

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.05.019

金属微粒对直流 GIL 盆式绝缘子电场的影响

尉元龙¹, 何柏娜¹, 崔荣喜², 代维汉¹, 张东进¹, 王硕¹

(1. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255000;

2. 国网山东省电力公司日照供电公司, 山东 日照 276826)

摘要:针对直流气体绝缘输电线路(gas-insulated transmission line, GIL)内部发生金属微粒污染时,金属微粒易附着在盆式绝缘子表面,威胁设备安全运行的问题。文中建立一种直流 GIL 电场仿真模型,结合直流 GIL 运行工况,选取毫米级金属微粒,综合考虑微粒尺寸、形态、附着位置以及多微粒聚集等因素,分析金属微粒缺陷对盆式绝缘子表面电场分布的影响。结果表明:单个微粒附着于绝缘子表面会导致电场强度超过安全阈值;毫米级微粒尺寸对电场畸变的影响存在边界递减效应;微粒附着位置的电势、曲率大小与绝缘子表面电场畸变程度呈正相关;当微粒为锥形、线形等不规则形状或者微粒呈纵向聚集时,绝缘子表面电场畸变程度急剧增大;在电压极性反转工况下,金属微粒附近电场畸变更严重。

关键词:气体绝缘输电线路(GIL);金属微粒;盆式绝缘子;毫米级微粒;电场畸变;电压极性反转

中图分类号:TM216

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2025)05-0198-10

0 引言

随着我国用电需求的日益增长,具有输送容量大、送电距离远等特点的直流输电技术研究及相关设备的研制受到广泛的关注并取得快速发展^[1-7]。在直流输电设备中,气体绝缘输电线路(gas-insulated transmission line, GIL)因其体积小、容量大、可靠性高、电磁辐射低的优点具有广阔发展前景,并在实际工程应用中取得较好效益^[8-11]。

在直流 GIL 中,盆式绝缘子是起到电气绝缘和支撑导体作用的关键部件,其参数反映直流 GIL 的运行状态^[12-13]。绝缘子运行中可能出现积污、附着金属微粒等情况^[14-16],一旦发生绝缘失效,将会成为整个输电部分的薄弱环节,影响直流 GIL 的安全可靠运行。导电微粒污染是引起 GIL 设备故障的一个重要原因^[17],特别是当盆式绝缘子表面附着金属微粒时,整个输电线路的安全运行水平将受到极大威胁。

目前,国内外关于绝缘子附着金属微粒的研究众多,研究范围广泛。有学者对金属微粒在 GIL 内部运动特性进行研究,如文献^[1,18-19]分析并总结直流及交流 GIL 内部球形金属微粒的几种典型运动轨迹。文献^[20-21]搭建微粒飞萤运动观测与测试平台,测得直流电压下微粒飞萤运动的起始电场强度。文献^[22]采用高速成像和脉冲序列分析方法,分析输电管道中微粒几何形状、材料成分对运

动幅度的影响。另有学者通过仿真计算以及风洞试验等方式研究金属微粒运动特性^[23-24]。

对于金属微粒附着在绝缘子表面的情形,文献^[25]基于流体力学和碰撞沉积模型,分析绝缘子表面微粒的附着过程。文献^[26]指出在金属球/金属丝微粒缺陷下,绝缘子表面的放电强度与电场畸变程度呈正相关。文献^[27]研究金属微粒缺陷对绝缘子电场的影响,并分析不同形状金属微粒引起的电场畸变程度。此外,还有学者对金属微粒的影响机理、抑制措施等方面进行研究^[28-30]。

上述研究从不同角度分析盆式绝缘子的电场分布特性,为绝缘子电场仿真计算提供理论基础。但对金属微粒的研究大多仅限于较为规则的单个球形微粒,既未结合绝缘子结构考虑电场畸变机理,也缺乏对线形、锥形等不规则形状微粒以及微粒聚集状态时电场特性的系统化研究,同时,这些研究并未考虑实际运行中直流 GIL 的电压极性反转工况。

在直流电压下,由于 GIL 受到单极性电场的长期作用,气固界面电场畸变容易诱发绝缘子沿面闪络^[31-33],影响直流 GIL 的安全稳定运行。鉴于金属微粒缺陷附近畸变的电场可能成为绝缘子局部放电或击穿失效的主要原因^[26,34],因此有必要结合 GIL 的实际运行工况,在充分考虑不同形态金属微粒缺陷的情况下,分析金属微粒对绝缘子电场畸变影响机理以及盆式绝缘子表面电场的分布特征。

针对上述问题,文中建立直流 GIL 绝缘子电场仿真模型,利用有限元计算软件模拟直流 GIL 盆式

收稿日期: 2025-01-13; 修回日期: 2025-03-20

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(ZR2021ME057)

绝缘子的运行工况。针对直流 GIL 绝缘子表面金属微粒污染缺陷, 设置多形态金属微粒模型, 分析金属微粒对绝缘子电场分布的影响, 并考虑绝缘子结构以及电压极性反转对电场分布的影响, 得到绝缘子电场分布影响因素及不同特征金属微粒附着时绝缘子沿面的电场特性。

1 直流 GIL 计算模型

1.1 GIL 几何模型

直流 GIL 基本结构主要包括金属外壳、高压导杆、盆式绝缘子以及管体内填充的 SF₆ 气体。文中选取国内某±200 kV 直流 GIL 作为研究对象, 其尺寸参数及模型如图 1 所示。直流 GIL 的高压导杆外半径为 45 mm, GIL 外壳内半径为 160 mm、外半径为 170 mm, 绝缘子的沿面距离为 156 mm, 直流 GIL 整体呈同轴结构。

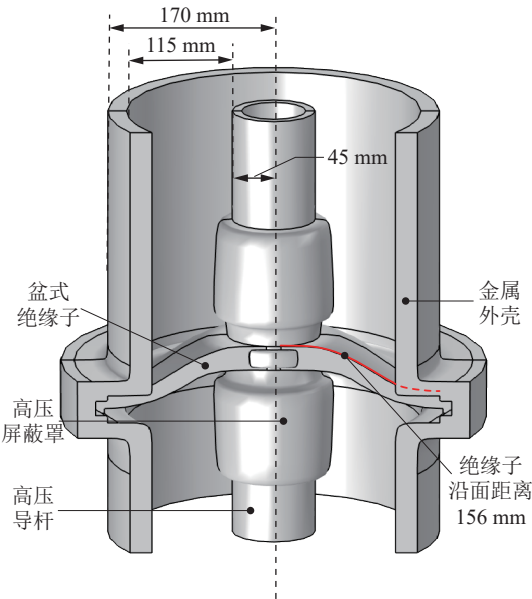


图 1 GIL 几何模型
Fig.1 GIL geometric model

在 GIL 设计中, 使用了 4 种材料: SF₆ 气体、金属(铝合金)、氧化铝陶瓷及空气。高压导杆与外壳之间的气体为 SF₆ 气体。外壳和高压屏蔽材质均为金属。绝缘子材质为氧化铝陶瓷。GIL 的外部空间为空气。上述材料的相对介电常数 ϵ 如表 1 所示。

