

高海拔条件下沙尘暴天气对 线-板间隙工频击穿电压的影响试验研究

刘 炯¹, 王 劲¹, 梁 明¹, 刘云鹏², 黄志成², 李星辰², 耿江海², 刘继兴²

(1. 中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司, 四川 成都 610000;

2. 华北电力大学 河北省输变电设备安全防御重点实验室, 河北 保定 071003)

摘 要:本研究参考西藏、新疆、青海等地沙尘暴高发地区输电线路走廊附近沙尘参数的调研结果,以及沙尘暴天气的相关气象资料确定了模拟风沙试验中风速、粒径、浓度、荷质比等具体参数,并搭建了一套模拟风沙试验装置。利用该装置,在海拔2 200 m地区开展了模拟风沙条件对间隙外绝缘工频放电电压的影响试验。结果表明:模拟沙尘环境仅会降低间隙距离为0.2 m以下短间隙的工频放电电压,而不会降低间隙距离为0.2 m以上长空气间隙的工频放电电压;空气中带电沙尘本身不是造成间隙跳闸放电的根本原因。

关键词:沙尘暴;线-板间隙;工频击穿电压;高海拔

中图分类号:TM933 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2022)10-0099-08

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2022.10.016

Experimental Study on Influence of Dust Storm Weather on Power Frequency Breakdown Voltage of Line-board Gap Under High Altitude

LIU Jiong¹, WANG Jin¹, LIANG Ming¹, LIU Yunpeng²,

HUANG Zhicheng², LI Xingchen², GENG Jianghai², LIU Jixing²

(1. Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group,

Chengdu 610000, China; 2. Key Laboratory of Safety and Defense of Power Transmission and

Transformation Equipment of Hebei Province, North China Electric Power University,

Baoding 071003, China)

Abstract: According to the sand parameters around the transmission line corridors in Tibet, Xinjiang, Qinghai and other high incidence of sandstorms regions and the relevant data of dust weather, the wind speed, particle size, concentration, charge/mass ratio and other specific parameters for sand simulation were determined, and a testing apparatus was built. The effect of simulated sand conditions on the power frequency discharge voltage of external insulation in the gap was tested by using this device at an altitude of 2 200 m. The results show that the simulated sand dust environment will decrease the power frequency discharge voltage of the short gap below 0.2 m, but will not reduce the power frequency discharge voltage of the long air gap above 0.2 m, and the charged dust in the air itself is not the cause of the gap trip discharge.

Key words: dust storm; line-board gap; power frequency breakdown voltage; high altitude

0 引言

沙尘天气是常见于西北、华北和东北西部地区

的一种灾害性天气,多发生于春季。沙尘天气对电网安全的影响不可忽视,2014年4月23日,新疆吐鲁番和哈密等地区发生特强沙尘暴天气,造成750 kV吐鲁番-哈密一线多次故障跳闸。2006年3月28日,河南郑州因沙尘暴天气发生30多起线路跳闸事故。2019年2月24日青海地区330 kV柴林I线也因沙尘暴天气发生跳闸事故。国外也曾出现过类

收稿日期:2021-10-05 修回日期:2021-11-29

基金项目:中国能源建设集团规划设计有限公司2019年度第一批集中开发科技项目(GSKJ2-D03-2019)

作者简介:刘炯(1983-),男(汉族),四川成都人,高级工程师,主要从事输电设计的研究。

似事故,2021年3月蒙古国在特强沙尘暴的影响下出现大面积停电。沙特电网近几十年来亦一直受到沙尘天气的困扰。鉴于沙尘天气对输电线路外绝缘的影响,很有必要对沙尘环境下空气间隙的放电特性进行研究^[1-2]。

目前,学者们对沙尘环境中空气间隙放电特性的研究已经取得了一些成果。司马文霞等^[3-4]设计了一套沙尘暴环境模拟装置,并利用该装置进行模拟沙尘环境下短空气间隙的工频放电特性试验。结果表明,动态的风沙流对棒-棒空气间隙工频击穿电压的影响较小,且无明显规律,而阴极表面沉积的沙粒会导致棒-棒间隙工频击穿电压降低,同时沙尘带电量对间隙击穿电压没有明显影响。然而,该试验中模拟的沙尘带电量仅在150 nC/kg以下,远低于国内外学者在野外和风洞试验中测量到的沙尘荷质比^[5-11]。同时,该研究仅探究了沙尘条件对5 cm以下短间隙工频放电电压的影响。邓鹤鸣^[12]采用正、负雷电冲击电压对间隙距离为20~45 cm的线-板电极进行击穿特性试验,研究了沙尘颗粒粒径对沙尘环境中空气间隙击穿电压的影响。结果表明,粒径较大的沙尘(大于0.1 mm)有利于放电的发展,但当沙尘粒径超过2 mm时,这种影响减弱。A A AL-ARAINY等^[13]在雷电和操作冲击电压作用下对沙尘环境中空气间隙进行击穿特性试验。结果表明,沙尘对空气间隙雷电放电特性有影响,影响程度与所施加电压的波形、电压极性、电极形状(方形和半球形)、空气间隙距离均有关;当空气间隙的长度超过40 cm后,沙尘对空气间隙击穿电压的影响可以忽略不计。然而,文献[12-13]的研究均在室内环境中进行,仅探讨了弥散沙尘对间隙雷电和操作冲击放电电压的影响,未开展风速与沙尘带电模拟,模拟沙尘暴条件不完全。

