

# 沙尘对电力系统外绝缘电气特性影响分析

司马文霞, 吴亮, 杨庆

(重庆大学高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400030)

**摘要:** 为了解沙尘对电力系统运行造成的影响, 在查阅有关文献的基础上分析了沙尘对空气间隙和绝缘子放电特性的影响, 同时在沙尘模拟实验室进行了风沙对间隙击穿电压影响的实验研究。分析和研究表明: 在雷电冲击和操作冲击电压作用下, 沙尘对空气间隙的冲击放电特性有一定的影响, 主要是由于阴极表面上的沙尘引起; 沙尘对空气间隙及绝缘子放电特性的影响程度与风速、沙尘的带电量等因素有关。

**关键词:** 沙尘暴; 空气间隙; 绝缘子; 放电电压; 电压分散性; 电荷量

**中图分类号:** TM852

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1003-6520(2008)01-0016-05

## Effect of Sand Dust Environment on External Insulation of Electrical Power System

SIMA Wen-xia, WU Liang, YANG Qing

(The Key Laboratory of High Voltage Engineering and Electrical New Technology of the Ministry  
of Education, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** The sand storm is one kind of serious natural disaster. In recent years, along with the frequent appearance of sand dust weather in our country, the influence of sand dust on electrical discharge of outdoor insulation causes our attention. There are also some reports on the power system tripped-out accidents caused by blowing sand in China. Therefore, researches on the influence of wind-sand on the electrical discharge characteristics along the insulator and air gap are important for the outdoor insulation coordination and safe operation of power system. This paper carries on the summary about the influence of sand dust on the breakdown of air gap and the flashover characteristics of the insulator on the present stage. Moreover, the tests on the influence of wind-sand on the air gap breakdown voltage are carried out in the wind-sand simulation laboratory. The results show that the sand dust particles had a considerable influence on the breakdown of air gaps under lightning and switching impulses, and the dust particles which settle on the cathode are most responsible for this dust related effects. The influence of the sand dust particles on the breakdown voltage of the air gap and the flashover characteristics of the insulator is dependent upon wind speed and the electric quantity of sand dust and so on.

**Key words:** sand dust storm; air gap; insulator; breakdown; distribution of voltage; charge

### 0 引言

扬沙和沙尘暴是一种气象灾害和突发性的地质灾害, 强大的风力和浓厚的沙尘给人类造成了巨大危害, 且伴有放电现象<sup>[1]</sup>。由于气流运动中沙尘颗粒间及沙尘颗粒与地床面间的电荷交换使沙粒带上了电荷<sup>[2-6]</sup>, 这些带电沙粒形成的空间电荷区对输电线路相间和导线对杆塔的空气间隙及绝缘子串表面放电特性产生影响。我国曾发生过由于扬沙天气而导致电力系统的停电事故<sup>[7]</sup>。

国内, 有关沙尘对输电线路外绝缘电气特性影响的研究很少。主要对风沙流中的电场产生机理<sup>[1,2]</sup>及在不同条件下测量和分析了风沙流中的电场、导线电位和沙粒的荷质比<sup>[3-8]</sup>。国外, 一些学者

对空气间隙及绝缘子在沙尘环境中的放电现象进行了研究<sup>[9-13]</sup>。结果显示, 沙尘对空气间隙击穿电压、绝缘子闪络电压 $U_f$ 与空气间隙在雷电冲击电压和操作冲击电压作用下放电分散性及伏秒特性均有影响, 本文分析了目前的研究状况<sup>[14-16]</sup>。

### 1 沙尘对空气间隙冲击放电特性的影响

#### 1.1 沙尘对空气间隙雷电冲击放电特性的影响

1) 雷电冲击电压作用下沙尘对棒—棒空气间隙放电特性的影响。研究表明: 在雷电冲击电压(1.2/50  $\mu$ s)作用下, 沙尘对棒—棒间隙50%击穿电压 $U_{50}$ 的影响与间隙距离有关<sup>[9]</sup>。