表 1 材料的 ϵ
Table 1 ϵ values of materials

材料	相对介电常数 ϵ
SF ₆ 气体	1.002 049
铝合金	10 ¹⁰
氧化铝陶瓷	9.8
空气	1

1.2 电场计算模型

计算 GIL 电场时, 将带电体表面设为边界, 带电体外空间设为计算场域。在该场域中, 电势及电场的求解须满足如式(1)所示的前提条件。

$$\nabla^2 \varphi = 0 \tag{1}$$

式中: φ 为电势函数。

由式(1)可计算介质交界处的电势分布:

$$\begin{cases} \varphi_1 = \varphi_2 \\ \epsilon_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = \epsilon_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} \end{cases} \tag{2}$$

式中: φ_1 、 φ_2 为不同介质在交界面的电势; ϵ_1 、 ϵ_2 为不同介质的介电常数; n 为交界面外法线矢量。

假设电场中存在点电荷 q_0 受到电场力作用, 此时电场强度如式(3)所示。

$$\boldsymbol{E} = \lim_{q_0 \rightarrow 0} \frac{\boldsymbol{F}}{q_0} \tag{3}$$

式中: $\boldsymbol{E}$ 为电场强度; $\boldsymbol{F}$ 为点电荷受力; q_0 为点电荷电量。

根据矢量分析理论, 任意一个标量函数的梯度的旋度恒为 0, 因此静电场电场强度 $\boldsymbol{E}$ 可以由一个标量函数的梯度来表示, 如式(4)所示。

$$\boldsymbol{E} = -\nabla \varphi \tag{4}$$

1.3 GIL 电场计算参数设置

由于实际 GIL 结构较为复杂, 分析其电场分布时需要计算复杂几何形状的边界条件。文中采用有限元仿真软件进行建模, 在 GIL 外部建立空气域, 整体仿真模型如图 2 所示。其中边界条件设置为: GIL 导杆承受运行电压为 200 kV, GIL 外壳接地, 如式(5)和式(6)所示。

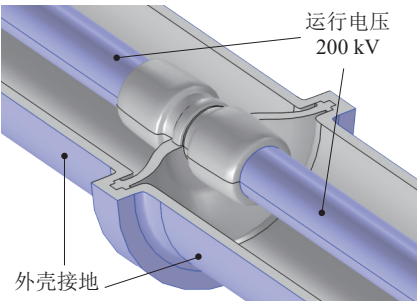


图 2 GIL 仿真模型
Fig.2 GIL simulation model

$$U_d = U_{op} = 200 \text{ kV} \tag{5}$$

$$U_w = 0 \tag{6}$$

式中: U_d 、 U_{op} 、 U_w 分别为 GIL 导杆电压、运行电压和外壳电压。

绝缘子表面研究路径选取如图 3 所示。绝缘子凸面研究路径长度 156 mm, 凹面研究路径长度

152 mm。绝缘子研究路径从导杆侧指向外壳侧,其中绝缘子导杆侧为起始位置,沿面路径为 0 mm。

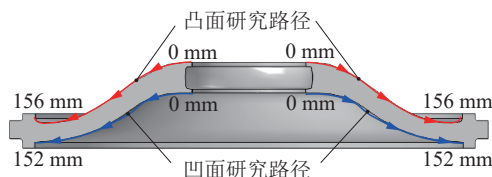


图 3 绝缘子表面研究路径

Fig.3 Research path over insulator surface

在有限元计算中,网格精度和剖分方式与计算精确性密切相关。由于盆式绝缘子与直流 GIL 整体结构存在显著尺寸差异,因此文中采取差异化网格划分,细化绝缘子区域网格,设置最大单元与最小单元尺寸分别为 3.0 mm 和 0.2 mm,最大单元增长率为 1.3。网格细化后的绝缘子区域划分情况如图 4 所示,其网格质量明显提升。

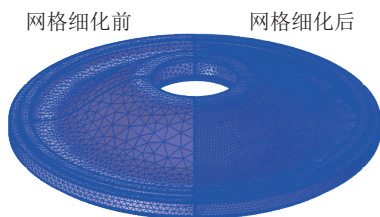


图 4 绝缘子网格划分情况

Fig.4 Mesh division of insulator

2 直流 GIL 绝缘子沿面特性分析

2.1 绝缘子沿面电势分布特性

对于盆式绝缘子,其沿面电势分布的畸变会导致绝缘子电位分布不均匀,进而降低绝缘子性能^[35]。绝缘子表面电势分布如图 5 所示。可以看出,绝缘子凸面的电势降落速度明显小于凹面,电势分布较为均匀。为便于分析,根据电势值将绝缘子表面划分为高电势区、中电势区和低电势区,划分情况如图 6 所示。

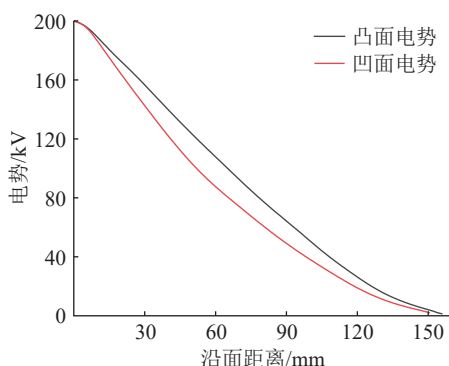


图 5 绝缘子表面电势分布

Fig.5 Electric potential distribution over insulator surface

绝缘子的沿面电势分布与表面曲率密切相关。

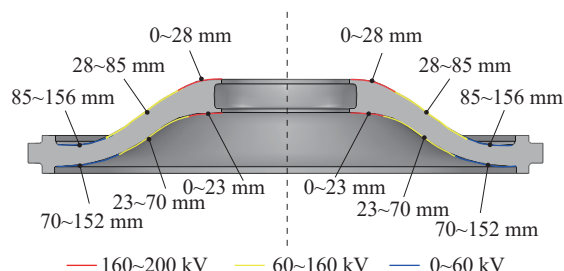


图 6 绝缘子表面电势区域划分

Fig.6 Electric potential range over insulator surface

凸面高电势区的平均曲率半径 r_{av} 为 83 mm,中电势区的 r_{av} 为 217 mm;凹面高电势区的 r_{av} 为 56 mm,中电势区的 r_{av} 为 134 mm。由图 6 可知,绝缘子凸面高电势区沿面长度为 28 mm,是凹面的 1.22 倍;凸面中电势区沿面长度为 57 mm,是凹面的 1.21 倍。因此,绝缘子表面曲率越大,电势降落速度越快,高电势区、中电势区的电势分布越不均匀。

