

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.05.019

直流 GIL 盆式绝缘子的表面电荷分布

杜乾栋¹, 赵军平¹, 吴治诚¹, 崔博源², 陈 允², 李志兵², 张乔根¹

(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. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

摘要: 直流气体绝缘金属封闭输电线路(gas-insulated metal-enclosed transmission line, GIL)盆式绝缘子的稳态电场按介质电导率分布,在长期直流电压作用下,绝缘子表面会积聚电荷,引起局部电场畸变,威胁设备的安全运行。因此有必要对直流盆式绝缘子表面电荷积聚现象进行研究,掌握准确的电荷测量技术、电荷反演计算方法和绝缘子表面电荷积聚特性,为提高盆式绝缘子的绝缘水平提供参考。文中研制了一套新型盆式绝缘子表面电荷测量装置,能够控制探头以等距垂直姿态对绝缘子曲面进行扫描式测量;采用同心圆环电极对静电容探头进行了标度,获得其空间响应函数,并基于矩阵的Cholesky分解法对绝缘子表面电荷分布进行了反演计算。实验研究了不同直流电压作用下,±200 kV 直流盆式绝缘子表面电荷积聚和消散特性,并根据实验和仿真计算结果,提出了不同条件下适用的表面电荷分布模型。文中对深入认识直流盆式绝缘子的表面电荷积聚现象、完善电荷积聚机理具有重要意义。

关键词: 直流盆式绝缘子; 表面电荷; 反演计算; 分布; 积聚模型

Surface Charge Distribution of DC GIL Basin-type Insulator

DU Qiandong¹, ZHAO Junping¹, WU Zhicheng¹, CUI Boyuan², CHEN Yun²,
LI Zhibing², ZHANG Qiaogen¹

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

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The stationnary electric field of the DC gas-insulated metal-enclosed transmission line(GIL)basin-type insulator is distributed according to the electric conductivity of the dielectrics. Under long-term DC voltage, charge will accumulate on the surface of insulator, leading to local electric field distortion and threatening the safe operation of the equipment. Therefore, it is of great necessity to study the phenomenon of surface charge accumulation in DC basin-type insulator, by mastering accurate charge measurement techniques and charge inversed calculation algorithm, and surface charge accumulation characteristics, in order to provide reference for improving the insulation level of insulator. In this paper, a new type of surface charge measurement device for a basin-type insulator is developed. The probe can be controlled to scan the surface of the insulator perpendicularly at an equidistant attitude. A set of concentric ring electrodes is used for the calibration of the electrostatic probe to obtain its spatial response function. Based on the Cholesky decomposition method for matrix, the surface charge distribution of the insulator is inversely calculated. The surface charge accumulation and decay characteristics of a ±200 kV DC pot insulators under different DC voltages are experimentally studied. Based on the experimental and simulation results, the surface charge distribution models suitable for different conditions are proposed. This paper is of significance for further comprehension of the surface charge accumulation phenomenon in DC basin-type insulators and for the amelioration of charge accumulation mechanism.

Key words: DC basin-type insulator; surface charge; inversed calculation; distribution; accumulation model

收稿日期:2018-01-17; 修回日期:2018-03-21

基金项目:国家电网公司科技项目资助(PGKJ2018-151)。

Project Supported by Science and Technology Project of SGCC(PGKJ2018-151).

0 引言

目前,直流输电被应用于远距离大容量电能输送。除采用传统的架空线或直流电缆进行输电以外,在一些占地要求较高、存在高落差输送需要的工程中,高压直流输电还可以考虑气体绝缘金属封闭输电线路(gas-insulated metal-enclosed transmission line, GIL)。GIL载流导体截面积大,输电能力强,损耗低于传统架空线和电缆;一般不受天气、地形等因素的影响;占地面积小,对周围环境基本无电磁辐射;还具有安装运维方便、故障率低、设计使用寿命长等优点,符合现代电力系统对设备运维和安全性的要求,因此GIL具有广阔的应用前景^[1-5]。

在GIL中,盆式绝缘子起着支撑导体、隔离气室和电气绝缘等作用。然而在直流电场下,绝缘子表面容易发生电荷积聚,研究表明,表面电荷不仅改变了原有电场分布,且不易消散,会造成盆式绝缘子沿面闪络电压降低,甚至引起异常放电,是设备安全运行的隐患^[6-8]。盆式绝缘子表面电荷积聚成为制约直流GIL应用的因素之一。

