

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.06.019

温度因素对盆式绝缘子缺陷电场分布影响的仿真研究

顾媛丽¹, 康朝阳¹, 王绪亮¹, 韩克俊², 刘洪顺¹, 李清泉¹

(1. 山东大学特高压输电技术与装备山东省重点实验室, 济南 250061; 2. 山东电工电气集团有限公司, 济南 250101)

摘要: 温度是影响气体绝缘金属封闭组合电器(GIS)中典型绝缘缺陷形成与发展的重要因素之一。为探究温度因素对盆式绝缘子缺陷电场分布的影响,文中利用有限元软件建立了252 kV GIS电—热—流多物理场耦合模型,得到了不同导体温度下、处于不同位置的气泡、裂纹及悬浮金属微粒缺陷下绝缘子表面的电场分布,并通过表面电荷分布与计算气体临界击穿场强进一步分析电场变化规律。结果表明:导体温度升高,3种缺陷下的绝缘子表面最大场强都随之增大,裂纹缺陷下增幅最大,悬浮金属微粒下最小。温度变化对电场的影响与绝缘缺陷类型、位置有关。导体温度越高,悬浮金属微粒周围与位于低压侧的气泡、裂纹处的绝缘子表面电场强度逐渐增大,而高压侧的气泡及裂纹处的绝缘子表面电场强度逐渐减小。位于低压侧的绝缘缺陷电荷密度随温度变化更加明显,电场畸变幅值改变也更大。研究结果有助于进一步认识温度变化对气泡、裂纹、悬浮金属微粒缺陷下盆式绝缘子表面电场分布的影响规律,对绝缘子设计改进也有一定的参考价值。

关键词: 气体绝缘金属封闭组合电器; 多物理场耦合; 有限元分析; 电场分布

Simulation Study on the Influence of Temperature Factors on the Electric Field Distribution of Defects in Insulating Spacers

GU Yuanli¹, KANG Zhaoyang¹, WANG Xuliang¹, HAN Kejun², LIU Hongshun¹, LI Qingquan¹

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of UHV Transmission Technology and Equipment, Shandong University, Jinan 250061, China; 2. Shandong Electrotechnical Electric Group Co., Jinan 250101, China)

Abstract: Temperature is one of the important factors affecting the formation and development of typical insulation defects in gas insulated switchgear (GIS). For exploring the influence of temperature factors on the electric field distribution of defects on the insulating spacers, a 252 kV GIS electric-thermal-fluid multi-physical field coupling model is set up in this paper by using finite element software, and the electric field distributions on the spacer surface are obtained for different conductor temperatures, bubbles, cracks, and suspended metal particle defects in different locations, and the variation of electric field is analyzed further by the space surface charge distribution and calculation of critical breakdown field strength of gas. The results show that with the increase of conductor temperature the maximum field strength on the spacer surface increases accordingly under all three defects, with maximum increase under crack defect and minimum increase under suspended metal particles. The effect of temperature change on the electric field is related to the type and location of the insulation defects. The higher the temperature of the conductor, the electric field strength of the spacer surface around the suspended metal particles and the bubbles as well as cracks on the low-voltage side gradually increases, while the electric field strength of the spacer surface at the bubbles and cracks on the high-voltage side gradually decreases. The charge density of insulation defects on the low voltage side varies more significantly with temperature variation, and the electric field distortion ampli-

收稿日期:2025-11-18; 修回日期:2026-02-11

基金项目:山东省重点研发计划(重大科技创新项目)(2021CXGC010211)。

Project Supported by Shandong Province Key R&D Program(Major Science and Technology Innovation Project)(2021CXGC010211).

tude changes more significantly. The study results can be not only useful for further understanding the effect of temperature variation on the electrical field distribution on the surface of insulating spacer under bubbles, cracks and suspended metal particles defects, but also have some reference value for design improvement of the insulating spacer.

Key words: gas insulated switchgear; multi-physics coupling; finite element analysis; electric field distribution

0 引言

气体绝缘金属封闭组合电器设备(gas insulated switchgear, GIS)因其稳定性强,可靠性高,结构紧凑等优点广泛应用于电力系统中^[1-3]。GIS的状态直接影响着电网的运行稳定性,但随着GIS使用规模的逐渐扩大,其各类缺陷也越来越多,例如盆式绝缘子在生产冷却过程产生的内部气泡,在运输或运行过程中由应力集中产生的裂纹,GIS运输、安装和运行过程中产生的金属微粒靠近盆式绝缘子表面形成的悬浮金属微粒等^[4]。这些缺陷使GIS腔室产生电场畸变,严重降低设备的绝缘性能。

近年来,许多学者对环氧树脂绝缘子上绝缘缺陷的电场分布进行了研究。王浩然及刘鹏分别通过仿真软件得到了不同缺陷下GIS/GIL绝缘子的电场分布,但仅讨论了缺陷的尺寸及分布位置对绝缘子电场的影响^[5-6]。常文治等人利用有限元软件探讨了单金属颗粒及金属颗粒群对电场的畸变情况^[7]。王碧霞等人仿真分析了悬浮颗粒粒径、圆柱气隙缺陷高度、沿面裂纹长度等对绝缘子电场分布的影响^[8]。李进等人通过实验发现预置粉尘工况下未抛光绝缘子、环向抛光绝缘子和径向抛光绝缘子的闪络电压有不同程度的下降,对绝缘子进行整体抛光处理或采用环氧喷漆修复可以提高沿面闪络电压^[9]。但上述研究都仅针对缺陷类型、分布位置及绝缘子表面状态等因素进行讨论分析,鲜有考虑温度对电场分布的影响。

