

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.06.014

XSP-160型瓷三伞绝缘子积污特性的数值模拟研究

吕玉坤¹, 史久志¹, 李金岗¹, 刘云鹏¹, 李志超², 张雪梅¹

(1. 华北电力大学, 河北 保定 071003; 2. 华能发电有限责任公司太仓电厂, 江苏 太仓 215424)

摘要: 为研究瓷三伞绝缘子表面的积污特性及荷电量的影响,以XSP-160型瓷三伞绝缘子为研究对象,利用COMSOL建立了其风洞条件下的积污模型并进行了数值模拟,与其风洞试验结果进行了对比,结果验证了此方法的可行性。藉此,对该绝缘子自然积污特性进行数值模拟研究,分析了电压类型、颗粒荷电量对其自然积污特性的影响。结果表明:绝缘子表面积污量及其增长率在直流电作用下更大、更快,而在交流电作用下的结果略大于不带电的情况;直流电作用下,颗粒荷电量越大,积污量越多,颗粒未荷电、正常荷电、加倍荷电时积污量的直、交流整体积污比分别为0.98、2.24、3.90,积污直交比随荷电量增加近似线性增加。

关键词: 瓷三伞绝缘子; 自然积污特性; 数值模拟; 电压类型; 颗粒荷电量

Simulation Study on Pollution Accumulation Characteristics of XSP-160 Porcelain Three Umbrella Insulators

LYU Yukun¹, SHI Jiuzhi¹, LI Jingang¹, LIU Yunpeng¹, LI Zhichao², ZHANG Xuemei¹

(1. North China Electric Power University, Hebei Baoding 071003, China; 2. Taicang Power Station of China Huaneng Group, Jiangsu Taicang 215424, China)

Abstract: In order to study the contamination characteristics of porcelain three umbrella insulators and the influence of particle charge. Using COMSOL, a pollution accumulation model of the wind tunnel at North China Electric Power University was built, and a simulation of the pollution accumulation characteristics of the XSP-160 porcelain three umbrella insulators was conducted, then, the simulation results were compared with the results from the wind tunnel test conducted at the campus. The verification results confirm the rationality of the simulation method. Based on these results, a simulation study was conducted on the natural contamination characteristics of the insulator to analyze the effects of individual factors and composite factors such as wind speed, particle size, particle charges, and voltage type on the natural pollution accumulation characteristics of insulators. The results show that DC voltage leads to a greater overall deposition of contaminants on the insulator surface and a faster rate of increase. However, the values of the deposition under AC voltage is slightly larger than that on the unelectrified state. Under DC condition, the greater the particle charge, the deposition is higher. The proportion of $NSDD_{DC}$ to $NSDD_{AC}$ is 0.98, 2.24 and 3.90, respectively, when the particles are uncharged, normal charged, and double charged, the proportion of $NSDD_{DC}$ to $NSDD_{AC}$ approximately linearly increases with increasing particle charge.

Key words: three umbrella porcelain insulators; natural contamination characteristics; numerical simulation; voltage type; particle charges

0 引言

近年来,输变电设备外绝缘的污闪事故频仍严重影响电力系统的安全运行^[1]。虽然污闪事故发

生的次数仅次于雷击故障,但造成的损失却是雷击故障的近10倍^[2]。大气中污秽颗粒在绝缘子表面的沉积,是污闪事故发生的前提^[3]。因此,研究绝缘子积污特性,借以检验其绝缘水平,对有效减少污闪事

故的发生从而保证电力系统和电气设备的安全运行具有一定的实际意义。

国内外学者对影响绝缘子积污的诸多因素进行了研究。目前,主要研究方法有自然积污试验^[4-5]、人工积污模拟试验^[6]和数值模拟分析^[7-8]等。自然积污试验法就是一种在工业污区架设专门的试验线段或建立自然积污试验站,或直接利用污区的运行线路作试验线路,让其绝缘子在运行电压和自然条件下受到污染和湿润,测量泄漏电流或闪络的方法。宿志一^[4-5]、王彬^[9]、Castaño^[10]等人对影响绝缘子自然积污的因素进行了试验研究,总结了污秽在绝缘子表面的沉积规律。在该方面做出了指导性的研究工作,为人工试验和数值模拟提供了大量对比性的数据。该方法侧重研究绝缘子伞型、季节、是否带电以及电压类型等对积污特性的影响,试验结果能最真实、最直接地表明绝缘子在实际运行条件下的特性,但周期长、易受周围条件影响,结果分散性大,其研究成果的推广应用尚存诸多困难^[11]。人工积污模拟试验由于其可以根据需要进行人为控制并能在较短时间能获得大量实验结果而在国内外得到了广泛应用^[12]。王晶^[13-14]等通过同轴电极模型试验研究了尘粒在电场力、稳态曳力、重力和极化力共同作用下的运动轨迹。研究表明:电场力可促使带电颗粒在伞裙表面沉积,是绝缘子积污的重要影响因素;风速较大时,稳态曳力对尘粒运动起主导作用。Horenstein^[15]通过建立简化积污模型研究了高压直流绝缘子串附近的电场分布、空气流场以及颗粒的动态响应。认为污秽颗粒在绝缘表面沉积速率是颗粒流动性、颗粒质量密度以及电场强度共同作用的结果。但人工试验往往难以考虑实际运行中污秽量差别、分布不均匀性以及其与自然积污试验等价性还不完善等问题,其结果与实际运行结果往往存在较大偏差^[16]。数值模拟主要是基于流体力学、低频电磁场以及流体流动颗粒两相流的数值模拟软件,分析绝缘子积污的影响因素,从而获得不同因素对绝缘子表面积污的影响规律^[17]。合理的数值模拟方法对实验研究和理论分析具有指导作用。蒋兴良^[18]等人利用Fluent软件模拟了尘粒布朗运动、气流曳力、湍流扩散、重力自沉降等因素对绝缘子表面积污的影响,其研究结果表明:弱风环境下表面积污主要与布朗运动和湍流扩散有关。Ravelomanantsoa^[19]等基于覆冰过程建立了高压线路绝缘子串模型并对风速、颗粒粒径以及绝缘子形状等影响绝缘子积污情况的因素进行了模拟分析。虽然数值模拟直观性不如试验方法好,较抽

