

复合绝缘子高压端输电导线安装绝缘护套的研究

梅红伟¹, 陈金君², 彭功茂¹, 王黎明¹, 关志成¹

(1. 清华大学深圳研究生院, 广东省 深圳市 518055; 2. 广东电网公司揭阳供电局, 广东省 揭阳市 522000)

Research on Insulation Jacket Put on Transmission Line Conductor Hung by Composite Insulator

MEI Hongwei¹, CHEN Jinjun², PENG Gongmao¹, WANG Liming¹, GUAN Zhicheng¹

(1. Graduate School at Shenzhen, Tsinghua University, Shenzhen 518055, Guangdong Province, China;

2. Jieyang Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Corporation, Jieyang 522000, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: A novel method of putting the insulation jacket on transmission line conductor was proposed to improve the electric field strength of high potential side of composite insulator and the principle was studied in detail. The physical model of this method was given in the case of dry contamination. The feasibility of this method was confirmed and the effects of insulation jacket parameters were analyzed. Based on these theoretical results mentioned above, the finite element method was used to study the relationship between the jacket parameters and the electric field strength of high voltage side of composite insulator, the simulation results were consistent with the theoretical results and the possible adverse factors as well as the corresponding solutions were also given. The experimental research on the relationship between the breakdown voltage and the thickness of insulation jacket was done, and the curve of relationship was drawn. Immediately, a kind of 220 kV composite insulator was taken as the research object. The specific implementation measure putting on the insulation jacket was given. Its corona inception voltage and contamination flashover voltage were obtained under the condition of with and without the insulation jacket. The correctness and feasibility of the proposed method were verified by the test results.

KEY WORDS: composite insulator; insulation jacket; high potential side; electric field strength; breakdown voltage; corona inception voltage; contamination flashover voltage

摘要: 提出在复合绝缘子高压端输电导线上安装一定长度的绝缘护套来改善其高压端电场强度的方法, 并对该方法的原

理和实施效果进行详细研究。建立污秽复合绝缘子干燥情况下在高压端输电导线加绝缘护套的物理模型, 分析护套参数对实施效果的影响, 得到了安装绝缘护套的理论依据。在此基础上, 通过有限元仿真研究护套具体参数与复合绝缘子高压端电场改善效果的关系, 并给出安装护套后可能出现的不利因素以及相应解决办法。最后, 试验给出了均匀电场下绝缘护套的击穿电压与其厚度的关系; 并以 220 kV 复合绝缘子为例, 研究了安装绝缘护套前后复合绝缘子起晕电压和污闪电压的变化情况。试验结果证实了所提安装绝缘护套方法的正确性和可行性。

关键词: 复合绝缘子; 绝缘护套; 高压端; 电场强度; 击穿电压; 起晕电压; 污闪电压

0 引言

复合绝缘子因憎水性及憎水迁移性好, 在同等污秽条件下, 闪络电压是瓷、玻璃绝缘子的 2 倍左右; 同时, 还具有伞型平滑、杆径细、重量轻、机械强度高优点, 因此在输电线路得到了广泛应用, 极大提高了输电线路的外绝缘水平^[1-6]。截至 2008 年底, 各电压等级的交流输电线路挂网运行的复合绝缘子约 200 万支, 占瓷、玻璃和复合绝缘子全部总量的 31%。

但是, 复合绝缘子自身电容较小, 而对地、对导线的杂散电容相对较大, 导致其端部尤其是高压端电场强度比同等情况下的玻璃或瓷绝缘子串大。当电场强度超过空气起晕电场强度时, 便会产生电晕放电。电晕放电会生成臭氧及氧化氮等产物, 破坏复合绝缘子端部密封, 腐蚀芯棒; 还会使复合绝缘子伞裙材料的老化, 从而降低复合绝缘子的电气性能和机械性能, 给输电线路的安全稳定运行带来隐

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2009CB724503)。

The National Basic Research Program of China (973 Program) (2009CB724503)

患。此外，电晕放电还会产生噪声和无线电干扰信号，影响附近居民的正常生活^[7-14]。因此，确保复合绝缘子长期安全稳定运行的关键是采取有效措施降低复合绝缘子高压端的电场强度。

本文提出一种在使用均压环情况下，在复合绝缘子高压端输电导线上安装一定长度的绝缘护套来进一步降低复合绝缘子高压端电场强度的方法。建立了安装绝缘护套后复合绝缘子的物理模型，给出了其污秽干燥情况下的等值电路，详细分析了绝缘护套参数对改善复合绝缘子高压端电场强度的影响，并通过试验证实了理论分析的正确性以及所提方法的有效性和可行性。

