

覆冰绝缘子表面电弧传播的临界条件

董玉冰¹, M. Farzaneh², 张建辉²

(1. 长春大学 电子信息工程学院, 吉林省 长春市 130022;

2. 魁北克大学席库提米分校, 加拿大 魁北克 G7H 2B1)

Critical Condition of Arc Propagation on Ice-Covered Insulators

DONG Yubing¹, M. Farzaneh², ZHANG Jianhui²

(1. School of Electronic Information Engineering, Changchun University, Changchun 130022, Jilin Province, China;

2. University of Quebec in Chicoutimi, Quebec, Canada G7H 2B1)

ABSTRACT: The flashover occurred on ice-covered insulators is mainly caused by the formation and propagation of local arc on the ice surface. The authors research the critical conditions of AC arc propagation along the surfaces of ice covering two kinds of post insulators for substations, and the influences of air gap length as well as insulator length and diameter on critical conditions to maintain the arc are researched and decided. Based on experimental results, a mathematical expression for arc propagation along the ice surface is proposed. This expression contributes to perfect the mathematical model of flashover along ice-covered insulator and can be used to predict the flashover voltage of long ice-covered insulator strings.

KEY WORDS: ice coating; insulators; arc; flashover

摘要: 覆冰绝缘子的闪络主要是由局部电弧引起的, 研究了 2 种类型变电站支柱绝缘子覆冰表面上交流电弧传播的临界条件, 确定和分析了空气间隙长度、绝缘子长度和直径对临界电弧维持条件的影响。基于实验结果, 提出了在冰表面上电弧传播的临界条件的数学表达式, 该式有助于完善覆冰绝缘子闪络的数学模型, 可用于长覆冰绝缘子串闪络电压的预测。

关键词: 覆冰; 绝缘子; 电弧; 闪络

0 引言

在亚洲、北美和欧洲的寒冷地区, 冰雪积聚在高压输电线上不仅会引起导线和铁塔的机械损坏, 而且会导致绝缘子的闪络, 从而引发大面积停电事故^[1-3], 例如, 2005 年初华中电网发生的大面积冰闪事故^[4]、加拿大魁北克省 735 kV 电网以及安大略省 500 kV 电网的冰闪事故等^[5]。

这一问题已经引起工业界和学术界研究人员的高度重视, 并进行了一系列关于覆冰过程和覆冰

绝缘子临界闪络电压的研究^[6-13]。由于实验室研究尤其是现场研究通常需要大量经费、耗费大量时间, 所以一些研究者正在研究通过建立数学模型来预测覆冰绝缘子的闪络电压^[14-15]。

目前, 预测短绝缘子串闪络电压的数字模型已被提出^[1], 为了完善现有模型以进一步应用于长串绝缘子, 本文的主要目的是通过使用不同长度和直径的变电站用支柱形绝缘子来研究电弧在冰表面上发展的临界条件, 并使用真正的覆冰支柱绝缘子来确定电弧维持条件。

1 预测短绝缘子串闪络电压的数学模型

在特定的条件下, 局部电弧的形成和传播会引起覆冰绝缘子的闪络, 图 1 所示是一种典型的人工覆冰短绝缘子串的闪络过程。由此可见, 局部电弧及串联的剩余冰层可以看作类似于污秽闪络中的一个电弧串联了一个剩余污秽层^[16], 在绝缘子表面上的冰可以认为是一种特殊的污秽, 因此图 2 所示的基于 Obenaus 概念建立的污秽绝缘子电路模型也可用来分析和计算覆冰绝缘子的闪络电压。

预测覆冰绝缘子闪络电压的数学模型见下式^[16]

$$U_m = AxI_m^n + I_m R(x) \quad (1)$$

式中: U_m 和 I_m 分别是外施电压和泄漏电流的峰值;

