

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.10.025

电—热—流多场耦合下交流 GIS 绝缘子金属微粒运动特性与抑制方法

董 浩, 王 涛, 赵树刚, 杨文钰, 任朝君

(国网德州供电公司, 山东 德州 253000)

摘要: 高压交流气体绝缘金属封闭开关(HVAC GIS)设备内部触指等金属结构在工作运行过程中磨损易产生金属微粒与粉尘等污染物,残留的自由金属微粒在交流电场下荷电运动,附着在绝缘子表面易引发电场畸变与沿面放电等绝缘故障,影响电力系统安全稳定运行。文中基于高压交流 GIS 盆式绝缘子仿真模型,模拟了 GIS 设备内部电—热—流多物理场耦合分布,分析了绝缘子周围金属微粒的受力与运动特性,仿真研究了金属微粒释放位置与粒径尺寸对运动行为的影响。针对于金属微粒向绝缘子表面的吸附问题,提出了基于表面氟化的 GIS 绝缘子金属微粒抑制方法。基于缩比盆式绝缘子试样,通过实验方法对比了均匀绝缘子与氟化绝缘子的金属微粒运动特性,验证了氟化绝缘子对金属微粒的吸附抑制与交流闪络电压提升效果。

关键词: 交流 GIS; 金属微粒; 盆式绝缘子; 运动行为

Motion Characteristics and Suppression Methods of Metal Particles on AC GIS Insulation Spacer Under Electro-thermal-fluid Multi-field Coupling

DONG Hao, WANG Tao, ZHAO Shugang, YANG Wenyu, REN Zhaojun

(State Grid Dezhou Power Supply Company, Shandong Dezhou 253000, China)

Abstract: During the operation of high-voltage alternating current gas-insulated switchgear(HVAC GIS), such metal structures as contact fingers are subject to wear and tear, which can generate contaminants including metallic particles and dust. The residual free metallic particles become charged and move under the AC electric field. When they attach to the surface of insulating spacer, they are prone to cause electric field distortion and insulation failures such as surface flashover, thereby compromising the safe and stable operation of the power system. In this paper, based on a simulation model of the insulating spacer in HVAC GIS, the electro-thermal-fluid multi-physics field coupling distribution inside GIS equipment is simulated. The force and motion characteristics of metallic particles around the spacer are analyzed, and the effects of release position and particle size on the motion behavior are studied through simulation. To address the issue of metallic particle adhesion to the insulating spacer surface, a suppression method based on surface fluorination of GIS insulating spacer is proposed. Based on the scaled insulating spacer samples, the motion characteristics of metal particles around the uniform and the fluorinated insulating spacers are experimentally compared. The adsorption inhibition effect of fluorinated spacer on metal particles and the enhancement effect of AC flashover voltage are verified.

Key words: AC-GIS; metal particles; insulation spacer; motion characteristics

0 引言

近年来,随着不可再生化石能源的日益紧缺以及全球性环境问题的不断加剧,中国在生态环境保

护与清洁能源的可持续发展方面面临着显著的挑战。为了有效应对目前存在的能源—负荷逆向分布问题,促进区域间资源的合理与高效利用,中国正在积极推动高压电网的建设。通过构建综合能

收稿日期:2026-05-11; 修回日期:2026-07-31

基金项目:国网山东省电力公司科技项目(520608240002)。

Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company(520608240002).

源互补平台,促进中西部地区丰富的水电、太阳能等清洁能源进行大规模的转移和利用,提高资源利用率,有效地平衡当前面临的环境与能源问题。高压输电技术凭借其远距离传输能力、传输容量大、传输效率高等显著优势,已逐渐成为解决能源分配不均问题的首选方案,为中国的可持续能源发展与应用奠定坚实的基础^[1-5]。

气体绝缘金属封闭开关设备(gas insulated switchgear, GIS)凭借其结构紧凑、占地面积小、可靠性高、环境适应能力出色以及维护需求较低等优势,满足了现代电力系统对安全性和稳定性的高要求,迅速发展为大型电力枢纽的优选技术方案^[6-10]。在GIS设备中,盆式绝缘子发挥着机械支撑、隔离气室与电气绝缘等重要作用,是GIS设备的核心绝缘部件^[11]。然而,近年来随着GIS设备在小型化和紧凑化设计方面的持续发展,盆式绝缘子运行工况日益复杂,面临着沿面放电故障频发的挑战^[12-16]。根据故障统计结果,GIS设备中绝缘性故障所占比高达57.3%,而在绝缘故障中接近40%的案例是由GIS内部金属异物污染引发的绝缘子异常放电或沿面闪络问题,设备内部自由金属微粒已成为影响GIS绝缘性能的重要影响因素^[17-22]。因此,研究GIS设备内部金属微粒污染的抑制措施,减少金属微粒对表面绝缘性能的负面影响,对于增强GIS设备以及整个电力系统的运行可靠性,具有至关重要的意义。

