

高浓度工业粉尘环境下宁夏地区线路瓷绝缘子积污模拟仿真

郝金鹏¹, 柳 莹², 伍 弘¹, 刘世涛¹, 相中华¹, 杨国华²

(1. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 宁夏 银川 750011;

2. 宁夏大学 电子与电气工程学院, 宁夏 银川 750021)

摘要:针对目前宁夏部分地区工业粉尘污染污秽浓度偏高的特点,考虑宁夏电网绝缘子表面不均匀粗糙度的实际情况,基于能量守恒原理得到高污秽覆盖下绝缘子表面污秽颗粒沉积模型,采用COMSOL仿真软件搭建多物理场耦合绝缘子自然积污仿真模型;以宁夏吴忠某工业园区附近110 kV交流输电线路瓷绝缘子为研究对象,模拟研究风速、粒径、污秽成分及电压类型对绝缘子表面自然积污特性的耦合影响。结果表明:交流场中污秽粘附率沿伞裙呈不规则“M”型分布且二氧化硅粘附率最高;在直流场中污秽粘附率沿伞裙呈“U”型分布且氧化铁粘附率最高;与均匀粗糙表面绝缘子积污仿真模型相比,本文所提模型可有效提高模拟结果的准确性,更真实地反映出高污秽工业粉尘环境下绝缘子串各伞裙的积污分布情况。

关键词:交流线路;瓷绝缘子;自然积污;等值盐灰密;工业粉尘

中图分类号:TM216 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.07.013

Simulation of contamination deposition on porcelain insulators of transmission lines in Ningxia under high concentration industrial dust environment

HAO Jinpeng¹, LIU Xuan², WU Hong¹, LIU Shitao¹, XIANG Zhonghua¹, YANG Guohua²

(1. Power Research Institute of State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750011, China;

2. School of Electronic and Electrical Engineering, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: In view of the high concentration of industrial dust pollution in some areas of Ningxia at present, considering the actual situation of uneven roughness of insulator surface in Ningxia power grid, the pollution particle deposition model of insulator surface under high pollution coverage was obtained based on the principle of energy conservation. The multiple physical field coupling insulator natural pollution simulation model was built by using COMSOL simulation software. Taking porcelain insulators of 110 kV AC transmission line near an industrial park in Wuzhong, Ningxia as the research object, the coupling effects of wind speed, particle size, pollution composition, and voltage type on the natural contamination characteristics of insulator surface were simulated. The results show that the pollution adhesion rate in the AC field shows irregular "M" shape along the shed, and the adhesion rate of silica is the highest. In the DC field, the pollution adhesion rate shows "U" shape along the shed, and the adhesion rate of iron oxide is the highest. Compared with the simulation model of insulator contamination on uniform rough surface, the model proposed in this paper can effectively improve the accuracy of simulation results and better reflect the contamination distribution of each shed of insulator string in the high-pollution industrial dust environment.

Key words: AC line; porcelain insulator; natural pollution; equivalent salt and ash density; industrial dust

0 引言

输电线路绝缘子污闪防治一直是人们重点关

注的问题^[1],研究表明,污秽浓度与积污速率呈正相关^[2],途经高污秽地区的输电线路绝缘子表面污秽累积率更快,污闪事故发生率更高^[3]。近年来,随着园区规模的不断扩大与重度污染天气的频繁发生,宁夏吴忠某工业园周边地区所在污区等级进一步扩大,由于高浓度工业粉尘污染源的特殊性^[4],部分

基金项目:宁夏回族自治区重点研发计划重点项目(2021BD E931026);国网宁夏电力有限公司科技项目(5229DK200 04M)

