

# 温度和电场引起绝缘子体积极电导率非均匀性对表面电荷积聚特性的影响

陈招明

江西高强电瓷集团有限公司 江西 萍乡 337200

摘要：为研究直流高压背景下，温度以及电场两者对表面电荷积聚的影响，创建出仿真模型，研究表面电荷积聚的特性。研究结果表明：电场强度的变化，能够使得电导率的非均匀性影响表面电荷的分布状况，然而，当绝缘子电场强度降低时，表面电荷的密度和电导率的非均匀性没有任何联系；当电场强度升高时，最大电荷的密度略有降低。所以，与电场以及温度相关的电导率非均匀性，才是影响到绝缘子电荷通过体传导积聚最重要的原因。

关键词：温度和电场；非均匀性；表面电荷积聚

引言：气体绝缘组合电器具有可靠性高、体积小等一些特点，在交流输电体系中获得广泛的运用，并且还能够直流输电体系中得到重视。相比交流输电的体系，在直流电压下，绝缘子以及 SF6 分界面中电荷积聚的情况更加严重，所以，需要明确绝缘子电荷积聚的机理。本文主要探究电场以及温度对表面电荷积聚特性的影响。

## 1 仿真模型

### 1.1 物理模型

主要运用到同轴电极所布置的几何模型，其中包含简化的环氧树脂绝缘子以及 SF6 气体。对于轴对称模型来说，其外半径为 200 毫米，内半径为 90 毫米，对于绝缘子而言，它的高度以及宽度为分别是 100 毫米、20 毫米。为了能够有效探究温度以及电场这两者对电荷积聚产生的影响，需要创建含有电场以及热场混合的物理场仿真模型。当设置直流电压时，电场从刚开始的容性逐渐转变成阻性的分布，此转变过程能够直接影响到表面电荷的积聚状况，可用式子（1）、（2）来描述。

$$-\nabla \cdot (\gamma \nabla \varphi) = \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \cdot \epsilon_0 \epsilon_r \nabla \varphi) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \sigma}{\partial t} = \gamma_i E_{in} - \gamma_g E_{gn} \quad (2)$$

在上述式子中： $\gamma$  代表则体积电导率； $\varphi$  代表电势； $\epsilon_0$ 、 $\epsilon_r$  分别代表着真空介电常数、相对介电常数； $t$  代表着时间； $\sigma$  代表着电荷密度； $E_n$  代表着法向分量， $i$ 、 $g$  分别代表绝缘子、气体。内导体施加高压，外导体接地。

充分运用到傅里叶定律，对热传导进行描述，如式子 3 所示：

$$\nabla \cdot (-k \nabla T) + \rho C_p u \cdot \nabla T = 0 \quad (3)$$

因为气体对流的过程比较复杂，非常难得到准确的温度分布情况，大概运用到下述办法，对气体以及固体中的热传导进行模拟。

假设导体以及外界环境之间的热交换，通过对流的形式进行，热通量的公式为  $h \cdot (T_{ext} - t)$ ，其中  $h$  代表着传热系数； $T_{ext}$  代表着 297.15 K；外导体温度就是 297.15 K，然而，内导体温度就应该按照相关仿真条件进行改变；绝缘子、SF6 内部热量，需要通过热传导的形式进行传递。

在本研究物理模型中，应该假设 SF6 绝对干燥，因此，就可以忽略掉电荷沿着绝缘子表面进行传导的过程。此外，需要设置出气体电导率，通过常数代替离子流的模型，从而对物理仿真模型进行简化，此种简化对绝缘子体积的电导率并没有造成任何的影响。

### 1.2 环氧树脂的电导率

相关研究人员已经对环氧树脂电导率开展测量工作，然而由于检测条件以及样品的差别，结果存在巨大差异。本文研究运用一组分段的函数，对此结果进行拟合，当电场强度  $< 5.76$  kV/mm，又或者电场强度  $> 10.25$  kV/mm 时，电导率为  $1.34 \times 10^{-14}$  S/m，又或者电导率为  $7.72 \times 10^{-13}$  S/m，当电场强度为 5.76—10.25 kV/mm 时，电导率的满足式（4）如下。

$$\gamma_E = 7.45 \times 10^{-17} e^{0.90E} \quad (4)$$

上述式子中  $E$  的代为是 KV/mm。

考虑到温度以及电场效应，绝缘子的体积电导率能够表示为式子 5。

$$\gamma_i = A e^{B(T-273.15)} \gamma_E \quad (5)$$

在上述式子中， $B$  需要设置成 0.1K<sup>-1</sup>； $T$  的单位是 K； $A$  就是和材料结构相关的常数，进一步计算其数值是 0.09。

因为电场和电导率的非线性关系，式子（1）也是非线性的，此研究运用到 COMSOL 模块进行求解。

### 1.3 仿真模型的有效性检验

为了能够有效检验这一仿真模型是否正确，在不变更其他物理方程的情况下，把  $\gamma_i$ 、 $\gamma_g$  分别取值  $10^{-14}$  S/m、 $10^{-16}$  S/m。