为了限制金属微粒在交流GIS绝缘子表面附着、提升系统的绝缘性能,国内外学者对金属微粒的运动抑制措施进行了大量技术研究,例如在绝缘子附近增设微粒陷阱、在电极表面覆膜以及安装驱赶电极等^[23-27]。虽然以上方法在金属微粒抑制方面各有成效,但这些措施在长期运行的稳定性、安装与维护的便利性及经济效益方面均存在不足,并未完全消除金属微粒对设备的潜在威胁。绝缘子表面氟化主要通过绝缘子表面材料进行表层化学结构修饰,改变交流电场下绝缘材料沿面电场分布,以实现绝缘子周围带电微粒运动行为的调控^[27-30]。研究表明氟化后绝缘子的静态接触角降低,表面电导率提升,表面电荷的消散速度加快,有助于缓解电极附近的电场畸变。针对于绝缘子表面氟化改性方法具有操作工艺简单,工业化基础扎实,成膜性能稳定性高等优势,该方法在交流GIS金属微粒抑制方面具有较大应用潜力。

文中针对于高压交流GIS设备中金属微粒的污染问题,基于交流GIS盆式绝缘子模型,模拟了电—热—流耦合场下金属微粒在GIS设备中的荷电、受

力与运动特性,研究了不同释放位置与微粒粒径等参数对金属微粒运动行为的影响。在此基础上,文中提出了一种基于表面氟化绝缘子的金属微粒污染问题治理思路,抑制绝缘子对自由金属微粒的吸附作用,本研究对提升GIS设备运行的绝缘可靠性具有重要的参考价值,能够为未来的电力设备发展和应用提供更为坚实的理论基础和技术支持。

1 仿真模型与材料参数

1.1 电—热—流多物理场耦合仿真模型

基于Comsol Multiphysics多物理场耦合仿真软件,搭建了500 kV交流GIS仿真计算模型,模型网格尺寸设置小于1 mm。500 kV高压交流GIS及盆式绝缘子的仿真模型见图1。在仿真模型中,高压导体与接地外壳同轴布置,与水平面保持平行,其导体与外壳直径分别为180、500 mm。盆式绝缘子位于高压电极与接地外壳之间,厚度为30 mm,其材料为环氧树脂/Al₂O₃复合材料,相对介电常数为5。在GIS设备模型内部其他区域填充气压为0.5 MPa的SF₆气体,气体区域的相对介电常数设置为1。

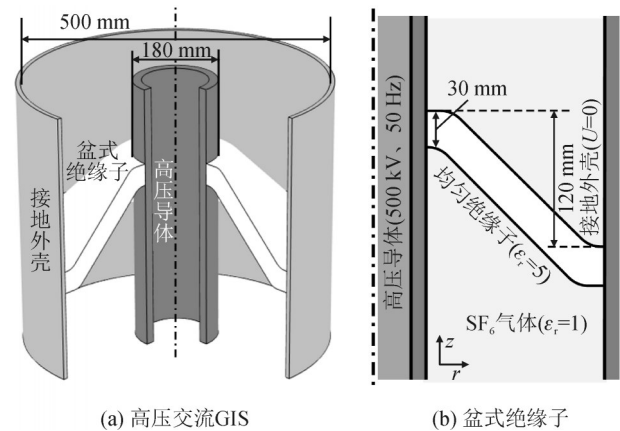


图1 500 kV高压交流GIS及盆式绝缘子的仿真模型

Fig. 1 Simulation model of the 500 kV HVAC GIS and basin-type insulation spacer

在高压交流GIS模型的基础上,对模型内部的盆式绝缘子与绝缘气体区域进行电—热—流多物理场耦合仿真。根据麦克斯韦方程,交流电场下GIS电场遵循电容分压规律,其电场分布满足如下静电场分布方程:

$$E = -\nabla\varphi \quad (1)$$

$$D = \varepsilon_0 \varepsilon_r E \quad (2)$$

$$\nabla \cdot D = \rho \quad (3)$$

式(1)-(3)中: E 为电场强度; φ 为电势; D 为电位移; ε_0 与 ε_r 分别为真空与相对介电常数; ρ 为电荷密度。在边界条件中设置Dirichlet条件,高压导体连