在正、负雷电冲击电压作用下, 有沙尘(电极表面和空气间隙均有沙尘)和无沙尘(电极表面和空气间隙均无沙尘)2种情况下空气间隙的 $U_{50}$ 与间隙距离 $d$ 的关系见图1、2。其中, 按沙尘对间隙放电特性的影响, 分①5 cm< $d$ <15 cm; ②15 cm< $d$ <50 cm;

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)。

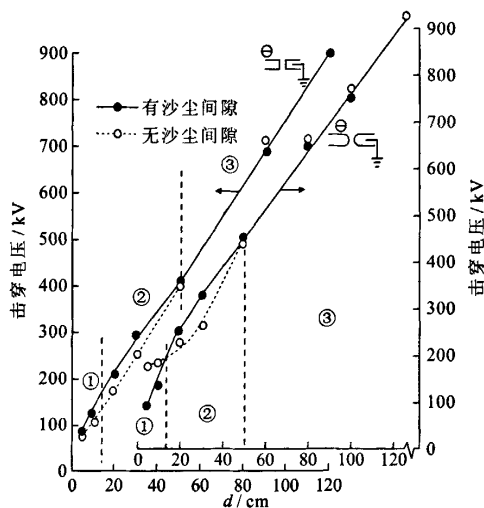
图1 负极性雷电冲击下间隙  $U_{50}$  与  $d$  的关系

Fig. 1 50% breakdown voltage as a function of gap length under negative lightning impulse

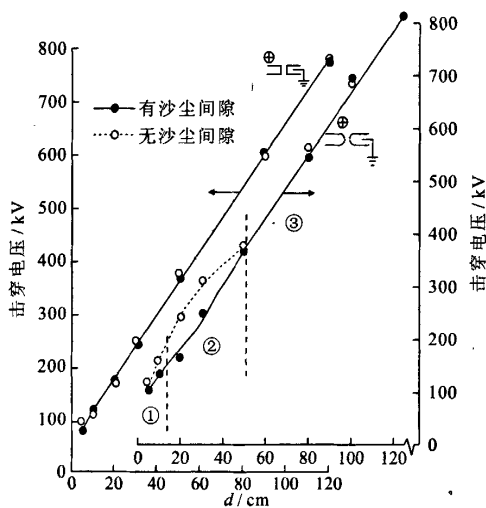
图2 正极性雷电冲击下间隙  $U_{50}$  与  $d$  的关系

Fig. 2 50% breakdown voltage as a function of gap length under positive lightning impulse

③  $d > 50$  cm 3 个区域。

在第①间隙区域,在负极性雷电冲击电压作用下,对半球形电极,有沙尘时间隙  $U_{50}$  比无沙尘时低;对方形电极,有沙尘时间隙  $U_{50}$  比无沙尘时高;对这2种形状电极,有沙尘时,间隙的击穿电压分散性和击穿时间分散性比无沙尘小。在正极性雷电冲击电压作用下,对半球形电极,有沙尘时间隙  $U_{50}$  比无沙尘低;对方形电极,有沙尘且  $d$  为5 cm 时,间隙  $U_{50}$  比无沙尘时小,对其它距离的间隙,其  $U_{50}$  没有明显变化;对这2种形状电极,有沙尘时,间隙击穿电压的分散性比无沙尘时要小,而击穿时间的分散性和无沙尘时类似。

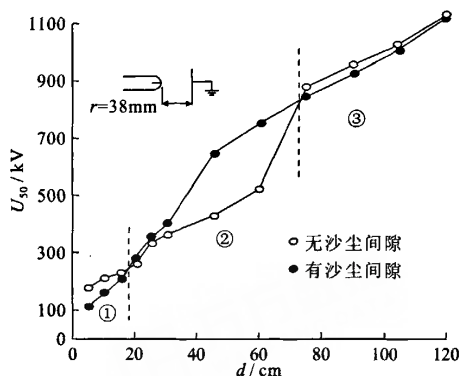


图3 在负极性雷电冲击下沙尘对击穿电压的影响

Fig. 3 50% breakdown voltage as a function of gap length under positive lightning impulse

