

文章编号:1000-3673(2001)10-0069-04

# 提高线路绝缘子防污闪及抗泄漏性能的新方法

李晓峰<sup>1</sup>, 李正瀛<sup>1</sup>, 陈俊武<sup>1</sup>, 王 燕<sup>1</sup>, 张国胜<sup>1</sup>, J. M. K. MacAlpine<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学电力系, 湖北省武汉市 430074; 2. 香港理工大学电力系, 香港 SAR)

## A NEW METHOD FOR IMPROVING FLASHOVER AND LEAKAGE CHARACTERISTICS OF LINE INSULATORS

LI Xiao-feng<sup>1</sup>, LI Zheng-ying<sup>1</sup>, CHEN Jun-wu<sup>1</sup>, WANG Yan<sup>1</sup>, ZHANG Guo-sheng<sup>1</sup>, J. M. K. MacAlpine<sup>2</sup>

(1. Huazhong University of Science &amp; Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China;

2. The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong SAR, China)

**ABSTRACT:** In this paper a new method is described in which an annular metal sheet coated with silicone rubber is added at the base of the conventional insulator cap to improve the insulator unit's performance under both clean and polluted conditions. The annular metal sheet is connected to the insulator iron cap and makes the electric field distribution more uniform, which increases the corona onset voltage. The annular metal sheet also makes the electric field direction on the insulator upper surface approximately perpendicular to the insulator surface, rather than parallel, as on the conventional insulator, therefore the development of the discharge is restrained. At same time, the annular coated with silicon rubber which possesses good pollution-proof performance can increase the creepage distance, reduce leakage current and raise the flashover voltage. The experimental results obtained coincide with the results of theoretical analyses. The fine performance of novel insulator is approved. After fully immersing the novel insulator into the sodium chloride solution at density of 10g/l, its flashover voltage is multiplied, the corona onset voltage increased more than 70% and the leakage current decreased nearly 30% under the same polluted conditions.

**KEY WORDS:** line insulator; corona; pollution flashover; leakage current

**摘要:** 文章介绍了通过在传统的瓷质或玻璃线路绝缘子的铁帽底部加装一表面覆盖硅橡胶的金属环片的新方法, 可以使绝缘子表面电场分布更均匀, 以提高起晕和闪络电压; 使电场方向更垂直于绝缘子上表面, 以抑制放电的发展; 同时金属环片外表面覆盖的具有良好防污性能的硅橡胶材料可以极大地增加爬电距离, 降低泄漏电流和提高闪络电压。实验结果和理论分析相吻合, 证实了采用该方法改进后的新型绝缘子的优良性能。经 10 克/升的氯化钠溶液充分浸泡后, 新

型绝缘子的干污闪电压比普通绝缘子至少提高了 170%, 起晕电压提高了近 70%, 泄漏电流减少了近 30%。

**关键词:** 线路绝缘子; 电晕; 污秽闪络; 泄漏电流

**中图分类号:** TM854 **文献标识码:** A

### 1 引言

传统的瓷质和玻璃绝缘子在严重污秽条件下经常发生污闪放电, 越来越难以满足输电线路运行稳定性和安全性的要求, 这主要是由于瓷和玻璃表面自由能很高, 容易吸附水分和污物的缘故<sup>[1,2]</sup>。为了提高瓷和玻璃绝缘子在严重污秽状况下的闪络电压、降低泄漏电流, 国内目前通常采取的措施有:

(1) 设计适宜的几何结构 如加大爬电距离、增加防雨淋区域、利用空气动力学原理降低污物积聚等措施<sup>[1,3]</sup>。但实际应用证明, 采用这些方法设计制造的防污型绝缘子在洁净和比较洁净的环境下很有效, 但在严重污秽的环境下效果却很不理想, 而且更进一步改进的余地不大<sup>[4]</sup>。

