

材料电导率对盆式绝缘子沿面电场与电荷分布的影响

杜乾栋¹, 张乔根¹, 赵军平¹, 吴治诚¹, 王婵琼²

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049;

2. 国网山西省电力公司长治供电公司, 长治 046011)

摘要: 在直流电压作用下, 气体绝缘金属封闭输电线路 (gas-insulated transmission line, GIL) 盆式绝缘子表面容易积聚电荷; 切断电压后, 绝缘子表面电荷消散较慢, 母线常存残压。残余电荷的存在会威胁设备的安全运行, 因此抑制表面电荷积聚, 改善绝缘子沿面电场分布, 具有重要意义。为此建立了恒定电场下 200 kV 盆式绝缘子仿真模型, 提出了绝缘材料表面电导率与体电导率的比值 α , 计算了不同 α 值下绝缘子沿面电场、电荷分布以及电荷消散时间常数, 最后确定了 α 的合理取值范围。结果表明, α 值在 1~10 [m] 之间时, 直流电场分布比较均匀, 绝缘子表面电荷积聚较少; 该范围内表面电荷消散时间常数为数百秒, 沿面是电荷消散的主要途径。该研究结果对合理选择绝缘子表面电导率与体电导率比值、优化沿面电场分布、加快表面电荷消散等方面有一定的工程参考价值。

关键词: 盆式绝缘子; 电导率; 配比值; 沿面电场; 表面电荷

Influence of Electric Conductivity of Materials on Field and Surface Charge Distribution of Basin-type Insulator

DU Qiandong¹, ZHANG Qiaogen¹, ZHAO Junping¹, WU Zhicheng¹, WANG Chanqiong²

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Changzhi Power Supply Company, State Grid Shanxi Electric Power Co., Ltd., Changzhi 046011, China)

Abstract: It is acknowledged that surface charges can accumulate on basin-type insulators of GIL (gas-insulated transmission line) under HVDC voltage, and that the residual voltage can remain on the busbar after cutting off HVDC voltage due to the low decaying rate of surface charge. The existence of residual charges threatens the safe operation of electric apparatus. Therefore, it is of great significance to suppress charge accumulation and improve field distribution of insulator. We established a simulation model of 200 kV basin-type insulator under DC field and defined α as the ratio of surface and volume electric conductivity of the insulating material. The field and charge distributions as well as charge decay time constant with different values of α were calculated for the determination of a reasonable value range of α . The results show that when the value α lies in 1~10 [m], the DC field will relatively evenly distributed and the surface charge density is lower. The charge decaying time constant is approximately hundreds of seconds with the range of values of α , and the insulator surface is the main way of charge decay. This study may to a certain extent be valuable for the selection of reasonable ratio of surface and volume electric conductivity of insulator for the improvement of DC field distribution and the increase of charge decaying rate.

Key words: basin-type insulator; electric conductivity; ratio; surface field strength; surface charge

0 引言

气体绝缘金属封闭输电线路 (gas-insulated transmission line, GIL) 具有传输容量大、损耗小、可靠性高等优点, 在高压直流输电工程中拥有广阔的应用前景^[1-2]。盆式绝缘子是 GIL 的重要部件, 起着

支撑导体、隔离气室和电气绝缘等作用。然而在直流电压作用下, 绝缘子表面容易发生电荷积聚, 对原有电场分布造成畸变^[3-5]; 同时, 积聚的电荷不易消散, 可能造成 GIL 母线残压, 在直流极性反转等操作时引起异常放电^[6-7]。因此, 研究盆式绝缘子的表面电荷积聚现象及消除手段, 对进一步探究绝缘子沿面闪络机理、保障设备的安全运行具有重要意义。

基金资助项目: 国家电网公司科技项目 (SGSXZ00XJTS170008).
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (SGSXZ00XJTS170008).

盆式绝缘子沿面是典型气-固界面,其电荷积聚特性主要取决于电极结构、外施电压波形、气体氛围、绝缘子自身材料属性及表面状况等因素^[8-9]。对直流盆式绝缘子而言,其外施直流电压及 SF₆ 气体氛围是固定不变的。因此可通过优化设计绝缘子及屏蔽电极形状、合理选择材料参数、表面改性处理等手段,减少表面电荷积聚对电场畸变的影响。

国内外学者对盆式绝缘子优化问题进行了大量研究。例如欧洲“ITER 计划”的粒子加速器需 1 MV 直流 GIL 进行输电,De Lorenzi 等学者使用直接搜索法和遗传算法对该特高压直流 GIL 盆式绝缘子进行了外形优化,有效改善了绝缘子沿面电场分布^[10-11]。有关绝缘子材料种类及表面状况对电荷积聚的影响,国内外学者看法不一,但一般认为绝缘子表面带电是电荷积聚和消散同时发生的动态过程^[12],高表面电导率材料电荷积聚量少。同济大学、清华大学的学者采用直接氟化的方式处理环氧绝缘子表面^[13-14],增大表面电导率并降低表面微观粗糙度,减少表面电荷积聚量。但是对固定外形的环氧盆式绝缘子,表面电导率和体电导率的共同作用对电荷积聚和电场分布的影响尚未研究,而这对于材料配方选择、表面特性调控等实际问题具有重要的指导意义。

