

非线性电导涂层对直流GIL绝缘子空间/表面电荷和沿面电场的调控研究

陈继明, 吴绩涛, 毕官正, 尹智慧

(中国石油大学(华东) 新能源学院, 山东 青岛 266580)

摘要:空间/表面电荷积聚是导致直流GIL绝缘子沿面闪络电压降低的潜在原因,涂敷非线性电导涂层是提升沿面绝缘性能的有效方法。本文建立了电场依赖性非线性电导涂层对绝缘子空间/表面电荷及沿面电场调控的数学模型,综合考虑了绝缘气体电流密度以及绝缘子固体电导率与电场强度的非线性关系,通过该模型研究了温度梯度分布下绝缘子内部电荷的分布规律,以及非线性电导涂层对绝缘子表面电荷积聚的影响机制。结果表明:非线性电导涂层对空间电荷消散有明显的促进作用,高压电极附近的同极性电荷主导了表面电荷分布;由于表面电荷分布和切向电场的改善,绝缘子的沿面闪络性能得到提高;在绝缘子与涂层界面之间会积聚正电荷,并从高压电极向地电极逐步递减。

关键词:直流GIL;非线性电导涂层;固-气/固-固界面电荷积聚;空间电荷密度

中图分类号:TM216 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2024.03.012

Study on regulation of space/surface charge and surface electric field of DC GIL insulator by nonlinear conductive coating

CHEN Jiming, WU Jitao, BI Guanzheng, YIN Zhihui

(College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China)

Abstract: Space/surface charge accumulation is a potential cause for the decrease of surface flashover voltage of DC GIL insulators. Applying nonlinear conductive coating is an effective method to improve the surface insulation performance. In this paper, a mathematical model was established for the regulation of space/surface charge and surface electric field of insulator by electric field dependent nonlinear conductive coating. The nonlinear relationships between the current density of insulating gas and the solid conductivity of insulator and the electric field intensity were comprehensively considered. The internal charge distribution law of insulator under temperature gradient distribution and the influence mechanism of nonlinear conductive coating on the surface charge accumulation of insulator were studied through this model. The results show that the nonlinear conductive coating promotes the dissipation of space charge obviously, and the homopolar charge near the high voltage electrode dominates the surface charge distribution. Due to the improvements of surface charge distribution and tangential electric field, the surface flashover performance improves. The positive charge may accumulate between the insulator and the coating interface, and decrease gradually from the high voltage electrode to the ground electrode.

Key words: DC GIL; nonlinear conductive coating; charge accumulation at the solid-gas/solid-solid interface; space charge density

0 引言

高压气体绝缘输电线路(gas-insulated transmission lines, GIL)相较于传统架空线路具有可靠性高、稳定性好等优点^[1],在自然环境恶劣地区已被应用于直流输电系统中。但在直流高压作用下,绝缘子空间和表面电荷积聚导致沿面电场发生畸变,会影响绝缘子的沿面绝缘性能,限制了直流GIL的大规模发展^[2]。

目前针对绝缘子沿面绝缘性能的研究主要集

中在表面电荷积聚特性和表面电荷抑制策略两个方面^[3-4]。前者研究的是电荷在固-气界面上的积累、耗散和输运机理^[5],后者旨在提出抑制表面电荷积聚的方法^[6],从而提高表面绝缘强度。因此,掌握表面电荷积聚的机理至关重要。目前,许多研究者对直流GIL绝缘子空间/表面电荷积聚的机理进行了大量研究^[7-11],认为表面电荷的来源主要有3种:①气体体积电流;②绝缘子表面电流;③绝缘子侧体积电流^[12]。

绝缘子表面涂层是抑制表面电荷积聚的有效手段。文献[13]利用不同TiO₂含量的TiO₂/环氧树脂复合材料以及文献[14]将Cr₂O₃沉积到环氧树脂材料表面的方式,实现了绝缘子表面从高压电极到接地电极电导率逐步减小的效果,结果表明这种涂层抑制了表面随机分布和电极附近的局部电荷。同时文献[15]提出的不同表面导电性分级涂层(surface conductivity graded coating, SCGC)与文献[16]提出的表层功能梯度材料(surface functionally graded materials, SFGM)的方案类似,前者揭示了绝缘子的表面电荷行为和闪络性能,后者研究了SFGM方案对直流GIL绝缘子电场分布的调控机理。文献[17]通过建立GIL盆式绝缘子在直流电压下电荷积聚的仿真模型,分析了主导表面电荷积累机制转变的原因;同时通过实验发现SiC/环氧涂层材料的非线性电导性可以控制电极的充电过程^[18-20]。不过以上研究也存在一些不足:在研究涂层对电荷的调控时未考虑温度梯度导致电导率分布不均对电荷积聚的影响;不管是仿真分析或是实验计算,均未考虑绝缘子与涂层之间界面电荷积聚的问题。