在第②间隙区域,在负极性雷电冲击作用下,对半球形和方形电极,有沙尘时,间隙  $U_{50}$  均较无沙尘时大。在正极性雷电冲击电压作用下,对半球形电极,有沙尘时间隙  $U_{50}$  较无沙尘时低;对方形电极,有沙尘间隙  $U_{50}$  较无沙尘时无明显变化。

在第③间隙区域,有沙尘时,空气间隙  $U_{50}$  随  $d$  线性增加,如式:

$$U_{50} = Ad + B, \quad (1)$$

式中,  $A$  为击穿电压随  $d$  的变化率;  $B$  为常数。  $A$  和  $B$  的大小与电极形状及作用电压极性有关。在此间隙区域,有沙尘时,间隙的击穿电压和击穿时间较无沙尘时无明显变化。

可见,在第①区域,有沙尘时,间隙的击穿电压较无沙尘时有变化,其变化与作用电压的极性和电极的形状有关;在第②区域,有沙尘时,间隙的正极性击穿电压比负极性低,因此在考虑有沙尘的绝缘配合时,只需考虑正极性击穿电压;在第③区域,有沙尘时,间隙的击穿电压及击穿时间较无沙尘时无明显变化,在此区域,可不考虑沙尘对间隙放电特性的影响。同时,一些试验比较了有、无沙尘以及仅电极表面有沙尘(棒-棒间隙间无沙尘)3种情况下间隙的放电特性。结果表明:间隙放电特性的变化主要是由于阴电极表面上沉积沙尘所致,与间隙间是否有沙尘无关。

2)在雷电冲击电压作用下沙尘对棒-板空气间隙放电特性的影响。在正极性雷电冲击电压作用下,有无沙尘时,棒-板空气间隙击穿电压无明显变化<sup>[11]</sup>。在负极性雷电冲击电压作用下,有无沙尘时,棒-板间隙击穿电压与  $d$  有关,见图3。同样,间隙也可分为①、②、③3个区域,区域的划分与电极形状和大小有关<sup>[10]</sup>。

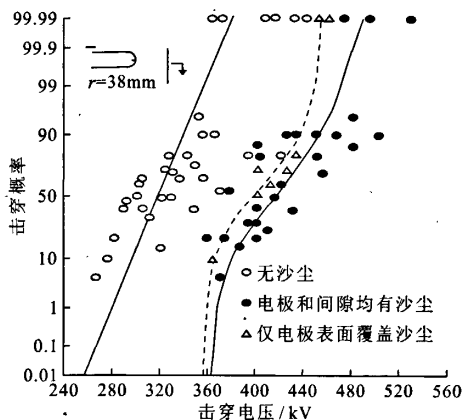


图4 在负极性雷电冲击下  $d$  为 30 cm 的击穿概率

Fig. 4 Breakdown voltage probability distribution for 30 cm air gap under negative lightning impulse

表1 10 cm 棒—板间隙有无沙尘时击穿电压

Tab. 1 Breakdown voltage of rod to plane gap kV

条件	$U_0$	$U_{50}$	$U_{100}$
无沙尘	155~198	215~256	285~315
有沙尘	140~152	157~190	140~220

在第①间隙区域,有沙尘时,棒—板间隙击穿电压及分散性比无沙尘时小。表1为  $d=10$  cm,棒半径为 38 mm 时,有无沙尘时棒板间隙的击穿电压。

在第②间隙区域,有沙尘时,间隙击穿电压较无沙尘时高,击穿电压的分散性比无沙尘时小。图4为在负极性雷电冲击电压作用下  $d$  为 30 cm 的击穿概率。

在第③间隙区域,沙尘的存在对间隙  $U_{50}$  特性无明显影响。

实验表明:在负极性雷电冲击电压作用下,棒—板间隙的放电特性主要受阴极表面沉积沙尘影响,阴极表面沉积沙尘增加了阴极发射电子的数目,当  $d$  较小时,电子数目的增加导致间隙击穿电压下降;  $d$  大时,间隙电场的不均匀度增加,在棒电极头部形成稳定的电晕,沙尘发射的电子加强了电晕的形成,电晕起始放电电压增大;当  $d$  进一步增大,沙尘发射的电子形成的空间电荷对间隙放电特性的影响变得较弱,沙尘对间隙击穿电压特性影响不明显。