1 理论研究

文献[15]给出了运行中悬垂长串复合绝缘子的等效电路图，如图1所示。其中，复合绝缘子每个伞裙本身的电容为 C_k ，对导线的电容为 C_{Lk} ，对地电容为 C_{Ek} ；每个伞裙的电阻为 R_k ，包括体积电阻和表面电阻($k=1,2,\dots,n$ ， n 为复合绝缘子伞裙数)。

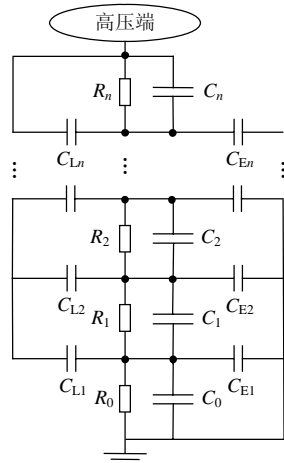


图1 复合绝缘子的等值电路

Fig. 1 Equivalent circuit of composite insulator

洁净或污秽干燥情况下，复合绝缘子的表面电阻和体积电阻都非常大，可以认为 $R_k \gg (\omega C_k)^{-1}$ ， $(\omega C_{Lk})^{-1}$ ， $(\omega C_{Ek})^{-1}$ ，沿复合绝缘子的电压分布主要由 C_k 、 C_{Lk} 和 C_{Ek} 决定，整支复合绝缘子对外可以等效为一个电容 C_1 。由于绝缘子的结构千差万别，其周围的环境也不一样，每种绝缘子的 C_k 、 C_{Lk} 和 C_{Ek} 值都不尽相同： C_k 值取决于绝缘子自身； C_{Lk} 和 C_{Ek} 值是随着绝缘子与周围环境的相对位置而定的，数值各异，改变绝缘子串的串型、布置方式等都会引起这2个数值的变化。因此，等效电容 C_1 值也同时受绝缘子自身和环境因素的影响。

复合绝缘子高压端输电导线安装绝缘护套的

原理图如图2所示。在洁净或污秽干燥情况下，护套体电阻和表面电阻都很大，导线夹与输电导线之间可以用一个电容来等效，定义为绝缘护套电容 C_s 。绝缘护套电容 C_s 的大小可以用如图3所示等效圆柱模型计算得到。

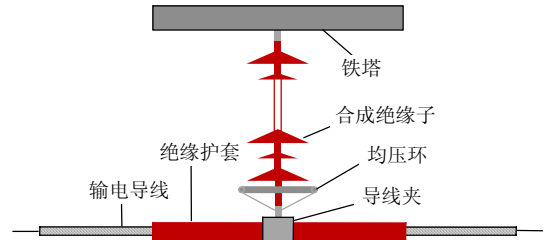


图2 复合绝缘子高压端导线安装绝缘护套的原理图

Fig. 2 Schematic of the insulator with insulation jacket on transmission line conductor near high potential side

如图3所示，绝缘护套厚度为 a ，介电常数为 ϵ ，输电导线半径为 b ，导线夹有效长度为 L ，则护套电容 C_s 的表达式^[16]为

$$C_s = L \frac{2\pi\epsilon}{\ln(1+a/b)} \tag{1}$$

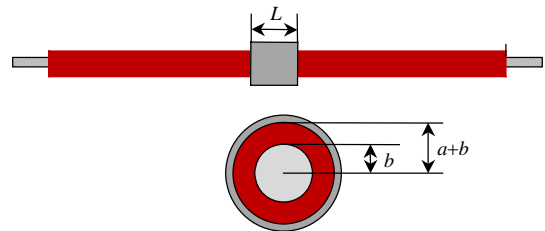


图3 护套电容的等效圆柱模型

Fig. 3 Equivalent cylindrical model of the jacket capacitor

至此，在洁净或污秽干燥情况下，复合绝缘子高压端输电导线安装绝缘护套的物理模型可以简化为复合绝缘子等效电容 C_1 和绝缘护套电容 C_s 的串联模型，如图4所示。其中， U_s 为护套承受的电压有效值； U_1 为复合绝缘子承受的电压有效值。

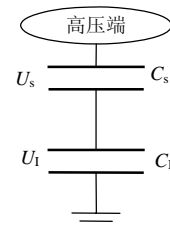


图4 污秽干燥情况下的物理模型

Fig. 4 Physical model in the case of dry contamination

假设线路运行电压的有效值为 U_L ，则绝缘护套和复合绝缘子承受电压的有效值为

$$U_s = U_L \frac{C_1}{C_s + C_1} \tag{2}$$

$$U_1 = U_L \frac{C_s}{C_1 + C_s} \quad (3)$$

由式(2)、(3)可以看出,由于绝缘护套的存在,复合绝缘子上承受的电压 U_1 比实际线路运行的电压 U_L 要低,减少的部分电压由绝缘护套承担。换一个角度去理解,即相当于复合绝缘子处于降压运行的状态。同时,复合绝缘子的等效电容 C_1 在实际使用中可以认为是一个固定值,其大小与复合绝缘子自身参数、环境参数、连接方式等有关。所以,控制绝缘护套电容 C_s 的大小,可以有效控制绝缘护套上承受的电压,从而控制复合绝缘子外绝缘性能的改善程度,但前提是必须保证绝缘护套上承受的电压小于其击穿电压,由于击穿电压与护套厚度直接相关,所以绝缘护套电容 C_s 与绝缘护套厚度 a 之间有一定的匹配关系。

