

复合绝缘子憎水性表面水滴的电场特性分析

王仲奕, 王琪, 陈青

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 基于复合绝缘子的污闪理论,通过两种简化的硅橡胶平板模型,应用电场有限元计算软件 ElecNet 分别模拟了复合绝缘子护套表面和伞裙表面水滴的电场特性,着重研究比较了水滴的体积、接触角、形状等参数对水滴表面电场的影响,分析了两种模型中影响水滴表面电场强度的主要因素,并计算了复合绝缘子表面附着水滴时的电场,得出复合绝缘子伞裙上下表面以及护套表面附着的分离水滴使电场大大增强的结论。

关键词: 复合绝缘子; 憎水性; 电场强度; 有限元

中图分类号: TM216

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)06-0005-07

Electric Field Analysis of Water Droplet on Hydrophobic Surface of Polymer Insulator

WANG Zhong-yi, WANG Qi, CHEN Qing

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The electric field characteristics of water droplets on surfaces of sheath and shed of polymer insulators are studied by means of two simplified flat silicone rubber sheet models. This study adopts both the pollution flashover mechanism of polymer insulator and the electric field computation software ElecNet. Effects of volume, contact angle, shape, and other parameters of water droplet on electric field are compared, and the main factors are obtained. The electric field distributions on polymer insulators with discrete water are also analyzed.

Key words: polymer insulators; hydrophobic surface; electric field; FEM

0 引言

复合绝缘子伞裙套表面具有良好的憎水性,绝缘子受潮后,表面形成分离水滴。试验研究^[1-5]表明:复合绝缘子的污闪机理与亲水性的瓷和玻璃绝缘子不同,憎水性表面分离水滴的存在会增强表面电场强度,水滴形状、大小等参数与表面憎水性强弱有关,而水滴的体积、接触角、形状、相邻水滴间距以及电导率影响水滴表面最大场强,改变绝缘子周围的电场分布,当水滴表面电场强度超过 $0.5 \sim 0.7 \text{ kV/mm}$ ^[6]的极限值时,水滴周围将首先发生电晕放电,使表面局部位置的憎水性下降,水滴伸展,表面形成湿润区,产生局部短路电流,降低表面电阻,为电弧的形成和发展提供通道。因此,复合绝缘子的污闪电压不仅仅取决于表面的污染程度,还取决于表面的憎水性能。

关志成等^[7]通过试验研究了硅橡胶表面水滴的起始电晕电压,认为水滴的起始电晕电压和起始电晕场强随着水滴间距的增大而增大;当水滴间距保持固定,起始电晕电压和起始电晕场强随着水滴体积的增大而减小。在电晕前后,水滴发生明显的变形。Que 和关志成等人^[7,8]计算研究了硅橡胶表面水滴的体积、接触角、形状、间距等参数对水滴周围电场增强程度的影响。但是,在 Que^[8]的计算模型中,水滴假设为半球形,忽略了不同憎水性对水滴接触角的影响。

笔者依据复合绝缘子表面憎水性及其评估准则,通过两种简化的硅橡胶平板模型,应用电场有限元计算软件 ElecNet 分别计算并分析了复合绝缘子护套表面和伞裙表面水滴的交流电场基本特性,着重研究了水滴的体积、接触角、形状、相邻水滴间距以及电导率对水滴表面最大电场的影响,分析了两种模型中影响水滴表面电场强度的主要因素,并计

收稿日期:2009-07-29

作者简介:王仲奕(1956),女,副教授,主要从事电气设备电磁特性分析及优化设计的研究。

算比较了复合绝缘子表面附着水滴时的电场, 为研究复合绝缘子的污闪机理提供理论依据。

1 复合绝缘子表面水滴电场计算模型

1.1 复合绝缘子表面憎水性评估标准

垂直悬挂的复合绝缘子表面的水滴可以分为 3 类:伞裙上表面的固着水滴(Sessile droplet)、伞裙下表面的悬垂水滴(Pendant droplet)和护套表面的附着水滴(Clinging droplet), 见图 1。

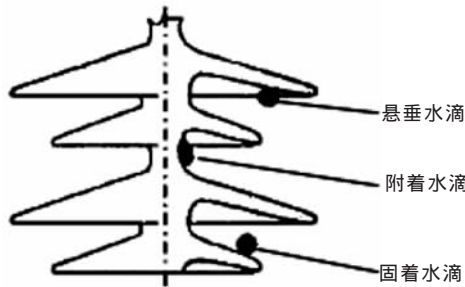


图 1 垂直悬挂绝缘子表面的 3 种水滴类型

在电场力作用下水滴发生变形, 沿电场方向被拉伸, 水滴的形状以及与憎水性表面的接触面积等参数会发生改变, 使得水滴周围的电场发生改变^[4]。国际上对憎水性能的评估一般采用图 2 所示的静态接触角 θ 和喷水分级两种方法。在相同水滴容量下, 接触角 θ 越大, 水滴与复合材料表面的接触面积越小, 憎水性越强, 复合材料表面越不容易被湿润; 相反, 接触角越小, 表面憎水性越弱, 表面越容易被湿润, 越容易形成水膜。