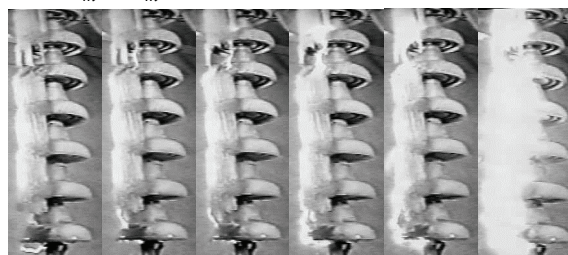


图 1 覆冰绝缘子串上的闪络

Fig. 1 The flashover on ice-covered insulators

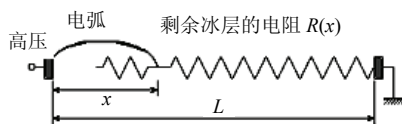


图2 冰表面上闪络的电路模型

Fig. 2 Circuit model of flashover on an ice surface

A 和 n 是电弧常数; x 是电弧长度; $R(x)$ 是未被电弧短接的剩余冰层的电阻。对于交流电弧的模型, 还需要满足电弧的重燃条件

$$U_m = \frac{kx}{I_m^b} \quad (2)$$

式中 k 和 b 是电弧重燃常数。

式(1)和式(2)中的交流电弧特性和其他主要的参数都已确定, 并且这个模型已成功地应用于计算 IEEE 标准绝缘子串在覆冰状态下的闪络电压。然而, 该模型应用在长于 2m 的覆冰绝缘子串时, 会产生明显的误差, 这是由于以前的研究是使用固定长度的小冰样来确定电弧的重燃条件, 事实上, 电弧在冰表面上和在污秽表面上的传播是不一样的。在冰表面的情况下, 电弧会在一定的电压值下在冰表面上传播, 也可以是随着冰融化和冰脱落导致的空气间隙的变大而扩展, 此外, 试验中还发现, 电弧维持条件也受绝缘子形状的影响, 需进一步研究。

2 覆冰绝缘子闪络过程及电弧维持条件

从图 1 中可以看出: 1) 在一定电压下, 局部电弧可以形成并稳定燃烧于空气间隙; 2) 当冰融化后, 在上电极附近形成了另一个空气间隙并形成了另一电弧; 3) 随着空气间隙增大, 局部电弧也随之增长; 4) 电弧延伸到一定长度后, 开始沿着冰表面向前发展; 5) 电弧达到临界长度后, 发展变得非常迅速; 6) 最终导致闪络发生。

由此可见, 局部电弧的形成和发展是覆冰绝缘子上发生闪络的必要条件, 因此, 在各种不同的情况下, 维持电弧在空气间隙处稳定燃烧的最小外加电压是一个主要参数, 而它就是所谓的电弧维持条件。

3 试验的设备和过程

为了确定电弧维持条件, 本研究中使用了 2 种变电站用支柱绝缘子。首先对图 3 所示人工气候室中的 2 只支柱绝缘子进行人工覆冰; 然后根据所需绝缘子的长度, 将一个电极安装在适当的位置。如图 3 所示, 通过喷射过冷水滴到绝缘子表面而形成人工冰。在覆冰期间, 人工气候室的温度维持在

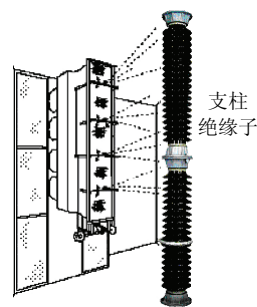


图3 人工气候室及试品

Fig. 3 Climate room and installed insulators

$-12 \pm 0.2^\circ\text{C}$, 放在蜂窝状漫射板后面的由 12 个风扇组成的吹风系统均匀出风, 试验中采用了 3.3 m/s 的风速。绝缘子上冰的厚度是通过测量 1 个直径为 3.8 cm、旋转速度为 1 r/min 的监视导体上的积冰厚度来衡量。由于覆冰绝缘子的闪络电压随着冰厚度的增加而降低, 并且在达到大约 15 mm 以后趋于饱和值, 所以本文也采用这个冰厚度值进行试验。

