

带电水蒸气冲洗污秽绝缘子时的交流闪络特性研究

张晋, 汲胜昌

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对带电水蒸气清洗绝缘子污秽进行了试验研究, 绘制了 3 种不同绝缘子随盐密变化的平均闪络电压、闪络电压梯度曲线和不同清洗方式下的闪络电压曲面, 并进行了带电水蒸气冲洗污秽绝缘子时闪络电压的拟合计算和影响因素分析. 结果表明: 在相同盐密下, FXBW4-35 型绝缘子时的闪络电压和闪络梯度最高, XP-70 型绝缘子次之, FC-70 型绝缘子最低; 幂函数可拟合带电水蒸气清洗污秽绝缘子时的闪络电压, 但非最优拟合函数; 采用自下而上清洗方式闪络电压最高; 绝缘子污秽盐密低于 $4 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^2$ 无过电压出现情况下, 带电水蒸气清洗可保证系统安全.

关键词: 绝缘子; 污秽; 带电水蒸气清洗; 闪络电压; 闪络电压梯度

中图分类号: TM84 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)12-0096-05

AC Flashover Performance of Contaminated Insulators in Hot Water Vapor Washing

ZHANG Jin, JI Shengchang

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The experiments of washing insulator contamination with hot water vapor are conducted to plot the average flashover voltage and flashover gradient curves of three insulators, calculate the flashover voltage, and analyze the influencing factors of flashover voltage. The results show that the flashover voltage and flashover gradient of FXBW4-35 insulators are highest, and those of XP-70 insulators are higher than FC-70 insulators. Power function can fit the flashover voltage of composite insulators washed by hot water vapor but not an optimum fitting function, the flashover voltage of insulators washed from bottom to top gets the highest. No overvoltage occurs to ensure the system security in the washing as the equivalent salt deposit density below $4 \times 10^{-4} \text{ g/cm}^2$.

Keywords: insulator; contamination; hot water vapor washing; flashover voltage; flashover voltage gradient

近年来绝缘子污闪事故日益增多, 污闪已经成为威胁电力系统安全运行的重大问题之一^[1], 防污工作的紧迫性日益升高.

国内外在污闪特性及防污闪措施方面进行了大量的研究, 防污技术主要有“爬、扫、涂”等方式^[2-4]. 在电力设备确定条件下, 污秽清扫是恢复设备外绝缘水平的主要手段. 随着我国对供电可靠性要求和电网电压的提高, 设备停电清扫逐渐难以实现. 已有带电清扫措施中, 带电机械干清扫使浮尘搬家易造

成二次污染, 而且不适用于线路绝缘子清扫; 带电水清洗的清扫效果较好, 但清洗中大量浪费水资源且可能会造成设备闪络. 近年来, 北方一些地区缺水严重, 节约保护资源的呼声日益高涨, 发展新的污秽清洗方法势在必行. 高压水蒸气由于其高温、高压、高电阻率的特性, 可以对电力设备进行有效带电清洗, 而且大量节水、无需系统断电的特点, 使水蒸气冲洗成为一种有良好研究前景的污秽清扫方法^[5-6].

本文研究了带电水蒸气冲洗 35 kV 绝缘子串

的交流闪络特性. 选择 3 种不同类型绝缘子进行了大量带电水蒸气冲洗污秽绝缘子闪络电压试验,绘制了绝缘子随盐密变化的平均闪络电压、闪络梯度曲线和不同清洗方式下闪络电压曲面,并进行了闪络电压拟合和影响因素分析,期望能够为工程应用提供技术参考.

