

DOI: 10.13382/j.jemi.B2306695

绝缘子不均匀积污成因及其对交流闪络特性的影响*

赵云鹏¹ 胡玉耀¹ 蒋兴良² 刘辉³ 沈浩³

(1. 山东理工大学山东省智能电网及装备工程实验室 淄博 255000; 2. 重庆大学雪峰山能源装备安全国家野外科学观测研究站 重庆 400044; 3. 国网山东省电力公司电力科学研究院 济南 250003)

摘要:在单一风向的作用下,线路运行绝缘子会呈现背风侧污秽积聚较多的现象,降低其绝缘性能。通过建立三维电场-流场耦合模型,仿真模拟污秽颗粒运动过程,揭示了绝缘子背风侧回流和涡流是造成污秽积聚的主要原因。采用人工涂污法模拟绝缘子表面迎/背风侧不均匀积污,并开展交流闪络试验,研究平均盐密(SDD)、迎风侧与背风侧盐密比(J)和背风侧面积占比(R)对平均闪络电压(U_f)的影响。结果表明, U_f 随 SDD 的增大而降低,随 J 和 R 的增大而升高,且 J 在 SDD 较低和 R 较小时对 U_f 影响更大, R 在 SDD 较低和 J 较小时对 U_f 影响更大。通过观测绝缘子闪络过程发现,均匀染污时放电电弧随机发展,而在不均匀染污时电弧总出现在背风侧,且升压过程中泄漏电流幅值较大。

关键词:绝缘子;平均盐密;不均匀污秽;闪络电压;泄漏电流

中图分类号: TM852

文献标识码: A

国家标准学科分类代码: 470.4037

Causes of uneven pollution accumulation on the insulator and its influence on AC flashover characteristics

Zhao Yunpeng¹ Hu Yuyao¹ Jiang Xingliang² Liu Hui³ Shen Hao³

(1. Shandong Provincial Smart Grid and Equipment Engineering Laboratory, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China; 2. Xuefeng Mountain Energy Equipment Safety National Observation and Research Station, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, China)

Abstract: Under the action of a single wind direction, more contamination accumulates on the leeward side of the insulator in service, which reduces its insulation performance. The movement of charged pollution particle was simulated by establishing a three-dimensional coupling model, revealing that the backflow and eddy flow on the leeward side of the insulator are the main reasons for pollution accretion. The manual coating method was used to simulate non-uniform pollution on the windward/leeward side, and AC flashover tests were conducted to investigate the effects of average salt density (SDD), salt density ratio (J) between the windward and leeward sides, and leeward area ratio (R) on the average flashover voltage (U_f). The results show that U_f decreases with the increase of SDD , and increases with increasing J and R . Moreover, J has a stronger impact on U_f under the small values of SDD and R . While R imposes a greater effect on U_f when SDD and J are low. By observing the flashover process of polluted insulator, it was found that the arc develops randomly when uniformly polluted, while the arc always propagates along the leeward side under non-uniform pollution, and the amplitude of the leakage current is larger during the voltage increment.

Keywords: insulators; average salt density; non-uniform pollution; flashover voltage; leakage current

0 引言

绝缘子是电力系统使用量最大的电力设备之一,在

线路中起电气绝缘与机械支撑的作用。长期运行的绝缘子表面易积污形成污层,在雾、毛毛雨等湿度较大的天气条件下,污层湿润,导致电导率上升,可能引发放电甚至闪络事故^[1-3]。绝缘子污闪通常为跨区域、大范围的事

故,易造成电网大面积瘫痪。2016年5月乌鲁木齐铁路局因沙尘天气引发的污闪跳闸事故共计10次,影响了多辆火车的正常运行^[4]。巴基斯坦卡西姆电站自2017年11月1日~2019年3月12日,频繁发生污闪故障共计101次,导致16次全厂失电,造成巨大经济损失^[5]。

国内外对绝缘子的污闪机理进行了系统的研究。文献[6-8]检测了大气中的污秽颗粒尺寸及荷电情况,发现其粒径主要集中在10~50 μm,且74%的污秽颗粒带电;大气中的污秽颗粒主要在重力和气流曳力的作用下运动,荷电颗粒运动还会受到电场力的影响。文献[9-12]对均匀染污的绝缘子开展了闪络试验,研究表明污秽成分会影响闪络电压,且随着不溶物粒径的增大,闪络电压升高,并提出了绝缘子的50%操作冲击污闪电压与等值附盐密度之间满足负幂函数关系。

目前对绝缘子积污的研究一般认为绝缘子表面污秽是均匀分布的,然而在单一风向的作用下,绝缘子表面迎风侧积污明显少于背风侧^[13]。陈然通过流体力学仿真与风洞积污试验研究了车顶绝缘子的积污特性,结果表明车顶绝缘子背风侧积污量明显大于迎风侧^[14]。文献[15]对扇形不均匀积污的支柱绝缘子进行了直流闪络试验,结果表明支柱绝缘子直流闪络电压随污秽不均匀度的增大而降低,随背风侧占比的增大而升高。目前对这种污秽不均匀分布现象的成因及其对绝缘子交流污闪特性的影响研究尚存在不足。

本文以XWP₂-160绝缘子为研究对象,基于流体力学和场致荷电理论,建立了电场-流场耦合模型,仿真分析了单一风向作用下交流电场中污秽颗粒的受力情况和运动过程,得到了电场及流场对污秽沉积的影响,揭示了绝缘子表面迎/背风侧不均匀积污的成因。通过采用人工涂污的方法模拟绝缘子表面不同积污程度和污秽不均匀分布情况,并开展交流闪络试验,研究了污秽分布特性对绝缘子闪络特性的影响,以期为污区输电线路外绝缘设计提供参考。