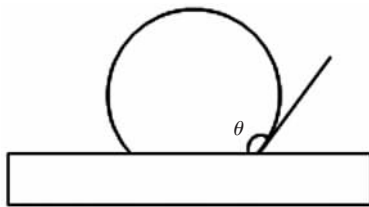


图 2 憎水性表面水滴的静态接触角

1.2 水滴电场计算简化模型

干燥洁净的复合绝缘子周围的电位分布见图 3 (以 4 伞裙为例, 不考虑均压环), 等电位线基本垂直于护套表面, 近似平行于伞裙上下表面。因此, 可以用图 4 所示的两种简化二维模型 (三维计算结果与两维计算结果接近) 计算研究护套表面和伞裙上下表面水滴的电场特性以及分析水滴的基本参数对水滴表面电场的影响。

计算中相对介电常数分别取为: 硅橡胶和伞裙套为 4.3, 空气为 1, 水滴为 81。高压侧电极施加 100 V

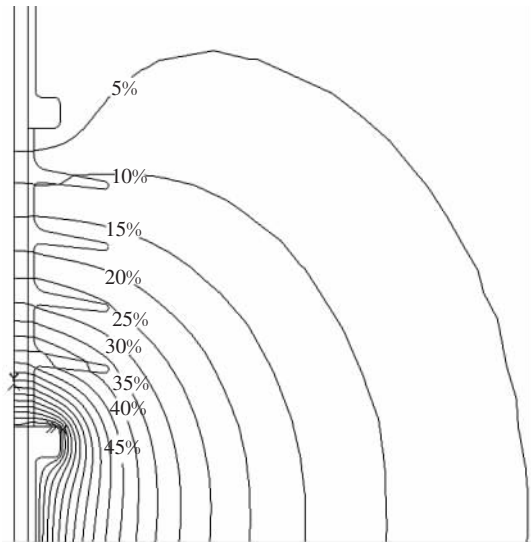
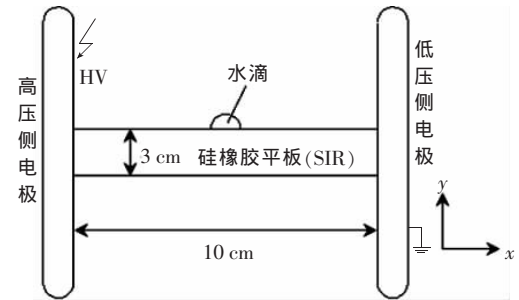
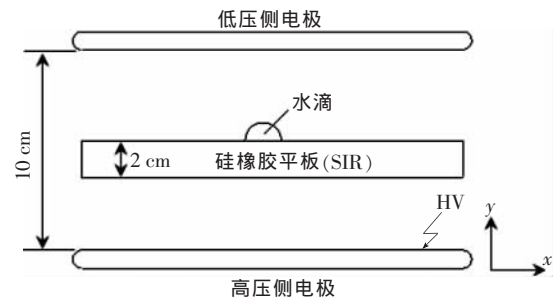


图 3 干燥洁净的复合绝缘子的电位分布



(a) 护套区水滴电场计算模型



(b) 伞裙区水滴电场计算模型

图 4 水滴电场计算简化模型

电压, 低压侧电极接地, 即两极板间的静态平均电场强度为 $E_0=1 \text{ V/mm}$ 。

护套区模型中硅橡胶平板(SIR)两端与高低压电极相连, 设水滴位于硅橡胶板中心, 水滴和硅橡胶板处于沿水平方向(x 方向)分布的均匀电场中。取水滴接触角为 90° , 与硅橡胶板接触面为半径 3 mm 的圆。计算得半球形水滴周围的静态电位分布以及水滴表面的电场分布见图 5。由于水滴的介电常数远大于硅橡胶和空气的介电常数, 水滴近似为等电位体, 水滴周围的电位分布发生畸变, 水滴两侧电位线密集, 最大电场出现在水滴、硅橡胶和空气三者的