1 试验条件和方法

1.1 试品

试品采用 XP-70 型普通悬式瓷绝缘子、FC-70 型普通悬式玻璃绝缘子和 FXBW4-35 型复合绝缘子,其结构参数如表 1、表 2 所示. 其中: A 为绝缘子表面积; L 为爬电距离; D 为瓷和玻璃绝缘子盘径; H 为结构高度; D_1 为复合绝缘子伞径; h 为电弧距离; d 为杆径. 试验中盐密为 3×10^{-5} 、 5×10^{-5} g/cm² 时瓷和玻璃绝缘子串长为 2 片,盐密为 1×10^{-4} 、 2×10^{-4} 、 4×10^{-4} g/cm² 时瓷和玻璃绝缘子串长为 3 片,复合绝缘子为 1 支.

表 1 瓷和玻璃绝缘子结构参数

绝缘子型号	A/cm^2	D/mm	H/mm	L/mm
XP-70	1 430	255	146	295
FC-70	1 646	255	146	320

表 2 复合绝缘子结构参数

绝缘子 型号	A/cm^2	D_1/mm	h/mm	L/mm	d/mm	伞数
FXBW4-35	1 763	110	455	915	45	7

1.2 试验水蒸气机

使用自制水蒸气机产生试验水蒸气,能够在短时间内将水迅速汽化为水蒸气. 水蒸气机安装有数字温控仪和气压表,能够显示并控制喷出机器的水蒸气温度和压力. 水蒸气机最大功率为 6 kW,总质量 ≤ 30 kg,箱体出口处的最大压力 ≤ 10 kg,箱体出口处的最高温度 ≤ 150 ℃.

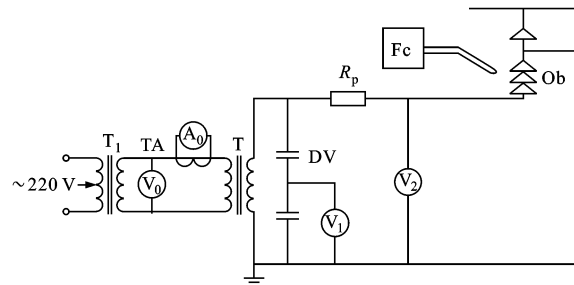
1.3 试品的染污

试验前将试品绝缘子清洗干净,采用定量涂刷法对试品进行染污^[7]. 污秽物中导电物采用商业纯 NaCl,不溶物采用硅藻土. 绝缘子灰密(ρ_{NSDD})均取 1×10^{-3} g/cm²,瓷和玻璃绝缘子盐密分别取 3×10^{-5} 、 5×10^{-5} 、 1×10^{-4} 、 2×10^{-4} 、 4×10^{-4} g/cm²,复合绝缘子盐密取 1×10^{-4} 、 2×10^{-4} 、 3×10^{-4} 、 $4\times$

10^{-4} g/cm². 根据绝缘子的表面积及试验污秽度,计算得到与试验污秽等级相应的 NaCl 和硅藻土用量,并按照 2×10^{-3} g/cm² 的用量在污秽中加入糊精来模拟自然污秽. NaCl、硅藻土和糊精均取用精度为 1 mg 的电子天平称量,然后加入适量的去离子水,组成糊状物,将其搅拌均匀后,全部均匀涂刷到经清洁预处理并自然阴干的试品绝缘子表面,让涂污后的绝缘子自然阴干等待试验使用.

1.4 试验方法

将染污绝缘子串安装于实验室清洗区处,试验电压由 100 kV/25 kV·A 工频试验变压器提供,通过高压引线引至绝缘子串,变压器的出口电压由其本身自带的电容分压器和交流电压表 V_1 测量. 变压器与试品之间接入高压保护电阻 R_p ,防止试品闪络时变压器输出电流过大对变压器造成损害,试品的闪络电压由静电电压表 V_2 测定,试验回路接线见图 1. 水蒸气机前端加装喷枪,设置水蒸气温度为 120 ℃,气压为 3 个相对大气压,该温度不会对复合绝缘子表面造成损伤^[8],调节喷枪使水蒸气柱前部面积较小并无散花. 对于瓷和玻璃绝缘子串,从连接高压导线侧设置绝缘子编号依次为 1、2、3 号,对于复合绝缘子串,划分绝缘子为下、中、上 3 部分. 试验模拟 35 kV 系统并采用升压法,在系统工作相电压 20.2 kV 下冲洗其中一片(部分)绝缘子 1 min 后,开始升压直至绝缘子串闪络,在各盐密下测量冲洗每片(部分)绝缘子的闪络电压 5 次.