地区局部污闪事故时有发生,严重威胁宁夏电网的稳定运行。因此研究高浓度工业粉尘环境下绝缘子的积污特性对宁夏电网外绝缘防污与配置具有重要意义。

绝缘子积污特性研究方法主要包括自然积污研究^[5-9]与模拟仿真研究^[10-14]。文献[5]详细分析了在不同气候环境下特高压换流站支柱绝缘子表面的自然积污规律;文献[6-7]通过分析自然污秽成分发现在宁夏工业环境中主要污秽成分为二氧化硅、硫酸钙、铁粉与铝粉等化合物;文献[8-9]指出当污秽成分相同时,粒径成为影响复合绝缘子表面积污的主要因素;文献[10-11]分别从污秽分布与颗粒荷电量的角度模拟研究了接触网腕臂绝缘子与瓷三伞绝缘子的积污特性;文献[12]通过建立电场与流场相耦合的仿真模型,研究了特高压复合绝缘子表面积污特性,但该模型忽略了污秽颗粒与绝缘子表面碰撞后的反弹现象;文献[13-14]从污秽颗粒与绝缘子壁面碰撞粘附机理出发,基于污秽颗粒沉积模型分别模拟研究了瓷绝缘子与接触网绝缘子的积污特性,但上述模型忽略了线路绝缘子表面粗糙不平这一实际情况;文献[15]建立了直流线路粗糙绝缘子表面颗粒物积聚模型,但该模型是在绝缘子表面覆盖一层等径球状颗粒以模拟粗糙表面,由于高污秽工业粉尘环境下的绝缘子表面更易附着粉尘污秽或被污液腐蚀,导致实际线路中绝缘子表面粗糙度不再均匀。

针对目前宁夏电网部分地区运行环境产生的污秽浓度集中偏高且以工业粉尘污染为主的这一变化,本文首先在考虑绝缘子表面粗糙度不均匀的实际情况下,研究得到高污秽地区绝缘子表面颗粒碰撞沉积判据;然后基于此判据构建宁夏高污秽地区多物理场绝缘子自然积污仿真模型,通过实采宁夏吴忠某工业园区附近 110 kV 交流输电线路带电运行瓷绝缘子表面污秽数据对比验证模拟结果;最后模拟研究风速、粒径、污秽种类与电压类型间的耦合作用对绝缘子积污的影响,研究结果可为高污秽工业粉尘环境下输电线路外绝缘防污与配置提供参考。

1 多物理场数学模型及颗粒沉积模型

1.1 流场数学模型

绝缘子表面空气运动状态为稳定不可压缩流动,选用流体流动单相湍流模块中 RANS $k-\varepsilon$ 模型描述空气流场的运动状态。模型方程如式(1)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} \rho(\mathbf{U} \cdot \nabla) \mathbf{U} &= \nabla \cdot [-p\mathbf{I} + (\mu + \mu_T)(\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T)] + \mathbf{F} \nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \\ \rho(\mathbf{U} \cdot \nabla) k &= \nabla \cdot [(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k}) \nabla k] + P_k - \rho \varepsilon \\ \rho(\mathbf{U} \cdot \nabla) \varepsilon &= \nabla \cdot [(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon}) \nabla \varepsilon] \\ &+ C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \\ \varepsilon &= \varepsilon p, \mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \\ P_k &= \mu_T [\nabla \mathbf{U} : (\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T)] \end{aligned} \right. \quad (1)$$

式(1)中: \mathbf{U} 为流场速度; ρ 为空气密度; \mathbf{I} 为主应力张量; p 为压力; μ 为空气动力黏度; μ_T 为湍流动力黏度; ε 为湍动能耗散率; P_k 为湍动能源; \mathbf{F} 为体积力; C_μ 为黏度系数; k 、 σ_k 、 σ_ε 、 $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 为湍流模型参数。

1.2 电场数学模型

110 kV 输电线路存在交、直流两种电压类型,分别采用 AC/DC 模块进行电场模拟,其对应数学模型分别如式(2)、式(3)所示,式(2)为交流电场控制方程,式(3)为直流电场控制方程。

$$\left\{ \begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{J} &= \mathbf{Q}_j \\ \mathbf{J} &= \sigma \mathbf{E} + \mathbf{J}_e \\ \mathbf{E} &= -\nabla \cdot V \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式(2)中: \mathbf{J} 为总电流密度; \mathbf{J}_e 为外部电流密度; \mathbf{Q}_j 为电荷量; σ 为电导率。

$$\left\{ \begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho_v \\ \mathbf{E} &= -\nabla \cdot V \\ \mathbf{D} &= \varepsilon_0 \varepsilon_1 \mathbf{E} \end{aligned} \right. \quad (3)$$

式(3)中: \mathbf{E} 为电场强度; \mathbf{D} 为电位移强度; V 为电势; ρ_v 为体电荷密度; ε_0 为真空相对介电常数,其值为 8.854×10^{-12} F/m; ε_1 为材料相对介电常数。