本文在考虑温度梯度下研究非线性电导涂层对直流GIL绝缘子空间/表面电荷和沿面电场的调控机理。在涂层电导率、气体侧电流密度与场强以及绝缘子体积电导率与温度的非线性关系基础上,建立非线性电导涂层对绝缘子空间/表面电荷调控的数学模型,并通过该模型研究非线性电导涂层对空间电荷和界面电荷以及电场分布的调控机制。

1 直流GIL电-热多物理场数学模型

由于直流GIL绝缘子表面电导、气体侧电导和固体侧电导机制的影响,其空间/表面电荷的积聚是一个动态平衡过程,下面分别从固-气界面、固-固界面电荷积聚特性和直流GIL温度出发介绍直流GIL的电-热多物理场数学模型。

1.1 绝缘气体侧数学模型

在绝缘气体中,由于正、负离子不停地产生、复合、碰撞和扩散,气体侧电流密度与场强并非简单的线性关系,本文建立考虑微观过程的气体侧数学模型。

使用微分方程组来表示绝缘气体中正、负离子密度,如式(1)所示^[2,21]。

$$\begin{cases} \partial n^+ / \partial t = \partial n_{ip} / \partial t - k_r n^+ n^- - \operatorname{div}(n^+ b^+ E) + D^+ \nabla^2 n^+ \\ \partial n^- / \partial t = \partial n_{ip} / \partial t - k_r n^+ n^- - \operatorname{div}(n^- b^- E) + D^- \nabla^2 n^- \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: $\partial n_{ip} / \partial t$ 为绝缘气体中离子对生成速率,本文取值为30 IP/(cm³·s),IP为离子对; k_r 为复合系数,

取值为 1.74×10^{-7} cm³/s^[10]; n^+ 、 n^- 是正、负离子密度; b^+ 、 b^- 是正、负离子迁移率, $b^+ = b^- = 0.048$ cm²/(V·s); E 为电场强度; D^+ 、 D^- 是正、负离子扩散速率。

在绝缘气体中正、负离子的扩散速率可由Einstein方程(式(2))表示。

$$D^+ = D^- = b^{+/-} \cdot \frac{k_B T_g}{e} \quad (2)$$

式(2)中, T_g 为SF₆气体温度。

直流GIL中的电场强度和正、负离子密度与电势 φ 的关系可由式(3)~(4)表示。

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

$$\nabla^2\varphi = -e(n^+ - n^-) / \varepsilon \quad (4)$$

式(4)中, ε 为介电常数。

以上微分方程构建了绝缘气体侧内部离子运动的微观模型,联立可以求得正、负离子的密度分布和电场分布。

1.2 涂层固-气界面数学模型

涂层固-气界面电荷密度随时间变化的积聚方程如式(5)所示^[22],指定由固体侧指向气体侧的方向为电场法向方向,如图1所示。

$$\partial\sigma / \partial t = J_{in} - J_{Gn} - \nabla \cdot (\gamma_s E_\tau) \quad (5)$$

式(5)中: J_{Gn} 为气体侧法向电流密度; J_{in} 为固体侧法向电流密度; γ_s 为涂层表面电导率; E_τ 为切向电场强度; σ 为表面电荷密度; t 为电荷积聚时间。

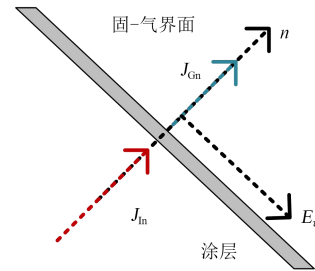


图1 涂层固-气界面向量示意图

Fig.1 Diagram of solid-gas interface vector of the coating

涂层内部电流密度由位移电流和传导电流组成,如式(6)所示。

$$J_1 = \frac{\partial D}{\partial t} + \gamma_c E \quad (6)$$

式(6)中: J_1 为涂层侧体积电流密度; D 为电通量密度; γ_c 为涂层体积电导率; E 为电场强度。

绝缘气体的体积电流密度 J_G 可表示为式(7)。

$$J_G = \partial D / \partial t + eE(n^+ b^+ + n^- b^-) - e \operatorname{grad}(D^+ n^+ - D^- n^-) \quad (7)$$

