

工作电压下 110kV 交流绝缘子串覆冰特性研究

张志劲, 蒋兴良, 马俊, 胡建林, 梁瑜

(重庆大学高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆市沙坪坝区 400044)

Study on Icing Performance of 110kV Insulator Strings at AC Service Voltage

ZHANG Zhi-jin, JIANG Xing-liang, MA Jun, HU Jian-lin, LIANG Yu

(Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology, Ministry of Education, Chongqing University, Shapingba District, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: Insulators' icing is one of the severe problems for external insulation of transmission lines and there are a lot of reports about power outages caused by flashover of the ice-covered insulators from all over the world. Therefore, it is very significant to investigate the icing process and the icing performances of insulators. Experiment investigations are carried out on 110kV composite insulators and 7 units of IEC standard suspension porcelain insulator string as well as 7 units of XWP-160 anti-pollution porcelain insulator string energized with 64kV voltages in the artificial climate chamber of Chongqing University. Based on the test results, it puts forward that there are evidence difference in ice status between the energized insulator strings and the non-energized ones. The energized insulators at the high voltage end are hard to be bridged by icicles and the ice density accreted on energized insulator string is lower than that of non-energized ones. It also shows that the electric strength, the material, type, structure of insulators and the water conductivity may influence the ice density.

KEY WORDS: Insulator; Icing; AC electrical field

摘要: 绝缘子覆冰严重威胁输电线路的安全运行。国内外已有许多关于绝缘子覆冰闪络导致电力系统故障的报道,对绝缘子覆冰过程及其特性开展深入研究具有重要意义。文中在人工气候室模拟自然覆冰条件,对7片XP-70、XWP-160瓷绝缘子串和FXBW₄-110/100合成绝缘子在运行电压(相对地电压64kV)下和不带电情况下的覆冰特性进行了试验研究。分析了带电和不带电对绝缘子覆冰的影响和差异,结果表明:带电与不带电条件下绝缘子覆冰状况有差异,带电覆冰下绝缘子高压端不易被冰棱桥接,绝缘子带电时覆冰密度比不带电时覆冰密度小,且带电时绝缘子表面覆冰多呈松

针状。绝缘子覆冰密度与电场强度、绝缘子材料、结构、形状、覆冰水电导率等有关。

关键词: 绝缘子; 覆冰; 交流电场

1 引言

绝缘子覆冰是输电线路的严重自然灾害之一,引发的事故严重危害了电网的安全运行。自1932年美国首次出现输电线路覆冰事故^[1]以来,各国的输电线路冰害事故不断发生,1998年1月发生在加拿大的冰灾事故造成了包括735kV线路杆塔在内的各电压等级线路1000多基铁塔和30000基木杆倒塌,累计170余万人中断供电达一周,仅魁北克省的直接经济损失就达10亿加元,间接损失超过30亿加元。我国自1954年首次记录到输电线路覆冰事故至今^[2-3],覆冰事故也不断发生,据不完全统计:1987~1994年,华中电网发生重大覆冰事故9次,经济损失过亿元,而近几年重大冰灾事故愈演愈烈,如2001年2月河南省220kV输电线路发生大面积覆冰倒杆和绝缘子覆冰闪络事故,河南省电网几乎瓦解;2004年12月下旬,华中电网在湖南、湖北发生大面积输电线路覆冰闪络、舞动事故,仅500kV线路于2004年12月21日~28日就发生冰闪34次;2005年2月,湖北、湖南、江西、河南、重庆、贵州等地的电网设施出现严重覆冰现象,导致高压输电线路杆塔多处倒塔、线路频繁跳闸,电网结构遭到严重破坏,电网安全受到威胁,受灾损失严重。随着“西电东送、南北互供、全国联网”电力发展战略的实施和1000kV交流特高压、±800kV直流特高压输电线路的建设,覆冰问题将成为影响高压、超特高压输电线路安全运行的严重

基金项目: 国家自然科学基金项目(90210026, 50577070)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(90210026,50577070).