各国学者对不同外施直流电压下绝缘子的表面电荷积聚特性进行了大量研究。西安交通大学汪泓通过实验研究了直流电压下环氧绝缘子的表面电荷积聚现象,发现当外施电压幅值增大时,绝缘子表面电荷的极性会在某一电压处翻倍^[9-10]。华北电力大学齐波等学者采用一套手动三维操控机构,对实际盆式绝缘子凸面进行全径向、全角度扫描测量,发现表面电荷积聚呈现明显极性效应,且电荷密度随着电压幅值增大呈现逐渐增多的趋势,并随电压作用时间的增加逐渐增至饱和^[11]。荷兰代尔夫特理工大学J. Tao认为电荷积聚达到饱和的时间与外施电压幅值有关,电压幅值越高,饱和时间越长;另外,绝缘子表面存在的微缺陷会导致局部积聚大量电荷^[12-13]。F. Messerer等人认为,绝缘子表面充电时间常数与表面电导率有关^[14]。唐炬等学者认为,不同情况下表面电荷的来源和积聚途径不同,可以通过电荷积聚饱和时间的差异来区分电荷积聚途径^[15-16]。

综合以上研究,可以发现各国学者对直流电压下绝缘子表面电荷积聚特性已达成许多共识,例如在积聚和消散过程中电荷密度随时间的动态变化规律及影响因素^[17-24]。但是仍存在以下几个问题:一是由于各学者实验条件不同,绝缘子表面积聚电荷的极性和分布不尽相同,缺乏统一的理论模型解释不同的电荷分布;二是由于直流配方的盆式绝缘子仍处于试制阶段,各学者在实验中使用了交流配方绝缘

子并施加直流电压,这对高压直流GIL盆式绝缘子的绝缘设计参考意义不大。因此,急需开展直流盆式绝缘子表面电荷积聚特性及理论模型的相关研究。

文中研制了一套盆式绝缘子表面电荷测量装置,改进了探头标度方法和电荷反演算法,对 ± 200 kV直流盆式绝缘子凹面电荷密度进行了测量,实验研究了不同极性、幅值和作用时间的直流电压对SF₆中绝缘子表面电荷积聚的影响,并结合仿真计算,对不同外施电压情况下的电荷积聚模型进行了分析。文中研究可以为改进电荷测量和标度方法、深入认识直流盆式绝缘子电荷积聚特性、完善电荷积聚模型提供参考。

1 表面电荷测量装置与方法

1.1 GIL盆式绝缘子表面电荷测量装置简介

盆式绝缘子表面电荷测量装置与GIL盆式绝缘子试验段进行对接,内部充有一定气压的SF₆气体。装置的目标功能是控制探头按照给定轨迹运动,对盆式绝缘子表面进行等距垂直圆周扫描,为此设计了四轴三维操纵机构、绝缘子高压屏蔽罩传送机构、控制系统等组成部分。其中,四轴三维操纵机构见图1,静电容探头固定于蓝色机械臂前端,位置经过校准。机构的轴向导轨(Y轴)可实现机械臂沿罐体轴线方向靠近或远离盆式绝缘子待测表面,径向导轨(Z轴)可实现机械臂沿盆式绝缘子径向的移动,探头的夹持旋转机构(A轴)可控制探头旋转一定角度进行姿态调整,旋转底座(X轴)实现整个测量机构在圆周方向上的旋转。探头运动距离定位精度为 ± 0.2 mm,角度定位精度为 $\pm 45'$ 。探头输出信号通过密封航空插头转接至装置外部进行采集。

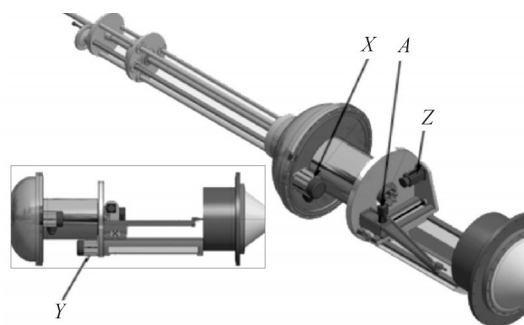


图1 四轴三维操纵机构(X,Y,Z,A为4台伺服电机)

Fig. 1 4-axes 3-dimensional manipulating mechanism
(X,Y,Z and A being 4 servo motors)

为模拟盆式绝缘子电场分布,需要在施加电压时给盆式绝缘子安装高压屏蔽罩,在撤去电压后将屏蔽罩移除,以对绝缘子表面电荷进行测量。屏蔽罩传送机构可实现密封腔体内高压屏蔽罩的安装

及拆卸,见图2。



图2 传送机构安装/拆卸盆式绝缘子高压屏蔽罩

Fig. 2 Transferring mechanism installing/removing the HV shielding conductor of basin-type insulator

1.2 实验平台与方法

实验测量 ± 200 kV 盆式绝缘子凹面的电荷分布情况。该绝缘子直流配方盆式绝缘子,其中球形氧化铝填料的质量份数为300。绝缘子的相对介电常数为4.9,体积电阻率为 1×10^{-14} S/m,表面电导率为 8×10^{-15} S。搭建测量实验平台见图3,其中直流高压串级发生器1产生正/负极性的直流高电压,经保护电阻接至套管2及转接段3,施加电压于直流盆式绝缘子上。表面电荷测量装置4安装于盆式绝缘子后级,装置内充入气压为0.3 MPa的纯净SF₆气体。实验温度控制在20~25 °C之间,SF₆气体中微水含量低于100 μ L/L(体积分数)。

