

沙尘环境下绝缘子交流闪络特性及机理

司马文霞, 程浩, 杨庆, 袁涛, 杨鸣, 叶轩

(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, 重庆 400030)

摘要: 风沙环境下沙粒的性质和状态可对输电线路外绝缘特性产生影响, 进而威胁输电线路的安全运行。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。对风沙速度、风沙带电量、沙尘沉积量等因素对瓷绝缘子闪络电压的影响规律开展了实验研究, 结果表明: 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低; 同时, 随着沙粒荷质比升高, 绝缘子闪络电压呈降低趋势, 且沙粒带负电时比带正电时的闪络电压略高; 绝缘子上表面沉积沙尘后, 其闪络电压随着沉积量的增加先减小后增大, 存在极小值; 最后, 结合闪络过程和泄漏电流的分析, 对风沙环境下绝缘子沿面放电机理进行了深入的探讨。

关键词: 沙尘暴; 绝缘子; 模拟实验; 泄漏电流; 闪络特性; 闪络机理

中图分类号: TM852

文献标志码: A

文章编号: 1003-6520(2011)04-0834-07

AC Flashover Performance and Mechanism of Insulator in Wind Sand Environment

SIMA Wen-xia, CHENG Hao, YANG Qing, YUAN Tao, YANG Ming, YE Xuan

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The flashover performance of insulator in sand storm can be influenced by the air condition and the characteristics of sand particle, then may bring danger to the safe operation of transmission line. Therefore, by analyzing relative literatures and the research results, and taking an XP-70 porcelain insulator as the research object, we experimentally and theoretically investigated the AC flashover characteristics regularity of the insulator in wind sand environment, and obtained the influences of wind speed, charge deposited on sand and sand quality in the flashover process. It is found that the flashover voltage of the XP-70 porcelain insulator increases with the increase of the wind speed in wind sand environment under the AC voltage, and that the flashover voltage in weather of wind dust is lower than that in the weather of wind. The flashover voltage of the XP-70 porcelain insulator decreases with the increase of the sand specific charge, and the flashover voltage of the sand with positive charge is lower than that with negative charge. When the sand particles deposit on the surface of the insulator, the flashover voltage appears to be a curve which decreases at first and then increases, and there is a minimal value. Moreover, according to the flashover process and the change of the leakage current during the process, the flashover mechanism of the insulator was analyzed.

Key words: sand-dust storm; insulator; simulation experiment; leakage current; flashover performance; flashover mechanism

0 引言

近年来,我国沙尘暴天气频发的地区已经不局限在北方干旱荒芜的沙漠地区,包括江苏、安徽、湖北等南方省份在内的16省、市、自治区都时常出现不同程度的沙尘天气,尤其在沙尘天气频发的4、5月份,平均有8.6次沙尘天^[1-3]。在发生沙尘天气的地区,国内外学者均观测到因沙风过境引起的高压打火、输电线路跳闸现象^[4-13]。有研究学者在新疆地区对高压输电线路运行现场进行调研,发现强风

及沙尘环境下的不明闪络事故约占整个外绝缘闪络事故的50%^[14]。国外也有沙尘暴引起的外绝缘闪络报道^[15]。这是由于沙尘在输送过程中产生不对称摩擦引起的沙粒带电所导致的^[6-13]。带电沙粒形成的空间电荷区会对输电线路相间和导线对杆塔的空气间隙及绝缘子表面放电特性产生影响。因此研究在沙尘天气下电力系统外绝缘电气特性,可为沙尘天气频发区的电力系统外绝缘设计和安全运行提供理论依据。

目前国内外学者对沙尘环境下的空气间隙的放电特性做了大量的研究^[16-18],发现空气间隙的放电特性受电极表面沉积沙粒的影响较大,而间隙中的沙粒对其影响较小。也有学者采用典型平板放电模

基金资助项目: 国家自然科学基金(90510014)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(90510014)。

型在沙尘天气下进行其放电特性的研究^[19],发现风沙会明显的影响其放电特性,带电沙粒会降低平板模型的闪络电压,降低幅度与沙粒电荷量有关,同时得到了沙粒沉积量及沙粒中水分质量分数的变化也会明显影响其闪络电压。但是针对带有弯曲弧面绝缘结构的电气模型在沙尘环境下放电过程及放电机理的研究还少见报道。