象,但具有成本低、时间短,可以快速得到结果,并可获得单一因素对积污特性的影响以弥补试验中的不足等优点^[20-21]。

文中以XSP-160型瓷三伞绝缘子为研究对象,利用COMSOL软件模拟风洞条件下绝缘子的积污特性,并与风洞试验结果进行对比,以探讨利用此方法研究绝缘子积污特性的可行性。在此基础上,拟对绝缘子自然积污特性进行仿真数值模拟,分析不同电压类型、颗粒荷电量等因素对绝缘子自然积污特性的影响。

1 风洞试验及其数值模拟结果的对比分析

1.1 风洞试验方法及装置简介

该校闭式风洞实验^[21-22]装置见图1。试验在低速段进行,尺寸为10.5 m×1.1 m×0.8 m,自然微风风速取4 m/s。限于试验段结构,选XSP-160型瓷三伞绝缘子3片,长为0.51 m,实物见图2。以下伞裙钢脚为高压端,上伞裙铁帽为接地端,试验电压及范围:DC,±12~±36 kV。污秽颗粒试样主要为细沙、硅藻土与NaCl颗粒以6:6:1比例混合的混合物,粒径分别为100、50、100 μm,密度分别为2.32、0.47、2.165 g/cm³。试验中主要测量绝缘子伞裙表面的积污量。为减少人为操作带来的误差,每种直流电压重复实验3次,即每种情况测量三组数据,并取其平均值作为实际积污量。

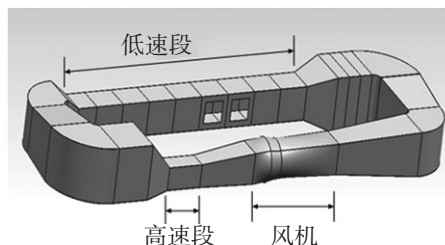


图1 风洞实验室结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wind tunnel laboratory

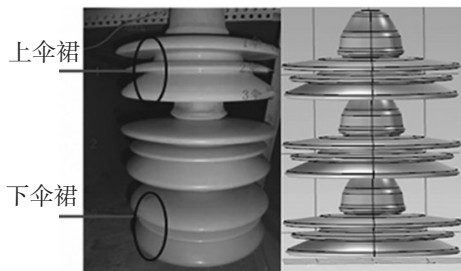


图2 瓷三伞绝缘子物理模型及伞裙划分

Fig. 2 Geometrical model and sheds division of porcelain three umbrella insulators

1.2 风洞积污特性数值模拟研究

1.2.1 数学模型及控制方程

颗粒运动过程中主要受到重力、稳态曳力、电

场力和极化力等力的影响^[13, 23-24]。经分析认为颗粒在运动过程中只受重力、稳态曳力和电场力的作用。

电场力

$$F_e = ezE \quad (1)$$

式(1)中: e 为元电荷; E 为电场强度; z 为颗粒的荷电量。

表观重力: 文中定义表观重力(简称重力)为颗粒所受重力与在流场中所受浮力之差, 表达式为

$$F_g = m_p g \frac{(\rho_p - \rho)}{\rho_p} \quad (2)$$

式(2)中: m_p 为颗粒重量; ρ_p 为颗粒密度; ρ 为空气密度。

稳态流场的曳力:

$$F_d = \frac{1}{\tau_p} m_p (u - v) \quad (3)$$

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \quad (4)$$

式(3)、(4)中: τ_p 为颗粒响应时间; u 为气体流速; v 为颗粒速度; d_p 为颗粒粒径; μ 为运动粘度。

颗粒运动特性由式(5)确定。

$$\frac{d(m_p v)}{dt} = F_g + F_d + F_e \quad (5)$$

1.2.2 物理模型建立及网格划分

瓷三伞绝缘子风洞试验的物理模型见图3。对应风洞试验中低速段的几何结构尺寸, 构建 10.5 m × 1.1 m × 0.8 m 的长方体, 并在其外部建立一个厚度为 100 mm 的虚拟区域——“无限元域”——电磁波的吸收区域。采用分区非结构化网格, 经网格无关性验证后, 确定网格数量为 70 万时可以比较好的权衡计算精度和计算时间的影响。