(2) 在绝缘子表面涂自由能较低的涂料, 如涂室温硫化硅橡胶 RTV 等来阻止绝缘表面形成水膜<sup>[1,5]</sup>。这一方法在新涂时效果较显著, 但 RTV 等涂层易受电弧、紫外线及其它外界环境的侵害, 寿命一般只有几年。停电更换线路绝缘子、除净受损涂层、再重新涂上新涂料的工作量是十分巨大的, 在有些线路上是不可能的<sup>[6]</sup>。

(3) 在绝缘子边缘粘贴一圈增爬裙来加大爬电距离 这一方法效果也很明显, 但增爬裙和绝缘子的接合部位结构脆弱, 影响了其寿命, 限制了其使用<sup>[7]</sup>。

另外,上述各项措施都仅仅从增加爬电距离、改变几何形状和选用防污型材料着眼,没有从改善电场分布这一导致起晕和闪络的根本原因考虑。改善绝缘子外表面的电场分布,包括减小场强最大区域的电场强度值和使基本上平行于绝缘子上表面的电场方向变为基本上垂直于上表面,都能从根本上抑制放电的发生和发展<sup>[4]</sup>。本文介绍的提高线路绝缘子防污闪及抗泄漏性能的新方法即着眼于此,并通过可靠的工艺手段,采用高温硫化硅橡胶这一优良防污材料来综合提高绝缘子的防电晕、耐闪络和抗泄漏的性能,尤其是在污秽和潮湿状态下的性能。

## 2 新方法简介

采用新方法设计的绝缘子结构如图1所示,在普通绝缘子铁帽上加装一外表面覆盖硅橡胶的金属环片,金属环片的内径和铁帽外径应匹配,以确保安装紧密;外径约为绝缘子盘径的三分之二。金属环面既可以为平面也可以是和绝缘子上表面弧度基本相同的弧面,这取决于绝缘子上表面的形状、加工工艺、改造成本及改进效果。总的说来,和绝缘子上表面形状相同的环面更能满足改善电场分布的要求,而采用统一的平面形状则便于加工制作。

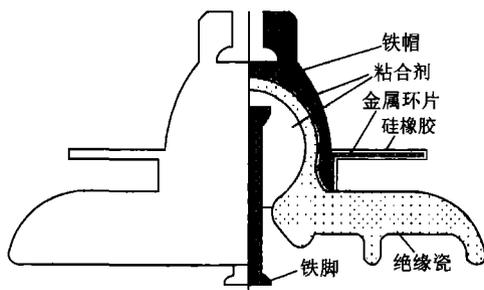


图1 新型绝缘子结构示意图  
Fig.1 Novel hybrid insulator structural diagram

新型绝缘子的制作及装配过程如下:首先将一厚度为2 mm左右的金属板加工成尺寸和形状如图1所示的环片,然后使用适宜的模具,在高温下将厚度为2 mm左右的硅橡胶硫化到金属环片的上下表面及外侧面,保持内侧金属面的洁净。然后将这一部件装配到铁帽上,装配过程中除须保证牢固外,还应保证金属环片的内侧面和铁帽之间有良好的电接触。金属环片外侧的硅橡胶和绝缘瓷接合处应涂上一层绝缘胶,以防止在此处发生电晕和闪络。新增部件的具体安装位置视绝缘子型号而定,总的原则是位置要适宜:既不能离绝缘子表面太近以免环片外端与绝缘子表面的空间距离太短而造成空气击穿;

也不能太远,以防金属环片改善电场分布的功效被削弱。

## 3 比较分析

### 3.1 电场分布的计算分析

正如一般绝缘表面的局部放电首先始于电晕一样,导致高压绝缘子最终闪络的放电过程最先也是始于电晕。而对于处于一定介质中的绝缘表面电晕发生的决定性因素是电场分布,即电场强度的大小和方向。为便于对比分析,我们用计算机仿真软件 ElecNet<sup>[8]</sup>绘制出图2和图3所示的单个普通瓷质绝缘子和新型绝缘子的等位线分布。