我国西北地区蕴藏着丰富的煤电和风电资源,为实现“西电东送”、“疆电东送”,输电线路会跨越大量的风沙环境地区,例如新疆哈密至甘肃永登 750 kV 输变电工程就经过新疆和甘肃两大沙尘暴频发区。但是目前在进行输电线路外绝缘配置的设计、施工和维护工作时,并没有充分考虑到强风及沙尘因素的影响。因此,本文采用瓷绝缘子 XP-70 进行了大量的实验研究,分析了沙尘暴环境对绝缘子闪络电压的影响规律,不仅对研究沙尘环境下的电气外绝缘特性和闪络机理具有重要的学术意义,同时也可作为沙尘暴频发地区外绝缘设计提供参考依据,具有重要的工程应用价值。

1 实验装置和方法

1.1 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 3 种天气情况^[1]。同时,受地域气候影响,沙尘暴在不同地区发生时展现的现象也有所区别:在气候干燥的北方地区,沙尘暴发生时往往伴随着大风和飞沙,沙粒不易沉积在绝缘子上,表现为典型的扬沙天气;而在南方气候湿润地区,沙尘季节被尘雾和细雨笼罩,呈现湿度大、风速小的特点,沙尘易沉降在绝缘子表面。本文针对这两种典型的沙尘天气对绝缘子闪络特性产生的影响进行了模拟研究。鉴于扬沙天气发生时气候比较干燥,绝缘子上的污秽对其闪络电压基本无影响,因此扬沙实验中

试品采用洁净的绝缘子;然而频繁发生尘雾天气的气候湿润地区,绝缘子上本已积聚的污秽物质易受潮溶解,同时湿润的绝缘子表面使沙尘更容易沉积其上,增加了污闪的风险,因此浮尘实验中试品采用污秽绝缘子,并以人工涂污的方式使绝缘子积污。

实验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建的沙尘暴模拟实验室进行,扬沙实验的实验装置图如图 1 所示,通过改变风速、沙尘质量密度以及沙尘带电量等环境变量可很好地模拟各种扬沙天气环境。针对气候湿润地区沙尘季节呈现尘雾的特点,去掉图 1 中的风沙装置,将绝缘子放进配套的气候箱内,向试品上加均匀的沙尘即可。利用热雾发生器可在气候箱内模拟大雾及毛毛雨天气。

图 1 所示的风沙模拟装置包括:双吸离心风机,额定功率为 7.5 kW,风速可调,最大可达 25 m/s;主体装置由铁架支撑,进沙漏斗连接风沙流通道,通道侧面为玻璃窗,便于观察。前端金属网可以施加电压,其作用是使通过的沙尘与金属网碰撞从而带上电荷。绝缘子试品置于出风口前端附近,使其受风均匀,同时为了减少实验误差,要严格控制绝缘子试品位置不变。采用 MS6250 型数字风速仪测量风速,其测量范围是 0~20 m/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 0.1~0.315 mm。

1.2 实验电路

实验电源由调压器和变压器共同组成(见图 2),其中调压器的主要参数:额定容量为 100 kVA,输入电压 380 V,输出电压 0~400 V;变压器的主要参数:额定容量为 200 kVA;额定电流为 1 A,输入电压 0~400 V,输出电压为 0~200 kV。实验电源通过一个穿墙套管引入沙尘暴模拟实验室,实验高压端通过 SGB-200A 交流电容式分压器连接到数据

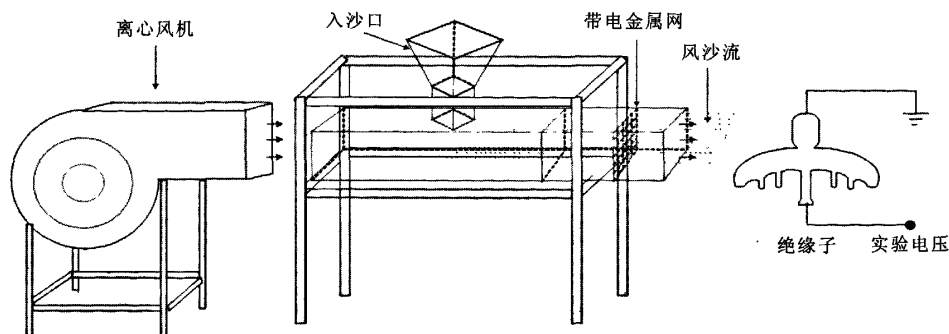


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of test device

采集系统,分压器的分压比为 1:1000。为避免实验中电流过大,施加保护电阻 R ,其阻值为 $5\text{ k}\Omega$ 。

1.3 沙尘荷质比的测量方法

在实验中,为了使沙粒带上一定的电荷量,采用带电金属网使沙尘碰撞金属网带电^[15],如图 1 中带电金属网所示,通过改变金属网上所施加的电压及金属网孔来改变沙粒的带电量极性和大小。采用网状目标法测量沙粒碰撞金属网后的带电量及荷质比,其原理如图 3 所示,风沙流体穿过带电金属网后,带电沙粒到达网状接收装置,当电荷转移到金属丝网上时,便与地面构成回路,并用精密微安表测量回路中的微电流 I ,待微电流稳定后,在一定时间 t 内计算出发生定向移动的电荷量 Q ,同时测出在相同时间内采样桶收集的沙粒质量 m ,则可以测出沙粒的平均荷质比 Q/m 。