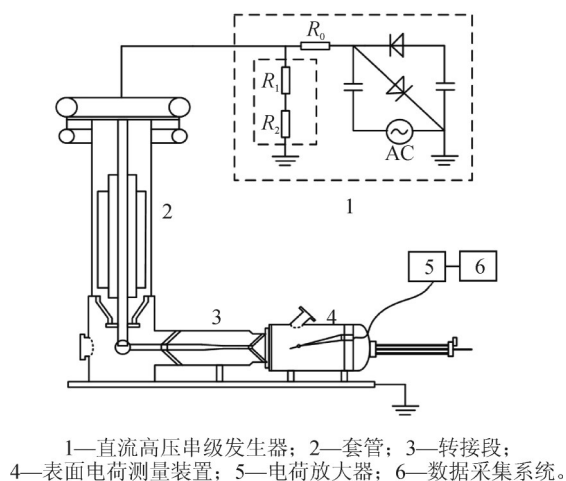


图3 盆式绝缘子表面电荷测量实验平台

Fig. 3 Experiment setup for surface charge measurement of basin-type insulator

测量前使用浸有无水乙醇的防静电除尘纸清洁绝缘子表面,干燥12 h以上,然后对接测量装置,在SF₆气体氛围中对绝缘子表面进行预扫描,确保无残余电荷存在,再开始施加电压进行实验。每次施加电压后均对盆式绝缘子表面进行清洁和预扫描,以排除上一次加压时残留电荷的影响。四轴三

维操纵机构控制探头对绝缘子表面进行连续圆周扫描的轨迹见图4,即探头完成一个圆周的测量后,调整姿态,以反方向再进行下一个圆周扫描。实验时静电电容探头沿盆式绝缘子径向的扫描点数为26个,圆周方向采集卡采样频率为10 Hz,每个圆周采样点数约250个。整个扫描及数据采集过程用时约13 min。

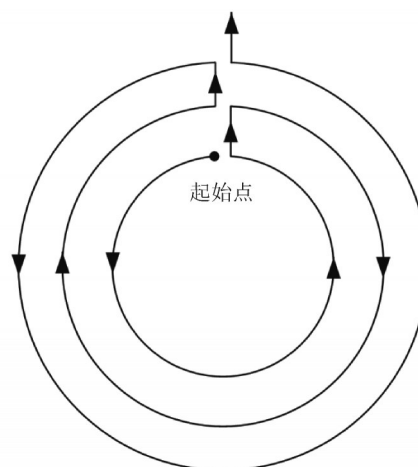


图4 静电电容探头运动轨迹示意图

Fig. 4 Schematic of movement trajectory of the electrostatic probe

2 新型探头标度方法和电荷反演算法

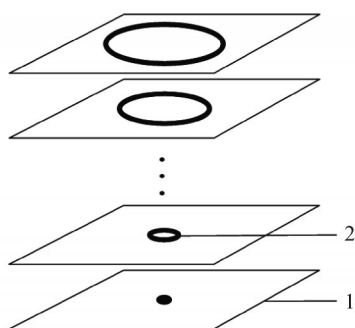
2.1 静电电容探头的同心圆环电极标度法

文中采用静电电容探头法进行表面电荷测量,所用电荷放大器型号为Kistler 5018A。采用一套同心圆环电极对电荷测量系统进行标度,原理示意图见图5。图5(a)为一套同心圆环电极电路板,共20片,每片电路板上单环形铜电极宽度为1 mm,各圆环的总覆盖面积是直径为39 mm的圆形区域。图5(b)为标度方法示意图,将静电电容探头固定在金属电极正上方,垂直距离 $d=2$ mm,对圆环电极施加一定幅值的直流电压 U_m ,并读取电荷放大器的输出。更换电路板,分别考察每个圆环电极对探头的感应电荷量,再进行累加,计算获得探头的空间分辨率。该方法克服了传统平板电极标度法中板电极上的电荷可自由移动、探头移动影响电荷分布等局限性。

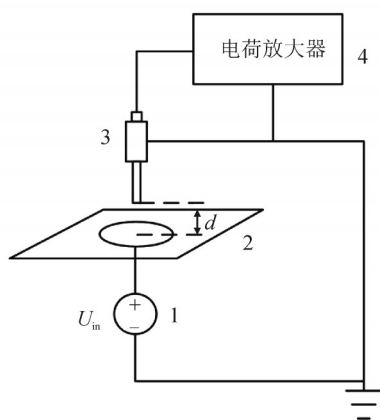
在距离 $d=2$ mm下,分别对每个圆环电极施加一定幅值的直流电压,在电荷放大器上读取探头的感应电荷量并进行叠加和归一化计算,得到单位密度面电荷在距离 d 处的响应。绘制响应和圆环半径之间的关系图,见图6,并拟合得到探头的响应函数 $H(x)=1/(a+bx+cx^2)$,其中 $a=1.0001$, $b=0.9294$, $c=-0.0043$ 。