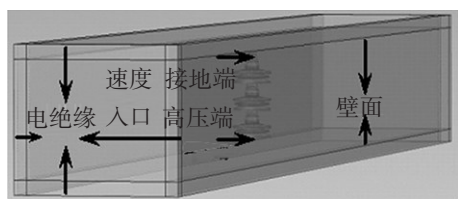


图3 风洞实验室低速段物理模型及电场与流场边界条件示意图

Fig. 3 Physical model of the low-speed test section of the wind tunnel, and the boundary conditions of the electric field

1.2.3 边界及物性条件设置

文中主要采用 COMSOL 软件中的电磁场模块、流场模块和粒子追踪模块进行数值模拟。流场模块选择 RNG k- ε 模型。在图3中, 流场入口设置为速度入口, 以 4 m/s 的速度均匀送入空气; 出口处理为压力出口; 其余 4 个面设为壁面, 采用壁面函数求解

速度、压力分布; 电磁场模块可与其它物理模块自由耦合, 计算区域外边界为默认的电绝缘边界条件; 颗粒运动过程中受到曳力、重力及电场力的作用, 在“粒子追踪”模块中定义各力施加到数值模拟区域的颗粒上。

污秽颗粒材料设为硅藻土, 粒径为 50 μm 。相关资料^[25]表明: 实际大气中多数尘粒处于荷电状态。文中认为颗粒群中单个颗粒荷电量的大小服从 -Z~Z 之间的随机分布, 颗粒相整体荷电均值为 0。对瓷三伞绝缘子各部分及流场区域和“无限元域”的材料进行设定。绝缘子外部区域(包括无限元域)设定为空气, 将绝缘子钢脚和铁帽设定为铸铁。数值模拟中用到的绝缘子材料的电气参数设定见表1, 其余边界条件设置与风洞试验相同。

表1 材料电气参数

Table 1 Electrical parameters of materials	
材料	相对介电常数
空气	1.0
铸铁	1.0×10^7
瓷三伞伞裙	5.5

1.2.4 数值模拟结果与试验结果对比分析

绝缘子表面积污量的风洞试验结果和数值模拟结果对比图见图4。由图4可知, 数值模拟结果的积污量小于风洞试验结果, 但两者属于同一量级, 整体上随直流电压变化趋势一致且呈“V”形分布。虽然风洞数值模拟结果与试验结果存在一定的差异, 但规律性较为吻合, 从而验证了文中采用的模型方法是可行的。

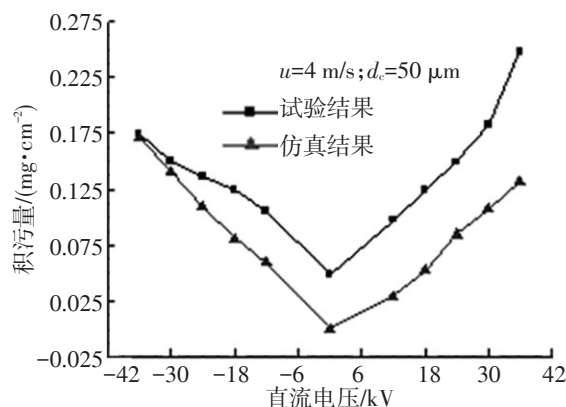


图4 绝缘子表面积污量的风洞试验和数值模拟结果对比图
Fig. 4 Comparison of wind tunnel test results with simulation results

风洞实验与仿真结果出现的差异在一定程度上是由以下因素造成的:

1) 钢脚、铁帽等金属部件的复杂结构在局部高压区域下可能造成空间场强畸变, 从而影响颗粒的

运动轨迹。污秽颗粒物的荷电情况极为复杂,实际情况中颗粒荷电量的极性及大小不断变化,影响颗粒所受电场力大小,这一点在文中的数值模拟方法中尚无法完全实现。

2)试验过程中所选用的污秽颗粒样本为细沙、硅藻土和NaCl以一定比例配制的混合物,沉积到绝缘子上的细沙及NaCl同样会被测量。数值模拟中仅以硅藻土作为污秽颗粒进行吹送,与试验条件有所差异。

2 瓷三伞绝缘子自然积污特性数值模拟

基于上述模拟方法对XSP-160型瓷三伞绝缘子自然积污特性进行数值模拟,分析在直流、交流以及不带电情况下,风速、粒径、颗粒荷电量等对绝缘子自然积污特性的影响。

2.1 自然积污仿真模型建立

建立与风洞试验数值模拟类似的物理模型见图5。选取7片绝缘子串,经网格无关性验证后,该模型网格数确定为82万。边界条件设置如下:风速分别为0.5、3、5 m/s,粒径分别为5、10、20 μm 。对应7片绝缘子的电压等级,在绝缘子上分别施加90 kV直、交流电压,且交流电施加的是有效值。其他条件的设置同风洞试验,见图6。