本文建立了恒定电场下 200 kV 直流盆式绝缘子仿真模型,提出了绝缘子表面电导率和体电导率的比值 α ,在现有直流配方基础上,计算了一定范围内不同 α 值下的电场及电荷分布,进而综合考虑电场分布、电荷聚散等各因素,合理选择 α 取值范围,为工程应用提供参考。

1 仿真模型及方法

1.1 表面电导率与体电导率比值 α

定义 α 为直流盆式绝缘子表面电导率与体电导率的比值。 α 具有长度量纲,单位 m,即:

$$\alpha = \gamma_s / \gamma_v \quad (1)$$

采用 α 值作为优化电场和表面电荷分布的判据,并最终提出其合理取值范围,原因是: α 值可以通过改变材料的电阻率影响稳态电场分布,亦可以通过改变沿面泄漏电流大小影响表面电荷分布,因此在一定程度上具有综合判据含义。

事实上,沿面电场和表面电荷之间的影响是相互耦合的,电场分布决定了电荷积聚的极性和分布,而电荷又进一步畸变电场,影响下一时刻的电荷积

聚;此外表面电荷对电场并非全为负面影响,且电荷积聚量大处的电场模可能不高。因此有必要提出综合判据 α ,以反映电场和电荷分布之间的相互影响。

1.2 仿真几何模型

仿真采用 Comsol Multiphysics 二维旋转对称模型,导入实际尺寸的 200 kV 直流盆式绝缘子试验段图形,如图 1 所示,主要包含母线、绝缘子、接地外壳、SF₆ 气体域等部分。母线外径为 140 mm,外壳内径为 250.6 mm;盆式绝缘子凹面沿面距离约为 160 mm。为设置绝缘子的表面电导率,分别在其上下表面添加一个厚度 $d = 0.1$ mm 的薄层,以 $\gamma_s d$ 作为表面电导^[15]。

考虑到薄层处的网格剖分可能对计算结果造成影响,计算时分别使用不同精度的网格剖分并将结果进行对比,确保本文采用的网格精度足够高,排除由于网格剖分不同导致的计算结果差异。

1.3 基本方程及边界条件

在施加直流电压后,电场瞬时建立,绝缘子表面电荷从无到有发生积聚,同时影响电场分布,直至二者达到稳态。稳态电场按材料电阻率分布,均匀媒质中电位函数 φ 满足拉普拉斯方程(2),分界面上由电位函数表示的衔接条件为方程(3)、(4),考虑自由电荷面密度的衔接条件为方程(5)^[15]:

$$\nabla^2 \varphi = 0 \quad (2)$$

$$\varphi_s = \varphi_g \quad (3)$$

$$\gamma_s \frac{\partial \varphi_s}{\partial n} = \gamma_g \frac{\partial \varphi_g}{\partial n} \quad (4)$$

$$\sigma = \varepsilon_s \frac{\partial \varphi_s}{\partial n} - \varepsilon_g \frac{\partial \varphi_g}{\partial n} \quad (5)$$

式中: γ_s 、 ε_s 和 γ_g 、 ε_g 分别为绝缘子和气体的电导

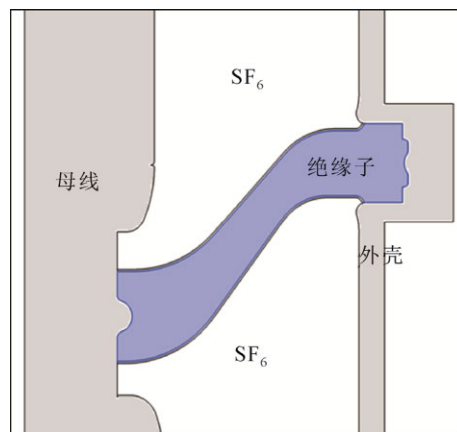


图1 试验段仿真几何模型(局部)

Fig.1 Geometric model of simulated test section (Partial)

率、介电常数; n 表示沿面法向。

边界条件为式(6)一式(7), 即母线电位 φ_g 恒为 U_0 ; 外壳接地, 电位 φ_o 为 0:

$$\varphi_g = U_0 \quad (6)$$

$$\varphi_o = 0 \quad (7)$$

撤去直流电压后绝缘子表面电荷发生消散, 该过程中残余电荷存在对地电位梯度, 电流密度 J 满足方程(8), 此外电位及电流密度之间满足方程(9):