1.3 流体流动粒子追踪数学模型

为模拟污秽颗粒在空气流场中的运动轨迹,采用流体流动颗粒追踪模块进行污秽颗粒的状态设置,其控制方程如式(4)所示。

$$\left\{ \begin{aligned} m_p \frac{dV}{dt} &= \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_d \\ \mathbf{F}_g &= m_p g \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} \\ \mathbf{F}_e &= q \mathbf{Z} \mathbf{E} \\ \mathbf{F}_d &= \frac{18\mu}{\rho_p d_p^2} m_p (\mathbf{U} - V) \end{aligned} \right. \quad (4)$$

式(4)中: \mathbf{F}_g 为重力; \mathbf{F}_e 为电场力; \mathbf{F}_d 为气流曳力; \mathbf{Z} 为电荷数; m_p 为颗粒质量; ρ_p 为颗粒密度; q 为元电

荷; d_p 为颗粒直径; V 为颗粒运动速度。

1.4 污秽颗粒沉积模型

高污秽地区绝缘子表面常年被颗粒物碰撞侵蚀,表面变得粗糙不平,大气浮尘在湿润气候影响下更易粘附于绝缘子表面,该气候导致绝缘子壁面形成一层阻尼水膜(流体挤压膜),图1为污秽颗粒与粗糙壁面碰撞过程示意图,其中 v_1 为初始入射速度, v_2 为脱离壁面速度。当颗粒接近壁面时,阻尼水膜将入射速度 v_1 降低为 v_i ,它们之间的关系^[16]如式(5)所示。

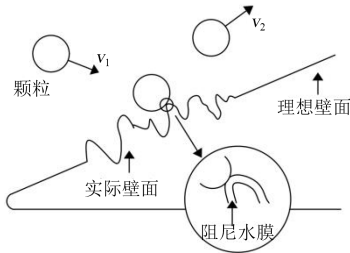


图1 颗粒与污层表面碰撞示意图

Fig.1 Schematic diagram of particles colliding with the surface of pollution layer

$$\frac{v_i}{v_1} = 1 + \frac{9\mu_f}{\rho_p v_1 d_p} \ln\left(\frac{\delta_{\text{gap}}}{x_0}\right) \quad (5)$$

式(5)中: ρ_p 是颗粒密度; d_p 是颗粒直径; μ_f 是流体黏度; x_0 是流体挤压膜厚度; δ_{gap} 是颗粒与壁面之间的最小接触间距。

如果颗粒逃脱后又反弹回来,则反弹速度 v_r 将通过流体挤压阻尼水膜再次降低到脱离速度 v_2 ,反弹速度 v_r 的计算公式如式(6)所示^[17]。

$$\frac{v_2 - v_r}{v_1} = \frac{9\mu_f}{\rho_p v_1 d_p} \ln\left(\frac{\delta_{\text{gap}}}{x_0}\right) \quad (6)$$

在不考虑污秽颗粒的破损情况下,认为污秽碰撞壁面存在粘附团聚与反弹脱离两种结果,期间颗粒运动速度将经历两次损耗,第1次为绝缘子表面阻尼水膜带来的首次接触损失,第2次为克服阻尼水膜做功导致的黏性损耗。

经过首次接触损失后,颗粒临界粘附速度^[18]如式(7)~(8)所示。

$$\frac{1}{m^*} = \frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \quad (7)$$

$$v_{h_1} = \left(\frac{14.18}{m^*}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{32\gamma^5 r_1^4}{E^2}\right)^{\frac{1}{6}} \quad (8)$$

式(7)~(8)中: m_1 为碰撞颗粒1的质量; m_2 为碰撞颗粒2的质量; m^* 为两碰撞颗粒的约化质量; r_1 为颗粒1的半径; γ 为表面能; E 为颗粒初始动能。

当克服黏性损耗后,颗粒临界粘附速度^[19]如式

(9)~(11)所示。

$$a = (4\pi\gamma r_1^2)^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

$$v_{h_2} = \sqrt{\alpha \left(\frac{4aE}{3m^*}\right)^{\frac{1}{2}} v_{h_1} \delta_{\text{gap}} + v_{h_1}^2} \quad (10)$$

$$\alpha = 1.2728 - 4.2783e + 11.087e^2 \quad (11)$$

式(9)~(11)中: a 为接触面半径; α 为耗散系数; e 为恢复系数。

基于能量守恒原理,颗粒临界粘附速度 v' 满足式(12)。

$$\frac{1}{2} m^* v'^2 = \Delta E_{h_1} + \Delta E_{h_2} \quad (12)$$

式(12)中: ΔE_{h_1} 为首次接触能量损失; ΔE_{h_2} 为黏性耗散能量损失。则临界粘附速度如式(13)所示。

$$v' = v_{h_2} + (3.43\alpha m^*{}^{-0.1} r_1^{2/15} E^{-1/15} \gamma^{1/6}) v'^{0.8} \quad (13)$$