2 沙尘环境下绝缘子的闪络规律

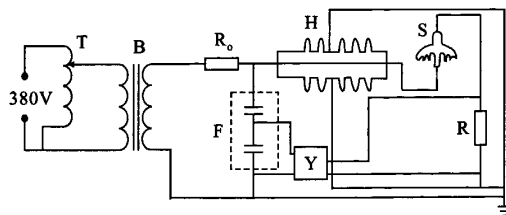
2.1 风速对绝缘子闪络电压的影响

由于风速是衡量沙尘暴的重要参数之一,因此,本文开展了扬沙环境下风速对绝缘子闪络电压的影响规律的研究。通过改变风速进行了有风无沙、有风有沙(沙尘颗粒质量密度 10 mg/cm^3)两种情况的对比实验,实验结果如图 4 所示。

由图 4 可以发现,在有风无沙环境下,随着风速的增加,绝缘子的闪络电压呈增大趋势,但增大率变缓。在风速 $>6\text{ m/s}$ 后,绝缘子闪络电压受风速的影响有饱和趋势。同时,对比有风的情况和风速为 0 的情况,可以发现,有风时绝缘子闪络电压比风速为 0 时高,风速导致其闪络电压的升高,但升高的幅度逐渐变小。

无风环境下绝缘子表面形成局部电弧后,促使局部电弧向前发展的主要因素是电弧头部附近存在的热电离^[20]。而大风的作用会影响电弧的发展:一方面,大风加快了绝缘子表面的空气流通,会降低弧头温度进而影响热游离;另一方面,水平风向使弧头带电粒子受绝缘表面的切向力增大,降低了带电粒子与绝缘子表面碰撞的剧烈程度,阻碍了粒子温度的升高,间接影响了热游离;此外,电弧是一束质量很轻的游离态气体,靠电荷间的相互引力形成并维持其形状,在外力作用下,很容易发生弯曲、变形,当其受外界较大的水平力时,处于外围的部分离子被吹散,导致电弧被拉长,从而使已形成的局部电弧易于熄灭。基于以上 3 个方面,在有风环境下绝缘子放电发展会被动地增加熄灭和重燃的过程,放电持续的时间较长,因此会造成闪络电压升高。

从图 4 中也可以发现,在有风有沙环境下,虽然



T:调压器;B:变压器; R_0 :保护电阻;H:高压套管;S:样品;
F:电容分压器;Y:数据采集系统;R:标准无偏电阻

图 2 实验电源回路

Fig. 2 Test circuit

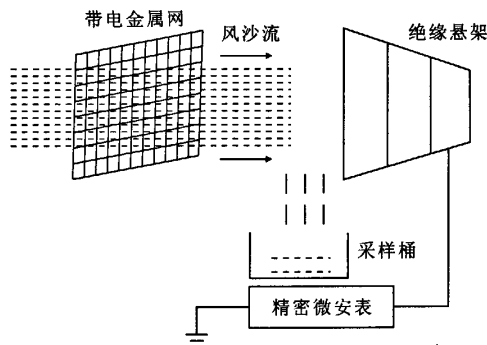


图 3 网状目标法原理示意图

Fig. 3 Schematic of mesh target

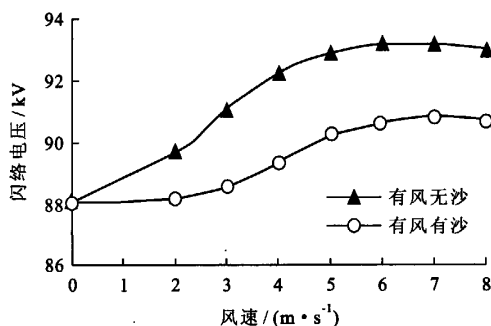


图 4 风速与绝缘子闪络电压的关系

Fig. 4 Relationship between flashover voltage
of insulator and wind speed

绝缘子闪络电压仍随着风速的增加而升高,但同样的风速下,绝缘子在有风有沙环境下的闪络电压比有风无沙时要低一些。这主要是由于风沙流经过时会畸变原有空间电场分布。一方面,受绝缘子附近高场强影响,沙粒表面吸附的水分将会强烈极化,水分的电离度增加会增多绝缘子附近空间的离子数量,导致绝缘子附近原有的电场分布发生改变;另一方面,电场分布受介质介电常数的影响很显著,沙粒的介电常数相对于空气的较大^[21],因此,环境中出

