

沙尘环境中棒—板间隙电场分布仿真及放电特性分析

律方成¹, 刘畅¹, 丁玉剑^{1,2}

(1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 空气间隙的放电特性是特高压输电线路设计的重要指标, 沙尘天气会对空气间隙的放电特性产生影响。为更加深入地研究沙尘条件下空气间隙的放电特性, 文中针对弥漫沙尘的棒—板空气间隙的电场分布进行了仿真。仿真考虑了间隙中弥漫沙尘时介质的不均匀性, 建立了三维仿真模型, 改进了以往改变介质介电常数模拟介质特性变化的方法。根据电场仿真的结果, 沙尘分布于间隙中时, 沙粒周围电场出现了明显的畸变。沙粒周围电场升高的方向总是指向棒极末端的方向, 而在沙粒与棒电极连线的垂直方向上电场降低, 该方向的电场值低于周围区域。沙粒的存在只会影响其5倍半径以内区域的电场分布。沙尘质量分数较低时, 沙粒对棒电极表面以及距沙粒较远的区域的电场分布所产生的影响很小。

关键词: 空气间隙; 电场; 沙尘; 放电特性

Simulation of Electric Field Distribution and Analysis of Discharge Characteristics for Rod-plane Air Gap with the Presence of Sandstorm

LYU Fangcheng¹, LIU Chang¹, DING Yujian^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The discharge characteristic of air gap is one of the key control factors of the insulation level of transmission line. Sandstorm has a certain effect on the discharge characteristics of air gap. To understand this effect, in this paper, the electric field distribution of the rod-plane air gap under sandstorm condition is simulated. The inhomogeneity of medium is considered when the sand particles present in the gap, and detailed three-dimensional simulation models are established, using this simulation model, the electric field intensity in the gap is calculated. Based on the calculation result, the electric field in the area around the sand shows an obvious distortion. The electric field increases in the direction from the sand particle to the end of the rod electrode; and the electric field decreases in the vertical direction. The existence of sand particles can only affect the distribution of electric field in the region of 5 times of its radius. And the effect of sand particles on the electric field distribution in the surface of the rod electrode and the region far away from the sand is very small.

Key words: air gap; electric field; sandstorm; discharge characteristic

0 引言

随着能源互联网的建设, 超特高压输电线路在能源输送方面发挥着愈发重要的作用。高压输电线路由于输电距离长, 难免经过沙尘多发地区。研

究显示, 空气中的沙粒会对空气间隙的放电特性产生影响。而空气间隙的放电特性, 是决定输电线路绝缘水平的关键控制因素之一。根据典型空气间隙放电特性合理确定沙尘多发地区超特高压输电线路绝缘水平^[1], 才能确保输电线路运行安全。

1964年, 美国学者Latham最先提出了沙尘暴中

收稿日期: 2017-10-16; 修回日期: 2017-12-28

基金项目: 国家自然科学基金(51207055); 中央高校基本科研业务费专项资金(14ZP10)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51207055), Fundamental Research Fund for the Central Universities(14ZP10).

运动沙粒的起电现象^[2-3],兰州大学的黄宁验证了Latham的说法^[4-6]。国内外学者开展了大量沙尘条件下的放电特性试验^[7-8],沙特学者M.I.Qureshi和A.A.Al-Arainy等展开了沙尘条件下典型空气间隙操作冲击放电特性和雷电冲击放电特性的试验^[9-14],试验指出对于间隙距离和电极形状不同的空气间隙,沙尘所产生的影响有差异。研究同时还指出阴极表面附着的沙尘是改变空气间隙放电特性的主要因素,附着的沙尘增加了阴极发射电子的数目。2006年,美国学者N.Y.Babaeva和M.J.Kushner研究了空气中含有颗粒物或者气溶胶等情况下,流注的发展过程^[15-16],研究指出沙粒能促进光电离过程。流注发展过程中沙粒表面光电离产生更多的自由电子,促进流注中电子崩和二次电子崩的发展。2008年,重庆大学的司马文霞等开展了沙尘条件下空气间隙的冲击放电特性和工频放电特性试验^[17-19]。2010年,西安交通大学的贺博等人开展了沙尘条件下板—板间隙工频放电特性试验,指出板—板电极的工频放电电压随沙尘质量分数的增加而降低^[20]。华中科技大学的邓鹤鸣等进行了含沙尘的间隙和洁净间隙的操作冲击放电特性对比试验^[21],发现沙粒对放电发展有促进的作用,沙粒可以引发放电树枝状发展。