$$\nabla \cdot J = q_j \quad (8)$$

$$J = -\gamma \cdot \nabla \varphi \quad (9)$$

联立式(2)一(7)可得到稳态电场及电荷密度分布; 联立式(8)一(9)可计算撤去电压后电荷消散的动态过程。

1.4 仿真参数设置

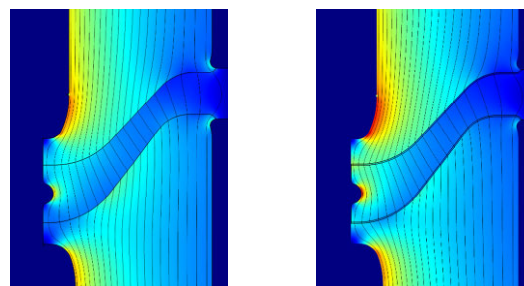
本文研究理想洁净条件下绝缘子沿面电场及电荷分布。由于理想条件下 SF_6 气体电导率 ($10^{-20} \sim 10^{-18} \text{ S/m}$) 与盆式绝缘子电导率相比存在数量级上的显著差异, 即 $\gamma_g \ll \gamma_s$, 因此计算时将取 γ_g 为定值 (10^{-20} S/m), 认为气体不导电。绝缘子材料为环氧树脂, 其相对介电常数为 4.9, 体电导率 $\gamma_v = 1 \times 10^{-14} \text{ S/m}$, 表面电导率记为 γ_s 。

对稳态电场及电荷分布的计算采用电流场稳态分析模块, 直流电压幅值 $U_0 = 200 \text{ kV}$ 。为计算撤去电压后电荷消散时间常数, 采用电流场暂态分析模块, 母线电位设置为 $\varphi_g = U_0(\text{step}(t) - \text{step}(t - 3000))$, 其中 $\text{step}(t)$ 和 $\text{step}(t - 3000)$ 分别为 $t = 0$ 和 $t = 3000 \text{ s}$ 时刻的阶跃函数, 二者相减表示直流电压在 $t = 0$ 时施加, $t = 3000 \text{ s}$ 时撤去, 此时绝缘子表面电荷积聚已达到饱和; 仿真时间为 10^4 s , 步长为 100 s 。

2 初始与稳态时电场分布

图 2 示出了施加直流电压初始时刻和足够长时间后电场分布云图, 仿真时绝缘子表面电导率取 $\gamma_s = 8 \times 10^{-14} \text{ S}$ 。在施加电压初始, 绝缘子表面电荷尚未发生积聚, 电位函数满足拉普拉斯方程, 分界面两侧电场满足折射定理, 电场为按照介电常数分布的静电场, 当施加足够长时间电压后, 电荷积聚达到饱和, 电场分布达到稳态, 此时电场为恒定电场, 按材料电阻率分布; 与加压初始时刻相比, 高压屏蔽罩附近的场强有所增强。

图 3 绘制了加压初始和达到稳态时, 绝缘子凹面气体侧电场模和电场切法向分量随归一化沿面距



(a) 初始 (b) 稳态

图 2 加压初始和稳态时电场分布图

Fig.2 Field distribution at initial moment of voltage application and steady state

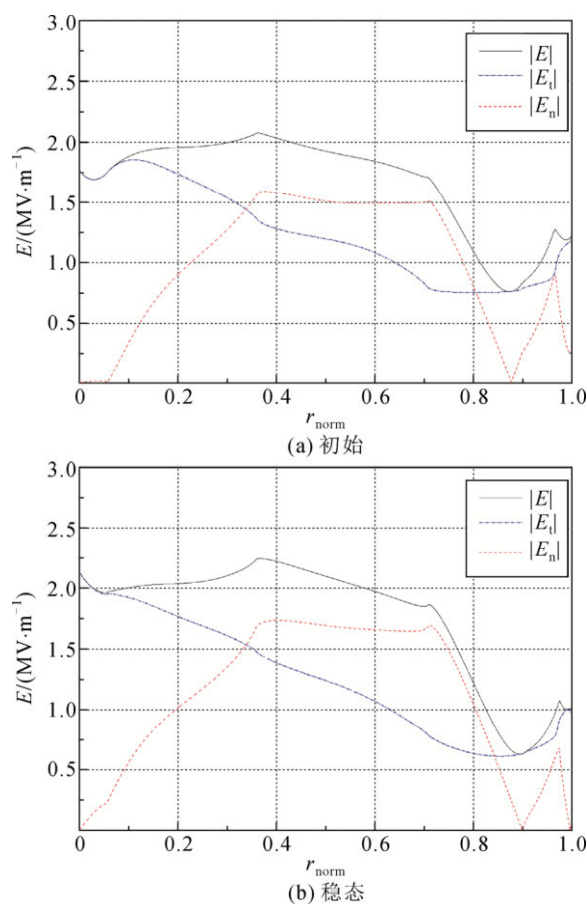


图 3 初始和稳态时绝缘子凹面场强

Fig.3 Field strength on the concave surface of insulator at initial and steady state