隐患之一，开展覆冰研究将成为保证电网安全运行的亟待解决的关键技术之一。

20 世纪 50 年代以来，输电线路覆冰严重的俄罗斯、加拿大、美国、日本、英国、芬兰、冰岛等国家相继投入技术力量对其进行长期观测和研究，探索输电线路覆冰的机理、形成的条件、覆冰绝缘子串的闪络特性等^[2-10]。我国自 20 世纪 70 年代以来，许多科研机构、高等院校、电力公司也对覆冰绝缘子串的闪络特性进行了试验研究，并取得了显著的成果^[2-3,11-17]，为覆冰地区输电线路外绝缘设计提供了参考。但由于试验条件的限制，目前国内外的研究大多是在不带电情况下进行的，没有考虑到电场对绝缘子覆冰及其电气性能的影响。因此，现有的研究成果在指导工程设计和运行上有一定的局限性。本文在人工气候室模拟自然覆冰条件对 7 片串 XP-70 和 XWP-160 瓷绝缘子以及 FXBW₄-110/100 合成绝缘子的覆冰特性进行了试验研究，分析了带电与不带电情况下绝缘子覆冰特性的异同，希望其研究结果对覆冰地区输电线路外绝缘的设计有一定的参考作用。

2 试验装置及试品

2.1 试验装置

试验是在直径 7.8 m、高 11.6 m 的人工气候室进行的，其温度 t 可降低到 -45°C ，气压 P 可达 30kPa。由 500kV/2000kVA 变压器提供试验电源，试验原理接线见文献[12-16]。

2.2 试品

试品为 XP-70 普通悬式瓷绝缘子、XWP-160 防污绝缘子和 FXBW₄-110/100 合成绝缘子。其技术参数见表 1。

表 1 试品技术参数

Tab.1 The configuration of tested insulators

绝缘子 型式	结构高度 H/mm	最小电弧距 离 h/mm	爬电距离 L/mm	伞裙直径 D/mm
XP-70	255	146	295	255
XWP-160	148	155	400	255
FXBW ₄ -110/100	1400	1150	3300	107*/145**

注：*为小伞裙直径，**为大伞裙直径。

2.3 试验方法

试验时覆冰水电导率分别为 77、220、320、480 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (20°C)，覆冰过程中喷雾量为 5L/min，雾滴的直径在 20~120 μm 之间，覆冰温度为 -5°C ，带电和带电时的覆冰条件一致，带电覆冰时绝缘子串施加交流电压 64kV (7 片串绝缘子)。带电和

不带电绝缘子同时覆冰，其间隔为 600mm。

试验过程中，每隔 1h 暂停 15min，退去试验电压对绝缘子的覆冰情况进行测量和记录，整个覆冰过程为 5h。覆冰完毕后先将电压退去，照相后再进行覆冰状态的比较研究。覆冰密度的测量采取排液法^[2]。