之前学者的研究主要针对试验研究,较少开展关于沙尘条件下空气间隙电场分布的仿真计算。并且在计算弥漫沙尘间隙的电场时,之前的仿真方法都采用改变介质介电常数的方式模拟介质特性的改变,这种方法不能体现出介质的不均匀性,也难以得出沙粒对电场畸变的影响。为进一步了解沙尘颗粒对空气间隙放电特性的影响,文中考虑了介质的不均匀性,建立了弥漫沙粒的棒—板间隙电场仿真模型,计算了不同情况下有沙间隙中的电场分布特性,并把电场仿真结果与试验现象相结合,对含沙尘间隙放电过程产生的一些现象进行了分析。

1 电场仿真方法

1.1 基于有限元法的计算原理

有限元法采用有限自由度的离散单元组合体模型去描述具有无限自由度的实际问题,以剖分差值的方法,把联系的无限空间构造成分片解析的有限元子空间。由于其方便性、实用性和有效性而广泛应用于物理场计算^[22]。静电场是高压电气绝缘结构和放电现象研究等许多领域最常遇到的场,静电场的数值分析计算在电力设备的设计和优化中有着极为重要的作用。

静电场微分形式的方程为

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (1)$$

$$\nabla \times E = 0 \quad (2)$$

式(1)中, ρ 为电荷体密度。

媒质构成方程为

$$D = \varepsilon E \quad (3)$$

式(3)中, ε 为介质的介电常数。

为便于计算,静电场的电场强度可以由一个标量函数 φ 表示

$$E = -\nabla \varphi \quad (4)$$

式(4)中,标量函数 φ 称为静电场的标量电位函数。

因此,对于均匀媒质,可得

$$\nabla^2 \varphi = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (5)$$

式(5)为静电场电位 φ 的泊松方程。对于场中无自由电荷分布的区域,则

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (6)$$

式(6)为静电场电位 φ 的拉普拉斯方程。

静电场问题就是在给定边界条件下,求电位函数 φ 的泊松方程或拉普拉斯方程的定解问题。

1.2 均匀介质模型的计算结果

在正常情况下,纯净空气的相对介电常数近似为1^[23]。当空气介质中弥漫着沙尘时,沙尘颗粒改变了纯净空气介质的特性。以往的学者在进行间隙电场仿真计算时,大多将弥漫沙尘时的间隙介质依然近似看作均匀介质,采用改变介质介电常数的方式模拟介质特性的改变。石英砂的相对介电常数为4.2,高于空气的相对介电常数。当空气介质中混有沙粒时,介质的等效介电常数会相应增大。沙尘质量分数越高,介质的等效介电常数也应越大。

文中按照这种思路,计算了间隙中介质介电常数分别为1、1.01、1.1、1.5时,间隙中电场强度的变化情况。介质的相对介电常数不同时,棒极末端电场值见表1。仿真结果表明,改变介质介电常数对间隙中电场的分布无明显影响。由于棒—板间隙的结构简单,仿真模型仅由棒极、板极和间隙介质构成。根据静电场原理,均匀介质中的电场强度由电位函数决定,仅改变介质的介电常数不会影响电位的分布,因此间隙中的电场强度无变化。

表1 均匀介质模型的计算结果

Table 1 Calculation results of homogeneous medium model

介质等效介电常数	1.00	1.01	1.10	1.50
棒极末端电场值/(kV·cm ⁻¹)	33.8	33.8	33.8	33.8

1.3 模型主要参数设定

当空气中弥漫着沙尘时,由于沙尘颗粒的直径相较于空气分子是很大的,把间隙的介质看作均匀介质的处理方法是比较粗糙的,不能比较真实地描述实际情况。为了更深入地了解沙粒所造成的电场畸变,文中在建立三维仿真模型时,考虑了存在沙粒的不均匀介质。在研究沙粒对间隙电场影响的仿真模型中,设定沙粒的直径固定为 $130\ \mu\text{m}$;沙粒的相对介电常数参考石英砂的参数,设定为 4.2;风沙的沙尘质量分数为 $5\ \text{g}/\text{m}^3$ 。在建模过程中,风沙沙尘质量分数体现在模型中沙粒间的距离上。参考石英砂的密度为 $2.6\ \text{g}/\text{cm}^3$,假设沙尘中沙粒均匀分布,当沙尘质量分数为 $5\ \text{g}/\text{m}^3$ 时,计算得到沙粒之间距离约为 $1.6\ \text{cm}$ 。

