

文章编号:1000-582X(2011)07-069-07

110 kV 电压互感器瓷套交流冰闪特性及防冰闪措施

张志劲¹, 蒋兴良¹, 胡建林¹, 陈凌¹, 刘兵², 黄海舟¹

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044;

2. 重庆 ABB 变压器有限公司, 重庆 400052)

摘要:为了解覆冰对电力系统的安全可靠运行影响程度,开展了 110 kV 电压互感器瓷套交流覆冰闪络特性试验研究,结果表明:随着覆冰程度的增加,110 kV 电压互感器瓷套交流覆冰闪络电压将降低,其覆冰闪络电压与覆冰质量和覆冰厚度分别满足负指数和负幂函数关系,且特征指数范围分别为 0.085~0.100 和 0.40~0.55;110 kV 电压互感器瓷套冰闪电压与覆冰前污秽有关,其覆冰闪络电压与污秽满足负幂函数关系,且特征指数范围为 0.21~0.26;当覆冰厚度达 25 mm 且盐密为 0.08 mg/cm² 及以上时,运行中的 110 kV 互感器瓷套将发生覆冰闪络;防止 110 kV 互感器瓷套交流冰闪的有效措施是采用增加结构高度和加装增爬裙,研究结果可为覆冰地区变电站外绝缘的选择和设计提供参考。

关键词:互感器;交流;覆冰;闪络;增爬裙;防冰闪措施

中图分类号:TM853

文献标志码:A

AC icing flashover performance of 110 kV potential transformer and the measures of anti-icing flashover

ZHANG Zhi-jin¹, JIANG Xing-liang¹, HU Jian-lin¹, CHEN Ling¹, LIU Bing², HUANG Hai-zhou¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China; 2. Chongqing ABB Transformer CO., LTD., Chongqing 400052, P. R. China)

Abstract: The AC flashover performance of 110 kV iced potential transformer is investigated by testing in laboratory to analyze the influence degree of icing on the safe and reliable operation of power system. The results show that the AC flashover voltage of 110 kV iced potential transformer decreases with the ice amount increasing. The relation between icing flashover voltage and ice amount accords with the negative exponential function law, and the characteristic index is in the range of 0.085~0.100. Meanwhile, the relation between icing flashover voltage and ice thickness accords with the negative power function law, and the characteristic index is in the range of 0.40~0.55. The flashover voltage of 110 kV iced bushing is related to the pollution before icing. The relation between icing flashover voltage and salt deposit density (SDD) accords with the negative power function law, and the characteristic index is in the range of 0.21~0.26. When the ice thickness is up to 25 mm and SDD is 0.08 mg/cm² and above, the icing flashover occurs on the 110 kV potential transformer in service. The effective measures to prevent AC icing flashover of 110 kV potential transformer are to increase the height of the structure and install creepage extenders. The results can offer consults for the external insulation selection and design of

收稿日期:2011-03-02

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(2009CB724502);国家自然科学基金青年基金资助项目(50807056)

作者简介:张志劲(1976-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事高电压与绝缘技术方面研究,(Tel)023-65111795-8220;
(E-mail)zhangzhjing@cqu.edu.cn.

substation in ice covered regions.

Key words: transformer; AC; ice; flashover; creepage extenders; measure of anti-icing flashover

中国是发生输电线路覆冰事故较多的国家之一,覆冰已严重威胁了电力系统的安全运行,特别是 2008 年 1-2 月,持续的低温雨雪冰冻自然灾害天气,使中国 13 个省(区)的电力系统运行受到影响,其中,灾情影响最为严重的是华中和南方地区,特别是贵州、湖南、江西、广东、广西、浙江等地,灾害共造成全国 169 个县停电,造成重大经济损失^[1-2]。同时,世界上其他国家,如加拿大^[3-5]、前捷克斯洛伐克^[6]、芬兰^[7]、日本^[8-9]、挪威^[10]、瑞典^[11]、美国^[12]等,也发生过由于覆冰所引起的输电线路绝缘子闪络事故。

