

[隔离开关]

基于ANSYS的一种小型化252 kV 隔离开关断口电场仿真分析

文/樊子健 龙红军 张路阳
河南平芝高压开关有限公司

设计一种小型化252 kV隔离开关，首先使用经验公式确定断口参数，在此基础上提出了一种小型化252 kV隔离开关的设计方案，然后使用ANSYS仿真软件的有限元电场分析模块对设计方案的三维模型断口进行仿真分析。依据仿真结果，可以为小型化隔离开关的断口设计提供数据支撑与优化方向。

随着社会经济持续发展，对电力的需求日益扩大。气体绝缘金属封闭开关设备（Gas Insulated Switchgear, GIS）作为电力系统的基础装备，其需求快速增加。国内252 kV GIS制造技术日趋成熟，目前制造厂商多达10余家，具有低耗能、长寿命、全寿命周期成本低、操作机构无油化（弹簧机构）、状态监测有效可靠、使用方便、开断容量高及通流能力强等特点。在顺应发展趋势的同时，研发小型化的隔离开关对GIS的结构与整体布置的简化具有重要意义。小型化隔离开关断口的电场分布均匀程度直接关系到隔离开关的绝缘性能，因此在小型化隔离开关的设计过程中对隔离断口的电场分析尤其重要。在高压电器的设计中，通常使用的电场计算方法为有限差分法、边界积分法、模拟电荷法及有限元法等。高压电器的设计中存在大量形状不规则区域，利用ANSYS软件的电场有限元分析模块，可以将复杂的区域剖分为一系列形状简单仅靠节点连接的网格，其内部的待求量通过选定的函数关系插值求解。求解的精度可以通过网格剖分的粗细进行控制，网格剖分得越细，计算结果越接近真实值。

本文首先介绍一种使用经验公式方法初步确定隔离断口关键参数的方法，在此基础上建立了一种小型

化252 kV隔离开关模型，然后使用ANSYS电场有限元分析模块对隔离断口进行两种实际运行工况的电场仿真分析，最终得到其电场分布，确定新结构满足电场设计需要，并从中汲取隔离开关断口的设计经验。

隔离断口设计

隔离断口结构主要包含动触点及其屏蔽、静触点及其屏蔽和壳体。依据国标要求，确定新设计252 kV小型化隔离开关的基本参数。详细介绍一种隔离断口经验公式的计算方法，初步确定隔离断口结构的关键参数。

1. 隔离开关基本参数

GB/T 7674—2020《额定电压72.5 kV及以上气体绝缘金属封闭开关设备》中对252 kV电压等级GIS优先选用的额定绝缘水平的要求见表1。

表1 252 kV GIS额定绝缘水平要求

额定电压 U_n /kV (有效值)	额定短时工频耐受电压 U_d /kV (有效值)		额定雷电冲击耐受电压 U_p /kV (峰值)	
	极对地、开关装置断口间及极间	隔离断口间	极对地、开关装置断口间及极间	隔离断口间
252	460	460 (+146)	1 050	1 050 (+206)

基金项目：252 kV混合气体隔离接地开关及套管研制项目（PGKJ2021-264）

以上述要求,作为此次新设计252 kV小型化隔离开关的绝缘性能参数。设备SF₆最低运行表压根据以往产品的设计经验,取0.45 MPa。

2. 断口开距计算方法

隔离开关断口开距与电压等级、SF₆气压(及对应的允许场强)和触点屏蔽设计(即断口电压分布的均匀性)有关。通常断口开距 l_k 为

$$l_k = K_6 K_{11a} \frac{U_s}{E_1} \quad (1)$$

式中, K_6 为设计裕度, $K_6=1.16$; K_{11a} 为隔离开关断口电压分布不均匀系数,查阅各电压等级断口电位分布不均匀系数表,252 kV隔离开关取1.45; U_s 为隔离开关断口雷电冲击耐受电压,单位为kV,根据此次设计需要,取1 050 kV; E_1 为允许雷电冲击场强值,单位为kV/mm。

允许雷电冲击场强值 E_1 的计算方法为:首先计算雷电冲击电压下50%击穿场强 $E_{50\%}$,单位为kV/mm,按下式计算

$$E_{50\%} = 63p + 2.4 \quad (2)$$

式中, p 为绝对气压,单位为MPa,根据此次设计的设备SF₆最低运行表压,取0.55。

一般取闪络概率为0.16%的场强值作为耐受场强,耐受电压与50%击穿电压两者之间的间隙为3 s,耐受场强 E_B 的计算值为

$$E_B = E_{50\%} (1 - 3\sigma) \quad (3)$$

雷电冲击与操作冲击的放电电压标准偏差相对值 $\sigma=0.05$ 。

考虑到产品制造的分散性和运行中的种种不利因素,雷电允许场强 E_1 的取值在 E_B 基础上还应留有裕度 K_1 ,表示为

$$E_1 = K_1 E_B \quad (4)$$

式中, K_1 为设计经验及制造经验数据, $K_1=0.85$ 。

代入数据,算出此次设计的设备SF₆最低运行表压下允许雷电冲击场强值 $E_1 \approx 26.8$ kV/mm,再将此值代入断口开距 l_k 的经验计算公式,求得断口开距 l_k 的初始设计值。