交界处,为 3.43 V/mm,水滴顶端表面电场急剧下降,几乎为 0。

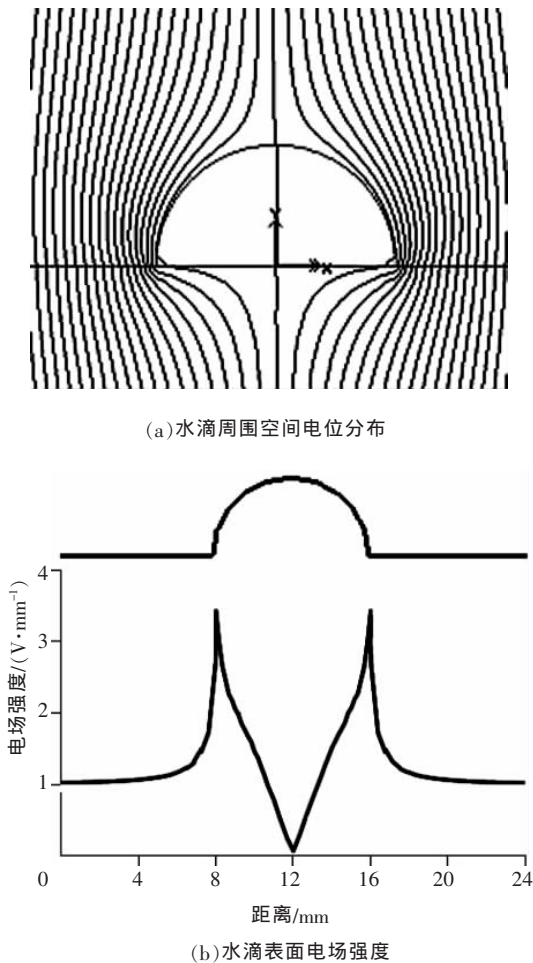


图5 护套区模型中水滴周围的电位电场分布

伞裙区模型中硅橡胶板与两电极平行,设水滴位于平板上表面中心,水滴和硅橡胶板处于沿垂直方向(y方向)分布的均匀电场中。取水滴接触角为 90°,与硅橡胶板接触面为半径 3 mm 的圆,计算得半球形水滴周围的电位分布以及水滴表面的电场分布见图 6。电位线在水滴顶端密集而两侧稀疏,最大电场出现在水滴顶端表面,为 2.18 V/mm,水滴两侧电场强度几乎为 0。

2 水滴参数对水滴表面电场的影响

图 5 和图 6 表明,复合绝缘子护套表面水滴的最大电场强度出现在水滴、护套和空气三者的交界处,伞裙表面水滴的最大电场强度出现在水滴的顶端。由硅橡胶表面分离水珠放电闪络试验^[4]可知,在较低的电压下,水滴周围首先出现明显的电晕放电,在电场力作用下水滴发生变形,沿电场方向被拉长,电晕前后水滴的形状、接触角以及水滴与硅橡胶板的接触面积等都发生改变,见图 7^[7]。因此,有必要