鉴于覆冰对电网安全的严重危害,国内外对覆冰机理和覆冰闪络特性开展了大量研究^[1-21],取得许多重要成果:如 Charneski 等^[13]对各种瓷、复合绝缘子以及支柱绝缘子的覆冰闪络特性进行了研究,结果表明 345 kV 支柱绝缘子覆冰闪络电压梯度为 2.89 kV/cm,闪络概率为 65%,增加支柱绝缘子的干弧距离可以提高其覆冰闪络电压;Farzaneh 等^[5]研究了冰增长方式、覆冰形状和厚度、覆冰水电导率等对支柱绝缘子覆冰耐受电压的影响,结果表明覆冰厚度对支柱绝缘子最大耐受电压的影响更明显;文献^[14]结果表明在重冰条件下,不同伞裙结构对支柱绝缘子直流闪络电压影响不明显;文献^[15]试验研究分析了标准支柱瓷绝缘子的覆冰临界闪络电压,提出了一种多电弧数学模型来预测绝缘子覆冰闪络电压;文献^[1,2,16]研究防止绝缘子冰闪的方法和措施;文献^[17]分析了持久性就地成型防污闪复合涂料对绝缘子覆冰及交流冰闪电压的影响,提出 PRTV 不具有防冰效果。

由于套管的伞间距远比线路用悬式绝缘子串两个相邻绝缘子之间的间距小,使得相同覆冰条件下,套管伞间距更容易桥接而导致其冰闪电压急剧下降,但国内外对套管下绝缘子冰闪特性的研究甚少,且电网冰闪事故仍时有发生,为保证覆冰条件下变电站的安全可靠运行,笔者开展 110 kV 电压互感器瓷套覆冰闪络特性试验研究并在此基础上提出相应的防冰闪措施具有重要的现实意义和工程应用价值。

1 试验装置、试品及试验程序

1.1 试验装置

110 kV 电压互感器瓷套覆冰试验在输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室的大型多功能人工气候室(其直径 7.8 m、高度 11.6 m)进行。人工

气候室温度在 $-45\sim+50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 可调,气压在 35~101.3 kPa 可调。喷淋及风速调节系统由 14 个 IEC 标准推荐的喷头和 10 个风速可调的风扇组成,雾滴颗粒直径 10~120 μm 可调,风速 1~12 m/s 可调。

交流试验电源为 500 kV/2 000 kVA 工频试验变压器,输入电压为 0~10.5 kV,输出电压为 0~500 kV,最大短路电流为 75 A,输出电压波形畸变率小于 3%,系统的短路阻抗小于 6%。

1.2 试品

试验所用的试品为普通型 110 kV 电压互感器,其结构高度为 1 260 mm,大伞盘径为 370 mm,小伞盘径为 325 mm,爬电距离为 2 864 mm,大伞为 13 个,小伞为 12 个,伞间距为 50 mm。

1.3 人工覆冰试验程序

1)污秽的模拟:运行中 110 kV 电压互感器瓷套覆冰前已经存在一定污秽,因此试验过程中首先用固体涂层法对 110 kV 电压互感器瓷套进行染污。涂刷污秽前根据试品所需的盐密(SDD)、灰密(NSDD)以及试品表面积,计算出试品所需要的 NaCl 和硅藻土的量。然后称量出所需的 NaCl 和硅藻土的量。在称量过程中,NaCl 的称量误差不大于所需量的 $\pm 1\%$,硅藻土的称量误差不大于所需量的 $\pm 10\%$ 。由于试验所采用的试品 110kV 电压互感器瓷套较长,为保证涂刷均匀,试验中将整支 110 kV 套管分成若干段,分段计算面积和所需要的 NaCl 和硅藻土的重量,进行分段涂刷污秽。涂刷过程中,先将称量出的 NaCl 和硅藻土放入清洗干净的瓷碗中加上适量的去离子水($\gamma_{20}<10\text{ }\mu\text{S/cm}$),并进行充分搅拌成糊状,然后用小排刷将污秽物全部均匀地涂刷于试品表面上。在涂刷过程中,尽量做到涂刷均匀,并尽量保证不让污液掉落,涂刷完污秽的 110 kV 电压互感器悬挂于实验室中待其自然阴干 24 h 以上后进行人工覆冰试验。

2)覆冰过程:降低人工气候室的温度至预定覆冰温度。对 110 kV 电压互感器瓷套进行覆冰所采用的过冷却水电导率为 80 $\mu\text{S/cm}$,其温度控制在 4 $^{\circ}\text{C}$ 左右,自动喷雾覆冰前,为避免喷嘴喷出的过冷却水冲刷掉 110 kV 电压互感器瓷套表面的污秽,先用喷壶人为在支柱绝缘子上、下表面分数次喷上薄薄的水膜,待其形成一层很薄的冰层并确认污秽不会被冲刷掉后再进行自动喷雾覆冰。用来喷雾形成覆冰条件的喷淋系统距离试品 3.8 m,喷出的雾粒大小为 80~120 μm ,喷雾流量约为 80 mm/h,调节风速使其在 4~

5 m/s, 覆冰过程中气候室内温度控制在 $-7 \sim -10 \text{ }^\circ\text{C}$, 使瓷套表面覆冰以混合淞为主, 覆冰密度在 $0.6 \sim 0.8 \text{ g/cm}^3$ 。