实际情况下GIS的运行工况复杂,母线流过较大的负载电流引起导体温升,通过热传导、热对流、热辐射等传热过程影响GIS内部温度^[10-12]。GIS内部组件不仅承受强电场作用,还承受温度场作用。部分组件的电导率及介电常数随温度会发生改变^[13-15]。同时,负载电流的大小也会影响GIS特高压站检测到的特高频局部放电信号^[16-17]。因此,研究不同导体温度下绝缘子缺陷的电场分布具有重要的实际意义。

文中以252 kV同轴单相GIS为原型,根据其实际尺寸与材料属性,建立带有气泡、裂纹及悬浮金属微粒缺陷的有限元模型。在电场、流场、温度场

耦合条件下,考虑热传导、热对流、热辐射3种传热过程以及集肤效应、流体重力、自然对流等多种因素,通过控制导体温度,得到不同温度分布下盆体表面及缺陷处的表面电荷与电场分布规律,探究温度因素对不同绝缘缺陷下盆式绝缘子的电场分布影响机理。

1 单相同轴GIS物理场耦合模型

1.1 单相同轴GIS数值计算物理模型

文中采用某厂生产的单相封闭式结构252 kV GIS为模型进行建模仿真,GIS图纸及尺寸参数分别见图1、表1。腔室竖直放置,重力方向与轴心同向,GIS腔室为轴对称模型。

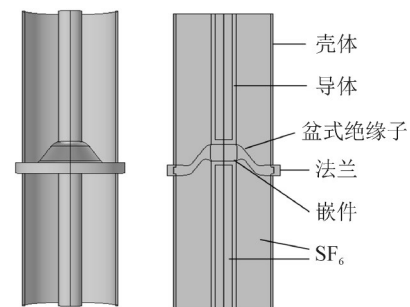


图1 GIS仿真模型

Fig. 1 GIS simulation model

表1 GIS模型尺寸参数

Table 1 GIS model size parameters mm

参数	数值	参数	数值
导体内径	35	导体外径	50
壳体内径	192	壳体外径	202
法兰外径	230	法兰高	25
盆式绝缘子高	150	GIS腔室高	1 400

1.2 盆式绝缘子缺陷模型

文中研究了气泡、裂纹与悬浮金属微粒3种GIS典型的绝缘缺陷。设置半径为1 mm的球体模拟气泡缺陷,内部材料为空气,其位置分布在盆式绝缘子凸面内部Y轴方向70、100、130、170 mm处,见图2。为之后方便表述,沿径向方向对气泡进行编号分别称为缺陷1、2、3、4(按照同样的方式定义后续两种缺陷的位置与编号)。气泡与盆式绝缘子表面径直距离保持0.5 mm。其二维平面示意图见图3。

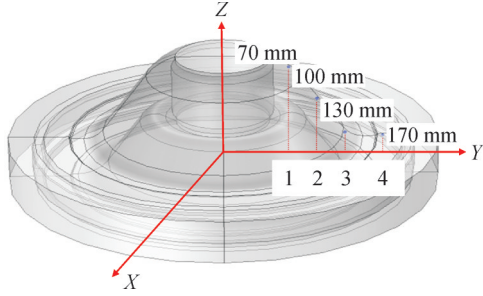


图2 气泡缺陷三维示意图

Fig. 2 3D schematic diagram of bubble defects

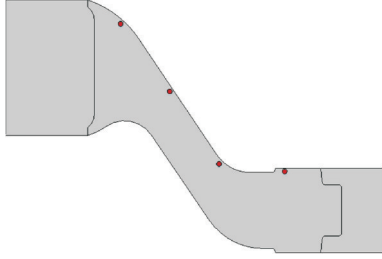


图3 气泡缺陷二维示意图

Fig. 3 Two-dimensional schematic diagram of bubble defects

设置半椭圆模型模拟绝缘裂纹缺陷,其示意图及尺寸参数见图4,裂纹缺陷与盆式绝缘子表面垂直,内部材料为SF₆。

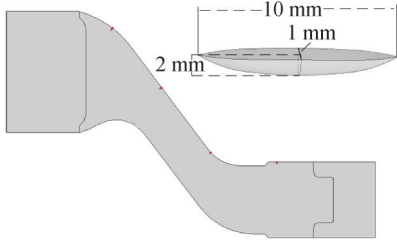


图4 裂纹缺陷示意图

Fig. 4 Schematic diagram of crack defects

设置半径为0.5 mm的球体模拟GIS腔室内的金属悬浮微粒,内部材料为铝合金。研究发现悬浮微粒与盆式绝缘子表面的距离会影响绝缘子表面的电场分布,当半径为0.5 mm的悬浮金属颗粒与盆式绝缘子距离>3 mm,缺陷对盆体表面电场分布基本无影响^[5-6]。文中选取缺陷与盆式绝缘子表面垂直距离保持1.5 mm,其示意图见图5。