T_1 为调压器; V_0 、 V_1 为交流电压表; TA 为电流互感器; A_0 为电流表; T 为试验变压器; DV 为变压器本体电容分压器; R_p 为高压保护电阻; V_2 为静电电压表; Bu 为套管; Fc 为水蒸气清洗机,可产生高温高压水蒸气; Ob 为试品绝缘子串

图 1 试验回路接线图

2 试验结果及分析

2.1 不同类型绝缘子在水蒸气冲洗时的闪络电压

按照上述试验方法测量 3 种绝缘子的带电清洗污秽闪络电压,对各试验测量电压进行空气密度校

正后^[9],在各盐密下取冲洗相同绝缘子不同部分的闪络电压计算整串绝缘子带电清洗平均闪络电压,将两片瓷和玻璃绝缘子的闪络电压换算为 3 片绝缘子闪络电压.以盐密变化为 X 轴,电压为 Y 轴,绘制温度为 20 ℃、大气压力为 101.3 kPa 时带电水蒸气冲洗绝缘子污秽时的闪络电压曲线,如图 2 所示.

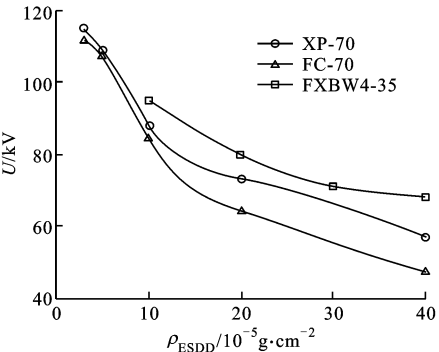


图 2 不同类型绝缘子的带电水蒸气冲洗闪络电压

由图 2 可知,3 种绝缘子串的水蒸气冲洗闪络电压随盐密增加而减小.盐密低于 1×10^{-4} g/cm² 时 XP-70 瓷绝缘子闪络电压高于 FC-70 玻璃绝缘子,盐密高于 1×10^{-4} g/cm² 时,FXBW4-35 复合绝缘子闪络电压最高,然后依次是 XP-70、FC-70.类似于绝缘子污闪电压,水蒸气冲洗污秽绝缘子产生的闪络电压受绝缘子染污程度、爬电距离 L 、伞形和大气湿度的影响,该冲洗闪络电压还受清洗洁净程度、水蒸气柱气压、清洗方式等多种因素的影响,比污闪电压影响因素更为复杂.试验中 3 片 FC-70 绝缘子爬电距离最大,但闪络电压最低,这是由于该型绝缘子下表面沟槽比 XP-70 绝缘子更深,清洗过程中较深的沟槽不利于将污秽冲洗干净,所以 FC-70 绝缘子冲洗闪络电压低于 XP-70 绝缘子.由于复合绝缘子伞裙较小且下表面无沟槽,污秽容易被高压水蒸气冲洗掉,故 FXBW4-35 绝缘子闪络电压最高.

大量试验结果表明,绝缘子串污闪电压 U 与盐密 ρ_{ESDD} 之间满足幂函数关系,即^[10-11]

$$U=M\rho_{\text{ESDD}}^{-b}$$

(1)

式中: M 、 b 为由绝缘子的盘径、爬电距离及形状因数确定的常数,反映了绝缘子形状对闪络电压的影响.

将图 2 试验结果分别按式(1)幂函数和二次多项式 $U=C_0+C_1\rho_{\text{ESDD}}+C_2\rho_{\text{ESDD}}^2$ 拟合,可得 M 、 b 值和 C_0 、 C_1 、 C_2 ,如表 3、表 4 所示.

