

沙尘环境对绝缘子交流闪络特性影响的研究

司马文霞, 程浩, 杨庆, 袁涛

输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学)
重庆市 400030

摘 要: 风沙环境对电力系统外绝缘放电的影响已经引起了广泛关注, 由于污秽绝缘子引起的闪络与沉积在绝缘子表面上的污秽性质有关, 沙尘环境下的沙粒性质及状态均会对绝缘子闪络特性产生影响, 因此以瓷绝缘子 XP-70 为研究对象, 在沙尘模拟实验室, 分别研究了风沙环境和风沙过境后沉积在绝缘子表面上的沙尘对绝缘子交流闪络特性的影响。得到了风沙速度、风沙带电量、沙尘沉积量及沙尘含水量等因素对瓷绝缘子闪络特性的影响规律; XP-70 瓷绝缘子闪络电压随风速的增大而升高, 且有风有沙时的闪络电压比有风无沙时略低; 随着沙粒荷质比升高, 绝缘子闪络电压呈降低趋势, 且沙粒带负电荷时比沙粒带正电荷时的闪络电压略高; 绝缘子上表面沉积干沙尘时, 其闪络电压与干闪络电压相比略有下降, 随着干沙粒沉积量的增加, 沙闪络电压存在极小值; 沉积湿沙尘时, 绝缘子的闪络电压下降的比较明显, 随着湿沙含水量的增加, 闪络电压下降的越发显著; 绝缘子上表面覆盖湿沙时, 其泄漏电流与干燥时有明显不同, 其幅值随含水量的增加而增大。

关键词: 沙尘暴; 绝缘子; 闪络; 放电

1 引言

随着我国电力工业的发展, 输电电压等级的提高, 我国 750kV 和 1000kV 超特高压线路通过沙尘天气频发的北方干旱地区, 在联网的情况下, 系统的这些主联络线一旦发生故障, 将造成大面积的停电, 其维修费用和造成的经济损失都是无法估量的, 因此电网的安全运行显得格外重要。

20 世纪 90 年代以来, 我国北部地区频繁出现扬沙和沙尘暴天气。近年来, 沙尘暴天气不仅发生在西北部地区, 更有逐渐向西南部蔓延的趋势。在沙尘暴活动过程中, 由于气流运动中沙尘颗粒之间以及沙尘颗粒与地床面之间的电荷交换使沙粒带上了电荷, 造成空气的介电常数增大、电阻率减小、形成强烈的负极性电场, 从而

改变输电线路的电场分布, 影响输电线路的相间及相对铁塔空气间隙和绝缘子放电特性, 危害电能的输送, 进而影响到电力系统的可靠运行。

本文以瓷绝缘子 xp-70 为研究对象, 分别研究了风沙环境和风沙过境后沉积在绝缘子表面上的沙尘对绝缘子交流闪络特性的影响。通过研究在沙尘天气下电力系统外绝缘电气特性, 为沙尘天气频发区的电力系统的外绝缘设计和安全运行提供理论依据。

2 实验装置及方法

2.1 实验装置

根据风速和能见度的不同, 沙尘天气一般分为浮尘、扬沙和沙尘暴三种天气情况。为研究沙尘对外绝缘放电特性的影响, 本文在重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自行组建的模拟扬沙和沙尘暴天气的实验装置进行了一系列的实验研究。通过改变风速和沙尘带电量等参数模拟实际可能出现的沙尘天气, 进行不同沙尘天气环境对绝缘子工频放电特性和放电过程的影响。模拟实验装置如图 1 所示。

