

外部环境温度与内部气压对 HVDC GIL 表面电荷积聚的影响

张雨啸¹, 张磊², 唐忠¹

(1. 上海电力大学 计算机科学与技术学院, 上海 201306;

2. 上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 盆式绝缘子的表面电荷积聚是制约高压直流 GIL 发展的重要因素之一, 而 GIL 内部热传递过程会加剧表面电荷的积聚进程。本文建立了电荷积聚的电-热场耦合数学模型, 模拟了不同外部环境温度和内部气体压力下高压直流 GIL 内部温度随时间的变化情况, 进一步研究了外部环境温度恒定及时变情况下的表面电荷积聚特征, 并分析了其对表面电荷积聚的影响。结果表明: 在外部环境温度为恒定值的情况下, 外部温度每升高 10°C, 绝缘子表面的稳态温度会升高 9.2% 以上, 绝缘子的稳态表面电荷密度也会因此增加 17.3% 以上。当考虑到外部环境温度随时间变化时, 绝缘子表面的温度在持续上升一段时间后, 最终会在特定温度范围内波动, 此时绝缘子表面电荷密度与外部环境平均温度下的表面电荷密度值近似相等。此外, 绝缘子的表面温度和电荷密度会随着气压的升高而减小。研究结果有望为直流 GIL 的设计和运行提供参考, 从而提高直流 GIL 运行的安全性和稳定性。

关键词: 盆式绝缘子; 高压直流 GIL; 表面电荷积聚; 温度分布; 电-热耦合; 有限元仿真; 多物理场; SF₆。

Effect of external ambient temperature and internal gas pressure on surface charge accumulation of HVDC GIL

ZHANG Yuxiao¹, ZHANG Lei², TANG Zhong¹

(1. College of Computer Science and Technology, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 201306, China; 2. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: The surface charge accumulation of basin insulators is one of the important factors restricting the development of HVDC GIL, and the heat transfer inside the GIL would aggravate the surface charge accumulation. In this paper, an electrical-thermal coupling simulation model of charge accumulation was established. The time-varying temperature distribution inside the GIL under different external ambient temperature and gas pressure was simulated. The surface charge accumulation characteristics under constant and time-varying external ambient temperature were studied, and its effect on the surface charge accumulation was also analyzed. The results show that when the external ambient temperature is a constant value, the external temperature increases every 10°C, the steady-state temperature on the insulator surface increases by more than 9.2%, and the steady-state surface charge density of insulator increases by more than 17.3%. When the external ambient temperature changes with time, the temperature on the insulator surface eventually fluctuates with time around a stable value after continuously rising for a period of time, and the surface charge density is approximately equal to that under the average external ambient temperature. In addition, the surface temperature and charge density of the insulator decrease with the increase of gas pressure. The research results are expected to provide reference for the design and operation of DC GIL, which can improve the safety and stability of DC GIL operation.

Key words: basin insulator; HVDC GIL; surface charge accumulation; temperature distribution; electric-thermal coupling; finite element simulation; multiple physical fields; SF₆。

0 引言

气体绝缘输电线路(GIL)因其具备大输送容量、高绝缘性能以及卓越的环境友好性而被广泛关

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51677113)。

注, 是目前国内外的研究热点^[1-8]。然而, 在直流电场下, GIL 内部绝缘子表面电荷积聚严重, 使沿面电场分布发生畸变, 降低了绝缘子的沿面闪络电压, 导致直流 GIL 无法长期稳定地运行^[9-13]。

针对 DC GIL 绝缘子表面电荷积聚的机理, 各

国学者开展了广泛地研究。目前,普遍认为表面电荷的积聚路径包含3个方面:气体侧电导、固体电导以及绝缘子表面电导,这3种电导电流的数值极大地影响绝缘子表面电荷的积聚情况^[14-16]。在实际设备运行中,中心导体流过大电流时会产生焦耳热,致使GIL管道内部出现明显的温升现象。由于直流GIL绝缘子电荷积聚与绝缘材料电导特性关系密切,而绝缘材料电导特性又与温度紧密相关,因此开展温度梯度下直流GIL表面电荷积聚的研究有助于获得真实的直流GIL电荷分布特性与电场畸变规律^[17-22]。

A WINTER等^[23]考虑了绝缘气体中带电粒子的产生、复合、扩散等物理过程,建立了可表征绝缘气体体电流密度与电场强度间非线性关系的绝缘子表面电荷积聚模型,并在该模型中考虑了温度对绝缘子体电导率的影响。MAGM等^[24]对不同温度下绝缘子的体电导率和表面电导率进行了测量,并拟合出绝缘子电导率与温度之间的函数关系,对后续仿真实验提供了重要参考。U STRAUMANN等^[25]分析了温度梯度对绝缘子体电导率以及空间电荷分布的影响,并进一步揭示了温度梯度下绝缘子表面电荷积聚的时变特征,但该文并未考虑温度梯度对气体侧电导电流的影响。YAN W等^[26]研究了温度梯度对绝缘子体电导率以及气体离子迁移率的影响,但该文没有考虑热对流以及热辐射的影响。LI X L等^[27]考虑了外部环境温度、导体载流等对GIL绝缘子表面电荷积聚的影响,并建立了直流GIL的3D仿真模型。在目前大多数的电-热耦合仿真中,GIL外部环境温度通常被设定为恒定值,以此研究GIL内部温度分布和变化特性。然而,在实际情况中,外部环境温度并不是恒定值,且环境温度通常在一天当中会随着时间推移而动态变化^[28-30]。因此,有必要通过仿真分析将外部环境温度设置为恒定值的合理性,并通过仿真量化由此带来的计算误差。

