

[开关设备]

小型金属体异物对126 kV GIS绝缘性能影响的研究

文/许继（厦门）智能电力设备股份有限公司 曹丽璐

以GIS三相共箱母线为研究对象，基于静电场分析理论，建立三维电场仿真模型，采用有限元分析方法，对可能存在四种小型金属体异物的母线进行全场域电场数值仿真与绝缘分析，得出零件异物对电场分布的影响，并通过工频耐受电压试验、局部放电量检测试验和雷电冲击耐受电压试验对其绝缘性能进行校核。

在电力设备中，气体绝缘金属封闭开关设备（Gas Insulated Switchgear，GIS）因具有结构紧凑、可靠性高、环境适应能力强和维护工作量小等特点，在高压、超高压领域得到广泛应用。虽然GIS发生故障的概率只有常规设备的20%~40%，但绝缘介质的泄漏、外部水分的渗入、导电杂质的存在和绝缘子的老化都会严重影响GIS的可靠性，其中导电杂质引起的放电故障发生次数最多，故障影响最大，占故障总数的29.0%左右。因此，研究杂质对GIS绝缘性能的影响，进而寻找应对措施，对降低GIS故障率具有积极意义。

目前，国内外对GIS中由于杂质导致的绝缘故障做了大量的研究并取得一定的成果。本文针对壳体中常见的螺钉、螺母、平垫和弹垫四种小型金属体异物对GIS局部电场的影响建立数值模型，采用有限元分析方法进行三维电场仿真，并进行相关试验验证结果的准确性。由于脱离了壳体的螺纹紧固件是可以自由运动的，在重力的影响下，最终都会滚落至卧式壳体底部，故本文只考虑并分析零件异物位于箱体底部情况。

卧式母线三维仿真模型

由于选择的仿真模型需具备典型性和可操作性，经过相关分析后选择许继集团的126 kV GIS作

为研究对象，在其中充入SF₆作为绝缘气体，气室充气压力为0.5 MPa（闭锁压力）。

1. 母线三维模型

在110 kV输变电工程中，GIS采用三相共箱式结构，其截面示意图如图1所示。其中，三相导体呈倒三角形均布在盘式绝缘子内部，具体参数数据如表1所示。

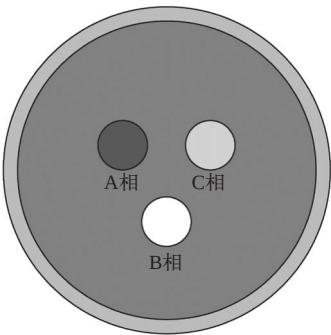


图1 GIS母线截面示意

表1 三相GIS基本参数

参数/mm	数值	参数	数值
壳体外径	516	额定电压/kV	126
壳体内经	500	额定工频耐受电压/kV	230
导电杆直径	60	额定雷电冲击耐受电压/kV	550
母线长度	2 000	环境温度/K	293.15

2. 仿真异物模型

为使仿真结果更加普遍,对于仿真的螺钉、螺母等的尺寸、位置都应进行考虑。

(1) 异物的选择

在126 kV GIS中,螺纹紧固件是应用广泛的一类机械零件,用于不同零件之间的紧固连接。由于所需功能不同,连接零件的尺寸不同,螺纹紧固件的类型和规格也不同。因通用程度高、价格经济,标准件为企业首选。126 kV GIS常用螺纹标准紧固件类型及规格如表2所示,本文将以这些零件作为研究对象。

表2 螺纹紧固件类型及规格

名称	类型	规格
十字沉头螺钉	GB/T 819.1	M5×8
六角螺母	GB/T 6170	M16
平垫圈	GB/T 97.1	M16
弹簧垫圈	GB/T 93	M16

(2) 异物的可能位置

脱落的螺纹紧固件能够在箱体内部自由运动,由于重力作用,最终滚至壳体底部。对螺钉和螺母而言,均存在两种可能的位置,分别如图2a、图2b、图2c和图2d所示。而对平垫和弹垫来说,由于宽度过窄,无法站立,一般只能平躺,如图2e和2f所示。其中,有研究表明,在其他条件相同的情况下,GIS内最大场强随着外壳金属异物高度的增加而增大,故选择条件更苛刻的螺钉a和螺母c进行分析。