由表 3 可知,带电水蒸气冲洗污秽绝缘子产生的闪络电压同盐密关系类似于污闪电压,可用式(1)

拟合. M 、 b 值不随爬电距离的增大而线性变化,还受伞形、清洗方式等众多因素影响. b 值反映了随盐

表 3 幂函数拟合 M 和 b 值

绝缘子型号	M	b	R^2
XP-70	45.709 2	0.276 7	0.975 1
FC-70	36.216 0	0.343 9	0.954 8
FXBW4-35	53.720 8	0.246 7	0.994 2

注: R^2 为拟合相关系数.

表 4 多项式拟合 C_0 、 C_1 和 C_2 值

绝缘子型号	C_0	C_1	C_2	R^2
XP-70	124.917 7	-375.228 9	515.884 8	0.987 1
FC-70	124.714 3	-429.213 0	590.508 7	0.994 2
FXBW4-35	116.000 0	-239.600 0	300.000 0	0.999 9

密增大,闪络电压变化的快慢,当闪络电压下降较快时 b 值较大.拟合相关系数 R^2 体现了拟合结果相关程度,对比表 3、表 4 可见,同型号绝缘子的多项式拟合相关性高于幂函数拟合相关性.虽然水蒸气冲洗闪络电压同盐密关系类似于污闪电压,但由于其受影响因素更为复杂,幂函数并不是最优拟合函数,多项式拟合的相关度高于幂函数拟合.

2.2 不同类型绝缘子水蒸气冲洗闪络梯度

不同类型绝缘子的爬电距离有差异会影响带电水蒸气冲洗污秽绝缘子的闪络电压.沿泄漏距离的闪络电压梯度表示在不同污秽度下带电冲洗时,不同类型绝缘子单位爬电距离能够承受的最大电压,直接反映了绝缘子对爬电距离的利用效率.因此,考虑爬电距离的有效性,绘制带电水蒸气冲洗污秽绝缘子闪络梯度曲线,如图 3 所示.图中绝缘子闪络梯度由式(2)计算得到,即^[10-12]

$$E_c=U/L$$

(2)

式中: E_c 为绝缘子闪络电压梯度,kV/cm.

由图 3 可知,带电水蒸气冲洗污秽绝缘子闪络梯度随盐密增加而降低.对比图 2 可见,闪络梯度随盐密的变化规律与闪络电压随盐密变化规律一致.

2.3 不同冲洗方式下绝缘子闪络电压

以被冲洗瓷、玻璃绝缘子编号为 X 轴、污秽盐密为 Y 轴,经空气密度校正和绝缘子片数换算后的平均闪络电压为 Z 轴,绘制首先冲洗不同编号绝缘子时的闪络电压曲面,如图 4 所示.绝缘子编号 1 代表首先冲洗靠近高压导线端的绝缘子,即自下而上

冲洗;绝缘子编号 2 代表首先冲洗中间绝缘子,即从中部清洗;绝缘子编号 3 代表首先冲洗靠近接地端的绝缘子,即自上而下冲洗. 盐密为 3×10^{-5} 、 5×10^{-4} g/cm² 时绝缘子串长为 2 片,故该部分曲面由绝缘子编号 1、3 两点闪络电压绘制.