本文首先建立DC GIL的电-热场耦合数学模型,包含表面电荷积聚模型以及GIL内部热传递模型,同时对仿真模型几何及物理参数进行了详细说明;然后仿真计算DC GIL腔体温度和气体流速分布,分析外部环境温度以及气压对绝缘子表面温度和表面电荷密度的影响。

1 数学模型

1.1 表面电荷积聚

依据文献[26],本文构建的GIL仿真几何模型如图1所示,该模型最早由日本学者依据实际DC GIS中的锥形绝缘子进行简化和缩放而成,考虑到本文中采用电-热场耦合方式进行仿真,为减小计算量以及计算难度,选择该简化模型进行研究。仿真模型中中心导体长度为500 mm,半径分别为20.75 mm和50 mm;绝缘子的厚度分别为50 mm和25 mm;接地外壳的内半径和外半径分别为201.25 mm和206.25 mm;额定电压为400 kV。中心导体与外壳的材料被设置为铝合金,绝缘子的材料为环氧树脂,其相对介电常数为4.95, SF₆的相对介电常数为1.002。

DC GIL中气-固界面处表面电荷密度的动态变化可由公式(1)表征^[23]。

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} = \mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_V - \mathbf{n} \cdot \mathbf{J}_G - \text{div}(\kappa_s \cdot \mathbf{E}_t) \quad (1)$$

式(1)中: ρ_s 为表面电荷密度; \mathbf{J}_V 和 \mathbf{J}_G 分别表示绝缘子固-气界面处的固体侧电流密度和气体侧电流密度; \mathbf{n} 表示固-气界面处的单位法向矢量,在本文中其正方向为气体侧指向固体侧; κ_s 表示绝缘子的表面电导率; \mathbf{E}_t 表示绝缘子表面电场的切向分量。

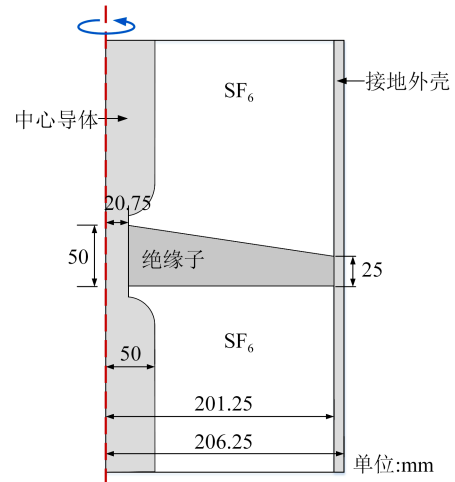


图1 高压直流GIL仿真模型

Fig.1 Simulation model of HVDC GIL

气体侧电流密度及离子输运过程在以往的文章中已被充分讨论,因此本文将不再详细描述,相关细节可查阅文献[23,25-26]。

绝缘子电流密度 \mathbf{J}_V 可由公式(2)进行计算^[26]。

$$\mathbf{J}_V = \kappa_V \cdot \mathbf{E} \quad (2)$$

式(2)中: κ_v 为绝缘子体电导率; E 为电场强度。

环氧树脂绝缘子体电导率与温度之间的关系可由经验公式(3)计算,绝缘子表面电导率可由公式(4)计算得到^[25]。

$$\kappa_v = (A \cdot \exp[B/T])^{-1} \quad (3)$$

$$\kappa_s = \kappa_v \cdot d_L \quad (4)$$

式(3)~(4)中: A 和 B 为绝缘子的材料系数; T 为绝缘子温度; d_L 为绝缘子表面薄层厚度。

1.2 热传递

在DC GIL中,电流通过中心导体时会产生焦耳热,根据焦耳定律可计算出中心导体上的热功率(P)^[27],如式(5)所示。

$$P = I^2 R = \frac{I^2 L}{S_{\text{cond}} \sigma_{\text{cond}}} \quad (5)$$

式(5)中: I 为中心导体电流; L 为中心导体长度; S_{cond} 为中心导体截面积; σ_{cond} 为中心导体电导率。

热传递主要包含热传导、热对流以及热辐射3种方式。其中,热传导主要发生在中心导体、绝缘子以及接地外壳之间,该过程可由公式(6)描述^[27]。

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p u \cdot \nabla T + \nabla \cdot (-k \nabla T) = Q \quad (6)$$