离 r_{norm} 的变化, 其中黑色实线为电场模 $|E|$, 蓝色点划线为切向电场模 $|E_t|$, 红色虚线为法向电场模 $|E_n|$ 。对比图 3(a)、(b)可知, 恒定电场下, 在靠近高压母线附近绝缘子沿面切向电场较高, 这是因为恒定电场下存在沿面电导电流, 切向电场强度增大, 使得高压屏蔽罩的屏蔽效果减弱。此外, 稳态时绝

缘子沿面法向电场也有所增强,这是因为直流电场下表面电荷逐渐积聚,直至饱和,表面电荷的存在增大了沿面电场法向分量。

3 α 值对电场及电荷分布的影响

3.1 α 值对稳态电场分布的影响

在恒定电场下,通过改变表面电导率与体电导率比值 α ,研究二者对比对绝缘子沿面电场分布的影响,结合表面电荷密度分布情况,提出合理的比值选择范围。由于现有直流盆式绝缘子仍处于试制阶段,对 α 取值无明确规定,部分厂家将 α 控制在 1 m 附近。本文参照厂家控制值,将其范围上下延拓,取 $10^3 \sim 10^{-1}$ m。绝缘子凹面气体侧电场分布情况如图 4 所示,计算时在 $10^3 \sim 10^2 \sim 10^1 \sim 10^0 \sim 10^{-1}$ 各区间内均有 3 个取值($(3, 5, 8) \times 10^i$)。 α 值在从 10^3 m 至 10^{-1} m 变化过程中,电场分布也是逐渐变化的,无中间值突变情况。因此图(4)仅示出了 10 的整数幂情况下的电场分布。

在仿真条件下,绝缘子体电导率为固定值($\gamma_v = 1 \times 10^{-14}$ S/m),若 α 越大则表面电导率 γ_s 越大,绝缘子沿面电导电流越大。由图 4(a)~(e)不难看出, α 越大则绝缘子凹面靠近高压母线处切向电场及总电场模越大,高压屏蔽罩的屏蔽效果越弱;在 $\alpha \leq 10$ m 时该处电场模在 (1.5~2) MV/m,而当 $\alpha > 10^2$ m 时该处电场模高达 2.7 MV/m。 α 值影响沿面电场的均匀程度,当 α 值较大时电场分布变得不均匀,例如当 α 值接近 1 m 时电场分布较均匀,各处均不超过 2 MV/m,电场不均匀系数 $f = 1.29$,而当 $\alpha = 10^3$ m 时高压母线附近出现场强集中区,沿面电场不均匀系数 $f = 1.80$ 。 α 值还对沿面法向电场有一定影响,当 α 值较小时,外壳附近的法向电场明显增大。

由于 α 值是表面电导率和体电导率综合影响的判据,本文设置了对比组,同时改变表面电导率和体电导率而保持二者比值 α 不变。在对比组中,绝缘子体电导率设置为 1×10^{-15} S/m,表面电导率设置为从 1×10^{-12} S 至 1×10^{-16} S 不等,相应 α 值仍为 $10^3 \sim 10^{-1}$ m。通过电场分析得到的结论与体电导率为 1×10^{-14} S/m 时相同,即 α 值不建议超过 10 m,否则电场分布的均匀度下降,母线附近出现高场强区。下面将结合绝缘子表面电荷密度分布进行进一步的数值选择。

3.2 α 值对稳态表面电荷分布的影响

对气-固界面来说,假设电场线自气体侧穿入

分界面为正方向,由方程(3)、(4)可以推导出分界面电荷密度与气体侧的法向电场的关系为^[16]:

$$\sigma = \frac{\epsilon_v \gamma_g - \epsilon_g \gamma_v}{\gamma_v} E_{ng} \quad (10)$$

若不考虑气体导电($\gamma_g \approx 0$),则有 $\sigma \approx -\epsilon_g E_{ng}$,因此绝缘子沿面电荷密度与法向场强密切相关,且极性与 E_{ng} 相反。在仿真采用的电极结构和电压极性下,绝缘子凹面大部分区域为电场线自气体侧的穿入, $E_{ng} > 0$;在靠近接地外壳区域为电场线的穿出, $E_{ng} < 0$ 。因此绝缘子凹面主要积聚负电荷,接地外壳附近积聚少量正电荷,如图 5 所示。

图 6 为不同 α 值下绝缘子凹面电荷密度分布,电荷极性与前述一致。当 α 值由 10^{-1} m 增至 10^2 m 时,绝缘子沿面电荷密度呈增大趋势,这是由于表面电导电流是表面积聚电荷的来源之一,因此在一定范围内增大 α 值会电荷密度有所增加;而当 α 值由 10^2 m 增至 10^3 m 时,电荷密度有所减小,这是由于过高的表面电导率使电荷泄放速度加快,绝缘子表面稳态电荷密度值变小。

结合 3.2 节电场分布情况可知,过高的表面电导率虽会使得电荷积聚量有所减少,但导致电场分布不均匀,靠近高压母线附近出现场强集中区;过低的表面电导虽会使电场分布变得更加均匀,但积聚电荷不易消散,且靠近接地外壳附近有较明显的同极性电荷积聚,因此 α 的合理取值在 10^0 数量级,既保证电场和表面电荷分布比较均匀,又保证一定的电荷消散速度。电导率取值对表面电荷消散速率的影响将在 3.3 节中研究。