若入射速度小于临界粘附速度,则颗粒满足粘附沉积条件。

2 绝缘子自然积污仿真模型

2.1 模型建立与网格划分

以8片XP-70型瓷绝缘子串为研究对象,示意图如图2所示。利用AutoCAD软件构建其三维模型,绝缘子金具与伞裙之间通过水泥粘连,为平衡仿真精度与求解效率,对绝缘子金具及连接部分进行简化处理。将绝缘子三维模型导入COMSOL仿真软件,电场域与流场域采用同一场域,其宽度、深度、高度分别为2 500、2 500、4 000 mm,绝缘子积污仿真模型如图3所示。流场域与电场域材料均为空气,绝缘子各结构对应材料属性见图2,其中绝缘金具材料属性为Iron。湍流模块中气体沿流场域 x 轴方向从左向右运动,左侧为气流入口,右侧为气流出口。交流模块中绝缘子串上端接地,下端接电压。粒子追踪场中选择颗粒沿面释放,其粒子释放出、入口与流场域设置相同,同时在该模块添加颗粒所受曳力、重力及电场力。

网格剖分影响计算精度,对绝缘子表面采用细化网格剖分,其中控制最小网格单元大小为20 mm,

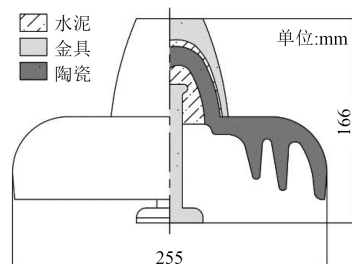


图2 XP-70型绝缘子结构示意图

Fig.2 XP-70 insulator structure diagram

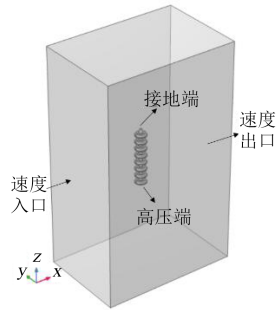


图3 绝缘子仿真模型

Fig.3 Insulator simulation model

保证绝缘子下表面凹槽部分不生成低质量网格,电、流场域采用较细化网格剖分,最终得到240 119个完整网格。图4为网格剖分结果。

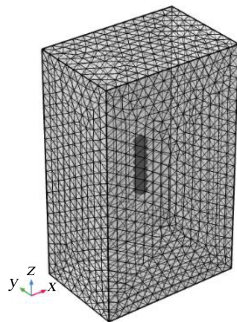


图4 网格剖分结果

Fig.4 The result of grid generation

2.2 边界条件设置

湍流场中气流随流场域左侧进入,右侧流出,通过壁面方程求解出其余面的压力和速度,绝缘子壁面粗糙度参数为0.26,粗糙高度为3.2 μm。

交流电场中绝缘子串上端口接地,下端口接电压,其中空气、金具、水泥及陶瓷的相对介电常数分别为1、1×10⁷、6、9。

粒子追踪场中颗粒由速度入口处进入,速度出口处壁面条件为消失,沿流场入口采用均匀沿面发射,为模拟工业粉尘高污染状态,颗粒初始位置基于网格释放且细化因子为3,每次密集释放正、负、不带电3种电荷各30 000个,颗粒荷电量参照文献[14]。同时将污秽颗粒沉积判据通过壁面条件输入,满足条件则粘附在绝缘子表面,若不满足条件则漫散射至流场中随流场运动,再次接触壁面则进行二次判断。