针对上述研究的不足,本研究根据西藏、青海、新疆等地沙尘暴天气频发,参考输电线路走廊地区沙尘参数的调研结果,结合沙尘暴天气的气候特征,最终确定了模拟沙尘暴环境的关键参数。同时,搭建一套模拟风沙试验装置以模拟西北高海拔地区沙尘暴的风速、浓度、粒径、荷电量。基于该装置,在昆明高海拔地区开展模拟沙尘环境对0.15~2.00 m线-板空气间隙工频击穿特性影响的试验。试验中通过改变沙尘粒径和浓度等参数,获得对空气间隙工频放电最不利的模拟沙尘条件。在此基础上,探究沙尘对间隙放电特性影响的机理,希望

能为线路外绝缘工程建设提供参考。

1 模拟风沙试验参数的确定

1.1 沙尘颗粒度的确定

本课题组曾调研了西藏、青海、新疆等地区输电线路走廊附近沿线3 600 km的沙尘参数^[14-15],调研得到的沙尘粒径一般在0~500 μm 。考虑粗沙难以输运至输电线路高度,本研究选择0~125 μm ,125~250 μm 两种粒径。

1.2 模拟沙尘浓度

目前,GB/T 20480—2017《沙尘天气等级》^[16]中依照能见度将沙尘天气分为5个等级,分别为浮尘(<10 000 m)、扬沙(<1 000 m)、沙尘暴(<500 m)、强沙尘暴(<100 m)、特强沙尘暴(<50 m)。本研究模拟的沙尘环境是根据沙尘浓度进行标定,参考L J HAGEN等^[17]总结的能见度和沙尘浓度的关系 $x=58.1/\gamma$ (其中 γ 是沙尘的浓度,单位为 mg/cm^3 ; x 是能见度),强沙尘暴与特强沙尘暴所对应的沙尘浓度分别为580 mg/m^3 和1 160 mg/m^3 。同时,文献[18-21]表明,当发生特强沙尘暴时,地面空气中的物质浓度可以达到1 017 mg/m^3 。据我国环境部门记录^[22],1993年5月5日发生的特强沙尘暴,甘肃省金昌市的室外空气的总悬浮颗粒物(TSP)浓度达到1 016 mg/m^3 。综合考虑上述研究成果,本研究选取沙尘浓度为500 mg/m^3 和1 000 mg/m^3 分别作为强沙尘暴和特强沙尘暴的浓度等级。

1.3 模拟沙尘荷质比

如引言所述,沙尘暴发生时,由于气流与沙粒、沙粒与沙粒、沙粒与地面的直接摩擦作用,沙尘暴颗粒会带上电荷。带电沙粒随风沙悬浮于空气中并出现在输电线路附近时便会影响周围的电场分布,从而可能影响其外绝缘特性。因此,模拟沙尘环境有必要对沙尘的带电量进行模拟。表1总结了国内外学者在沙尘暴发生地实测得到的沙粒荷质比。

达到输电线路高度的沙尘多为细沙,细沙由于不对称摩擦作用通常带负电。根据表1统计的沙粒带电量的测量结果,考虑较为极端环境,最终确定模拟沙尘环境中的沙粒荷质比为-100 $\mu\text{C}/\text{kg}$ 和-200 $\mu\text{C}/\text{kg}$ 。

1.4 模拟沙尘暴风速

一般情况下,风速达到6~9 m/s的风就可以将地面上的沙尘吹到空气中,此时为浮尘和扬沙天

表1 国内外沙尘荷质比实测结果

Tab.1 The measured results of dust charge-mass ratio

研究者	荷质比/($\mu\text{C}/\text{kg}$)	粒径范围/mm
屈建军等 ^[6]	-204~28	80~315
郑晓静等 ^[7]	-124~0.95	0~1 000
张鸿发等 ^[9]	-24.3~65.8	100~600
D S SCHMIDT 等 ^[10]	66	250
S FUERSTENAU 等 ^[11]	-75~38	0.4~50