2.2 基于矩阵Cholesky分解的电荷密度反演算法

对测量数据进行简单处理,可获得一个 26×495



1—电路板；2—圆环铜电极。
(a) 同心圆环电极电路板示意图



1—直流电压源；2—圆环电极电路板；3—探头；4—电荷放大器。
(b) 标度方法示意图

图5 静电容探头的标度

Fig. 5 Calibration of electrostatic probe

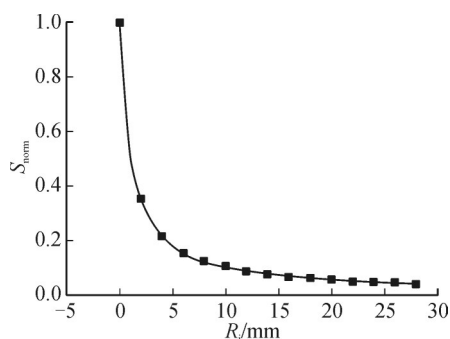


图6 静电容探头的响应函数

Fig. 6 Response function of electrostatic probe

的原始矩阵。由于探头的输出不单是测量点处的响应,而且受到测量点周围电荷的影响,因此需对原始矩阵进行解耦计算,以获得实际电荷分布。文中采用矩阵Cholesky分解法进行计算。

在盆式绝缘子的半径方向上,相邻两个测量点之间的距离是5 mm;在圆周方向上,相邻两个点之间的距离与其所在圆周半径有关。经过计算,发现绝缘子表面相邻点之间的弧线距离接近直线距离,因此不必进行空间几何变换。考虑到图6所示的响应函数,在某点 P 附近选择周围18个点进行反演计算,见图7。其余点由于对 P 点影响很小,可以忽略不计。

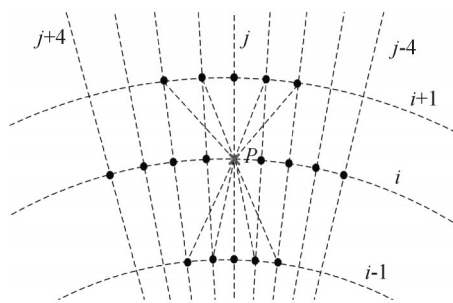


图7 反演计算点选取

Fig. 7 Choice of inverted calculation points

当不考虑边界情况时,构建向量 $\sigma'[1 \times 19]$ 、向量 $\sigma[1 \times 19]$ 以及系数矩阵 $M[19 \times 19]$,满足

$$\sigma' = M\sigma \quad (1)$$

式(1)中:向量 σ' 是已知 P 周围(含 P)19个点的电荷密度测量值;向量 σ 是这19个点的电荷密度反演计算值,其中只有点 $P(i, j)$ 对应的元素是真实电荷密度分布;系数矩阵 M 中的元素含义为对应两点之间距离的响应系数。式(1)可以转化为

$$\sigma = M^{-1}\sigma' \quad (2)$$

方程(2)中,矩阵 M 为一个 n 阶对称正定矩阵。Cholesky分解法指出,存在一个可逆的下三角矩阵 G ,使得 $M=GG^T$,而当 G 的对角元为正时,这种分解是唯一的。完成矩阵 M 的Cholesky分解后,方程 $M\sigma=\sigma'$ 变为 $GG^T\sigma=\sigma'$,因此可由 $Gy=\sigma'$ 解出 y ,再由 $G^T\sigma=y$ 解出 σ 。对非边界情况的每个点都进行此计算,从而得到每次循环中 σ 里面的一个真实元素。当考虑边界元素时,仍按照原计算点选取方式,但在径向边界处无部分周围元素时,矩阵 M 中相应系数设为0即可。对圆周方向边界元素的处理为:类似时钟12点进行跨接,例如当 $j=1$ 时,则 $j-1=495$, $j-2=494$,以此类推。反演计算后,可绘制表面电荷真实分布图像。

3 不同直流电压下的表面电荷分布

3.1 直流电压极性的影响

对盆式绝缘子分别施加 ± 80 kV直流电压60 min,以保证绝缘子表面电荷积聚达到饱和(饱和时间约为30 min)。电荷分布见图8,其中1表示正电荷,2表示负电荷。从图8可以看出,80 kV直流电压下,盆式绝缘子表面电荷基本呈圆周对称分布,靠近中心导杆附近电荷积聚较少,外围电荷积聚较多,电荷密度可达十几 $\mu\text{C}/\text{m}^2$ 。正极性电压下,绝缘子凹面主要积聚负电荷;负极性电压下,绝缘子凹面主要积聚正电荷。

直流电压作用下,气—固界面发生电荷弛豫过程,表面电荷密度动态方程见式(3)^[25-26]