由式(1)可以看出,控制绝缘护套电容 C_s 的大小,可以从控制绝缘护套厚度 a 、绝缘护套介电常数 ϵ 、输电导线半径 b 以及导线夹有效长度 L 的大小来实现。现实中,由于输电导线半径 b 的大小架线时就已经确定,无法修改;绝缘护套的材料一旦选定,也无法改变;所以主要通过控制绝缘护套的厚度 a 和导线夹的有效长度 L 来实现绝缘护套电容 C_s 的大小控制。绝缘护套厚度越大、导线夹的有效长度越小, C_s 的值就越小,复合绝缘子承受的电压也就越小。

2 有限元仿真

采用电磁场有限元分析软件 Maxwell,以国内某绝缘子厂的 220 kV 洁净或污秽干燥复合绝缘子为蓝本进行仿真建模,对安装绝缘护套的复合绝缘子轴向的电位分布、电场分布进行仿真计算。仿真模型考虑杆塔和输电导线的影响,忽略杆塔上地线、复合绝缘子相间作用和复合绝缘子伞裙的影响。模型求解空间取 $8\text{m} \times 8\text{m} \times 20\text{m}$ 的长方体,体内介质为空气;杆塔用门型塔模拟,塔高为 20m,大地用 $8\text{m} \times 8\text{m} \times 1\text{cm}$ 的长方体来模拟,杆塔与大地相连,考虑杆塔与大地需要良好的导电性能,两者的材料都设为铝;复合绝缘子用长 2.44m,直径 2.4 cm 的复合圆柱棒模拟,复合绝缘子高压端加均压环,均压环环径取 30cm,管径取 3cm(参照实际 220kV 复合绝缘子均压环参数);输电导线用长度为 5m,直径为 33.6 mm(参照 LGJ-630/45 导线)的铝圆柱棒模拟;考虑线路运行电压最大有 15% 的波动,导线运行电压有效值取 $220\text{kV}/1.732 \times 1.15 = 147\text{kV}$ 。整体

的三维仿真模型如图 5 所示。

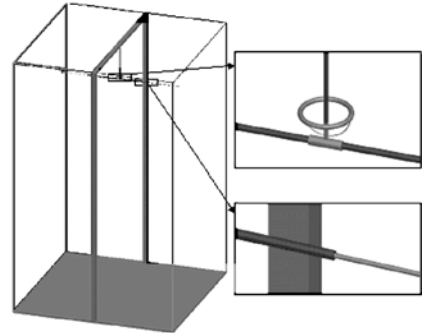


图 5 三维仿真模型

Fig. 5 Tree-dimensional simulation model

仿真结果如图 6—17 所示,表 1、2 为其具体数值。其中, l_i 为距复合绝缘子高压端的距离; l_j 为距绝缘护套一端的距离; φ_i, φ_j 分别为对应点的电位; E_i, E_j 分别为对应点的电场强度。

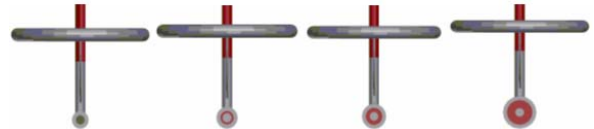


图 6 不同厚度绝缘护套的仿真模型

Fig. 6 Simulation models of jackets of different thickness

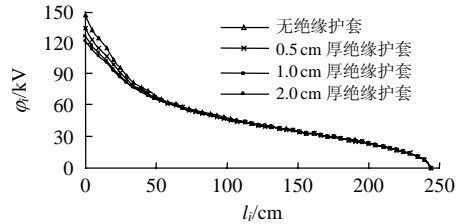


图 7 复合绝缘子沿面电位分布(不同厚度绝缘护套)

Fig. 7 Potential distribution along the insulator surface of different thickness jackets

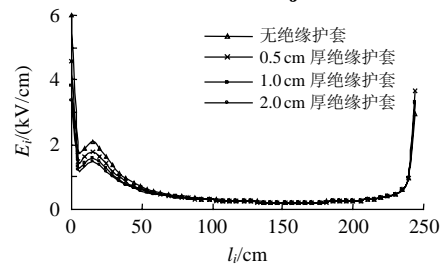


图 8 复合绝缘子沿面电场分布(不同厚度绝缘护套)