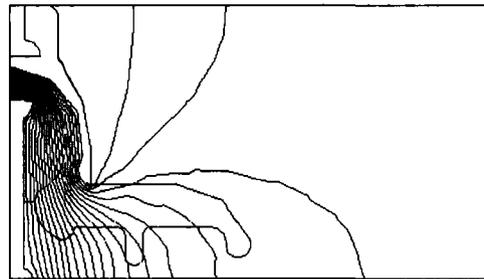


图2 普通绝缘子等位线分布图  
Fig.2 The equipotential distribution of the traditional ceramic insulator

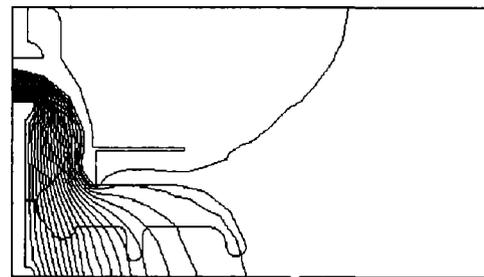


图3 新型绝缘子等位线分布图  
Fig.3 The equipotential distribution of novel hybrid ceramic insulator

从图2和图3可以看出,普通瓷质绝缘子的上表面特别是靠近铁帽部分的表面与等位线基本垂直;而新型绝缘子的等位线与绝缘子上表面基本平行。由电力线垂直于等位线可以知道,普通瓷质绝缘子上表面电力线的方向基本上平行于上表面;而新型绝缘子上表面电力线的方向基本上垂直于上表面。由于方向与表面平行的电场使导电粒子易于沿面发展,最终导致闪络击穿;而与表面垂直的电场则相反,不易激励导电粒子沿面发展,所以说新型绝缘子的电场方向要优于普通绝缘子。同时,加了金属环片后,沿面放电被抑制了,因而沿绝缘子表面的泄漏电流便相应地减小了,从而有利于减少输电线路的损

耗<sup>[9]</sup>。另外,加装金属环片后,铁帽处电场强度的最大值可以降低一半以上,这也有利于抑制常由此处发生的电晕和闪络。

还应特别指出的是:无论是普通耐污型绝缘子还是涂 RTV 层或加增爬裙的绝缘子,当其表面受污并受潮(导电率增大)后,绝缘子表面的电场分布就改变了,变得有利于沿面放电的发展。而利用本文所论述的新方法改进后的新型绝缘子,当其金属环片上的硅橡胶积污并受潮后,仍然处在基本相同的等位面上,畸变电场分布的程度较小,因而有利于提高绝缘子在污秽和潮湿状况下的闪络电压和起晕电压,并降低泄漏电流。

### 3.2 性能比较

由于硅橡胶材料具有良好的绝缘性能,足够厚度的硅橡胶在运行条件下和瓷质部分一样很难被击穿,所以新型绝缘子即使发生放电也只能由金属环片上部的铁帽处开始,经由环片外部的硅橡胶表面,再沿原来的瓷质表面到铁脚处构成通路,或者由铁脚处开始,到铁帽处构成回路。可以看出,表面覆硅橡胶的金属环片除了改善电场分布外,也显著地增加了爬电距离,这与用增爬裙改进普通线路绝缘子的目的是相同的,不同的是由于金属环片上的硅橡胶是经过高温硫化后固定上去的,其坚固性、稳定性和长寿命是增爬裙结构所无法比拟的。同时,由于瓷质和玻璃绝缘子在严重污秽状况下的表现不理想,也使得我们必须寻找更可靠的绝缘材料和更可靠的技术手段来提高它们在此状况下的绝缘性能<sup>[6]</sup>。有机绝缘材料,特别是高温硫化硅橡胶的优良性能已经被实践所证实,由其制作的绝大部分绝缘子已经使用了20年以上,仍然具有良好的绝缘性能并且没有明显的放电痕迹<sup>[10]</sup>,这一优良性能主要是由于硅橡胶的憎水性和其内部的小分子易于迁移到外表面的性质所决定的:憎水性使得其表面不易形成水膜,而小分子迁移到外表面有利于修补由于污秽积累而受损的憎水性并包裹污物而使放电和闪络不易沿面发展<sup>[11]</sup>。因此,由金属环片外表面的高温硫化硅橡胶所增加的爬电距离自然比单纯增加瓷质爬电距离效果要好得多<sup>[7]</sup>。