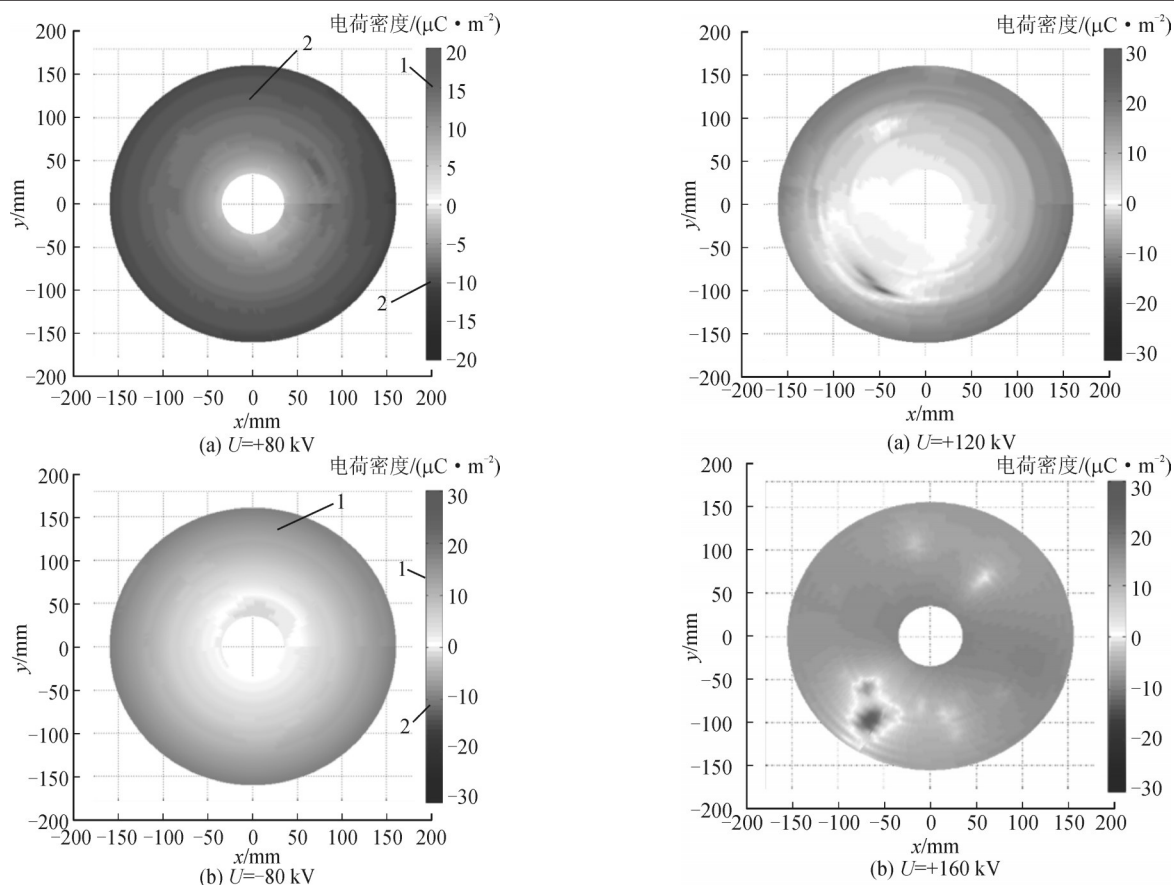


图8 不同极性直流电压下盆式绝缘子表面电荷分布图

Fig. 8 Surface charge distributions of basin-type insulator under DC voltages of different polarities

$$\sigma(t) = \frac{\varepsilon_s \gamma_g - \varepsilon_g \gamma_s}{b\gamma_s + a\gamma_g} U (1 - e^{-t/\tau_e}) \quad (3)$$

式(3)以电场强度由气体侧指向固体侧为正; ε_g , γ_g 为气体介质的介电常数和电导率; ε_s , γ_s 为固体介质的介电常数和电导率; a 、 b 为与电极结构相关的具有长度量纲的常数; U 为施加直流电压; τ_e 为电荷弛豫时间常数。对盆式绝缘子凹面, 电场线主要由气体侧穿入固体侧, 式(3)电场强度取正方向; 由于外施电压幅值较低, 气体电导率较绝缘子电导率可忽略不计 ($\gamma_g < \gamma_s$), 因此式(3)分子为负, 即表面电荷极性与外施电压极性相反。

3.2 直流电压幅值的影响

对盆式绝缘子分别施加不同幅值的正极性直流电压 60 min, 其表面电荷分布见图9。

由图9可以看出, 随着外施电压幅值增大, 盆式绝缘子表面局部区域开始出现正极性电荷积聚, 正极性电荷区域及密度值均随电压幅值显著增大。对此解释为: 盆式绝缘子表面存在缺陷, 电压幅值较低时, 不足以引发微放电; 而电压幅值较高时, 绝缘子表面微放电产生大量与外施电压同极性的电荷, 使得同极性电荷覆盖区域及密度值均随电压增