3 仿真结果与讨论

以110 kV交流线路XP-70绝缘子为研究对象,风速分别取2、4、6、8 m/s,粒径变化区间为1~30 μm,污秽成分取硫酸钙、二氧化硅、氧化铁及氧化

铝,其对应参数设置见表1^[20]。

表1 污秽成分参数设置

Tab.1 Parameter settings of pollution components

污秽成分	密度/(kg/m ³)
CaSO ₄	2 960
SiO ₂	2 320
Al ₂ O ₃	3 500
Fe ₂ O ₃	5 240

对上述不同工况模拟研究得到不同情况下绝缘子表面的粘附颗粒数*N*,则绝缘子表面等效积污量(ρ_m)计算如式(14)所示,污秽颗粒黏附率为绝缘子表面粘附颗粒数与污秽颗粒释放总数之比。

$$\rho_m = \frac{\pi n d_p^3 \rho_p N}{6s} \quad (14)$$

式(14)中:*s*为绝缘子伞裙表面积;*t*为等效时间系数。

3.1 仿真结果验证

选取二氧化硅颗粒为污秽颗粒,粒径为15 μm,模拟风速为4 m/s时交流场中绝缘子串各伞裙积污分布。图5~图6分别为绝缘子附近流场云图与矢量图。

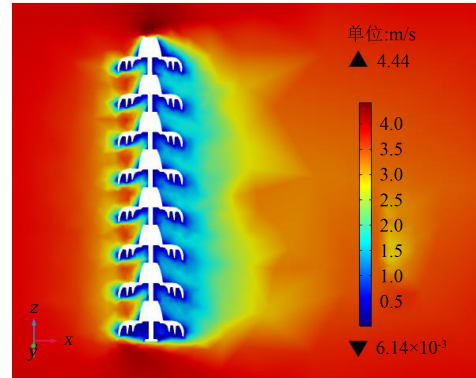


图5 绝缘子附近流场云图

Fig.5 Cloud map of flow field velocity around insulator

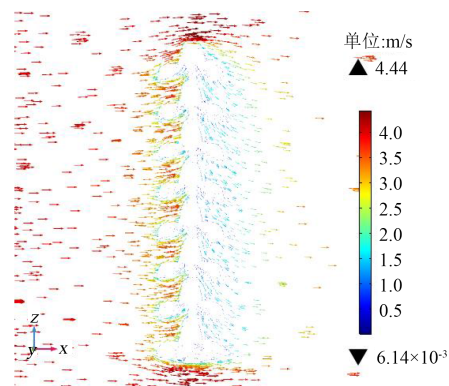


图6 绝缘子附近流场矢量图

Fig.6 Vector diagram of flow field velocity around insulator

由图5可知,当风速为4 m/s的气流在经过绝缘子串时,由于固体物的阻挡在绝缘子串顶部与底部的运动速度出现小幅提升,使其运动速度超过初始速度,最大风速可达到4.44 m/s,但在绝缘子下表面以及背风面附近,气流运动速度整体降低。由图6可知,气流在经过绝缘子时在其下表面及背风面分别发生“绕流”与“回流”现象,此时气流运动速度接近于0。因此绝缘子下表面及背风面位置处污秽颗粒均易于沉积与粘附,但底部绝缘子下端由于没有其他固体物的遮挡,因此“回流”现象不明显,污秽将随气流运动飘走不易粘附,这一运动机理与模拟中绝缘子串底端绝缘子下表面积污量明显偏低这一结果相印证,验证了所提模型的正确性。

采集宁夏吴忠某工业园区附近110 kV交流带电运行瓷绝缘子表面污秽,测量各伞裙表面污秽值,沿绝缘子串接地端向高压端依次从1到8编号。得到实采测量值与本模型仿真值、均匀粗糙度绝缘子积污模型仿真值对比结果见图7。

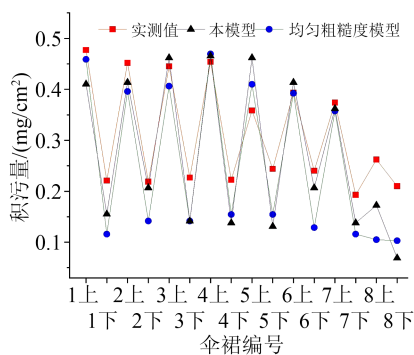


图7 绝缘子伞裙积污模拟结果对比

Fig.7 Comparison of simulation results of insulator contamination

由图7可知,相比均匀粗糙度绝缘子积污仿真模型,本文所提模型能够更好地反映绝缘子串伞裙的实际积污分布情况。由实测值可知,1~6号绝缘子表面积污量接近且高于7、8号绝缘子表面积污量,5号绝缘子上表面积污量明显偏低,可能是采样过程中操作不当造成样本缺损导致。由均匀粗糙度表面绝缘子积污模型仿真结果可知,该模型所得绝缘子串中第8号绝缘子上、下表面积污规律与实测值存在较大差距,该模型仿真值与实测值误差为18%。而本文所提模型在绝缘子串中第8号绝缘子上、下表面积污分布规律与实测分布规律一致,且该模型仿真值与实测值误差为13%,表明其在提高仿真准确性的同时更能真实地反映高污秽地区绝缘子串各伞裙的积污分布规律。