接周期性变化的 500 kV 交流电压, 频率为 50 Hz, 金属外壳接地, 电势为 0, 导体电势 U_{HV} 与外壳电势 U_{GND} 为

$$\begin{cases} U_{HV}(t) = U_m \cos(2\pi ft + \phi) \\ U_{GND} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: U_m 为交流电压的峰值; f 为交流电压的频率; ϕ 为初始相位; t 为时间。在交流电压的作用下, GIS 设备内部电场强度与方向也呈现周期性变化。在电压峰值时刻, 高压交流 GIS 绝缘子的电场分布见图 2。GIS 设备内部电场强度从高压导体至接地外壳逐渐下降, 在绝缘子与高压导体的接触区域出现了较为明显的电场强度提高。接地外壳表面附近电场强度相对较低, 但在绝缘子的影响下局部区域也出现了电场畸变现象。

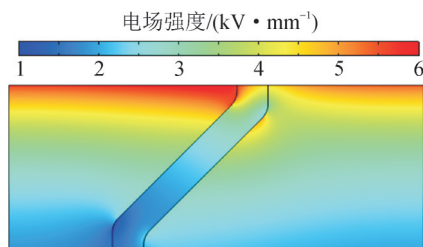


图2 GIS 绝缘子交流电场分布

Fig. 2 AC electric field distribution of the GIS basin spacer

在热一流多物理场耦合仿真中, 由于电流的热效应, 高压导体内部通流产热, 作为模型的热源。热量在 GIS 内部的主要传递方式包括: ①固体介质之间的热传导; ②固体介质与气体环境之间的热对流; ③固体介质表面对其他介质的热辐射。在热场仿真中, GIS 设备内部温度同样设置边界 Dirichlet 条件, 额定运行条件下导体温度 T_{HV} 与外壳温度 T_{GND} 为

$$\begin{cases} T_{HV} = T_a + \Delta T \\ T_{GND} = T_a \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中: T_a 为环境温度, 设置为 30 °C; ΔT 根据额定工作电流的热效应计算所得, 约为 40 °C; 因此, 导体温度 T_{HV} 为 70 °C^[8-12]。此外, 由于 GIS 设备内部绝缘气体密度受温度变化的影响, 在仿真模拟中同时考虑了气体流动现象对温度分布的影响。高压交流 GIS 绝缘子的温度分布见图 3(a)。在导体内部电流热效应的影响下, 高压导体附近的温度较高, 在径向方向上温度逐渐降低。由于接地外壳与外界环境的热对流作用, 外壳温度与环境温度相近。由于温度对气体相对介电常数等参数的影响较小, 不同温度梯度下交流电场分布变化较小, 因此在后续计算中, 忽略了温度对交流电场分布的影响。GIS 设备内部气体流动方向与流速分布情况见图 3(b)。高压导体与水平面平行放置。在温度的影响

下, SF_6 气体呈现循环流动的变化趋势, 在绝缘子表面与电极表面的流速较快, 其流速最大约为 5 mm/s。交流 GIS 腔体内部的气体流动会改变金属微粒运动过程中所受的气体阻力, 从而影响金属微粒的运动轨迹。

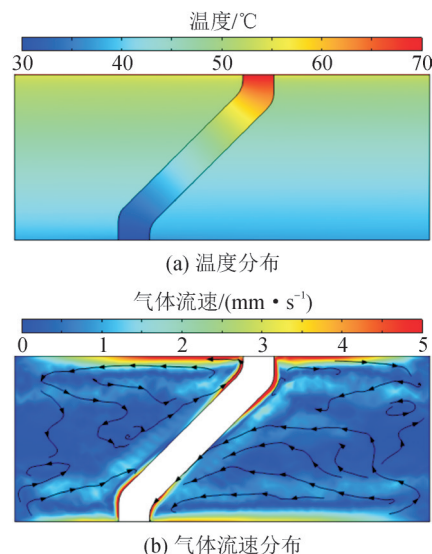


图3 高压交流 GIS 绝缘子温度与气体流速分布

Fig. 3 The temperature and airflow distributions of the HVAC GIS basin spacer

1.2 金属微粒运动仿真模型

在工作运行过程中, GIS 内触指结构多次运动后磨损容易产生金属微粒粉尘, 造成污染。散落的金属微粒粉尘在交流电压下荷电自由运动, 最终吸附在绝缘子表面, 引发绝缘子表面局部区域的电场畸变, 缩短绝缘距离, 最终引发放电与闪络事故, 降低了 GIS 盆式绝缘子的绝缘可靠性, 影响输电系统的安全稳定运行。本节以球形金属微粒为研究对象, 基于 1.1 节中 GIS 绝缘子附近电-热-流多场耦合分布结果, 建立了 GIS 内部金属微粒的荷电运动模型, 探究多场耦合状态下金属微粒的运动特性, 模型参数与前文保持一致。金属微粒与接地外壳碰撞后电荷电量 q 为^[14]