为了消除位置和长度的随机性带来的问题, 覆冰过程中绝缘子串上不加电压, 监测圆柱导体上的冰厚达到 15 mm, 则停止覆冰过程。然后在高压电极附近切割移除一部分冰, 人工地制造出一个空气间隙, 冰样品和试验线路如图 4 所示。

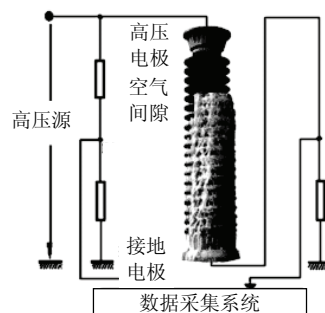


图4 冰样品和测试线路

Fig. 4 Ice sample and test circuit

交流电压由 1 个 350 kV/700 kVA 的变压器和 1 个 700 kVA 的调压器提供, 在最高运行电压 350 kV 时, 电源总短路电流大约为 20 A。一旦冰样形成, 升高人工气候室内的温度, 直到在冰表面上形成一层水膜, 然后在高压电极端以 3.9 kV/s 的速度升高电压, 直到空气间隙处产生击穿并且形成一个电弧, 再降低外施电压直到电弧熄灭。在此期间, 利用数据采集系统记录外施电压和相应的泄漏电流。

4 试验结果及讨论

4.1 电弧维持电压的确定

用上述的测试方法, 通过分析图 5 所示的由数据采集系统记录的外施电压和泄漏电流的波形可

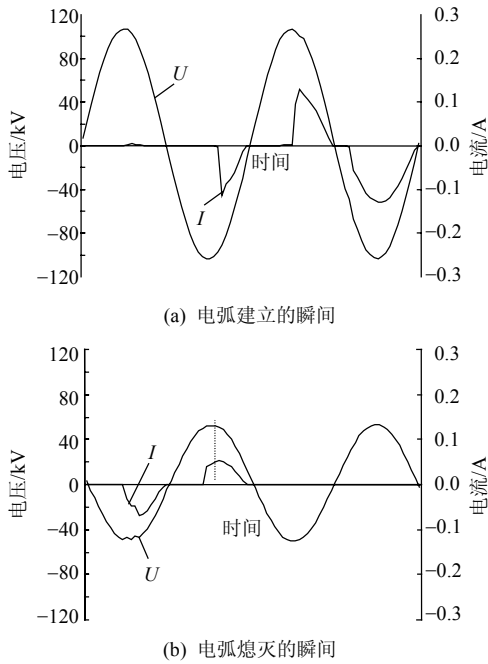


图 5 电压和泄漏电流的典型波形

Fig. 5 Typical waveforms of voltages and leakage current
 得到电弧维持电压和空气间隙击穿电压。当外施电压 U_1 达到一定值时，空气间隙被击穿，如图 5(a) 所示，并且在空气间隙处产生 1 个电弧。这个时刻 (t_0) 泄漏电流 I 会突然增加，该点的峰值电压 U_1 就是空气间隙的击穿电压 U_b 。

建立 1 个稳定的电弧后，降低外施电压 U_1 ，直到电弧消失且泄漏电流趋于 0，如图 5(b) 所示，电弧消失前的最后半个周期的峰值电压 U_1 就是电弧维持电压 U_a 。

4.2 空气缝隙长度的影响

图 6 是使用长度为 259 cm 的 A 型绝缘子得到的试验结果，由图 6 可知，随着空气间隙长度的增加，电弧维持电压也增加。这说明要维持较长的电弧燃烧，就需要施加较高的电压。当泄漏电流在 0.02 A 和 0.6 A 之间增加时，电弧维持电压保持一恒定值或略有减少。