3) 覆冰程度的表征: 试验研究中以覆冰厚度 (d) 和覆冰质量 (W) 作为特征量。覆冰厚度采用同样覆冰环境中监测旋转的圆柱铜管上的覆冰厚度, 铜管直径为 $\Phi 20 \text{ mm}$, 铜管旋转速度为 1 r/min , 铜管长度 600 mm , 如图 1 所示。



图 1 监测覆冰厚度的旋转导体

试验同时对 110 kV 电压互感器瓷套表面的覆冰质量进行了测量, 其测定方法: 首先将 110 kV 电压互感器放入清洁、干燥的盆中, 称出总质量; 然后将 110 kV 电压互感器放在人工气候室内覆冰, 待 110 kV 电压互感器瓷套覆冰达到要求后, 将其取出再放入原盆中称出总质量; 用这次测量的结果减去未覆冰时的 110 kV 电压互感器和盆的质量, 即可得到 110 kV 电压互感器瓷套的覆冰量。当覆冰程度达到预定值后停止覆冰并进行试验。

4) 覆(冰)雪电气试验方法: 采用最低闪络电压法或 U 形曲线法^[18]。

① 当 110 kV 电压互感器瓷套覆冰达到预定要求时, 停止喷雾并继续冷冻约 15 min , 然后打开人工气候室的密封门, 放进暖空气或采用加热方式使冰层按 $0.1 \sim 0.2 \text{ }^\circ\text{C/min}$ 的速度逐渐融化, 并保证最低闪络电压出现时的环境温度在 $-2 \sim 2 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间。

② 当覆冰层开始融化时, 采用均匀升压法对 110 kV 电压互感器瓷套不断地进行重复闪络试验, 每相邻 2 次闪络试验之间的间隔约为 3 min 。当 110 kV 电压互感器瓷套表面冰层完全融化和脱落时试验终止。

由以上步骤得到的覆冰 110 kV 电压互感器瓷套的交流闪络电压 U_f 与闪络次数 N 或融冰时间的关系呈 U 形曲线, U 形曲线的最低点则为最低闪络电压 $U_{f\min}$, 可表示为:

$$U_{f\min} = \text{Min}(U_{f1}, U_{f2}, U_{f3}, \dots, U_{fi}, \dots, U_{fn}) \quad (1)$$

2 110 kV 电压互感器瓷套的交流冰闪特性

对不同盐密、不同覆冰程度下 110 kV 电压互感器瓷套进行交流覆冰闪络特性试验研究, 试验结果如表 1 所示。

表 1 110 kV 电压互感器瓷套交流冰闪试验结果 kV

| d/mm | 10 | 15 | 20 | 25 | |
|--|------|-------|-------|-------|-------|
| W/kg | 2.67 | 4.02 | 5.98 | 7.21 | |
| | 0.08 | 160.2 | 135.2 | 116.6 | 108.4 |
| $SDD/(\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2})$ | 0.15 | 141.1 | 117.1 | 96.5 | 90.2 |
| | 0.25 | 118.4 | 106.4 | 88.7 | 81.4 |

表 1 可以看出:

1) 110 kV 电压互感器瓷套冰闪电压与覆冰质量(或厚度)有关, 且随着覆冰质量(或厚度)的增加, 瓷套覆冰交流闪络电压将减小。

大量试验结果表明^[1,2,19], 绝缘子覆冰闪络电压 $U_{f\min}$ 与冰重 W (或冰厚 d) 满足下列关系:

