容易捕获水滴和阻滞水滴的流失,加速了覆冰的形成,而普通玻璃绝缘子表面冰层却比较光滑,见图 4,并且与玻璃表面粘结的紧密。因此,覆冰时间较长后,观察到两种绝缘子串的覆冰总量已无明显差异。



图4 两种绝缘子串覆冰状态

3.2 对冰闪电压的影响

从冰闪特性看,无论是在覆冰期、融冰期,还是在不同覆冰水电导率和不同串长下,涂有 PRTV 绝缘子串的闪络电压均低于同等情况下的无涂料绝缘子串,这与覆冰过程是有密切关系的。因为在涂有 PRTV 的绝缘子串表面形成的多气隙颗粒状冰层中,微小气隙将承受较高的电压,从而使气隙产生局部放电,产生的局部电弧融化了冰层,使绝缘子串的泄漏电流增大,并且局部电弧沿绝缘子表面与冰层之间发展比较明显。同时,局部电弧又易被融冰水熄灭,融冰水在冰层内部改变了表面电压分布,又可能引起其它区域产生局部电弧,如此反复,很容易烧伤 PRTV 涂层,见图 5。绝缘子串的高压端表层烧伤比中间部分严重很多,因为高压端承受的电压要比中



(a) 高压端 (b) 中间部分

图 5 PRTV 涂料表面烧伤情况

间大很多,更容易产生局部放电。

在覆冰期,绝缘子表面的冰层处于冻结状态,虽然冰凌桥接但泄漏电流不大,因而绝缘子串覆冰期的冰闪电压相对融冰期要高。涂有 PRTV 的绝缘子串冰闪电压的降低程度比融冰期时要小一些。这是因为在融冰期,绝缘子表面有高电导率的融冰水存在,引起泄漏电流增大,加上冰层内部又容易产生局部放电,使涂有 PRTV 的绝缘子串更容易从内部形成放电途径,使得其泄漏电流更大,因而其冰闪电压也比覆冰期时降低得更快。

因此,PRTV 涂层的憎水性引起覆冰状态的改变,使得冰层内部易于产生局部放电是 PRTV 涂料绝缘子串冰闪电压降低的主要原因。

4 结论

(1) PRTV 涂料具有良好的憎水性,对于防污闪有一定作用,但在覆冰条件下,对提高覆冰绝缘子串的冰闪电压没有效果。

(2) 在同等覆冰环境条件下,涂有 PRTV 的绝缘子串的冰闪电压低于未涂时的情况,其降低的比例约为 10%。

(3) PRTV 涂料的憎水性使覆冰后冰层内部存在大量微小的气隙,容易产生局部放电,从而烧坏 PRTV 涂层,使其丧失憎水性。因此,在重冰区应慎用 PRTV 涂料。

参考文献:

[1] 蒋兴良, 易 辉. 输电线路覆冰及防护 [M]. 北京: 中国电力

出版社, 2002.

- [2] PHAN C L. Accumulation Du Verglas Sur Les Nouveaux Types D Isolateurs Sous Haute Tension [J]. Canadian Electrical Engineering Journal, 1977: 2(4): 24-28
- [3] 蒋兴良, 舒立春. 覆冰绝缘子长串交流闪络特性和放电过程研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 7(14): 128-132.
- [4] KHALIFA M M, MORRIS R M. Performance of Line Insulators Under Rime Ice [J]. IEEE Trans. on Power Application and systems, Vol. PAS-86, 1967: 692-698
- [5] 苑吉河, 蒋兴良, 张志劲, 等. 低气压下 3 种覆冰支柱绝缘子直流闪络特性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 12-15.
- [6] 孙才新, 舒立春, 蒋兴良, 等. 高海拔、污秽、覆冰环境条件下超高压线路绝缘子交直流放电特性及闪络电压校正研究[J]. 中国电机工程学报, 2002: 22(11): 115-120.
- [7] SUN Cai-xin, JIANG Xing-liang. Study of Flashover Performance and Voltage Correction of DC Insulator in Icing Districts of Altitude of 2 500 m and Below [C]// International Conference on Power System Technology Proceedings. Yunnan Science and Technology Press, 2002: 251-257.
- [8] S Cai-xin, J Xing-liang, S Wen-xia, et al. Study of Flashover Performance and Voltage Correction of DC Insulator in Icing Districts of Altitude of 2 500 m and Below [C]// AWAIIS, 2002: 149-154.
- [9] 蒋兴良, 武利会, 司马文霞, 等. 低气压下 XZP/XZWP4-160 直流绝缘子覆冰闪络特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 111-115.
- [10] 关志成, 贾志东. RTV 硅橡胶涂层耐污闪性能及憎水迁移特性[J]. 高电压技术, 1990, 19(4): 22-28.
- [11] FARZANEH M, BAKER T. Insulator Icing Test Methods and Procedures - a Position Paper Prepared by the IEEE Task Force on Insulator Icing Test Methods [J]. IEEE Trans. Power Delivery, 2003, (18) 14: 1 503-1 515.
- [12] 蒋兴良, 孙才新. 10 kV 合成绝缘子覆冰交流闪络特性及冰闪过程的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 58-61.
- [13] GB/T 4585.2-1991. 交流系统用高压绝缘子人工污秽试验方法-固体层法[S].

(上接第 134 页)

流波形图和放电发光图上比较了他们的差异。可以看出, 3 种电极结构下 DBD 均为丝状放电, 但细丝形状各不相同。柱-板电极 DBD 中, 随柱电极曲率半径的增大, 正负半周起始放电电压增大。最后从放电机理角度对实验结果作了讨论。

参考文献:

[1] KOGELSCHATZ U. Dielectric-barrier Discharge: their History, Discharge Physics, and Industrial Application [J]. Plasma

Chemistry and Plasma Processing, 2003, 23(1): 1-46.

- [2] MA H, QIU Y. A Study of Ozone Synthesis in Coaxial Cylinder Pulse Streamer Corona Discharge Reactors [J]. Ozone Science and Technology, 2003, 25(1): 127-135.
- [3] 孙岩洲, 石兴民, 王 辉. 介质阻挡放电杀灭枯草杆菌芽孢的电镜观察[J]. 高压电器, 2005, 41(1): 10-11.
- [4] 方 志. 大气压辉光放电及其在材料表面改性中的应用[D]. 西安: 西安交通大学, 2005.
- [5] 邱毓昌, 张文元, 施 围. 高电压工程 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1995.