3.2 风速和粒径对积污的影响

图8为在交流场中不同粒径绝缘子表面污秽颗粒粘附率随风速变化的规律。由图8可知,不同粒径绝缘子污秽粘附率随风速变化规律有所不同。当粒径小于10 μm、风速为2~8 m/s时,随着风速的增大,绝缘子表面污秽粘附率先增大后减小,当粒径大于10 μm时颗粒粘附率与风速呈正相关。

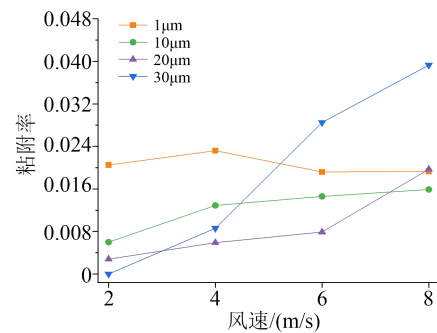


图8 不同粒径绝缘子表面污秽粘附率与风速的关系

Fig.8 The relationship between the surface pollution adhesion rate of insulators with different particle sizes and wind speed

颗粒随风运动至绝缘子表面的过程中,曳力、重力及电场力起主要作用,交流电场对污秽颗粒施加的作用力随电流极性的变化大都互相抵消,因此交流场中主要考虑重力与曳力对颗粒产生的影响。颗粒粒径越小,则重力场对其施加的作用力也越小,此时颗粒主要受流体曳力影响。当风速处于2~4 m/s时,漂浮在空气中的细小颗粒极易随气流运动降落至绝缘子表面;当风速处于4~6 m/s时,这些细小颗粒也容易被气流卷走,因此粒径为1 μm的颗粒在绝缘子表面的粘附率随风速先增大后减小;随着粒径的增大,重力场对颗粒施加的作用力随之增强,此时重力在颗粒运动粘附过程中起主导作用,粒径越大的颗粒越容易降落沉积在绝缘子表面,仿真结果也体现了这一点,当粒径大于10 μm时,颗粒粒径越大,绝缘子表面积污增率随风速变化越明显。但绝缘子表面污秽粒径检测结果显示90%的颗粒粒径小于15 μm^[6],这是因为实际线路中绝缘子位于距地10多米处的高空,当粒径大于15 μm时地面颗粒难以随气流运动至绝缘子附近。

3.3 粒径和污秽成分对积污的影响

$D_n=x$ 用来表示所测颗粒中百分之 n 的颗粒粒径小于 x ,该指标可反映粒径集中分布情况。通过自然积污采集测量发现 D_{90} 污秽颗粒粒径为15 μm左右,同时绝缘子表面污秽不溶物与微溶物较多^[6],因此选取粒径分别为10、15、20 μm,研究交流场中二

氧化硅、硫酸钙、氧化铝及氧化铁工业粉尘颗粒在绝缘子表面积污情况,所得结果如图9所示。

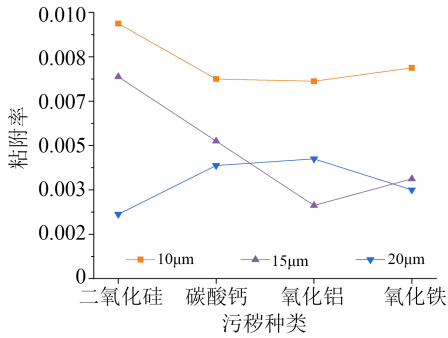


图9 不同粒径的绝缘子表面污秽粘附率与污秽种类的关系

Fig.9 The relationship between surface pollution adhesion rate and pollution type of insulators with different particle sizes