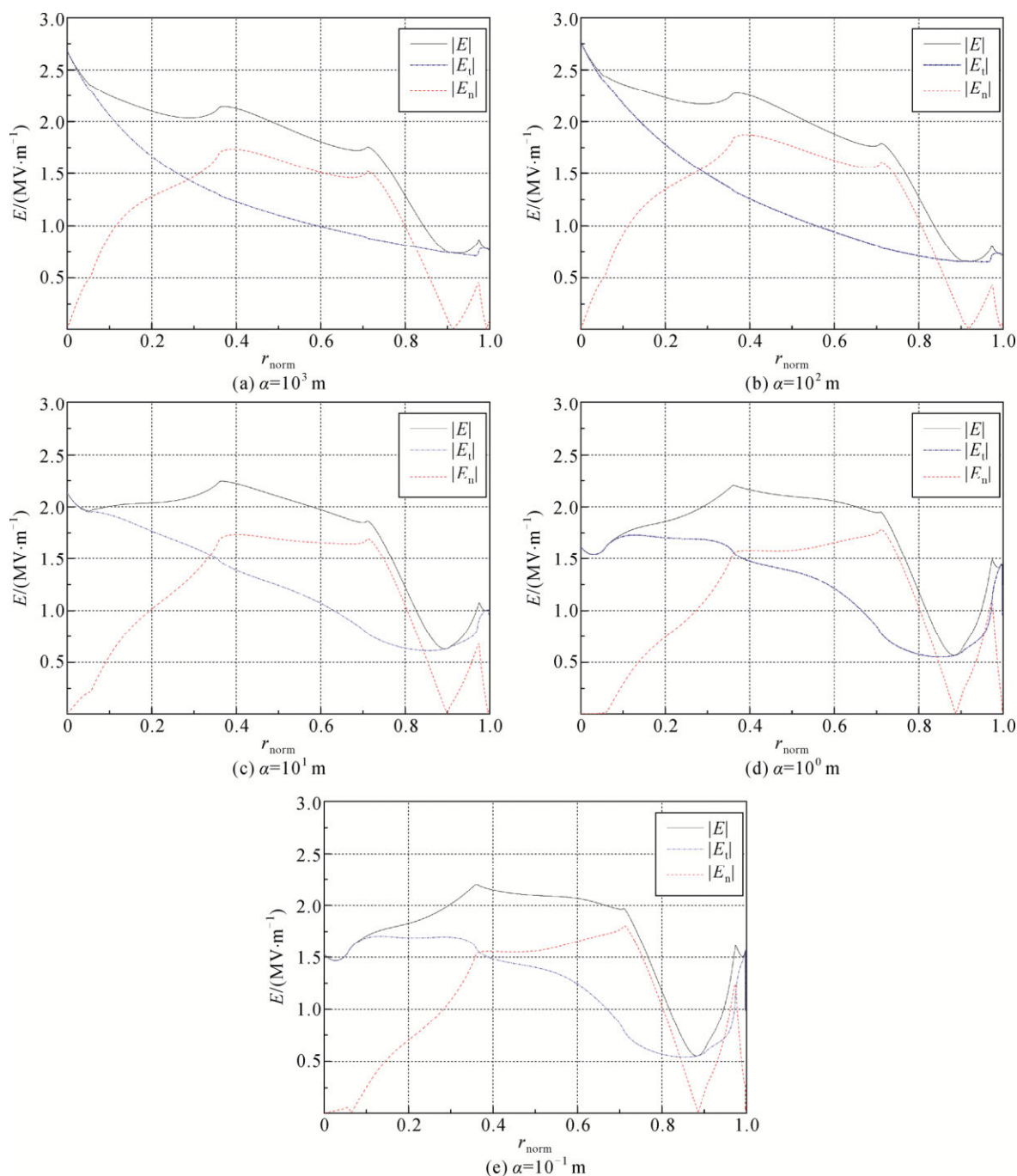
3.3 α 值对表面电荷消散速率的影响

研究表明,切断直流电压后,绝缘子表面电荷的消散有气体传导、绝缘子表面传导、绝缘子内部传导 3 种途径^[17-21]。表面电荷密度随时间呈现指数规律衰减,其方程描述为

$$\sigma(t) = \sigma_0 e^{-t/\tau} \quad (11)$$

式中: σ_0 为初始表面电荷密度; τ 为电荷消散时间常数,与材料特性有关,一般为数百至数万秒不等^[22]。

图 7 为盆式绝缘子表面平均电荷密度随时间的衰减特性仿真结果,其中对电荷密度值进行了归一化处理。由图 7 可知,随着绝缘材料表面电导率与体电导率比值 α 增大,电荷消散时间常数迅速减小,在 $\alpha > 1$ m 时的时间常数仅为数百秒。在 3.1 及 3.2 节 α 值的限定范围内(1~10 m),表面电荷消散速率较快,约在 1 h 内完全消散。