式(6)中: ρ 表示材料密度; C_p 表示比热容; T 为温度; u 为绝缘气体的流速; k 为导热系数; Q 为由中心导体产生的热源。

热对流主要发生在GIL内部SF₆气体以及外部空气中,该过程可由公式(7)~(9)描述^[24]。

$$\rho \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \rho \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} = -\nabla \left[-p \cdot \mathbf{I} + \mu \left(\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right) \right] + \rho \mathbf{g} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \cdot \mathbf{u}) = 0 \quad (8)$$

$$\rho = \frac{pM}{RT} \quad (9)$$

式(7)~(9)中: p 表示气压; μ 为气体动力黏性系数; \mathbf{g} 为重力加速度; M 为SF₆平均摩尔质量; R 为气体常数。

考虑外部环境温度的影响时,外部空气与GIL外壳之间不断发生热交换,其属于典型的对流换热过程。因此,GIL外壳与外部空气的对流换热过程由公式(10)定义。

$$q_c = h_c A_c (T_c - T_a) \quad (10)$$

式(10)中: q_c 为对流换热量; h_c 为外壳与大气之间的

对流换热系数; A_c 为外壳面积; T_c 和 T_a 分别为外壳温度与大气温度。

热辐射主要发生在固体表面之间,包含中心导体外表面、绝缘子表面、接地外壳内表面以及接地外壳外表面,热辐射量可通过公式(11)~(12)进行计算^[27]。

$$e_b(T) = n_r^2 \sigma_{\text{SB}} T^4 \quad (11)$$

$$q_r = \varepsilon_{\text{sc}} [G - e_b(T)] \quad (12)$$

式(11)~(12)中: $e_b(T)$ 为辐射功率; n_r 为折射率; σ_{SB} 为Stefan-Boltzmann常数; ε_{sc} 为表面发射率; G 和 q_r 分别为换热面内表面辐射功率和净辐射热流密度。

1.3 仿真参数

在以往的研究中,研究者主要考虑了温度梯度对绝缘子体电导率的影响,而气体电导电流受温度梯度的影响往往没有被充分考虑。因此,本文将影响气体电导电流的关键参数(如离子迁移率、离子扩散率以及复合系数)都设置为温度相关的方程^[16,24,27],如式(13)~(15)所示。

$$b^{\pm} = b_0^{\pm} \cdot \frac{P_0}{P} \cdot \frac{T}{T_0} \quad (13)$$

$$D^{\pm} = \frac{k_b \cdot T}{e} b^{\pm} \quad (14)$$

$$k_r = \frac{e \cdot (b^+ + b^-)}{\varepsilon_{\text{SF}_6} \cdot \varepsilon_0} \quad (15)$$

式(13)~(15)中: b^+ 和 b^- 分别表示正、负离子迁移率; D^+ 和 D^- 分别表示正、负离子扩散率; k_r 表示复合系数; b_0 是在气压为 P_0 (101 kPa)、温度为 T_0 (273 K)情况下的离子迁移率测量数据; P 表示SF₆气压; k_b 为玻尔兹曼常数; ε_0 为真空介电常数; $\varepsilon_{\text{SF}_6}$ 为SF₆的相对介电常数。

仿真中使用到的其他参数如表1所示,这些参数均可在文献[24-27]中获取。除表1中参数以外,热学仿真中所涉及到的其他参数(包含中心导体以及SF₆气体的热力学参数)均采用COMSOL软件的内置材料参数。

考虑到实际GIL通常是被绝缘子分割成各个密闭腔室段,将图1中的竖置GIL模型上下边界设置为封闭边界,以模拟实际GIL中的封闭腔室。此外,本文的温度场与静电场仿真是强耦合,即温度场与静电场仿真同时耦合计算,这与以往研究者常采用的静电场调用温度场稳态计算结果的耦合方式不同。

表1 仿真参数

物理量	数值	参数含义
$n_{ip}/(\text{cm}^3 \cdot \text{s})^{-1}$	30	离子对产生速率
e/C	1.6×10^{-19}	元电荷量
$A/(\Omega \cdot \text{m})$	45.4	材料系数A
B/K	1.086×10^4	材料系数B
$d_t/\mu\text{m}$	50	绝缘子表面层厚度
$k_b/(\text{J}/\text{K})$	1.38×10^{-23}	玻尔兹曼常数
$C_p/(\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K}))$	1 000	绝缘子比热容
$k_{in}/(\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K}))$	0.25	绝缘子热导率
$\rho_{in}/(\text{kg}/\text{m}^3)$	1 200	绝缘子密度
I/A	3 150	负载电流
$\sigma_{\text{cond}}/(\text{S}/\text{m})$	3.02×10^7	中心导体电导率
$M_{\text{SF}_6}/(\text{g}/\text{mol})$	146.05	SF_6 平均摩尔质量
$R/(\text{J}/(\text{mol} \cdot \text{K}))$	8.314	气体常数
n_r	1	折射系数
$\sigma_{\text{SB}}/(\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4))$	5.67×10^{-8}	Stefan-Boltzmann 常数

2 仿真结果

2.1 温度和气体流速分布特征

图2为绝缘子表面径向50、100、150 mm处温度随时间的变化规律(气压为0.4 MPa, 外部环境温度为20°C)。从图2可以看出, 绝缘子表面温度持续上升15 h后不再有明显的变化, 因此, 当前条件下绝缘子表面温度过渡到稳态的时间为15 h。