1 单一风向下绝缘子表面污秽沉积

某些地区的线路绝缘子长期受单一风向的影响,呈现明显的迎/背风侧不均匀积污现象^[16]。现场观测到的绝缘子自然积污情况如图1所示。

为揭示迎/背风侧污秽积聚不均匀现象的成因,本文以XWP₂-160绝缘子为研究对象,对单一风向作用下的绝缘子表面污秽颗粒积聚过程进行仿真分析,试品结构及参数如图2所示。

1.1 大气中颗粒初始运动状态

SiO₂是绝缘子表面不溶污秽的主要成分^[17]。因此,

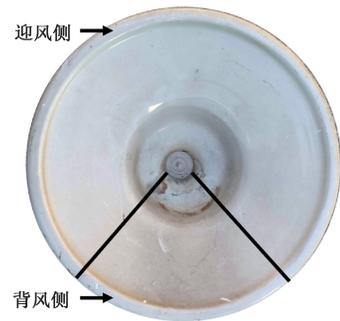


图1 自然积污绝缘子

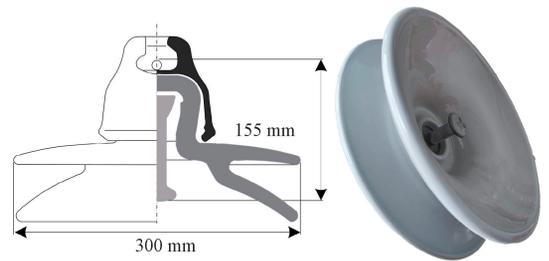


图2 XWP₂-160绝缘子配置和结构参数

Fig. 2 Configuration and structural parameters of XWP₂-160 insulator

本文污秽颗粒选择SiO₂颗粒。为方便分析,假设污秽颗粒为球形,随气流从远处向绝缘子运动。忽略颗粒之间的相互作用以及颗粒对气流的影响,此时颗粒主要受到重力和气流曳力的作用。

文献[18]给出了初始时刻颗粒水平和垂直方向上速度为0时,颗粒在水平和垂直方向上的运动方程:

$$\begin{cases} V_{px} = V_c \\ V_{py} = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \cdot g \end{cases} \quad (1)$$

式中: V_{px} 为颗粒水平速度; V_{py} 为颗粒垂直速度; V_c 为气流横向速度分量,即风速; ρ_p 为SiO₂颗粒密度; d_p 为颗粒直径; μ 为动力粘度; g 为重力加速度。

由式(1)可知,大气中污秽颗粒的水平方向速度等于风速,垂直方向速度为常量。

1.2 物理场控制方程

1) 电场控制方程

交流电场采用频域分析,其控制方程如下:

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{J} = Q_j \\ \mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + \mathbf{J}_e \\ \mathbf{E} = -\nabla V \end{cases} \quad (2)$$

式中: \mathbf{J} 为总电流密度; Q_j 为电荷量; σ 为电导率; \mathbf{E} 为电场强度; \mathbf{J}_e 为外部电流密度; V 为电势。

2) 流场控制方程

当污秽颗粒在绝缘子表面沉积时,需要考虑气流边界层的影响。风速在 1~10 m/s 时,可认为绝缘子表面切

向流场为湍流^[19]。湍流模型采用 RANS $k-\varepsilon$ 模型构建^[20]:

$$\begin{cases} \rho(\mathbf{v}_a \cdot \nabla) \mathbf{v}_a = \nabla \cdot [-\rho \mathbf{I} + (\mu + \mu_T) (\nabla \mathbf{v}_a + (\nabla \mathbf{v}_a)^T)] + \mathbf{F} \\ \rho \nabla \cdot \mathbf{v}_a = 0 \\ \rho(\mathbf{v}_a \cdot \nabla) k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \\ \rho(\mathbf{v}_a \cdot \nabla) \varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \\ \mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \\ P_k = \mu_T [\nabla \mathbf{v}_a : (\nabla \mathbf{v}_a + (\nabla \mathbf{v}_a)^T)] \end{cases} \quad (3)$$

式中: ε 为湍流耗散率; \mathbf{v}_a 为气流速度; \mathbf{I} 为主应力张量; μ_T 为由于湍流而额外产生的动力粘度; ρ 为流体密度; k 为湍流动能; \mathbf{F} 为体积力; σ_k 、 σ_ε 分别为 k 和 ε 的有效普朗特常数的倒数; $C_{\varepsilon 1}$ 、 $C_{\varepsilon 2}$ 为湍流模型参数; P_k 为湍流动能源项。

3) 颗粒场控制方程

自然情况下,带电运行绝缘子附近的污秽颗粒运动受重力、曳力和电场力的共同作用,其运动控制方程为:

$$m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_d + \mathbf{F}_g \quad (4)$$

式中: m 为污秽颗粒的质量; \mathbf{v} 为污秽颗粒的运动速度; \mathbf{F}_e 、 \mathbf{F}_d 、 \mathbf{F}_g 为污秽颗粒所受电场力、气流曳力和重力。

气流曳力 \mathbf{F}_d 为^[21]:

$$\begin{cases} \mathbf{F}_d = \frac{1}{\tau_p} m (\mathbf{v}_a - \mathbf{v}) \\ \tau_p = \frac{\rho_p d_p}{18\mu} \end{cases} \quad (5)$$

式中: τ_p 为弛豫时间。

受静电力影响,污秽颗粒运动轨迹发生偏转,相互碰撞作用导致粒子带电,上述过程被称为场致荷电。由于污秽颗粒从不带电到饱和荷电时间短,为简化模型,本文认为颗粒在靠近绝缘子直至被捕获的过程中,电荷量始终饱和。场致荷电饱和荷电量如下:

$$Q_{\max} = 3\pi \varepsilon_0 E_p d_p^2 \left(\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_r + 2} \right) \quad (6)$$