2.2 正极性电压下的绝缘子电场特性

根据 GIL 设计基准和运行维护经验,直流电压下绝缘子的电场畸变与击穿放电密切相关。如果 GIL 绝缘子电场强度超过阈值(通常为 3 kV/mm)^[2],则存在绝缘失效的风险。文中重点研究绝缘子表面电场分布特性。通过有限元软件计算,首先得到 GIL 正常运行状态下绝缘子的电场分布,如图 7 所示。可见绝缘子表面电场呈现梯度分布特征。

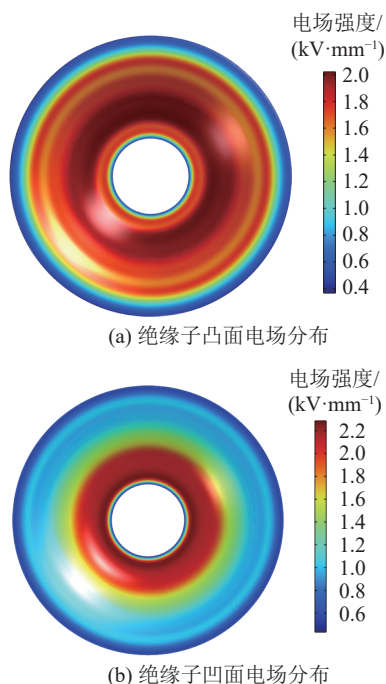


图 7 绝缘子表面电场分布云图

Fig.7 Cloud map of electric field distribution over insulator surface

由图 7 可知,绝缘子表面电场强度最大值不超过阈值,此时绝缘子表面发生闪络概率较低,处于

正常运行状态。根据图 6 所选取的研究路径对绝缘子表面电场分布进行计算, 得到绝缘子表面电场分布特性如图 8 所示。

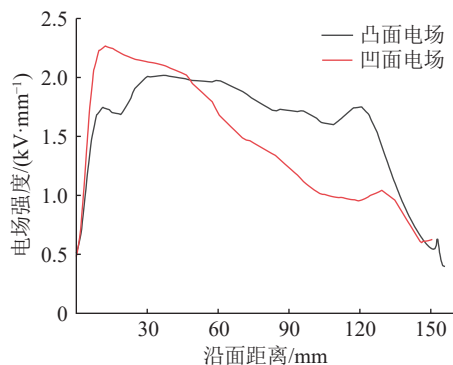


图 8 绝缘子表面电场分布特性
Fig.8 Characteristics of electric field distribution over insulators surface

根据图 8 所示的绝缘子沿面特性, 可知绝缘子凸面和凹面电场分布存在明显差异。绝缘子凸面 10~120 mm 区域电场强度值在 1.8 kV/mm 左右, 电场分布较均匀, 电场强度最大值 $E_{\max}$ 为 2.0 kV/mm; 绝缘子凹面电场强度值先增大后减小, $E_{\max}$ 为 2.4 kV/mm, 为凹面最大值的 1.2 倍。由于绝缘子凸面的整体曲率小于凹面, 结合绝缘子沿面电势和电场分布可知, 当绝缘子表面曲率较大时, 电势分布不均匀, 电场畸变程度也随之增大。

2.3 负极性电压下的绝缘子电场特性

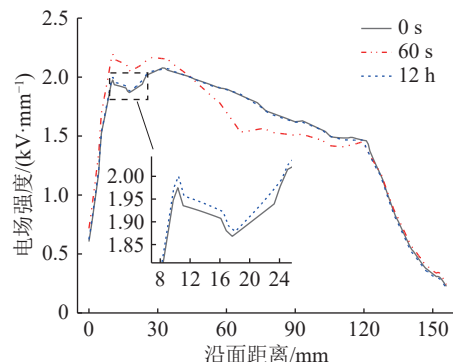
在直流 GIL 实际工程应用中, 特别在维护、测试、改变电流方向或控制电压的过程中, 盆式绝缘子可能面临电压极性反转的工况。电压极性反转会使绝缘子凸面、凹面电荷积聚情况发生变化, 从而影响绝缘子表面电场分布^[30]。在 $t=0$ s 时发生直流 GIL 电压极性反转后, 电荷重新分配。电压极性反转后绝缘子表面电场随时间变化情况见图 9。

由图 9 可知, 电压极性反转对绝缘子影响主要体现在 $t=60$ s 时表面电场畸变程度显著增大。 $t=0$ s 时直流 GIL 发生电压极性反转, $t=60$ s 时绝缘子凸面 0~15 mm 范围电场强度最大值由 1.97 kV/mm 增至 2.19 kV/mm, 增幅为 11.17%; 绝缘子凹面 0~43 mm 范围电场强度最大值由 2.43 kV/mm 增至 2.74 kV/mm, 增幅为 12.76%。随着时间推移, 绝缘子表面电场分布规律在 $t=12$ h 时与电压极性反转前基本相同。

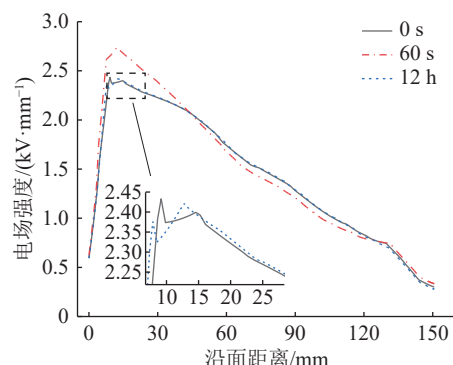
3 金属微粒特性对绝缘子表面电场的影响分析

3.1 微粒尺寸

根据 GIL 工程中金属微粒污染的统计数据, 微



(a) 绝缘子凸面电场分布

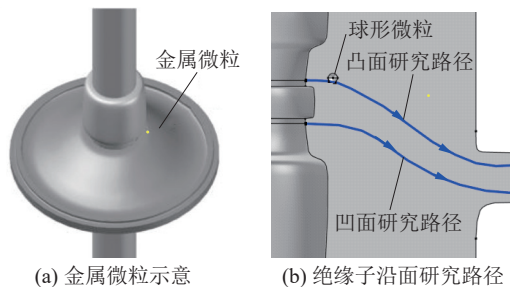


(b) 绝缘子凹面电场分布

图 9 电压极性反转后不同时刻的绝缘子表面电场分布

Fig.9 Electric field distribution over insulator surface at different moments after voltage polarity reversal