气。当风速介于六级和八级之间,为中等强度沙尘暴;当风速高于九级时,沙尘暴等级上升为强沙尘暴。同时,沙尘暴瞬时风速亦可能达到25 m/s,该情况为特强沙尘暴。本研究选取风速10 m/s对应浮沉扬尘天气、18 m/s对应中等沙尘暴天气、25 m/s对应特强沙尘暴天气。

1.5 模拟参数总结

本研究选取模拟沙尘环境风速分别为10、18、25 m/s,沙尘试验浓度为500 mg/m³和1 000 mg/m³。将试验沙尘粒径(d)分为 $d < 125 \mu\text{m}$ 和 $125 \mu\text{m} < d < 250 \mu\text{m}$ 。根据国内外学者在沙尘暴发生时得到的沙尘荷质比测量结果,选择沙粒荷质比分别为0、-100、-200 $\mu\text{C}/\text{kg}$ 。

2 沙尘模拟系统

本研究设计了一套沙尘暴模拟试验装置,其结构如图1所示。下面则逐一叙述模拟沙尘环境中各参量的控制方法。

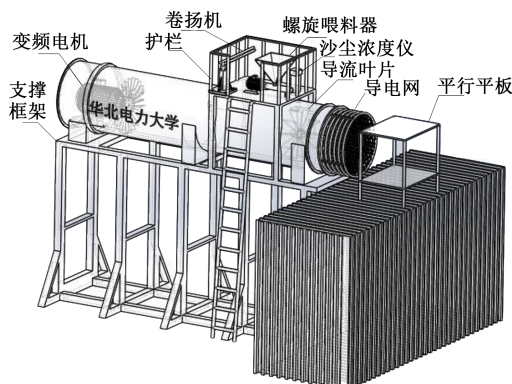


图1 沙尘环境模拟试验装置示意图

Fig.1 Diagram of sand environment simulation testing apparatus

2.1 沙尘暴风速控制及沙尘扩散面积的保障

风机由55 kW的变频调速电机提供动力,风机出口处最大风速可以达到35 m/s,在试品安装处(距

离风机出口7 m位置)最大风速可达25 m/s。风机出口安装24片倒流叶片。导流叶片增大了沙尘的弥散范围,使得试品区域沙尘弥散面积超过3 m×3 m。沙尘扩散效果如图2所示,装置满足了风速及沙尘扩散面积的要求(风机出口直径为1.5 m)。



图2 风沙扩散现场图片

Fig.2 Picture of sandstorm spreading scene

2.2 沙尘浓度与粒径控制

本研究选择的沙尘粒径为125~250 μm 以及0~125 μm 两种。试验选用新疆本地沙源,采用筛沙机分别配合60目与120目筛网获得上述两种沙粒。模拟沙尘浓度控制则采用螺旋喂料器,试验中通过改变给喂料器的转速来调节沙速度,进而控制沙尘浓度。

2.3 沙尘荷质量比的标定与控制

本试验采用场致荷电对沙尘颗粒进行荷电^[23]。颗粒的场致荷电理论公式如式(1)所示。

$$\frac{q_s}{m} = \frac{6E_0(3\epsilon_r)\epsilon_0}{\rho d(\epsilon_r + 2)} \cdot \frac{t}{t + \tau} \quad (1)$$

式(1)中: q_s 为颗粒带电量; m 为颗粒质量; ρ 为颗粒密度; d 为颗粒直径; ϵ_r 为颗粒相对介电常数; ϵ_0 为真空介电常数; τ 为颗粒的荷电时间常数, $\tau = 4\epsilon_0 E_0/i$; E_0 为颗粒所处位置的电场强度; t 为颗粒的荷电时间; i 为离子流密度,单位是A/m²。

由式(1)可知,沙粒的充分荷电需要3个条件,分别是电场、一定的荷电时间以及充足的空气离子。因为模拟沙尘暴的风速较高,沙尘通过荷电区域的时间较短,所以需要增大荷电区域的长度。但是,荷电区域的加长必然要求更高的电势以提供较大的电场,保持电晕网起晕。这两者本身存在矛盾。为了解决这一矛盾,本研究采用多层荷电网的形式,满足了沙尘荷电的需求。多层荷电网由起晕网与接地网交替排列组成,如图3所示。沙粒荷电量的测量标定方式如图4所示。