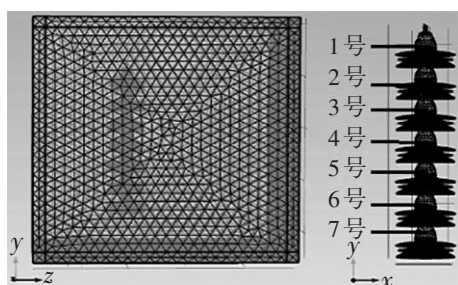


图5 自然积污模型及其网格划分图
Fig. 5 Natural contamination geometric model and grid partition

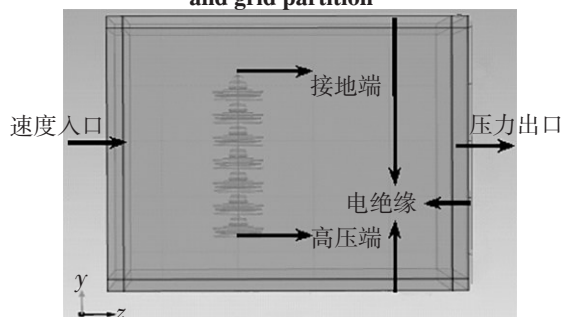


图6 流场及电场边界条件
Fig. 6 The boundary conditions of the flow field and electric field

2.2 绝缘子附近多物理场数值模拟结果分析

2.2.1 绝缘子附近流场结果分析

风速5 m/s时瓷三伞绝缘子的速度云图和速度

流线图见图7。由图7(a)可知,空气流经绝缘子表面时,在壁面上存在一定厚度的边界层,绝缘子背风侧存在一个面积较大的尾流区,速度降低的较为明显(图中圆圈所示)。由图7(b)可以看出,在绝缘子下表面及背风面存在旋涡的产生和脱离。由于瓷三伞绝缘子的伞形结构较符合空气动力学特性,空气流经伞裙表面所形成的旋涡较少,但旋涡的尺度较大。即流场分布符合流体力学相关原理。

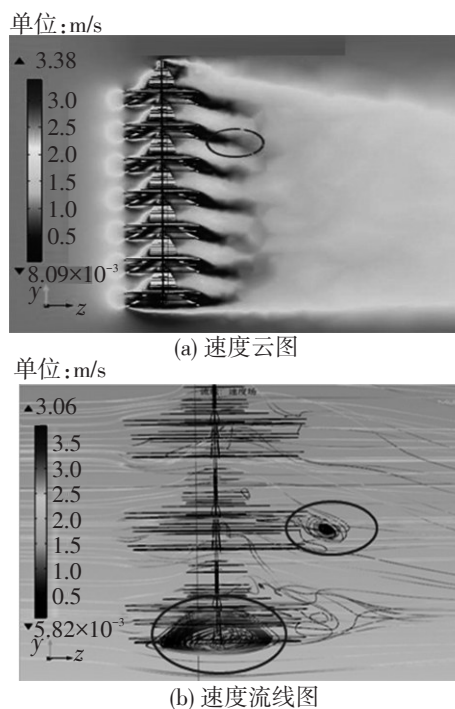


图7 风速5 m/s时瓷三伞绝缘子的速度云图和速度流线图
Fig. 7 Velocity nephogram and stream lines of porcelain three umbrella insulators at $v = 5 \text{ m/s}$

2.2.2 绝缘子附近电场结果分析

瓷三伞绝缘子施加90 kV直流电与交流电时其附近空间电场线分布见图8。由图8可知:直流电作用下,绝缘子周围电场线深色区域较大,而交流电电场线深色区域较小,故直流电作用下在绝缘子周围产生的空间场强整体上比交流电作用下强。电场线分别以高压端和接地端为焦点,形成闭合的曲线,未闭合的曲线终止于“无限元域”的外边界上,即延伸至无限远的零电势处。越靠近绝缘子壁面,电场线越密集,对应的场强梯度越大,即电场分布符合电磁场相关原理。