根据非线性电阻电场分级理论,在电场不为0的情况下,涂层体积电导率与场强的关系如式(8)所示^[23]。

$$\gamma_c = \gamma_c (E/E_c)^\alpha \quad (8)$$

式(8)中: α 是表征电导率对所加电场依赖性的非线性指数,本文取值为2.67^[23]; γ_c 、 E_c 分别为临界电导率和临界电场。

在直流GIL中,涂层表面电流密度由切向场强 E_t 和表面电导率 γ_s 来表征。其中, γ_s 可表示为式(9)。

$$\gamma_s = \gamma_0 e^{\alpha_0 E_t} \quad (9)$$

式(9)中: γ_0 为材料系数; α_0 为电场敏感系数^[24]。

1.3 绝缘子空间电荷

在电场向稳态过渡过程中,温度分布不均导致电导率分布不均,若电导率分布不均匀,内部将积累空间电荷。本文考虑到绝缘子电导率和温度的非线性关系。直流GIL绝缘子空间电荷密度 ρ_i 与电势 φ 的关系可用Poisson方程表示,如式(10)所示。

$$\nabla^2 \varphi = -\rho_i / \varepsilon_i \quad (10)$$

式(10)中, ε_i 为绝缘子相对介电常数。

根据电流连续性原理,绝缘子空间电荷密度 ρ_i 与电流密度 J 的关系可表示为式(11)。

$$\nabla J = -\partial \rho_i / \partial t \quad (11)$$

电场强度 E 与电势 φ 以及电流密度 J 的关系分别如式(12)和式(13)所示。

$$E = -\nabla \varphi \quad (12)$$

$$J = \gamma_v E \quad (13)$$

由以上可推出式(14)。

$$\partial \rho_i / \partial t = (\nabla \gamma_v)(\nabla \varphi) - (\gamma_v \varepsilon_i) / \rho_i \quad (14)$$

根据经验公式,绝缘子体积电导率与温度的关系可表示为式(15)。

$$\gamma_v = A e^{\frac{B}{T_i}} \quad (15)$$

式(15)中: A 、 B 为材料系数; T_i 为绝缘子温度^[24]。

1.4 涂层固-固界面数学模型

绝缘子与涂层之间的电导率和介电常数的不连续会引起固-固界面电荷积聚,图2和式(16)~(18)展示了绝缘子和涂层之间的极化模型^[25]。

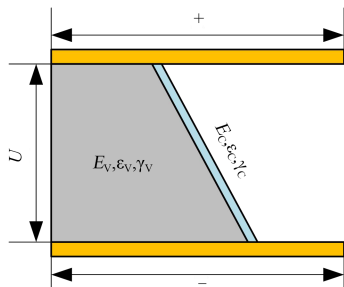


图2 Maxwell-Wagner极化模型示意图

Fig.2 Diagram of Maxwell-Wagner polarization model

$$E_v d_v + E_c d_c = U \quad (16)$$

$$\gamma_v E_v - \gamma_c E_c = 0 \quad (17)$$

$$\varepsilon_c E_c - \varepsilon_v E_v = \rho_s \quad (18)$$

式(16)~(18)中: E_v 、 ε_v 、 γ_v 分别为绝缘子的电场强度、介电常数和体积电导率,其中 ε_v 取值为4.95^[26]; E_c 、 ε_c 、 γ_c 分别为涂层的电场强度、介电常数和体积电导率, ρ_s 为界面电荷密度; U 为两端所加电压; d_v 为绝缘子的厚度; d_c 为涂层厚度。

1.5 绝缘子温度分布特性

直流GIL在工况下会存在温度梯度分布,以热传导和热对流为主要传导机制,根据傅里叶定律可得出式(19)和式(20)。

$$\rho C \cdot \partial T / \partial t + \rho C u \nabla T + \nabla q = Q \quad (19)$$

$$q = -k \nabla T \quad (20)$$

式(19)~(20)中: ρ 为物体的密度; C 为物体的比热容; T 为物体的温度; k 为物体的导热系数; u 为流体速度场; q 为物体的热通量; t 为时间; Q 为热源。