荷电标定时,随风运动的带电沙粒穿越平行平板和屏蔽板进而被纯铜开口沙粒收集箱收集^[22],其

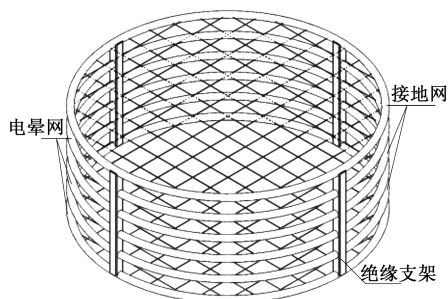


图3 多层起晕网

Fig.3 Multilayer corona network

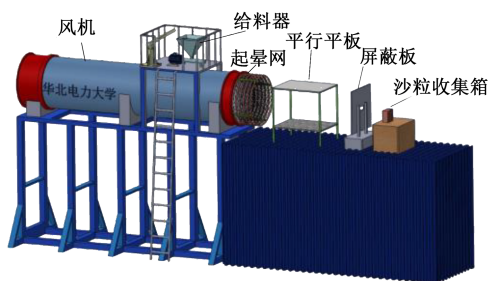


图4 沙粒荷电标定系统

Fig.4 Sand charge calibration system

尺寸为 20 cm×10 cm×20 cm, 开口大小为 15 cm×2 cm, 其背面为 1 000 目铜网, 风沙流通过时沙粒会被收集箱收集。沙粒收集箱通过双层屏蔽线与吉时利 6517B 型静电计(灵敏度为 1 pA)相连, 带电沙粒将电荷传递给铜质的沙粒收集箱形成电流, 由静电计测量并被采集卡采集传输给电脑, 通过式(2)即可计算得到沙粒的带电量。

$$q_e = \frac{\int Idt}{m_2 - m_1} \quad (2)$$

式(2)中: m_1 为试验前沙粒收集筒的质量; m_2 为试验后沙粒和沙粒收集桶的总质量; I 为采集卡采集的电流读数; t 为测量时间。

平行平板的作用主要是滤除由电晕网产生的随空气一起流动的空气离子, 避免空气离子对沙粒荷电量测量以及间隙放电的影响。屏蔽板的作用则仅用于荷电测量, 防止电晕网及平行平板的电场作用下沙粒收集箱产生感应电, 引起荷电测量误差。多次测量后, 沙粒荷电标定结果如表 2 所示。

3 模拟沙尘天气下线-板间隙工频放电试验

3.1 试品布置及试验方法

工频试验设备为 2 250 kV 工频试验变压器, 电源容量为 4 500 kVA, 结构型式为户外、单相、敞开式, 其照片如图 5 所示。试验过程中记录温度和湿

表2 沙尘荷质比标定

Tab.2 Dust charge-mass ratio calibration

多层电晕网电压/kV	荷质比/($\mu\text{C}/\text{kg}$)
-16.0	-86~-132
-19.2	-176~-235

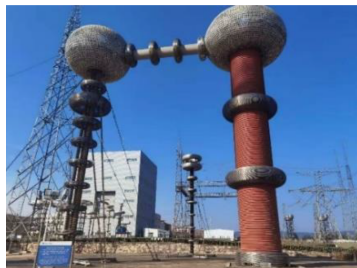


图5 工频试验变压器

Fig.5 AC test transformer

度, 便于后续对放电电压进行温湿度校正。

工频试验中试品布置方式如图 6 所示, 结合现场杆塔的结构, 本试验采用棒电极与板电极平行布置的方式。棒电极长度为 2 m, 直径为 10 cm, 两端半球直径为 10 cm, 焊接点打磨后光滑无毛刺; 板电极为多块不锈钢板铺设而成, 边长为 7 m, 均接地。工频试验变压器的高压引线经水电阻与棒电极相连。试验中, 由于模拟环境风速较大, 使用 8 根绝缘绳加固绝缘子和棒电极, 保证棒电极在 25 m/s 风速下无位移和抖动。

试验方法采用 GB/T 16927-1—2011《高电压试验技术第 1 部分: 一般定义及试验要求》^[24]规定的破坏性放电电压试验方法, 具体为调整间隙距离后, 逐渐升高电压, 直到放电为止。当施加的电压在 75% 预期放电电压以下时, 升压速度可稍快, 当电压升至 75% 预期放电电压时, 缓慢升压, 从 75%~100% 放电电压的升压时间约为 1 min 直到间隙击穿, 此时记录击穿放电瞬间的工频试验电压有效值和气象条件。放电后电压退至零位, 再次升压, 充分考虑放电的分散性, 每个间隙距离施加电压的次数为 10 次。

3.2 无风沙条件下风速对线-板间隙工频击穿电压的影响

不同风速条件下(无沙尘), 线-板间隙分别为 0.5、1.0、1.5、2.0 m 的工频电压击穿试验结果如图 7 所示。从图 7 可以看出, 风速基本不会影响 4 种线-板空气间隙的工频击穿电压, 工频击穿电压测量结果的偏差均在 3% 以内。同时, 从图 7 还可以看出,