$$U_{f\min} = A \cdot e^{-bW} \quad (2)$$

或

$$U_{f\min} = B \cdot d^{-c} \quad (3)$$

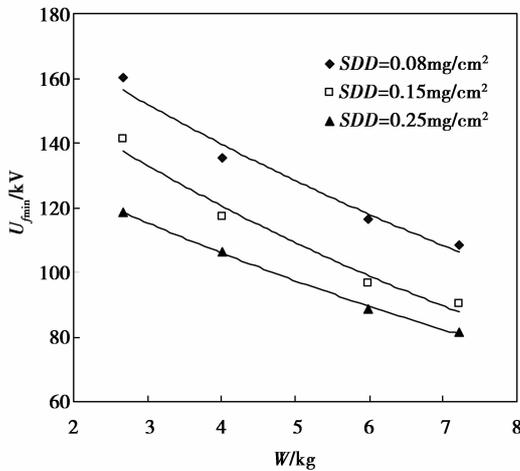
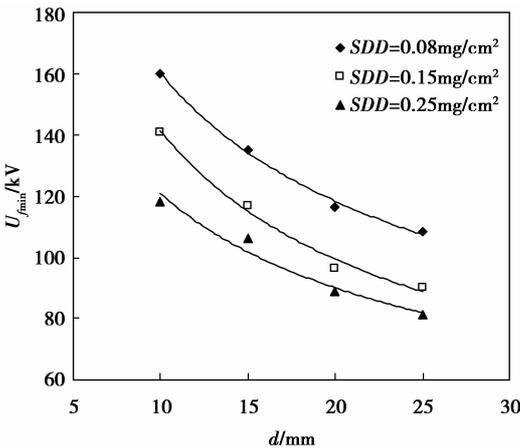
式中: $U_{f\min}$ 为覆冰闪络电压, kV; W 为覆冰质量, kg; d 为覆冰厚度, mm; A, B, b, c 为与绝缘子型式、污秽程度等有关的常数。

对表 1 的试验结果按式(2)或式(3)进行拟合, 拟合曲线如图 2、3 所示, 拟合所得 A, B, b, c 值如表 2 所示。

表 2 拟合得到的 A, B, b, c 值

| SDD $/(\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2})$ | 相关参数 | | | | | |
|--|-------|-------|---------|-------|------|---------|
| | A | b | R^2 | B | c | R^2 |
| 0.08 | 195.9 | 0.085 | 0.977 1 | 437.1 | 0.44 | 0.995 9 |
| 0.15 | 179.0 | 0.099 | 0.976 6 | 454.9 | 0.51 | 0.988 1 |
| 0.25 | 148.4 | 0.084 | 0.997 7 | 320.5 | 0.42 | 0.969 1 |

由表 2 可知, 对于 110 kV 电压互感器瓷套, 其覆冰质量影响特征指数 b 值范围为 $0.085 \sim 0.10$, 其覆冰厚度影响特征指数 c 值范围为 $0.40 \sim 0.55$, 比同等条件下的悬式绝缘子大^[1-2], 即 110 kV 电压互感器瓷套交流冰闪电压受覆冰的影响程度较大。

图2 110 kV电压互感器瓷套冰闪电压 U_{fmin} 与冰重 W 的关系图3 110 kV电压互感器瓷套冰闪电压 U_{fmin} 与冰厚 d 的关系

2) 套管冰闪电压与覆冰前污秽程度有关,且随着盐密的增加,110 kV电压互感器瓷套覆冰交流闪络电压将减小。

大量试验结果表明^[1,2,21],绝缘子覆冰闪络电压 U_{fmin} 与覆冰前污秽程度 SDD 满足下式关系:

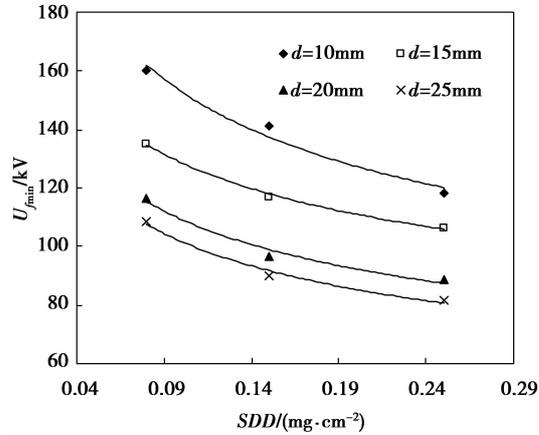
$$U_{fmin} = C \cdot SDD^{-n}, \quad (4)$$

式中: U_{fmin} 为覆冰闪络电压,kV; SDD 为附盐密度, mg/cm^2 ; C, n 为与绝缘子型式、覆冰程度等有关的常数。

对表1的试验结果按式(4)进行拟合,拟合曲线如图4所示,拟合所得 C, n 值如表3所示。

表3 拟合得到的 C, n 值

| d/mm | C | n | R^2 |
|--------|------|------|---------|
| 10 | 83.4 | 0.26 | 0.984 8 |
| 15 | 79.1 | 0.21 | 0.996 9 |
| 20 | 62.5 | 0.24 | 0.975 1 |
| 25 | 56.8 | 0.25 | 0.989 5 |

图4 110 kV电压互感器瓷套冰闪电压 U_{fmin} 与冰厚 SDD 的关系

由表3可知,对于110 kV电压互感器瓷套,其污秽影响特征指数 n 值范围为0.21~0.26,比同等条件下的悬式绝缘子小^[1-2],即110 kV电压互感器瓷套交流冰闪电压受覆冰前污秽的影响程度较小。