图4 不同 α 值时绝缘子凹面电场分布Fig.4 Field distribution on the concave surface of insulator with different values of α

由于表面电荷同时通过3个途径发生消散, 时间常数 τ 可以等效拆分为并联的3部分, 即

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_3} \quad (12)$$

其中 τ_1 、 τ_2 、 τ_3 分别为电荷通过气体、固体表面和固体内部消散的时间常数。为简便, 下述所有变量下标中, 1表示与气体相关, 2表示与绝缘子表面相关, 3表示与绝缘子内部相关。若将时间常数与各消散途径媒质的电导率 γ_i ($i=1, 2, 3$)联系起来, 定义系数

C_1 、 C_2 、 C_3 , 则有

$$\begin{cases} \tau_1 = \frac{1}{C_1 \gamma_1} \\ \tau_2 = \frac{1}{C_2 \gamma_2} \\ \tau_3 = \frac{1}{C_3 \gamma_3} \end{cases} \quad (13)$$

由式(12)、(13)可知, 总时间常数 τ 可表示为电导率 γ_i ($i=1, 2, 3$)的函数, 即

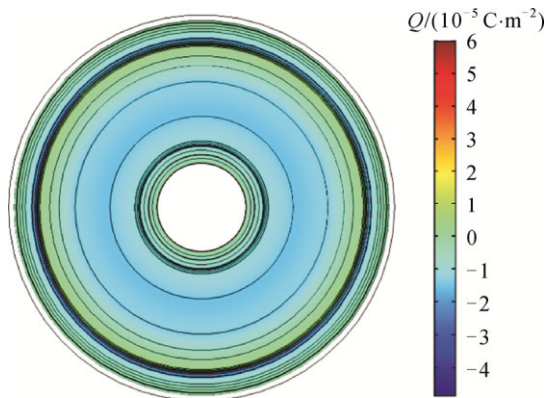
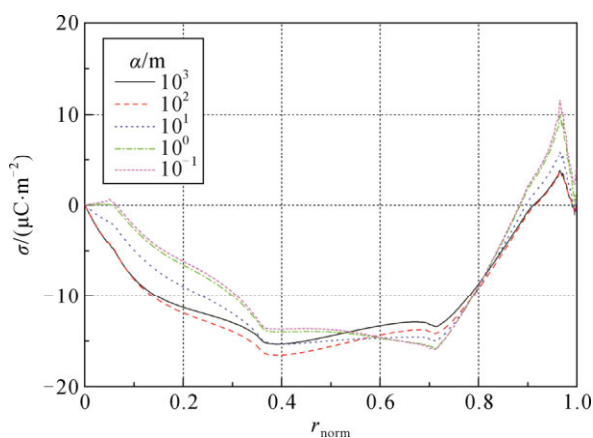
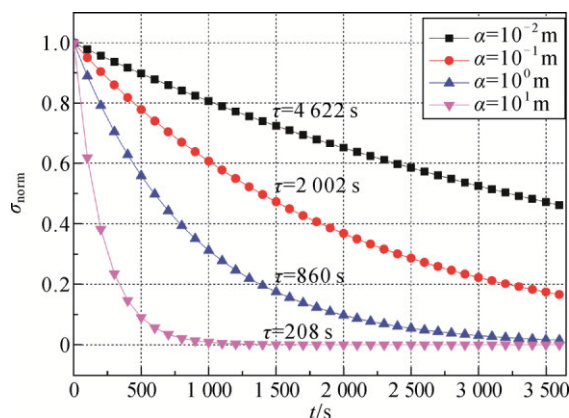


图5 施加正极性电压时绝缘子凹面电荷分布图

Fig.5 Concave Surface Charge distribution (+DC)

图6 不同 α 值时绝缘子凹面电荷密度值Fig. 6 Charge density along the concave surface of insulator with different values of α 图7 不同 α 值时绝缘子表面平均电荷密度的衰减Fig.7 Average charge density decay on the surface of insulator with different values of α

$$\tau = \frac{1}{C_1\gamma_1 + C_2\gamma_2 + C_3\gamma_3} \quad (14)$$

定义各消散途径的影响因数 β_i ($i=1, 2, 3$), 其表

示单位时间内通过途径 i 消散的电荷占总消散电荷量的比, $\beta_i \in (0, 1)$ 。对式(11)取全微分, 有

$$-\frac{1}{\tau} \sigma_0 e^{-t/\tau} \Delta t = -\left(\frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_3}\right) \sigma_0 e^{-t/\tau} \Delta t \quad (15)$$

影响因数 β_i ($i=1, 2, 3$)的表达式为

$$\beta_i = \frac{\Delta \sigma_i}{\Delta \sigma} = \frac{\tau}{\tau_i} \quad (16)$$