文中采用 COMSOL Multiphysics 有限元软件,对沙尘环境下棒—板间隙电场分布进行仿真计算。仿真模型中设定棒电极长为 $1\ \text{m}$,半径 $0.01\ \text{m}$ 的圆柱,棒极末端为半径 $0.01\ \text{m}$ 的半球;板极为半径 $3\ \text{m}$,高 $0.003\ \text{m}$ 的圆柱形;间隙距离为 $0.1\ \text{m}$;模型的空气截断域设定为 $3\ \text{m}$ 。棒电极施加 $40\ \text{kV}$ 电压;板电极接地,电压为 0 。由于三维模型仿真计算量大,而沙粒的影响主要体现在沙粒对间隙当中电场的影响,为减小计算量,仿真模型中的沙粒只分布于棒—板间隙当中。模型中,为了避免由于沙粒网格划分不精细而造成的电场畸变,对沙粒网格的划分最为精细,采用最大单元尺寸控制,最大单元尺寸为 $3\times 10^{-5}\ \text{m}$;棒极和板极网格采用较精细划分,最小单元尺寸为 $0.009\ \text{m}$,最大单元生长率为 1.35;为减小计算量,空气域的网格划分略粗糙,最大单元生长率为 1.5,既能保证电极和沙粒周围的网格划分足够精细,同时外围区域网格较大,计算量合理。仿真模型及网格划分见图 1。

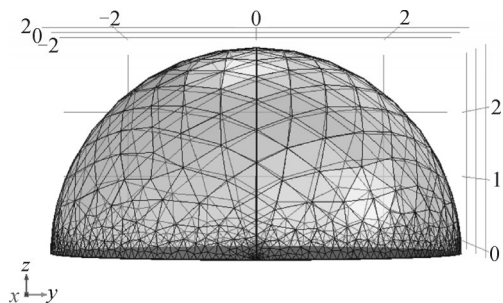


图1 仿真模型及其网格剖分

Fig. 1 Simulation model and its mesh generation

2 电场仿真分析

2.1 沙粒对间隙电场分布的影响

文中采用三维模型进行了沙尘条件下棒—板间隙电场仿真计算,由于棒—板间隙电场分布模型是轴对称模型,故以 yz 轴截面上的电场分布为例进

行分析。当间隙中存在沙粒时,模型棒极周围的电场分布见图 2。仿真结果表明,棒极末端电场最大值为 $33.8\ \text{kV}/\text{cm}$,与无沙的情况相比没有明显的差别。然而沙粒周围出现了明显的电场畸变。沙粒距离棒电极越近,其对电场的畸变作用越明显。

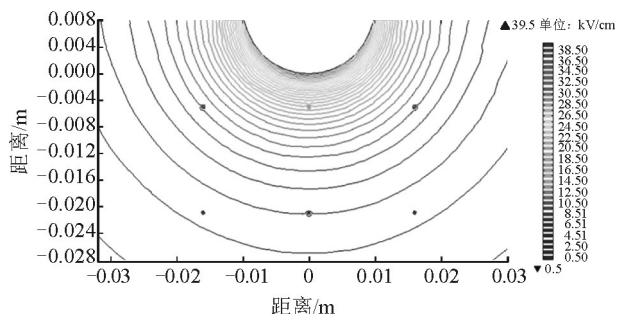


图2 棒极周围电场分布

Fig. 2 Electric field distribution around the rod electrode

为了更清晰地描述沙粒周围电场的变化,图 3 给出了棒极正下方,通过 z 轴方向上一列沙粒正中的截线上的电场分布图,图 3 中不光滑的位置对应的即为沙粒的位置。结合图 2、3 可以看出,在沙粒上表面和沙粒下表面附近的电场出现了明显的升高,沙粒内部的电场低于周围区域的电场。通过同一列沙粒侧边缘的截线上的电场分布图见图 4,从图 4 可见,其侧方外表面附近的电场是低于周围电场的。