式中: Q_{\max} 为污秽颗粒饱和荷电量; ε_0 为真空介电常数; E_p 为污秽颗粒所在位置处的电场模; ε_r 为相对介电常数。

污秽颗粒受到的电场力 F_e 的大小为:

$$F_e = 3\pi \varepsilon_0 E_p^2 d_p^2 \left(\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_r + 2} \right) \quad (7)$$

1.3 绝缘子多物理耦合场的构建

1) 绝缘子模型及网格剖分

为研究污秽颗粒在绝缘子附近的运动过程,本文建立了电场-流场耦合模型,如图 3 所示。模型网格剖分如图 4 所示。

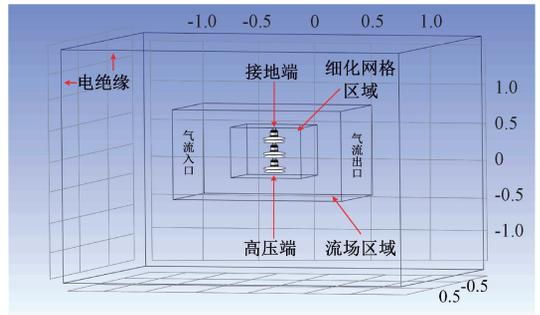


图 3 多物理场仿真模型

Fig. 3 Multi-physical field simulation model

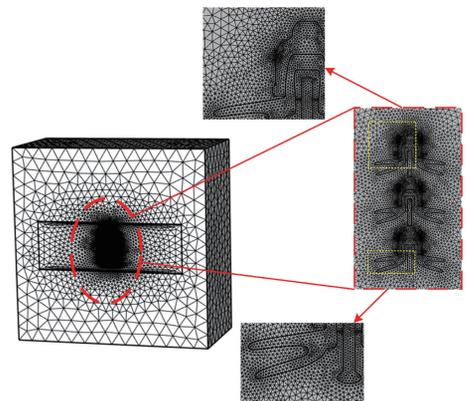


图 4 网格剖分

Fig. 4 Mesh generation

2) 边界条件设置

湍流模型的边界条件设置如下:流体入口为指定的湍流强度和湍流尺度入口,绝缘子表面设为内壁面,相对湿度设为 90%。图 3 中流场计算域左侧定义为速度入口,速度为 3 m/s,气流方向垂直于绝缘子的悬挂方向,右

侧定义为压力出口, 剩余侧面的边界条件设置为壁面。在电场计算域中, 设置无限远域为 0 电荷, 绝缘子上端为接地端, 下端为高压端, 施加 35 kV 交流电压。在粒子追踪模块中, 粒子由速度入口释放, 并在压力出口设置消失壁面条件, 绝缘子表面设置黏附条件。污秽颗粒密度为 $2\ 320\ \text{kg}/\text{m}^3$, 粒径为 $10\ \mu\text{m}$ 。

1.4 仿真结果与分析

1) 耦合场对颗粒运动的影响

交流电场中电场力的大小和方向是时变的, 为衡量电场力对污秽颗粒运动的影响, 利用 F_e 和 v 的夹角 θ 的余弦值进行表征, 其示意图如图 5 所示。以荷正电颗粒为例, 其运动过程中所受电场力方向及 $\cos\theta$ 变化如图 6 所示。

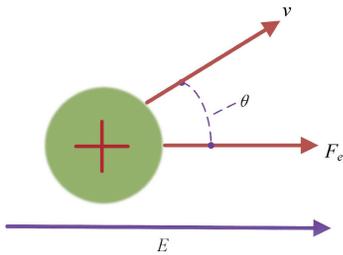


图 5 F_e 和 v 夹角示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the angle between F_e and v

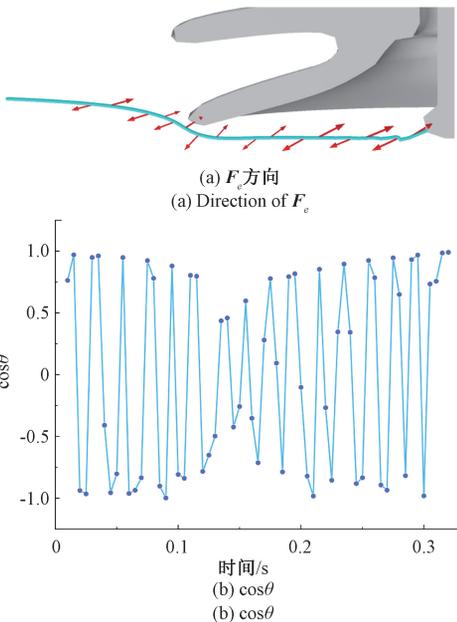


图 6 交流电场中带正电颗粒所受电场力方向及 $\cos\theta$

Fig. 6 Direction of F_e on positively charged particle in AC electric field and $\cos\theta$

由图 6 可得, 在交流电场中, 荷电颗粒在交变电场作用下 $\cos\theta$ 正负交替变化, 靠近绝缘子时, F_e 对颗粒运动

起主导作用。当 F_e 对颗粒运动提供正加速度时, 即 $\cos\theta$ 大于 0 时, 颗粒向钢脚运动; 当 $\cos\theta$ 小于 0 时, 颗粒在 F_e 作用下做减速甚至反向运动。受电场力的影响, 绝缘子附近的污秽颗粒运动轨迹发生偏转, 更易与绝缘子表面发生碰撞并造成颗粒黏附。

以风速 3 m/s 为例, 绝缘子串表面气流分布如图 7 所示。

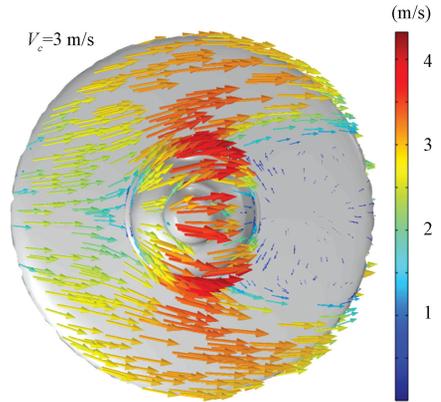


图 7 绝缘子表面气流矢量/速率分布图

Fig. 7 Distribution diagram of air flow vector/velocity on the insulator surface

由图 7 可知, 绝缘子表面迎风侧和侧风侧的空气流速较大, 因此在气流曳力的作用下, 表面污秽颗粒易被气流带走。而绝缘子背风侧有涡流和回流, 风速较低。因此, 污秽颗粒易沉积于绝缘子的背风侧。