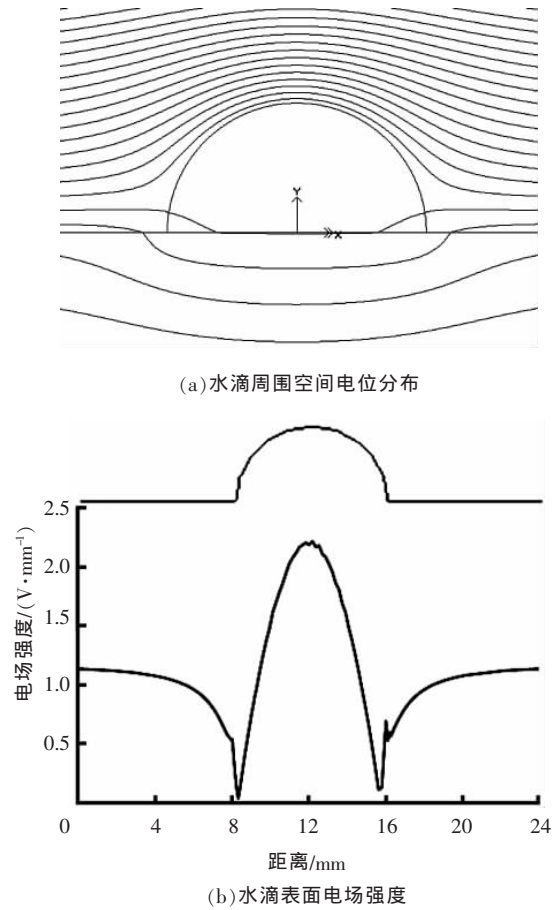


图6 伞裙区模型中水滴周围的电位电场分布

了解水滴参数对水滴电场的影响。

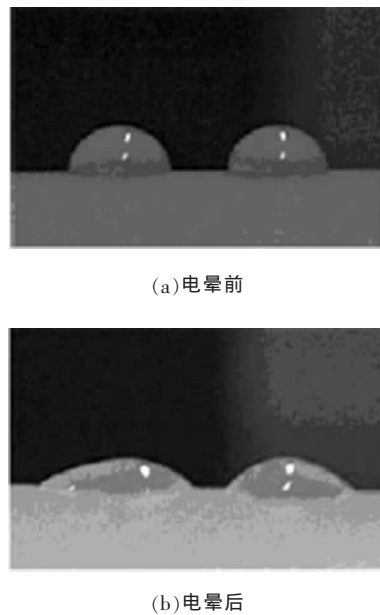


图7 水滴电晕前后的形状视图

2.1 水滴体积的影响

一般憎水性表面水滴的形状多为椭球形。保持水滴与硅橡胶板的接触角为 90°不变,计算得半球形水滴和半椭球形水滴表面的电场增强因子 f (水

滴表面最大电场 E_{max} 与硅橡胶表面平均场强 E_0 之比)随水滴体积的变化见图 8。图中,横坐标为沿电场方向水滴与硅橡胶板接触面的长度(称为接触长度),半球形水滴与硅橡胶板的接触面为圆,其接触长度为圆的直径,半椭球形水滴与硅橡胶板的接触面为椭圆,其接触长度为椭圆的长轴,水滴体积的大小与水滴接触长度有关。

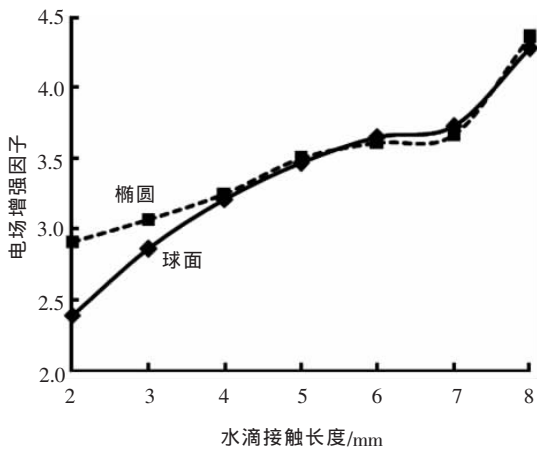


图 8 护套区水滴电场增强因子随水滴体积的变化

当水滴体积较小,接触长度小于 4 mm 时,半球形水滴和半椭球形水滴的电场增强因子有一定差别,随着水滴体积的增大,两种形状的水滴电场增强因子基本相同,因此可以采用半球形水滴模型讨论。护套区不同体积的半球形水滴表面电场增强因子见表 1,由表可知,水滴接触长度越长,水滴体积越大,护套区水滴表面的电场越强,电场增强因子越大。

表 1 护套区不同体积半球形水滴表面电场增强因子

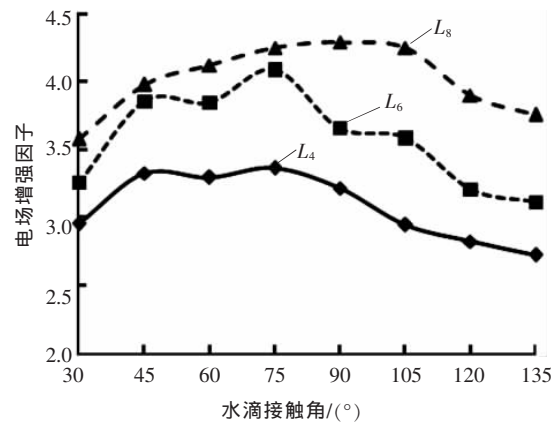
水滴接触长度/mm	水滴体积/ μL	电场增强因子 f
1.0	2.1	2.39
1.5	7.1	2.86
2.0	16.8	3.21
2.5	32.7	3.47
3.0	56.5	3.65
3.5	89.8	3.73
4.0	134.0	4.28

随水滴体积的增大,伞裙区水滴表面的电场基本不变。水滴接触长度由 2 mm 增大到 8 mm,水滴表面的电场分布曲线基本重合,水滴顶端的电场强度最大且基本保持 2.2 V/mm 不变,电场增强因子与水滴大小无关,这主要是因为电位线基本平行于水滴顶部,电场强度与水滴顶部的曲率变化有关,对半径相差不大的半球形水滴而言,水滴顶部曲率的变化较小。