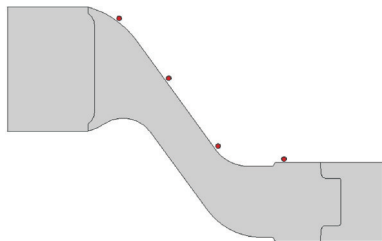


图5 悬浮金属微粒缺陷示意图

Fig. 5 Schematic diagram of suspended metal particles defects

2 GIS控制方程

GIS在运行中受电热流等多个物理场的耦合作用。中心导体承受高电压与大电流,产生焦耳热损耗,并通过热传导、热辐射、热对流的传热方式影响GIS内部的温度分布,最终达到相对稳定状态^[18-19],见图6。

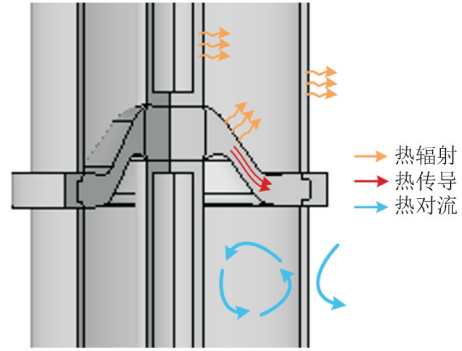


图6 GIS内部换热过程

Fig. 6 Heat exchange process inside GIS

2.1 电场控制方程及参数

在整个GIS求解域中施加静电场,中心导体施加220 kV电压,壳体接地。控制方程为

$$J = \sigma E \quad (1)$$

$$\nabla \cdot J = 0 \quad (2)$$

$$E = -\nabla \varphi \quad (3)$$

式(1)-(3)中: J 为电流密度; σ 为材料电导率; φ 为电势; E 为场强。

盆式绝缘子的材料主要为环氧树脂,其导电性能受到温度分布的影响较大,导电性能会影响盆式绝缘子及其内部缺陷的电场分布。绝缘子的电导率 γ 是与温度有关的指数函数

$$\gamma(T) = Ne^{-C/T} \quad (4)$$

式(4)中, N 和 C 都为与材料相关的常数, $N = 40\,000\text{ S/m}$, $C = 10\,860\text{ K}$ ^[13]。

2.2 热一流场控制方程及参数

为方便计算,本模型对计算过程做如下简化:不考虑太阳辐射及外界空气流动;不考虑SF₆中气体分子与尘埃对导体辐射的吸收、反射和散热作用。基于本模型的尺寸、材料及边界条件设置,计算得到的雷诺数较小,因此本模型的SF₆气体采用层流模型^[20]。根据以上简化得到热一流场的控制方程。

固体传热控制方程为

$$\rho c_p v \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + Q \quad (5)$$

式(5)中: ρ 、 c_p 、 k 分别为材料的密度、比热容、导热系数; v 为气体速度; Q 为热源^[18-23]。

在流场中本模型采用壁面无滑移。导热系数、

动力粘度以及恒压热容是与温度有关的变量。SF₆设置为不可压缩的粘性流体,比热率取1.1,压强保持0.5 MPa,密度受温度与压强的影响^[21]。

$$\rho = \frac{Mp}{RT} \quad (6)$$

式(6)中: M 为气体摩尔质量; p 为气体压强; R 为SF₆为气体常数; T 为温度。

外界恒温边界条件

$$T|_{\Gamma_{\text{ext}}} = T_0 \quad (7)$$

辐射边界控制方程:

$$q_{\text{net}} = \varepsilon(G - \sigma T^4) \quad (8)$$

$$J_0 = \varepsilon\sigma_0 T^4 + (1 - \varepsilon)G \quad (9)$$

式(8)、(9)中: q_{net} 为GIS内部表面流入辐射换热总热通量; ε 为对应导体、盆式绝缘子和壳体的表面发射率; G 为表面入射辐射热通量; σ_0 为Stefan-Boltzmann常数; J_0 为流出辐射热通量。

GIS的散热方式采用与外界空气的自然对流换热,自然对流热通量传热系数为5 W/(m²·K)。其他参数见表2。

表2 GIS材料参数

Table 2 GIS material parameters

名称	导体	壳体	绝缘子
密度/(kg·m ⁻³)	2 700	2 690	2 300
比热容/[J·(kg·K) ⁻¹]	900	819	1 500
导热系数/[W·(m·K) ⁻¹]	218.0	152.0	0.7
表面发射率	0.20	0.92	0.93
电导率/(S·m ⁻¹)	3.448×10 ⁷	3.012×10 ⁷	γ
相对介电常数	1.0×10 ²⁰	1.0×10 ²⁰	3.9

当通入4 000 A额定电流,环境温度为20℃时,GIS内部最大温度位于中心导体处,为51.3℃,温升为31.3℃,其温度分布见图7。文中通过控制导体温度来模拟不同电流下电磁损耗引起的导体温升,导体温度分别选30、50、70℃来模拟母线导体欠载、正常及过载情况^[13]。