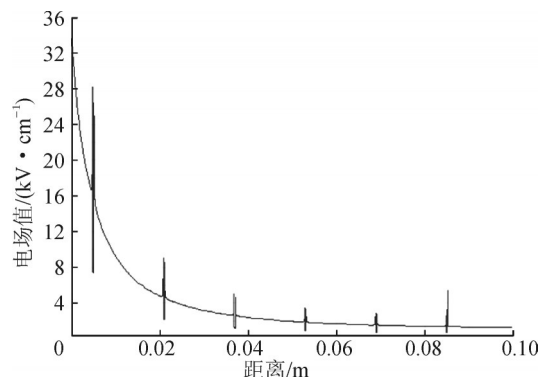


图3 沙粒正中截线上的电场分布

Fig. 3 The electric field distribution on the median stub line

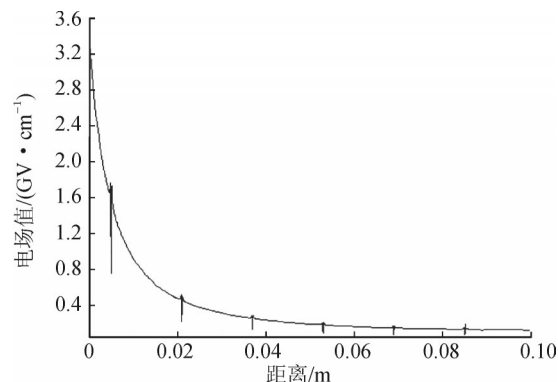


图4 沙粒边缘截线上的电场分布

Fig. 4 The electric field distribution on the marginal stub line

对于棒极侧下方的沙粒,沙粒表面的电场也是有上升有下降的。电场升高的方向总是指向棒极末端的方向,而在沙粒与棒电极连线的垂直方向上电场降低,该方向的电场值低于周围区域。沙粒周围的电场分布情况见图5。

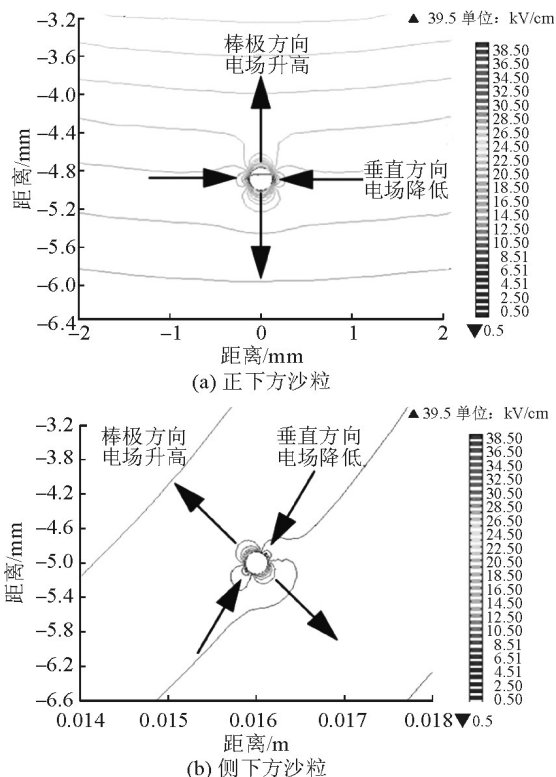


图5 沙粒周围电场分布

Fig. 5 Electric field distribution around sand particles

2.2 沙尘质量分数增加对间隙电场的影响

沙粒悬浮在空气中时,沙粒间的相互作用也会影响电场分布,造成电场畸变。保持沙尘粒径不变的前提下,沙尘质量分数增加时,沙粒的体积分数会增大,沙粒间的距离也会减小,使沙粒间的相互作用变得明显,因此沙尘质量分数的变化可能对电场的分布造成影响。文中建立了沙尘质量分数分别是5、10 g/m³时的电场仿真模型,计算了不同质量分数条件下间隙中电场分布的变化。模型中的沙粒设定相同的直径,沙粒属性参数不变,2个模型中沙粒的相对介电常数均为4.2。

模型中设定沙粒均匀分布,沙粒质量分数的改变主要体现在沙粒间距离的变化上。沙尘质量分数为5、10 g/m³时的仿真模型中,沙粒间隙分别为1.6、1.25 cm。根据仿真结果,沙尘质量分数在这个范围内变化时,棒电极末端的电场分布没有明显的变化。对于间隙间的电场分布,无沙、沙尘质量分数为5、10 g/m³ 3种情况下,间隙中棒极轴向方向通过一系列沙粒正中的截线上的电场分布