粒形状各异, 而以球形、线形、片形及不规则形居多。微粒尺寸跨度较大, 在封闭输电管道中, 微粒长度可达 3 mm 左右, 且以毫米和微米级居多^[17-18]。为研究微粒对表面电场特性的影响, 将半径为 1.5 mm 的球形微粒置于绝缘子凸面高电势区、沿面距离 19 mm 处, 构建附着微粒的 GIL 绝缘子模型如图 10 所示。



(a) 金属微粒示意

(b) 绝缘子沿面研究路径

图 10 金属微粒附着时 GIL 模型

Fig.10 GIL model with metal particle attachment

绝缘子表面电场分布情况如图 11 所示, 金属微粒导致绝缘子表面电场明显畸变, 微粒附着处电场强度最大值为 6.421 5 kV/mm, 相比无缺陷时增大 2.21 倍。直流 GIL 盆式绝缘子表面放电强度与电场畸变程度呈正相关, 金属微粒导致附近电场畸变, 增大了绝缘子放电击穿概率。

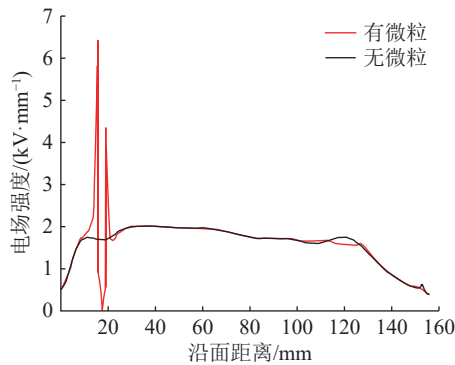


图 11 微粒附着时的绝缘子表面电场分布特性
Fig.11 Characteristics of electric field distribution over insulator surface with particles attachment

研究微粒尺寸对绝缘子表面电场畸变影响时,在相同位置附着半径分别为 1.5、2.0 mm 的金属微粒,电场分布如图 12 所示。金属微粒两端出现电场强度最大值 $E_{\max}$,微粒附近电场明显畸变,但两种微粒引起的绝缘子表面电场畸变区域无较大差异,绝缘子电场畸变最为严重的部位仍位于绝缘子与微粒交界处。

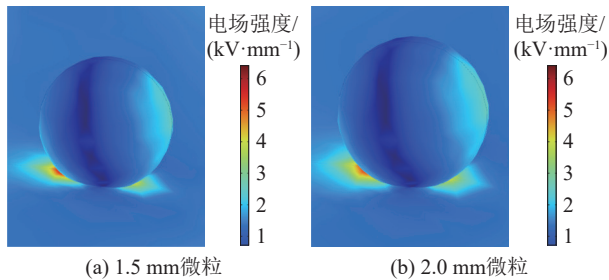


图 12 不同半径微粒附着时绝缘子表面电场分布
Fig.12 Electric field distribution over insulator surface with particles of different semidiameter attachment

为研究微粒尺寸对绝缘子电场影响机理,针对直流 GIL 附着金属微粒半径在 0.25~2.5 mm 范围的情况进行分析。绝缘子电场分布随微粒半径的变化情况如表 2 所示。当微粒半径由 0.25 mm 增至 1.5 mm 时,绝缘子表面电场强度最大值 $E_{\max}$ 与电场强度平均值 E_{av} 的增幅分别为 15.74% 与 2.98%;而当微粒半径由 1.5 mm 增至 2.5 mm 时,绝缘子表面 $E_{\max}$ 、 E_{av} 增幅均远小于 1%。不同半径的金属球形微粒均导致 GIL 盆式绝缘子表面场强值增大,但当微粒半径超过一定值后,其影响程度减弱。因此,球形微粒存在一个临界半径(约为 1.5 mm),当球形微粒半径大于该临界值时,绝缘子表面的 $E_{\max}$ 、 E_{av} 趋于定值。

研究表明,球形金属微粒缺陷会导致绝缘子电场明显畸变。微粒半径存在某一临界值:当半径小于该临界值时,绝缘子表面电场畸变程度随半径增

表 2 微粒尺寸对绝缘子表面电场强度影响

Table 2 Effect of particle size on electric field strength over insulator surface

微粒半径/ mm	电场强度最大值 $E_{\max}/(\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1})$	电场强度平均值 $E_{\text{av}}/(\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1})$
无微粒	2.000 7	1.595 5
0.25	5.548 4	1.598 3
0.5	6.143 0	1.606 8
1.0	6.303 9	1.620 5
1.5	6.421 5	1.645 9
2.0	6.423 7	1.648 1
2.5	6.424 1	1.648 2

大而增大;而当半径大于该临界值时,微粒尺寸不再是影响绝缘子表面电场分布的主导因素。

3.2 微粒形状及附着方式

金属微粒产生具有随机性,因剥落、磨损、振动以及磕碰而产生的金属微粒形状多变,以线形、圆锥形、螺旋形居多。微粒形状、微粒附着方式均有可能影响绝缘子电场畸变程度。文中微粒形状选择纺锤形微粒和线形微粒,相关微粒尺寸如表 3 所示。

表 3 金属微粒形状及尺寸

Table 3 Metal particle shape and size

形状	尺寸
纺锤形	横向长度 2 mm, 纵向长度 3.6 mm
线形	长 5 mm, 半径 0.2~0.4 mm

微粒设置于绝缘子凸面 19 mm 处,研究其形状及附着方式对电场分布影响,具体电场分布情况如图 13 所示。

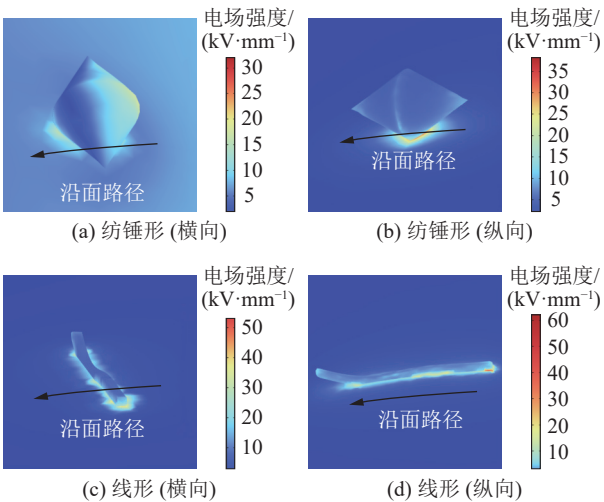


图 13 微粒形状与附着方式对绝缘子表面电场分布影响
Fig.13 Effect of particle shape and attachment on electric field strength over insulator surface