由图9可知,不同粒径颗粒在绝缘子表面的粘附率随污秽种类的变化规律也不相同。当粒径分别为10 µm与20 µm时,绝缘子表面污秽粘附率随污秽种类变化规律虽然相反,但除二氧化硅颗粒外其余3种污秽在绝缘子表面粘附率变化不大;当颗粒粒径为10~15 µm时,二氧化硅颗粒在绝缘子表面粘附率最高,硫酸钙颗粒粘附率次之,表明上述两种污秽颗粒更易粘附至绝缘子表面。

3.4 电压类型和污秽成分对绝缘子伞裙积污的影响

设定颗粒粒径为15 µm,风速为4 m/s,研究不同污秽成分下,交、直流电压对绝缘子串伞裙污秽粘附率的影响,分别结果如图10和图11所示。

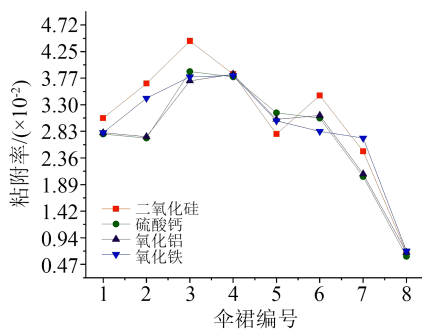


图10 交流电压下不同污秽成分绝缘子伞裙粘附率分布
Fig.10 Adhesion rate distribution of insulator skirt under AC voltage with different pollution components

由图10~11可知,不同电压类型作用下污秽颗粒沿绝缘子串表面分布规律也不同。交流电压作用下污秽颗粒沿绝缘子串伞裙粘附率呈不规则“M”型分布,而直流电压作用下污秽颗粒沿绝缘子串伞裙粘附率则呈“U”型分布。由于电场极性的规律性变化,交流场中污秽颗粒所受电场力互相抵消,因

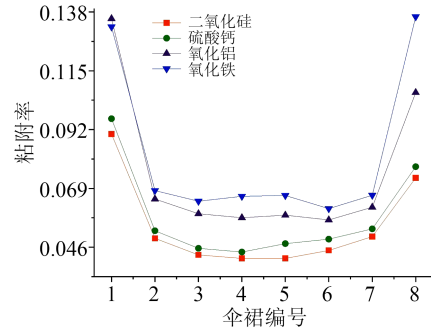


图11 直流电压下不同污秽成分绝缘子伞裙粘附率分布
Fig.11 Adhesion rate distribution of insulator skirt under DC voltage with different pollution components

此在交流场中不同污秽成分在绝缘子表面的粘附率大小无明显差别,但二氧化硅颗粒积污率最高,表明在交流场中,该成分污秽更易粘附至绝缘子表面,该结果与3.3节所得结果相同。然而在直流场中,氧化铝与氧化铁颗粒的粘附率明显高于二氧化硅与硫酸钙颗粒积污量,固体颗粒密度越高,直流场中粘附率沿绝缘子伞裙呈“U”型分布越明显,同时在直流电场作用下,绝缘子表面污秽粘附率是交流电场作用下的2.9倍。

4 结论

(1)与均匀粗糙表面绝缘子积污模型相比,本文所提模型可有效提高模拟结果的准确性,能更好地反映出高污秽工业粉尘环境下绝缘子串各伞裙的积污分布情况。均匀粗糙表面绝缘子积污仿真值与实测值误差为18%,其仿真结果显示绝缘子串中第8号绝缘子上、下表面积污分布情况相同,此规律与实际测量结果并不相符。而基于本文所提模型得到的绝缘子串各伞裙积污分布规律与实际情况相一致,并且模拟值与实测值误差为13%。

(2)粒径为10~20 µm的颗粒更易粘附至绝缘子表面,该粒径范围氧化铝与氧化铁颗粒的粘附率整体低于硫酸钙与二氧化硅的粘附率,表明在交流场中硫酸钙与二氧化硅颗粒更易粘附至绝缘子表面。

(3)在交流场中,污秽颗粒沿绝缘子串伞裙粘附率呈不规则“M”型分布且二氧化硅颗粒更易黏附至绝缘子表面;在直流电压作用下,污秽颗粒沿绝缘子串伞裙粘附率则呈“U”型分布且氧化铁与氧化铝颗粒积污率更高。直流电压下绝缘子表面污秽粘附率是交流电压的2.9倍。因此,在外绝缘防污与配置工作中,应结合周边环境的污染物粒径范围与污秽成分制定防污举措,提高运维效率。