2) 污秽颗粒沉积仿真结果

在上述研究的基础上, 开展了绝缘子表面污秽颗粒积聚仿真, 颗粒沉积结果如图 8 所示。

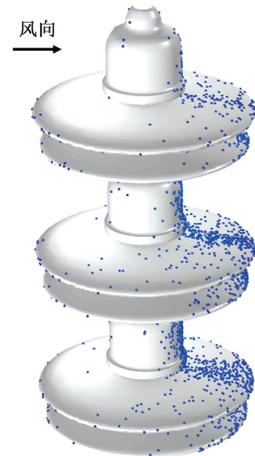


图 8 绝缘子表面污秽颗粒沉积

Fig. 8 Pollution particles accretion on the insulator

由图 8 可知, 绝缘子表面污秽沉积呈现明显的不均匀现象, 且迎风侧积污量远少于背风侧。此外, 绝缘子高

压端积污量高于接地端。一方面是颗粒受重力的作用易向高压侧移动;另一方面,污秽颗粒在电场力的作用下运动轨迹发生偏转,绝缘子高压端电场强度较大,对颗粒运动的影响更加显著,使附近污秽颗粒更易与绝缘子表面碰撞造成黏附。

2 试验装置及试验程序

据上文可知,瓷绝缘子表面积污呈现不均匀分布特性。因此,为探究污秽分布对交流闪络特性的影响,本节开展了绝缘子表面均匀和不均匀积污下的交流闪络试验。

2.1 试验装置

试验电源由交流试验变压器提供;外施电压采用电阻分压器测量;泄漏电流经采样电阻通过 NI 采集卡测量;雾由超声波雾发生器产生;分别采用高速摄像机和手持式红外热像仪获取绝缘子闪络过程中电弧发展过程和表面温度分布,绝缘子污闪试验平台如图 9 所示。其中, R_1 为保护电阻, RCF 为电阻分压器, R_F 为采样电阻, G 为放电管。

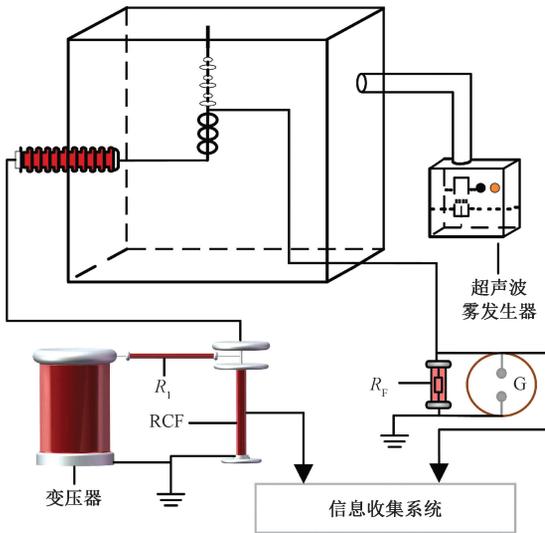


图 9 绝缘子污闪试验平台

Fig. 9 Test platform for insulator pollution flashover

2.2 试验程序

1) 污秽颗粒沉积仿真结果

试品绝缘子表面污秽采用 GB/T 4584-2004 推荐的固体层法进行染污。固体层法是目前国内外研究人员普遍使用的绝缘子表面染污方法,采用氯化钠 (NaCl) 和硅藻土分别模拟自然污秽中的可溶性导电物质和不溶性惰性物质,盐灰比取 1 : 5。

为模拟实际工况,涂覆不均匀污秽以研究迎/背风侧

不均匀积污对 XWP₂-160 绝缘子交流闪络特性的影响。在试验过程中,绝缘子表面等值附盐密度分别取 0.03、0.08、0.15 mg/cm²;迎风侧与背风侧盐密比分别为 1 : 1、1 : 4、1 : 9 和 1 : 16;背风侧面积分别占绝缘子总面积的 15%、25% 和 35%,如图 10 所示。

迎/背风侧的盐密由式(8)计算:

$$\begin{cases} SDD = \frac{SDD_Y \cdot S_Y + SDD_B \cdot S_B}{S_Y + S_B} \\ J = \frac{SDD_Y}{SDD_B} \\ R = \frac{S_B}{S_Y + S_B} \end{cases} \quad (8)$$

式中: SDD 表示绝缘子表面平均盐密; SDD_Y 表示迎风侧盐密; SDD_B 表示背风侧盐密; S_Y 表示迎风侧面积; S_B 表示背风侧面积; J 表示迎风侧与背风侧盐密之比; R 表示背风侧面积占总面积之比。

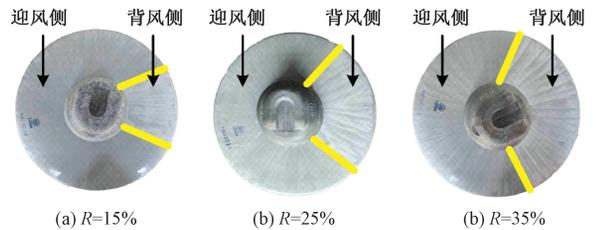


图 10 绝缘子背风侧占比

Fig. 10 Percentage of the leeward side of the insulator

2) 试品湿润

试品染污后自然阴干 24 h,再放置于人工雾室中,由超声波雾发生器产雾使试品湿润。当试品表面完全湿润而不发生水滴滑落则判断为达到饱和湿润。

3) 均匀升压

本文试验采用均匀升压法:当试品绝缘子达到饱和湿润后立即施加电压。40%预期闪络电压前的升压速度不作要求,之后按照每秒 10%~20%的速度升压至试品闪络^[22]。每种情况下对 3 串试品绝缘子进行闪络试验,每支试品闪络 3~5 次,取其中误差不超过 10%的闪络电压平均值为该污秽度下的平均污闪电压 (U_f),计算公式如式(9)所示:

$$\begin{cases} U_f = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i \\ \sigma\% = \frac{1}{U_f} \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (U_i - U_f)^2} \times 100\% \end{cases} \quad (9)$$