由图 13 可知,微粒形状和附着方式对绝缘子

表面电场畸变具有明显影响。与球形微粒相比, 纺锤形微粒、线形微粒均造成绝缘子表面电场严重畸变。以线形微粒为例, 电场强度最大值为 57.2 kV/mm, 电场畸变程度均大于球形微粒附着情况。

以纺锤形微粒为例, 附着方式由横向变为纵向, 绝缘子表面电场强度最大值由 25.3 kV/mm 增至 33.6 kV/mm, 增幅为 32.81%; 线形微粒附着方式由横向变为纵向, 电场强度最大值由 47.9 kV/mm 增至 57.2 kV/mm, 增幅为 19.42%。微粒附着方式不同, 对绝缘子表面电场影响程度也不同, 纵向附着方式会造成更加严重的电场畸变, 绝缘子闪络风险增加。根据微粒附着方式和绝缘子表面电场分布可知, 线形微粒尺寸大、纵向附着时, 微粒首末端存在较大电势差, 附着位置的绝缘子表面电势分布极不均匀, 同时电场畸变程度严重。

根据 GB/T 5593—2015, 盆式绝缘子(95% 氧化铝陶瓷)直流击穿场强 E_{DC} 为 18 kV/mm。相比于球形微粒, 上述形状不规则的纺锤形及线形微粒导致绝缘子表面电场强度最大值均超过 E_{DC} , 引起绝缘子表面电场严重畸变, 显著增大了绝缘子闪络风险, 威胁直流 GIL 安全运行。

3.3 微粒附着位置

GIL 运行时绝缘子凸面、凹面均有可能附着金属微粒, 并且随机分布在不同位置, 因此有必要研究微粒附着位置对电场影响。文中以 1.5 mm 半径微粒为例, 研究微粒附着位置对绝缘子表面电场分布影响, 如表 4 所示。

表 4 微粒附着位置对电场影响

Table 4 Effect of attachment position on electric field

单位: kV/mm

电势区	凸面 $E_{\max}$	凹面 $E_{\max}$	凸面 E_{av}	凹面 E_{av}
高电势区	6.421 5	6.741 2	1.615 9	1.740 3
中电势区	5.461 8	5.798 3	1.505 9	1.671 4
低电势区	4.419 7	4.670 9	1.402 1	1.517 8

由表 4 可知, 微粒附着位置不同, 绝缘子表面电场畸变程度存在如下差异:

(1) 微粒附着在相同电势区, 凹面处的微粒附近电场畸变程度明显大于凸面, 凹面附着微粒对绝缘性能影响更为严重。

(2) 微粒附着在不同电势区, 绝缘子表面电场畸变程度存在明显差异。高电势区电场畸变程度最大, 中电势区、低电势区电场畸变程度相对较小。

当金属微粒附着位置不同时, 微粒接触的绝缘

子表面曲率、电势也不同。微粒附着时绝缘子表面曲率、电势与电场分布的关系如图 14 所示, 微粒附着位置的曲率越大, 电势越高, 引起的电场畸变也更加严重。

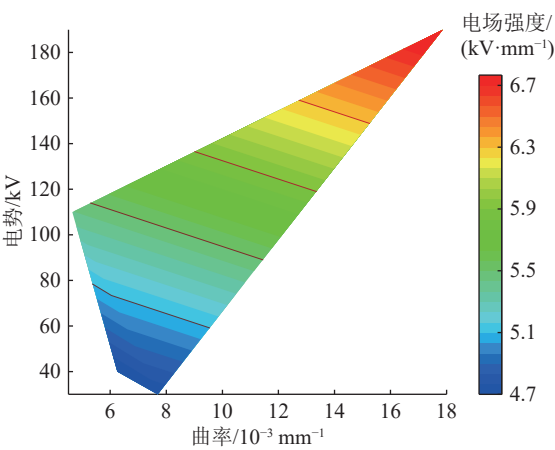


图 14 绝缘子曲率及电势对金属微粒电场畸变影响
Fig.14 Effect of insulator curvature and potential on electric field distortion of metal particles

为分析金属微粒附着位置的曲率对电场影响, 选取绝缘子在凸面及凹面 19 mm 处, 如图 15 所示。曲率变化前, 绝缘子 A 处曲率半径 r_a 为 44 mm, B 处曲率半径 r_b 为 129 mm; 曲率变化后, 绝缘子 A 处曲率半径 r_a 为 96 mm, B 处曲率半径 r_b 为 80 mm。当 1.5 mm 半径球形金属微粒附着在绝缘子沿面距离 19 mm 处时, 表面电场分布如图 16 所示。

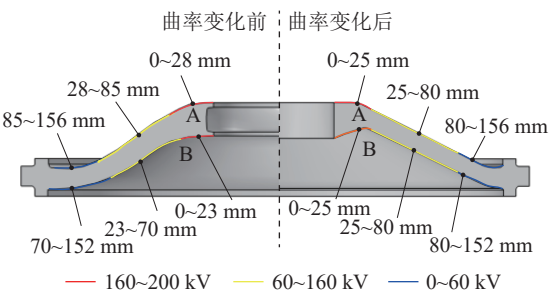
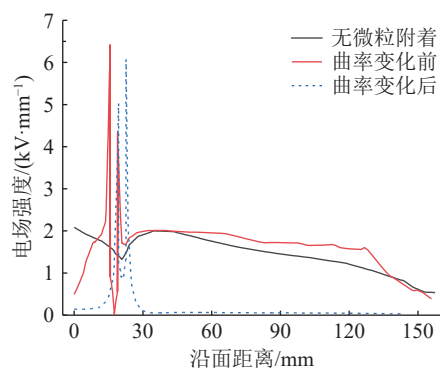


图 15 绝缘子曲率变化情况
Fig.15 Variation of insulator curvature

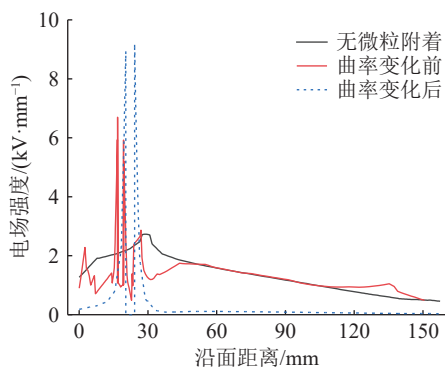
由图 16 可知, 绝缘子凸面 A 处曲率半径增大即曲率减小时, 电场强度最大值由原来的 6.42 kV/mm 降低至 6.17 kV/mm, 电场畸变程度略有减小。绝缘子凹面 B 处曲率半径减小即曲率增大时, 电场强度最大值由原来的 6.74 kV/mm 升高至 9.28 kV/mm, 电场畸变程度明显增大。综上可知, 金属微粒附着在绝缘子表面时, 绝缘子凸面曲率对金属微粒电场畸变程度影响较小, 而绝缘子凹面曲率对电场畸变影响较大。