3. 触头屏蔽关键尺寸计算方法

为了缓和触头尖角、弹簧等件的电场,必须设计合理的触头屏蔽尺寸。设计的重点是取合适的 d_p 及 R 值,如图1所示,使触点间及触点对地间电场分布较均匀且最大场强值不超过限定允许值。

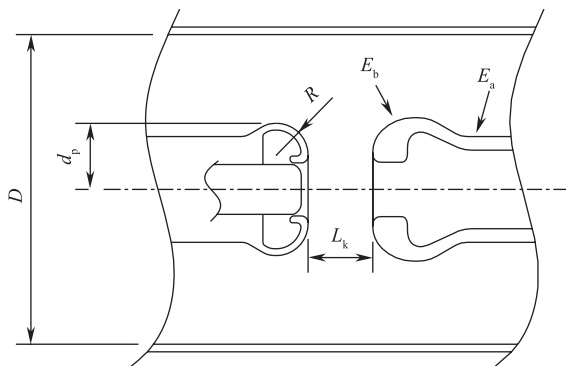


图1 隔离断口结构设计示意图

为了防止电弧漂移,将开断电弧可靠地限定在触头屏蔽之间,要求触头屏蔽直径为 d_p ,单位为mm,不能过小,按以下经验公式进行计算

$$d_p = (2 \sim 3) l_k \quad (5)$$

式中, l_k 为断口开距,单位为mm。

同时要求屏蔽端部圆角 R 有足够的曲率半径,使计算出的场强 E_b 限定在允许值之内,表达式为

$$E_b = E_a \left(4.9 - \frac{9 d_p}{4 D} \right) \left(\frac{200 R}{D} \right)^{-0.3} \quad (6)$$

式中, E_a 为屏蔽圆柱面上的计算场强,单位为kV/mm,按下式计算为

$$E_a = K_{11a} U_s / \left(\frac{D - d_p}{2} \right) \quad (7)$$

式中, K_{11a} 、 U_s 按前文取值; D 为隔离开关壳体内径,按下式计算为

$$U = K_{10} E_5 \frac{d_p}{2} \ln \frac{D}{d_p} \quad (8)$$

式中, U 为产品雷电冲击耐受电压,单位为kV,根据国标要求,252 kV隔离开关取1 050 kV; K_{10} 为卧式布置的开关壳体,考虑电弧分解物及金属粒子对绝缘的不利影响,取壳体直径放大系数 $K_{10}=0.8$,其余壳体取 $K_{10}=0.95 \sim 1.0$; E_5 为支撑绝缘件的壳体表面允许场强值,考虑到壳体表面粗糙度差异大、残留尖角毛刺的可能性大及运行出现金属微粒的可能性大,通常取14~16 kV/mm。 E_5 的取值越低,越有利于产品的安全运行。

将252 kV隔离开关设计的相关参数代入上述公式,完成触头屏蔽关键尺寸 d_p 及 R 值初始设计值的确定。

计算模型

新设计一种小型化252 kV隔离开关的方案模型，如图2所示。

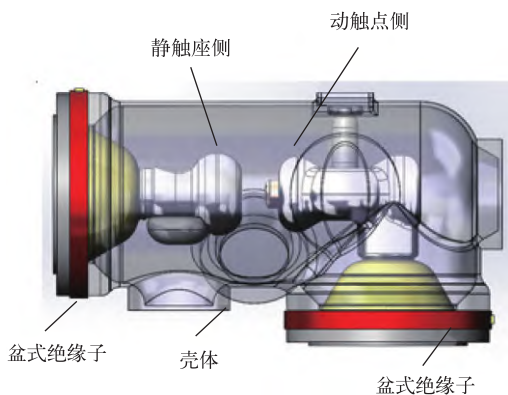


图2 一种小型化252 kV隔离开关的方案模型

此模型按照设计方案1:1等比例进行建模，用于ANSYS电场仿真计算。电场计算主要关注导体表面电场，在方案初设阶段只对隔离开关内部导体的轮廓按真实外形进行建模，导体内部结构（如触指、触点传动结构等）无须建模，直接将导体建成实心模型。这样处理的目的是在不影响电场仿真结果的前提下，降低模型的复杂程度，使计算前的参数设置更加简化，同时有利于ANSYS更高效地完成结构的电场计算。

电场仿真

使用ANSYS软件，分析两种工况下新设计252 kV小型化隔离开关的三维静电场。该软件可以用于计算由静态电荷分布和电压引起的静电问题，其仿真器利用直接求取的标量电位，自动计算出静电场密度，用户可以根据这些基本的场量求取电场值。在分析高压绝缘体、套管及静电设备中的电荷密度产生的电场时，静电场功能尤为适用。

静电场计算的基本原理简要如下：给需要仿真分析的导体施加一定的电压，分析出导体外表面的电场分布。气体隔离开关在进行三维静电场分析时，求解域内无自由电荷分布，满足轴对称电场的拉普拉斯方程为

$$\partial \left(\frac{r \partial \phi}{\partial r} \right) / r \partial r + \partial^2 \phi / \partial^2 Z = 0 \quad (9)$$