综上所述,采用文中模型获得的瓷三伞绝缘子附近的流场及电场均符合相应的物理场的变化规律,表明了将该方法用于瓷绝缘子自然积污特性研究的可行性。

2.3 瓷三伞绝缘子自然积污特性影响因素分析

以XSP-160型瓷三伞绝缘子表面整体积污量

以及沿其伞裙的积污情况来分析绝缘子的自然积污特性。积污模拟对应的时间段为10月至次年3月的少雨季节,即模拟绝缘子在积污期内的污移自然沉积情况。

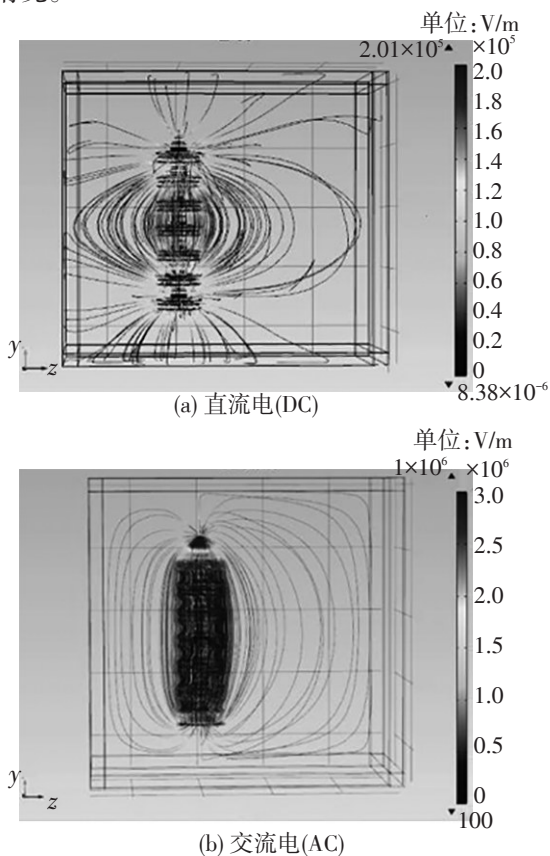


图8 空间电场线分布

Fig. 8 Spatial distribution of electric field lines

2.3.1 电压类型对积污的影响分析

绝缘子表面整体积污量随电压类型的变化见图9。由图9可知,在不同风速、粒径时,直流电作用下绝缘子表面积污量均大于不带电和交流电作用下的积污量,且后两者积污量基本相当,但交流电作用下的积污量仍略大于不带电的情况;绝缘子表面积污量的直交比随风速增大而减小,随粒径增大而增加。

由于直流电作用下(假设颗粒带电量的大小和极性不随时间变化)颗粒受到大小和方向恒定的电场力作用,偏离原运动轨迹,与绝缘子表面的碰撞概率大大增加,且颗粒在表面粘附后也更加牢固,致使直流电作用下绝缘子表面的积污量大于交流电作用下的积污量。交流电电场力曲线是周期性变化的,颗粒受到交变的、不稳定的电场力作用,造成颗粒在绝缘子附近运动轨迹是振荡的;而且交流电场力和气流曳力相差一个数量级,颗粒在绝缘子表面附近运动过程中主要受气流曳力作用,故交流电作用下颗粒的运动轨迹近似等效于不带电情况,其积污量

与不带电情况基本相当。虽然污秽颗粒在交流电场中的运动轨迹是周期性振荡的,电场力作用距离较小,但相比于不带电情况,仍有部分污秽颗粒在交流电场力的作用下发生了主流方向的扰动,使其与绝缘子壁面的碰撞概率增加,从而使交流电作用下的积污量略大于不带电的情况。

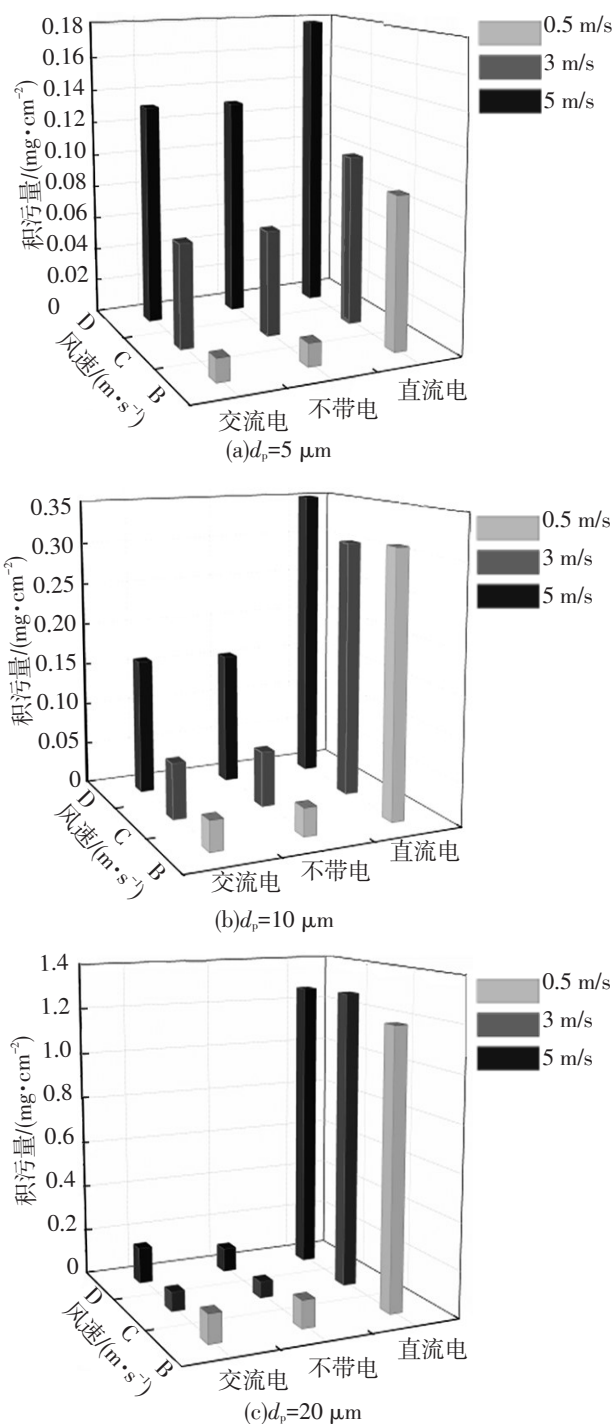


图9 积污量随电压类型变化

Fig. 9 Changing patterns of deposition with voltage type

2.3.2 颗粒荷电量对自然积污的影响分析

荷电量的确定对积污特性的研究有重要意义。例如:颗粒荷电量是电场力计算中的一项重要变量,

荷电量不同,颗粒所受的电场力不同,颗粒运动轨迹也会发生变化。实际颗粒荷电量情况极其复杂,其大小同当地气候环境、湿度、颗粒粒径、颗粒碰撞等因素都有关,电场也会影响颗粒荷电量,甚至可以说颗粒荷电量是随时间动态变化的。为研究颗粒荷电量对积污特性的影响,假定颗粒粒径和密度不变,通过改变单位质量颗粒所带电量(不超出其所能带电量的饱和值);风速为5 m/s且粒径为10 μm 时,颗粒在不同荷电量条件下(正常荷电、未荷电、加倍荷电),绝缘子表面积污量沿伞裙的变化情况见图10。