3.4 微粒聚集方式

实际运行中的 GIL 绝缘子表面还可能出现金



(a) 绝缘子凸面电场

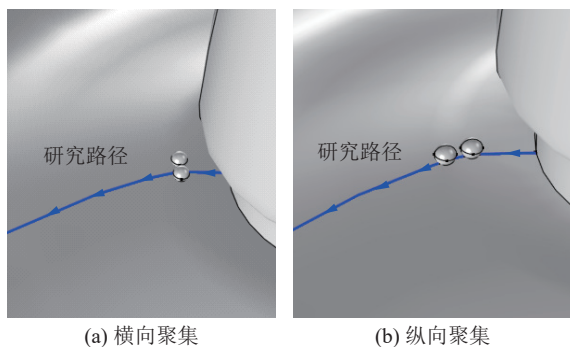


(b) 绝缘子凹面电场

图 16 绝缘子曲率对其表面电场分布影响

Fig.16 Effect of insulator curvature on the electric field distribution over insulator surface

属微粒聚集现象,并且微粒尺寸越小,聚集概率越大。高电势区附着的微粒引起电场畸变更严重,因此文中以 0.25 mm 半径微粒为例,研究微粒以横向、纵向两种方式聚集附着在绝缘子高电势区的情形,如图 17 所示。



(a) 横向聚集

(b) 纵向聚集

图 17 绝缘子表面微粒聚集示意

Fig.17 Schematic of particle aggregation over insulator surface

绝缘子表面出现微粒聚集时,电场分布如图 18 所示。微粒横向聚集,电场强度最大值为 32.93 kV/mm,超过 GB/T 5593—2015 要求的绝缘子直流击穿场强值,此时电场畸变较为严重,绝缘子表面闪络概率增大。微粒纵向聚集,电场强度最大值约为 200 kV/mm,远超绝缘子直流击穿场强值,微粒

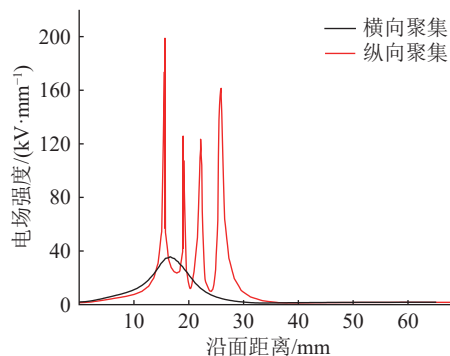


图 18 微粒聚集方式对绝缘子表面电场分布影响

Fig.18 Effect of particle aggregation on the electric field distribution over insulator surface

聚集处极易发生闪络,导致绝缘材料放电击穿。

3.5 电压极性反转时微粒附近电场畸变

当绝缘子凸面高电势区 19 mm 处附着 1.5 mm 金属微粒,且 GIL 发生电压极性反转时,绝缘子凸面电场分布变化情况如图 19 所示。 $t=0$ s 时,直流 GIL 发生电压极性反转; $t=60$ s 时,金属微粒附近区间发生严重电场畸变,电场强度最大值由原来的 6.42 kV/mm 增至 159.3 kV/mm; $t=12$ h 时,金属微粒附近电场畸变程度明显减弱,但电场强度最大值仍较电压极性反转前有所增大。

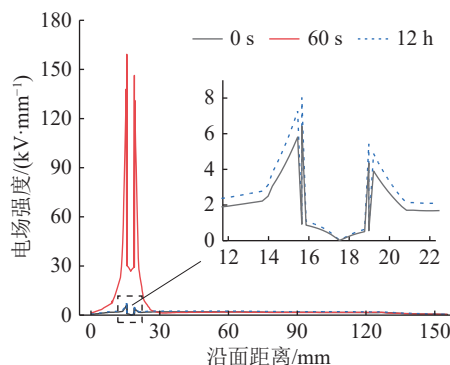


图 19 极性反转对绝缘子表面电场分布影响

Fig.19 Effect of polarity reversal on the electric field distribution over insulator surface

当直流 GIL 存在电压极性反转工况时,附着金属微粒的绝缘子表面电场强度最大值在 $t=60$ s 时增至原来的 24.8 倍,电场畸变程度显著增大。随着时间推移, $t=12$ h 时绝缘子表面电场逐渐恢复到电压极性反转前的分布情况, $E_{\max}$ 变为原来的 1.25 倍,绝缘子表面电场畸变情况相比反转前更为严重。

4 结论

文中结合直流 GIL 运行工况,并考虑电压极性对直流 GIL 的影响,分析了金属微粒缺陷的形状、尺寸、附着位置以及微粒聚集方式对盆式绝缘子电场分布的影响,主要结论如下:

(1) 绝缘子无微粒附着时, 其表面电势和电场均呈现梯度分布。绝缘子表面曲率越大, 电势分布越不均匀, 电场畸变程度越大。当直流 GIL 发生电压极性反转时, 绝缘子表面电场畸变程度在 60 s 内显著增大; 经过 12 h 后, 其绝缘子表面电场分布基本恢复至电压反转前的状态。

(2) 绝缘子表面附着微粒时, 在绝缘子与微粒的交界处电场发生明显畸变, 此时场强最大值超过绝缘子的安全运行阈值。对于毫米级微粒, 其尺寸对绝缘子表面电场畸变的影响存在边界递减效应。

(3) 微粒的形状、聚集方式、附着位置电势以及附着点的表面曲率是影响绝缘子表面电场畸变程度的主导因素。微粒形状不规则或者呈纵向聚集会使电场畸变程度进一步加剧; 微粒附着位置的绝缘子表面曲率越大、电势越高, 微粒引起的电场畸变也更加严重。

(4) 附着金属微粒的绝缘子在电压极性反转时, 电场强度最大值增至原来的 24.8 倍, 电场畸变程度显著。随着时间推移, 金属微粒附近电场畸变程度减弱, 但其电场强度最大值仍为电压极性反转前的 1.25 倍。

参考文献:

- [1] 贾云飞, 汲胜昌, 吕亮. GIL 内金属微粒在直流电压下的运动特性分析[J]. 电力工程技术, 2020, 39(6): 124-131.
JIA Yunfei, JI Shengchang, LYU Liang. Motion characteristic of metal particles in GIL under DC voltage[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(6): 124-131.
- [2] 王刚, 魏建巍, 贺永明, 等. ± 200 kV 直流盆式绝缘子的研制[J]. 绝缘材料, 2021, 54(4): 64-71.
WANG Gang, WEI Jianwei, HE Yongming, et al. Development of ± 200 kV DC basin insulator[J]. Insulating Materials, 2021, 54(4): 64-71.
- [3] 乔宇娇, 唐泽华, 高鹏, 等. 不同环境因素下 GIL 温度场分布特性研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(3): 136-143, 150.
QIAO Yujiao, TANG Zehua, GAO Peng, et al. Distribution characteristics of GIL temperature field under different environmental factors[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(3): 136-143, 150.
- [4] 马彦琴, 杨刚, 李湛宇, 等. 计及系统状态的多端柔性直流输电系统可靠性评估及灵敏度分析[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(6): 98-107.
MA Yanqin, YANG Gang, LI Zhanyu, et al. Reliability assessment and sensitivity analysis of multi-terminal VSC-HVDC system considering system status[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(6): 98-107.
- [5] 李铜林, 冯媛, 黄亚欧, 等. 柔性直流输电技术及提高 IGBT 元件运行稳定性的策略研究[J]. 南方能源建设, 2023, 10(5): 34-40.
LI Tonglin, FENG Yuan, HUANG Yaou, et al. Research on flexible HVDC transmission technology and strategies for improving the operational stability of IGBT components[J]. Southern Energy Construction, 2023, 10(5): 34-40.
- [6] 李康, 黄萌, 查晓明, 等. 高压直流输电系统可靠性分析方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(9): 174-187.
LI Kang, HUANG Meng, ZHA Xiaoming, et al. An overview of reliability analysis methods for an HVDC transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(9): 174-187.
- [7] 程骁, 顾乔根, 任旭超, 等. 海上风电柔性直流输电换流变差动保护的适应性分析[J]. 浙江电力, 2024, 43(3): 8-18.
CHENG Xiao, GU Qiaogen, REN Xuchao, et al. Adaptability analysis on differential protection of converter transformers in a VSC-HVDC transmission system connected to offshore wind farms[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(3): 8-18.
- [8] 杨朝锋, 臧春艳, 汤会增, 等. 特高压 GIL 现场交接试验标准研究[J]. 高压电器, 2023, 59(5): 75-83.
YANG Chaofeng, ZANG Chunyan, TANG Huizeng, et al. Research on the standards of hand-over acceptance tests of UHV GIL[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(5): 75-83.
- [9] 彭宗仁, 张鹏飞, 刘鹏, 等. 苏通综合管廊工程特高压 GIL 绝缘关键技术[J]. 高电压技术, 2023, 49(10): 4046-4057.
PENG Zongren, ZHANG Pengfei, LIU Peng, et al. Key insulation technology of UHV GIL in sutong utility tunnel project[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4046-4057.
- [10] 梁芳蔚, 张长虹, 吕金壮, 等. 直流气体绝缘输电线路关键问题及装备研发现状综述[J]. 高压电器, 2023, 59(9): 1-11.
LIANG Fangwei, ZHANG Changhong, LYU Jinzhuang, et al. Review of key problems and development status of DC gas insulated transmission line[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(9): 1-11.
- [11] 董曼玲, 臧春艳, 詹振宇, 等. GIL 内部金属微粒问题研究进展[J]. 高压电器, 2024, 60(1): 1-14.
DONG Manling, ZANG Chunyan, ZHAN Zhenyu, et al. Research progress on metal particle issues inside GIL[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(1): 1-14.
- [12] 黄宵宁, 刘锦, 杨成顺, 等. 典型表面状态下的绝缘子空间电场特性研究[J]. 电力工程技术, 2020, 39(3): 144-150.
HUANG Xiaoning, LIU Jin, YANG Chengshun, et al. Electric field characteristics of polluted insulator space under typical surface state[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(3): 144-150.
- [13] 李成学, 吕邦欢. 基于带电颗粒动态积污的绝缘子电场分布研究[J]. 高压电器, 2024, 60(5): 147-155, 170.
LI Chengxue, LYU Banghuan. Research on electric field distribution of insulators based on dynamic pollution accumulation of charged particles[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(5): 147-155, 170.
- [14] 李静, 杨小娟, 刘树鑫, 等. 污秽覆冰绝缘子动态闪络特性分析[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(22): 9378-9383.