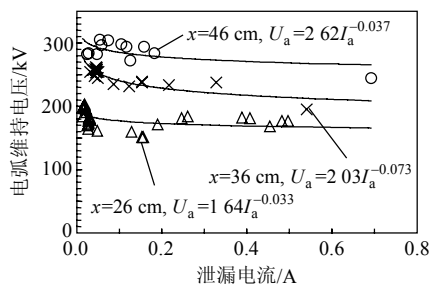


图 6 不同空气间隙长度下电弧维持电压与泄漏电流的关系

Fig. 6 The arc maintenance voltage as a function of leakage current for different air gap lengths

4.3 绝缘子长度的影响

图 7 是空气间隙固定为 36 cm 的 A 类绝缘子长度由 206 cm 变化到 306 cm 的试验结果。由图 7 可以看出，随着绝缘子长度的增加，电弧维持电压也随之增加。这说明，对于较长的绝缘子，在相同长度的空气缝隙下，需要较高的附加电压来维持电弧，因此，在确定电弧维持条件以及覆冰绝缘子闪络模型的电弧重燃条件时，考虑绝缘子长度的影响是十分必要的。

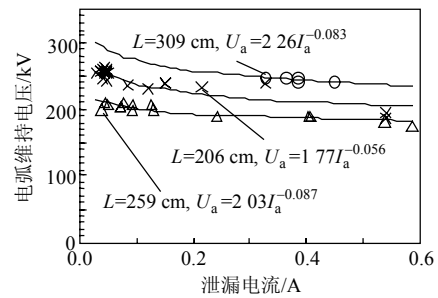


图 7 不同绝缘子长度下电弧维持电压与泄漏电流的关系

Fig. 7 The arc maintenance voltage as a function of leakage current for different insulator lengths

4.4 绝缘子直径的影响

图 8 给出了不同绝缘子类型下电弧维持电压与泄漏电流的关系。对 A 类绝缘子和 B 类绝缘子，空气间隙为 161 cm 和 16 cm。

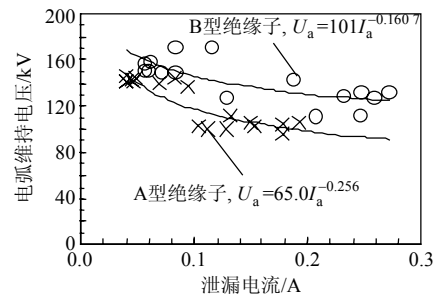


图 8 不同类型绝缘子的维弧电压与泄漏电流的关系

Fig. 8 The arc maintenance voltage as a function of leakage current for different insulator types

由图 8 可以看出，B 类绝缘子的直径大于 A 类绝缘子，前者的电弧维持电压也高于后者，所以绝缘子的直径也影响维持电压的大小。这是由于不同直径的覆冰绝缘子的电阻不同，对电弧维持条件的影响也不同，所以对不同类型的绝缘子，在计算其覆冰状态下的闪络电压时，应使用不同的电弧维持条件。