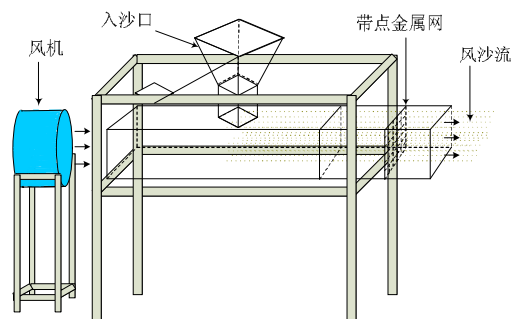


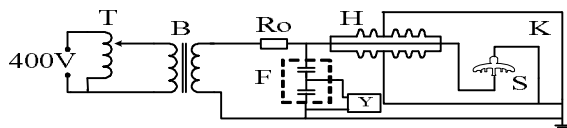
图 1 模拟实验装置示意图

图 1 所示的模拟装置包括: 风机采用轴流风机, 额定功率为 2.5 千瓦, 其风速可调, 最大可

达 10m/s; 主体装置由铁架支撑, 进沙漏斗连接风沙流通道, 通道侧面采用玻璃, 为了便于观察。前端为带电金属网, 其作用是使沙尘带上电荷。实验对象置于出风口前端附近, 使其受风均匀, 同时严格控制实验对象位置不变, 为了减少实验误差。采用 MS6250 型数字风速仪测量风速, 其测量范围是 0~20m/s, 测量精度为 ± 0.1 m/s。实验用沙来源于宁夏沙坡头, 其沙径变化范围为 0.1~0.315mm。

2.2 实验电路

试验电路如图 2 所示, 其中变压器的主要参数: 额定容量为 200kVA; 额定电流为 1A, 输入电压 0~400V, 输出电压为 0~200kV; 调压器的主要参数: 额定容量为 100kVA, 输入电压 380V, 输出电压 0~400V; 保护电阻 R 的阻值为 5k Ω 。



T: 调压器, B: 变压器, Ro: 保护电阻, H: 高压套管, F: 电容分压器, Y: 数据采集系统, S: 试品

图 2 试验电源回路

2.3 沙粒带电量测量

在实际的扬沙天气中, 由于沙粒之间以及沙粒与大地之间的摩擦, 导致沙尘带上了电荷。在实验室搭建的平台中, 为了使沙粒带上一定的电荷量, 参考了国外学者的试验方法, 在沙粒出口端加装一张金属网, 通过改变金属网上所施加的电压及金属网孔, 来改变沙尘的带电量极性和大小。

为了测量沙粒碰撞金属网后的带电量, 采用网状目标法进行测量, 网状目标法用于测量荷质比一种方法, 其原理示意图如图 3 所示。

该装置由带电金属网和数据采集两部分组成, 荷电粒子到达网状接收装置, 当电荷转移到金属网上时, 即与地面构成回路, 产生微电流, 用精密微安表测出该电流 I , 同时采样筒在一定时间 t 内测出质量 m , 则可以测出粒子的平均荷质比。

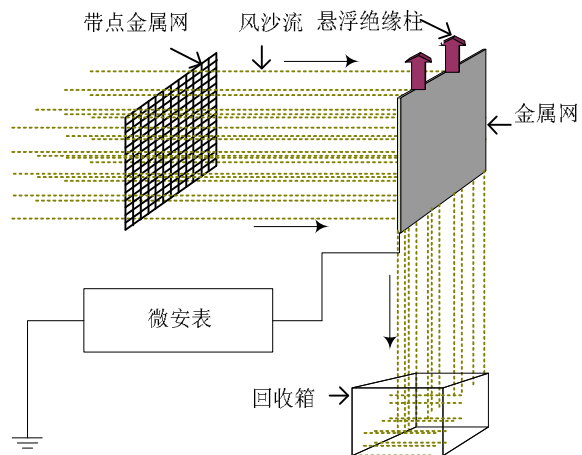


图 3 网状目标法原理示意图

3 沙尘环境下绝缘子交流闪络特性

为研究沙尘暴天气对绝缘子闪络特性的影响规律, 在沙尘模拟实验室, 采用瓷绝缘子 XP-70 为研究对象, 进行了大量的重复、对比试验。试验中通过改变风沙速度和风沙带电量模拟沙尘暴过境时沙尘对绝缘子交流闪络特性的影响; 通过改变沙尘沉积量和沙尘含水量模拟沙尘暴过境后沉积在绝缘子表面上的沙尘对绝缘子交流闪络特性的影响。

3.1 风速对闪络电压的影响

为研究风速、沙尘对绝缘子闪络特性的影响, 分别进行了无风无沙、有风无沙、有风有沙 (沙尘不带电, 沙尘浓度为 5~10g/m³) 三组对比试验, 分析风速与绝缘子交流闪络电压的关系。