- LI Jing, YANG Xiaojuan, LIU Shuxin, et al. Analysis of dynamic flashover characteristics of polluted iced insulators[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(22): 9378-9383.
- [15] 薛建议, 王涵, 李科峰, 等. 直流 GIL 中盆式绝缘子表面电荷分布特性研究[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(20): 6164-6172.
XUE Jianyi, WANG Han, LI Kefeng, et al. Research on charge distribution characteristics on spacer surface in DC GIL[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(20): 6164-6172.
- [16] 李静, 刘伟. 盐密变化对不同材质绝缘子闪络特性的影响[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(12): 4748-4753.
LI Jing, LIU Wei. Effect of salt density change on flashover characteristics of different material insulators[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(12): 4748-4753.
- [17] 常亚楠, 王健, 李庆民, 等. 交直流气体绝缘管道输电设备微粒污染治理措施研究进展[J]. *高压电器*, 2021, 57(10): 91-100, 110.
CHANG Yanan, WANG Jian, LI Qingmin, et al. Research progress of particle contamination suppression measures in AC and DC gas-insulated transmission equipment[J]. *High Voltage Apparatus*, 2021, 57(10): 91-100, 110.
- [18] 丁然, 赵科, 李洪涛, 等. 交流 GIL 内金属微粒的受力及运动特性分析[J]. *高压电器*, 2022, 58(5): 70-79.
DING Ran, ZHAO Ke, LI Hongtao, et al. Force and motion characteristic analysis of metal particles in AC GIL[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(5): 70-79.
- [19] 高山, 丁然, 赵科, 等. 直流 GIL 内金属微粒的落点分布研究[J]. *高压电器*, 2022, 58(4): 32-39.
GAO Shan, DING Ran, ZHAO Ke, et al. Study on drop point distribution of metal particles in DC GIL[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(4): 32-39.
- [20] 胡智莹, 魏来, 耿秋钰, 等. 直流 GIS/GIL 中线形金属微粒群飞萤运动现象与危险程度评估[J]. *中国电机工程学报*, 2024, 44(15): 6219-6229.
HU Zhiying, WEI Lai, GENG Qiuyu, et al. Firefly movement phenomenon of wire particle swarm and risk assessment in DC GIS/GIL[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(15): 6219-6229.
- [21] 常亚楠, 耿秋钰, 胡智莹, 等. 直流电应力下线形微粒飞萤运动物理机制与临界起始判据[J]. *电工技术学报*, 2023, 38(3): 648-658.
CHANG Yanan, GENG Qiuyu, HU Zhiying, et al. Physical mechanism and critical starting criterion of wire particle firefly movement under DC electric stress[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2023, 38(3): 648-658.
- [22] WENGER P, BELTLE M, TENBOHLEN S, et al. Combined characterization of free-moving particles in HVDC-GIS using UHF PD, high-speed imaging, and pulse-sequence analysis[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2019, 34(4): 1540-1548.
- [23] WU Z H, LI Z K, LIU P, et al. Simulation and analysis on motion behavior of metal particles in AC GIL[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2022, 29(2): 567-574.
- [24] NAN J, LI H, WAN X D, et al. Study on fast contamination characteristics of cap and pin insulators in straight flow wind tunnel simulation[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 125912-125919.
- [25] 姜昀芃, 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.
JIANG Yunpeng, LI Li, LU Ming, et al. Study on particle diameter distribution characteristics and influence factors of adhered particles on the porcelain insulator surface[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(3): 611-619.
- [26] 沙伟燕, 罗艳, 马鹏欢, 等. 不同金属微粒缺陷下 GIS 盆式绝缘子表面放电与电场特性研究[J]. *绝缘材料*, 2023, 56(9): 89-93.
SHA Weiyan, LUO Yan, MA Penghuan, et al. Study on surface discharge and electric field characteristics of GIS basin insulator with different metal particle defects[J]. *Insulating Materials*, 2023, 56(9): 89-93.
- [27] 邓瑾怡, 高凯, 任茂鑫, 等. 110 kV GIS 内不同形态金属微粒附着缺陷电场分析[J]. *电气工程学报*, 2024, 19(2): 316-324.
DENG Jinyi, GAO Kai, REN Maoxin, et al. Electric field analysis of multi-shape metal particle adhesion defects in 110 kV GIS[J]. *Journal of Electrical Engineering*, 2024, 19(2): 316-324.
- [28] 何柏娜, 孔杰, 姜仁卓, 等. 盆式绝缘子金属丝缺陷下电场分布仿真研究[J]. *绝缘材料*, 2021, 54(1): 39-44.
HE Baina, KONG Jie, JIANG Renzhuo, et al. Simulation research on electric field distribution of basin insulators with metal wire defect[J]. *Insulating Materials*, 2021, 54(1): 39-44.
- [29] 律方成, 马康, 刘华琦, 等. 直流 GIL 微粒陷阱的捕获机理分析与优化设计[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(15): 5751-5763.
LYU Fangcheng, MA Kang, LIU Huaqi, et al. Capture mechanism analysis and optimization design of DC GIL particle trap[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(15): 5751-5763.
- [30] 梁虎成, 王雨帆, 杜伯学, 等. 表层非线性电导盆式绝缘子表面电荷分布与沿面放电特性[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(2): 835-844.
LIANG Hucheng, WANG Yufan, DU Boxue, et al. Surface charge distribution and discharge behaviors of basin spacer with surface nonlinear conductivity[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2022, 42(2): 835-844.
- [31] KUMARA S, ALAM S, HOQUE I R, et al. DC flashover characteristics of a polymeric insulator in presence of surface charges[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2012, 19(3): 1084-1090.
- [32] LI C Y, HU J, LIN C J, et al. The potentially neglected culprit

- of DC surface flashover: electron migration under temperature gradients[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 3271.
- [33] 张长虹, 张博雅, 李明洋, 等. 高压直流 GIL 设备绝缘关键技术研究综述[J]. *高电压技术*, 2023, 49(3): 920-936.
- ZHANG Changhong, ZHANG Boya, LI Mingyang, et al. Review of key insulation technologies of HVDC GIL[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(3): 920-936.
- [34] 王文渠, 高宇, 赵慧存, 等. 振动诱发金属微粒弹跳对圆盘绝缘子表面电荷积聚的影响[J]. *绝缘材料*, 2022, 55(11): 63-70.
- WANG Wenqu, GAO Yu, ZHAO Huicun, et al. Effect of vibration induced metal particle bouncing on surface charge accumulation of disk spacer[J]. *Insulating Materials*, 2022, 55(11): 63-70.
- [35] 李彦昭, 杨国华, 伍弘, 等. 悬浮沙尘环境下瓷绝缘子沿面电位与电场的变化规律[J]. *绝缘材料*, 2023, 56(8): 87-93.

LI Yanzhao, YANG Guohua, WU Hong, et al. The variation law of surface potential and electric field of porcelain insulator in suspended sand and dust environment[J]. *Insulating Materials*, 2023, 56(8): 87-93.

作者简介:



尉元龙

尉元龙(2000), 男, 硕士在读, 研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail: 1491169675@qq.com);

何柏娜(1977), 女, 博士, 副教授, 通信作者, 研究方向为电力系统仿真及高电压绝缘技术;

崔荣喜(1979), 男, 硕士, 研究员级高级工程师, 从事电力系统运行与控制、新能源并网等工作。

Effect of metal particles on the electric field in DC GIL basin insulator

WEI Yuanlong¹, HE Baina¹, CUI Rongxi², DAI Weihai¹, ZHANG Dongjin¹, WANG Shuo¹

(1. College of Electrical and Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255000, China; 2. State Grid Shandong Electric Power Company Rizhao Power Supply Company, Rizhao 276826, China)

Abstract: Aiming at the safety threat posed by metal particle contamination inside DC gas-insulated transmission line (GIL), where metal particles tend to adhere to the surface of basin insulators, a simulation model reflecting the actual operating conditions in DC GIL is established, and the impact mechanism of metal particles on the insulator's surface electric field is analyzed. In this paper, the millimeter-sized particle is selected, and the effect of various factors, such as particle size, shape, attachment location, and the aggregation of multiple particles, is researched on the electric field distribution of basin insulators. The findings indicate that the safety threshold of the insulator surface electric field strength is exceeded with a single metal particle adhesion defect. There is a boundary-diminishing effect of particle size on electric field distortion. The potential and curvature of particle attachment location are positively correlated with the degree of electric field distortion on the insulator surface. Furthermore, when particles are irregularly shaped, such as conical or linear, or when multiple particles aggregate longitudinally, there is a significant increase in the degree of electric field distortion on the insulator surface. The electric field distortion near the particles becomes more severe under the condition of voltage polarity reversal.

Keywords: gas-insulated transmission line (GIL); metal particle; basin insulator; millimeter-sized particle; electric field distortion; voltage polarity reversal

(编辑 吴昊)