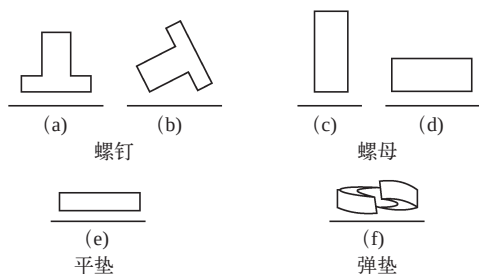


图2 螺纹紧固件位置

根据126 kV GIS中母线的实际物理模型建立异物存在时的仿真模型,如图3所示。

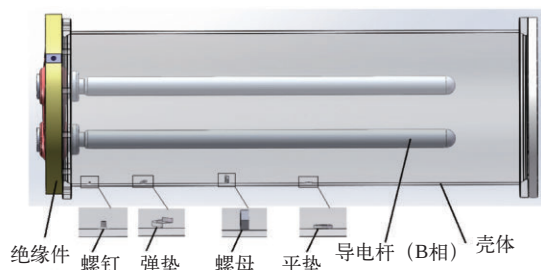


图3 仿真模型

仿真计算理论与结果分析

1. 有限元基础理论

基于有限元分析法计算电器设备的电场时,在所建三维模型导体表面施加规定电压,进而对加压导体外围空间的电场分布进行求解。在该过程中,将带电导体表面作为边界,表面外空间称为场域,当场域中不存在电荷时,应满足拉普拉斯方程,即

$$\text{divgrad} \varphi = 0 \quad (1)$$

则将场域的计算问题转化为求取函数 φ 的边界问题,即Dirichlet问题。通常把函数 φ 称为电位。

电位函数满足微分方程

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

而电场强度

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

式中, E 为电场强度矢量,单位是V/m。

当存在两种介质时,在其交界面上满足

$$\varphi_1 = \varphi_2$$

$$\varepsilon_1 \frac{\partial \varphi_1}{\partial n} = \varepsilon_2 \frac{\partial \varphi_2}{\partial n} \quad (4)$$

式中, ε_1 、 ε_2 分别是交界面上两种不同材料的相对介电常数; n 是交界面的外法线矢量。

对于导体表面则有

$$\varphi = \varphi_0 \quad (5)$$

式中, φ_0 是已知电位。

对于悬浮导体表面则有

$$\varphi = \varphi_x$$

$$\oint \varepsilon_1 \frac{\partial \varphi}{\partial n} dS = q \quad (6)$$

式中, φ_x 为待求的悬浮导体表面电位; q 是悬浮导体的表面电荷量。

对于静电场,相应的变分问题为

$$\begin{cases} F(\varphi) = \int_V \frac{\varepsilon}{2} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right] dV = \min \\ \varphi = \varphi_0 \end{cases} \quad (7)$$

经离散后,原泛函可表示为各单元的泛函之和

$$F(\varphi) = \sum_{e=1}^n F^e(\varphi^e) \quad (8)$$

式中, n 表示体单元总数 φ 。

$$F^e(\varphi^e) = \int_{V_e} \frac{\varepsilon}{2} \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 \right] dV \quad (9)$$

式中, V_e 表示第 e 个单元的体积。

取 F^e 对 φ^e 的偏导数,写成矩阵形式为

$$\left[\frac{\partial F^e}{\partial \varphi^e} \right] = [K^e] [\varphi^e] \quad (10)$$

$$K_{ij}^e = \int_{V_e} \epsilon \left(\frac{\partial N_i^e}{\partial x} \frac{\partial N_j^e}{\partial x} + \frac{\partial N_i^e}{\partial y} \frac{\partial N_j^e}{\partial y} + \frac{\partial N_i^e}{\partial z} \frac{\partial N_j^e}{\partial z} \right) dV \quad (11)$$