式中: U_f 为试品绝缘子的平均污闪电压; U_i 为第 i 次污闪电压; N 为试验次数; $\sigma\%$ 为试验结果的相对标准偏差。

3 试验结果及分析

3.1 交流污闪试验结果

按前文所述试验方法进行交流污闪试验,当 SDD 分

别为 0.03、0.08 和 0.15 mg/cm^2 , R 为 15%、25% 和 35%, J 为 1:1、1:4、1:9 和 1:16 时, XWP_2 -160 绝缘子的平均污闪电压如表 1 所示。

表 1 不同 J 和 R 下绝缘子污闪电压

Table 1 Pollution flashover voltage of the insulator under different J and R

R	$SDD/(\text{mg} \cdot \text{cm}^{-2})$	J							
		1:1		1:4		1:9		1:16	
		U_f/kV	$\sigma\%$	U_f/kV	$\sigma\%$	U_f/kV	$\sigma\%$	U_f/kV	$\sigma\%$
15%	0.03	89.6	4.0	68.0	6.7	64.2	2.5	60.6	3.6
	0.08	72.7	4.8	61.4	3.9	55.9	5.4	54.4	4.1
	0.15	60.6	6.2	52.7	2.9	48.9	4.3	46.9	2.0
25%	0.03	89.6	4.0	73.3	2.5	70.6	4.0	66.1	4.8
	0.08	72.7	4.8	64.4	5.7	60.1	6.3	58.9	4.5
	0.15	60.6	6.2	55.0	6.9	51.5	4.4	49.0	4.6
35%	0.03	89.6	4.0	77.3	4.2	72.4	4.9	69.0	4.3
	0.08	72.7	4.8	65.6	3.3	61.4	2.5	59.9	4.5
	0.15	60.6	6.2	56.0	5.6	53.5	6.2	50.8	4.8

表 1 中所有标准偏差 $\sigma\%$ 均小于 7%, 因此认为试验数据的分散性不大, 试验结果较为准确。

由表 1 可知, 均匀染污情况下, 当 SDD 为 0.03 mg/cm^2 时, 闪络电压 U_f 为 89.6 kV。而当 SDD 分别增加至 0.08 和 0.15 mg/cm^2 时, U_f 为 72.7 和 60.6 kV, 相较 0.03 mg/cm^2 时分别降低了 18.9% 和 32.4%。其主要原

因是平均盐密增大导致绝缘子表面电导率减小, 泄漏电流增大, 有利于电弧发展。

3.2 J 对污闪电压的影响

试验结果表明, J 对 U_f 影响显著。根据表 1 绘制 U_f 随 J 变化的趋势如图 11 所示。

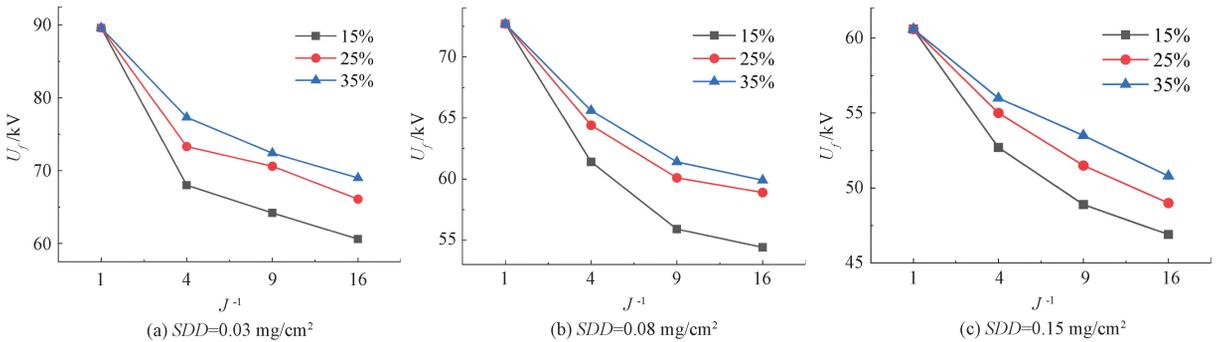


图 11 U_f 与 J 的关系

Fig. 11 Relationship between U_f and J

由图 11 可得: 1) 保持 R 和 SDD 不变, U_f 随着 J 的减小而降低, 且趋势趋于平缓, 以 $SDD = 0.08 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 、 $R = 25\%$ 为例, 当 J 为 1:4、1:9、1:16 时, U_f 分别为 64.4、60.1、58.9 kV, 与均匀染污相比分别下降了 11.4%、17.3% 和 19.0%。2) 当 SDD 较低时, J 对 U_f 的影响更大。当 SDD 为 0.03、0.08 和 0.15 mg/cm^2 时, 对于 3 种不同的背风侧占比, $J = 1:16$ 情况下的 U_f 相比 $J = 1:1$ 时平均减小了 27.2%、20.1% 和 19.3%。3) R 较小时, J 对 U_f 影响更为显著。当 R 为 15%、25%、35% 时, 对于不