## 1.2 沙尘对空气间隙操作冲击放电特性的影响

1)操作冲击电压作用下沙尘对棒—棒空气间隙放电特性的影响<sup>[12]</sup>。研究表明:在操作冲击电压(250/2 500  $\mu$ s)作用下,沙尘对棒—棒间隙  $U_{50}$  的影响与  $d$  有关。

在负极性操作冲击电压作用下,有无沙尘时,棒—棒空气间隙  $U_{50}$  与  $d$  的关系见图5,其影响程度与  $d$  有关,可分为①  $d < 20$  cm;②  $20$  cm  $< d < 70$  cm;

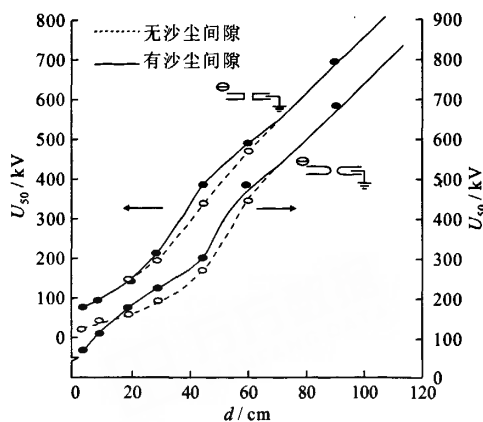


图5 负极性操作冲击间隙  $U_{50}$  与  $d$  的关系

Fig. 5 50% breakdown voltage as a function of gap length under negative switching impulse

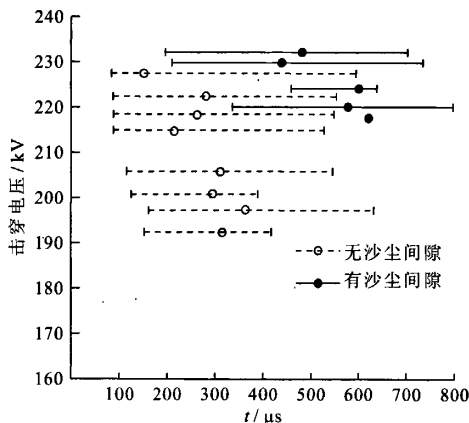


图6 负极性操作冲击下  $d$  为 30 cm 时的伏秒特性

Fig. 6 Effect of dust particles on V-t characteristics under negative switching impulse

## ③ $d > 70$ cm 3 个区域。

在第①间隙区域,对半球形和方形电极,有沙尘时间隙  $U_{50}$  比无沙尘时低;对方形电极,间隙的  $U_{50}$  分散性大,  $d$  为 5 cm 和 10 cm 时其变化范围为  $-2\% \sim +5\%$ 。

在第②间隙区域,对半球形和方形电极,有沙尘时,间隙  $U_{50}$  比无沙尘时高。间隙平均击穿时间较无沙尘时长,见图6。

在第③间隙区域,对半球形和方形电极,间隙  $U_{50}$  随  $d$  线性增加,具有式(1)类似的函数关系,对2种电极  $A$  为 7.5 kV/cm。沙尘的存在对间隙击穿电压特性无明显影响。

在正极性操作冲击电压作用下,有无沙尘时,棒—棒间隙  $U_{50}$  与  $d$  的关系见图7。

从图中可见,对半球形电极,  $5$  cm  $< d < 50$  cm 且有沙尘时,间隙  $U_{50}$  明显较无沙尘时小;  $d > 50$  cm

时,沙尘对间隙的  $U_{50}$  影响不明显。对方形电极  $d$  可分为① $d < 20$  cm、② $20 \text{ cm} < d < 50$  cm、③ $d > 50$  cm。对第①区域,有沙尘时,间隙的  $U_{50}$  比无沙尘时小;对第②区域,有沙尘间隙的  $U_{50}$  比无沙尘时大;对第③区域,沙尘对间隙  $U_{50}$  影响不大。