见图6。对比分析发现,沙尘质量分数为5、10 g/m³时,最靠近棒极的沙粒表面的电场最大值约为28 kV/cm,较周围区域的平均电场(约16 kV/cm)上升了40%,然而距沙粒较远的区域电场无明显变化。根据图6中的曲线,静电场情况下,沙粒的存在只会影响5倍半径以内区域的电场分布,然而对于沙尘质量分数为5、10 g/m³的仿真模型,其沙粒间距都在50倍半径以上,对于距沙粒较远的区域以及棒极表面的电场分布所产生的影响很小。但由于10 g/m³的仿真模型中沙粒的分布比5 g/m³模型中的更为密集,间隙中的电场分布也相应的更加不均匀。

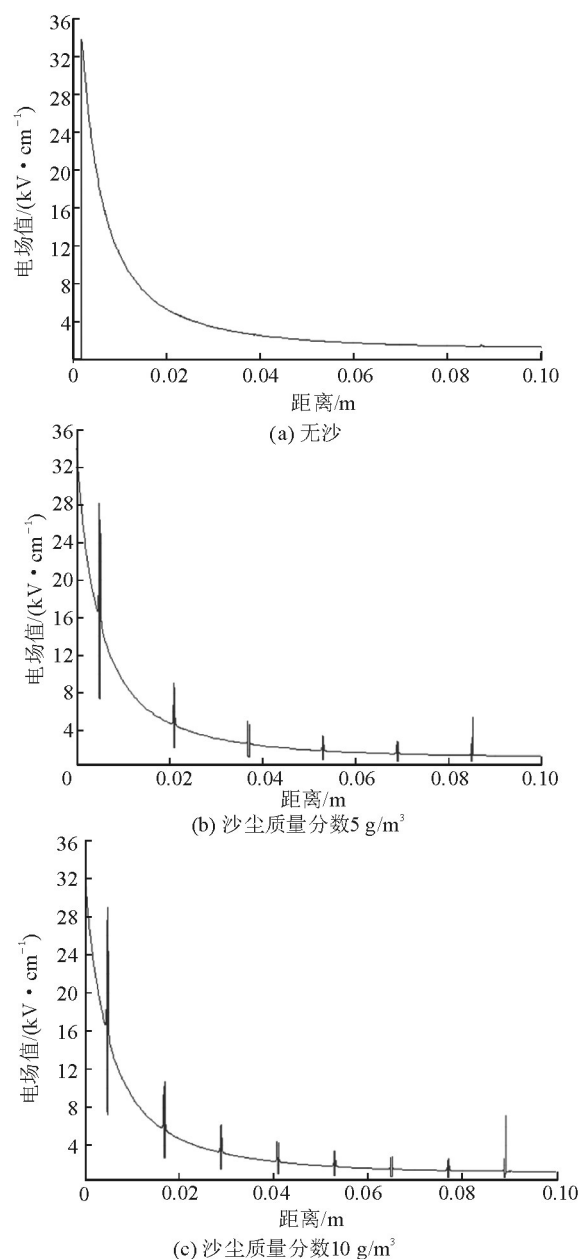


图6 不同质量分数模型棒电极轴向电场分布

Fig. 6 Electric field distribution of models with different concentration

2.3 沙尘质量分数增加对间隙电场的影响

沙粒悬浮在空气中时,沙粒间的相互作用也会影响电场分布,造成电场畸变。保持沙尘粒径不变的前提下,沙尘质量分数增加时,沙粒的体积分数会增大,沙粒间的距离也会减小,使沙粒间的相互作用变得明显,因此沙尘质量分数的变化可能对电场的分布造成影响。文中建立了沙尘质量分数分别为5、10 g/m³时的电场仿真模型,计算了不同质量分数条件下间隙中电场分布的变化。模型中的沙粒设定相同的直径,沙粒属性参数不变,2个模型中沙粒的相对介电常数均为4.2。