同的等值盐密, J 从 1:1 减小到 1:16 时, U_f 平均分别减小了 26.3%、21.5%、18.9%。

3.3 R 对污闪电压的影响

总体上, 与 SDD 和 J 相比, R 对 U_f 的影响较小。根据表 1 绘制 U_f 随 R 变化的趋势如图 12 所示。

由图 12 可得: 1) 在 SDD 和 J 不变的情况下, U_f 均随着 R 的增大而升高。以 $SDD = 0.08 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 、 $J = 1:9$ 为例, 当 R 为 15%、25%、35% 时, U_f 分别为 55.9、60.1、61.4 kV, 后两者较前者分别提高了 7.5% 和 9.8%。

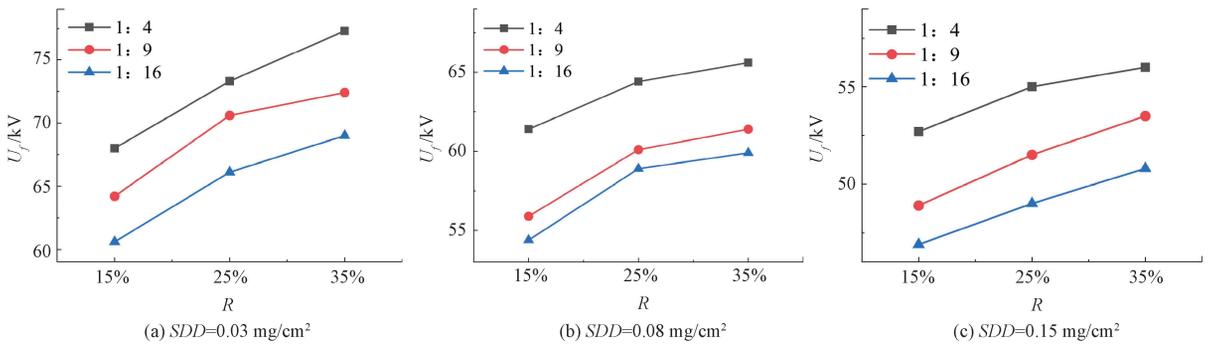


图 12 U_f 与 R 的关系

Fig. 12 Relationship between U_f and R

2) SDD 较低时, R 对 U_f 的影响较为显著。当 SDD 为 0.03、0.08 和 0.15 mg/cm^2 时, 3 种 J 下, R 从 15% 增加到 35% 时, U_f 平均增大了 11.8%、8.2% 和 7.4%。3) J 较小时, R 对 U_f 的影响较为显著。当 J 为 1:4、1:9、1:16 时, 3 种 SDD 下, $R=35\%$ 时, U_f 比 $R=15\%$ 时的 U_f 平均增大了 8.1%、9.6% 和 9.7%。

3.4 污秽分布对交流闪络特性的影响

1) 污秽分布对电弧发展过程的影响

使用高速摄像机拍摄三片串 XWP₂-160 绝缘子闪络过程, 当 $R=25\%$ 、 $SDD=0.08 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 时, 均匀染污时不同盐密情况下的闪络路径如图 13 所示。保持 R 和 SDD 不变, 不同 J 下的三片串 XWP₂-160 绝缘子的闪络路径如图 14 所示。

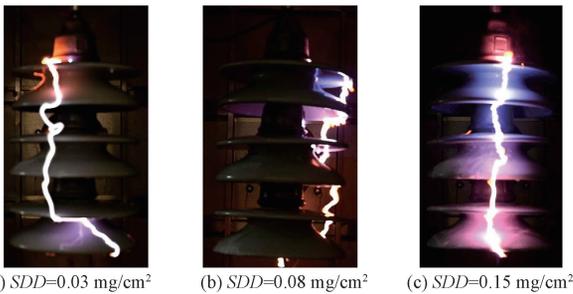


图 13 均匀染污时绝缘子闪络路径

Fig. 13 Flashover path under uniform pollution

使用手持式红外热像仪拍摄的均匀染污与不均匀染污情况下红外热图像如图 15 所示。

由图 13、14 和 15 可得到如下结论:

(1) 在图 13 中, 对于均匀染污的绝缘子, 闪络发生时放电路径具有随机性, 而且从图 15(a) 可以看出, 绝缘子闪络时表面各个方向温度均高于闪络前。这是因为均匀染污的绝缘子表面污层电导率也是均匀的, 故电弧的发展与位置无关, 具有随机性。

(2) 在图 14 中, 不均匀染污情况下的绝缘子电弧放

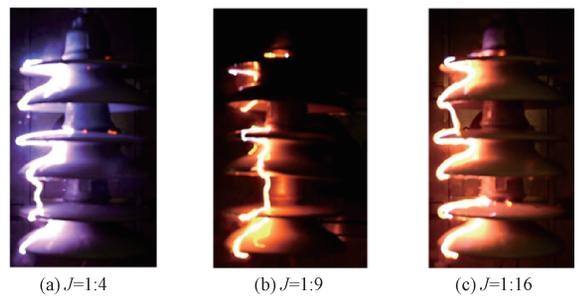


图 14 不均匀染污时绝缘子闪络路径

Fig. 14 Flashover path under non-uniform pollution

电路径均出现在背风侧。而且由图 15(b) 可知, 闪络时绝缘子背风侧温度明显升高, 而迎风侧温度基本不变, 与均匀染污情况明显不同, 主要原因是非均匀染污绝缘子背风侧污秽重, 污层电导率高, 有利于干带的形成和电弧的发展。

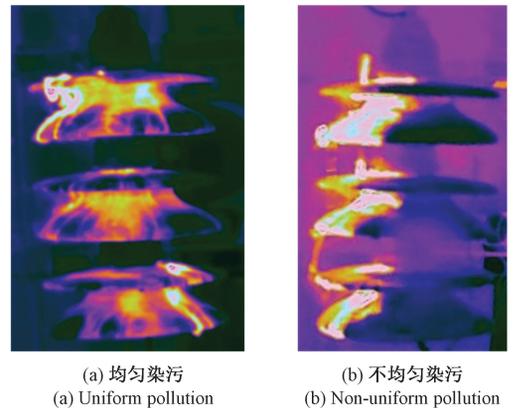


图 15 不均匀染污时绝缘子闪络时红外热图像

Fig. 15 Infrared image of insulator flashover

2) 污秽分布对泄漏电流的影响

当 $SDD=0.15 \text{ mg}/\text{cm}^2$ 、 $R=25\%$ 、 J 分别为 1:1 和 1:9 时, 绝缘子交流闪络过程中泄漏电流随时间的变化