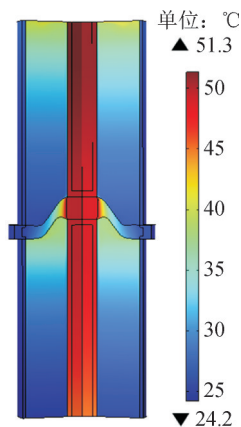


图7 4 000 A下GIS温度分布

Fig. 7 GIS temperature distribution at 4 000 A

3 仿真结果及分析

在电—热—流场耦合条件下,环境温度保持20℃不变,导体温度分别设为30、50、70℃。计算得到不同导体温度、不同类型绝缘缺陷下的GIS盆式绝缘子凸面表面最大电场强度($E_{1\text{max}}$)结果见表3。

表3 不同导体温度下盆式绝缘子凸面最大电场

Table 3 Maximum electric field on the convex surface of the basin insulator at different conductor temperatures

导体温度/℃	$E_{1\text{max}}/(\text{kV}\cdot\text{mm}^{-1})$		
	气泡缺陷	裂纹缺陷	悬浮金属颗粒缺陷
30	2.59	6.31	50.50
50	3.46	7.93	51.00
70	4.82	12.10	51.10

从表3可以看出,3种绝缘缺陷相比下,气泡缺陷对绝缘子表面电场的畸变程度最小,悬浮金属微粒缺陷最严重。随着导体温度的增大,不同绝缘缺陷下的 $E_{1\text{max}}$ 逐渐增大。导体温度由30℃增大至70℃,裂纹缺陷的 $E_{1\text{max}}$ 增幅最大为5.79 kV/mm,气泡缺陷的增幅为2.23 kV/mm,悬浮金属微粒的增幅最小,仅为0.6 kV/mm。

不同导体温度下,带有不同缺陷的盆式绝缘子凸面Y轴方向的表面电荷密度分布及电场分布见图8。

由图8可以看出,表面电荷密度大的地方电场畸变严重。导体温度变化对缺陷处电场畸变的幅值影响较大,电场畸变形状变化不大。气泡缺陷与裂纹缺陷对绝缘子表面电场的畸变形状略有不同,气泡缺陷处电场呈中间凸起两边凹陷的“W”状,裂纹处呈先凸再凹的“倒Z”状,气泡缺陷的积聚效果最弱且曲率半径大于裂纹缺陷,所以其电场畸变程度最小。电场方向使得靠近地电极的绝缘缺陷也更容易积聚负电荷。悬浮金属微粒附近的绝缘子表面电场呈针尖状,其作为良导体对电荷的积聚效果最强且不容易消散,缺陷附近积聚了大量正电荷,高压侧的悬浮金属微粒处绝缘子表面积聚的正电荷最多,达到870 μC/m²以上,对电场的畸变幅值在50 kV/mm以上。随着位置的径向外移,金属微粒对绝缘子表面的电场畸变减小。

随着导体温度升高,表面电荷积聚程度加强^[24],缺陷处积聚的电荷密度越大,电场畸变也越严重。缺陷越靠近低压侧,电场畸变受温度的影响越大。当导体温度为70℃时,位置4处的气泡、裂纹和悬浮金属微粒对绝缘子表面的电场畸变幅值分别为3.15、11.49、13.53 kV/mm,比30℃时分别增大了