热传导主要发生在电极与绝缘子之间,其传热过程可由式(21)进行描述。

$$\frac{\lambda}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_i}{\partial r} \right) + \lambda \frac{\partial^2 T_i}{\partial r^2} + Q = 0 \quad (21)$$

式(21)中: λ 为绝缘子导热系数,本文取值为0.2 W/(m·K); Q 为高压电极与绝缘子间热通量; r 为坐标系 r 轴; T_i 为绝缘子温度。

对流换热主要发生在高压电极与绝缘气体、绝缘子与绝缘气体、外壳与大气环境之间,其对流过程可由式(22)进行描述,对流系数采用COMSOL固体和流体传热模块中的外部自然对流模型。

$$\begin{cases} Q_1 = h_1 A_1 (T_h - T_g) \\ Q_2 = h_2 A_2 (T_i - T_g) \\ Q_3 = h_3 A_3 (T_1 - T_a) \end{cases} \quad (22)$$

式(22)中: h_1 、 h_2 、 h_3 分别为高压电极与绝缘气体、绝缘子与绝缘气体、外壳与大气环境之间的传热系数; A_1 、 A_2 、 A_3 为高压电极与绝缘气体、绝缘子与绝缘气体、外壳与大气环境之间对流的有效接触面积; T_h 、 T_i 、 T_a 、 T_1 、 T_g 分别为高压电极、地电极、大气环境、绝缘子与绝缘气体的温度。

2 仿真及分析

2.1 直流GIL绝缘子仿真模型、参数及边界条件

通过多物理场有限元软件建立GIL台式绝缘子二维轴对称仿真模型。其中高压电极与地电极之间的距离为20 mm,电极半径为30 mm,绝缘子上半径为10 mm,下半径为20 mm,如图3所示,绝缘子体积电流密度和表面电流密度可以等效为两个电

阻并联的电路模型。为减少计算量,不考虑各种潜在因素的影响,仿真模型参数如表 1 所示。

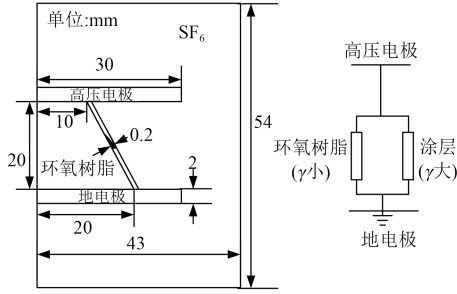


图 3 圆台绝缘子几何仿真模型

Fig.3 Geometric simulation model of circular insulator

表 1 仿真模型参数

Tab.1 Simulation model parameters

物理量	名称	数值	参考文献
e/C	单位电荷量	1.6×10^{-19}	[10]
$k_B/(J/K)$	玻尔兹曼常数	1.38×10^{-23}	[10]
ϵ_{SF_6}	六氟化硫介电常数	1.002	[10]
$\epsilon_0/(F/m)$	真空介电常数	8.854×10^{-12}	[26]
$n_0^{\pm}/(1/m^3)$	初始正、负离子密度	1.14×10^{10}	[22]
$\gamma_c/(S/m)$	临界电导率	1×10^{-13}	[23]
$E_c/(kV/mm)$	临界电场强度	5	[23]
γ_0/S	材料系数	10^{-20}	[24]
$\alpha_0/(m/MV)$	电场敏感系数	1.25	[24]
P/MPa	仿真压强	0.5	[22]
$A/(S/m)$	材料系数	45.5	[24]
B/K	材料系数	1.086×10^4	[24]
T_0/K	基准温度	273.15	[26]
T_h/K	高压电极温度	371	[26]
T_l/K	地电极温度	333	[26]
T_a/K	大气温度	313	[10]