Fig. 8 Electric field distribution along the insulator surface of different thickness jackets

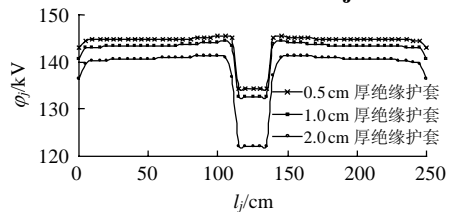


图 9 绝缘护套沿面电位分布(不同厚度绝缘护套)

Fig. 9 Potential distribution along the jacket surface of different thickness jackets

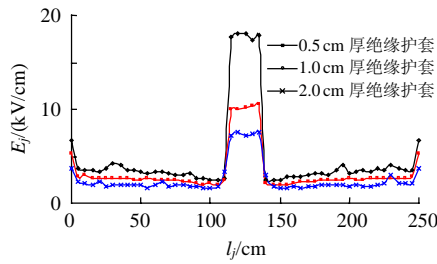


图 10 绝缘护套沿面电场分布(不同厚度绝缘护套)
Fig. 10 Electric field distribution along the jacket surface of different thickness jackets

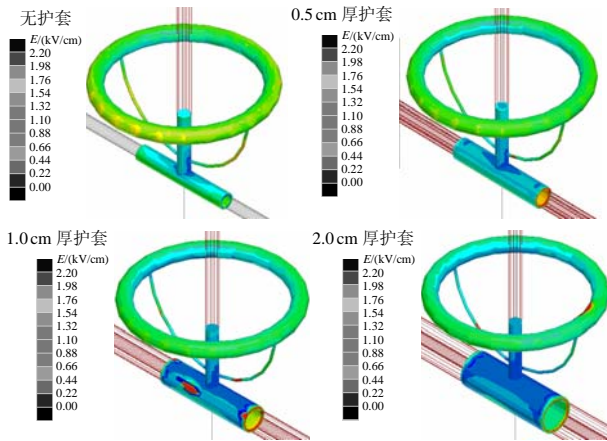


图 11 均压环表面电场云图(不同厚度绝缘护套)
Fig. 11 Electric field cloud on the surface of grading ring of different thickness jackets

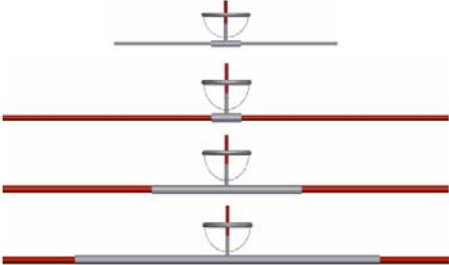


图 12 不同有效长度导线夹的仿真模型
Fig. 12 Simulation models of wire clips of different length

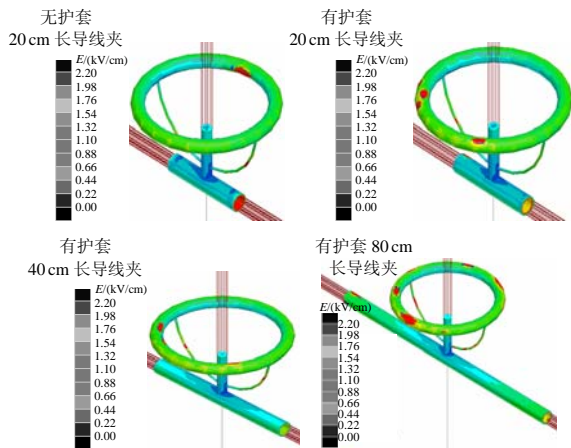


图 13 均压环表面电场云图(不同长度导线夹)
Fig. 13 Electric field cloud on the surface of grading ring of different length wire clips

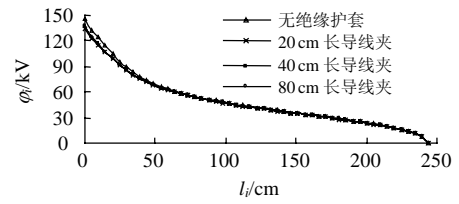


图 14 复合绝缘子沿面电位分布(不同长度导线夹)
Fig. 14 Potential distribution along the insulator surface of different length wire clips

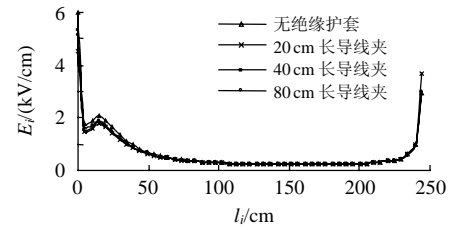


图 15 复合绝缘子沿面电场分布(不同长度导线夹)
Fig. 15 Electric field distribution along the insulator surface of different length wire clips