3 试验结果及分析

3.1 带电覆冰对绝缘子覆冰状况的影响

带电 (交流 64kV) 和带电情况下 7 片串 XP-70、XWP-160 和 110kV 合成绝缘子覆冰的形状、增长过程如图 1、2 所示，由图可知：

(1) 随着覆冰时间延长，带电和带电覆冰的绝缘子表面覆冰均逐渐增长，当覆冰时间较短时，带电覆冰时绝缘子表面的冰呈颗粒状，不带电覆冰的绝缘子表面光滑。

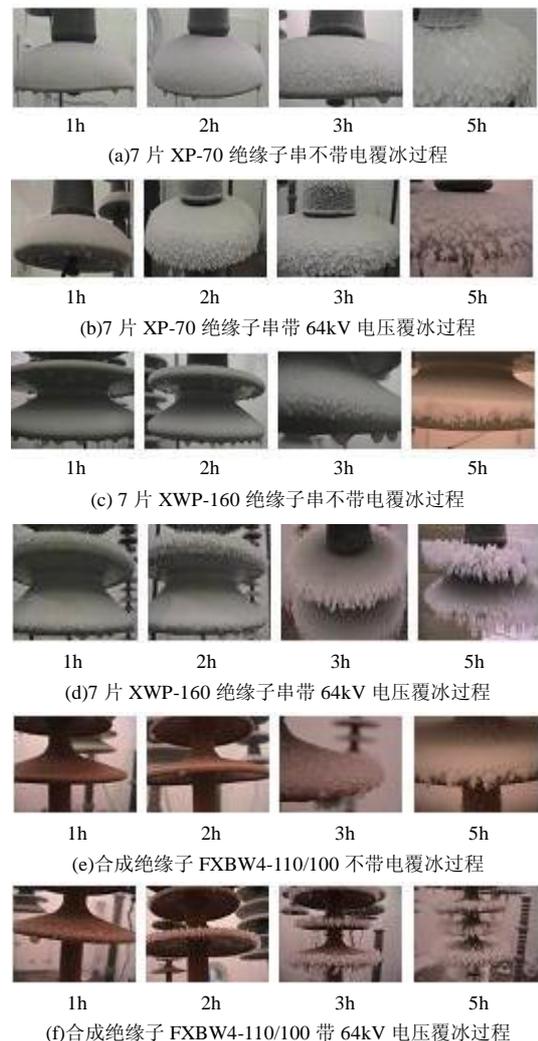
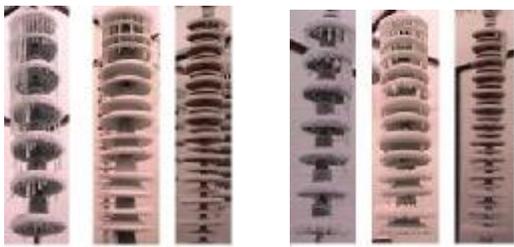


图 1 绝缘子带电覆冰与不带电覆冰结果
Fig.1 The icing of insulator strings with energized or without energized



(a)不带电覆冰 5h 后 (b)带 64kV 电压覆冰 5h 后

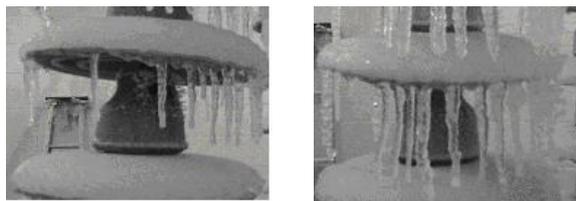
图2 绝缘子串带电覆冰与不带电覆冰结果
Fig.2 The icing of insulator strings with energized or without energized

(2) 随着覆冰时间的延长,带电和不带电覆冰时绝缘子表面冰的状态出现明显的差异,带电时绝缘子表面的冰呈茸毛状的微小分支,其原因是电场力对空气中过冷却微粒的吸引作用,使其向绝缘子表面定向移动,移动的方向为沿着电场的方向。

(3) 与不带电相比,带电覆冰时绝缘子表面的冰较细且疏松,这是电场的吸引作用造成的,使过冷却微粒在与冰棱碰撞时发生炸裂从而形成多个更小的微粒,微粒在冻结前试图沿电场力方向脱离冰棱。

(4) 带电覆冰时绝缘子串中各片以及每片绝缘子各部位的覆冰状况差别也很明显,高压端的绝缘子表面冰呈茸毛状情况最显著,这是因为电场强度差异造成的。

图3是覆冰温度为 -5°C ,带电与不带电时绝缘子串高压端绝缘子被冰棱桥接状态。



(a)带电 (b)不带电

图3 带电覆冰与不带电覆冰冰棱桥接状况
Fig.3 The iced bridged situation on insulators with energized or without energized

由图3可知:

(1) 带电情况下高压端绝缘子不易被冰棱桥接,但低压端绝缘子会被桥接,其原因是绝缘子串覆冰后其电压分布发生严重畸变^[2]。串中其它绝缘子被冰棱桥接后,高压端绝缘子承受的电压占施加电压的60%以上,因此,在冰棱增长过程中,冰棱尖端的强电场导致冰尖产生局部放电,从而熔化冰棱,阻碍了冰棱的生长。