通过设置计算所需要的边界条件便能展开仿真计算。在高压电极和地电极设置狄利克雷边界条件,如式(23)和式(24)所示。

$$\varphi_h = U \quad (23)$$

$$\varphi_l = 0 \quad (24)$$

式(23)~(24)中, φ_h 、 φ_l 分别为高压侧和低压侧电势。

绝缘气体电极侧边界正离子密度(n^+)为狄利克雷边界条件,绝缘子或涂层表面负离子密度(n^-)为纽曼边界条件,如式(25)和式(26)所示。

$$n^+ = 0 \quad (25)$$

$$\nabla n^- = 0 \quad (26)$$

绝缘气体筒壁侧边界负离子密度(n^-)为狄利克雷边界条件,绝缘子或涂层表面正离子密度(n^+)为纽曼边界条件,如式(27)和式(28)所示。

$$n^- = 0 \quad (27)$$

$$\nabla n^+ = 0 \quad (28)$$

2.2 绝缘子温度和涂层电导率分布

施加电压后,直流 GIL 台式绝缘子内部温度分布和涂层电导率分布分别如图 4 和图 5 所示。从图 4 可以看出,直流 GIL 温升达到稳定状态后内部温度分布均匀且由高压电极向地电极逐渐降低。温度梯度分布会导致绝缘子体积电导率变化,从而影响绝缘子内部与表面电荷的积聚与消散。因此,在研究非线性电导涂层对固-气界面电荷的调控规律时需要考虑 GIL 内部温度梯度。

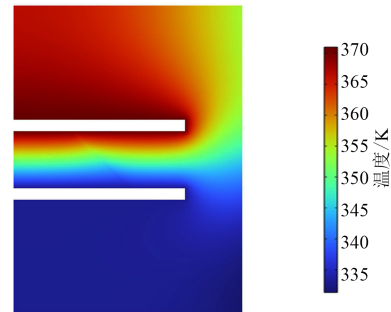


图 4 稳定状态下直流 GIL 内部温度分布

Fig.4 Internal temperature distribution of DC GIL in stable state

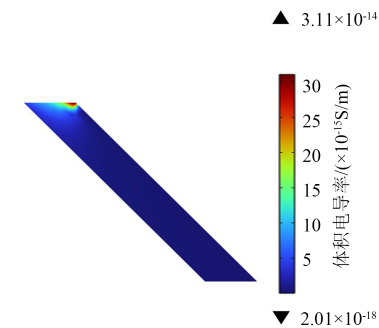


图 5 稳定状态下涂层内部电导率分布

Fig.5 Conductivity distribution inside the coating in stable state

从图 5 可以看出,涂层内部的电场梯度分布使涂层的电导率呈现连续梯度分布,且电导率从高压电极到接地电极逐渐降低。在直流系统中,电场分布与涂层电导率分布成反比,电导率越大,电场越小。因此,依据电场依赖性非线性电导率涂层可以实现电场分布的自适应调节,从而对空间/表面电荷进行调控。

2.3 引入涂层前后绝缘子空间电荷积聚特性

由于电导率分布不均匀,在过渡到恒定电场过程中,直流 GIL 绝缘子内部将有自由电荷积累。图 6 和图 7 直观地展现了引入涂层前后绝缘子内部的

电荷密度分布情况。从图6和图7可以看出,电导率的不均匀分布导致绝缘子内部积聚正电荷,且空间电荷密度最大位置位于高压电极附近温差较大的区域。在高压直流激励下,绝缘子内部积聚正电荷。引入涂层后,绝缘子空间电荷密度峰值由17.9 mC/m³减小至12.7 mC/m³,减小了29.05%;最小值由0.01 mC/m³增大到0.05 mC/m³。这是由于气体侧电流密度在电场强度变化不大的情况下几乎不变,而涂层电导率相较于绝缘子体积电导率数量级高很多,由并联电路等效模型可知绝缘子内部电荷是通过涂层的体传导电流消散。

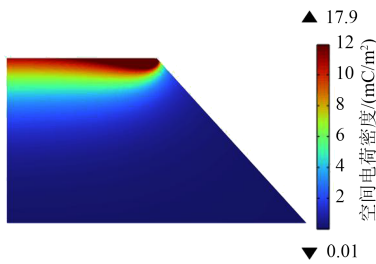


图6 引入涂层前稳定状态下绝缘子空间电荷分布
Fig.6 Space charge distribution of insulators in stable state before introducing coating

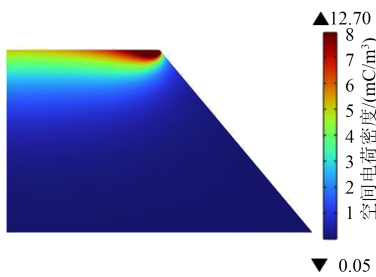


图7 引入涂层后稳定状态下绝缘子空间电荷分布
Fig.7 Space charge distribution of insulators in stable state after introducing coating