### 3.3 新方法的其它优势

除上述特点外,金属环片外部的高温硫化硅橡胶与 RTV 涂层及一般有机绝缘子相比,还具有更好的稳定性和长寿命。和 RTV 涂层相比的优越性前已叙及,和一般有机绝缘子相比其优势主要体现

在良好的机械性能、抗电弧和承受环境影响上。本文所述的新型绝缘子内部由机械性能相当稳定的金属、瓷和水泥等粘合剂混合而成,耐电弧和外部环境如射线等的侵害;而一般有机绝缘子内部的玻璃纤维棒易碎且易受电弧、射线等的破坏。

最后,金属环片增加了绝缘子自身的电容,起均压环作用,有利于改善绝缘子串上的电压分布,提高了绝缘子串的整体绝缘性能<sup>[12]</sup>。

## 4 试验及分析

### 4.1 试验步骤

为了验证上述分析,分别测量了洁净和污秽两种状态下普通瓷质绝缘子和加装表面被覆硅橡胶金属环片后的新型绝缘子的交流起晕电压、闪络电压和10 kV 下的泄漏电流。试验所使用的绝缘子型号为 X-4.5,盘径260 mm,高160 mm,爬电距离290 mm。金属环片所使用的金属为碳钢,厚度为2 mm,外径为210 mm,内径与安装处的铁帽外径相匹配,硫化后硅橡胶厚度为2 mm,金属环面为平面(参见图1)。

洁净试验是将加装金属环片前后的瓷质绝缘子清洗干净后进行试验。污秽实验开始前,首先将两种类型的洁净绝缘子投入浓度为10 g/L 的氯化钠溶液中充分浸泡。10 min 后取出,自然晾干24 h 进行试验。为了保证试验的可比性,试验时保持试验场地、装置、大气条件等要素基本相同,两种类型的绝缘子交替进行试验。

由于所使用试验装置的最大试验电压为100 kV,同时型号 X-4.5 的绝缘子在实际挂网运行时单片承受电压一般远低于100 kV,所以在此对比试验中没有进行100 kV 以上的试验。

### 4.2 试验结果

两种类型绝缘子的交流起晕电压、闪络电压和10 kV 电压下的泄漏电流值如表1所示。以示波器上显示的泄漏电流波形开始明显跳跃时为电晕开始的标志。

### 4.3 试验结果分析

从表1可以看出,洁净状态下新型瓷质绝缘子的起晕和闪络电压较普通型分别提高了近44%和44%以上;在用10 g/L 氯化钠溶液充分浸泡后的污秽状态下,这一比例分别是72%和170%以上。

同时可以看出,洁净状态下新型绝缘子的交流泄漏电流仅降低了6%,不明显;而污秽状态下的泄

漏电流则降低了近30%，这无疑对减少输电线路污秽状态下的电能损失具有重要意义。

表1 两种类型绝缘子的交流起晕电压、闪络电压和10 kV 电压下的泄漏电流  
Tab. 1 The leakage current (under 10 kVrms), corona initialization and flashover voltage of the two types of insulators

表面状况	绝缘子类型	泄漏电流 / $\mu$ A	起晕电压 /kVrms	闪络电压 /kVrms
洁净	普通型	150	15.5	69.2
	改进型	141	22.4	>100
污秽	普通型	210	18.6	37.0
	改进型	148	32.0	>100