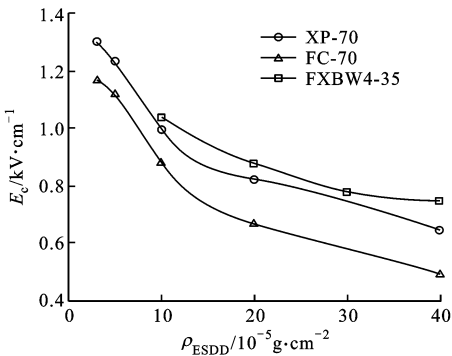


图 3 不同类型绝缘子带电水蒸气冲洗闪络梯度

一部分水蒸气由于高压发生散花,一部分水蒸气由于环境温度较低冷凝成为水珠. 散花会使水蒸气柱附近的污秽湿润,而冷凝的水珠会沿绝缘子表面向下滴落. 绝缘子串自上端开始清洗时,散花和自上端滴落的水珠会使下部未清洗绝缘子的污秽湿润,引起闪络电压降低. 自下端开始清洗时,上部滴落的水珠落在清洗过的绝缘子表面,此时下部绝缘子经过清洗剩余污秽已经较少且表面湿润,滴落的水珠可能携带部分污秽使闪络电压下降,但影响小于自上而下清洗的水珠. 所以,3 种清洗方式中自下而上清洗闪络电压最高,从中部清洗闪络电压次之. 玻璃绝缘子下表面沟槽较深,不利于清除污秽,故相同清洗方式、相同盐密下 XP-70 瓷绝缘子闪络电压高于 FC-70 玻璃绝缘子. 图中最低闪络电压为玻璃绝缘子盐密为 4×10^{-4} g/cm² 时自上而下冲洗闪络电压 41.8 kV,高于 35 kV 系统最高运行相电压 23.4 kV,无过电压出现情况下可以保证带电清洗的系统安全.

3 结 论

(1)在带电水蒸气冲洗污秽绝缘子的过程中,不同类型绝缘子闪络电压不同. 相同盐密下 FXBW4-35 型绝缘子闪络电压最高,XP-70 型绝缘子次之,FC-70 型绝缘子闪络电压最低.

(2)带电水蒸气冲洗污秽绝缘子时的闪络电压类似于污闪电压,可用幂函数 $U = M\rho_{ESDD}^{-b}$ 拟合. 但是,由于影响水蒸气清洗绝缘子产生的闪络电压因素复杂,幂函数并不是最优拟合函数,多项式拟合的相关度高于幂函数拟合.

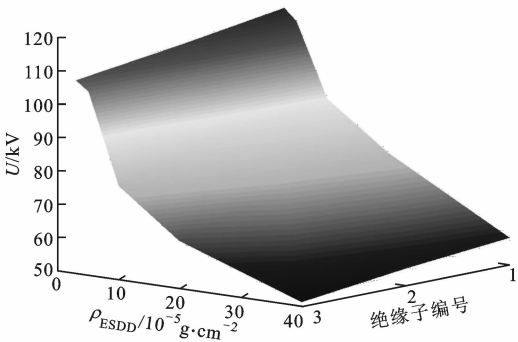
(3)不同冲洗方式会影响绝缘子闪络电压,带电水蒸气冲洗绝缘子时,采用自下而上冲洗方式的闪络电压最高,自上而下冲洗方式的闪络电压最低.

(4)绝缘子污秽盐密低于 4×10^{-4} g/cm² 时,最低带电水蒸气清洗时的闪络电压仍高于 35 kV 系统最高运行相电压,无过电压出现情况下可保证带电清洗的系统安全.

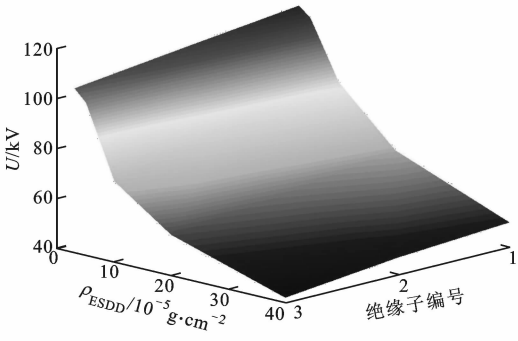
污秽灰密、黏度和更多清洗方式^[13]对绝缘子闪络电压的影响,笔者会在后续试验工作中进行研究.