如图 16、17 所示。

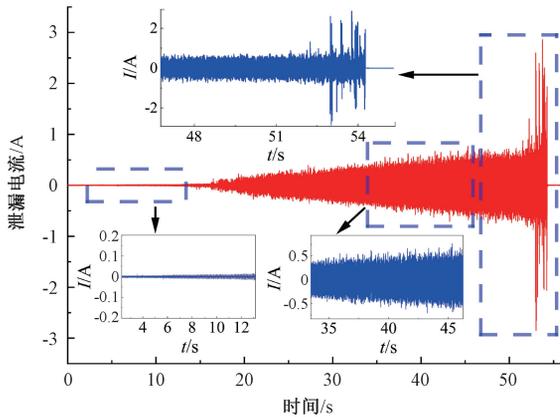


图 16 均匀染污时绝缘子泄漏电流

Fig. 16 Leakage current under uniform pollution

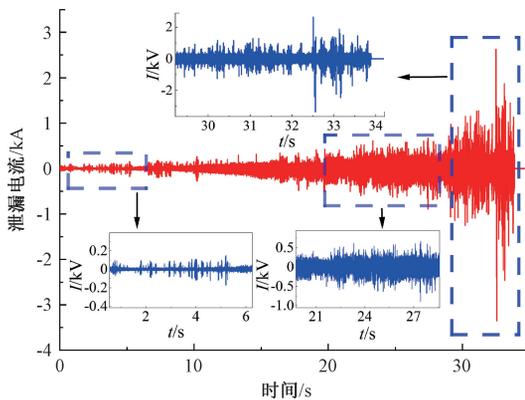


图 17 不均匀染污时绝缘子泄漏电流

Fig. 17 Leakage current under non-uniform pollution

由图 16 和 17 可知,均匀染污的绝缘子在加压的初始阶段泄漏电流没有明显变化,一段时间后,泄漏电流近似均匀增大,直至发生闪络。而不均匀染污的绝缘子在升压的初始阶段泄漏电流明显增大,且随着电压的升高泄漏电流波动剧烈。闪络发生前,均匀染污的绝缘子泄漏电流最大峰峰值为 1 682 mA,而不均匀染污最大峰峰值可达 2 158 mA。主要原因是相同 SDD 下,不均匀染污绝缘子电弧在背风侧发展,且背风侧污层电导率比均匀染污的绝缘子大,因此放电更为剧烈。

4 结 论

本文通过建立三维电场-流场耦合模型,对污秽颗粒运动过程进行了仿真研究,并采用人工涂污法模拟绝缘子表面迎/背风侧不均匀污秽,开展了放电试验以研究不均匀积污对交流闪络特性的影响,得到了如下结论:

单一风向作用下,交流电场中因电场力的作用颗粒

运动轨迹发生偏移,更易与绝缘子表面碰撞从而发生黏附。背风侧存在回流和涡流是导致污秽易在绝缘子背风侧积聚的主要原因。

U_f 随 SDD 的增大而降低,随 J 和 R 的增大而升高。在本文研究范围内, SDD 的增大使 U_f 最大降低了 32.4%; J 的减小使 U_f 最大降低了 32.4%; R 的增大使 U_f 最大升高了 13.7%。

均匀染污的绝缘子闪络路径具有随机性,而不均匀染污绝缘子闪络路径出现在背风侧。与均匀染污相比,不均匀染污的绝缘子闪络前泄漏电流峰峰值高 476 mA,即电流变化更大,放电较为剧烈。

参考文献

- [1] 蒋兴良,廖乙,袁一钧,等.极不均匀染污绝缘子操作冲击闪络特性[J].高电压技术,2023,49(11):4676-4685.
JIANG X L, LIAO Y, YUAN Y J, et al Switching impulse flashover characteristics of insulator with extremely non-uniform pollution [J]. High Voltage Engineering,2023,49(11):4676-4685.
- [2] 杨志超,张成龙,葛乐,等.基于熵权法的绝缘子污闪状态模糊综合评价[J].电力自动化设备,2014,34(4):90-94.
YANG ZH CH, ZHANG CH L, GE L, et al. Comprehensive fuzzy evaluation based on entropy weight method for insulator flashover pollution. [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(4):90-94.
- [3] JIANG X L, REN X D, WANG H, et al. Effect of inverted T arrangement on AC pollution flashover characteristics of insulator strings. [J] High Voltage, 2019,4(2):97-104.
- [4] 徐婉丽.基于电-热特性的绝缘子交流污闪动态模型研究[D].兰州:兰州交通大学,2019.
XU W L. Research on dynamic model of polluted Insulators under AC voltage based on the electro-thermal characteristics [D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University,2019.
- [5] 蔡斌,郭广领,代朝辉,等.巴基斯坦卡西姆电站及 500 kV 输电线路严重频繁污闪事故分析[J].科学技术创新,2021(3):186-190.
CAI B, GUO G L, DAI ZH H, et al. Analysis of severe and frequent pollution flashover accidents at kasim power station and 500 kV transmission line in Pakistan. [J]. Scientific and Technological Innovation, 2021 (3): 186-190.
- [6] 何书言.南京市大气颗粒物化学组分的粒径分布特征[D].南京:南京大学,2020.
HE SH Y. Characteristics of size distribution of atmospheric