2.4 引入涂层前后固-气界面电荷积聚特性

在直流激励下,直流 GIL 绝缘子在有涂层时绝缘子固-气界面的电荷密度如图8~9所示。从图8可以看出,在直流电压作用下,无涂层时台式绝缘子表面靠近高压电极处积聚同极性电荷,地电极附近积聚异极性电荷;有涂层时仅在高压电极处积聚大量同极性电荷,附近分布有少量的异极性电荷;界面电荷密度在无涂层和有涂层时的最大值分别为0.91 mC/m²和1.40 mC/m²,有涂层时的界面电荷密度峰值相较无涂层时增大了53.85%。如图9所示,引入涂层前绝缘子电流密度由高压电极向地电极按指数形式衰减,与绝缘子体积电导率-温度的指数关系相符;引入涂层后体电流密度和面电流密度急剧衰减,这是因为三结合点处的电场强度最大,而非线性电导涂层又有电场依赖性。

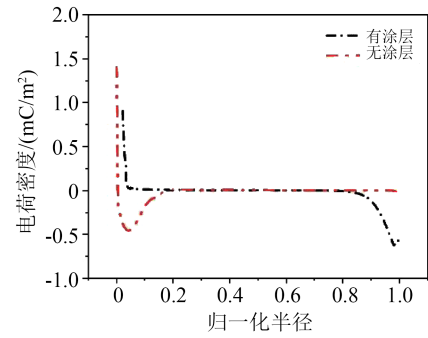
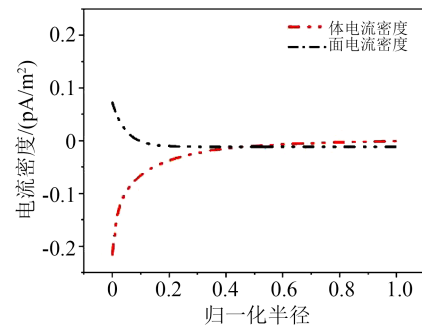
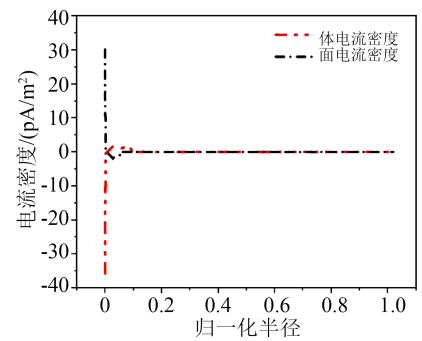


图8 固-气界面电荷密度

Fig.8 Charge density at the solid-gas interface



(a)无涂层



(b)有涂层

图9 引入涂层前后电流密度

Fig.9 Current density before and after introducing coating

事实上,气体电流在低场强和温度梯度不变的情况下变化不大,对于没有涂层的绝缘子,表面电荷积聚过程主要由绝缘子体电流主导,高压电极附近由于体电流传导会积聚同极性电荷,温度由高压电极向接地电极逐级递减导致接地电极附近迁移率较低,异极性电荷主要停留在接地电极附近。而对于引入涂层的绝缘子,由图9可知,绝缘子面电流和体电流都增大,同极性电荷和异极性电荷均增加,如图10表面电荷主导机制示意图所示,涂层表面电导率的增加使得异极性电荷向高压电极快速迁移,导致高压电极附近积聚少量异极性电荷,同时由式(5)可知,在涂层面电流和体电流方向相反的情况下,表面电荷峰值会增加。在其他区域,从

接地电极向高压电极移动的异极性电荷与泄漏电流供给的同极性电荷抵消,形成了几乎无电荷的表面。也就是说,电场依赖性非线性电导涂层对表面电荷的调节作用是通过增加涂层面电流来补偿绝缘子体电流传导电流实现的。