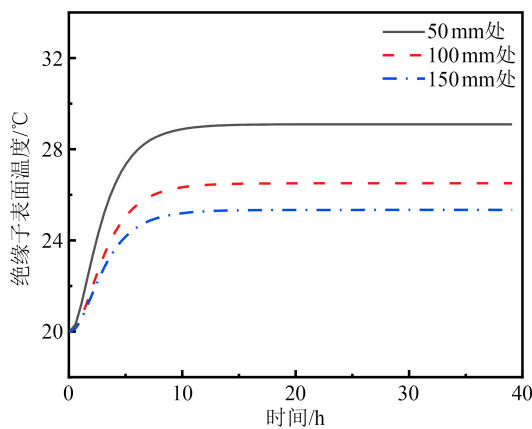


图2 绝缘子表面温度随时间的变化

Fig.2 Variation of surface temperature of insulators over time

图3为DC GIL稳态温度分布和气体流速分布。从图3(a)可以看出, DC GIL腔体温度从中心导体(52.4°C)向接地外壳(24.1°C)逐步减小。同时, 以绝缘子为间隔, 可以发现DC GIL腔体被分隔为两个密闭腔体, 且两个密闭腔体中上半部分温度高于下半部分温度, 这是由于气体对流传热引起的, 如

图3(b)所示。中心导体附近的气体被加热而沿着导体上升至腔体顶部, 之后沿着腔体内壁下降, 并最终流回到中心导体的底部, 其中, 气体流速最大达到 42.5×10^{-3} m/s。

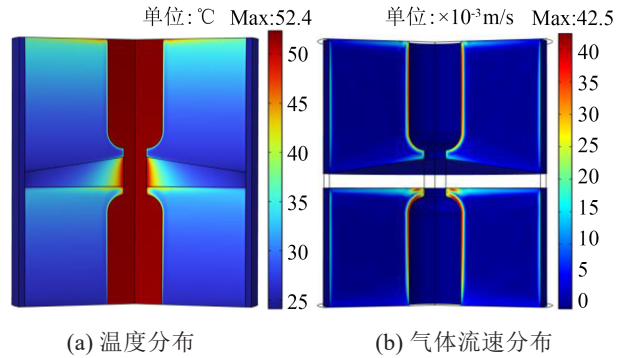


图3 DC GIL腔体稳态时温度和流速分布

Fig.3 Temperature and flow velocity distribution of DC GIL cavity during steady-state

2.2 外部环境温度对表面电荷积聚的影响

DC GIL腔体的接地外壳会与外部环境不断发生热传递, 因此, 外部环境温度的变化势必会对DC GIL腔体内部的温度分布产生影响。本文考虑外部环境温度为恒定值以及外部环境温度随时间变化两种情况, DC GIL内部初始温度设为0°C。其中, 对于环境温度变化的情况, 由于大部分地区早晚温差变化明显, 且在24 h内温度变化近似呈现出三角函数变化特征, 因此本文将外部环境温度简化为三角函数处理, 即将外部环境温度 T_{amb} 设置为与时间 t 相关的正弦函数, 且波动范围为0~20°C, 即 $T_{\text{amb}} = 10^\circ\text{C} + 10^\circ\text{C} \times \sin(\omega t)$, 周期为24 h, 即 $\omega = 2\pi/(24 \text{ h})$, 如图4所示。从图4可以看出, 外部环境温度首先在0~6 h时段从10°C持续上升至20°C, 之后在6~18 h时段从20°C持续下降至0°C, 外部环境温度随时间整体呈现正弦波动变化, 以此来模拟实际环境温度在每天不同时间段的波动情况。

图5为不同外部环境温度下绝缘子表面径向50 mm处温度随时间的变化情况。从图5可以看出, 考虑外部环境温度为恒定值时, T_{amb} 每提高10°C, 绝缘子表面稳态温度增长约2.2°C, 增长率约为8.2%。定义 $t_{90\%}$ 为绝缘子表面温度达到稳态温度的90%时的时间, 可以发现, 当 T_{amb} 为0、10、20°C时, $t_{90\%}$ 分别为6.6、7.1、7.6 h。因此, 外部温度每提高10°C, 绝缘子表面温度的 $t_{90\%}$ 增长约7%。考虑外部环境温度在0~20°C范围内波动时, 可以发现绝缘