模型中设定沙粒均匀分布,沙粒质量分数的改变主要体现在沙粒间距离的变化上。沙尘质量分数为5、10 g/m³时的仿真模型中,沙粒间隙分别为1.6、1.25 cm。根据仿真结果,沙尘质量分数在这个范围内变化时,棒电极末端的电场分布没有明显的变化。对于间隙间的电场分布,图6给出了无沙、沙尘质量分数为5、10 g/m³3种情况下,间隙中棒极轴向方向通过一系列沙粒正中的截线上的电场分布图。对比分析发现,沙尘质量分数为5、10 g/m³时,最靠近棒极的沙粒表面的电场最大值约为28 kV/cm,较周围区域的平均电场(约16 kV/cm)上升了40%,然而距沙粒较远的区域电场无明显变化。根据图6中的曲线,静电场情况下,沙粒的存在只会影响其5倍半径以内区域的电场分布,然而对于沙尘质量分数为5、10 g/m³的仿真模型,其沙粒间距都在50倍半径以上,对于距沙粒较远的区域以及棒极表面的电场分布所产生的影响很小。但由于10 g/m³的仿真模型中沙粒的分布比5 g/m³模型中的更为密集,间隙中的电场畸变增加,电场分布也相应的更加不均匀。

3 仿真结果与试验现象验证

根据电场仿真的结果,沙尘分布于间隙中时,电场出现了明显的畸变。沙粒周围的电场,在指向棒电极末端的方向及其反方向上,电场出现了明显的升高;而在沙粒与棒电极连线的垂线方向上电场降低,该方向的电场值低于周围没有沙粒的区域。在美国学者N.Y.Babaeva和M.J.Kushner的研究中指出^[21-22],当流注头部靠近沙粒时,沙粒会阻碍流注的发展或加快流注的发展。在华中科技大学学者进行的棒—板间隙雷电冲击放电特性试验研究中指出,相同条件下,有沙间隙的放电通道明显宽于洁净空气间隙的放电通道,沙粒能促进放电树枝状发展。由于流注头部发展的方向是随机的,当流注沿等值线切线方向靠近沙粒,那么流注的发展会受

到限制;当流注沿等值线法线方向靠近沙粒,那么畸变的电场会加快流注的发展。沙粒产生的电场畸变,有利于流注朝向电场等值线法线方向发展——即树枝状发展,因此会出现有沙间隙的放电通道宽于无沙间隙的放电通道的现象。

在西安交通大学贺博等人在板—板间隙的操作冲击放电特性试验表明^[19],间隙击穿电压随风沙风速的增加先下降再上升,随沙尘质量分数的升高而降低。沙粒的存在造成了间隙中电场的畸变,显然,这种电场的畸变给间隙的放电特性带来了一定的影响。相比于棒—棒、棒—板间隙,板—板间隙中的电场属于比较均匀的电场,因此板—板间隙的放电特性对于电场畸变更为敏感。沙尘质量分数升高也会导致电场畸变程度的增加,因此沙尘质量分数增加会造成板—板放电电压的降低。

4 结论

文中基于COMSOL Multiphysics有限元软件,建立了考虑不均匀介质的棒—板间隙电场分布仿真模型。计算得到了以下结论:

1)当间隙中弥漫着沙粒时,沙粒周围会出现明显的电场畸变。沙粒越接近棒极,电场产生的畸变越明显。

2)沙粒周围的电场,在指向棒电极末端的方向及其反方向上,电场出现了明显的升高;而在沙粒与棒电极连线的垂直方向上电场降低,该方向的电场值低于周围没有沙粒的区域。

3)间隙中弥漫着沙粒时,棒电极表面的电场分布基本无变化。沙粒的存在只会影响其5倍半径以内区域的电场分布。

4)沙尘质量分数增加时,间隙中的电场畸变增加,电场分布也相应的更加不均匀,而对于距沙粒较远的区域以及棒极表面的电场分布所产生的影响很小。

参考文献:

- [1] 段大鹏,张玉佳,郭鑫宇,等.气象因素对北京电网设备影响的统计规律及时空分布特征[J].高压电器,2013,49(7):75-79.
DUAN Dapeng, ZHANG Yujia, GUO Xinyu, et al. Statistical law and distribution characteristic of the impacts of climate on equipment of Beijing power network[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(7): 75-79.
- [2] LATHAM J. The electrification of snowstorms and sand storms[J]. The Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1964(90):91-95.