$$q = -\frac{1}{6} \pi^3 \varepsilon_0 \varepsilon_r E d^2 \quad (6)$$

式(6)中: E 为金属微粒与接地外壳接触位置的电场强度; d 为金属微粒的粒径大小。

GIS 绝缘子附近金属微粒的受力情况见图 4。

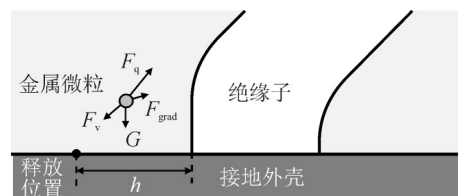


图4 GIS 绝缘子附近金属微粒受力示意图

Fig. 4 Schematic diagram of forces on the metal particle around the GIS basin spacer

考虑金属微粒所受库仑力 F_q 、重力 G 、电场梯度力 F_{grad} 、气体阻力 F_v 的作用,计算金属微粒在交流电场瞬态作用下的运动轨迹,金属微粒的受力情况为^[17-19]:

$$F_q = qE \quad (7)$$

$$G = \frac{1}{6}\pi d^3 g \rho_{Al} \quad (8)$$

$$F_{grad} = \rho \frac{1}{4}\pi d^3 \varepsilon_0 \varepsilon_r |\nabla E^2| \quad (9)$$

$$F_v = \frac{\pi d^2 \rho_g}{4} \left(\frac{12}{Re} + \frac{3}{1 + \sqrt{Re}} + 0.2 \right) (v_g - v_p)^2 \quad (10)$$

式(7)-(10)中: g 为重力加速度, m/s^2 ; q 为金属微粒带电量,C; ρ_g 为 SF_6 气体密度, kg/m^3 ; Re 为雷诺数; v_g 与 v_p 分别为 SF_6 气体流速与金属微粒运动速度, m/s 。根据金属微粒在GIS设备内部的受力分析,库仑力与电场梯度力受实时交流电场分布影响,其受力大小与方向随时间而变化。此外,由于不同区域内气体流速的不同,金属微粒在运动过程中所受的气体阻力也会发生变化。其中,库仑力为金属微粒运动的主要作用力。在接地外壳内表面释放金属微粒,根据不同时刻、不同位置与不同荷电状态的情况,实时计算受力结果,模拟金属微粒在GIS内部的运动轨迹。此外,通过改变金属微粒参数,比较具有不同粒径大小与释放位置的金属微粒运动行为规律。

2 金属微粒运动特性研究

2.1 释放位置

在接地电极表面不同位置释放粒径为0.2 mm金属微粒的运动特性见图5,金属微粒与绝缘子表面的距离分别为10、20、30 mm。当金属微粒在绝缘子凹面释放时,受实时交流电场作用,金属微粒的受力大小与方向发生周期性变化,呈现朝向绝缘子波动性跳跃的运动趋势。当与绝缘子相距较远时,金属微粒向绝缘子表面的运动趋势不变,最终附着在绝缘子表面。当金属微粒位于绝缘子凸面侧时,若其与绝缘子表面距离较短(<10 mm),金属微粒在电场力的作用下启举并附着在绝缘子表面。与凹面侧不同,当凸面侧金属微粒距离绝缘子表面距离较远(>20 mm)时,金属微粒远离绝缘子表面运动,不会向绝缘子表面吸附,因此此处的金属微粒对绝缘子的威胁性相对较低。

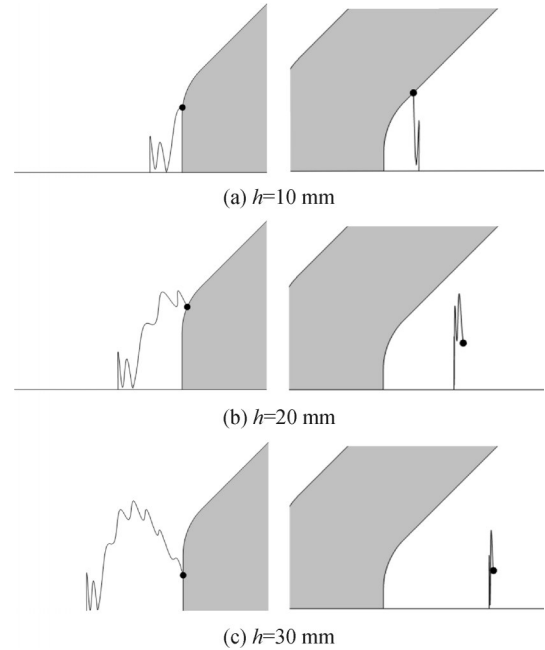


图5 GIS绝缘子附近不同位置释放金属微粒的运动特性
Fig. 5 Motion characteristics of metal particles released from different positions around the GIS basin spacer