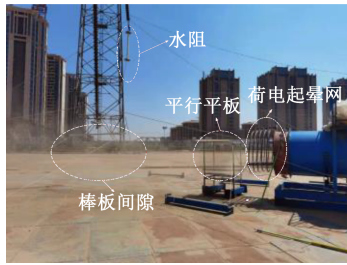


图6 试验现场布置图

Fig.6 Layout of the test site

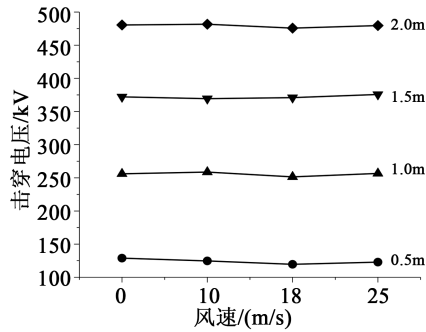


图7 线-板间隙工频击穿电压随风速变化特性曲线

Fig.7 Line-plate clearance power frequency breakdown voltage with wind speed variation curves

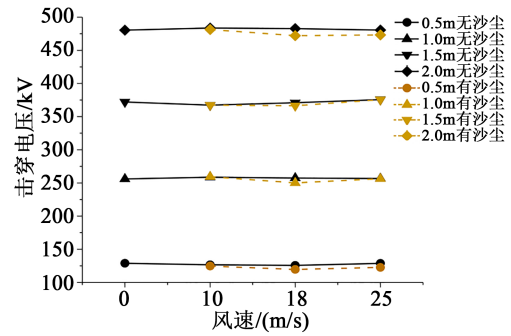
随着风速增大,不同长度线-板间隙的工频击穿电压呈现先略微降低后略微升高的趋势。对于不可压缩流动,可用伯努利方程描述流场的能量守恒,如式(3)所示。

$$\frac{P}{\rho_a} + gz + \frac{V^2}{2} = C \quad (3)$$

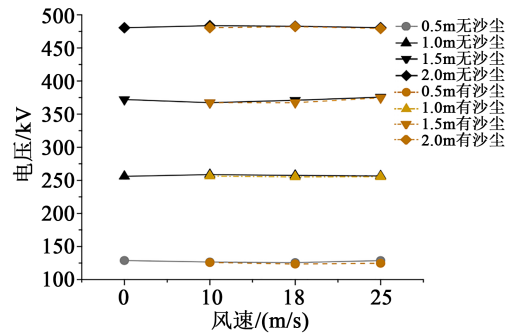
式(3)中: P 为气压; ρ_a 为空气密度; g 为重力加速度; z 为高度; C 为常量。 P/ρ_a 可以理解为气流的压力势能; gz 为气流的重力势能; $V^2/2$ 为气流的动能,随着气流速度的提高,必然导致空气的气压有所减小,进而降低击穿电压。但是,由于气流流速较小,气流的动能远小于其压力势能,这种影响可以说非常微弱。随着风速继续增大,气流的吹弧效应会造成间隙击穿电压的升高,但由于间隙流注的发展过程非常迅速,这种效应对击穿电压的影响仍然有限。

3.3 不同风速下有沙条件对间隙工频击穿电压的影响

沙尘粒径分别选择 $0\sim 125\ \mu\text{m}$ 和 $125\sim 250\ \mu\text{m}$,荷电量选择 $-200\ \mu\text{C}/\text{kg}$,不同风速下有无沙尘环境对线-板间隙工频击穿电压的影响如图8所示。从图8可以看出,有无沙粒条件对空气间隙击穿电压影响很小,可以忽略不计。同时,沙尘粒径对棒板-间隙工频击穿电压影响不明显,两种粒径风沙



(a)细沙条件



(b)粗沙条件

图8 有风沙条件对线-板间隙工频击穿电压影响

Fig.8 Influence of wind-sand condition on power frequency breakdown voltage of line-plate gap

条件下的击穿电压差别小于1%,细沙条件下棒板-间隙击穿电压略低于粗沙条件,这可能是由于粗沙的粒径较大,在间隙放电空间中会吸附放电过程中产生的电子和离子,对放电起到一定的阻碍作用。

3.4 沙尘浓度对间隙工频击穿电压的影响

进一步研究沙尘浓度对线-板空气间隙工频击穿电压的影响,在沙尘粒径为 $0\sim 125\ \mu\text{m}$ 、风速为 $18\ \text{m/s}$ 、荷电量为 $-200\ \mu\text{C}/\text{kg}$ 的环境下,获得不同沙尘浓度对线-板间隙工频击穿电压的影响如图9所示。