现多种电介质时会加剧对原单一介质电场分布的畸变程度。但是风沙流对原电场分布的影响作用有限,因此有风有沙时绝缘子闪络电压虽然比有风无沙时降低了,但仍比无风无沙时高。

2.2 沙粒电荷量对绝缘子闪络电压的影响

沙尘暴发生时,扬起的沙粒彼此之间、沙粒与大地之间都会由于不对称摩擦而带上电荷,形成带电颗粒,这会对绝缘子的放电特性产生影响。因此,本文通过实验研究了沙粒带电量对绝缘子闪络电压的影响。实验采用固定的风速和沙尘质量密度,分别为 6 m/s 和 10 mg/cm^3 ,实验结果如图 5 所示。

由图 5 可以看出,当沙粒所带电荷由 50 上升到 300 nC/kg 时,绝缘子闪络电压略有下降,这主要是沙粒带电量太小,沙粒产生的附加电场仅仅对原电场分布产生了微小的影响。实际沙尘暴发生时,沙粒带电后产生的电磁场会对通信系统产生明显的干扰^[22],但此附加电场还难以大幅影响高电场作用下的绝缘子闪络过程。

2.3 沙尘沉积量对污秽绝缘子闪络电压的影响

南方大部分地区气候较为湿润,使得悬于空气中的污秽颗粒、粉尘等很容易造成户外绝缘子大量积污。同时这些地区在沙尘暴季节多表现为尘雾或浮尘天气,受湿润天气及绝缘子表面污秽物黏着作用,沙尘极易沉降在绝缘子表面。沙尘作为一种不溶性污秽颗粒,其沉积量的变化会对绝缘子闪络特性造成一定影响,因此本文开展了沙尘沉积量对污秽绝缘子闪络电压影响的实验研究。根据线路污秽等级的划分标准^[23],实验中选取了 4 个污秽等级,对应的等值附盐密度分别为 0.05 、 0.1 、 0.15 及 0.25 mg/cm^2 。

图 6 为通过实验得到的在各个污秽等级下沙尘沉积量与绝缘子闪络电压的关系。由实验数据的拟合曲线可发现,随着沙尘沉积量的增加,绝缘子闪络电压先减小后增大,在沙尘沉积密度为 10 mg/cm^2 附近,闪络电压出现最小值,此时绝缘子闪络电压最大下降了 15.1% 。当沙尘沉积密度 $> 30\text{ mg/cm}^2$ 后,绝缘子闪络电压超过了无沙时的闪络电压。这说明在潮湿的气象环境下,少量沙尘沉积在绝缘子上后会对绝缘子的绝缘特性造成一定的影响,尤其是在易发生尘雾天气的气候湿润地区。

3 沙尘沉积作用下绝缘子闪络过程及放电机制分析

风沙环境下整个模拟实验室弥漫着沙尘,难以进行闪络过程的拍摄,因此,本文采用 HG-100K 高速摄像机对沙尘沉积作用下绝缘子的闪络过程进行

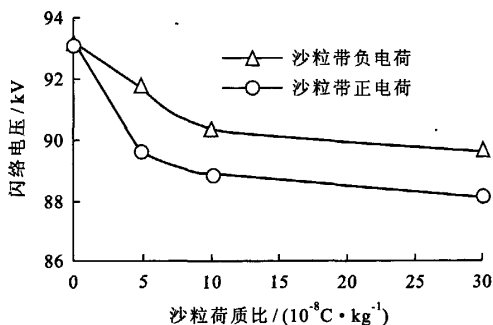


图 5 沙粒电荷量与绝缘子闪络电压的关系

Fig. 5 Relationship between flashover voltage of insulator and charge of sand dust