4.5 电弧维持电压的数学表达

电弧维持条件是外施电压值 U_a 的大小，高于此值，电弧便可以稳定地燃烧于长度为 x 的空气间隙，它是空气间隙长度 x 和泄漏电流 I 的函数，但

反过来它又受冰的导电性及包括绝缘子长度的绝缘子形状参数的影响。

采用了3个不同长度的支柱绝缘子(59、103和161 cm)来测定电弧维持条件,结果如图9所示。

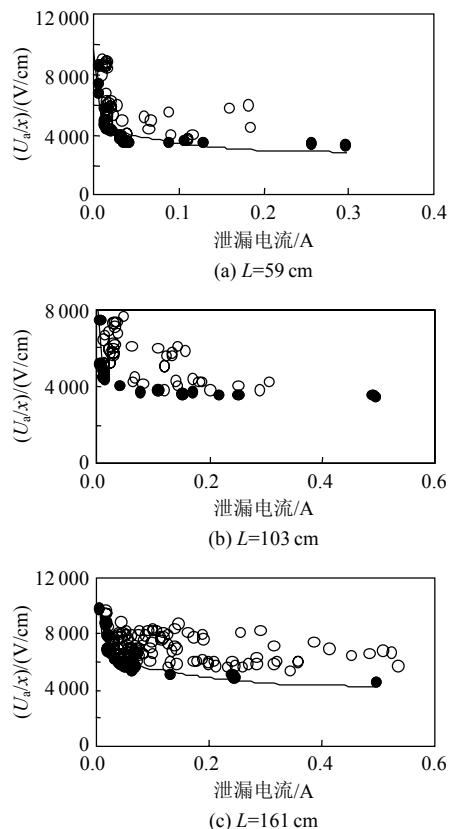


图9 电弧维持电压与泄漏电流的关系
Fig. 9 Arc maintenance condition as a function of leakage current

从图9可以看出,电弧维持电压和电弧长度的比值(U_a/x)与泄漏电流 I 相关。对不同的 I ,选择最小的 U_a/x 值作为临界点,通过回归方法可以求得电弧维持电压 U_a 为

$$U_a = \begin{cases} \frac{2\ 212.8x}{I^{0.193\ 4}}, & L=59 \\ \frac{2\ 849.1x}{I^{0.133\ 8}}, & L=103 \\ \frac{3\ 692.6x}{I^{0.173\ 9}}, & L=161 \end{cases} \quad (3)$$

4.6 讨论

在以往的模型中,用电弧重燃条件(能保证电弧稳定燃烧并沿冰表面传播的最小外施电压)来预测覆冰绝缘子的交流闪络电压,电弧重燃条件被假定与绝缘子串长度无关,使用一个较小的冰模型来确定。事实上,对于一个给定的电弧长度和泄漏电流值,要用同样的外施电压来保证电弧在不同长度的冰表面上维持燃烧是不可能的,所以,这导致了计

算长覆冰绝缘子串闪络电压的一些误差。

通过比较等式(3)和式(1),可以发现,电弧维持条件可以用下式表示

$$U_a = \frac{k'x}{I^{b'}} \quad (4)$$

式中 k' 和 b' 是电弧维持系数。

与等式(1)中认为是常数的 b 、 k 相反, k' 和 b' 的值取决于绝缘子长度 L 。随着 L 增大,系数 b' 略微变小,也就是说,对不同的绝缘子长度, U_a/x 相对于 I 的变化趋势是一样的(见图9)。但是当长度 L 变大时,系数 k' 明显增加,这就意味着,对于较长的绝缘子,同样的电弧长度需要较高的外施电压来维持。然而,要通过电弧维持条件来预测覆冰绝缘子的闪络电压,还需要进行进一步的研究。

5 结论

1) 当空气间隙长度增加时,电弧维持电压也随之增加,即较高的外施电压可以维持一个较长的燃烧电弧,然而,当泄漏电流在0.02 A和0.6 A之间增加时,电弧维持电压基本保持不变或略有减少。

2) 绝缘子的长度对电弧维持条件有明显的影 响,随着绝缘子长度的增加,电弧维持电压也随之增加,因此,在确定电弧维持条件以及覆冰绝缘子闪络模型的电弧重燃条件时,考虑绝缘子长度的影响是十分必要的。