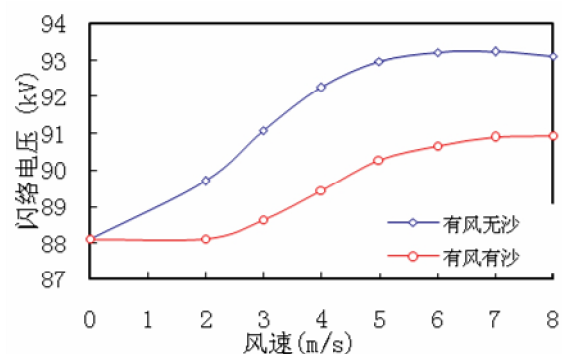


图 4 风速与闪络电压的关系

图 4 表示在有风无沙和有风有沙两种情况下, 沙尘暴风速对闪络电压的影响。在无风无沙

时绝缘子的干闪络电压为 88kV, 随着风速的增加, 绝缘子闪络电压逐渐增大, 但有风有沙时增加的快。当风速超过 4m/s 时, 两种情况下, 闪络电压增大的趋势都在变缓。分析有风无沙时的闪络特性, 有风时闪络电压较无风时高, 说明风速的增加升高了绝缘子的闪络电压, 但增加的程度不是线性的, 而是增幅在减小。这是因为大风会拉长电弧, 甚至会使电弧熄灭, 延长了绝缘子闪络过程需要的时间, 从而升高了闪络电压。如图 4 所示, 当风速超过 6m/s 后, 有风时比无风时闪络电压升高了 5.97%。当风中夹杂沙粒时, 由于大风吹弧的作用, 闪络电压同样会升高, 但风中夹杂的沙粒会在流动过程中发生碰撞带上电荷, 而且会有少量的沙粒沉降在绝缘子表面, 降低了闪络电压升高的程度, 因此有风有沙时的闪络电压较有风无沙时略低。在风速超过 4m/s 后, 有风有沙时的闪络电压较有风无沙时低 3.32%。

3.2 沙尘带电量对闪络电压的影响

为研究沙粒带电量对绝缘子闪络特性的影响, 进行了有风有沙时沙尘带电与否的对比试验, 实验中风速为 6m/s, 沙尘浓度为 5~10g/m³。图 5 为沙粒带电量与绝缘子闪络电压的关系图。

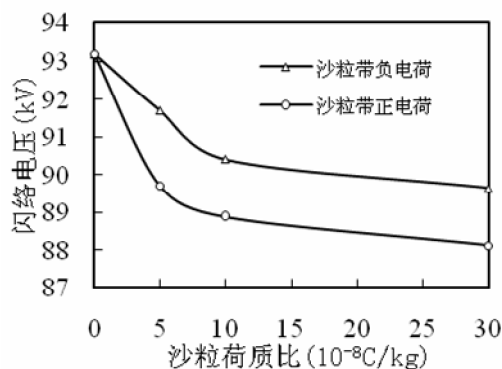


图 5 沙粒带电量与闪络电压的关系

从图 5 可知, 沙粒不带电时, 绝缘子的闪络电压约为 93kV; 在相同的风速和沙尘浓度条件下, 使沙粒带上正、负电荷, 当沙粒荷质比从 $5 \times 10^{-8} \text{C/kg}$ 升到 $30 \times 10^{-8} \text{C/kg}$ 时, 绝缘子闪络电压明显下降, 而且沙粒带正电荷时闪络电压下降的幅度比带负电荷时大。这说明沙粒带上电荷以

后, 产生的附加电场明显的改变了绝缘子原电场的分布。

3.3 沙尘沉积量对闪络电压的影响

沙尘暴过境后, 绝缘子表面会沉降一部分沙粒, 为研究沙尘沉积对绝缘子闪络特性的影响, 分别进行绝缘子表面无沙尘、上表面沉积 5mg/cm²、10mg/cm²、15mg/cm²、20mg/cm²、25mg/cm²、30mg/cm²、50mg/cm²、100mg/cm² 干沙尘的重复对比实验。通过改变绝缘子表面沙粒的沉积密度分析沙尘沉积量与闪络电压的关系。

通过改变绝缘子表面沙粒的沉积密度得到了沙尘沉积密度与绝缘子闪络电压的关系, 如图 6 所示。随着绝缘子上表面沉积的沙粒密度的增加, 绝缘子闪络电压急剧下降, 下降幅度为 7.5%。当沉积密度达到 25mg/cm² 左右时, 绝缘子闪络电压出现最小值。当沉积密度继续增大时, 绝缘子闪络电压的变化趋于平缓。说明少量的干沙粒沉降在绝缘子表面时, 会显著的影响绝缘子的闪络电压。