- [3] 屈建军, 言穆弘, 董光荣, 等. 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 Jianjun, YAN Muhong, DONG Guangrong, et al. Wind tunnel simulation of effect of sandstorm on electrical wire voltage[J]. Science Sinica, 2003, 33(6): 593-601.
- [4] GILL E W B. Frictional electrification of sand[J]. Journal of Glaciology, 1948, 1(5): 230.
- [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.
HUANG Ning, ZHENG Xiaojing. Experimental measurement of sand particles in sand flow[J]. Chinese Science Bulletin, 2000, 45(20): 2232-2235.
- [6] 薛朝晖, 王燕, 刘靖, 等. 强电场对低速气固两相流体运动影响的模拟试验研究[J]. 高压电器, 2015, 51(7): 171-176.
XUE Zhaohui, WANG Yan, LIU Jing, et al. Simulation experiment of the impact on the motion of the particle in dual-phase distribution of gas & solid under strong electric field[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(7): 171-176.
- [7] LAGHARI J R, QURESHI A H. A review of particle-contaminated gas breakdown[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1981, EI-16(5): 388-398.
- [8] AWAD M M, ELGENDY O, ARAFA B A, et al. The effect of industrial environmental conditions on the performance of conventional and polymeric insulators[J]. International Symposium on High-voltage Engineering, 1999(4): 30-33.
- [9] QURESHI M I, AL-ARAINY A R, 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.
- [10] AL-ARAINY A R, MALIK N H, QURESHI M I. Influence of desert pollution on the lightning impulse breakdown voltages of rod to plane air gaps[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(1): 421-428.
- [11] AL-ARAINY A A, MALIK N H, QURESHI M I. Influence of sand/dust contamination on the breakdown of asymmetrical air gaps under lightning impulses[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1992, 27(2): 193-206.
- [12] QURESHI M I, AL-ARAINY A A, MALIK N H. Performance of protective rod gaps for medium voltage networks in the presence of dust particles under lightning impulses[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(4): 1311-1316.
- [13] 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 Transactions on Power Delivery, 1993, 8(3): 1045-1051.
- [14] AL-ARAINY A A, MALIK N H, QURESHI M I. 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.
- [15] BABAEVA N Y, BHOJ A N, KUSHNER M J. Streamer dynamics in gases containing dust particles[J]. Plasma Sources Science & Technology, 2006, 15(4): 591-602.
- [16] BABAEVA N Y, KUSHNER M J. Streamer branching: The role of inhomogeneities and bubbles[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2008, 36(5): 892-893.
- [17] SIMA Wenxia, MA Gaoquan, YANG Qing. Flashover characteristics of flat model under DC voltage in wind-sand two-phase mixture[C]//High Voltage Engineering and Application. [S.l.]: IEEE, 2009: 158-162.
- [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: 16-20.
SIMA Wenxia, 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] 吴亮. 沙尘环境下空气间隙和平板模型沿面放电特性的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.
WU Liang. Study on discharge characteristics of flat model and air gap under sand dust environment[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.
- [20] 贺博, 张刚, 陈邦发, 等. 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(物理学 天文学), 2010, 40(3): 296-302.
HE Bo, ZHANG Gang, CHEN Bangfa, et al. Simulation experimental study on the effect of sand dust environment on the air gap discharge characteristics of plate-plate electrode[J]. Science Sinica (Phys., Mech. & Astron.), 2010, 40(3): 296-302.
- [21] 邓鹤鸣, 何正浩, 马军, 等. 沙尘天气下大沙粒对放电发展的影响[J]. 高电压技术, 2010, 36(5): 1246-1252.
DENG Heming, HE Zhenghao, MA Jun, et al. Effect of large sand dust particles on discharge development in sand dust weather[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(5): 1246-1252.
- [22] 徐志钊, 律方成, 李和明, 等. 绝缘子电场有限元分析法的影响因素及其优化[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 944-951.
XU Zhiniu, LYU Fangcheng, LI Heming, et al. Influencing factors of insulator electric field analysis by finite element method and its optimization[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 944-951.
- [23] 王伟, 屠幼萍. 高电压技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 56-59.
WANG Wei, TU Youping. High voltage technology[M]. Beijing: China Machine Press, 2011: 56-59.

律方成(1963—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事电气设备绝缘机理、电气设备在线监测与故障诊断、电气设备状态检修等方面的研究。

刘畅(1991—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为特高压交直流外绝缘技术。

丁玉剑(1982—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为特高压交直流输电外绝缘和海拔修正、带电作业技术和绝缘子检测技术。