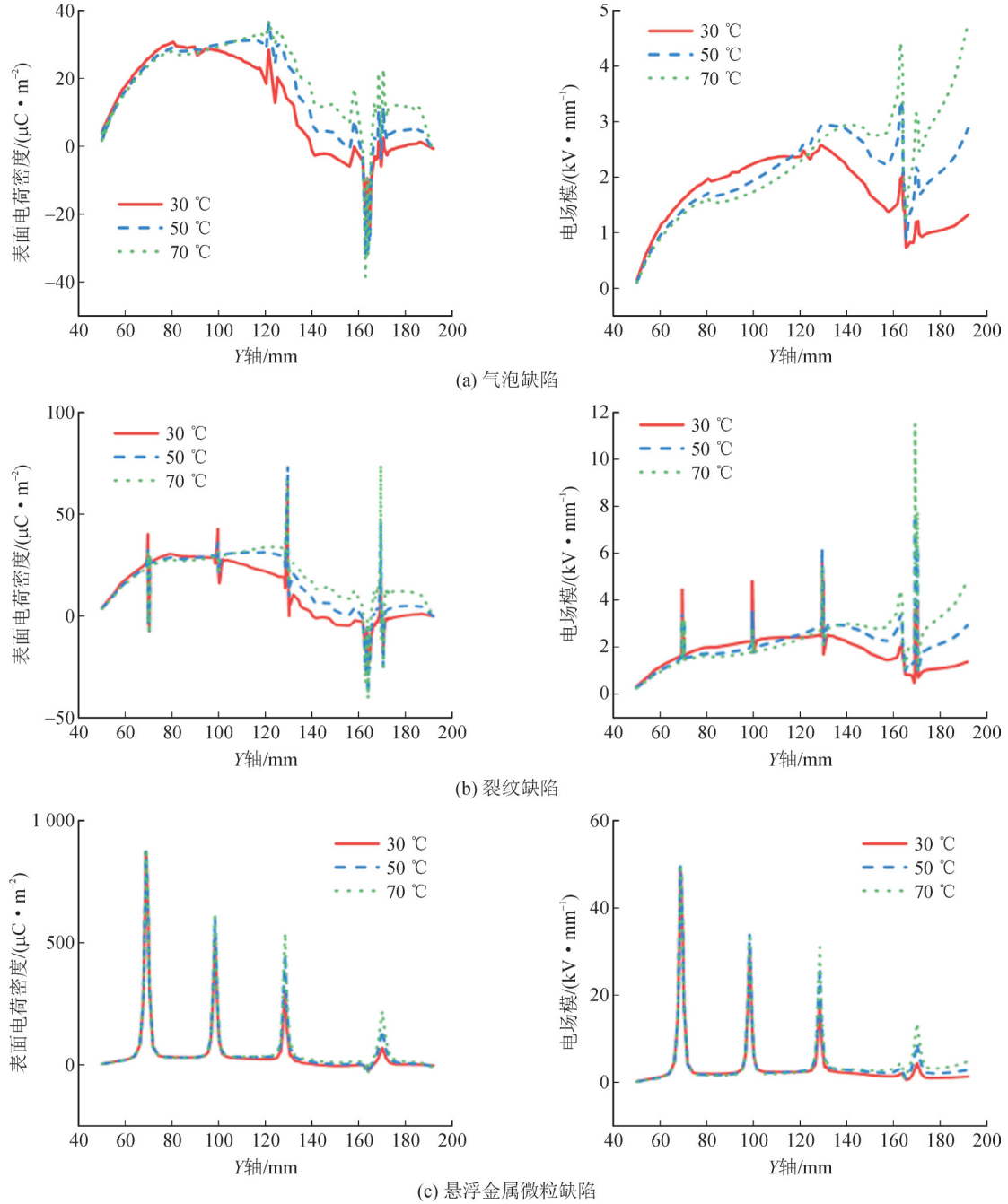


图8 不同导体温度下盆式绝缘子凸面Y轴方向的表面电荷密度分布及电场分布

Fig. 8 Surface charge density distribution and electric field distribution of the convex surface of the basin insulator in the Y-axis direction at different conductor temperatures

160.6%、193.2%、210.3%。这是因为温度的改变会影响电荷积聚,靠近地电极的缺陷容易积聚电荷,温度改变时绝缘子表面电荷密度变化较大,缺陷处的绝缘子电场幅值受温度影响明显。但导体附近的气泡与裂纹缺陷对绝缘子表面电场的畸变程度随温度的升高而减小。因为随着导体温度的升高,盆式绝缘子表面电荷密度增大,但导体附近产生巨大的温升导致绝缘子体积电导率急剧增加,削弱了导体附近的电场,气泡与裂纹都位于绝缘子上,其表面电荷与电场随温度变化规律与绝缘子表面相似。

封闭空间内,气隙的压强受温度的影响,击穿场强受压强影响较大,受温度影响较小。不同温度同一压强下的气隙击穿场强相差不大,可以由式(10)计算

$$E_v = \frac{71.05p}{T} + 6.08 \sqrt{\frac{2.9p}{Td}} \quad (10)$$

式(10)中: E_v 为气隙的临界击穿场强; p 为气隙的压强,kPa; d 为气隙长度,cm^[25]。

在工频交流电压下,稍不均匀电场中SF₆的临界击穿场强为 E_s (kV/mm),可以用式(11)工程击穿场强公式计算

$$E_s = 65(10p)^{0.73} \quad (11)$$

式(11)中, p 为 SF₆ 的绝对压力, MPa。

计算模型与实际工程击穿场强等效需乘以一个等效系数 k :

$$E_m = kE_s \quad (12)$$

$$k = \frac{\eta_m}{\eta_s} \quad (13)$$

η 为电极利用系数, 用式(14)表示

$$\eta = \frac{E_{ave}}{E_{max}} \quad (14)$$

式(14)中: E_{ave} 为平均场强; E_{max} 为最大场强。

文中 SF₆ 压强为 0.5 MPa, 静电场下 SF₆ 的 E_s 为 21.046 kV/mm。工程中 η_s 常取 0.55~0.58^[26]。

悬浮金属微粒周围的电场分布云图见图 9, 从图 9 可以看出不同位置的缺陷对电场造成的畸变程度不同且范围较小, 采用一种临界击穿场强作为是否发生击穿的标准不太准确。

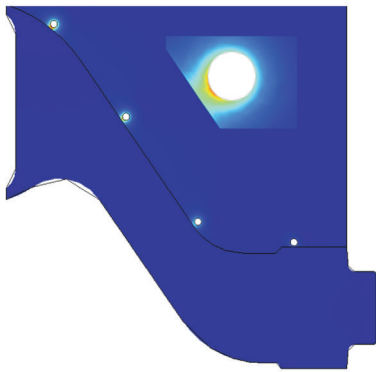
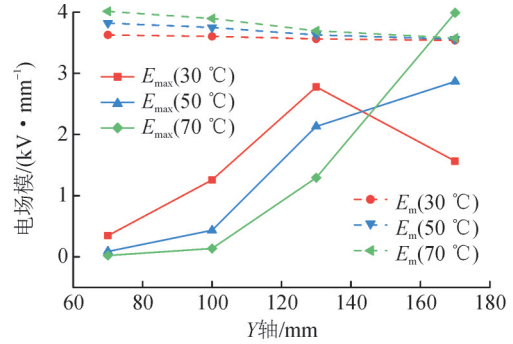