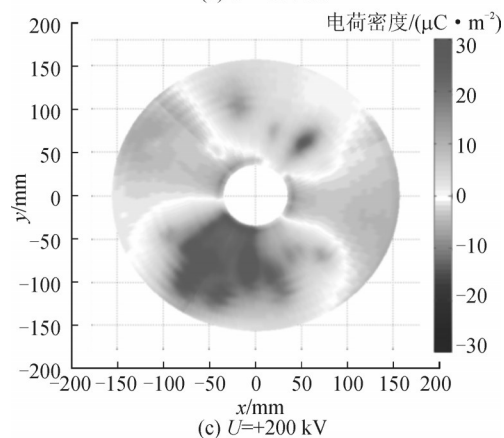


图9 不同幅值直流电压下盆式绝缘子表面电荷分布图

Fig. 9 Surface charge distributions of basin-type insulator under DC voltages of different amplitudes

大而增大。表面电荷出现极性反转对应的电压幅值约为 160 kV, 施加低于此幅值的电压, 正极性电压下绝缘子凹面基本积聚负电荷; 外施电压高于此幅值后, 开始出现明显的正电荷集中区, 在 +200 kV 电压下, 正电荷密度值可超过 $30 \mu\text{C}/\text{m}^2$ 。

3.3 直流电压作用时间的影响

不同加压时间下盆式绝缘子表面电荷分布图见图10, 从图10可以看出, 表面电荷随时间增加逐渐积聚至饱和状态。与正极性电压下正负电荷均有分布不同, 在负极性 200 kV 直流电压下, 绝缘子表面全部为负电荷, 且在积聚过程中, 电荷分布形

态、集中分布区域均在加压初始就确定下来,基本不随时间发生变化。

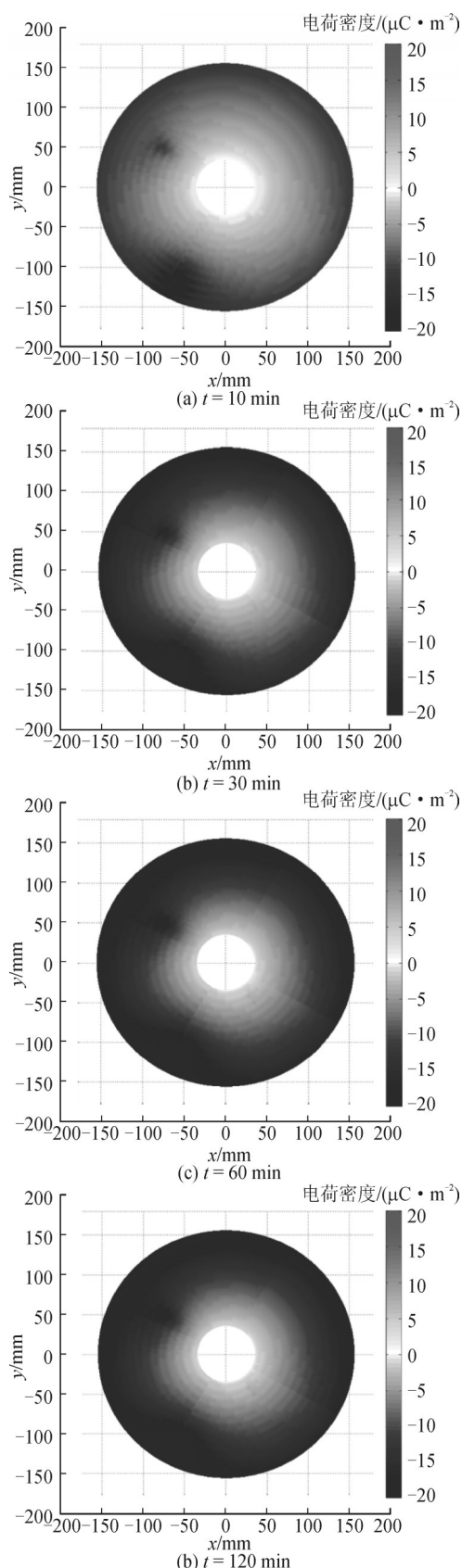


图10 不同电压施加时间下盆式绝缘子表面电荷分布图

Fig. 10 Surface charge distributions of basin-type insulator under DC voltages of different application times

电荷密度值(平均值、最大值与最小值)随时间变化情况见图11。从图11可以看出,电荷积聚在30 min后基本达到饱和状态,30 min以后,随着加压时间的增长,电荷密度平均值稳定在 $-10 \mu\text{C}/\text{m}^2$ 左右,电荷密度最大值略有增大,可达 $-35 \mu\text{C}/\text{m}^2$,电荷密度最大值出现在极坐标下 -120° 左右近外壳处。