定义闪络梯度 E_{fmin} (kV/m)为闪络电压 U_{fmin} (kV)与结构高度 H (m)之比,即

$$E_{fmin} = \frac{U_{fmin}}{H}. \quad (5)$$

在设计和运行中,变电站仅允许非常小的闪络概率,且根据50%闪络梯度可以得到耐受概率为99.87%或闪络概率为0.13%的电压梯度。由文献[2]可知最低闪络电压 E_{fmin} 比升降法得到的 E_{50} 高一个标准偏差 $\sigma\%$ (5.0%~7.0%)。因此根据前面试验结果可知,99.87%耐受概率的闪络梯度为:

$$E_{0.13} = (1 - 3\sigma\%)E_{50} = (1 - 3\sigma\%)(1 - \sigma\%)E_{fmin}. \quad (6)$$

笔者将 $\sigma\%$ 取7%,我国变电站设计的耐受梯度为65 kV/m,如果以65 kV/m为参考,超过65 kV/m为可靠运行,低于65 kV/m则认为发生闪络。则由表1中的试验结果及式(6),可得110 kV电压互感器瓷套在覆冰及污秽情况下的99.87%耐受梯度如表4所示。

表4 110 kV电压互感器瓷套覆冰下的99.87%耐受梯度 kV/m

| d/mm | 10 | 15 | 20 | 25 |
|-----------------------|------|------|------|------|
| W/kg | 2.67 | 4.02 | 5.98 | 7.21 |
| SDD | 0.08 | 93.4 | 78.8 | 68.0 |
| | 0.15 | 82.3 | 68.3 | 56.3 |
| $/(mg \cdot cm^{-2})$ | 0.25 | 69.0 | 62.0 | 51.7 |
| | | | 47.5 | |

从表4可知:

1) 覆冰套管的耐受梯度随覆冰及污秽程度的增

加而急剧下降,如 SDD 为 0.08 mg/cm^2 ,覆冰从 10 mm 增加到 25 mm ,耐受梯度下降了约 32.3% ;从 SDD 为 0.08 mg/cm^2 且 d 为 10 mm 增加到 SDD 为 0.25 mg/cm^2 且 d 为 25 mm 时,绝缘子的耐受梯度降低了约 49.2% 。

2)如表中阴影所示,其耐受梯度已经低于绝缘子的可靠运行梯度 65 kV/m ,也即是说在覆冰,污秽达到一定程度时,套管在运行中有可能发生闪络。

3 110 kV 套管防冰闪措施

一般来说,防止绝缘子冰闪的最根本方法是在设计之初让线路避开重冰区,对于不可避免的经过重覆冰地区,应当采取有效措施来防止绝缘子的冰闪。近年来,绝缘子的防冰技术得到了广泛的研究,并获得了许多防止绝缘子冰闪的方法:

1)增加绝缘子串长,对于支柱绝缘子及套管增加绝缘子的结构高度能有效地防止冰闪。

2)优化绝缘子的布置方式,通常的做法是将悬垂绝缘子串进行 V 型、 Δ 型布置,防止绝缘子串被冰棱桥接,这是一种非常有效的方法。

3)在绝缘子表面涂覆憎水性涂料(如 PRTV),以延缓绝缘子覆冰的作用,但文献[17,19]研究结果表明,绝缘子表面涂覆憎水性涂料在覆冰严重时,PRTV 涂料不具备防冰效果,反而更容易诱发冰闪。

4)采用大小盘径“插花”方式,以及加装增爬裙。

然而对于支柱和套管绝缘子来说不可能采用 V 型、 Δ 型布置方式,因而增加结构高度和加装增爬裙成为了这类型绝缘子防冰的主要方式。

3.1 增加结构高度

增加 110 kV 电压互感器瓷套的结构高度,可以提高其冰闪电压。在不同覆冰及污秽地区,所需的可靠运行的结构高度不同。按照表 4,对 $E_{99.87\%}$ 低于可靠运行梯度的部分,可按下式对结构高度进行修正。

$$H_{\text{修正}} = \begin{cases} \frac{65}{E_{99.87\%}} H, E_{99.87\%} < 65 \text{ kV/m} \\ H, E_{99.87\%} \geq 65 \text{ kV/m} \end{cases}, \quad (7)$$