根据上述推导, 可通过设置不同的气体、表面及固体电导率值组合, 计算得到总消散时间常数 τ , 再由式(14)进行多元函数拟合得到常数 C_i , 经式(13)得到 τ_i , 最后由式(16)求得影响因数 β_i 。

数值计算时, γ_1 取 1×10^{-20} S/m, 绝缘子体电导率 γ_3 范围是 $[10^{-17}, 10^{-13}]$ S/m, 表面电导率 γ_2 范围是 $[10^{-17}, 10^{-13}]$ S。因自变量 γ_2 和 γ_3 取值范围较大, 为拟合准确需先进行变量代换, 令 $t_i = \lg(\gamma_i) + 17$, 新自变量 t_i 取值范围是 $[0, 4]$, 方程(14)变为

$$\frac{1}{\tau_0} = \sum_{i=1}^3 C_i 10^{t_i - 17} \quad (17)$$

不同电导率组合下表面电荷消散时间常数 τ 差别较大, 例如当 $\gamma_2 = 8 \times 10^{-15}$ S、 $\gamma_3 = 1 \times 10^{-14}$ S/m时 τ 超过1000 s; 若增大 γ_2 或 γ_3 , 时间常数可减小至几百秒; 减小 γ_2 或 γ_3 , 时间常数可增大至数千秒。使用方程(17)进行多元函数拟合, 得到 $C_1 = 8.1 \times 10^9$ 、 $C_2 = 1.0 \times 10^{11}$ 、 $C_3 = 1.9 \times 10^{10}$, 拟合误差 $< 1\%$ 。获得 C_i 之后, 将每一组电导率参数代入式(16), 可得到电荷通过气体、固体表面和固体内部消散的时间常数 τ_1 、 τ_2 、 τ_3 。例如 $\gamma_2 = 8 \times 10^{-15}$ S、 $\gamma_3 = 1 \times 10^{-14}$ S/m时 $\tau_1 = 1.2 \times 10^{10}$ s、 $\tau_2 = 1.3 \times 10^3$ s、 $\tau_3 = 5.3 \times 10^3$ s, $\beta_1 = 0$ 、 $\beta_2 = 0.84$ 、 $\beta_3 = 0.16$ 。

将计算结果对应于比值 α , 当 $\alpha = 10^{-1}$ m时, $\beta_1 \approx 0$, $\beta_2 \approx 0.1$, $\beta_3 \approx 0.9$; 当 $\alpha = 10^0$ m时, $\beta_1 \approx 0$, $\beta_2 \approx 0.84$, $\beta_3 \approx 0.16$; 当 $\alpha = 10^1$ m时, $\beta_1 \approx 0$, $\beta_2 \approx 0.97$, $\beta_3 \approx 0.03$ 。表面途径影响因数 β_2 激增对应的 α 区间为 $(0.1, 1)$, $\alpha > 1$ m时表面传导成为电荷消散的主要途径。

综上所述, 在工程中对绝缘子的体电导率及表面电导率进行配合选择时, α 值建议控制在1~10 m, 此时沿面稳态电场、电荷分布较为均匀, 电荷消散主要通过绝缘子沿面且消散迅速。

4 结论

1) 直流电压作用下盆式绝缘子表面电荷逐渐积聚, 电场由按介电常数分布向按电阻率分布转变。恒定电场中高压屏蔽罩屏蔽效果有所减弱。

2) α 过大会导致绝缘子沿面电场分布不均匀, 在高压屏蔽罩附近出现场强集中区; α 过小会使绝缘子表面靠近接地外壳处出现电荷集中区, 且电荷消散速率较慢。综合考虑电场及电荷分布情况, 推荐的 α 取值范围是 1~10 m。