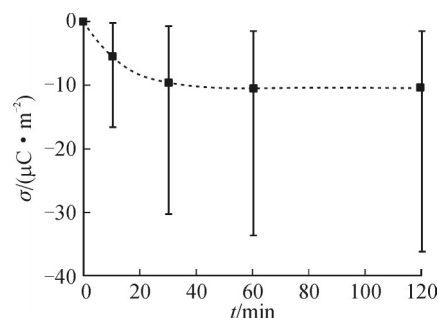


图11 表面电荷密度值随加压时间的变化

Fig. 11 Surface charge density in variation with voltage application time

4 表面电荷积聚模型的讨论

当外施电压较低时,介质分界面上的积聚电荷来源于恒定电场的电导电流。分界面两侧电位移矢量和电流密度满足方程为:

$$D_{ns} - D_{ng} = \sigma \quad (4)$$

$$J_{ns} = J_{ng} \quad (5)$$

即

$$\epsilon_s E_{ns} - \epsilon_g E_{ng} = \sigma \quad (6)$$

$$\gamma_s E_{ns} = \gamma_g E_{ng} \quad (7)$$

由式(6)、(7)可推导出表面电荷密度与气体侧法向电场强度的关系,即

$$\sigma = \frac{\epsilon_s \gamma_g - \epsilon_g \gamma_s}{\gamma_s} E_{ng} \quad (8)$$

当外施电压较低时,气体电导率 $\gamma_g \approx 0$,则电荷密度 $\sigma \approx -\epsilon_g E_{ng}$,法向电场强度与电荷密度之间的关系见图12,其中仿真计算采用Comsol Multiphysics的恒定电场模块,导入实际绝缘子几何模型,给定绝缘材料电导率、介电常数,在网格剖分足够精细的情况下,求解恒定电场下的Laplace方程,获得盆式绝缘子沿面电场与电荷密度分布,并绘制 $E_n-\sigma$ 关系图。由图12可知,对仿真结果拟合得到的直线的斜率为负的气体介电常数 $-\epsilon_g$,对实验结果拟合得到的直线斜率接近 $-\epsilon_g$ (误差为7.8%),这验证了表面电荷的常规分布模型 $\sigma \approx -\epsilon_g E_{ng}$,表明稳态电荷密度值取决于气体侧法向电场强度大小,因此,为减少表面电荷积聚,应当尽量减小沿面气体侧法向电场强度。

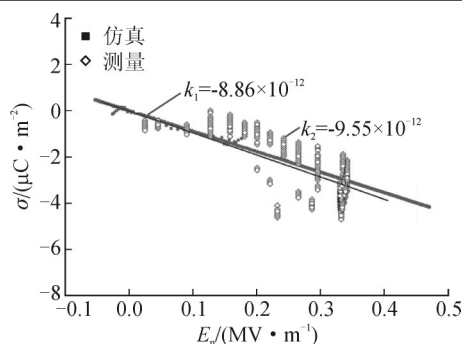


图12 表面电荷密度与沿面法向场强的关系
(仿真及实验中 $U=+80$ kV)

Fig. 12 Relationship between surface charge density and normal electric field strength ($U=+80$ kV in both simulation and experiment)

当电压幅值增高后, SF_6 气体电导率增大, 绝缘子表面电荷的来源不仅包括恒定电场下常规的导电电流, 而且包括气体导电过程产生的大量带电离子。在这种情况下, 绝缘子表面电荷分布是恒定电场下的常规分布和气体侧传导导致的奇异分布综合作用的结果, 积聚电荷的极性也将发生明显变化(见图8)。由式(6)、(7)可推导出表面电荷密度与固体侧法向电场强度的关系

$$\sigma = \frac{\varepsilon_s \gamma_g - \varepsilon_g \gamma_s}{\gamma_g} E_{ns} \quad (9)$$

当气体电导率增长到远大于固体电导率时 ($\gamma_g \gg \gamma_s$), 式(9)可简化为 $\sigma \approx \varepsilon_s E_{ns}$, 即表面电荷密度值与固体侧法向电场强度之比为固体材料的介电常数。通过式(7)可知, 此时气体侧法向电场强度 $E_{ng} = (\gamma_s/\gamma_g) \cdot E_{ns} \approx 0$, 即表面电荷的存在抵消了气体侧法向电场强度, 电荷积聚达到饱和状态, 这也是表面电荷的气体侧传导模型所描述的结果。

5 结语

直流电压作用下, 表面电荷积聚呈现明显的极性效应, 低幅值电压下, 绝缘子凹面主要积聚与外施电压极性相反的电荷; 高幅值电压下, 绝缘子凹面积聚大量同极性电荷, 且正极性电压下绝缘子表面正负电荷均有分布, 负极性电压下只分布负电荷。随外施电压时间增加, 绝缘子表面电荷分布逐渐趋于饱和, 该过程中电荷分布形态基本不变, 达到饱和所需的时间约 30 min。