式中: $H_{\text{修正}}$ 为覆冰污秽地区瓷套不发生冰闪的最小结构高度, m ; H 为试品的结构高度, m 。

对于笔者研究的 110 kV 电压互感器瓷套,根据试验结果和结构高度修正公式可得在试验范围内的污秽及覆冰程度下,瓷套不发生冰闪所需的最小结构高度如表 5 所示。

表 5 110 kV 电压互感器瓷套覆冰下不发生闪络所需的最小结构高度 m

| d/mm | 10 | 15 | 20 | 25 |
|---|------|------|------|------|
| $SDD/(\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2})$ 0.08 | 1.26 | 1.26 | 1.26 | 1.30 |
| 0.15 | 1.26 | 1.26 | 1.46 | 1.56 |
| 0.25 | 1.26 | 1.33 | 1.59 | 1.73 |

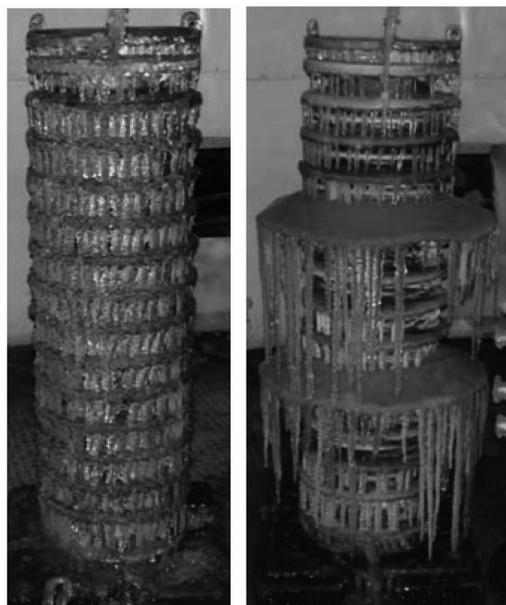
对于其他范围的污秽及覆冰情况,可采用外推法来确定瓷套不发生冰闪的最小结构高度。

3.2 加装增爬裙防冰效果

笔者还进行了 110 kV 电压互感器瓷套加装增爬裙的防冰试验效果验证,增爬裙安装在瓷套的第 4、第 9 个大伞处,如图 5 所示。覆冰试验结果(旋转监测导体覆冰厚度为 20 mm)如表 6 及图 6、7 所示。

表 6 加装增爬裙对 110 kV 电压互感器瓷套覆冰及闪络的影响

| 参数 | 瓷套结构 | 覆冰厚度/ mm | | | |
|-----------------------------|---------------------------------|-------------------|-------|-------|-------|
| | | 10 | 15 | 20 | 25 |
| 覆冰质量/ kg | 普通 | 2.67 | 4.02 | 5.98 | 7.21 |
| | 加增爬裙 | 3.12 | 4.61 | 6.58 | 8.02 |
| $U_{f\text{min}}/\text{kV}$ | 普通 | 141.1 | 117.1 | 96.5 | 90.2 |
| | $SDD=0.15 \text{ mg/cm}^2$ 加增爬裙 | 194.8 | 166.2 | 135.2 | 124.5 |



(a) 普通型 (b) 加装增爬裙

图 5 110 kV 电压互感器覆冰效果

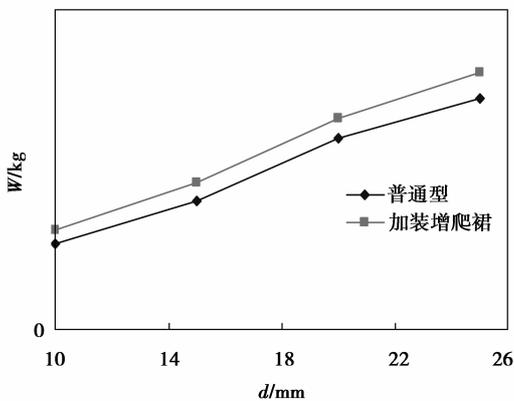


图6 增爬裙对110 kV电压互感器瓷套覆冰量的影响

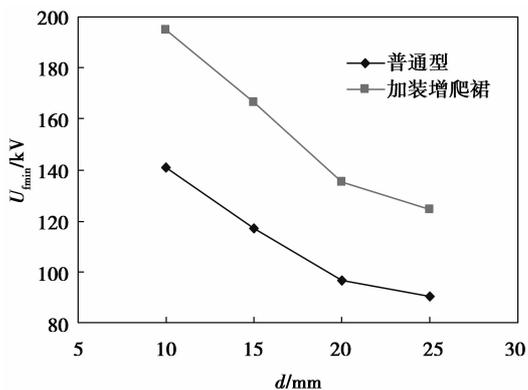


图7 增爬裙对110 kV电压互感器瓷套覆冰电压的影响

由表6及图5-7可知:

1) 加装增爬裙后110kV电压互感器瓷套的覆冰量明显增加,这是由于增爬裙的表面积大,受覆冰面积增大。虽然瓷套加装增爬裙后覆冰量增加,但其桥接很慢,如图5所示,普通型伞间已完全被桥接,而加装增爬裙的仍没有完全桥接。

2) 从图6还可以看到,虽然加装增爬裙的瓷套覆冰量增加,但它的增长速度与普通型的增长速度几乎一致(两条曲线的斜率基本一致),即加装增爬裙没有加速覆冰增长,而覆冰量的增加是由于增爬裙表面积大,增大了受覆冰面积的原因。

3) 110 kV电压互感器瓷套加装增爬裙后的覆冰闪络电压得到大幅度的提高,在厚度为10、15、20、25 mm时冰闪电压分别提高了38.1%、41.9%、40.1%、38.0%,这是由于增爬裙的加装,使得冰棱不容易对绝缘子形成完全桥接。

两种瓷套结构形式的99.87%耐受电压梯度如表7和图8所示。

表7 装与不装增爬裙瓷套的99.87%耐受电压梯度 kV/m

| 参数 | 瓷套结构 | 覆冰厚度/mm | | | |
|---------------|------|---------|------|------|------|
| | | 10 | 15 | 20 | 25 |
| U_{fmin}/kV | 普通 | 82.3 | 68.3 | 56.3 | 52.6 |
| | 加装爬裙 | 113.6 | 96.9 | 78.8 | 72.6 |

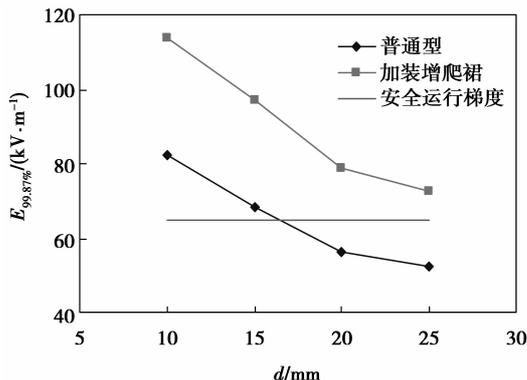


图8 两种110 kV电压互感器瓷套结构形式的99.87%耐受梯度

由表7和图8可知,110 kV电压互感器瓷套在加装了增爬裙后,其99.87%耐受电压梯度大幅度提高。普通型在覆冰达到20 mm时,其99.87%耐受电压梯度低于可靠运行电压梯度(65 kV/m)而可能发生闪络事故,当加装增爬裙后,99.87%耐受电压梯度提高了38%~41.9%,在试验的覆冰及污秽的程度范围内不会发生闪络事故。

综上所述,加装增爬裙虽然使110 kV电压互感器瓷套整体覆冰量增加,但增爬裙能有效地防止覆冰绝缘子伞裙间的桥接,从而可以大幅度地提高10 kV电压互感器瓷套的覆冰闪络的电压。因此加装增爬裙是防止覆冰闪络的有效方法。

4 结论

1) 随着覆冰质量 W 和覆冰厚度 d 的增加,110 kV电压互感器瓷套交流冰闪电压 U_{fmin} 将减小,且满足以下关系: $U_{fmin} = A \cdot e^{-bW}$ 和 $U_{fmin} = B \cdot d^{-c}$,对于110 kV电压互感器瓷套, b 值范围为0.085~0.10, c 值范围为0.40~0.55,比同等条件下的悬式绝缘子大,即110 kV电压互感器瓷套交流冰闪电压受覆冰的影响程度较大。

2) 当盐密为0.08 mg/cm²,覆冰厚度为25 mm及以上或盐密为0.15 mg/cm²,覆冰厚度为20 mm及以上或盐密为0.25 mg/cm²,覆冰厚度为15 mm及以上时,运行中的110 kV电压互感器瓷套可能会发生闪络。

3) 当覆冰或污秽严重时,可以增加结构高度以防止110 kV电压互感器瓷套运行中发生闪络;合理加装和布置增爬裙,可以提高110 kV电压互感器瓷套交流冰闪电压约40%。