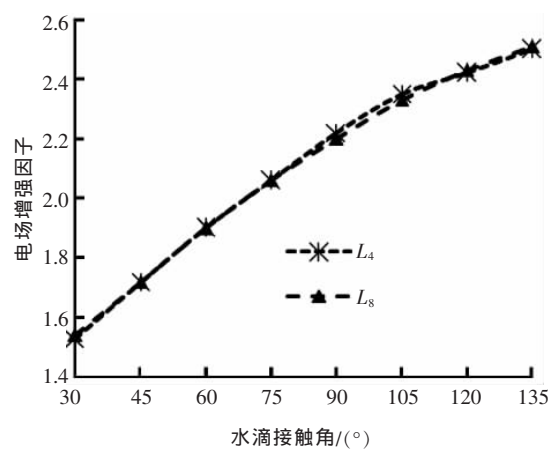
2.2 水滴接触角的影响

在电场力的作用下水滴会发生拉伸变形。某一体积容量的半球形水滴发生拉伸变形后,水滴的接触长度增大,高度减小,水滴与硅橡胶的接触角减小。

采用半球形水滴模型,保持水滴与硅橡胶的接触长度不变,改变水滴的接触角大小,不同接触角的水滴形状为不同大小的球冠。分别计算接触长度为 4、6、8 mm 的球冠形水滴的电场特性,得护套区和伞裙区水滴表面的电场增强因子随接触角的变化,见图 9。图 9 表明,在护套区模型中,当水滴与硅橡胶板的接触长度固定不变时,水滴表面的最大电场随着接触角的增大先增大后减小。当水滴接触角固定,水滴表面的最大电场随接触长度的增大而增大。



(a) 护套区水滴



(b) 伞裙区水滴

图 9 水滴表面电场增强因子随接触角的变化

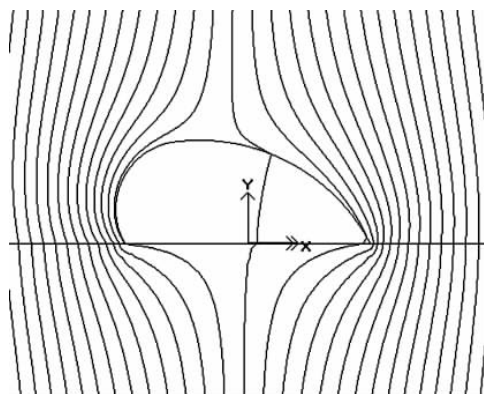
综合以上计算结果,可以得出结论:在护套区水滴体积大小的影响因素中,沿电场方向上水滴与硅橡胶的接触长度是最主要的因素,水滴的体积容量以及水滴与硅橡胶接触面的形状对水滴表面的最大电场影响较小。

在伞裙区模型中,比较接触长度分别为 4 mm

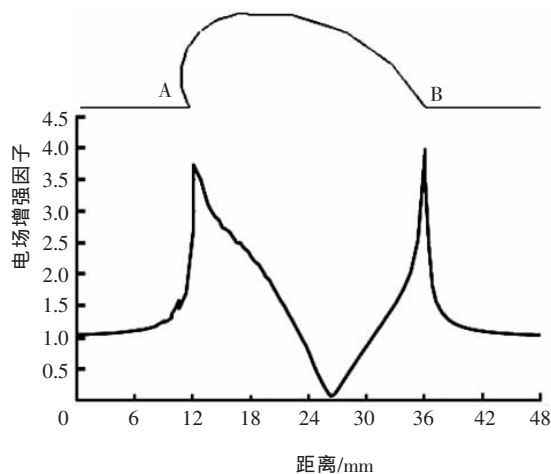
和 8 mm 的水滴表面电场增强因子随接触角的变化曲线,可以得出:水滴表面的最大电场随着接触角的增大而增大;在相同接触角下的电场增强因子基本相同,与接触长度关系不大。因此,可以得出结论:伞裙区水滴与硅橡胶的接触长度对水滴表面的最大电场影响较小,而影响较大的因素是水滴的高度,当水滴接触角增大时,水滴高度增大,水滴顶端的电位线更加密集,使顶端的电场增强。

2.3 水滴形状的影响

影响憎水性表面水滴形状的因素是多样的。考虑护套区水滴在重力作用下的变形,取水滴与硅橡胶的接触长度为 8 mm;水滴两侧的接触角不等,靠近高压侧(A点)取 120° ,靠近低压侧(B点)取 60° 。计算后得到护套区不规则形状水滴周围的电场分布见图 10。水滴表面的最大电场仍然出现在水滴、硅橡胶和空气三者的交界处,A、B 两点的电场强度分别为 3.7 V/mm 和 4 V/mm,比相同接触角的球冠形水滴表面的最大电场略低。因此,护套区水滴的形状对水滴表面电场有一定影响,但这种影响可以归结为水滴的接触角和接触长度的影响。