图 9 悬浮金属微粒周围电场分布

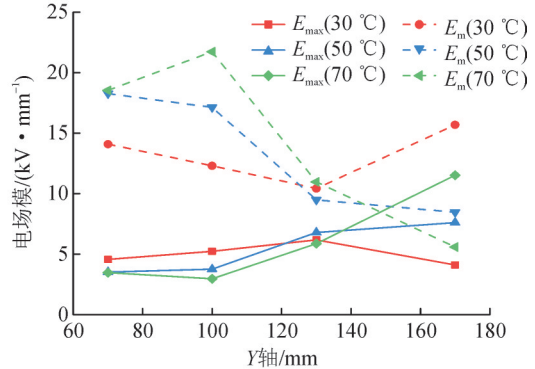
Fig. 9 Electric field distribution around the suspended metal particles

根据式(10)-(14)可以计算出不同位置缺陷下的临界击穿场强。不同位置处缺陷承受的最大电场强度 E_{max} 及该位置下的击穿场强 E_m 的关系见图 10。

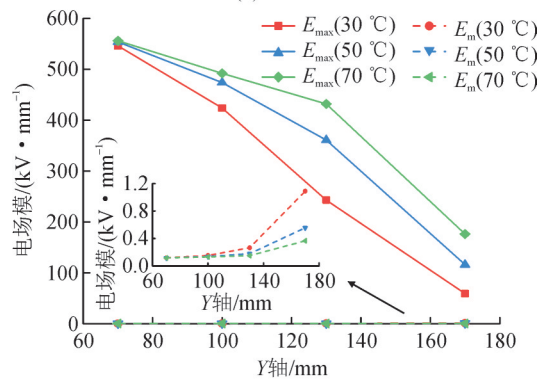
由图 10(a)可知, 导体温度为 30 °C 时, 随着位置外移, 气泡缺陷处的 E_{max} 先增大再减小, 位置 3 处的 E_{max} 最大。当导体温度增大时, 电场强度沿径向开始呈逐渐增大的趋势, 最大 E_{max} 位于位置 4 处。导体温度升高 40 °C, 高压侧缺陷的 E_{max} 随温度升高而减小, 低压侧缺陷变化规律相反且变化幅值更大。根据式(10)计算不同温度、不同位置下的气泡 E_m 。由计算结果可知, 相同导体温度下, 越靠近低压侧的气泡 E_m 越小。相同位置下, 导体温度越低的气泡 E_m 越小。由于气泡缺陷所承受的电场强度较小, 多数缺陷并未超过 E_m 。导体温度为 30 °C 时, 气泡 3 处的 E_{max} 最大, 为 2.78 kV/mm, 但没有超过该环境下的 E_m 。随着导体温度的增大, 气泡 4 处的 E_{max} 逐渐增大,



(a) 气泡缺陷



(b) 裂纹缺陷



(c) 悬浮金属微粒缺陷

图 10 不同导体温度下缺陷最大电场强度

Fig. 10 Maximum electric field strength of defects at different conductor temperatures

导体温度 70 °C 时, 缺陷 4 处的 E_{max} 增大到 4 kV/mm, 增大了 1.55 倍, 已经超过了该温度下的 E_m (3.58 kV/mm), 存在被击穿的风险。

导体温度改变时, 裂纹缺陷处的 E_{max} 在 Y 轴方向上的变化趋势与气泡缺陷大体相似, 临界击穿场强与气泡缺陷计算方式不同。由图 10(b)可知, E_m 受裂纹畸变场强的影响, 导体温度逐渐升高, 高压侧的缺陷 E_m 逐渐增大, 低压侧的变化规律相反且幅值极小。整体裂纹的 E_{max} 小于其位置下的 E_m 。当温度为 70 °C 时, 位置 4 处的裂纹 E_{max} 增大至 11.52 kV/mm, 超过了该位置处的 E_m 。文[27]通过实验得出: 温度升高时, 缺陷处积累的电荷增加, 局部电场畸变, 导致沿面放电和气隙放电的起始电压降低, 放电次数增加。该结论与文中的仿真结果一致。

由图 10(c)可知高压处的悬浮金属微粒周围电场畸变最为严重,达到 546 kV/mm 及以上。与气泡及裂纹不同的是,随着位置外移,悬浮金属微粒对电场畸变影响呈现逐渐减小的趋势。由公式计算得到不同位置下的 E_m ,其数值都小于 1.2 kV/mm,远远小于悬浮金属微粒缺陷下的畸变电场,产生局部放电的可能性极大。随着导体温度的升高,悬浮金属微粒周围电场畸变越严重。缺陷越靠近壳体,温度对电场的影响越明显。导体温度升高 40 °C,悬浮金属微粒 1 处的 E_{max} 仅增大了 10 kV/mm,4 处的 E_{max} 从 59.1 kV/mm 增大到 176 kV/mm,增大了 1.92 倍。文[28]中通过实验发现温度对 GIS 内线性颗粒的局部放电影响较小,仅放电次数增大。文中导体温度升高时,悬浮金属微粒缺陷处的绝缘子表面电荷密度增大,电场畸变严重。但因其电场畸变的幅值远远大于 SF₆ 击穿场强,温度对缺陷处的局放起始电压变化不大。导体温度升高时,缺陷处电场畸变加剧, E_m 减小,放电次数会增加,侧面验证了文中仿真模型的有效性。