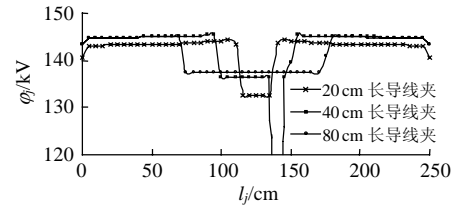


图 16 绝缘护套沿面电位分布(不同长度导线夹)
Fig. 16 Potential distribution along the jacket surface of different length wire clips

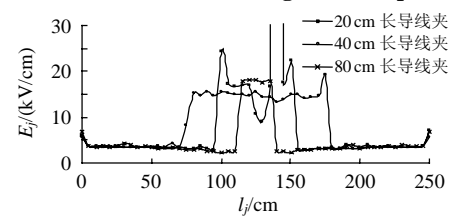


图 17 绝缘护套沿面电场分布(不同长度导线夹)
Fig. 17 Electric field distribution along the jacket surface of different length wire clips

表 1 绝缘护套厚度影响的仿真结果

Tab. 1 Simulation results of different thickness jackets

护套厚度/cm	复合绝缘子电位最大值/kV	复合绝缘子电场强度最大值/(kV/cm)	均压环表面电场强度	导线夹电场强度最大值/(kV/cm)
无护套	147	6.0	护套厚度增加, 均压环	—
0.5	134	4.6	表面电场强度减小	18.1
1.0	126	3.8		9.9
2.0	122	3.3		7.2

表 2 导线夹有效长度影响的仿真结果

Tab. 2 Simulation results of different length wire clips

导线夹有效长度/cm	复合绝缘子电位最大值/kV	复合绝缘子电场强度最大值/(kV/cm)	均压环表面电场强度	导线夹电场强度最大值/(kV/cm)
无护套	147	6.0	导线夹长度增加, 均压环	—
20	134	4.6	环表面电场强度增大。	18.1
40	136	5.1		17.1
80	138	5.3		14.3

由仿真结果可以看出：洁净或污秽干燥情况下，安装绝缘护套后复合绝缘子的沿面电位值和电场强度值都有所下降，下降程度与绝缘护套的厚度和导线夹的有效长度相关；同时，导线夹处的电场强度明显增大，成为最易电晕的位置。该结果与理论研究结论完全一致，说明复合绝缘子高压端导线安装绝缘护套能够有效抑制其高压端的电场强度，降低高压端均压环表面的电场强度。

仿真结果同时也揭示了一个新的问题，即导线夹处和绝缘护套端部电场强度畸变较大，如果不安装防电晕设施，很容易在这些地方发生电晕。所以，在绝缘护套应用时，有必要在导线夹处及护套两端安装防晕罩。

3 试验研究

3.1 绝缘护套材料厚度与击穿电压的关系

试验所用绝缘护套如图 18 所示，护套上有卡扣，可以掰开后包裹在输电导线上，而后再扣上。



图 18 绝缘护套
Fig. 18 Insulation jacket

本文进行绝缘护套材料厚度与击穿电压的试验研究，首先委托厂家用生产绝缘护套的材料制作 6 种不同厚度(1,2,3,4,5,6mm)、直径均为 10cm 的圆型试片，每种厚度的试片各制作 10 片，如图 19(a)所示；其次加工一对圆盘型平板电极(如图 19(b)所示)用来产生均匀电场，同时为了防止试片发生沿面放电而未能击穿，试验要求被测试片和电极都浸在绝缘油里进行；最后，每种厚度试片都做 10 次击

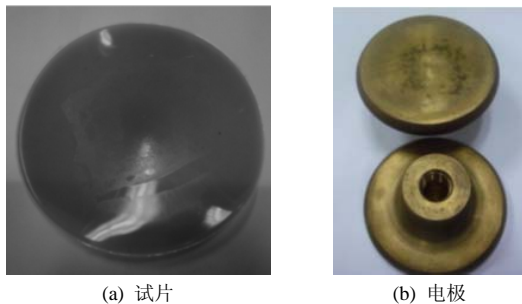


图 19 试片和电极
Fig. 19 Specimen and test electrode

穿试验，并记录下每次的击穿电压和试片击穿处的厚度，将 10 次试验得到的击穿处厚度的平均值和击穿电压的平均值作为厚度值和对应的击穿电压，所得试验结果如图 20 所示。从图中可以看出，均匀电场下绝缘护套材料的击穿电压与其厚度基本成线性关系，厚度越大，击穿电压越高。