式中, N_i^e 、 N_j^e 是插值函数。

$$N_i^e = \frac{1}{6V_e} (a_i^e + b_i^e x + c_i^e y + d_i^e z) \quad (12)$$

$$N_j^e = \frac{1}{6V_e} (a_j^e + b_j^e x + c_j^e y + d_j^e z) \quad (13)$$

式中, a_i^e 、 b_i^e 、 c_i^e 、 d_i^e 、 a_j^e 、 b_j^e 、 c_j^e 、 d_j^e 是四面体体积的代数余子式。

$$V_e = \frac{1}{6} \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i & z_i \\ 1 & x_j & y_j & z_j \\ 1 & x_m & y_m & z_m \\ 1 & x_p & y_p & z_p \end{vmatrix} \quad (14)$$

组合所有 n 个单元, 得到方程组

$$\left[\frac{\partial F^e}{\partial \varphi^e} \right] = \sum_{e=1}^n \left[\frac{\partial F^e}{\partial \varphi^e} \right] = \sum_{e=1}^n ([K^e][\varphi^e]) = 0 \quad (15)$$

从而得有限元方程

$$[K][\varphi] = [0] \quad (16)$$

其中, $[K]$ 的表达式为

$$[K] = \sum_{e=1}^n [K^e] \quad (17)$$

2. 有限元仿真计算与分析

在进行电场强度计算时, 适当的网格划分对于提升模型求解准确度有着关键的作用。本次仿真重点是壳体底部异物对GIS局部电场的影响, 但由于异物尺寸远小于GIS箱体尺寸, 过稀的网格划分可能导致装配零件无法被剖分; 相反, 过密的网格划分会大大增加计算量, 甚至因内存不足而无法计算。针对该问题, 考虑利用有限元网格细化命令对装配零件进行局部剖分, 该方法不仅能够确保计算准确度, 还能提高求解效率。剖分结果如图4所示。

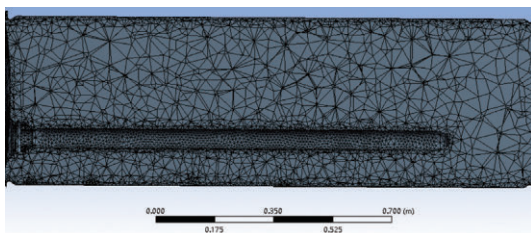


图4 局部网格剖分结果

对含四种异物的三维模型进行计算, 在母线模型内部生成气隙后, 设置金属、绝缘件及气隙的介电常数分别为 $1e+7$ 、4、1。由于壳体底部的金属异物距离B相导体最近, 选择对B相导体施加高电位, 所加电压大小为550 kV, 对A、C相导体以及箱体外壳施加零电位。局部电场仿真结果如图5所示。

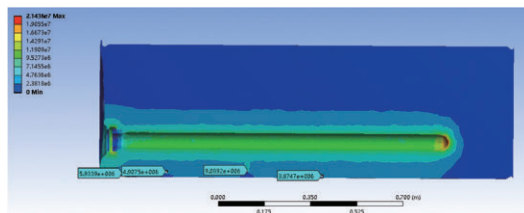


图5 局部电场仿真结果

由图5可知, 异物存在时, 异物周围局部电场发生明显变化, 但不影响整体的电场分布。对四种异物存在时的电场结果进行提取, 可得GIS箱体内部存在异物螺钉、螺母、平垫和弹垫时, 其周围最大场强如表3所示。

表3 异物存在时场强数据分布

名称	周围最大场强kV/mm
螺钉	5.93
螺母	9.09
平垫	3.87
弹垫	4.91

在0.5 MPa气压下, 高压设备壳体内部允许场强值应小于29 kV/mm, 故四种异物存在时的电场均在设计标准允许范围之内。考虑到实际应用中, 由于壳体加工不规则、异物不规则程度等的影响, 实际的场强会高于表3中的数值。