4 结论

文中在电—热—流多场耦合下建立了 GIS 仿真模型,设置了气泡缺陷、裂纹缺陷与悬浮金属微粒缺陷,通过改变导体温度,探究了温度对不同缺陷下盆式绝缘子电场的影响规律。文中得到的具体结论如下:

1)导体温度由 30 °C 增大到 70 °C,3 种缺陷下的绝缘子表面最大场强都增大,裂纹缺陷下增幅最大,气泡缺陷下次之,悬浮金属微粒下最小。

2)导体温度越高,悬浮金属微粒缺陷周围与位于低压侧的气泡、裂纹处的绝缘子表面电场强度逐渐增大,而高压侧的气泡及裂纹处的绝缘子表面电场强度逐渐减小。

3)位于低压侧的绝缘缺陷电荷密度随温度变化更加明显,电场畸变幅值改变也更大。导体温度由 30 °C 增大至 70 °C,位置 4 处的气泡、裂纹和悬浮金属微粒缺陷最大场强分别增大了 1.55、1.81、1.92 倍。可以采用对盆式绝缘子低压侧涂敷高介电常数界面涂层等方法提高绝缘子的绝缘性能。

4)文中设置的气泡、裂纹及悬浮金属微粒等缺陷都为确定性的静态模型,对于实际过程中会影响电荷积聚及电场分布的气体空间放电、微粒运动、局部放电发生等随机性因素会在后续的研究中被考虑。

参考文献:

- [1] 岳 嵩,朱 勇,何龙寿,等. 基于改进动态电弧模型的 GIS 快速暂态过电压特性研究[J]. 智慧电力,2025,53(8):114-120.
YUE Song, ZHU Yong, HE Longshou, et al. Research on characteristics of very fast transient overvoltage in GIS based on an improved dynamic arc model[J]. Smart Power, 2025, 53(8): 114-120.
- [2] 王 宁,黄新波,朱永灿,等. 基于 MA-DBN 算法的 GIS 故障预测[J]. 西安工程大学学报,2020,34(5):27-33.
WANG Ning, HUANG Xinbo, ZHU Yongcan, et al. GIS fault prediction based on MA-DBN algorithm[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2020, 34(5): 27-33.
- [3] XING Yunqi, WANG Zhiwen, LIU Lin, et al. Defects and failure types of solid insulation in gas-insulated switchgear: In situ study and case analysis[J]. High Voltage, 2022, 7(1): 158-164.
- [4] 周 倩,唐 炬,唐 铭,等. GIS 内 4 种典型缺陷的局部放电超高频数学模型构建[J]. 中国电机工程学报,2006,26(8):99-105.
ZHOU Qian, TANG Ju, TANG Ming, et al. Mathematical model of four typical defects for UHF partial discharge in GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 99-105.
- [5] 王浩然,郭子豪,张丝钰,等. 缺陷对特高压交流盆式绝缘子电场分布的影响[J]. 高电压技术,2018,44(3):982-992.
WANG Haoran, GUO Zihao, ZHANG Siyu, et al. Influence of UHV AC GIS spacer' defects on electrical field distribution[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3): 982-992.
- [6] 刘 鹏,吴泽华,朱思佳,等. 缺陷对交流 1 100 kV GIL 三支柱绝缘子电场分布影响的仿真[J]. 电工技术学报,2022,37(2): 469-478.
LIU Peng, WU Zehua, ZHU Sijia, et al. Simulation on electric field distribution of 1 100 kV AC tri-post insulator influenced by defects [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(2): 469-478.
- [7] 常文治,毕建刚,刘姝嫔,等. GIS 盆式绝缘子典型缺陷的电场仿真[J]. 高压电器,2018,54(5): 138-143.
CHANG Wenzhi, BI Jiangang, LIU Shupin, et al. Electric field simulation of GIS insulators typical defects[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(5): 138-143.
- [8] 王碧霞,田铭兴,冯婷娜,等. GIS 盆式绝缘子典型缺陷对其电场分布的影响[J]. 高压电器,2022,58(11): 197-204.
WANG Bixia, TIAN Mingxing, FENG Tingna, et al. Influence of typical defects of GIS insulating spacer on its electric field distribution[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(11): 197-204.
- [9] 李 进,王禹淮,张黎明,等. 抛光方式对交流电压下盆式绝缘子表面电荷分布和沿面闪络特性的影响[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 4093-4101.
LI Jin, WANG Yuhuai, ZHANG Liming, et al. Influence of polishing treatments on surface charge distribution and flashover characteristics of basin spacer under AC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 4093-4101.
- [10] 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.
- [11] 吴细秀, 程诗敏, 周帆, 等. 母线通流温升对GIS内绝缘特性影响的仿真研究[J]. 高压电器, 2020, 56(2): 7-14.
WU Xixiu, CHENG Shimin, ZHOU Fan, et al. Influence of temperature rise due to rated-current flowing through busbar on the internal insulation characteristics of GIS: A simulation study[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(2): 7-14.
- [12] 王珂珂, 李丽, 王久阳, 等. 基于混合绝缘气体的三相GIS母线温升多物理场耦合机制研究[J]. 高压电器, 2021, 57(4): 69-75.
WANG Keke, LI Li, WANG Jiuyang, et al. Study on multi-physical field coupling mechanism of three-phase GIS bus temperature rise based on mixed insulating gas[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(4): 69-75.
- [13] DU B X, LIANG H C, LI J, et al. Electrical field distribution along SG_6/N_2 filled DC - GIS/GIL epoxy spacer[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018, 25(4): 1202-1210.
- [14] 李进, 张程, 杜伯学, 等. 直流GIL用非线性电导环氧绝缘子电场仿真[J]. 高电压技术, 2019, 45(4): 1056-1063.
LI Jin, ZHANG Cheng, DU Boxue, et al. Electrical field simulation of epoxy spacer with nonlinear conductivity for DC GIL[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(4): 1056-1063.
- [15] 张施令, 彭宗仁, 王浩然, 等. 盆式绝缘子多物理场耦合数值计算及结构优化[J]. 高电压技术, 2020, 46(11): 3994-4005.
ZHANG Shiling, PENG Zongren, WANG Haoran, et al. Numerical calculation and structural optimization of multi - physical field coupling for basin insulator[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(11): 3994-4005.
- [16] 李星, 许渊, 丁登伟, 等. 温度对GIS绝缘子表面金属异物局部放电及闪络特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(1): 406-414.
LI Xing, XU Yuan, DING Dengwei, et al. Influence of temperature on partial discharge and flashover characteristics of metal particle on GIS insulator surface[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 406-414.
- [17] ZHANG Z, SONG H, MENG X, et al. Experimental research on the influence of temperature on the discharge signal of void defects in GIS[J]. High Voltage, 2022, 7(2): 314-324.
- [18] 吴吉, 王增彬, 吕鸿, 等. 考虑气流场影响的GIS温升计算与实验研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(3): 815-823.
WU Ji, WANG Zengbin, LYU Hong, et al. Calculation of GIS temperature rise considering effect of gas flow and experimental study[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(3): 815-823.
- [19] 杨桢, 任玲玲, 王凯, 等. 基于混合绝缘气体的GIS母线温升多物理场耦合分析[J]. 高压电器, 2021, 57(1): 48-54.
YANG Zhen, REN Lingling, WANG Kai, et al. Multiphysics - field coupling analysis of GIS bus bar temperature rise based on mixed insulating gas[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(1): 48-54.
- [20] 陈强, 李庆民, 丛浩熹, 等. 引入多重边界条件的GIS母线温度分布多场耦合计算及影响因素分析[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 187-195.
CHEN Qiang, LI Qingmin, CONG Haoxi, et al. Numerical calculation and correlative factors analysis on temperature distribution of GIS bus bar based on coupled multi - physics methodology combined with multiple boundary conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 187-195.
- [21] LUO Yi, TANG Ju, PAN Zijun, et al. How temperature and pressure affect the electric field distribution in HVDC GIS/GIL: A numerical study[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(4): 1334-1342.
- [22] ZHANG Guobao, YANG Wei, CAI Mengyi, et al. Numerical computation of 3D electromagnetic heat current temperature field for UHV GIS basin insulator[C]//2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE). China: IEEE, 2020: 1-4.
- [23] REBZANI N, CLAVEL E, MARTY P, et al. Numerical multiphysics modeling of temperature rises in gas insulated busbars[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(5): 2579-2586.
- [24] 周宏扬, 马国明, 赵书静, 等. 温度对直流GIL绝缘子电荷积聚特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(24): 6675-6681.
ZHOU Hongyang, MA Guoming, ZHAO Shujing, et al. Effect of temperature on charge accumulation on insulator in DC - GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(24): 6675-6681.
- [25] 阮江军, 唐烈峥, 邱志斌, 等. 基于流注起始判据的球—板—球短空气间隙击穿电压计算[J]. 高压电器, 2017, 53(7): 38-44.
RUAN Jiangjun, TANG Liezheng, QIU Zhibin, et al. Breakdown voltage calculation of short sphere - plane - sphere air gap based on streamer inception criteria[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(7): 38-44.
- [26] 郑宇, 周文俊, 陈维江, 等. 密闭空间中温度对 SF_6/N_2 混合气体工频击穿电压的影响规律[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(15): 4589-4598.
ZHENG Yu, ZHOU Wenjun, CHEN Weijiang, et al. Influence law of temperature on power frequency breakdown voltages of SF_6/N_2 mixture in enclosed space[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(15): 4589-4598.
- [27] 陶亦然. 温度对GIS缺陷局部放电特高频信号特征的影响[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
TAO Yiran. Influence of temperature on partial discharge UHF characteristics of GIS defects[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- [28] 郭壮. GIS中性线金属颗粒运动行为及温度影响的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
GUO Zhuang. The motion behavior and temperature effect of linear metallic particles in GIS[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.
- 顾媛丽(1998—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为GIS绝缘缺陷特性研究(E-mail: 903364597@qq.com)。
李清泉(1969—), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为高压设备复合绝缘的放电特性、绝缘的劣化机理、绝缘状态评估、人工智能在电力设备中的应用(通信作者)(E-mail: lqq@sdu.edu.cn)。