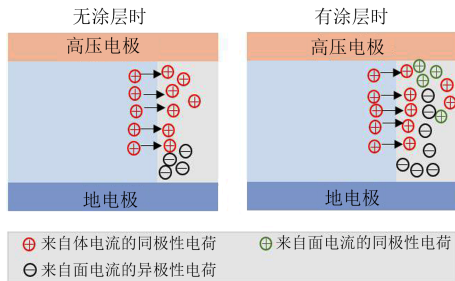


图10 表面电荷主导机制示意图

Fig.10 Schematic diagram of the surface charge dominant mechanism

2.5 引入涂层前后电场分布

直流GIL在工况下运行时,表面电荷积聚导致的切向电场畸变会影响绝缘子的绝缘性能,因此有必要分析固-气界面电荷对沿面电场的影响。

图11和图12分别为有无涂层时固-气界面的法向电场强度和切向电场强度。

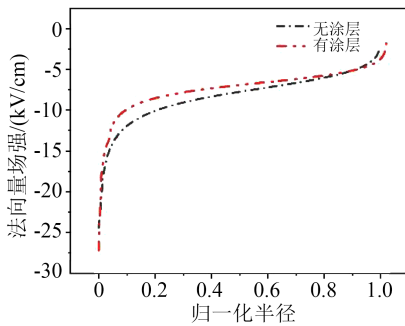


图11 固-气界面法向电场强度

Fig.11 Normal electric field intensity at the solid-gas interface

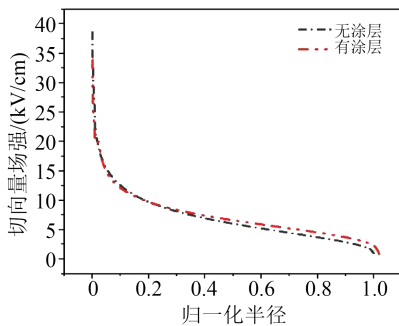


图12 固-气界面切向电场强度

Fig.12 Tangential electric field intensity at the solid-gas interface

从图11和图12可以看出,引入涂层后法向场强峰值由 -24.41 kV/cm 增大至 -27.18 kV/cm ,增大了11.35%;切向场强峰值由 38.52 kV/cm 减小至 33.84 kV/cm ,减小了12.14%。造成这种现象的原因是没有涂层时靠近高压电极的同极性电荷来源于体电流的注入和气体侧正离子在法向场强为负的情况下不断向绝缘表面迁移;引入涂层后,同极性电荷数量的增加增大了法向电场强度,同时高压电极附近积聚少量异极性电荷,削弱了切向电场强度。

2.6 固-固界面电荷分布

引入涂层后,绝缘子与涂层之间的固-固界面也会导致电荷积聚,其对绝缘子绝缘性能的影响直接关系到非线性电导涂层的实际应用。

图13为固-固界面电荷密度。从图13可以看出,绝缘子与涂层之间的同极性电荷密度峰值出现在高压电极附近,这是因为涂层内部传导电流增加,同极性电荷在法向场强为负的情况下不断向固-固界面迁移。另外三结合点处涂层内部电场显著高于绝缘子内部电场,根据式(18),也能推断出其峰值出现在高压电极附近。当接近地电极时,绝缘子内部电场与涂层内部电场的差值逐渐减小,其固-固界面电荷密度也逐渐减小。

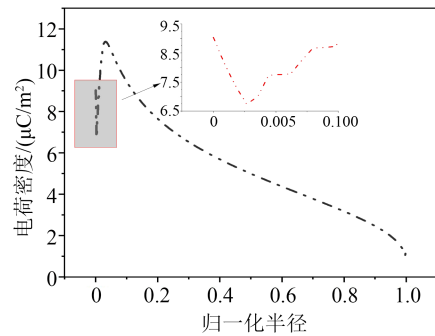


图13 固-固界面电荷密度

Fig.13 Charge density at the solid-solid interface

3 结论

(1)在直流正极性电压激励下,绝缘子内部积聚正电荷;电场依赖性非线性电导涂层能加快绝缘子内部电荷消散且使空间电荷分布更加均匀。

(2)引入涂层后绝缘子表面电荷密度峰值增大了53.85%,这是由于涂层电导率数量级高,表面电荷主导机制由涂层体电流传导模式转变为涂层体电流传导和面电流传导共同主导模式,涂层面电流成为表面电荷的主要来源。

(3)由于表面电荷积累和空间电荷的改善,切向电场由 38.52 kV/cm 减小至 33.84 kV/cm ,减小了

12.14%,说明非线性电导涂层有利于改善电场分布。

(4)在绝缘子与涂层之间的固-固界面有正电荷积聚,峰值在高压电极附近,并且由高压电极向低压电极递减,其电荷密度数量级远小于固-气界面电荷密度,不会对整体绝缘性能造成隐患。

参考文献:

- [1] 范建斌,李鹏,李金忠,等.±800kV特高压直流GIL关键技术研究[J].中国电机工程学报,2008,28(13):1-7.
- [2] 贾志杰,张斌,范建斌,等.直流气体绝缘金属封闭输电线路中绝缘子的表面电荷积聚研究[J].中国电机工程学报,2010,30(4):112-117.
- [3] LI C Y, XU Y, LIN C J, et al. Surface charging phenomenon on HVDC spacers in compressed SF₆ insulation and charge tailoring strategies[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems,2019,6(1):83-99.
- [4] 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 Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2018,25(4):1152-1166.
- [5] GAO Y, XU B B, WANG X F, et al. Charge transport in low density polyethylene based micro/nano-composite with improved thermal conductivity[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2019,52(28):285302.
- [6] DU B X, LIANG H C, LI J. Surface coating affecting charge distribution and flashover voltage of cone-type insulator under DC stress[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2019,26(3):706-713.
- [7] VOLPOV E. HVDC gas insulated apparatus: Electric field specificity and insulation design concept[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2002,18(2):7-36.
- [8] 李博,淡淑恒.直流GIL中温度对绝缘子表面电荷积聚时变特性影响研究[J].绝缘材料,2020,53(4):52-58
- [9] 王邸博,唐炬,刘凯.直流高压下GIS支柱绝缘子表面电荷积聚特性[J].高电压技术,2015,41(9):3073-3081.
- [10] 周宏扬,马国明,刘姝媛,等.基于电-热多物理场耦合模型的直流GIL绝缘子表面电荷积聚及其对沿面电场影响的研究[J].中国电机工程学报,2017,37(4):1251-1259.
- [11] 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.
- [12] LUTZ B, KINDERSBERGER J. Surface charge accumulation on cylindrical polymeric model insulators in air: simulation and measurement[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2012,18(6):2040-2048.
- [13] XUE J Y, ZHANG Z, DING L J, et al. Surface charge behavior and flashover performance on epoxy-based spacers by graded conductivity coatings subjected to DC voltages[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2021,54(48):485502.
- [14] LI C, HU J, LIN C, et al. Hot electron injection regulation in Al₂O₃-filled epoxy resin composite using Cr₂O₃ coatings[C]//2016 IEEE Conference of Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Toronto, Canada:IEEE,2016.
- [15] XUE J Y, CHEN J H, DONG J H, et al. Enhancing flashover performance of alumina/epoxy spacers by adaptive surface charge regulation using graded conductivity coating[J]. Nanotechnology,2020,31(36):364002.
- [16] DU B X, LIANG H C, LI J, et al. Fabrication and electrical evaluation of interfacial E-field regulating insulator for DC-GIL application[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2019,26(6):1956-1964.
- [17] LUO Y, TANG J, PAN C, et al. Transition of the dominant charge accumulation mechanism at a gas-solid interface under DC voltage[J]. IET Generation Transmission and Distribution, 2020,14(15):3078-3088.
- [18] PAN Z J, TANG J, PAN C, et al. Contribution of nano-SiC/epoxy coating with nonlinear conduction characteristics to surface charge accumulation under DC voltage[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2020,53(36):365303.
- [19] PAN Z J, PAN C, TANG J, et al. Influence of SiC/epoxy coating on surface charging phenomenon at DC voltage-Part I: Charge accumulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2022,29(4):1333-1342.
- [20] PAN Z J, PAN C, TANG J, et al. Influence of SiC/Epoxy coating on surface charging phenomenon at DC voltage-Part II: Charge dissipation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2022,29(4):1343-1352.
- [21] GREMAUD R, MOLITOR F, DOIRON C, et al. Solid insulation in DC gas-insulated systems[C]//Conference Record of the 2014 CIGRE Session. Paris,France:CIGRE,2014.
- [22] WINTER A, KINDERSBERGER J, TENZER M, et al. Solid/gaseous insulation systems for compact HVDC solutions[C]//Conference Record of the 2014 CIGRE Session. Paris, France: CIGRE,2014.
- [23] HAN Y S, LI S T, MIN D M. Nonlinear conduction and surface potential decay of epoxy/SiC nanocomposites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(5):3154-3164.
- [24] OKABE S. Phenomena and mechanism of electric charges on spacers in gas insulated switchgears[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2007,14(1):46-52.
- [25] TANG C, CHEN G, FU M, et al. Space charge behavior in multi-layer oil-paper insulation under different DC voltages and temperatures[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2010,17(3):775-784.
- [26] 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,2013,19(6):2196-2205.

收稿日期:2023-03-30;修回日期:2023-05-22。

作者简介:陈继明(1970-),男(汉族),山东济宁人,副教授,主要从事电力系统故障检测诊断工作;通信作者:吴绩涛(1998-),男(汉族),河南信阳人,硕士生,主要从事高压绝缘材料性能的研究。