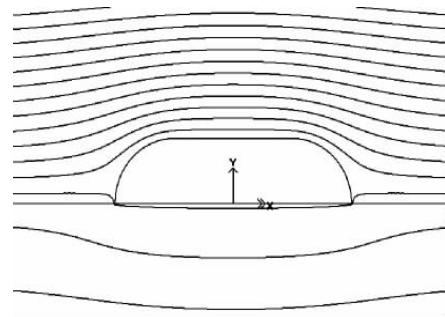
(a)水滴周围空间电位分布



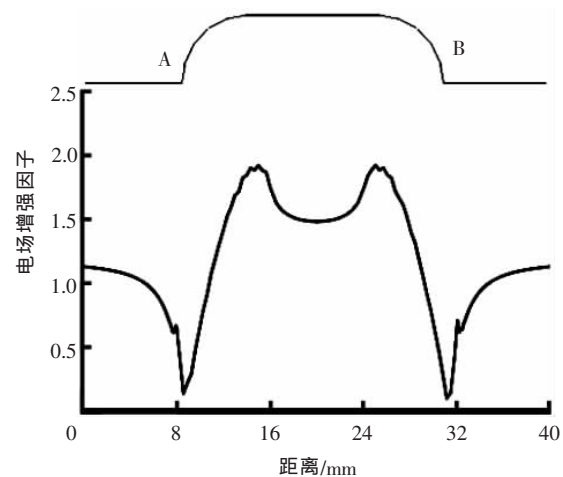
(b)水滴表面电场分布

图 10 护套区水滴形状对电场的影响

考虑伞裙区相邻水滴融合形成水带,取水滴接触长度为 8 mm,高度为 2 mm,水滴顶端水平,计算得电场分布见图 11。水滴表面的最大电场出现在(A、B 两点),为 1.9 V/mm,比半球形水滴表面的最大电场略低。由此可见,伞裙区水滴的形状对水滴表面电场有一定影响,但这种影响可以归结为水滴的接触角和高度的影响。



(a)水滴周围空间电位分布



(b)水滴表面电场分布

图 11 伞裙区水滴形状对电场的影响

2.4 相邻水滴间距的影响

当硅橡胶表面存在多个水滴时,相邻水滴间距也会对水滴表面的电场产生影响。在护套区模型中,在硅橡胶板表面布置两个大小相等的半球形水滴,每个水滴的接触长度均为 8 mm。水滴表面的电场增强因子随间距的变化曲线见图 12,由图可知,水滴表面的最大电场随着水滴间距的增大而降低,当水滴间距为 1 mm 时,水滴表面的电场增强因子为 6.46,远高于单个水滴的电场增强因子;当水滴间距增大到 2 mm 时,电场增强因子减至 4.51;随着间距继续增大,水滴表面的电场增强因子缓慢减小,直至与单个水滴的近似相等。

在伞裙区模型中,由于水滴周围的电位线沿着水滴顶端表面分布,所以沿电位线方向相邻水滴的间距对水滴表面最大电场影响甚微。

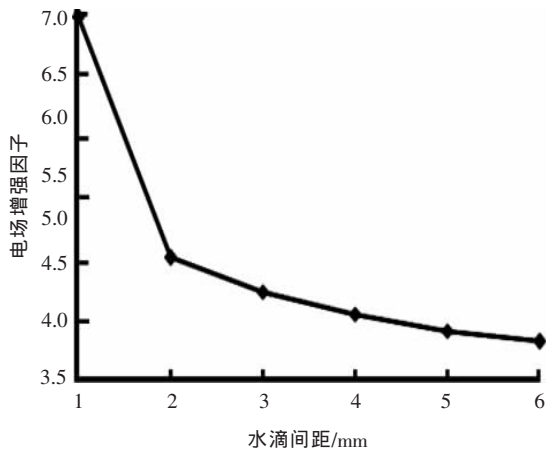


图 12 护套区相邻水滴表面电场增强因子随间距的变化

2.5 水滴电导率的影响

复合绝缘子表面受潮形成水滴后,表面污秽物质中的可溶性导电成分溶于水滴,在表面形成以水滴为中心的高电导率小区域,使水滴周围的电场分布发生改变。采用时谐场计算,同时考虑电导率和介电常数,计算中,取半径为 4 mm 的半球形水滴模型,相对介电常数为 81,表 2 为护套区模型中不同电导率的水滴表面的电场增强因子,由表可知,水滴电导率会影响水滴表面的最大电场强度,100 V 工频电压下,当水滴电导率 γ 与 $\omega\epsilon$ 近似相等为 $2.25 \times 10^{-7} \text{ S/m}$ 时,水滴表面电场增强因子为 4.69,比电导率较小时的大;当电导率 $\gamma \geq 2.25 \times 10^{-5} \text{ S/m}$ 时,电场增强因子维持在 4.75 不变。因此,工频电压下水滴电导率的影响取决于电导率 γ 与 $\omega\epsilon$ 之间的关系。