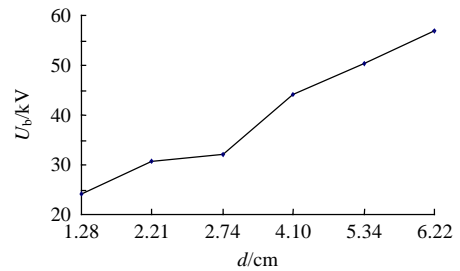


图 20 试片击穿电压的试验曲线

Fig. 20 Test curve of breakdown voltage of specimen

3.2 电晕试验

试品采用绝缘高度为 1.8 m 的复合绝缘子，其主要参数如表 3 所示。

表 3 绝缘子试品的主要参数

Tab. 3 Parameters of insulator samples

泄漏距离/mm	结构高度/mm	直径/mm
6 050	2 170	140*

注：*表示复合绝缘子直径为大伞和小伞的平均直径。

试验电源电压等级为 1 000 kV，系统稳定度为 1%；输电导线用 2 根长 6.5 m，直径为 34 mm 的镀锌管代替；铁塔用长度为 4 m 的长方体钢架结构代替；导线夹为普通跳线线夹；绝缘子两端均压环为厂家标配，导线夹和绝缘护套两端的防晕罩直径取为 40 mm；绝缘护套长度为 2 m，厚度分别取为 4 和 6 mm 这 2 种；导线夹的有效长度通过在绝缘护套上包裹导电铝箔来改变，原始长度为 25 cm，试验图片如图 21 所示。复合绝缘子起晕电压取复合绝缘子或其高压端均压环最先发生电晕时的电压。试验结果如表 4 所示。

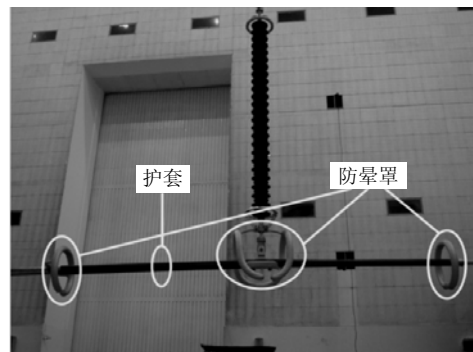


图 21 电晕试验照片

Fig. 21 Corona test photo

表4 电晕试验结果
Tab. 4 Results of corona test

试验条件	起晕电压/kV	起晕位置
25 cm 长线夹, 安装防晕罩	无护套	280 高压端均压环
	4 mm 厚护套	320 高压端均压环
	6 mm 厚护套	350 高压端均压环
100 cm 长线夹, 安装防晕罩	6 mm 厚护套	315 高压端均压环
25 cm 长线夹, 无防晕罩	无护套	200 高压端均压环
	4 mm 厚护套	174 导线夹端部
	6 mm 厚护套	168 导线夹端部

试验结果显示: 1) 安装绝缘护套及防晕罩后复合绝缘子的起晕电压得到了提高, 其值随着绝缘护套厚度的增加而增大(加 4 mm 厚度护套, 起晕电压提高 40 kV; 加 6 mm 厚度护套, 起晕电压提高 70 kV), 随着导线有效长度的增加而减小(加 25 cm 长导线夹, 起晕电压提高 70 kV; 加 100 cm 长导线夹, 起晕电压提高 35 kV)。2) 防晕罩有效改善了导线夹处的电场强度(无防晕罩时, 170 kV 左右导线夹发生电晕; 有防晕罩时, 导线夹 350 kV 还未电晕)。试验结果与第 2 节的仿真结果和理论研究结果一致, 同时也证实了防晕罩能够有效解决安装绝缘护套后导线夹处电场发生严重畸变的问题。

3.3 污闪试验

试品复合绝缘子的参数与电晕试验试品相同, 如表 3 所示。污闪试验中采用人工污秽试验的固体涂层法^[17-20], 用 NaCl 模拟导电物质, 用中国高岭土模拟惰性物质。采用定量涂污法, 按比例将高岭土、NaCl 和去离子水混合并均匀涂刷于绝缘子表面, 待污层干燥后进行试验。试验采用恒压升降法。复合绝缘子染污后阴干 15~18 h 进行试验。湿润方法为人工喷湿法。

试验条件: 海拔为 50 m, 盐密为 0.2 mg/cm^2 , 灰密为 1.0 mg/cm^2 。试验电源采用 750 kV 交流污秽电源试验装置, 该装置的电源系统满足 IEC 61245—1993 关于人工污秽试验电源的相关规定。

试验过程为: 装配好染污晾干后的复合绝缘子和护套(如图 22 所示), 用喷壶给绝缘子和护套均匀加湿, 用电机将绝缘子提升到一定高度, 而后利用升压法加压至其闪络。如果护套没有击穿, 把绝缘子放下来重新加湿, 再提升后升压闪络, 如此重复 3 次, 做 3 支绝缘子, 污闪电压取平均值。闪络过程中的电弧发展如图 23、24 所示, 试验结果如表 5 所示。