- particulate matter components in Nanjing [D]. Nanjing: Nanjing University, 2020.
- [7] 王晴. 光传感监测绝缘子污秽的成分分析[J]. 电子测量技术, 2018, 41(23): 74-77.
WANG Q. Analysis of natural pollution deposit on optic sensor for monitoring of insulators contamination [J]. Electronic Measurement Technology, 2018, 41 (23): 74-77.
- [8] HUANG Y C, HUANG X B, ZHU Y C, et al. An integrated fouling model of insulator surface considering particle deposition and removal [J]. Electric Power Systems Research, 2022, 211: 108198.
- [9] 王胜辉, 王玺铭, 李楠. 交流电压下污秽成分对瓷绝缘子泄漏电流及闪络电压的影响研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2023, 50(4): 53-59.
WANG SH H, WANG X M, LI N. Study on the influence of contaminated components on the leakage current and flashover voltage of porcelain insulators under AC voltage [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2023, 50 (4): 53-59.
- [10] QIAO X H, ZHANG Z J, JIANG X L, et al. DC pollution flashover performance of HVDC composite insulator under different non-uniform pollution conditions [J]. Electric Power Systems Research, 2020, 185: 106351.
- [11] 刘又超, 蒋兴良, 张欢, 等. 不溶物对绝缘子污闪的影响[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(11): 3331-3338, 3390.
LIU Y CH, JIANG X L, ZHANG H, et al. Influence of insoluble contaminants on the pollution flashover of insulators [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(11): 3331-3338, 3390.
- [12] 杨忠毅. 绝缘子表面污秽成分检测方法及其对交流污闪特性的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2019.
YANG ZH Y. Detection methods for insulator surface pollution components and the influence of pollution components on AC flashover performance of insulators [D]. Chongqing: Chongqing University, 2019.
- [13] 杨超. 扇面不均匀污秽下绝缘子串直流闪络特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
YANG CH. Study on DC pollution flashover performance of sectoral un-uniform polluted insulator strings [D]. Chongqing: Chongqing University, 2014.
- [14] 陈然, 郭裕钧, 张血琴, 等. 车顶绝缘子空气动力结构优化及其积污特性研究[J]. 电瓷避雷器, 2023(2): 164-171.
CHEN R, GUO Y J, ZHANG X Q, et al. Aerodynamic structure optimization and contamination accumulation characteristics of roof insulator [J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(2): 164-171.
- [15] 张志劲, 杨晟欢, 蒋兴良, 等. 迎背风不均匀污秽下支柱绝缘子直流污闪特性[J]. 电网技术, 2020, 44(1): 354-360.
ZHANG ZH J, YANG SH H, JIANG X L, et al. DC flashover characteristics of post insulators under non-uniform pollution between windward and leeward sides [J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 354-360.
- [16] 杨富淇. 重庆地区绝缘子不均匀积污特性及其对交流闪络电压影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
YANG F Q. Study on non-uniformity pollution characteristics and its influence on AC flashover voltage of insulators in Chongqing area [D]. Chongqing: Chongqing University, 2020.
- [17] 张东东, 张志劲, 蒋兴良, 等. XP-160 绝缘子直流快速积污过程仿真及分析[J]. 电网技术, 2020, 44(2): 791-798.
ZHANG D D, ZHANG ZH J, JIANG X L, et al. Simulation study on fast DC contamination process of XP-160 insulator and its analysis [J]. Power System Technology, 2020, 44(2): 791-798.
- [18] 张东东. 绝缘子迎/背风侧污秽不均匀分布特性及其对直流污闪的影响研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2017.
ZHANG D D. Study on the non-uniform pollution distribution performance on insulator windward/leeward sides and its effect on DC pollution flashover [D]. Chongqing: Chongqing University, 2017.
- [19] 李恒真, 姚思海, 杨昆升, 等. 污秽颗粒在绝缘表面吸附前的受力和运动分析[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2013, 41(4): 21-26.
LI H ZH, YAO S H, YANG K SH, et al. Force analysis and kinematic analysis of polluted particles before their adsorption on electrical insulator surface [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2013, 41(4): 21-26.
- [20] 李彦哲, 李刚, 李宝学, 等. 强风环境下腕臂绝缘子雪晶沉积特性仿真分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(7): 217-223.
LI Y ZH, LI G, LI B X, et al. Simulation analysis of snow crystal deposition characteristics of cantilever insulators in strong wind environment [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(7): 217-223.
- [21] HUANG Y C, HUANG X B. Flow field distribution around insulator and contamination uneven characteristic of insulator [J]. IET Science, Measurement & Technology, 2020, 14(10): 1088-1097.

- [22] 陈吉, 蒋兴良, 陈成瑞, 等. 不同试验方式对绝缘子污闪特性的影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2020, 298(6): 241-248.

CHEN J, JIANG X L, CHEN CH R, et al. Study on the influence of different testing method on polluted flashover performance of insulators [J]. Insulators and Surge Arresters, 2020, 298(6): 241-248.

作者简介



赵云鹏, 2021 年于山东理工大学获得学士学位, 现为山东理工大学硕士研究生, 主要研究方向为高电压与绝缘技术。

E-mail: zhaoyunpeng98@163.com

Zhao Yunpeng received his B. Sc. degree from Shandong University of Technology in 2021. He is now a M. Sc. candidate at Shandong University of Technology. His main research interests include

high voltage and insulation technology.



胡玉耀(通信作者), 2012 年于内蒙古科技大学获得学士学位, 2017 年于重庆大学获得博士学位, 现为山东理工大学副教授, 主要研究方向为输变电设备外绝缘放电特性、输电线路防冰减灾技术等。

E-mail: hyuyao@sdut.edu.cn

Hu Yuyao (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Inner Mongolia University of Science & Technology in 2012 and Ph. D. degree from Chongqing University in 2017. He is now an associate professor at Shandong University of Technology. His main research interests include external insulation discharge characteristics of power transmission and distribution equipment and transmission line ice prevention and mitigation technology.