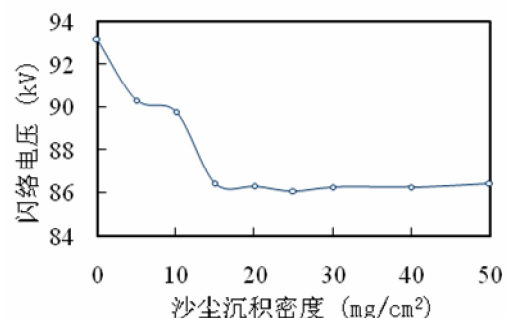


图 6 沙尘沉积密度与闪络电压的关系

3.4 沙尘含水量对闪络电压的影响

通过对普通污秽的研究表明污秽湿润后对绝缘特性的影响明显不同于干污秽。为了研究沉降在绝缘子表面上的沙沉受潮后对其闪络特性的影响, 通过改变沙尘的含水量, 得到了沙尘含水量与闪络电压的关系, 如图 7 所示。

中国发生沙尘暴的区域比较辽阔, 且各地区的气候不尽相同, 直接导致了沉降在绝缘子上的沙尘量及沙尘中的含水量有所不同。为了使模拟实验更加接近真实环境, 分别在沙尘沉积密度为 10mg/cm²、30mg/cm²、50mg/cm² 的情况下改变

沙尘含水量, 得出了较为详细的研究沙尘含水量与闪络电压的关系, 如图 7 所示。实验结果表明绝缘上沉降的沙尘含水后其闪络电压明显低于干沙尘时的闪络电压, 且随着沙尘含水量的增加, 绝缘子发生闪络时的电压呈递减趋势, 当含水量超过 6% 后闪络电压降低的趋势变缓。这是由于沙尘中的少量电解质遇水后发生溶解, 在沙粒中形成导电通道, 大大降低了绝缘子的绝缘性能; 当少量的电解质溶解度达到饱和后, 随着水份的增加会对其产生稀释作用, 从而降低了解质质的导电能力, 因此绝缘子的闪络电压降低的趋势变缓。

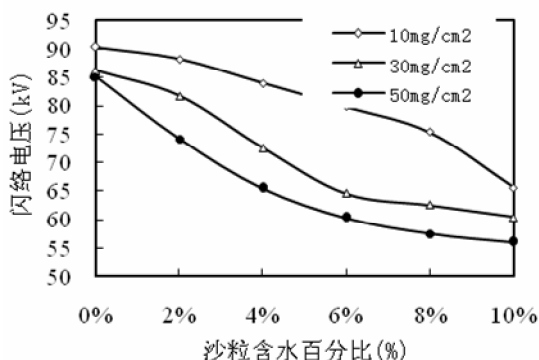


图 7 绝缘子闪络电压与沙尘含水量的关系

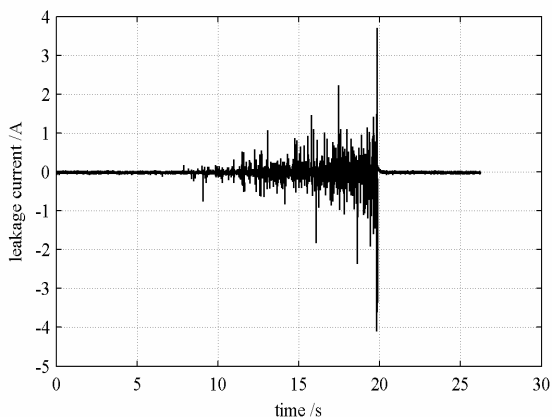


图 8 沙尘沉积量 $50\text{mg}/\text{cm}^2$ 含水量 10% 时泄漏电流

图 8 是在沙尘沉积量 $50\text{mg}/\text{cm}^2$ 时含水量为 10% 时泄漏电流。在施加电压初始阶段, 泄漏电流幅值为 10-15mA, 此时没有明显放电现象; 随着施加电压的进一步升高, 绝缘子边缘出现局部电弧时, 泄漏电流幅值为 150-200mA; 随着局部电弧的重燃和熄灭, 泄漏电流中出现大量脉冲电