由表 5 的试验结果可以看出: 护套长度适中时



图 22 污闪试验照片

Fig. 22 Flashover test photo

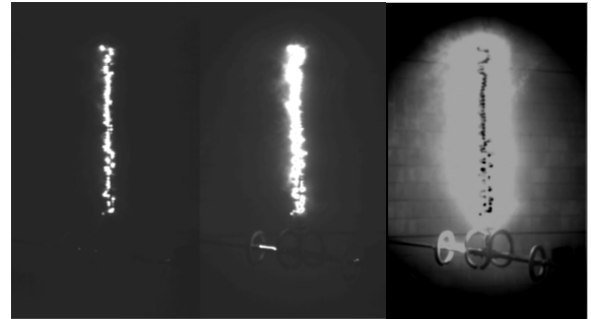


图 23 护套沿面闪络的电弧发展过程

Fig. 23 Performance of the arcs propagation with jacket surface flashover

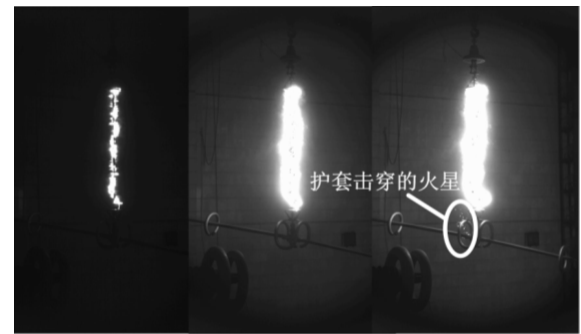


图 24 护套击穿的电弧发展过程

Fig. 24 Performance of the arcs propagation with jacket breakdown

表 5 污闪试验结果

Tab. 5 Results of flashover test

试验条件	污闪电压/kV
6 mm 厚护套, 25 cm 长线夹, 安装防晕罩	222
无绝缘护套	244
120 cm 长护套	213(护套被击穿)
284 cm 长护套	

能有效提高污闪电压; 护套长度太长时, 护套容易击穿, 污闪电压比不加护套时略低。其原因为: 护套长度适中时, 护套增大的泄漏距离得到了有效利用, 在升压至闪络的整个过程中, 护套承受的电压始终小于其击穿电压; 护套长度太长时, 护套增大

的泄漏距离没能得到有效利用, 护套承受的电压比例较大, 以至于在升压过程中, 护套先被击穿, 从而导致闪络。

4 结论

1) 复合绝缘子高压端导线安装绝缘护套的结构, 在污秽干燥的情况下可以等效成绝缘子电容和护套电容相串联的物理模型; 复合绝缘子承担电压的大小可以通过改变护套电容来实现, 而护套电容的大小可以通过改变护套厚度和导线夹的有效长度来调节。

2) 复合绝缘子高压端导线安装绝缘护套的结构, 导致导线夹和绝缘护套端部的电场强度畸变较大, 需要在相应位置安装合适的防晕设施。

3) 在合理选择绝缘护套厚度、长度以及安装防晕罩的情况下, 复合绝缘子高压端导线安装绝缘护套的结构既能降低复合绝缘子高压端电场强度, 提高其起晕电压, 又能增大泄漏距离, 提高其污闪电压。但是有 2 个问题还有待于进一步研究: 一是如何改善绝缘护套的机械性能, 使得导线夹对安装护套导线的握力能满足工程要求; 二是不同电压等级下, 绝缘护套的长度和厚度如何匹配才能实现最佳的效果。