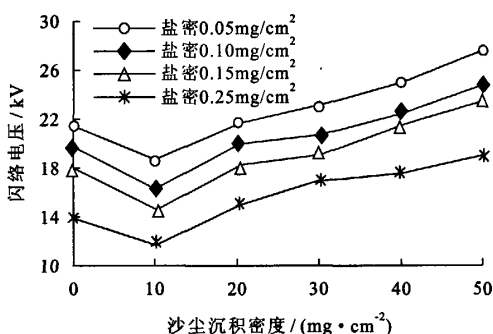
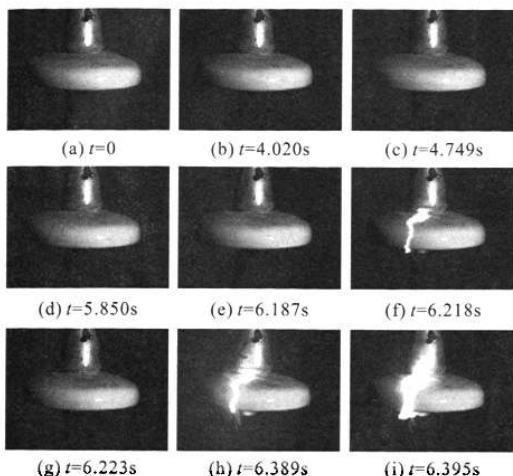


图 6 沙尘沉积量与绝缘子闪络电压的关系

Fig. 6 Relationship between flashover voltage of insulator and deposition density of sand dust

了拍摄。通过闪络过程发现不同沙粒沉积密度下沿面闪络特性呈现不同的特点,下文在固定污秽等级(等值附盐密度 $\rho_{\text{ESDD}} = 0.05\text{ mg/cm}^2$)条件下,以两种典型的沉积密度下的放电过程进行分析,沉积密度分为较小(10 mg/cm^2)和较大(50 mg/cm^2)两种情况。

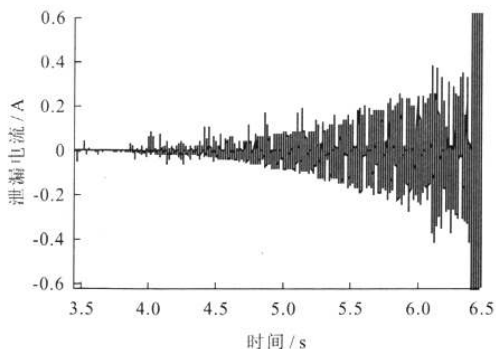
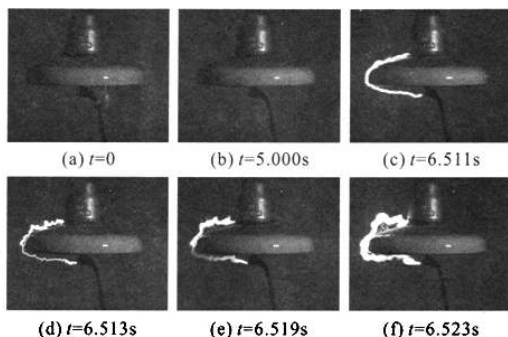
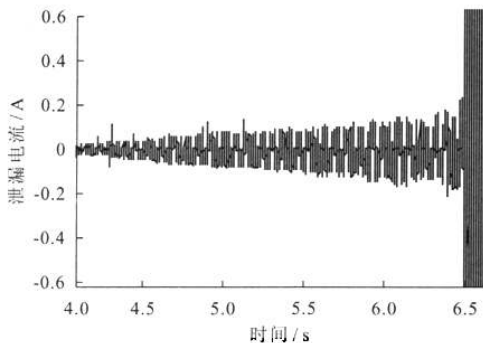
图 7 所示为沙粒沉积密度较小时绝缘子的闪络过程,图 8 所示为对应绝缘子闪络过程中泄漏电流的变化。由于沙粒沉积密度较小,沙粒均匀、分散的覆盖绝缘表面,沙粒间间隙较大,不会影响绝缘子表面污秽层吸收空气中的水分,污秽层可以充分润湿。随着绝缘子上所施加电压的升高,泄漏电流逐渐增大,如图 8 所示。在加压初始阶段($t < 4.5\text{ s}$),泄漏电流幅值较小,发热量小,对绝缘子表面的沙粒层影响很小,对应图 7(a)~(b)。随着施加电压的继续升高,泄漏电流幅值明显的增大($t = 5 \sim 6\text{ s}$),在电流密度集中的区域因泄漏电流作用产生大量的热量。沙粒是典型的低比热容固体颗粒,在吸收相同热量的条件下,温度变化更为明显,因此电流密度集中区域的沙粒很快会被烤干。这些干燥了的沙粒在

图7 沙尘沉积密度为 10 mg/cm^2 时绝缘子闪络过程Fig.7 Flashover process of insulator with $\rho = 10 \text{ mg/cm}^2$