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,2001.
- [2] 蒋兴良,舒立春,孙才新. 电力系统污秽与覆冰绝缘[M]. 北京:中国电力出版社,2009.
- [3] VOLAT C, MEGHNEFI F, FARZANEH M, et al. Monitoring leakage current of iced-covered station post insulators using artificial neural networks[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010,17(2):443-450.
- [4] MEGHNEFI F, VOLAT C, FARZANEH M. Temporal and frequency analysis of the leakage current of a station post insulator during ice accretion[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007,14(4):1381-1389.
- [5] FARZANEH M, BAKER T, BERNSTORF 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 Transaction on power Delivery,2003,18(4):1503-1515.
- [6] SKLENICKA V, VOKSLEK J. Insulators in icing conditions; selection and measures for reliability increasing[C]//Proceedings of the 7th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, June 3-6, 1996, Chicoutimi, Canada. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronic Engineers,1996:72-76.
- [7] KANNUS K, LAHT K. Laboratory investigations of the electrical performance of ice-covered insulators and a metal oxide surge arrester[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2007,14(6):1357-1372.
- [8] KIMURA S, SATO T, YAMAGISHI Y et al. Evaluation of ice detecting sensors by icing wind tunnel test[C]//International Workshop on Atmospheric Icing on Structures, September 8-11, 2009, Andermatt, Switzerland. [S. l.]:swiss energy,2009:1-9.
- [9] HANAOKA R, TAKATA S, NAKAGAMI Y. Electrical treeing in hexagonal ice crystals under applied impulse voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2004,11(6): 935-945.
- [10] NYGAARD B E. Evaluation of icing simulations for all the "COST727 icing test stations" in Europe[C]// International Workshop on Atmospheric Icing on Structures, September 8-11, 2009, Andermatt, Switzerland. [S. l.]:swiss energy,2009:1-5.
- [11] WIECK H, GUTMAN I, OHNSTAD T. Investigation of flashover performance of snow-covered breakers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2007,14(6):1339-1345.
- [12] THOMPSON G, NYGAARD B E, MAKONEN L. Using the weather research and forecasting (WRF) model to predict ground/structural icing [C]// International Workshop on Atmospheric Icing on Structures, September 8-11, 2009, Andermatt, Switzerland. [S. l.]:swiss energy,2009:1-8.
- [13] CHARNESJI M D, GAIBROIS G L, WHITNEY B F. Flashover test of artificially iced insulators[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems,1982, 101(8):2429-2433.
- [14] 苑吉河,蒋兴良,张志劲,等. 低气压下三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.
- YUAN JI-HE, JIANG XING-LIANG, ZHANG ZHI-JING, et al. Study on DC flashover performance of three types of iced post insulators at low atmospheric pressure [J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(15):12-15.
- [15] ZHANG J, FARZANEH M. Modeling of flashover on ice-covered insulators with multi air gaps[C]//2005/2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, May 21-24, 2006, Dallas, TX. [S. l.]: Institute of Electrical and Electronic Engineers,[2006-08-21]:109-114.
- [16] 易辉,王泉龙. 线路覆冰绝缘子串防冰闪措施及分析[J]. 高电压技术,2003,29(11):57-58.
- YI HUI, WANG QUAN-LONG. Measures of preventing ice flashover for transmission line insulator string and analysis of mechanism[J]. High Voltage Engineering,2003,29(11):57-58.
- [17] 蒋兴良,杜轶,林峰,等. 持久性就地成型防污闪复合涂料对绝缘子覆冰及交流冰闪电压的影响[J]. 电网技术, 2008,32(1):71-75.
- JIANG XING-LIANG, DU YUAN, LIN FENG, et al. Effect of PRTV on insulator string's icing and its AC icing flashover voltage[J]. Power System Technology, 2008,32(1):71-75.
- [18] FARZANEH M, BAKER T, BERNSTORF 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 Transactions on Power Delivery,2002,18(4):1503-1515.
- [19] 张志劲,蒋兴良,胡建林,等. 110kV支柱绝缘子交流覆(冰)雪电气特性[J]. 高电压技术,2009,35(10):2528-2534.
- ZHANG ZHI-JIN, JIANG XING-LIANG, HU JIAN-LIN, et al. AC electric characteristics of 110kV post insulators covered with ice or snow[J]. High Voltage Engineering,2009,35(10):2528-2534.
- [20] 张志劲,蒋兴良,胡建林,等. 覆冰程度对复合绝缘子直流覆冰闪络特性的影响[J]. 高电压技术,2009,35(10): 2545-2550.
- ZHANG ZHI-JIN, JIANG XING-LIANG, HU JIAN-LIN, et al. Influence of icing degree on dc icing flashover performance of composite[J]. High Voltage Engineering,2009,35(10):2545-2550.
- [21] 蒋兴良,王波,张志劲,等. XZP-210绝缘子冰闪特性与串长和布置方式的关系[J]. 重庆大学学报,2007,30(7):37-41.
- JIANG XING-LIANG, WANG BO, ZHANG ZHI-JING, et al. Influence of units and assemble on dc flashover voltage of iced insulator strings at high altitude districts[J]. Journal of Chongqing University, 2007,30(7):37-41.