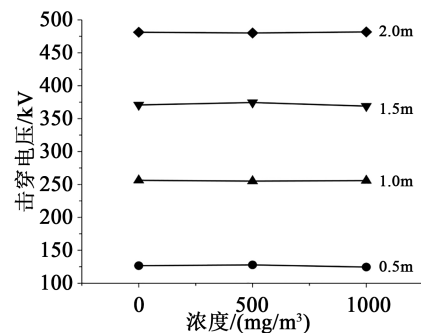


图9 沙尘浓度对线-板间隙工频击穿电压的影响

Fig.9 Influence of dust concentration on power frequency breakdown voltage of line-plate clearance

从图9可以看出,沙尘浓度对线-板间隙工频击穿电压的影响较小。沙尘浓度对间隙击穿电压的影响有两个方面,首先,沙粒的存在会畸变空间电场,促进电晕及流注起始的发展。其次,随着沙尘浓度的增大,空间中的沙尘可能阻碍放电的发展。通过数据对比发现,沙粒浓度对于间隙击穿过程的影响仍较微弱。

3.5 沙尘荷质比对间隙工频击穿电压的影响

进一步研究沙尘带电量对间隙工频击穿电压的影响,在沙尘粒径为 $0\sim 125\ \mu\text{m}$ 、风速为 $18\ \text{m/s}$ 、浓度为 $1\ 000\ \text{mg/m}^3$ 的环境下,获得不同沙尘带电量对线-板间隙工频击穿电压影响如图10所示。

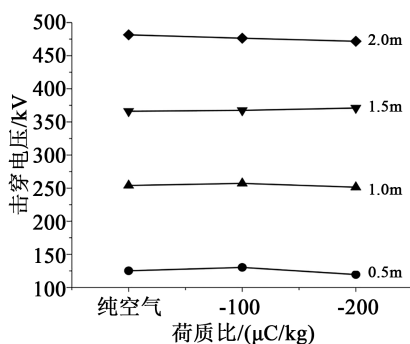


图10 沙尘荷质比对线-板间隙工频击穿电压影响

Fig.10 Influence of charge to mass ratio on power frequency breakdown voltage of line-plate clearance

从图10可以看出,沙尘荷质比对空气间隙击穿电压的影响亦较小,这是因为沙尘的带电量相较于于击穿过程中空气电离的电荷量来说微乎其微,基本不会影响间隙的击穿电压。但是,带电沙尘会造成其周围的电场畸变更严重,对线-板间隙电晕及流注的起始发展过程可能有促进作用。

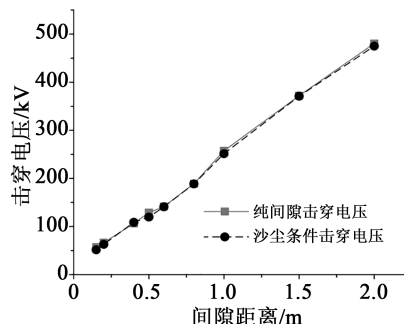
3.6 高海拔长间隙试验总结及最低放电电压组合

通过图8(a)对比发现,各种沙尘条件对于空气间隙工频击穿电压的影响很小,除 $0.5\ \text{m}$ 间隙条件下,影响均小于 3% 。线路外绝缘设计时可以不考虑沙尘暴对线路空气外绝缘的影响。仔细对比数据发现,风速为 $18\ \text{m/s}$ 、沙粒浓度为 $1\ 000\ \text{mg/m}^2$ 、荷质比为 $-200\ \mu\text{C/m}^2$ 、粒径为 $0\sim 125\ \mu\text{m}$ 时,间隙的击穿电压最低。但该条件对于 $1.0\ \text{m}$ 以上间隙放电电压的影响仍可忽略。

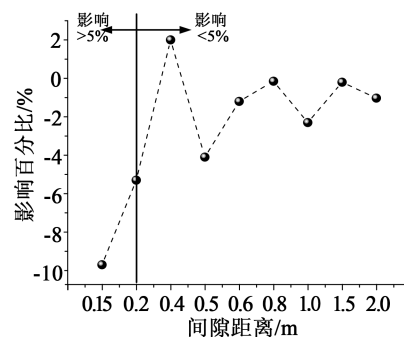
3.7 最低放电组合条件下有无风沙条件的影响

由前文得知,沙尘对 $0.5\ \text{m}$ 间隙击穿电压的影响略大于其他间隙,因此进一步探究沙尘对短间隙击穿电压的影响,补充了组合沙尘条件下,间隙距离分别为 0.15 、 0.20 、 0.30 、 0.40 、 $0.80\ \text{m}$ 的试验,结果如