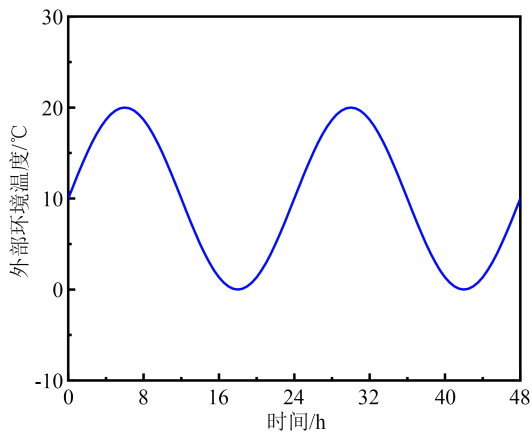


图4 外部环境温度设置

Fig.4 The ambient temperature setup

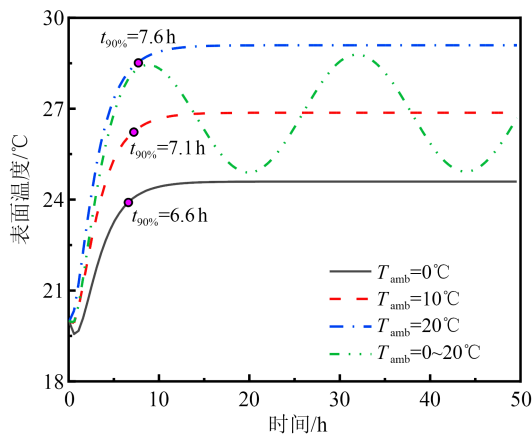


图5 不同外部环境温度下绝缘子表面径向50 mm处温度随时间的变化

Fig.5 Temperature variation over time at the radial 50 mm position of insulators under different external environmental temperatures

子表面温度首先在0~8 h时段呈现持续上升趋势,这是由于该阶段外部环境温度高于DC GIL内部温度,DC GIL内部气体通过金属外壳与外部环境温度不断发生热传递致使内部温度呈现出持续上升趋势。在一段时间后绝缘子表面温度最终随时间呈三角函数波动,波动范围为24.9~28.8°C(最大幅值与最小幅值之差约为3.9°C),这主要是受到外部环境温度的波动所导致。因此,当外部环境温度随时间不断变化时,DC GIL绝缘子表面温度也会随着时间不断变化,而不会出现一个恒定的温度稳态值,这与以往的仿真研究结果(考虑外部环境温度为恒定值的情况)所呈现的稳态温度值不同。

为比较外部环境温度对绝缘子表面温度分布的影响,图6展示了 T_{amb} 为0、10、20°C时绝缘子表面的稳态温度分布。从图6可以看出,绝缘子表面温

度从中心导体处向接地外壳方向逐步降低,且外部环境温度越高,绝缘子表面的稳态温度越高。同时,由外部环境温度引起的绝缘子表面温度差从中心导体处向接地外壳方向逐步增大,在靠近中心导体处绝缘子表面温度几乎相等,而在绝缘子表面中间位置处(径向100 mm),表面温差达到10%左右,具体而言, $T_{amb}=10^\circ\text{C}$ 时绝缘子表面温度比 $T_{amb}=0^\circ\text{C}$ 时增长了10.6%, $T_{amb}=20^\circ\text{C}$ 时绝缘子表面温度比 $T_{amb}=10^\circ\text{C}$ 时增长了9.2%。同时,表面温度差在靠近接地外壳处达到最大。

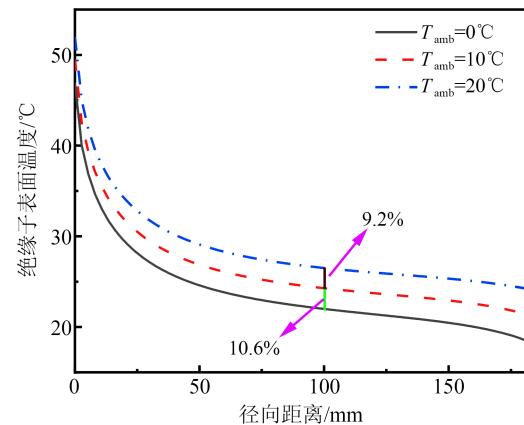


图6 不同外部环境温度下绝缘子表面稳态温度分布

Fig.6 Steady state temperature distribution on the surface of insulators under different environmental temperatures

图7展示了外部环境温度为20°C时绝缘子径向的表面电荷密度分布情况(与文献[26]的结果基本相似)。从图7可以看出,在中心导体附近绝缘子表面主要积聚正电荷,在径向距离为0~50 mm主要积聚负电荷,而在径向距离为50~180 mm则主要积聚正电荷,这主要是由该模型下绝缘子表面的电场分布所决定的。由于表面电荷在绝缘子上的分布特征已被大量研究,本文将重点关注温度对绝缘子表面电荷时变特征的影响,尤其是当温度随时间不断变化时。

图8展示了不同外部环境温度下绝缘子表面径向25 mm处(该模型下25 mm处为绝缘子负表面电荷的峰值位置)表面电荷随时间的变化。从图8可以看出,绝缘子表面电荷密度随外部环境温度的升高而增大,且表面电荷密度在 $t=10\,000$ h左右达到稳态值。当 $T_{amb}=10^\circ\text{C}$ 时,绝缘子表面电荷密度相比 $T_{amb}=0^\circ\text{C}$ 时增长了28.7%。而 $T_{amb}=20^\circ\text{C}$ 时,表面电荷密度相比 $T_{amb}=10^\circ\text{C}$ 增长了17.3%。当 T_{amb} 在0~20°C范围内波动时,其表面电荷密度基本与 $T_{amb}=$