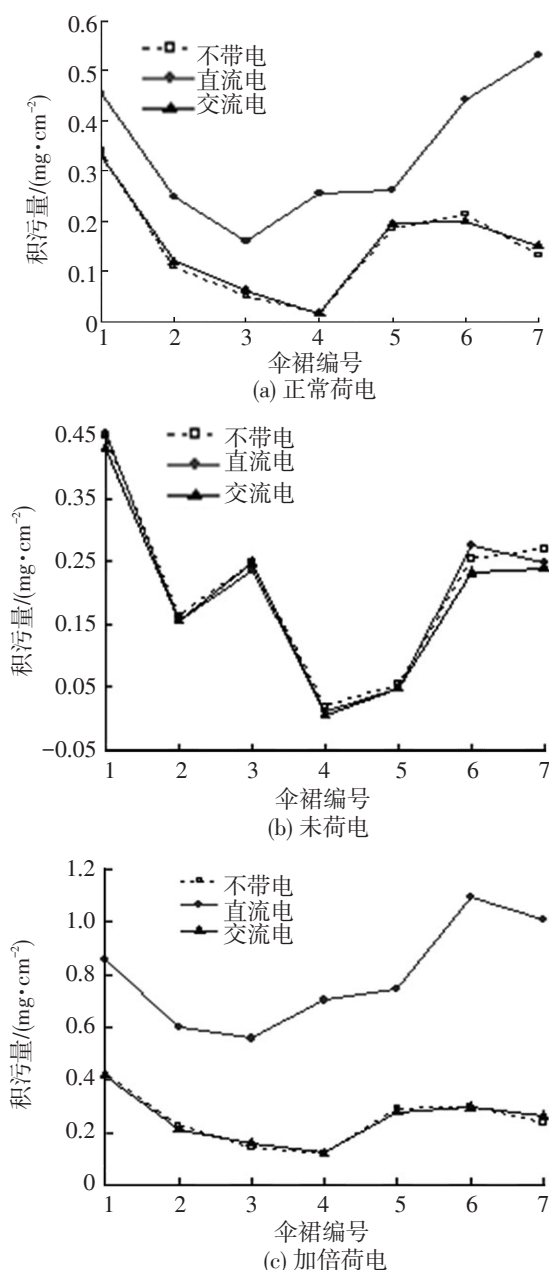


图10 颗粒不同电荷量条件下积污量沿伞裙变化

Fig. 10 Changing patterns of deposition with the parachute skirt under different charge quantity of the particles

图10中,正常荷电是指按所陈述方法计算得出

的单个颗粒所带电量;未荷电指颗粒所带电荷量为0 C;加倍电荷指在正常基础上将单个颗粒荷电量加一倍,其实质是将单位质量颗粒所带电量加倍,但不超出其所能带电的饱和值。

由图10(a)可知,颗粒正常荷电时,不带电和交流电作用下的两条积污曲线差异很小,且明显小于直流电作用下绝缘子表面的积污量,直、交流积污比为2.24;由图10(b)可知,直流电、交流电和不带电三种情况下的曲线几乎重合,直、交流积污比为0.98,说明颗粒未荷电情况下3种电压类型的积污量及趋势基本一致;由图10(c)可知,在颗粒加倍荷电的情况下,直流电作用下的积污量明显高于不带电和交流电作用,且积污量的直、交流积污比为3.90。对比图10(a)、10(b)和10(c),交流电作用下的积污曲线与不带电情况下的趋势相似且积污量大致相同,但略大于不带电,说明颗粒荷电情况对绝缘子表面积污影响在不带电和交流电作用下较小。对比图10(a)和10(b)可知,直流电作用下,颗粒荷电情况对绝缘子表面积污影响较大,且3号伞裙积污量变化较大。对比图10(a)和10(c),直流电作用下绝缘子的积污量均明显大于其他两种情况,且颗粒加倍荷电时绝缘子表面的积污量明显大于正常荷电时的积污量,说明颗粒荷电量增加会使直流电作用下绝缘子表面的自然积污量增大。