## 2 仿真结果

### 2.1 电场对表面电荷积聚的影响

因为在绝缘子的内部,电场呈现出非均匀分布的形式,为了有效探究电场进一步影响表面电荷的积聚,通过调节内导体施加电压,进一步获得不同分布情况的电导率,当外施的电压达到 300 kV 时,绝缘子内部的电场  $< 5.76 \text{ kV/mm}$ ,电导率的分布均匀。随着外施电压逐渐升高,内导体电场  $> 10.25 \text{ kV/mm}$ 。

当温度在 24 时,在电压不同的情况下,表面电荷可以达到稳定状态时的分布。当电压为 500 kV 时,不仅包含内导体周围的部分区域,上表面电荷以及下表面电荷的分布曲线也保持不变。随着电压的增大,上表面的电荷分布形状明显发生改变,然而,下表面电荷的变化却非常小。

在不同电压等级下,表面电荷分布曲线维持稳定,当外加的电压达到 300、500KV 时,绝缘子上表面电荷的密度是  $-21.4$ 、 $-35.8 \mu\text{C/m}^2$ ,下表面为  $37.0$ 、 $61.6 \mu\text{C/m}^2$ 。由此可见,在电场强度不高状况下,电导率的非均匀性能够直接影响到表面电荷分布形状的改变,但其密度的最大值并没有变化。

### 2.2 温度对表面电荷积聚的影响

温度会随着和内导体距离的增加而降低。除此之外,随着内导体及外导体之间温度梯度的不断增大,除了温度幅值能够不断增大外,绝缘子温度分布的规律可以维持不变。按照上述式子 (5) 的计算,在不同的温度背景下绝缘子体积的电导率。由此可见,电导率会随着温度不断上升而增大,并且内导体的温度会越来越高,电导率的非均匀性愈发明显。除此之外,当温度不断上升过程中,使表面电荷分布状况发生一定的变化。当内导体的温度达到 44、104 时,负电荷密度最大的数值为  $-35.1$ 、 $-28.1 \mu\text{C/m}^2$ 。

由此可见,随着温度的增加,进一步使得下表面的电荷密度不断增大,然而,上表面负电荷随之而减少,正电荷不断增多。上表面以及下表面的电荷分布能够随温度的变化,进一步表现不同的规律,这就是因为电场分布的差异所导致的。为了可以验证电导率非均匀性,对表面电荷积聚产生影响,需要假设绝缘子内部的温度维持着稳定及均匀,并且计算表面电荷的分布情况。尽管表面电荷的密度会随温度升高有所增加,然而不计算电荷密度的变化。由此可见,考虑温度对绝缘材料表面电荷积聚产生的影响,就需要充分考虑到温度分布的非均匀性。

## 3 讨论

温度以及电场均能够影响到电导率,进一步改变表面电荷的积聚特性,然而,温度以及电场的影响略有不同。一

方面,由于温度的梯度使得绝缘子的下表面最大电荷密度增加。对于上表面来说,如果温度能够均匀分布,主要积聚负电荷,然而考虑到温度存在梯度,就会存在异极性的电荷。这是因为温度梯度,从而引发电导率的非均匀性,进一步改变电场的分布,对表面电荷积聚产生一定的影响。当温度较高时,电场方向会对表面电荷的极性产生一定的影响,当电场法向分量指向绝缘子内部时,负电荷就会发生积聚的情况;反之,正电荷存在积聚的情况。

另外一方面,如果外加的电压比较低,电场就会引发电导率的非均匀性,逐渐改变表面电荷的分布曲线,但是最大表面的电荷密度不会因此而减小或者增大。当外加的电压比较高时,绝缘子体积电导率的非线性就会增强,对于表面电荷密度来说,其最大值要比设定的电导率均匀时的小,这就说明忽略电场使得电导率的非均匀性影响到表面电荷的密度,并且使其偏高。

综上,在一定程度上,电导率的非均匀性对表面电荷分布情况会产生一定的影响。当绝缘子内部存在比较低的电场强度时,可以忽略掉最大表面的电荷密度产生的影响,但是,在电场的强度比较高时,电导率非线性也会随之逐渐增强,相比较电导率均匀过程中,最大电荷密度会减小。

### 参考文献:

- [1] 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(03):54-59.
- [2] 刘畅. 氮离子注入对聚四氟乙烯表面电荷积聚消散特性影响研究 [D]. 中国工程物理研究院, 2020.
- [3] 晏武,张周胜,邓保家,张子. 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.
- [4] 朱庆东,潘子君,潘成,罗毅,唐炬. 温度和电场引起绝缘子体积电导率非均匀性对表面电荷积聚特性的影响 [J]. 绝缘材料, 2019,52(10):80-86.
- [5] 周武. 直流电压下绝缘子表面电荷积聚影响因素及消散特性研究 [D]. 湖南大学, 2018.
- [6] 李晓龙. 特高压换流变压器阀侧套管油浸绝缘纸表面电荷积聚与击穿机理研究 [D]. 天津大学, 2017.
- [7] 周宏扬,马国明,刘姝嫫,李成榕,赵书静,屠幼萍,秦司晨. 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(04):1251-1260.
- [8] 张宪标. SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体中绝缘子表面电荷积聚与沿面闪络的 PIC 仿真 [D]. 湖南大学, 2009.