若外施电压和气体电导率较低, 绝缘子表面电荷积聚达到饱和后, 电荷符合常规分布模型, 可用 $\sigma \approx -\varepsilon_g E_{ng}$ 描述; 若外施电压和气体电导率较高, 表面电荷呈现奇异分布, 模型可用 $\sigma \approx \varepsilon_s E_{ns}$ 来描述, 此时

表面电荷抵消了气体侧法向电场强度。

参考文献:

- [1] KOCH H. Gas-insulated transmission lines(GIL)[M]. Hoboken: Wiley-IEEE Press, 2012:21-25.
- [2] KOCH H. Basic information on gas-insulated transmission lines(GIL)[C]//IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. [S.l.]: IEEE, 2008: 1-4.
- [3] SCHOFFNER G, KUNZE D, SMITH I. Gas insulated transmission lines-successful underground bulk power transmission for more than 30 years[C]//The IEE International Conference on AC and DC Power Transmission. [S.l.]: IET, 2006:271-275.
- [4] 肖登明, 阎究敦. 气体绝缘输电线路(GIL)的应用及发展[J]. 高电压技术, 2017, 43(3):699-707.
XIAO Dengming, YAN Jiudun. Application and development of gas insulated transmission line(GIL)[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3):699-707.
- [5] 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: Xi'an Jiaotong University, 2015:38-53.
- [6] 苑 舜. 营口华能电厂 GIS 盘式绝缘子沿面放电分析[J]. 东北电力技术, 1996(5):36-37.
YUAN Shun. Analysis of GIS disk insulator flashover accident in yingkou huaneng power plant[J]. Northeast Electric Power Technology, 1996(5):36-37.
- [7] NAKANISHI K, YOSHIOKA A, ARAHATA Y, et al. Surface charging on epoxy spacer at DC stress in compressed SF_6 gas[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1983, PAS-102(12):3919-3927.
- [8] FUJINAMI H, TAKUMA T, YASHIMA M, et al. Mechanism and effect of DC charge accumulation on SF_6 gas insulated spacers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(3): 1765-1772.
- [9] 汪 风. 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: Xi'an Jiaotong University, 2003:28-37.
- [10] 汪 风, 邱毓昌, 张乔根, 等. 气-固交界面绝缘子表面电荷的观测与分析[J]. 绝缘材料, 2002(4):37-40.
WANG Feng, QIU Yuchang, ZHANG Qiaogen, et al. Observation and analysis of surface charge accumulation at the gas-solid interface of insulator[J]. Insulating Materials, 2002 (4):37-40.

- [11] 齐 波,高春嘉,赵林杰,等. 交/直流电压下气体绝缘变电站盆式绝缘子表面电荷对闪络电压的影响[J]. 高电压技术,2017,43(3):915-922.
 QI Bo, GAO Chunjia, ZHAO Linjie, et al. Influence of surface charge on flashover voltage of gas insulated substation basin insulator under AC and DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(3): 915-922.
- [12] TAO J. Surface charge accumulation in SF₆[D]. Netherlands: Delft University of Technology, 1993: 115-142.
- [13] TAO J, MORSHUIS P H F, KREUGER F H. mechanisms of surface charge accumulation in SF₆[J]. Archiv Für Elektrotechnik, 1994, 77(2): 151-155.
- [14] MESSERER F, BOECK W. Gas insulated substation(GIS) for HVDC[C]//IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. [S.l.]: IEEE, 2000: 698-702.
- [15] 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.
- [16] KUMADA A, OKABE S. Charge distribution measurement on a truncated cone spacer under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(6): 929-938.
- [17] 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 Qiang, ZHANG Guixin, WANG Xinxin. Surface charge accumulation phenomenon at the gas-solid interface under DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 594-598.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] KINDERSBERGER J, LEDERLE C. Surface charge decay on insulators in air and sulfurhexafluorid-Part I: Simulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(4): 941-948.
- [21] KINDERSBERGER J, LEDERLE C. Surface charge decay on insulators in air and sulfurhexafluorid-Part II: Measurements[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(4): 949-957.
- [22] VOLPOV E. Dielectric strength coordination and generalized spacer design rules for HVAC/DC SF₆ gas insulated systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(6): 949-963.
- [23] 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: 28-45.
 GAO Yu. Dynamic behavior of surface charge on polymer insulating materials[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009: 28-45.
- [24] ZHANG B, QI Z, ZHANG G. 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.
- [25] 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: Higher Education Press, 2000: 74-79.
- [26] 刘志民,邱毓昌,冯允平. 对绝缘子表面电荷积聚机理的讨论[J]. 电工技术学报, 1999, 14(2): 65-68.
 LIU Zhimin, QIU Yuchang, FENG Yunping. The discussion about accumulation mechanism of surface charge on insulating spacer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1999, 14(2): 65-68.

杜乾栋(1993—),男,硕士研究生,主要从事 GIS/GIL 绝缘子沿面绝缘特性的研究。

张乔根(1965—),男,博士,教授,博导,主要从事特高压直流换流阀、特高压 GIS/GIL、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。