同雷电冲击电压作用下的情况类似,在操作冲击电压作用下,棒-棒间隙放电特性的变化由阴极表面沉积沙尘所致。

2)操作冲击电压作用下沙尘对棒-板空气间隙放电特性的影响。在正极性操作冲击电压作用下,沙尘的存在对棒-板间隙放电特性影响不大。

在负极性操作冲击电压作用下,同在负极性雷电冲击电压下的情况类似,沙尘的存在对棒-板间隙击穿电压的影响程度与  $d$  有关,可分为短间隙、中等长度、长间隙 3 个区域,区域分界线与电极的形状和大小有关<sup>[13]</sup>。

在短间隙区域,有沙尘时间隙的击穿电压比无沙尘时小;间隙的击穿时间比无沙尘时短,其分散性比无沙尘时小。

在中等长度间隙区域,有沙尘时,间隙的击穿电压比无沙尘时大;无沙尘时间隙的击穿时刻一般发生在波前或波尾,而有沙尘时间隙的击穿时刻发生在波峰。

在长间隙区域,有无沙尘时,间隙的击穿电压和击穿时间都无明显变化。

同负极性雷电冲击电压作用下的情况类似,在负极性操作冲击电压作用下,沙尘所引起间隙放电特性的变化主要是由于阴极表面沉积沙尘所引起,且其变化程度与电极表面沙尘的存积量有关。

### 1.3 沙尘对空气间隙工频击穿电压的影响

查阅国内外文献未见工频电压下沙尘对空气间隙击穿电压的影响研究。本文在重庆大学沙尘暴模拟试验室进行了在工频电压作用下,分析研究了沙尘对空气间隙击穿电压的影响,分别就沙尘对棒-棒间隙和棒-板间隙击穿电压的影响进行分析,其模拟试验装置见图 8。

该沙尘暴模拟装置可分为 2 部分:左边为风速可调的风机,风速  $v$  最大可达  $10 \text{ m/s}$ ;右边为装置的主体结构,其中由铁架作为整个装置的支撑,装沙的漏斗连接金属箱构成沙尘暴产生通道,为便于观察,金属箱前后两面为玻璃,金属箱前端的带电金属网是使沙尘带上电荷,铁架高  $1.2 \text{ m}$ ,长  $1.4 \text{ m}$ ,宽  $0.8 \text{ m}$ ;金属箱高  $0.4 \text{ m}$ ,长  $1.2 \text{ m}$ ,宽  $0.6 \text{ m}$ ;漏斗的上下两个面为正方形,边长分别为  $40$ 、 $20 \text{ cm}$ ,高  $30 \text{ cm}$ ;其中棒电极为圆锥形,半径  $1 \text{ cm}$ ,高  $4 \text{ cm}$ ;板电极为圆形金属板,半径  $11.2 \text{ cm}$ 。

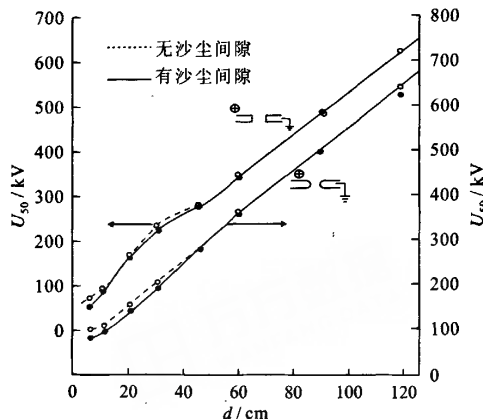


图 7 在正极性操作冲击下间隙  $U_{50}$  与  $d$  的关系

Fig. 7 50% breakdown voltage as a function of gap length under positive switching impulse