绝缘子整体积污直交比随荷电量的变化曲线见图11。由图11可知,瓷三伞绝缘子积污量的直、交流整体积污比随荷电量的增加近似线性增加。

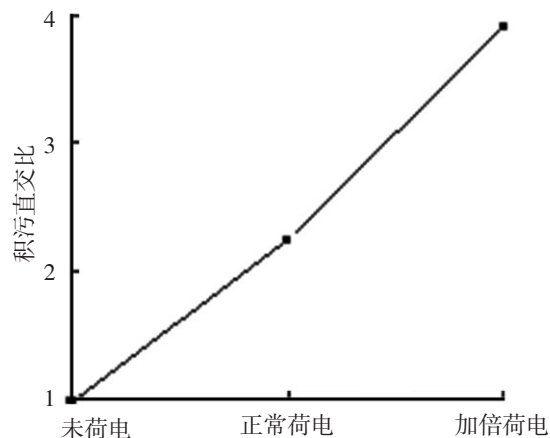


图11 积污直交比随荷电量的变化

Fig. 11 Proportion of NSDD_{DC} to NSDD_{AC} versus electric charge curves

因此,颗粒荷电量的大小在直流电作用下会对绝缘子表面的自然积污产生重大影响,深入研究并准确检测颗粒荷电量,使之符合自然条件,有可能有效提高数值模拟结果的准确性,对积污特性研究具

有重要意义。

3 结论

1)瓷三伞绝缘子数值模拟结果与风洞试验结果积污量的数量级相同,整体上随直流电压的变化趋势一致且呈“V”形分布,验证了文中所采用的模拟方法的可行性。

2)文中获得的瓷三伞绝缘子附近的流场及电场符合相应的物理场的变化规律,说明该数值模拟方法用于瓷绝缘子自然积污特性研究具有可行性。

3)绝缘子表面积污量及其增长速度在直流电作用下更大、更快,而不带电和交流电作用下积污量相当,且交流电作用下的积污量略大于不带电的情况;绝缘子表面积污量的直、交流积污比随风速增大而减小,随粒径增大而增加。

4)颗粒荷电量对直流电作用下绝缘子表面积污产生较大影响;荷电量越大,积污量越大,而在不带电和交流电作用下影响较小。

5)颗粒未荷电、正常荷电、加倍荷电时积污量的直、交流整体积污比分别为0.98、2.24、3.90。即绝缘子积污量的直、交流整体积污比随荷电量的增加近似线性增加。

参考文献:

- [1] ARMSTRONG M J, ROSS C A H. Implications of distribution voltage configuration on TeDP electrical systems[J]. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2014, 86(6): 501-508.
- [2] 张本皇, 李恒真, 刘刚, 等. 珠三角地区不同地形条件下绝缘子污秽积累规律的研究[J]. 高压电器, 2012, 48(4): 1-6.
ZHANG Benhuang, LI Hengzhen, LIU Gang, et al. Study on the rule of insulator contamination accumulation of various landforms in the Pearl River Delta[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(4): 1-6.
- [3] 韩玉康, 柯磊, 李三, 等. ± 800 kV 楚穗直流线路自然积污规律分析研究[J]. 高压电器, 2015, 51(11): 176-181.
HAN Yukang, KE Lei, LI San, et al. Study on natural pollution rule in Chu-Sui ± 800 kV DC transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11): 176-181.
- [4] 宿志一. 直流电压下绝缘子的自然积污特性与绝缘子的直交流积污比[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2004.
SU Zhiyi. The characteristics of insulator contamination under DC voltage and the contamination with DC and AC stress[R]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2004.
- [5] 宿志一, 刘燕生. 我国北方内陆地区线路与变电站用绝缘子的直、交流自然积污试验结果的比较[J]. 电网技术, 2004, 28(10): 13-17.
SU Zhiyi, LIU Yansheng. Comparison of natural contaminants accumulated on surfaces of suspension and post insulators with DC and AC stress in Northern China's inland areas[J]. Power System Technology, 2004, 28(10): 13-17.
- [6] 贺博, 万军, 陈邦发, 等. 人工模拟沙尘气候环境下线路绝缘子积污特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2008, 42(12): 1510-1514.
HE Bo, WANG Jun, CHEN Bangfa, et al. Contamination depositing characteristics of suspension insulators under sandstorm circumstance simulated artificially[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2008, 42(12): 1510-1514.
- [7] FU Ping. Modelling and simulation of the ice accretion process on fixed or rotating cylindrical objects by the boundary element method[D]. Chicoutimi: University du Québec à Chicoutimi, 2006.
- [8] RAVELOMANANTSOA N, FARZANEH M, CHISHOLM W A. A simulation method for winter pollution contamination of HV insulators[C]//Electrical Insulation Conference. Maryland, Annapolis: [s.n.], 2011: 5-8.
- [9] 王彬, 梁曦东, 张铁博, 等. 交、直流电压下复合绝缘子和瓷绝缘子的自然积污试验[J]. 高电压技术, 2009, 35(9): 2322-2328.
WANG Bin, LIANG Xidong, ZHANG Yibo, et al. Natural pollution test of composite and porcelain insulators under AC and DC stress[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(9): 2322-2328.
- [10] CASTAÑO J G, VELILLA E, CORREA L, et al. Ceramic insulators coated with titanium dioxide films: Properties and self-cleaning performance[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 116: 182-186.
- [11] MONTOYA - TENA G, HERNANDEZ - CORONA R, RAMIREZ-VAZQUEZ I. Experiences on pollution level measurement in Mexico[J]. Electric Power Systems Research, 2005, 76(1): 58-66.
- [12] 赵晨龙, 梅红伟, 戴罕奇, 等. 自然污秽与人工污秽绝缘子等价性分析方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6): 955-965.
ZHAO Chenlong, MEI Hongwei, DAI Hanqi, et al. Research on analysis method of equivalence between natural polluted insulators and artificial contaminated insulators[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(6): 955-965.
- [13] 王晶, 陈林华, 刘宇, 等. 电场对复合绝缘子积污特性影响的研究[J]. 高电压技术, 2011, 37(3): 585-593.
WANG Jing, CHEN Linhua, LIU Yu, et al. Effect of the electric field on the contamination accumulation characteristic of the insulators[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 585-593.