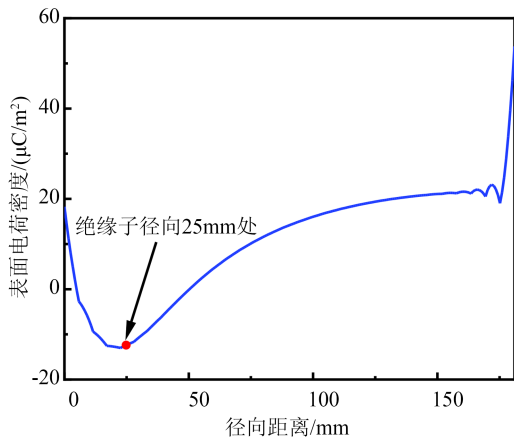


图7 绝缘子径向的表面电荷密度分布

Fig.7 Surface charge density distribution along the radial direction of insulator

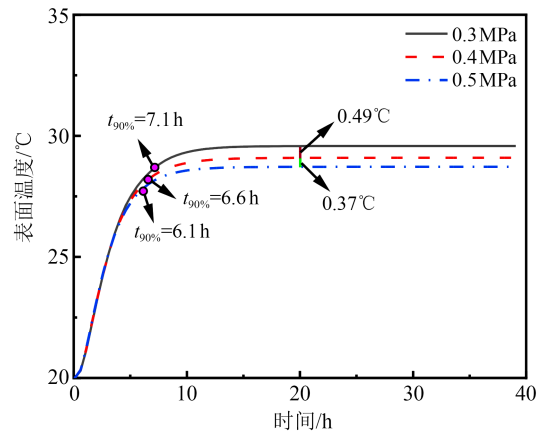


图9 不同气压对绝缘子表面温度随时间的变化

Fig.9 Changes in surface temperature of insulators over time under different air pressures

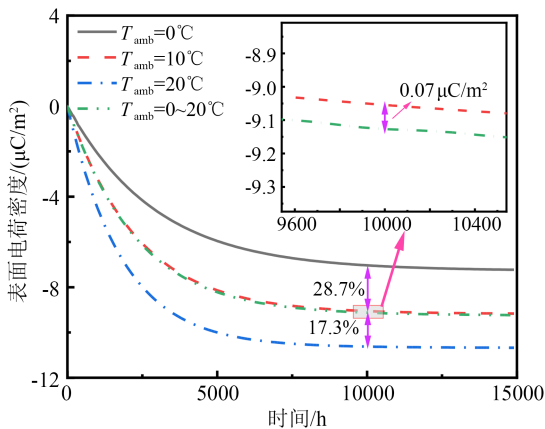


图8 不同外部温度对表面电荷密度时变特征的影响

Fig.8 The influence of different external temperatures on the time-varying characteristics of surface charge density

10°C相等,两者在 $t=10\,000$ h时的电荷密度差值仅为 $0.07\ \mu\text{C}/\text{m}^2$ 。这可以说明当外部环境温度随时间波动时,绝缘子表面电荷密度与其平均温度下的值近似相等。

2.3 气压对表面电荷积聚的影响

图9展示了 $T_{\text{amb}}=20^\circ\text{C}$ 时不同气压下绝缘子表面径向50 mm处温度随时间的变化情况。从图9可以看出,绝缘子表面温度的 $t_{90\%}$ 随气压的升高而逐步缩短,在0.3、0.4、0.5 MPa下 $t_{90\%}$ 分别为7.1、6.6、6.1 h。同时,可以发现绝缘子表面稳态温度随着气压的升高而下降,0.3、0.4、0.5 MPa下绝缘子表面稳态温度分别为29.58、29.09、28.72°C。

图10展示了 $T_{\text{amb}}=20^\circ\text{C}$ 时不同气压下绝缘子表面径向25 mm处表面电荷密度随时间的变化。从图10可以看出,绝缘子表面电荷密度在 $t=10\,000$ h左右达到稳态值,且表面电荷密度随着气压的升高

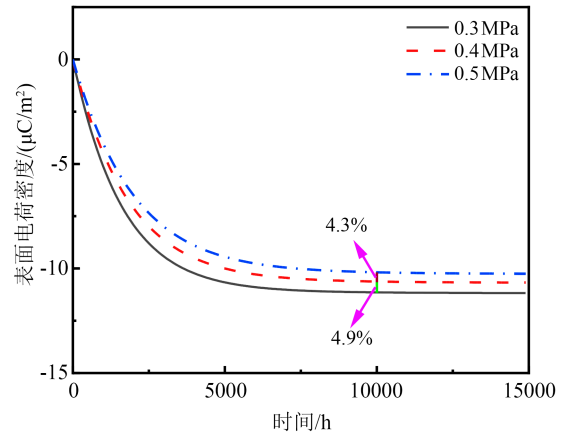


图10 不同气压对绝缘子表面电荷密度时变特征的影响

Fig.10 The effect of different air pressures on the time-varying characteristics of surface charge density of insulators

而减小。在 $t=10\,000$ h时,0.3、0.4、0.5 MPa下的表面电荷密度分别为 -11.14 、 -10.62 、 $-10.18\ \mu\text{C}/\text{m}^2$ 。造成这种现象的原因主要是不同气压下绝缘子表面稳态温度存在差异(如图9所示),气压越高,绝缘子表面稳态温度越低,绝缘子体电导率越小,导致固体侧注入电流密度减小。同时,不考虑温度梯度的影响,气压也会影响气体侧的离子输运过程,离子对产生速率会随着气压的升高而增大,使得气体侧注入电流密度增大。由公式(1)可知,在这两种因素的共同作用下,最终会使得绝缘子表面电荷密度随着气压的升高而减小。