表 2 护套区不同电导率水滴的电场增强因子

电导率/(S·m ⁻¹)	0	2.25×10^{-9}	2.25×10^{-7}	2.25×10^{-5}	2.25×10^{-3}	2.25×10^{-1}
电场增强因子	4.44	4.44	4.69	4.75	4.75	4.75

伞裙区模型中水滴电导率对电场增强因子的影响特性与护套区模型中相同。

3 考虑水滴时复合绝缘子的电场分布

绝缘子表面水滴分布状态的局部视图见图 13。计算模型中水滴的参数为:水滴相对介电常数为 81,伞裙上下表面水滴接触角为 90°,接触长度为 2 mm;护套表面水滴的接触角为 60°,接触长度为 4 mm;考虑到伞裙沿的滴水现象,伞裙下表面裙沿处水滴大小为其余水滴的 2~3 倍。在高压侧电极施加 1 000 V 电压,计算三维电场得复合绝缘子周围的电位分布见图 14。

图 15 和图 16 分别为最底部伞裙上、下表面的电场分布。图示表明,水滴较小时,对电位分布的改

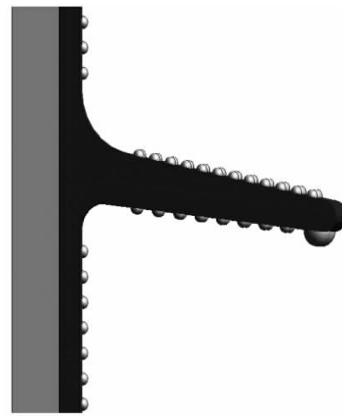


图 13 水滴分布局部视图

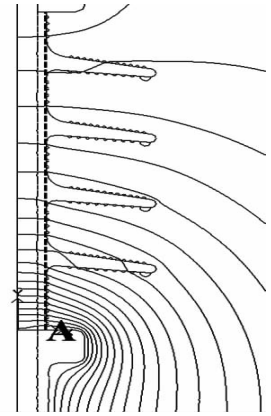


图 14 电位分布

变不明显;伞裙上下表面水滴顶部的电场强度最大,表 3 为底部伞裙套与高压侧电极连接处(A 点)的电场强度和底部伞裙上表面的最大场强。由表 3 可知,相比复合绝缘子干燥时,水滴的存在使 A 点场强降低,但表面最大场强增大,电场增强因子(电场与干燥时电场之比)为 1.97。

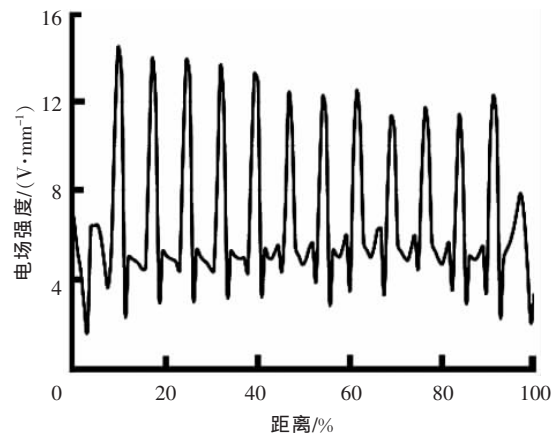


图 15 底部伞裙上表面的电场分布

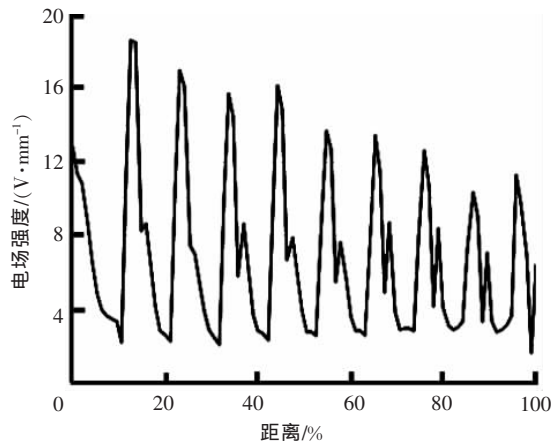


图 16 底部伞裙下表面的电场分布

由表 3 可知,当复合绝缘子受潮表面附着分离水滴时,A 点的场强大于干燥时的场强;底部伞裙下表面靠近高压电极,其最大场强高于上表面;底部伞裙与高压电极之间的护套表面的水滴使护套表面的

表3 干燥和水滴状态下各部位的最大场强比较

各部位最大场强 / (V·mm ⁻¹)	干燥状态	水滴状态
A点	17.67	18.3
底部伞裙上表面	7.30	14.8
底部伞裙下表面	8.08	18.6
伞裙沿水滴表面	8.54	11.8
伞裙和高压电极间护套表面	17.67	42.4