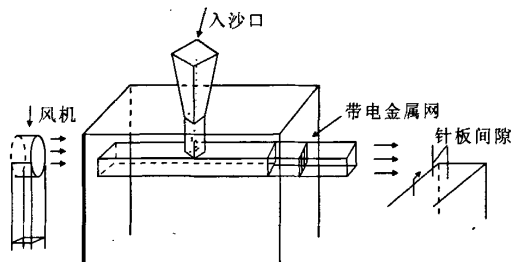


图 8 沙尘暴模拟试验装置示意图

Fig. 8 Schematic of simulating test device of sand storm

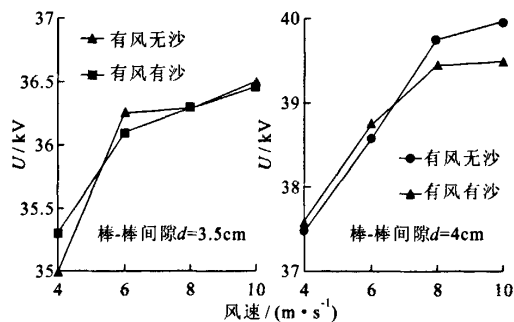


图 9 在工频电压作用下风速与间隙击穿电压的关系

Fig. 9 Breakdown voltage as a function of wind speed under frequency voltage

图 9 为棒-棒  $d$  为  $3.5$ 、 $4 \text{ cm}$  时,不同风速下间隙击穿电压。从图中可见,在有风、沙(指间隙内有沙尘吹过,沙尘质量浓度为  $2 \sim 5 \text{ g/m}^3$ )和有风无沙(自然风吹过)2 种情况下沙尘对间隙击穿电压无明显影响。图 10 为棒电极表面有沙尘(仅高压电极表面有沙尘)和棒电极表面无沙尘时(电极表面和间隙间均无沙尘)棒-棒间隙击穿电压。由图可见,棒电极表面沉积的沙尘对间隙击穿电压有影响,其影响程度与  $d$  有关, $d$  为  $3$ 、 $4$ 、 $4.5$ 、 $5 \text{ cm}$  时,间隙击穿电

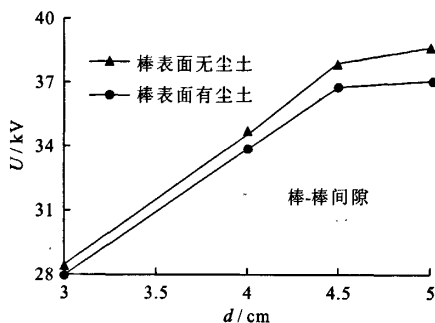
图10 间隙击穿电压与 $d$ 的关系

Fig 10 Breakdown voltage as a function of gap distance

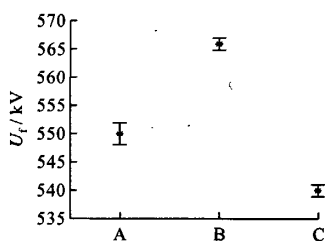
图11 沙尘对绝缘子 $U_f$ 的影响

Fig. 11 Effect of natural desert pollution on the insulators flashover voltage

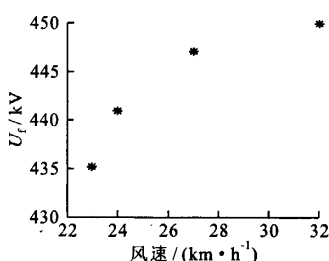
图12 绝缘子 $U_f$ 与风速大小的关系

Fig. 12 Effect of wind speed on the flashover of string

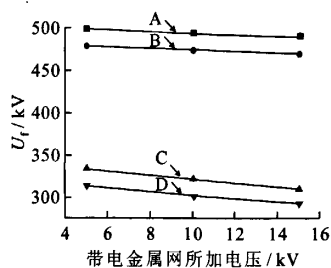
图13 金属网带不同极性电压及大小时绝缘子 $U_f$ 

Fig. 13 Flashover voltage of the string under the effect of charged grid of a.c and d.c voltages