3 结论

本文建立了DC GIL的电-热场耦合数学模型,并综合考虑了外部环境温度以及腔体内部气压对

DC GIL 绝缘子表面温度分布以及表面电荷积聚特征的影响,得到以下主要结论:

(1)当外部环境温度恒定值时,绝缘子表面稳态温度随着外部环境温度的升高而增大,绝缘子表面温度达到稳态分布的时间增加。当外部环境温度随时间在较大温度范围内波动时,绝缘子表面温度在持续上升一段时间后,最终会随着时间在特定温度范围内波动,且不会出现一个恒定的温度稳态值。

(2)当外部环境温度为恒定值时,绝缘子表面电荷密度在 10 000 h 左右达到稳态值,且稳态电荷密度值随着外部环境温度的升高而增大。当外部环境温度随时间在较大温度范围内波动时,绝缘子表面电荷密度与该段时间内环境平均温度下的表面电荷密度值近似相等,在考虑热-电场耦合下的表面电荷长时期仿真中,可将外部环境温度设置为其平均温度以减小计算量和计算难度,这对表面电荷密度分布的影响在可接受范围内。

(3)当外部环境温度为 20℃ 时,绝缘子表面温度达到稳态温度 90% 时的时间和稳态温度值随着气压的升高而减小,且绝缘子表面电荷密度也随着气压的升高而减小。

参考文献 References

- [1] LI C Y, ZHANG C H, LV J Z, et al. China's 10-year progress in DC gas-insulated equipment: from basic research to industry perspective [J]. *iEnergy*,2022,1(4):400-433.
- [2] 赵慧存,高宇,王文渠,等.不同温度下弹跳金属微粒对圆盘绝缘子表面电荷积聚的影响[J].*绝缘材料*,2022,55(10):39-46.
ZHAO H C, GAO Y, WANG W Q, et al. Effect of bouncing metal particles on charge accumulation on disc insulator surface at different temperatures[J]. *Insulating Materials*,2022,55(10):39-46.
- [3] 李进,王雨帆,梁虎成,等.高压直流 GIL 盆式绝缘子非线性电导参数优化[J].*中国电机工程学报*,2021,41(1): 166-173.
LI J, WANG Y F, LIANG H C, et al. Parameter optimization of nonlinear conductivity spacer for HVDC GIL[J]. *Proceedings of the CSEE*,2021,41(1):166-173.
- [4] 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 G, WEI J W, HE Y M, et al. Development of ±200 kV DC Basin insulator[J]. *Insulating Materials*,2021,54(4):64-71.
- [5] 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 Q M, WANG J, LI B T, et al. Review on metal particle contamination in GIS/GIL[J]. *High Voltage Engineering*, 2016, 42(3): 849-860.
- [6] 蔺占芳,王柯.直流电场下盆式绝缘子体积电导率对其表面电荷积聚特性的影响[J].*绝缘材料*,2021,54(3):54-59.
LIN Z F, WANG K. Effect of volume conductivity of basin type insulator on its surface charge accumulation under DC electric filed[J]. *Insulating Materials*,2021,54(3):54-59.
- [7] 张博雅,张贵新.直流 GIL 中固-气界面电荷特性研究综述I: 测量技术及积聚机理[J].*电工技术学报*,2018,33(20): 4649-4662.
ZHANG B Y, ZHANG G X. Review of charge accumulation characteristics at gas-solid interface in DC GIL, Part I: measurement and mechanisms[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*,2018,33(20):4649-4662.
- [8] 王哲铭,潘越,张磊,等.直流 GIL 气-固界面电荷调控的影响因素分析[J].*中国电机工程学报*,2021,41(20):7177-7193.
WANG Z M, PAN Y, ZHANG L, et al. Analysis of charge tailoring techniques for DC GIL gas-solid interface charges[J]. *Proceedings of the CSEE*,2021,41(20):7177-7193.
- [9] CHEN G, TU Y P, WANG C, et al. Analysis on temperature distribution and current-carrying capacity of GIL filled with fluoronitriles-CO₂ gas mixture[J]. *Journal of Electrical Engineering & Technology*,2018,13(6):2402-2411.
- [10] WANG F, LIANG F W, CHEN S, et al. Surface charge inversion method on cylindrical insulators based on surface potentials measured online[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,2021,28(1):192-197.
- [11] 唐炬,潘成,王邸博,等.高压直流绝缘材料表面电荷积聚研究进展[J].*电工技术学报*,2017,32(8):10-21.
TANG J, PAN C, WANG D B, et al. Development of studies about surface charge accumulation on insulating material under HVDC[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*,2017, 32(8):10-21.
- [12] 张博雅,王强,张贵新,等.SF₆ 中绝缘子表面电荷积聚及其对直流 GIL 闪络特性的影响[J].*高电压技术*,2015,41(5):1481-1487.
ZHANG B Y, WANG Q, ZHANG G X, et al. Surface charge accumulation on insulators in SF₆ and its effects on the flashover characteristics of HVDC GIL[J]. *High Voltage Engineering*, 2015,41(5):1481-1487.
- [13] 张贵新,张博雅,王强,等.高压直流 GIL 中盆式绝缘子表面电荷积聚与消散的实验研究[J].*高电压技术*,2015,41(5):1430-1436.
ZHANG G X, ZHANG B Y, WANG Q, et al. Experiment study of surface charge accumulation and decay on a cone-type insulator in HVDC GIL[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(5): 1430-1436.
- [14] WINTER A, KINDERSBERGER J. Transient field distribution in gas-solid insulation systems under DC voltages[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*,2014,21(1): 116-128.
- [15] XUE J Y, ZHANG Z, LI B B, et al. Temperature-dependent adaptive conductivity coating for surface charge release and electric field control under electro-thermal coupling field[J]. *High Voltage*,2023,8(5):1082-1092.
- [16] DU B X, DONG J N, LI J, et al. Gas convection affecting surface charge and electric field distribution around tri-post insula-