图11所示。



(a)线-板间隙工频击穿电压



(b)最低放电组合沙尘条件对间隙工频击穿电压

影响百分比

图11 最低放电组合沙尘条件对线-板间隙工频击穿电压影响

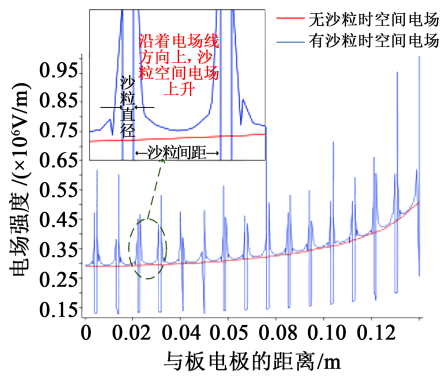
Fig.11 The influence of the lowest discharge combined sand and dust condition on the power frequency breakdown voltage of the line-plate gap

从图11可以看出,当间隙距离大于 $0.2\ \text{m}$ 时,沙尘对间隙工频击穿电压的影响均小于 5% ,而当间隙距离为 $0.15\ \text{m}$ 时,沙尘条件可以使其工频击穿电压降低 10% 。因此,可以认为沙尘条件对短间隙的工频放电电压有影响。但当间隙距离大于 $0.2\ \text{m}$ 时,其影响可以忽略不计。

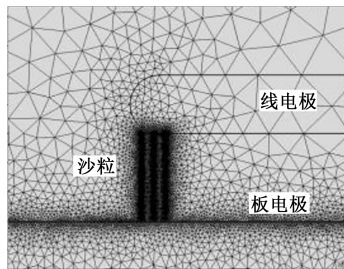
4 沙尘对间隙放电影响原因分析

如前文所述,沙尘会畸变空间电场,这可能促进间隙起晕及起始流注的发展。但当间隙距离超过 $0.2\ \text{m}$ 时,沙尘对间隙击穿电压的影响可以忽略不计。

使用COMSOL仿真软件对存在沙尘颗粒的 $0.15\ \text{m}$ 的线-板间隙进行静电场仿真分析。仿真中沙粒的直径设置为 $250\ \mu\text{m}$ 。进一步研究沙尘颗粒对线-板间隙静电场的影响,仿真结果如图12所示。



(a)沙粒附近电场分布



(b)网格剖分

图12 沙粒在线板间隙的静电场仿真
Fig.12 Electrostatic field simulation of sand particles in line-plate gap

从图12可以看出,沙尘颗粒会引起线电极端部电场发生畸变,在线电极与板电极的垂线方向上,沙尘颗粒表面电场增强,而在线电极的平行线方向上,沙尘颗粒的表面电场下降。距离棒电极越近的沙尘颗粒表面电场的畸变程度越大,在线电极附近沙尘颗粒的表面电场强度增大了约1倍。在放电发展的起始阶段,沙粒周围的电场畸变能够加速线电极周围电子崩和流注的发展^[25],进而降低短间隙的击穿电压。同时,沙粒平行方向的弱电场区域有利于正、负离子的复合,进而释放光子,促进流注发展,如图13所示。

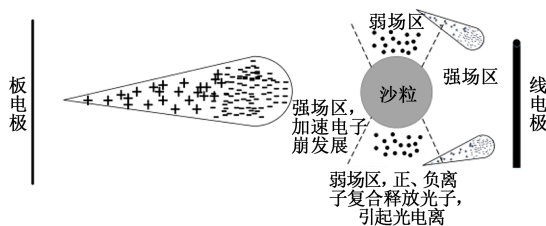


图13 沙粒对间隙放电的促进作用

Fig.13 Promoting effect of sand particles on gap discharge

沙粒对空气间隙放电发展同样存在抑制作用,如图14所示。

沙尘颗粒在空间电场中可以吸附自由电子和

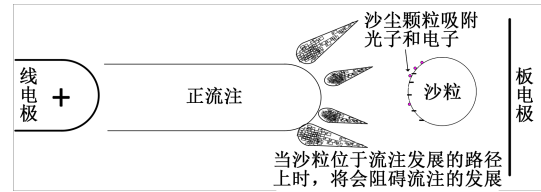


图14 沙粒对间隙放电的抑制作用

Fig.14 Promoting effect of sand particles on gap discharge

光子,影响电子崩的发展,特别是当空气中沙尘浓度增大时,沙尘颗粒对光子和自由电子的吸附作用增强,进而提高间隙击穿电压。文献[26]表明,当粒径超过80 μm的沙粒位于流注前端时,沙尘颗粒可能阻碍放电的发展,此时沙粒会引起放电呈树枝状发展。对于长空气间隙来说,间隙击穿前已经形成了发展较为充分的流注。流注头部对间隙电场的畸变作用、热游离作用远大于沙粒。造成沙粒对长间隙放电的影响不明显。