3) 在推荐 α 范围内, 表面电荷消散时间常数仅为数百秒, 电荷在撤去电压 1 h 内完全消散, 其中通过绝缘子沿面发生消散的比例高于 84%。

参考文献 References

- [1] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 10-17.
ZHAO Wanjun. Transmission technology of HVDC[M]. Beijing, China: China Electric Power Press, 2004: 10-17.
- [2] SCHOFFNER G, KUNZE D, SMITH I. Gas-insulated transmission lines – successful underground bulk power transmission for more than 30 years[C]//The 8th IEEE International Conference on AC and DC Power Transmission. London, UK: IEEE, 2006: 271-275.
- [3] 范建斌, 李 鹏, 李金忠, 等. ± 800 kV 特高压直流 GIL 关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 1-7.
FAN Jianbin, LI Peng, LI Jinzhong, et al. Study on key technology of ± 800 kV UHVDC GIL[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, Vol. 28(13): 1-7.
- [4] 汪 汛, 邱毓昌, 张乔根, 等. 表面电荷积聚对绝缘子沿面闪络影响的研究[J]. 中国电力, 2002, 35(9): 52-55.
WANG Feng, QIU Yuchang, ZHANG Qiaogen, et al. Study on influence of surface charge accumulation on flashover of insulator [J]. Electric Power, 2002, 35(9): 52-55.
- [5] 刘文静, 汪 汛, 张宪标. GIS 中绝缘子表面电荷积聚的观测与分析[J]. 高电压技术, 2008, 34(8): 1573-1577.
LIU Wenjing, WANG Feng, ZHANG Xianbiao. Observation and analysis of insulator surface charge accumulation in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(8): 1573-1577.
- [6] 李 鹏. 直流电压下 SF_6 气体中绝缘子闪络特性及其在特高压直流 GIL 中的应用[D]. 西安: 西安交通大学, 2015: 38-53.
LI Peng. Flashover characteristics along the insulator in SF_6 gas under DC voltage and its application in UHV DC GIL[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2015: 38-53.
- [7] WANG C, WILSON A, WATTS M. Surface flashover sustained by electrostatic surface charge on epoxy resin insulator in SF_6 [C]// International Conference on Dielectric Materials. Manchester, UK: [s.n.], 1992: 182-185.
- [8] 高 宇. 聚合物电介质表面电荷动态特性研究[D]. 天津: 天津大学, 2009: 4-14.
GAO Yu. Dynamic behavior of surface charge on polymer insulating materials[D]. Tianjin, China: Tianjin University, 2009: 4-14.
- [9] 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 Ju, PAN Cheng, WANG Dibo, 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.
- [10] DE LORENZI A, GRANDO L, PESCE A, et al. Modeling of epoxy resin spacers for the 1MV DC gas insulated line of ITER neutral beam injector system[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, Vol. 16(1): 77-86.
- [11] DE LORENZI A, GRANDO L, GOBBO R, et al. The insulation structure of the 1MV transmission line for the ITER neutral beam injector[J]. Fusion Engineering and Design, 2007(82): 826-844.
- [12] 汪 汛. 绝缘子表面电荷积聚及其对沿面闪络的影响[D]. 西安: 西安交通大学, 2003: 28-37.
WANG Feng. Research on surface charge accumulation and its effect on flashover characteristics of the insulator[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2003: 28-37.
- [13] 刘亚强, 安振连, 仓 俊, 等. 氟化时间对环氧树脂绝缘表面电荷积累的影响[J]. 物理学报, 2012, 61(15): 1-8.
LIU Yaqiang, AN Zhenlian, CANG Jun, et al. Influence of fluorination time on surface charge accumulation on epoxy resin insulation[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(15): 1-8.
- [14] ZHANG B Y, ZHANG G X, WANG Q, et al. Suppression of surface charge accumulation on Al_2O_3 -filled epoxy resin insulator under DC voltage by direct fluorination[J]. AIP Advances, 2015, 5: 1-12.
- [15] 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.
- [16] 冯慈璋, 马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 74-79.
FENG Cizhang, MA Xikui. Introduction to engineering electromagnetic fields[M]. Beijing, China: Higher Education Press, 2000: 74-79.
- [17] KINDERSBERGER J, LEDERLE C. Surface charge decay on insulators in air and sulfurhexafluoride – part I: simulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(4): 941-948.
- [18] TAN J. Surface charge accumulation in SF_6 [D]. Delft, Netherlands: Delft University of Technology, 1993: 115-142.
- [19] 王 蓓, 张贵新, 王 强, 等. SF_6 及空气中绝缘子表面电荷的消散过程分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(1): 99-103.
WANG Bei, ZHANG Guixin, WANG Qiang, et al. Analysis of surface charge decay process on insulators in SF_6 and air[J]. High Voltage Engineering, 2011, Vol. 37(1): 99-103.
- [20] 邢照亮, 茹佳胜, 黄 印, 等. 直流电晕下环氧绝缘材料的表面电荷特性[J]. 智能电网, 2016, 4(11): 1104-1107.
XING Zhaoliang, RU Jiasheng, HUANG Yin, et al. Research on surface charge characteristics of epoxy insulating material by DC corona[J]. Smart Grid, 2016, Vol. 37(1): 99-103.
- [21] 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 Guixin, ZHANG Boya, WANG Qiang, 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.
- [22] GREMAUD R, BJELOGRLIC M, SCHNEIDER M, et al. Surface charge decay on HVDC insulators: temperature and field effects[C]// International Conference on Solid Dielectrics. Monterey, CA, USA: IEEE, 2013: 1056-1059.



DU Qian Dong

杜乾栋

1993—, 男, 硕士生

主要从事 GIS 设备绝缘特性方面的研究

E-mail: duqiandong@stu.xjtu.edu.cn



ZHANG Qiaogen

张乔根(通信作者)

1965—, 男, 博士, 教授, 博导

主要从事特高压直流换流阀、特高压 GIS、特高压交直流变压器绝缘特性与现场试验、故障诊断等方面的研究

E-mail: hvzhang@mail.xjtu.edu.cn

Ph.D., Professor

Corresponding author

收稿日期 2018-01-08 修回日期 2018-04-22 编辑 曹昭君