(2) 试验中观察到冰凌增长导致空气间隙击穿时,放电产生的热量熔化冰凌及下表面覆冰,空

气间隙距离增大,放电熄灭,从而限制了冰凌向下发展的趋势。

3.2 带电覆冰对绝缘子覆冰密度的影响

对带电(交流64kV)和不带电情况下7片串XP-70、XWP-160和110kV合成绝缘子覆冰密度进行了测量,结果如表2所示。

表2 绝缘子覆冰密度
Tab.2 The density of iced insulator

绝缘子型式	覆冰状态	覆冰水电导率/ $\mu\text{S}/\text{cm}$			
		77	220	332	480
XP-70	不带电	0.840	0.844	0.843	0.845
	带电	0.667	0.740	0.820	0.830
XWP-160	不带电	0.890	0.894	0.900	0.897
	带电	0.670	0.760	0.790	0.810
FXBW ₄ -110/100	不带电	0.805	0.808	0.810	0.815
	带电	0.728	0.760	0.790	0.800

注:表中数据为高压端绝缘子表面的平均覆冰密度。

从表2可知:

(1) 带电64kV与不带电时绝缘子覆冰密度有明显差异,即带电时绝缘子覆冰的密度比不带电时低。但这种密度的差异与覆冰水电导率有关,即覆冰水电导率越小,差异越明显,在覆冰水电导率较高时,覆冰过程中泄漏电流较大,其焦耳热可熔化冰层,使其密度增加,从而更接近不带电时的覆冰密度。例如XP-70,覆冰水电导率为 $70\mu\text{S}/\text{cm}$,不带电时的覆冰密度为 $0.840\text{mg}/\text{cm}^2$,带电时的覆冰密度为 $0.667\text{mg}/\text{cm}^2$,带电下绝缘子覆冰密度比不带电下的覆冰密度低12%;覆冰水电导率为 $480\mu\text{S}/\text{cm}$,不带电时的覆冰密度为 $0.845\text{mg}/\text{cm}^2$,带电时的覆冰密度为 $0.830\text{mg}/\text{cm}^2$,带电下绝缘子覆冰密度比不带电下的覆冰密度低2%。

(2) 覆冰水电导率对带电(64kV)与不带电时绝缘子覆冰密度的影响不同,即不带电时,不同覆冰水电导率下绝缘子覆冰密度基本相同;带电时,不同覆冰水电导率下绝缘子覆冰密度有明显差异,且随着覆冰水电导率的增加,覆冰密度也将增大。如XP-70绝缘子在覆冰水电导率分别为77、220、332、 $480\mu\text{S}/\text{cm}$ 时,不带电绝缘子覆冰密度在 $0.840\sim 0.845\text{mg}/\text{cm}^2$ 之间;带电下绝缘子覆冰密度分别为 0.667 、 0.740 、 0.820 、 $0.830\text{mg}/\text{cm}^2$ 。

(3) 覆冰水电导率对带电(64kV)与不带电下不同型式绝缘子覆冰密度的影响程度不同。不带电下,覆冰水电导率为 $70\sim 480\mu\text{S}/\text{cm}$ 时,XWP-160的覆冰密度最大,为 $0.900\sim 0.890\text{mg}/\text{cm}^2$;XP-70的覆冰密度次之,为 $0.840\sim 0.845\text{mg}/\text{cm}^2$;FXBW₄-

110/100的覆冰密度最小,为 $0.805\sim 0.815\text{mg}/\text{cm}^2$;带电时,当覆冰水电导率从 $70\mu\text{S}/\text{cm}$ 增大到 $480\mu\text{S}/\text{cm}$ 时,对于XP-70,其覆冰密度从 $0.667\text{mg}/\text{cm}^2$ 增加到 $0.830\text{mg}/\text{cm}^2$,增加了24.4%;对于XWP-160,其覆冰密度从 $0.670\text{mg}/\text{cm}^2$ 增加到 $0.810\text{mg}/\text{cm}^2$,增加了20.9%;对于FXBW₄-110/100,其覆冰密度从 $0.720\text{mg}/\text{cm}^2$ 增加到 $0.800\text{mg}/\text{cm}^2$,增加了11.1%。即带电覆冰时,绝缘子XP-70覆冰密度受覆冰水电导率的影响最大,XWP-160次之,FXBW₄-110/100最小。

4 结论

(1) 带电与不带电时绝缘子覆冰的状态有明显差异,带电时绝缘子覆冰更为松散,且多呈松针状。由于覆冰状态影响其冰闪特性,因此今后进行覆冰绝缘子闪络特性研究时应考虑这种影响。