3) 对于相同的绝缘子长度和空气缝隙长度,直径较大的绝缘子,维弧电压也比较高。

4) 较长的绝缘子需要较高的外施电压来维持相同长度的电弧。

参考文献

- [1] 夏慧恒. 220 kV 坪廊线绝缘子覆冰故障分析[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊1): 239-241.
Xia Huiheng. An analysis of the flashover trip of 220 kV pinglang transmission line[J]. Power System Technology, 2006, 30(S1): 239-241(in Chinese).
- [2] 蒋兴良, 苑吉河, 孙才新, 等. 我国±800 kV 特高压直流输电线路外绝缘问题[J]. 电网技术, 2006, 30(9): 1-9.
Jiang Xingliang, Yuan Jihe, Sun Caixin, et al. External insulation of ±800 kV UHV DC power transmission lines in China[J]. Power System Technology, 2006, 30(9): 1-9(in Chinese).
- [3] Chisholm W A, Ringler K G, Erven C C, et al. The cold fog test[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(4): 1874-1880.
- [4] 胡毅. 输电线路大范围冰害事故分析及对策[J]. 高电压技术, 2005, 31(4): 14-15.
Hu Yi. Analysis and countermeasures for large area accident cause by icing on transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(4): 14-15(in Chinese).

- [5] Farzaneh M. Ice accretions on high-voltage conductors and insulators and related phenomena[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society, 2000, 358(1776): 2971-3005.
- [6] 李鹏, 范建斌, 李武峰, 等. 高压直流输电线路的覆冰闪络特性[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 74-78.
Li Peng, Fan Jianbin, Li Wufeng, et al. Icing flashover performance of HVDC transmission lines[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 74-78(in Chinese).
- [7] 张志劲, 蒋兴良, 孙才新. 污秽绝缘子闪络特性研究现状及展望[J]. 电网技术, 2006, 30(2): 35-40.
Zhang Zhijin, Jiang Xingliang, Sun Caixin. Present situation and prospect of research on flashover characteristics of polluted insulators[J]. Power System Technology, 2006, 30(2): 35-40(in Chinese).
- [8] 蒋兴良, 舒立春, 张志劲, 等. 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, 25(14): 158-163.
Jiang Xingliang, Shu Lichun, Zhang Zhijin, et al. Study on AC flashover performance and process of long iced insulator strings[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(14): 158-163(in Chinese).
- [9] 马俊, 蒋兴良, 张志劲, 等. 交流电场对绝缘子覆冰形成的影响机理[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 7-11.
Ma Jun, Jiang Xingliang, Zhang Zhijin, et al. Study on the influence mechanism of AC electrical field on ice accretion on insulator string[J]. Power System Technology, 2008, 32(5): 7-11(in Chinese).
- [10] Farzaneh M, Baker T, Bernstorff A. Insulator icing test methods and procedures[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(4): 1503-1515.
- [11] Volat C, Farzaneh M. Three-dimensional modeling of potential and electric-field distributions along an EHV ceramic post insulator covered with ice-part II: effect of air gaps and partial arcs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(3): 2014-2021.
- [12] Farzaneh M, Fofana I, Tvakoli C, et al. Dynamic modeling of dc arc discharge on ice surfaces[J]. IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, 2003, 10(3): 463-474.
- [13] 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, 1999, 22(11): 115-120.
Sun Caixin, Shu Lichun, Jiang Xingliang, 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, 1999, 22(11): 115-120(in Chinese).
- [14] Zhang J, Farzaneh M. Propagation of AC and DC arcs on ice surfaces[J]. IEEE Trans on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(2): 269-276.
- [15] 杨庆, 司马文霞, 孙才新, 等. 覆冰绝缘子交直流闪络场路模型的研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(6): 13-19.
Yang Qing, Sima Wenxia, Sun Caixin, et al. Research on DC and AC flashover field-circuit model of ice-covered HV insulator[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(6): 13-19(in Chinese).
- [16] Farzaneh M, Zhang J, Chen X. Modeling of the AC arc discharge on ice surfaces[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(1): 325-338.



董玉冰

收稿日期: 2010-06-10。

作者简介:

董玉冰(1976), 女, 讲师, 研究方向为电力电子、高电压工程等, E-mail: dyblbq@126.com;

M.Farzaneh(1948), 男, 博士生导师, 研究方向为电力系统绝缘;

张建辉(1961), 男, 教授, 研究方向为高电压工程。

(编辑 褚晓杰)