2.2 金属微粒粒径

GIS绝缘子附近释放不同粒径金属微粒的运动特性见图6。释放位置距离绝缘子表面为10 mm,金属微粒粒径分别为0.1、0.2、0.4 mm。运动结果显示,当金属微粒粒径较大时,金属微粒质量与荷电量增加,重力与电场力明显增加,在运动过程中的波动次数增加,飞行高度下降,但朝向绝缘子表面的运动趋势不变。因此,粒径尺寸大小主要影响金属微粒的运动方式,对金属微粒的运动方向趋势影响较小。

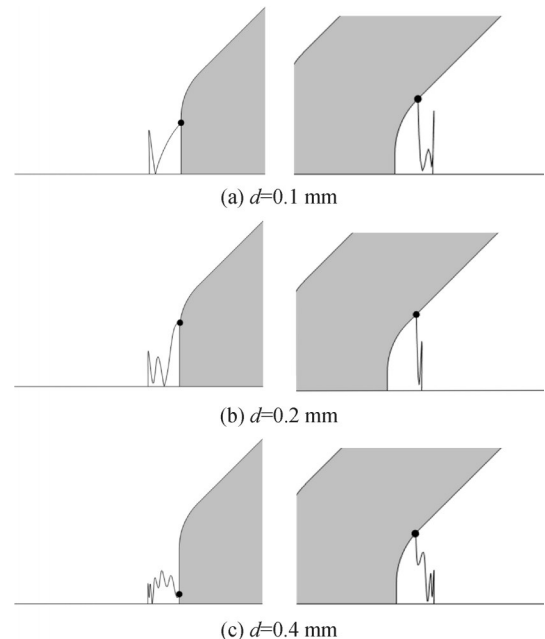


图6 GIS绝缘子附近释放不同粒径金属微粒的运动特性
Fig. 6 Motion characteristics of metal particles with different particle sizes released around the GIS basin spacer

3 金属微粒运动抑制方法

3.1 实验装置

本节基于缩比盆式绝缘子试样,实验测试了金属微粒在交流 GIS 绝缘子附近的运动特性,实验用缩比盆式绝缘子外径为 66.8 mm,其材料为环氧树脂/氧化铝复合材料。针对于金属微粒在绝缘子附近跳跃并吸附的问题,本节提出了一种基于绝缘子表面氟化改性的金属微粒抑制方法。氟气(F_2)具有极强的氧化性,可以与环氧树脂复合材料直接反应,在表层形成致密的氟化层,改变绝缘子材料的介电参数与电场分布,达到金属微粒运动特性调控的目的。氟化反应所用的气体为 N_2/F_2 混合气体, F_2 的占比为 12.5 vol%,反应釜内部温度保持为 25 $^{\circ}C$,氟化时间为 30 min。金属微粒运动的实验观测平台见图 7。在交流电压作用下,通过高速摄像机观测金属微粒的运动特性,记录交流电压施加前后金属微粒的运动位置。实验交流电压为 20 kV,频率为 50 Hz,实验用球形金属微粒粒径为 0.2 mm,释放位置位于接地外壳内表面,距绝缘子凹面接地三结合点 25 mm。

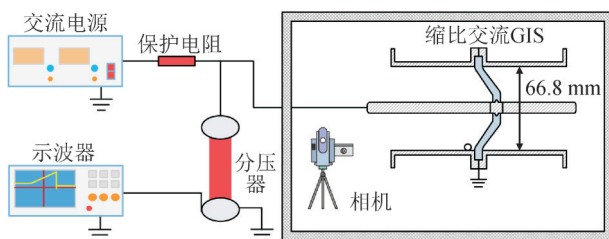


图7 金属微粒运动观测平台

Fig. 7 Metal particle movement observation platform

3.2 金属微粒运动与闪络特性

均匀绝缘子与氟化绝缘子附近金属微粒的运动特性见图 8。对于均匀绝缘子,在交流电压作用下,金属微粒在 GIS 接地外壳表面跳动,并向绝缘表面移动,最终与绝缘子发生碰撞,破坏绝缘子的绝缘性能。表面氟化处理后绝缘子表面电荷消散速度加快,绝缘子接地区域的交流电场强度和方向均发生了明显变化。外壳处法向电场强度减小,金属微粒跳跃高度下降,绝缘子附近轴向电场方向变化,金属微粒所受电场力方向改变,其运动状态也随之改变。因此,在实验中金属微粒仅在释放位置进行小幅度跳动,未出现向绝缘子表面的运动趋势,有效保护了绝缘子的表面绝缘性能。金属微粒的运动模式与仿真结果保持一致,该结果对交流 GIS 实际运行情况具有代表性。