以上试验结果和分析相吻合,证明本文所论述的新型绝缘子确实具有优良的绝缘性能,特别是在污秽状态下的耐闪络和降低泄漏电流效果显著。

## 5 结论

通过理论分析和试验验证,本文所述提高线路绝缘子防污闪及抗泄漏性能的新方法具有下列优点:

(1)和铁帽相连接的金属环片改变了绝缘子上表面的电场强度方向,即由原来的基本平行于上表面变更为基本垂直于上表面,有利于抑制沿面放电的发展,提高闪络电压。

(2)金属环片可以使电场分布更均匀,降低了铁帽处的最大电场强度,有利于提高起晕和闪络电压。

(3)金属环片可以增大绝缘子本身的电容,起均压环作用,有利于改善绝缘子串上的电压分布,提高绝缘子串的整体绝缘性能。

(4)采用具有良好憎水性和自恢复性的硅橡胶来覆盖金属环片以增大爬电距离,比单纯增加表面瓷质爬电距离的普通耐污型绝缘子效果要更好。

(5)泄漏电流的减小,有利于降低输电损耗。

(6)制作工艺简便、成本低廉,结构稳定坚固、寿命长。克服了RTV涂层和增爬裙等方法的不足。

(7)本文所提出的新方法,不仅适用于现有绝缘子的改进(加装环片),而且也可在绝缘子的设计、制造过程中考虑一次成型,以更好地提高绝缘性能和降低制作成本。

## 参考文献:

[1] Gorur R S,Cherney E,Tourreil C D,*et al.* Protective coatings for improving contamination performance of outdoor high voltage ce-

ramic insulators [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995,10(2):924-933.

- [2] Chang R J,Shah M,Mazeika L,*et al.* Design of insulators for severe contamination[C]. Proceedings of the 5th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, May 25-30, 1997, :778-781.
- [3] Dewey B F. Tests on insulators reveal danger signs for silicones [J]. Electrical World, March 1969.
- [4] Farag A S,Zedan F M,Cheng T C,*et al.* New dc insulator design for use in the desert environment [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation,1990,25(2):435-448.
- [5] Cherney E A,Gorur R S. RTV silicone rubber coatings for outdoor insulators[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,1999,6(5):605-611.
- [6] Eldridge K,Xu J,Yin W,Jeffery A M. Degradation of a silicone-based coating in a substation application [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1999,14(1):188-193.
- [7] Xi L,Wang S,Fan J,Guan Z. Development of composite insulators in china [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation. 1999,6(5):586-594.
- [8] Infolytica Ltd. ElecNet v. 6. 1. Abingdon, Oxford, U. K,2000
- [9] Horten K,Kutil A,Roder R,Mohaupt P. New insulator design for gas insulated high voltage apparatus with advantageous composite application [C]. High Voltage Engineering Symposium, 22-27 August 1999.
- [10] Bognar A,Szaploneczay P,Pinter Sz,Banhegyi G. Investigation on a 20 years old composite insulator [C]. 10th International Symposium on High Voltage Engineering (ISH'97), Montreal, 25-29 August 1997:325-328.
- [11] Reynders J P,Jandrell I R,Reynders S M. Review of aging and recovery of silicone rubber insulation for outdoor use [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,1999,6(5):620-631.
- [12] 朱德恒,严璋. 高电压绝缘 [M]. 北京:清华大学出版社,1992,2.

收稿日期:2000-09-28; 改回日期:2000-12-27.

作者简介:

李晓峰(1969-),男,博士研究生,从事输电线路绝缘及防雷方面的研究;

李正瀛(1938-),男,博士生导师,教授,从事高电压新技术的研究;

陈俊武(1964-),男,讲师,从事高电压教学、科研及新产品开发工作;

王燕(1965-),女,工程师,从事高电压教学与科研工作;

张国胜(1945-),男,副教授,从事高电压教学与科研工作;

J. M. K. MacAlpine(1942-),男,博士,副教授,从事气体放电及绝缘方面的研究。

(编辑 宋书芳)