(2) 带电时绝缘子覆冰的密度比不带电时低,且其密度与电场强度、绝缘子的形状、结构和覆冰水电导率等有明显关系。

(3) 带电时绝缘子覆冰过程较为复杂,涉及电磁学、热力学、流体力学等多方面过程,本文只是初步探讨。电场强度等如何对冰的形状、冰的增长、密度产生影响,有待进一步深入研究。

参考文献

- [1] Imai I. Studies of ice accretion[J]. Res. Snow Ice, 1953, 1(1): 35-44.
- [2] 蒋兴良, 易辉. 输电线路覆冰及防护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [3] 孙才新, 司马文霞, 舒立春. 大气环境与电气外绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [4] Farzanch M, Drapeau J F. AC flashover performance of insulators covered with artificial ice[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1995, 10(2): 1038-1051.
- [5] Cherney E A. Flashover performance of artificially contaminated and iced long-rod transmission line insulators[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and System, 1980, PAS-99, (1): 46-52.
- [6] Sugawara N T. Withstand voltage and flashover performance of iced insulators depending on the density of accreted ice[C]. Proc. 6th Int. Workshop Atmospheric Icing Structures, Budapest, Hungary, 1993.
- [7] Phan L C, Matsuo H. Minimum flashover voltage of iced insulators [J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1983, EI-18-6, (6): 605-618.
- [8] Farzaneh M, Baker T, Bernstorff A, et al. Insulator icing test methods and procedures: a position paper prepared by the IEEE task force on insulator icing test methods[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2002, 18(4): 1503-1515.
- [9] Wu D, Halsan K A, Fikke S M. Artificial ice tests for long insulator strings[C]. Proceeding of the 7th International Workshop Atmospheric Icing Structures, Chicoutimi, QC, Canada, 1996.
- [10] Farzanch M, Laforte J L. Ice accretion on conductor energized by AC or DC: A laboratory investigation of ice treeing[J]. International Journal of Offshore and Polar Engineering, 1994, 4(1): 40-47.
- [11] 栗福衍, 贾逸梅. 500kV 绝缘子串人工雾凇和放电试验[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(2): 75-78.
Su Fuheng, Jia Yimei. Artificial rime covering and discharging tests of 500kV insulator string[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(2): 75-78.
- [12] 舒立春, 蒋兴良, 田玉春, 等. 海拔4000m以上地区4种合成绝缘子覆冰交流闪络特性及电压校正[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 97-101.
Shu Lichun, Jiang Xingliang, Tian Yuchun, et al. AC flashover performance and voltage correction of four types of iced composite insulator at altitude 4000m above[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 97-101.
- [13] 孙才新, 蒋兴良, 舒立春, 等. 高海拔、污秽、覆冰环境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.
Sun Caixin, Jiang Xingliang, Shu Lichun, et al. AC/DC flashover performance and its voltage correction of UHV insulators in high altitude and icing and pollution environments[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(11): 115-120.
- [14] 蒋兴良, 孙才新, 司马文霞, 等. 10kV合成绝缘子覆冰交流闪络特性及冰闪过程研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 58-61.
Jiang Xingliang, Sun Caixin, Sima Wenxia, et al. Study on AC flashover performance and process of iced 10kV composite insulator [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 58-61.
- [15] 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.
Jiang Xingliang, Wu Lihui, Sima Wenxia, et al. Study on flashover mechanism of XZP/XZWP4-160 DC insulator under icing and low atmospheric pressure conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 111-115.
- [16] 司马文霞, 蒋兴良, 武利会, 等. 低气压下覆冰染污10kV合成绝缘子直流电气特性[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 122-126.
Sima Wenxia, Jiang Xingliang, Wu Lihui, et al. DC electrical performance of icing and polluted 10kV composite insulator at low atmospheric pressures[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 122-126.
- [17] IEEE Std4/1995, IEEE standard techniques for high-voltage testing[S].

收稿日期: 2005-10-13.

作者简介:

张志劲(1976-), 男, 讲师, 博士研究生, 从事高电压与绝缘技术工作;

蒋兴良(1961-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事高电压与绝缘技术与输电线路覆冰及防护研究工作。

(责任编辑 韩 蕾)