电场垂直分量的作用下激烈地碰撞绝缘子表面,导致部分沙粒带电,同时受法向电场力的作用这些带电沙粒向周围运动,在绝缘子表面形成若干无沙区域,如图7(c)~(e)所示,且无沙区域会逐渐扩大,由于沙的介电常数比空气大,无沙区域内电场强度比有沙区域要大,其区域内很容易发生放电^[19]。当所施加的电压达到某临界值时,会出现明亮的局部电弧,泄漏电流伴随着局部电弧的重燃和熄灭而产生大量脉冲电流。随着施加电压的进一步升高,当局部电弧发展到低压电极,导致沿面完全闪络,如图7(f)~(i)所示。在电弧出现后,通道附近的沙粒会发生向上跃起的现象,在图7(i)可以明显的观察到。观察图7(d)~(i),可以发现局部电弧及最终闪络通道均发生在无沙区域,这也验证了前文所述的“无沙区域内电场强度比有沙区域要大,其区域内很容易发生放电”的结论。

图9为沙粒沉积密度较大时绝缘子的闪络过程,图10为其对应闪络过程中泄漏电流幅值的变化趋势。对比图7和图9,可以发现沙尘沉积量较大时其闪络过程明显的不同于沉积密度较小时的现象。随着施加电压的升高,没有无沙区域的形成,当电压升高到某一临界值时,电弧瞬间贯穿两极,形成沿面闪络,如图9(a)~(c)所示。在主放电通道上方仍能看到跃起的沙粒,如图9(f),这说明主电弧通道上方的沙粒在高温电弧的作用下被烤干,并且这些沙粒在电弧形成时带上电荷,受电场强垂直分量的作用而发生起跳运动。

由图10可以看出随着施加电压的升高,泄漏电流变化不大,绝缘子闪络前其泄漏电流幅值也只有

图8 沙尘沉积密度为 10 mg/cm^2 时绝缘子泄漏电流Fig.8 Leakage current during the flashover process of insulator with $\rho = 10 \text{ mg/cm}^2$ 图9 沙尘沉积密度为 50 mg/cm^2 时绝缘子闪络过程Fig.9 Flashover process of insulator with $\rho = 50 \text{ mg/cm}^2$ 图10 沙尘沉积密度为 50 mg/cm^2 时绝缘子泄漏电流Fig.10 Leakage current during the flashover process of insulator with $\rho = 50 \text{ mg/cm}^2$

200 mA,而图8中泄漏电流在闪络前达到400 mA。这主要是沉积在绝缘子上厚厚的沙粒层全覆盖其下的污秽,致使污秽层无法充分湿润,降低了其导电能力。而且厚厚的沙尘层吸水能力很差,只能做为水气的凝结核保持一定的水分,形成的水膜可以使表面的沙粒潮湿,但不足以渗透到污秽层溶解污秽中的盐分,因此绝缘子的闪络电压反而比无沙粒沉积

时升高。

为了对沙粒的吸水能力做进一步的证实,通过实验观察沙粒中水分质量分数 w_{H_2O} 的变化对绝缘子闪络电压产生的影响。实验中设置 3 个沙尘沉积密度梯度(即沙尘沉积量),各个沙尘沉积量下沙粒中水分质量分数

$$w_{H_2O} = \frac{m_w}{m_w + m_s} \quad (1)$$

式中, m_w 、 m_s 分别代表水分和沙尘的质量,改变沙粒中水分的质量即可改变水分质量分数,实验结果如图 11 所示。

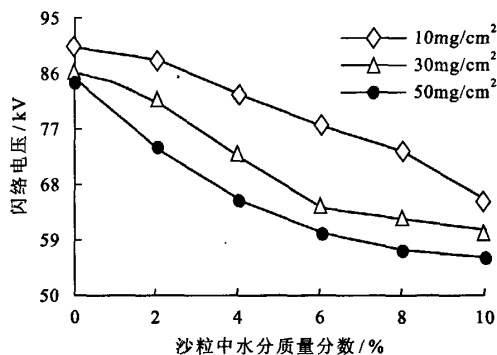


图 11 沙粒中水分质量分数对绝缘子闪络电压的关系

Fig. 11 Relationship between flashover voltage of insulator and moisture content of sand dust

由图 11 所示可发现,在各个沙尘沉积密度下,绝缘子闪络电压均随着沙粒中水分质量分数 w_{H_2O} 的增加而降低,当沙粒中水分质量分数 w_{H_2O} 超过 8% 后绝缘子闪络电压的变化趋于平缓,即此时沙粒已经充分潮湿,其吸收水分的能力趋于饱和。由此可以说明沙粒充分潮湿后会明显的降低绝缘子的闪络电压,且水分质量分数及潮湿程度越大,闪络电压下降的越明显。