- neering, 2011, 37(3): 585-593.
- [14] 王 晶, 李 燕, 梁曦东, 等. 利用原子力显微镜探究污秽颗粒在绝缘子表面的粘附力[J]. 高电压技术, 2013, 39(6): 1352-1359.
- WANG Jing, LI Yan, LIANG Xidong, et al. Research of adhesion force between dust particle and insulators surface using atomic force microscope[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(6): 1352-1359.
- [15] HORENSTEIN M N, MELCHER J R. Particle contamination of high voltage DC insulators below corona threshold[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1979, 16(4): 297-305.
- [16] 李武峰, 范建斌, 李 鹏, 等. 直流绝缘子串污秽闪络特性研究[J]. 电网技术, 2006, 30(15): 21-24.
- LI Wufeng, FAN Jianbin, LI Peng, et al. Contamination flashover performance of DC insulator strings[J]. Power System Technology, 2006, 30(15): 21-24.
- [17] HALL J, PAUL T. Wind tunnel studies of the insulator contamination process[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1981, 16(3): 180-188.
- [18] 蒋兴良, 温作铭, 孙才新. 复合绝缘子表面水滴撞击特性的数值模拟与伞裙结构分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 7-12.
- JIANG Xingliang, WEN Zuoming, SUN Caixin. Numerical simulation of water droplet impingement on composite insulator surface and analysis of shed configuration[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(19): 7-12.
- [19] RAVELOMANANTSOA N, FARZANEH M, CHISHOLM W A. Insulator pollution process under winter conditions[C]//Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena(CEIDP). [S.l.]: IEEE, 2005: 321-324.
- [20] 江云志, 何 钢, 张林元. 复合绝缘子表面湿润积污过程的数值模拟方法[J]. 华中电力, 2010(1): 14-18.
- JIANG Yunzhi, HE Gang, ZHANG Linyuan. Numerical simulation method on humid pollution process around composite insulators surface[J]. Central China Electric Power, 2010(1): 14-18.
- [21] 李 聪. 双伞 XWP2-160 型绝缘子积污特性模拟研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- LI Cong. Simulation study on the contamination accumulation characteristic of the XWP2-160 double umbrella insulators[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [22] 黄 华. 绝缘子自然横风无降水直流积污特性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2014.
- HUANG Hua. Contamination depositing characteristics of insulators under DC voltage natural crosswind without precipitation conditions[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.
- [23] 由长福, 祁海鹰, 徐旭常. 湍流对气固两相流动中颗粒受力的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002, 42(10): 1357-1360.
- YOU Changfu, QI Haiying, XU Xuchang. Effect of turbulence on the drag in a gas-particle two-phase flow [J]. Journal Tsinghua University (Sci. & Tech.), 2002: 42(10): 1357-1360.
- [24] DUWAIRI H M, DAMSEH R A. Effect of thermophoresis particle deposition on mixed convection from vertical surfaces embedded in saturated porous medium [J]. International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow, 2008, 18(2): 202-216.
- [25] WHITE H J. Industrial electrostatic precipitators[M]. Reading UK: Addison-Wesley, 1963.
- 吕玉坤(1964—), 男, 副教授, 主要从事绝缘子积污特性、节能技术以及大型回转机械经济运行方面的研究。
- 刘云鹏(1976—), 男, 博士(后), 教授, 从事特高压输电技术、电气设备在线检测和故障诊断等方面研究。

(上接第 92 页)

- 1205-1210.
- TIAN Jihuan, ZHOU Yuanxiang, GUO Shaowei, et al. Distributed parallel computation of the 3D electric field in the HVDC converter valve hall[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(5): 1205-1210.
- [18] 杜志叶, 阮江军, 詹 婷, 等. ± 660 kV 阀厅金具电场分布计算及优化研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2012.
- DU Zhiye, RUAN Jiangjun, ZHAN Ting, et al. Research on the calculation and optimization of the surface electric field of electric power fittings in ± 660 kV valve hall[D]. Wuhan: Wuhan University, 2012.
- [19] 韩少卫. 高压直流输电线路电晕起始电压及起始场强研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2008.
- HAN Shaowei. The study of corona inception voltage and inception electric field of HVDC transmission lines[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2008.
- [20] 刘泽洪, 丁永福, 王祖力, 等. 特高压阀厅金具表面电场计算及起晕校核[J]. 中国电力, 2014, 47(10): 19-23.
- LIU Zehong, DING Yongfu, WANG Zuli, et al. Calculation of the surface electric field and checking of the corona onset field intensity on the fittings inside UHVDC valve hall[J]. Electric Power, 2014, 47(10): 19-23.
- 常林晶(1979—), 男, 工程师, 从事高压电器方向的研究。