参考文献:

[1] 宿志一. 防止大面积污闪的根本出路是提高电网的基本外绝缘水平:对我国电网大面积污闪事故的反思[J]. 中国电力,2003,36(12):57-61.
SU Zhiyi. To intensify basic external insulation level



(a)瓷绝缘子



(b)玻璃绝缘子

图 4 不同冲洗方式下瓷、玻璃绝缘子闪络电压

由图 4 可知,相同盐密时由下端开始冲洗绝缘子的闪络电压高于自中部和顶端冲洗绝缘子串,不同冲洗方式下的绝缘子闪络电压也随着盐密的增大而下降. 瓷和玻璃绝缘子的最高闪络电压均为盐密 3×10^{-5} g/cm² 时自下向上冲洗,最低闪络电压均为盐密 4×10^{-4} g/cm² 时自上向下冲洗,且瓷绝缘子闪络电压高于玻璃绝缘子. 带电水蒸气清洗绝缘子污秽过程中,高压水蒸气柱接触到绝缘子表面后

- of power system; fundamental way for prevention of large-scale pollution flashover[J]. *Electric Power*, 2003, 36(12): 57-61.
- [2] 喻华玉, 徐文澄, 沈刚, 等. 高压电气设备防污闪及带电清扫技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [3] 关志成, 刘瑛岩, 周运翔, 等. 绝缘子及输变电设备外绝缘[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [4] PELACCHI P. Automatic hot line insulator washing device positioned by helicopter[C] // *Proceedings of IEEE 8th International Conference on Transmission & Distribution Construction, Operation & Live-Line Maintenance*. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1998, 133.
- [5] 张晋, 汲胜昌, 曹涛, 等. 电力设备带电清扫技术的现状及展望[J]. *绝缘材料*, 2009, 42(2): 63-66.
ZHANG Jin, JI Shengchang, CAO Tao, et al. Present and prospect of power equipment's electriferous cleaning technique[J]. *Insulating Materials*, 2009, 42(2): 63-66.
- [6] 张晋, 王志龙, 欧小波, 等. 高温水蒸气中绝缘子串闪络电压的研究[J]. *电磁避雷器*, 2009, 228(2): 6-9.
ZHANG Jin, WANG Zhilong, OU Xiaobo, et al. Study on flashover voltage of insulator strings in high-temperature water vapor[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2009, 228(2): 6-9.
- [7] 徐涛, 吴光亚, 周文俊. 交流特高压输电线路绝缘子串污秽耐压特性试验[J]. *高电压技术*, 2007, 33(7): 9-13.
XU Tao, WU Guangya, ZHOU Wenjun. Flashover voltage characteristic of 1 000 kV AC transmission line insulator strings under polluted conditions[J]. *High Voltage Engineering*, 2007, 33(7): 9-13.
- [8] 吴世雄. 硅橡胶独特的性能极其特殊用途[J]. *有机硅材料及应用*, 1992(4): 18-26.
- [9] 戴佑复, 朱同春, 胡文岐, 等. GB/T16927.1-1997 高电压试验技术[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
- [10] 舒立春, 冉启鹏, 蒋兴良, 等. 瓷和玻璃绝缘子人工污秽交流闪络特性及有效爬电系数的比较[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(9): 6-10.
SHU Lichun, RAN Qipeng, JIANG Xingliang, et al. Comparison on AC artificial pollution flashover performance and valid coefficient of creepage distance between porcelain and glass insulators[J]. *Proceeding of the CSEE*, 2007, 27(9): 6-10.
- [11] RAMOS N G, CAMPILO R M T, NAITO K. A study on the characteristics of various conductive contaminants accumulated on high voltage insulators[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1993, 8(4): 1842-1850.
- [12] 顾乐观, 孙才新. 电力系统的污秽绝缘[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1990.
- [13] 王如璋. 安全带电水冲洗《临界盐密法》的研究[J]. *高电压技术*, 1985(3): 53-61.
WANG Ruzhang. Research on critical salt deposit density method for safe hot washing[J]. *High Voltage Engineering*, 1985(3): 53-61.

(编辑 杜秀杰)