显降低,见图11。随 $v$ 的增大,绝缘子 $U_f$ 增加,当 $v$ 达到一定值时 $U_f$ 趋于饱和,见图12。在沙尘环境下绝缘子 $U_f$ 同金属网所带电压极性及大小的关系见图13,图中A、B为绝缘子雷电冲击 $U_f$ 在金属网上施加的交、直流电压曲线,C、D为绝缘子工频 $U_f$ 在金属网上施加的交、直流电压曲线。由图可知,在沙尘环境下,绝缘子的 $U_f$ 随金属网所带电压即沙粒带电量的增大而减小;当金属网带直流电压时,沙尘环境下绝缘子 $U_f$ 随沙粒带电量减小的程度比金属网带交流电压时大。

### 3 结论

a) 沙尘对空气间隙的影响与 $d$ 有关, $d > 60$  cm时,沙尘对雷电冲击击穿电压影响很小; $d > 80$  cm时,沙尘对操作冲击击穿电压影响很小。

b) 沙尘所引起间隙放电特性的变化主要是由于阴极表面沉积沙尘引起。

c) 沙尘导致绝缘子的闪络电压明显减小,且其闪络电压随沙粒所带电量的增加而减小,随风速的增加而增大。

压的降幅分别为1.6%、2.3%、2.9%、4.1%。

可见,间隙间的沙尘对间隙击穿电压无明显影响;电极表面沉积沙尘对间隙击穿电压有影响。

### 2 沙尘对绝缘子闪络特性的影响

埃及学者 M. Awad 试验研究了沙尘对绝缘子闪络特性的影响,其试品是由10片玻璃绝缘子组成的绝缘子串,串长180 cm、爬电距离550 cm。试验中,沙粒通过带电金属网碰撞后产生电荷来模拟实际沙尘暴中沙粒因不对称摩擦所带电荷。

研究表明:沙尘的存在使绝缘子闪络电压 $U_f$ 明

d) 对沙尘环境下,棒—棒、棒—板空气间隙及绝缘子的放电特性受带电沙粒影响的定量分析目前尚未见研究,还需对其深入研究。

### 参考文献

- [1] 黄宁. 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.
- [2] 郑晓静. 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.
- [3] 张鸿发. 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.
- [4] 张鸿发. 风沙起电的风洞实验研究[J]. 高原气象, 2002(4): 402-407.
- [5] 屈建军. 沙尘暴起电的风洞模拟实验研究[J]. 中国科学, 2003, 33(6): 593-601.
- [6] 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.
- [7] 李芳. 风沙电研究的现状与展望[J]. 地球科学进展, 2002, 17(4): 572-575.
- [8] 鹿振友. 风沙运动的散体动力学模型及其动力学过程[J]. 中国水土保持科学, 2005, 3(1): 82-87.

(下转第52页)



504.

- [8] Hamada S, Takuma T. Electric field calculation in composite dielectrics by first-order triangular surface method[J]. Trans IEE Japan, 2000, 120-A(4): 44-450.
- [9] Hamada S, Techaumnat B, Takuma T. Electric field calculation in composite dielectrics by curved triangular surface method[J]. Trans IEE Japan, 2000, 120-A(5): 568-574.
- [10] Tatematsu A, Hamada S, Takuma T. Calculation of the coefficient matrix between surface charge and probe response for surface charge measurement[C]. 10<sup>th</sup> Asian Conference on Electrical Discharge (ACED-2000). Kyoto, Japan, 2000: 379-382.
- [11] Tatematsu A, Hamada S, Takuma T. A study on the accuracy of surface charge measurement [J]. IEEE Trans on D&EI, 2002, 9(3): 406-415.
- [12] Kumada A, Chiba M. Charge distribution measurement of positive surface streamer with high spatial resolution[C]. International Conference on Gas Discharges and Their Applications. Toulouse, France, 2004: 331-334.
- [13] Kumada A, Okaba S. Measurement of surface charge on oppo-

site sides of a planar insulator using an electrostatic probe[J]. IEEE Trans on D&EI 2004, 11(6): 919-928

- [14] Kumada A, Okaba S, Hidaka K. Influences of probe geometry and experimental errors on spatial resolution of surface charge measurement with electrostatic probe [J]. IEEE Trans on D&EI, 2005, 12(6): 1172-1181.
- [15] Kumada A, Shimizu Y, Chiba M, et al. Pockels surface potential probe and surface charge density measurement [J]. Journal of Electrostatics, 2003(58): 45-58.