均匀与氟化绝缘子的交流闪络电压特性见图 9。

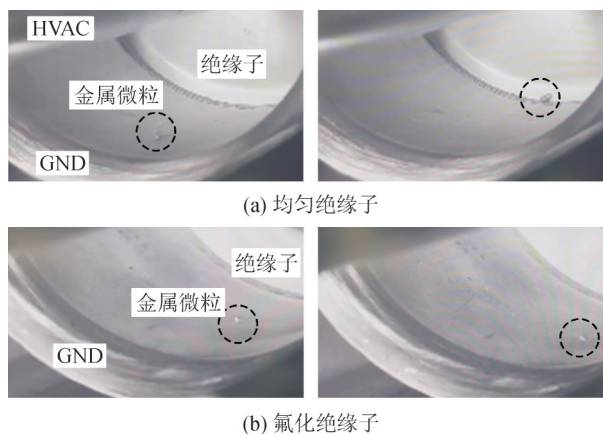


图8 均匀绝缘子与氟化绝缘子附近释放金属微粒的运动特性

Fig. 8 Motion characteristics of metal particles released near uniform and fluorinated basin spacer

闪络试验中导体电压的升压速率为 0.2 kV/s。交流闪络测试结果表明,在不放置自由金属微粒的条件下,均匀与氟化绝缘子的闪络电压接近,其差距仅约为 3%。在接地外壳表面放置自由金属微粒后,在交流电压作用下金属微粒跳跃运动至绝缘子表面,缩短绝缘距离,闪络电压下降了约 9.9%。对于氟化绝缘子,金属微粒未出现向绝缘子表面的运动趋势,因此对交流闪络电压的影响较小。在放置金属微粒的情况下,氟化绝缘子的交流闪络电压比均匀绝缘子高约 9%。

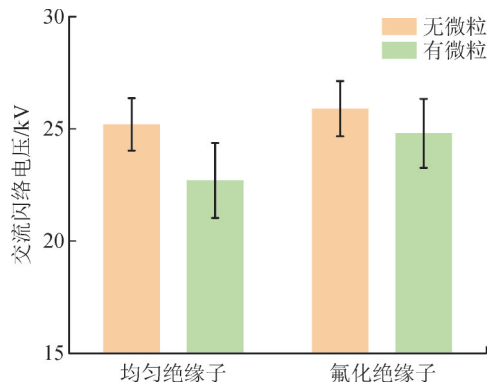


图9 不同绝缘子的交流闪络特性

Fig. 9 AC flashover characteristics of different basin spacer

4 结论

文中针对于高压交流 GIS 设备中金属微粒的污染问题,研究了 GIS 设备内部自由金属微粒的运动特性,提出了基于表面氟化的 GIS 绝缘子金属微粒抑制方法,主要结论如下:

1) 基于高压交流 GIS 盆式绝缘子模型,模拟了 GIS 内部电—热—流多物理场耦合分布情况。分析了金属微粒异物在 GIS 设备中的荷电、受力与运动

特性。在绝缘子凹面侧释放的自由金属微粒在接地外壳上跳动并趋向于绝缘子表面运动,凸面侧金属微粒仅在靠近绝缘子表面的小范围内受绝缘子的吸附作用。金属微粒粒径尺寸主要影响微粒的运动形态,而对运动方向影响较小。

2)为了抑制GIS内部自由金属微粒向绝缘子表面的吸附行为,提出了基于表面氟化的GIS绝缘子金属微粒抑制方法。基于缩比盆式绝缘子试样,实验观察了均匀与氟化绝缘子对金属微粒运动的影响。表面氟化处理后,在接地外壳表面释放的自由金属微粒仅在释放位置进行小幅度跳动,未出现向绝缘子表面的运动趋势。在放置金属微粒的条件下,氟化绝缘子的交流闪络电压相比较于均匀绝缘子提高了约9%。

参考文献:

- [1] 舒印彪,陈国平,贺静波,等.构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J].中国工程科学,2021,23(6):61-69.
Shu Yinbiao, Chen Guoping, He Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6):61-69.
- [2] 刘振亚,张启平.国家电网发展模式研究[J].中国电机工程学报,2013,33(7):1-10.
Liu Zhenya, Zhang Qiping. Study on the development mode of National power grid of China[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7):1-10.
- [3] 邱桂华,邝梓佳,吴树鸿.基于量测信息的新型电力系统综合负荷模型在线建模方法[J].电力科学与技术学报,2025,40(3):114-122.
Qiu Guihua, Kuang Zijia, Wu Shuhong. Online modeling method of comprehensive load model for new power system based on measurement information[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(3):114-122.
- [4] 李忠文,李夏乐,柏宇宁,等.考虑参数不确定性的新型电力系统分布式模型预测AGC方法研究[J].电力系统保护与控制,2026,54(2):36-47.
Li Zhongwen, Li Xiale, Bai Ningning, et al. Distributed model prediction AGC method for new power systems considering parameter uncertainty[J]. Power System Protection and Control, 2026, 54(2):36-47.
- [5] 汤广福,庞辉,贺之渊.先进交直流输电技术在中国的发展与应用[J].中国电机工程学报,2016,36(7):1760-1771.
Tang Guangfu, Pang Hui, He Zhiyuan. R & D and application of advanced power transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7):1760-1771.
- [6] Yao Hang, Du Boxue, Liang Hucheng, et al. DC/AC electric field relaxation with multidimensional functionally graded materials(ϵ/σ -MFGM) for offshore bipolar HVDC GIS spacer[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(5):2059-2066.
- [7] 王超,李文栋,陈泰然,等.550 kV GIS盆式绝缘子小型化设计(一)—几何形状优化[J].电工技术学报,2022,37(7):1847-1855.
Wang Chao, Li Wendong, Chen Tairan, et al. Compact design of 550 kV Basin-type spacer in gas insulated switchgear(part I)—structure optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(7):1847-1855.
- [8] Yao Hang, Du Boxue, Liang Hucheng, et al. Electric field regulation of DC-GIS spacer by surface conductivity gradient coatings under variable temperature gradients[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2025, 32(2):1094-1101.
- [9] 徐政.直流输电的基本特性及其应用模式概述[J].电力建设,2025,46(10):34-43.
Xu Zheng. Overview of basic characteristics and application modes of DC power transmission[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(10):34-43.
- [10] 任冲,崔明建.面向新型电力系统支撑需求的构网型技术多维量化评估体系综述[J].智慧电力,2026,54(3):1-11.
Ren Chong, Cui Mingjian. A review of multi-dimensional quantitative evaluation system for grid-forming technologies oriented towards support requirements of new power systems[J]. Smart Power, 2026, 54(3):1-11.
- [11] 孙秋芹,罗宸江,汪汛,等.特高压GIS盆式绝缘子沿面闪络特性研究综述[J].高压电器,2018,54(5):17-25.
Sun Qiuqin, Luo Chenjiang, Wang Feng, et al. Overview on the surface flashover of basin-type insulator in UHV GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(5):17-25.
- [12] 王增彬,刘姝嫔,周宏扬,等. GIS盆式绝缘子温度多物理场仿真方法[J].高电压技术,2019,45(12):3820-3826.
Wang Zengbin, Liu Shupin, Zhou Hongyang, et al. Multiphysics simulation method for GIS epoxy spacer temperature[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12):3820-3826.
- [13] 张震,林莘,余伟成,等. C_4F_7N/CO_2 和 C_4F_7N/N_2 混合气体热力学物性参数计算[J].高电压技术,2020,46(1):250-256.
Zhang Zhen, Lin Xin, Yu Weicheng, et al. Thermodynamic calculation of physical properties of C_4F_7N/CO_2 and C_4F_7N/N_2 [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1):250-256.
- [14] 纽春萍,矫璐璐,王小华,等.基于多场耦合的环保型GIS热特性分析[J].电工技术学报,2020,35(17):3765-3772.
Niu Chunping, Jiao Lulu, Wang Xiaohua, et al. Thermal characteristics analysis of environmentally friendly GIS based on multi-field coupling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(17):3765-3772.
- [15] 杜伯学,姚航,梁虎成,等.时变温差工况下直流GIL/GIS盆式绝缘子动态电场畸变抑制[J].电工技术学报,2024,39(9):2851-2859.
Du Boxue, Yao Hang, Liang Hucheng, et al. Electric field relaxation of basin spacer under variable temperature gradient in DC-GIL/GIS[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(9):2851-2859.
- [16] Hering M, Speck J, Gromann S, et al. Influence of gas temperature on the breakdown voltage in gas-insulated systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(1):401-408.