最大场强达到 42.4 V/mm, 远高于干燥时绝缘子表面的最大场强(A点)。以上结果表明, 当复合绝缘子运行于潮湿环境时, 伞裙上下表面以及护套表面附着的分离水滴使电场增强, 这也是复合绝缘子污闪多发生于毛毛雨或雾露等高温湿度天气的原因之一。

4 结论

根据复合绝缘子表面水滴的分布状态, 通过两种简化的硅橡胶平板模型, 分别计算分析了护套表面和伞裙表面的水滴的体积、接触角、形状、电导率以及相邻水滴间距等参数对水滴表面最大电场的影响。得出以下结论:

(1) 护套区水滴表面最大电场出现在水滴、硅橡胶和空气三者的交界处, 伞裙区水滴表面最大电场出现在水滴的顶端。

(2) 护套区模型中, 影响水滴表面最大电场的主要因素为水滴与硅橡胶的接触长度和接触角大小, 随着水滴接触长度的增大, 水滴表面的最大电场增强; 随着水滴接触角的增大, 水滴表面的最大电场先增大后减小。水滴形状的影响可以归结为水滴接触长度和接触角的影响。

(3) 伞裙区模型中, 影响水滴表面电场的主要因素是水滴的高度、水滴顶端曲率的变化和接触角大小, 随着接触角的增大, 水滴高度增大, 水滴表面的最大电场增强; 而水滴的接触长度对水滴表面最大

电场基本没有影响。

(4) 护套区水滴表面的最大电场随着相邻水滴间距的增大而逐渐降低, 直至与单个水滴的近似相等; 伞裙区沿电位线方向相邻水滴的间距对水滴表面最大电场影响甚微。

(5) 工频电压下, 水滴的电导率参数对水滴表面电场影响的大小取决于水滴电导率 γ 与 $\omega\epsilon$ 之间的关系。

(6) 复合绝缘子伞裙上下表面以及护套表面附着的分离水滴使电场大大增强。

参考文献:

- [1] 关志成, 陈原, 梁曦东, 等. 硅橡胶合成绝缘子染污放电机理的研究[J]. 清华大学学报(自然科学版), 1999, 39(5): 16-19.
- [2] LIANG XD, WANG S, GUAN ZC. Hydrophobicity Status of Silicone Rubber Insulators in Field[C]//Proceedings of the 12th International Symposium on HV Engineering, Bangalore: [s.n.], 2001(3): 703-706.
- [3] 贾志东, 关志成. 沿有机硅表面染污放电现象的研究[J]. 电工能新技术, 2003(3): 21-26.
- [4] 刘贞瑶. 硅橡胶表面分离水珠放电的特性及其对憎水性的影响[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- [5] 司马文霞, 刘贞瑶, 蒋兴良, 等. 硅橡胶表面分离水珠的局部放电对表面特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 113-118.
- [6] MORENO M, GORUR S. Effect of Long-term Corona on Non-ceramic Outdoor Insulator Housing Materials[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2001, 8(1): 117-128.
- [7] GUAN Zhicheng, WANG Liming. Electric Field Analysis of Water Drop Corona[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 964-969.
- [8] QUE Wei-guo. Electric Field and Voltage Distributions Along Non-ceramic Insulators[D]. Doctor Dissertation of the Ohio State University, 2002.

(上接第4页)

4.2 分闸位置的绝缘性能

由于 800 kV SF₆ 高压断路器 2 个串联断口完全一样且有并联电容对其进行良好的均压, 考虑电压不均匀系数 1.05 后, 仅对其中一个断口进行分析计算。结合反向加压工况, 考虑极性效应, 即分别在静动侧施加雷电冲击耐受电压 2 100 kV 和工频反向电压峰值 650 kV, 罐体上施加零电位。两种工况下的电场强度最大值与许用值^[5]见表 2。

由于断口结构的不对称, 动侧施加雷电冲击耐受电压时静弧触头上的电场强度较静侧施加时略大, 但仍小于许用场强。

5 结语

新沈高自主研发的 LW56-800 型罐式 SF₆ 高压

交流断路器高参数通过了所有型式试验项目, 它将为我国西北电网 750 kV 输电线路的建设提供经济、可靠的技术和设备保障, 同时也为我国进一步研发 1 100 kV 高压断路器打下了坚实的基础。

参考文献

- [1] 周小谦. 我国的能源结构与电力规划[J]. 高压开关, 2003(2): 25-28.
- [2] 施文耀. 影响压气式断路器开断性能的因素分析[J]. 华通技术, 1993(2): 2-6.
- [3] 董秉纲, 孔祥言, 邓国华. 气体动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- [4] 林兆福. 气体动力学[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 1988.
- [5] 黎斌. SF₆ 高压电器设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.