试验验证

1. 试验工装

试验前, 将四种异物置于箱体底部距B相最近的位置, 含异物三相共箱GIS如图6所示。母线与试验设备连接完成的试品试验状态图如图7所示。



图6 含异物三相共箱GIS



图7 试品试验状态图

2. 试验条件

根据GB 11022《高压开关设备和控制设备标准的共用技术要求》和GB 7674《72.5 kV及以上气体绝缘金属封闭开关设备》等相关的技术标准确定试验条件。

(1) 工频耐受电压试验

进行老炼净化后,对试品进行单相对地耐受电压试验,即母线靠近异物的B相施加工频高电压,其余两相及壳体接地,试验在230 kV电压下保持60 s。

(2) 局部放电试验

在工频耐受电压试验的降压过程中进行局部放电检测,局部放电的试验电压为72.7 kV。

(3) 雷电冲击耐受电压试验

对B相施加雷电冲击电压550 kV,标准雷电波形,正负极性分别进行5次试验。

3. 试验结果及分析

(1) 工频耐受电压试验结果

表4为异物存在时的工频耐压试验结果。本次试验按照完整试验流程对壳体内存在小型金属体异物的126 kV GIS设备B相导体进行试验,整个过程中未出现击穿现象,无异常声响,拆开气室检查未发现闪络痕迹,工频耐受电压试验通过。

表4 工频耐压试验结果

异物	工频耐压 (230 kV)
螺钉	合格
螺母	合格
平垫	合格
弹垫	合格

(2) 局部放电试验结果

如图8所示,在72.7 kV下检测到异物存在时,母线箱体的局部放电量为20~60 pC,远大于正常值(≤ 5 pC)。从局部放电动态图谱分析,该局部放电现象呈现较多的悬浮电位放电和不太明显的尖端放电。

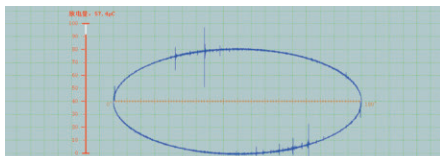
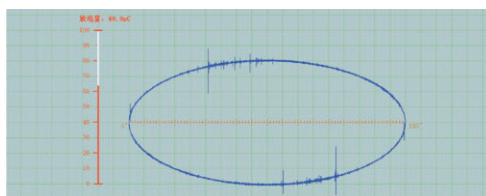


图8 72.7 kV下局部放电量

(3) 雷电冲击耐受电压试验结果

正负极性雷电冲击下的试验结果显示非自恢复绝缘上未出现破坏性放电,试验合格。

在上述结果中,工频耐压试验和标准雷电冲击试验均顺利通过。这与仿真计算结果是吻合的。局部放电检测结果显示局部放电量较大,且超过标准值较多,通过对局部放电类型的分析结合试验模型的结构特点,局部放电产生的原因如下:一方面,由于金属表面氧化、接触压力不足等造成接地的壳体与金属异物之间接触不良,产生悬浮电位,产生悬浮放电;另一方面,由于壳体和金属异物模型与实物之间的差异造成电场畸变也会导致尖端局部放电增加,因此形成较明显的悬浮电位放电和不太明显的尖端放电的复合型式。

结束语

本文对可能影响126 kV GIS绝缘性能的四类小型金属体异物在母线气室内产生的电场影响作用进行了数值计算和试验验证,为GIS工程实际故障预判提供了理论支撑,得出结论如下。①GIS母线箱体内存存在四类金属异物时,异物周围的局部电场有明显增大,工频和雷电冲击均能满足要求,局部放电量会增大,但是由于这种放电只对局部SF₆分解,且由于SF₆具有自恢复性,未对绝缘材料产生永久损害,因此这种放电是自恢复的放电,短期内对GIS的整体绝缘性能影响不大,绝缘性能可控;②在以后的工程应用中,若出现工频耐压结果正常,但局部放电量较大,呈现明显悬浮电位放电或者混合有少量的尖端放电的情况时,可考虑是由小型金属体异物所致,可以通过X光透视该部位确定。

同时,若此时设备退出运行困难,或者工程项目急于送电的情况下,这种小型金属体异物引起的异常短期内不影响设备正常运行,无须立刻停电检修,可在选择在年检或者其他计划检修时进行拆箱检修。EA

(收稿日期:2020.07.05)

(编辑:朱金凤)