流, 最大幅值到达 700-800mA; 当局部电弧发展成闪络后, 泄漏电流幅值超过 1000mA。这与普通污秽发电现象类似, 即随着施加电压的升高, 泄漏电流幅值增大。

4 结论

本文通过对沙尘环境下绝缘子模型的放点试验研究分析得出一下结论:

1) 风沙环境下, 有风有沙和有风无沙时, xp-70 绝缘子闪络电压比无风无沙时闪络电压高, 随着风速的增加而增大, 但增大趋势变缓; 有风有沙时闪络电压比有风无沙时高。

2) 风沙环境下, 沙粒带电后, xp-70 绝缘子闪络电压降低, 随着带电量的增加而降低, 但降低的趋势变缓; 带正电荷时闪络电压比带负电荷时高。

3) 绝缘子上沉降干沙粒后, 闪络电压急剧下降, 当沙粒沉积密度达到 $20\text{mg}/\text{cm}^2$ 后闪络电压无明显变化; 绝缘子上沉降湿沙粒后, 闪络电压随着含水量的增加而降低, 且下降趋势变缓。

参考文献

- [1] Gill M. Frictional electrification of sand[J]. Nature, 1948, 9: 568-659
- [2] Latham J. The electrification of snowstorms and sandstorms[J]. Q J R Meteorol, 1964, 90: 91295
- [3] Greeley, Iversen. Wind as a Geological Process on Earth, Mar, Venus and Titan[M]. New York: Cambridge UnivPress, 1985.
- [4] Schmidt D S, Schmidt R S. Electrostatic force on saltation sand[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(4): 8997-9001.
- [5] 黄宁, 郑晓静. 风沙流中沙粒带电现象的实验测试[J]. 科学通报, 2000, 45(20): 2232-2235
- [6] 郑晓静, 黄宁, 周又和. 风沙运动的沙粒带电机理及其影响的研究进展[J]. 力学进展, 2004, 34(1): 77-86
- [7] 屈建军. 沙尘暴起电的风洞模拟实验研究[J]. 中国科学, 2003.6, 33(6): 593-601
- [8] 郑晓静, 周又和. 风沙运动研究中的若干关键力学问题[J]. 力学与实践, 2003, 25(2): 1-6

- [9] 黄宁, 郑晓静. 风沙运动力学机理研究的历史、进展与趋势[J]. 力学与实践, 2007, 29(4): 9-16
- [10] 董治宝, 郑晓静. 中国风沙物理研究 50a[J]. 中国沙漠, 2005.11, 25(6): 795-815
- [11] 郑晓静. 风沙运动的力学机理研究[J]. 科学导报, 2007, 25(14): 22-27
- [12] 张鸿发, 王韬, 屈建军. 沙尘暴电效应的实验观察研究[J]. 地球物理学报, 2004, 47(1): 47-53
- [13] 屈建军, 俎瑞平. 扬沙和沙尘暴对导线电位影响的风洞模拟实验[J]. 中国沙漠, 2004, 24(5): 534-538
- [14] M. I. Qureshi, A. A. Al-Arainy and N. H. Malik, "Performance of rod-rod gaps in the presence of dust particles under lightning impulses", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 6, No. 2, pp. 706-714, 1991.
- [15] 司马文霞, 吴亮, 杨庆. 沙尘对电力系统外绝缘电气特性影响分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(1): 16-20
- [16] 司马文霞, 杨庆, 吴亮, 等. 平板模型沿面工频沙尘闪络特性的试验研究及放电机理分析[J]. 电机工程学报, 2008
- [17] 司马文霞, 马高权, 杨庆. 风沙条件下的平板模型直流沿面放电特性[J]. 高电压技术, 2008.12, Vol.34, No.12: 2570-2574.
- [18] S. H. A. Hamza, N. M. K. Abdelgawad, and B. A. Arafa, "Effect of desert environmental conditions on the flashover voltage of insulators", Energy Conversion and Management, Vol. 43, No. 17, pp. 2437-2442, 2002.
- [19] C. X. Sun, W. X. Sima, and L. C. Shu, Atmospheric Environment and Electrical External Insulation, Beijing, China Electric Power Press, pp. 79-80, 2002.