5 结论

(1) 本文通过调研现场沙尘颗粒参数及沙尘暴天气的相关研究资料确定了模拟沙尘暴天气的关键参数。同时,搭建了一套沙尘模拟试验装置,实现了高海拔沙尘暴天气的合理模拟。

(2) 沙尘颗粒对线-板间隙工频击穿电压的影响与间隙距离有关,当间隙距离超过0.2 m后,沙尘天气对间隙放电特性无明显影响。

(3) 沙尘浓度、沙尘荷质比、沙尘颗粒粒径对线-板长空气间隙工频击穿电压无明显影响。

参考文献:

- [1] 邓鹤鸣,李勇杰,蔡炜,等. 沙漠区域输电问题研究现状及展望[J]. 高电压技术,2017,43(12):3850-3861.
- [2] 律方成,刘畅,丁玉剑. 沙尘环境中棒-板间隙电场分布仿真及放电特性分析[J]. 高压电器,2018,54(2):1-6.
- [3] 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):16-20,52.
- [4] 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制分析[J]. 中国电机工程学报,2010,30(1):6-13.
- [5] 张鸿发,王涛,屈建军,等. 沙尘暴电效应的试验观测研究[J]. 地球物理学报,2004,47(1):47-53.
- [6] 屈建军,俎瑞平,言穆弘,等. 扬沙和沙尘暴对导线电位影响的风洞模拟试验[J]. 中国沙漠,2004,24(5):534-538.
- [7] 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.
- [8] 屈建军,言穆弘,董光荣,等. 沙尘暴起电的风洞模拟试验研究[J]. 中国科学(D辑:地球科学),2003,33(6):593-600.
- [9] 张鸿发,王涛,屈建军,等. 沙尘暴电效应的试验观测研究[J]. 地球物理学报,2004,47(1):47-53.

- [10] SCHMIDT D S, SCHMIDT R A. A theoretical predication of effects of electrostatic forces on salting snow particles[J]. *Annals of Glaciology*,1993,23(18):234-238.
- [11] FUERSTENAU S, WILSON G. A particle charge spectrometer for determining the charge and size of individual dust grains on Mars[C]//11th International Conference on Electrostatics. Edinburgh, Scotland,2004.
- [12] 邓鹤鸣. 雷电冲击电压下两相体放电特性研究[D]. 武汉:华中科技大学,2010.
- [13] AL-ARAINY A A, MALIK N H. Influence of sand/dust contamination on the breakdown of asymmetrical air gaps under switching impulses[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,1994,1(2):305-314.
- [14] 张重远,李星辰,马旭东,等. 高海拔沙尘环境对典型长间隙操作冲击放电特性的影响[J]. *科学技术与工程*,2021,21(11):4478-4485.
- [15] 张重远,毕腾,耿江海,等. 荷电沙尘对线-板短空气间隙工频击穿电压影响的试验研究[J]. *华北电力大学学报(自然科学版)*,2019,46(4):39-45.
- [16] 中国气象局. 沙尘天气等级:GB/T 20480—2017[S]. 北京:中国标准出版社,2017.
- [17] HAGEN L J, SKIDMORE E L. Wind erosion and visibility problems[J]. *American Society of Agricultural Engineers*,1976,20(5):27-30.
- [18] CHEPIL W S. Dynamics of wind erosion: I. Nature of movement of soil by wind[J]. *Soil Science*,1945,60(4):305-320.
- [19] CHEPIL W S. Properties of soil which influence wind erosion: IV. State of dry aggregate structure[J]. *Soil Science*,1951,72(5):387-401.
- [20] 赵性存,赵铭球,王淑彦. 大气沙尘的测量和研究[J]. *中国沙漠*,1990,2(1):13-20.
- [21] 牛生杰. 沙尘气溶胶微结构及其对降水影响的观测和数值模拟研究[D]. 南京:南京气象学院,2004.
- [22] 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(2):10-15.
- [23] 刘云鹏,黄志成,耿江海,等. 沙粒荷电测量系统设计及沙粒荷电量测量仿真[J]. *中国电机工程学报*,2019,39(20):6148-6158,6196.
- [24] 中国电器工业协会. 高电压试验技术第1部分:一般定义及试验要求:GB/T 16927.1—2011[S]. 北京:中国标准出版社,2011.
- [25] 许芝龙,许健芳. 附着金属颗粒的绝缘介质沿面放电微观发展过程[J]. *绝缘材料*,2018,51(7):65-71,76.
- [26] BABAEVA N Y, BHOJ A N, KUSHNER M J. Streamer dynamics in gases containing dust particles[J]. *Plasma Sources Science & Technology*,2006,15(4):591.