- tors in ± 800 kV GIL[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2021,28(4):1372-1379.
- [17] 李传扬,林川杰,陈庚,等. 高压直流盆式绝缘子气-固界面电荷行为研究综述[J]. 中国电机工程学报,2020,40(6):2016-2025.
LI C Y, LIN C J, CHEN G, et al. Review of gas-solid interface charging phenomena of HVDC spacers[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(6):2016-2025.
- [18] 王强,张贵新,王新新. 直流电压下气固交界面表面电荷积聚现象的实验分析[J]. 高电压技术,2011,37(3):594-598.
WANG Q, ZHANG G X, WANG X X. Surface charge accumulation phenomenon at the gas-solid interface under DC voltage [J]. High Voltage Engineering,2011,37(3):594-598.
- [19] 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 H Y, MA G M, ZHAO S J, et al. Effect of temperature on charge accumulation on insulator in DC-GIL[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(24):6675-6681.
- [20] 薛建议. 直流气体绝缘输电管道气固界面电荷的积聚特性与涂层六法调控[D]. 西安:西安交通大学,2020.
XUE J Y. Accumulation characteristics of gas-solid interface charges in DC gas insulated transmission lines and six coating methods for charge regulation[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University,2020.
- [21] ZHANG B Y, QI Z, ZHANG G X. Charge accumulation patterns on spacer surface in HVDC gas-insulated system: dominant uniform charging and random charge speckles[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(2):1229-1238.
- [22] LI C Y, LIN C J, ZHANG B, et al. Understanding surface charge accumulation and surface flashover on spacers in compressed gas insulation[J]. IEEE Transaction on Dielectric and Electrical Insulation,2018,25(4):1152-1166.
- [23] WINTER A, KINDERSBERGER J. Stationary resistive field distribution along epoxy resin insulators in air under DC voltage [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012,19(5):1732-1739.
- [24] MA G M, ZHOU H Y, LU S J, et al. Effect of material volume conductivity on surface charges accumulation on spacers under DC electro-thermal coupling stress[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2018,25(4):1211-1220.
- [25] STRAUMANN U, SCHULLER M, FRANCK C M. Theoretical investigation of HVDC disc spacer charging in SF₆ gas insulated systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2012,19(6):2196-2205.
- [26] YAN W, LI C Y, LEI Z P, et al. Surface charging on HVDC spacers considering time-varying effect of temperature and electric fields[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2019,26(4):1316-1324.
- [27] LI X L, WANG M D, ZHANG G K, et al. Surface charge characteristics of DC-GIL insulator under multiphysics coupled field: effects of ambient temperature, load current, and gas pressure[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2022,29(4):1530-1539.
- [28] 胡琦,李庆民,刘智鹏,等. 温度梯度下直流GIL三支柱绝缘子电荷积聚对电场分布的影响分析[J]. 电工电能新技术,2021,40(7):20-27.
HU Q, LI Q M, LIU Z P, et al. Impact analysis of charge accumulation on electric field distribution of DC GIL tri-post insulator under temperature gradients[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy,2021,40(7):20-27.
- [29] 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.
- [30] 晏武,张周胜,邓保家,等. 温度和正极性电压对直流GIL盆式绝缘子表面电荷积聚的影响[J]. 高电压技术,2019,45(12):3889-3897.
YAN W, ZHANG Z S, DENG B J, et al. Influence of temperature and positive voltage on surface charge accumulation for the disc insulator of GIL under DC voltage[J]. High Voltage Engineering,2019,45(12):3889-3897.

收稿日期:2023-10-31;修回日期:2023-12-22。

作者简介:

张雨啸(1998-),男(土家族),湖北恩施人,硕士生,主要研究方向为输变电设备局部放电相关领域;

张磊(1996-),男(土家族),湖北巴东人,博士生,主要研究方向为绝缘材料气固界面电荷积聚机理与GIS/GIL气体侧电荷传导机制等;

通信作者:唐忠(1964-),男(汉族),上海人,教授,主要研究方向为电力系统运行与控制相关领域。