汪 汎

Ph. D. WANG Feng

汪 汎 1972—,男,博士,副教授,德国 TU Darmstadt 博士后,研究领域为电力设备绝缘技术、气体放电理论及其应用技术等。E-mail: wangfeng55@263.net

印 峰 1983—,男,硕士生,研究方向高电压与绝缘技术。E-mail: yinfeng83@126.com

收稿日期 2007-03-06

编辑 郭守珠

## (上接第 20 页)

- [9] 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 Trans on PWRD, 1991, 6(2): 706-714.
- [10] Al-Arainy A A, Malik N H, Qureshi M I. Influence of desert pollution on the lightning impulse breakdown voltages of rod to plane air gaps[J]. IEEE Trans on PWRD, 1991, 6(1): 421-428.
- [11] Qureshi M I, Al-Arainy A A, Malik N H. Influence of sand/dust contamination on the breakdown of asymmetrical air gaps under lightning impulses[J]. IEEE Trans on EI, 1992, 27(2): 193-206.
- [12] Qureshi M I, Al-Arainy A A, Malik N H. Performance of rod-rod gaps in the presence of dust particles under standard switching impulses[J]. IEEE Trans on PWRD, 1993, 8(3): 1045-1051.
- [13] Qureshi M I, Al-Arainy A A, Malik N H. Influence of sand/dust contamination on the breakdown of asymmetrical air gaps

under switching impulses[J]. IEEE Trans on D&EI, 1984, 1(2): 305-314.

- [14] 孙才新, 司马文霞. 大气环境与电气外绝缘[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [15] 朱德恒. 高电压绝缘[M]. 北京: 清华大学出版社, 1996.
- [16] 杨保初. 高电压技术[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2002.



司马文霞

Ph. D. SI MA Wen-xia

司马文霞 1965—,女,博士,博导,从事复杂大气环境下外绝缘技术、电力系统过电压与保护研究工作。电话: (023) 65111172-8228

吴 亮 1982—,男,硕士生,从事高电压绝缘技术研究工作。

收稿日期 2007-05-28

编辑 蔡爱姣

## (上接第 29 页)

- [11] 曾文曲, 王向阳. 分形理论与分形的计算机模拟[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1993.
- [12] 谢和平, 薛秀谦. 分形应用中的数学基础与方法[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
- [13] 谢和平. 分形几何—数学基础与应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 1991.
- [14] 王 俊, 邵立康. 分形插值函数及曲线的 IFS 求取[J]. 浙江工业大学学报, 2000, 28(增): 15-18.  
WANG Jun, SHAO Li-kang. Fractal interpolation function and how to obtain curvilinear IFS[J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2000, 28(S): 15-18.
- [15] David S Mazel, Mnson H Hayes. Using iterated function system to model discrete sequences[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1992, 40(7): 1742-1734.
- [16] 贺 博. 高压污秽绝缘子闪络机理及在线监测和风险预警中关键技术研究[D]. 西安: 西北工业大学, 2006.  
HE Bo. Study of key technology and mechanism of hv contaminated insulators flashover for online monitoring and risk predic-

tion [D]. Xi' an: Northwestern Polytechnical University, 2006.

- [17] 马云潜, 张学工. 支持向量机函数拟合在分形插值中的应用[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2000, 40(3): 76-78.  
MA Yun-qian, ZHANG Xue-gong. Application of support vector machines function regression in fractal interpolation [J]. Journal of Tsinghua University (Science and Technology), 2000, 40(3): 76-78.



惠阿丽

Ph. D. HUI A-li

惠阿丽 1975—,女,博士生,研究方向为绝缘子污闪检测及识别。E-mail: huial1975@yahoo.com.cn

沐 辉 1957—,男,教授,博导,研究方向为电力电子技术,智能控制理论。电话: (029) 88493078; E-mail: linhui@nwpu.edu.cn

收稿日期 2007-02-28

编辑 卫李静