参考文献:

- [1] 徐森,仵超,李少华,等. 雾霾期间绝缘子的积污特性研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(7):2142-2150.
- [2] 张睿哲,周恺,叶宽,等. 北京地区外绝缘表面雾霾积污特征及其影响研究[J]. 电力系统及其自动化学报,2021,209(6):1-6.
- [3] 宋玮,贾男,杨升杰,等. 雾霾天气下动车组车顶绝缘子积污特性研究[J]. 电瓷避雷器,2018,61(2):186-190.
- [4] 李明哲,邵仕超,吴笑寒,等. 特殊工业粉尘地区复合绝缘子腐蚀失效过程研究[J]. 电力工程技术,2021,40(2):141-146.
- [5] 田亮,刘岩,陕华平,等. 不同环境条件下特高压换流站用绝缘子积污特性研究[J]. 绝缘材料,2021,54(4):36-40.
- [6] 郭飞,刘世涛,李秀广,等. 宁夏典型环境绝缘子污秽成分分析[J]. 绝缘材料,2017,50(4):61-66.
- [7] 刘世涛,李秀广,李焕友,等. 高污秽度环境中绝缘子积污特性研究[J]. 绝缘材料,2019,52(1):63-67.
- [8] 邵仕超,毕晓甜,李明哲,等. 特殊工业粉尘地区复合绝缘子自然积污特性研究[J]. 电力工程技术,2021,195(1):138-141,154.
- [9] 张东东,刘欣,杨成顺,等. 典型粉尘污染源下绝缘子积污粒径特征及其影响研究[J]. 绝缘材料,2022,55(1):95-100.
- [10] 张友鹏,张鼎昌,董海燕,等. 污秽颗粒在腕臂绝缘子表面分布规律仿真分析[J]. 铁道科学与工程学报,2020,17(4):1015-1024.
- [11] 吕玉坤,王晶,张雪梅,等. 颗粒荷电对XSP-160型瓷三伞绝缘子积污特性影响数值模拟[J]. 电瓷避雷器,2021(5):197-204.
- [12] 毕晓甜,高嵩,郭嵘,等. 流场与电场耦合作用下特高压复合绝缘子串的积污特性研究[J]. 绝缘材料,2019,52(7):86-91.
- [13] 姜昀芑,李黎,卢明,等. 瓷绝缘子表面粘附颗粒的粒径分布特性及其影响因素研究[J]. 电工技术学报,2019,34(3):611-619.
- [14] 王国志,陈情. 电气化铁路接触网绝缘子积污特性模拟仿真[J]. 电瓷避雷器,2020(6):228-234,240.
- [15] 张东东,张志劲,蒋兴良,等. 基于碰撞动力学的绝缘子粗糙表面污秽颗粒积聚模型及验证[J]. 电工技术学报,2018,33(16):3389-3896.
- [16] KLEINHANS U, WIELAND C, FRANDBSEN F J, et al. Ash formation and deposition in coal and biomass fired combustion systems: Progress and challenges in the field of ash particle sticking and rebound behavior[J]. Progress in Energy and Combustion Science,2018,68:165-168.
- [17] ZHU F, ZHANG Y Y, WU X X, et al. New explicit correlations for the critical sticking velocity and restitution coefficient of small adhesive particles: A finite element study and validation [J]. Journal of Aerosol Science,2022,160:105918.
- [18] THORNTON C, NING Z M. A theoretical model for the stick/bounce behaviour of adhesive, elasticplastic spheres[J]. Powder Technology,1998,99(2):154-162.
- [19] CHEN S, LI S Q, YANG M M. Sticking/rebound criterion for collision of small adhesive particle: Effect of impact parameter and particle size[J]. Powder Technology,2015,274:431-440.
- [20] 刘云鹏,黄志成,耿江海,等. 颗粒与绝缘子碰撞黏附问题的模型选择[J]. 高电压技术,2022,48(3):809-819.

收稿日期:2022-07-11 修回日期:2022-09-12

作者简介:郝金鹏(1985-),男(汉族),黑龙江尚志人,高级工程师,主要从事高电压绝缘技术,输电线路六防技术的研究;通信作者:柳莹(1996-),女(汉族),宁夏固原人,硕士生,主要从事高电压与绝缘技术的研究。