若将沉积了沙尘的绝缘子放入通有足量热雾的雾室内,并在热雾环境下浸湿 15 min 后再施加电压,则其闪络电压下降百分比最大时为 9.21%,如图 7 所示。而图 11 中,沙粒沉积密度为 50 mg/cm²、水分质量分数为 2% 时的绝缘子闪络电压下降百分比就高达 12.95%。对比以上两组数据,即可说明沙粒在热雾环境、充分长的时间条件下,吸收的水分质量分数仅在 2% 左右,远低于使其充分潮湿的水分质量分数 8%,也即沙粒在热雾环境下虽受潮,但远未达到全部沙粒充分湿润的地步。沙尘沉积密度较小时受沙尘湿润程度的影响不大,原因是绝缘子污秽层不会被沙尘全部覆盖,可以吸收空气中的水分,充分溶解,导致绝缘子闪络电压会下降;然而,当

沙粒密度较大时影响很显著,污秽层被完全覆盖而无法受潮溶解,因此会使得污秽绝缘子的闪络电压有一定升高。

4 结论

本文通过实验研究了沙尘环境对绝缘子闪络特性产生的影响,并对沙尘环境中各个因素产生影响的机理进行了分析,得到以下结论:

1) 风沙环境下,绝缘子闪络电压会随着风速的增大而升高,但升高趋势逐渐变缓;有风有沙时其闪络电压比有风无沙时略低。

2) 荷电沙粒带电量在一定范围内变化时,对绝缘子闪络电压的影响比较小。

3) 污秽绝缘子受沙尘沉积量的影响较为明显,随沉积密度的增大,绝缘子闪络电压先降低后升高,存在最小值。沙尘沉积密度 $< 20 \text{ mg/cm}^2$ 时对绝缘子的绝缘性能有较大影响。

4) 污秽绝缘子表面沙尘沉积量较小时,绝缘子闪络过程中会出现无沙区域,无沙区域内比较容易产生局部电弧,会降低绝缘子的闪络电压;而沉积量较大时,不会出现明显的无沙区域,其闪络电压反而会升高。

参 考 文 献

- [1] 钱正安,宋敏红,李万元. 近 50 年来中国北方沙尘暴的分布及变化趋势分析[J]. 中国沙漠, 2002, 22(2): 106-111.
QIAN Zheng-an, SONG Min-hong, LI Wan-yuan. Analyses on distributive variation and forecast of sand-dust storm in recent 50 years in north China[J]. Journal of Desert Research, 2002, 22(2): 106-111.
- [2] 冯鑫媛,王式功,程一帆,等. 中国北方中西部沙尘暴气候特征[J]. 中国沙漠, 2010, 30(2): 394-399.
FENG Xin-yuan, WANG Shi-gong, CHENG Yi-fan, et al. Climatic characteristics of dust storms in the middle and west of northern China[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(2): 394-399.
- [3] 康玲,孙鑫,侯婷,等. 内蒙古地区沙尘暴的分布特征[J]. 中国沙漠, 2010, 30(2): 401-406.
KANG Ling, SUN Xin, HOU Ting, et al. Distribution characteristics of sandstorms in Inner Mongolian area[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(2): 401-406.
- [4] Gill E W B. Frictional electrification of sand[J]. Nature, 1948, 18(4): 568-569.
- [5] Hamza A S H A, bdelgawad N M K, Arafat B A. Effect of desert environmental conditions on the flashover voltage of insulators[J]. Energy Conversion and Management, 2002, 43(17): 2437-2442.
- [6] Schmidt D S, Schmidt R A. Electrostatic force on saltating sand[J]. Journal of Geophysical Research, 1998, 103(4): 8997-9001.
- [7] Schmidt D S, Schmidt R A. A theoretical predication of effects of electrostatic forces on saltating snow particles[J]. Annals of Glaciology, 1993, 23(18): 234-238.