- [17] 李庆民,王 健,李伯涛,等. GIS/GIL中金属微粒污染问题研究进展[J]. 高电压技术,2016,42(3):849-860.
- Li Qingmin, Wang Jian, Li Botao, et al. Review on metal particle contamination in GIS/GIL[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42 (3):849-860.
- [18] 陈 田,金洲玉,胡睿智,等. 交流GIS/GIL绝缘子介电功能梯度化设计与金属微粒驱离方法研究[J]. 绝缘材料,2024,57(10): 133-141.
- Chen Tian, Jin Zhouyu, Hu Ruizhi, et al. Dielectric functional gradient design of AC GIS/GIL insulator and research on expelling of metal particles[J]. Insulating Materials, 2024, 57(10): 133-141.
- [19] Iwabuchi H, Matsuoka S, Kumada A, et al. Influence of tiny metal particles on charge accumulation phenomena of GIS model spacer in high-pressure SF₆ gas[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(5): 1895-1901.
- [20] Toigo C, Vu-Cong T, Jacquier F, et al. Partial discharge behavior of protrusion on high voltage conductor in GIS/GIL under high voltage direct current: comparison of SF₆ and SF₆ alternative gases[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(1): 140-147.
- [21] 尉元龙,何柏娜,崔荣喜,等.金属微粒对直流GIL盆式绝缘子电场的影响[J]. 电力工程技术,2025,44(5):198-207.
- Wei Yuanong, He Baina, Cui Rongxi, et al. Effect of metal particles on the electric field in DC GIL basin insulator[J]. Electric Power Engineering Technology, 2025, 44(5): 198-207.
- [22] 王 媛,杨睿成,苏宝亮,等.直流GIS/GIL内微纳粉尘弥散浓度分布特性及对气隙击穿强度的影响[J]. 电工技术学报,2025,40 (5):1601-1613.
- Wang Yuan, Yang Ruicheng, Su Baoliang, et al. Characterization of diffuse concentration distribution of micron-nano dust in DC GIS/GIL and the effect on air gap breakdown strength[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(5): 1601-1613.
- [23] 王 健,常亚楠,王靖瑞,等. 基于捕捉效用分析的直流GIL微粒陷阱设计与 参数优化[J]. 中国电机工程学报,2020,40(15): 5050-5060.
- Wang Jian, Chang Yanan, Wang Jingrui, et al. Design and optimization of particle traps in DC GIL based on the capture effect analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 5050-5060.
- [24] 贾江波,查 玮,张乔根,等. 交流电压下预埋电极对绝缘子附近导电微粒运动的影响[J]. 中国电机工程学报,2008,28(10): 136-141.
- Jia Jiangbo, Zha Wei, Zhang Qiaogen, et al. Influence of metal inserted polytetrafluorethylene spacer on the motion of conducting particle under AC voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28 (10): 136-141.
- [25] 倪潇茹,王靖瑞,王 健,等. 直流GIL电极覆膜对微粒抑制的极性效应[J]. 高电压技术,2018,44(8):2695-2703.
- Ni Xiaoru, Wang Jingrui, Wang Jian, et al. Polarity effect of DC GIL electrode coating on particle inhibition[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8): 2695-2703.
- [26] 郭 浩,李松原,何 金,等. 交流GIS聚酰亚胺电极覆膜微粒抑制效果及绝缘寿命评估[J]. 高压电器,2023,59(10):223-231.
- Guo Hao, Li Songyuan, He Jin, et al. Assessment for particles inhibition effect and insulation life of polyimide electrode-coating in AC GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(10): 223-231.
- [27] Sakai K I, Abella D L, Khan Y, et al. Theoretical and experimental studies for spherical free - conducting particle behavior between nonparallel plane electrodes with AC voltages in air[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(3): 404-417.
- [28] Du Boxue, Ran Zhaoyu, Li Jin, et al. Fluorinated epoxy insulator with interfacial conductivity graded material for HVDC gaseous insulated pipeline[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(4): 1305-1312.
- [29] Li Chuanyang, He Jinliang, Hu Jun. Surface morphology and electrical characteristics of direct fluorinated epoxy-resin/alumina composite[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(5): 3071-3077.
- [30] Zhang Boya, Gao Wenqiang, Hou Yicen, et al. Surface charge accumulation and suppression on fullerene - filled epoxy - resin insulator under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(5): 2011-2019.
- 董 浩(1996—),男,硕士,主要研究方向为高电压绝缘材料及应用技术研究(通信作者)(E-mail:m13061492818@163.com)。
- 王 涛(1987—),男,硕士,副高级工程师,主要研究方向为电气设备故障诊断及局部放电定位研究。