参考文献

- [1] 关志成, 刘璞岩, 周远翔, 等. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 261-311.
Guan Zhicheng, Liu Yingyan, Zhou Yuanxiang, et al. Insulators and outdoor insulation of power transmission equipments[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006: 261-311(in Chinese).
- [2] 梁曦东, 戴建军. 防护复合绝缘子芯棒脆断的方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 136-140.
Liang Xidong, Dai Jianjun. A method for preventing brittle fracture of FRP rod of composite insulator[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 136-140(in Chinese).
- [3] 张锐, 吴光亚, 袁田, 等. 我国复合绝缘子关键制造技术的发展与展望[J]. 高电压技术, 2007, 33(1): 106-110.
Zhang Rui, Wu Guangya, Yuan Tian, et al. Development history and direction of composite insulators on important manufacture technique [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 106-110(in Chinese).
- [4] 刘泽洪. 复合绝缘子使用现状及其在特高压输电线路中的应用前景[J]. 电网技术, 2006, 30(12): 1-7.
Liu Zehong. Present situation and prospects of applying composite insulators to UHV transmission lines in China[J]. Power System Technology, 2006, 30(12): 1-7(in Chinese).
- [5] 张大全, 车德竟, 张万友, 等. 合成绝缘子端部金具的缝隙腐蚀研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 86-90.
Zhang Daquan, Che Dejing, Zhang Wanyou, et al. Study on crevice corrosion of end-fitted metallic hardware of composite insulator [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 86-90(in Chinese).
- [6] 赵林杰, 李成榕, 熊俊, 等. 基于带电检测的复合绝缘子憎水性评价[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 135-142.
Zhao Linjie, Li Chengrong, Xiong Jun, et al. Evaluation of the hydrophobicity of composite insulators based on on-line detection [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 135-142(in Chinese).
- [7] 刘振, 卞星明, 王黎明, 等. 特高压直流复合绝缘子均压环设计[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 137-141.
Liu Zhen, Bian Xingming, Wang Liming, et al. Calculation of electric field distribution along composite insulator strings and design of grading ring of UHVDC transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 137-141(in Chinese).
- [8] 卫李静, 王伯时, 汪忆新, 等. 均压环对复合绝缘子电场分布影响的研究[J]. 高压电器, 2006, 42(4): 262-267.
Wei Lijing, Wang Baishi, Wang Yixin, et al. Effects of shielding rings on the electric field distributions of composite insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(4): 262-267(in Chinese).
- [9] Zhao Tiebin, Comber M G. Calculation of electric field and potential distribution along non-ceramic insulators considering the effects of conductors and transmission towers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 313-318.
- [10] Que W, Sebo S A, Hill R J. Practical cases of electric field distribution along dry and clean non-ceramic insulators of high-voltage power lines[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(2): 1070-1078.
- [11] Electric Power Research Institute. Electric field modeling of NCI and grading ring design and application[R]. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute, 1999.
- [12] Philips J, Childs D J, Schneider H M. Aging of non-ceramic insulators due to corona from water drops[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3): 1081-1089.
- [13] Zhang Bo, He Jinliang, Cui Xiang, et al. Electric field calculation for HV insulators on the head of transmission tower by coupling CSM with BEM[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006, 42(4): 543-546.
- [14] Sima W, Espino-Cortes F P, Cheyney E A, et al. Optimization of corona ring design for long-rod insulators using FEM based computational analysis[C]//Conference Record of the 2004 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Indianapolis, USA: IEEE, 2004: 480-483.
- [15] 钟山. 复合绝缘子电场计算与分析[D]. 北京: 清华大学, 2000.
Zhong Shan. Calculation and analysis of electric field strength of composite insulator[D]. Beijing: Tsinghua University, 2000(in Chinese).
- [16] 孙春峰. 用复变反三角函数变换求共焦点椭圆柱形电容器的电势及电容[J]. 大学物理, 2005, 24(2): 13-15.
Sun Chunfeng. Calculation of the electric potential and capacitance of a confocal elliptic capacitor by transform of inverse trigonometrical function of complex variable[J]. College Physics, 2005, 24(2): 13-15(in Chinese).

- [17] 赵林杰, 李成榕, 姚继莎, 等. 用冷雾法研究复合绝缘子污秽闪络特性[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(18): 71-75.
Zhao Linjie, Li Chengrong, Yao Jisha, et al. Using a cold fog test method to study contamination flashover performance of composite insulators[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(18): 71-75(in Chinese).
- [18] IEC . IEC61245-1993 Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on DC systems[S]. Geneva: IEC, 1993.
- [19] 全国绝缘子标准化技术委员会. GB/T4585—2004 交流系统用高压绝缘子的人工污秽试验[S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
National Insulators Standardization Technical Committee. GB/T4585—2004 Artificial pollution tests on high-voltage insulators to be used on AC systems[S]. Beijing: Standard Press of China, 2005(in Chinese).
- [20] 全国高电压试验技术和绝缘配合标准化技术委员会. GB/T16927.1—1997 高电压试验技术[S]. 北京: 中国标准出版社, 1998.
National High Voltage Test Techniques and Insulation Coordination Standardization Technical Committee. GB/T16927.1—1997 High voltage testing techniques[S]. Beijing: Standard Press of China,

1998(in Chinese).



梅红伟

收稿日期: 2010-06-13。

作者简介:

梅红伟(1979), 男, 博士研究生, 主要从事高电压与绝缘技术、电力电子技术方面的研究, meihw07@mails.tsinghua.edu.cn;

陈金君(1973), 男, 工程师, 主要从事输电线路外绝缘方面的研究, cjj7300@sohu.com;

彭功茂(1981), 男, 博士研究生, 从事高电压技术方面的研究, pgm07@mails.tsinghua.edu.cn;

王黎明(1963), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事高电压外绝缘、输变电设备电晕、电磁环境及电工新技术的研究, wanglm@sz.tsinghua.edu.cn;

关志成(1944), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统外绝缘、特高压输电、输变电设备电晕、电磁环境等, guanzc@sz.ysinghua.edu.cn。

(责任编辑 张玉荣)