- [8] Ansari H F, Eans A J B G. Microwave propagation in sand and dust storms[J]. IEE Proc Commun Radar & Signal Process, 1982, 129(5): 315-322.
- [9] 郑晓静, 黄宁, 周又和. 风沙运动的沙粒带电机制及其影响的研究进展[J]. 力学进展, 2004, 34(1): 77-86.
ZHENG Xiao-jing, HUANG Ning, ZHOU You-he. Advances in investigation on electrification of wind-blown sands and its effects[J]. Advances in Mechanics, 2004, 34(1): 77-86.
- [10] 曲建军, 言穆弘, 董光荣. 沙尘暴起电的风洞模拟实验研究[J]. 中国科学, 2003, 33(6): 593-601.
QU Jian-jun, YAN Mu-hong, DONG Guang-rong. Summary on wind tunnel simulation experiment study of sandstorm electrification[J]. Science in China, 2003, 33(6): 593-601.
- [11] 张鸿发, 王韬, 曲建军. 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.
ZHANG Hong-fa, WANG Tao, QU Jian-jun. An experimental and observational study on the electric effect of sand storm[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(1): 47-53.
- [12] 曲建军, 郑瑞平. 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.
QU Jian-jun, ZU Rui-ping. Wind tunnel simulation of effect of sandstorm on electrical wire voltage[J]. Journal of Desert Research, 2004, 24(5): 534-538.
- [13] 李芳, 屈建军. 风沙电研究的现状及展望[J]. 地球科学进展, 2002, 17(4): 572-575.
LI Fang, QU Jian-jun. Current situation and prospect of some research on wind-sand electricity[J]. Advance in Earth Sciences, 2002, 17(4): 572-575.
- [14] 贺博, 张刚, 陈邦发. 沙尘环境对板-板电极气隙放电特性影响的模拟试验研究[J]. 中国科学, 2010, 40(3): 296-302.
HE Bo, ZHANG Gang, CHEN Bang-fa. Simulation test research of the effect of dust environment on the discharge characteristics of plate board electrode gap[J]. Science in China, 2010, 40(3): 296-302.
- [15] Mohamed M Awad, Hassan M Said, Bahaa A Arafat, et al. Effect of sandstorms with charged particles on the flashover and breakdown of transmission lines[C]// International Conference on Large HV Electric Systems, Paris: CIGRE, 2002.
- [16] Qureshi M I, Al-Arainy A A, Malik N H. Performance of rod-rod gaps in the presence of dust particles under lightning impulses[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(2): 706-714.
- [17] Al-Arainy A A, Malik N H, Qureshi M I. Influence of desert pollution on the lightning impulse breakdown voltage of rod to plane air gaps[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(1): 421-428.
- [18] 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.
SIMA Wen-xia, WU Liang, YANG Qing. Effect of sand dust environment on external insulation of electrical power system[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(1): 16-20.
- [19] SIMA Wen-xia, YANG Qing, MA Gao-quan. Experiments and analysis of sand-dust flashover of the flat plate model[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(2): 572-581.
- [20] 顾乐观, 张建辉, 孙才新. 染污光滑圆柱绝缘子沿面电场分布对闪络过程的影响[J]. 中国电机工程学报, 1993, 13(增刊): 70-75.
GU Le-guan, ZHANG Jian-hui, SUN Cai-xin. Influence of surface electric field distribution along polluted cylindrical insu-

lator on flashover process[J]. Proceedings of the CSEE, 1993, 13(supplement): 70-75.

- [21] 阎照文. ANSYS10.0 工程电磁分析技术与实例详解[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2006.

YAN Zhao-wen. Analysis techniques of electromagnetic and examples detailed in ANSYS10.0[M]. Beijing, China: China Water Power Press, 2006.

- [22] YANG Chao-jun, WANG Yu-ning, JIANG Sheng-fa. Finite element analysis of the electromagnetic field of untouched permanent induction magnetic coupling[C]// 12th International Manufacturing Conference, Xi'an, China: [s. n.], 2006: 476-482.

- [23] 蒋兴良, 舒立春, 孙才新. 电力系统污秽与覆冰绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

JIANG Xing-liang, SHU Li-chun, SUN Cai-xin. Pollution and ice in power system insulation[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2009.



SIMA Wen-xia

Ph. D., Professor

多项国家、省部级和横向项目研究

E-mail: cqsmwx@cqu.edu.cn

司马文霞

1965—, 女, 博士, 教授, 博导

1994年获重庆大学电气工程系高电压技术专业博士学位。现任中国电机工程学会过电压学组委员, 教育部长江学者特聘教授。主要从事电力系统的防雷与过电压防护研究, 特殊环境中外绝缘放电特性及机理的研究。作为负责人承担1项国家重点基础研究发展计划(973项目)子课题, 2项国家自然科学基金项目研究, 作为主研人员参与



CHENG Hao

程浩

1984—, 男, 硕士生

研究方向为高电压与绝缘技术

E-mail: chenghao@cqu.edu.cn



YANG Qing

Ph. D.

Associate professor

杨庆

1981—, 男, 博士, 副教授, 硕导

2006年获重庆大学电气工程系高电压技术专业博士学位。从事高电压输变电技术、外绝缘技术及电力系统过电压研究

E-mail: yangqing@cqu.edu.cn



YUAN Tao

Ph. D.

袁涛

1976—, 男, 博士, 讲师

从事电力系统过电压及接地技术研究

E-mail: yuantaocq@cqu.edu.cn

收稿日期 2010-12-29 修回日期 2011-03-19 编辑 任明