此次计算模型的动静触头边界条件为

$$\phi|_{S_1} = 252 \text{ kV} \quad (10)$$

$$\phi|_{S_2} = 0 \text{ kV} \quad (11)$$

中轴线处边界条件为

$$\frac{\partial \phi}{\partial n} \Big|_{S_3} = 0 \quad (12)$$

式中， S_1 为动触头边界； S_2 为静触头边界； S_3 为中轴线处边界。

采用麦克斯韦方程组对电场进行求解为

$$\nabla (\sigma \nabla \phi) = 0 \quad (13)$$

$$E = -\nabla \phi \quad (14)$$

$$J = \sigma E \quad (15)$$

式中， ϕ 为电位； J 为电流密度的矢量； E 为电场强度的矢量。

1. 计算参数设置

计算雷电冲击电压下模型分闸状态时断口的电场分布，判断隔离断口的绝缘性能是否满足设计需要。ANSYS软件需在计算前对模型的介电常数与施加电压进行设置。根据计算经验，绝缘盆的介电常数为6，SF₆的介电常数为1，壳体接地设置为零电位。根据GB/T 7674—2020《额定电压72.5 kV及以上气体绝缘金属封闭开关设备》，计算分闸状态时的两种工况见表2。

表2 电场工况

工况序号	电压值/kV	
	动触头侧导体	静触头侧导体
1	1 050	-206
2	-206	1 050

2. 网格剖分

网格剖分是ANSYS有限元仿真计算的重要环节。生成节点和单元的网格剖分过程包括3个步骤：定义单元属性、定义网格生成控制和生成网格。在最后一个步骤中，ANSYS提供多种待求解模型网格剖分的方法。对于形状不规则的隔离开关电场计算模型，选择四面体网格剖分方法（Tetrahedrons）。使用该方法的理由与优点为：

- 1) 任意体总可以使用四面体网格。
- 2) 可以快速自动生成，并适用于复杂几何。
- 3) 在关键区域容易使用曲度和近似尺寸功能自动化细化网格。
- 4) 可使用膨胀细化实体边界附近的网格（边界层识别）。

5) 有助于提高计算准确度和收敛性。

在确定适当的网格剖分方法后,需对网格的大小进行合理设置。网格剖分过大,会使计算结果产生较大偏差;网格剖分过小,虽然能够提升计算结果的准确度,但是会占用更多的计算机内存,耗费更多达到收敛准确度所需的计算时间,影响设计效率。综合考虑计算精度与计算时间,可以将高压导体剖分得较小,接地壳体剖分得较大,网格具体大小依据模型整体尺寸确定。针对模型计算结果中出现高电场的部位划分更小的网格,进一步提高计算结果的准确性。

复杂几何区域的网格单元会变扭曲。劣质的单元会导致不准确的计算结果,甚至在某些情况下导致无法计算出结果。有很多方法可以检查剖分完毕的网格质量,例如,一个重要的度量是单元畸变度。畸变度是单元相对于理想形状的扭曲的度量,是一个值在0(极好的)~1(无法接受的)之间的比例因子。在进行计算前检查模型网格剖分的单元畸变度,其值越接近0,计算结果越准确,否则需调整网格的大小,重新进行剖分。

依据网格剖分的要点,此次新设计的252 kV隔离开关模型整体剖分采用四面体网格,筒体内SF₆气体网格最大取10 mm,动静触头金属表面网格最大5 mm,细化后整体网格数量1 619 141,节点数量2 395 953,提高数值计算准确度,总体网格过渡平滑,网格质量较高,满足数值计算模型的要求,剖分结果如图3所示。

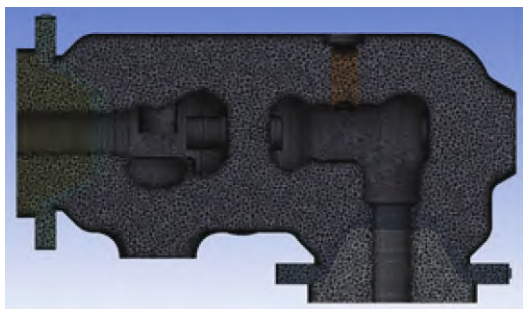


图3 网格剖分结果

3. 计算结果

工况1为对动触头施加1 050 kV的额定雷电冲击电压,对静触头施加-206 kV的峰值相电压,对壳体施加地电位,动触头侧与静触头侧电场计算结果如图4、图5所示。

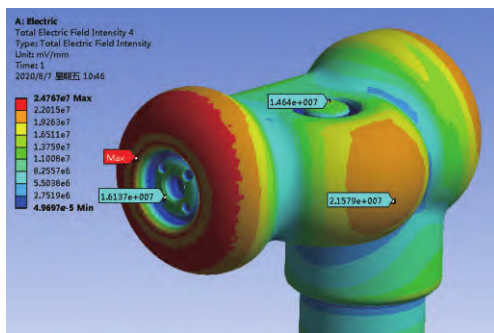


图4 动触头侧电场分布云图

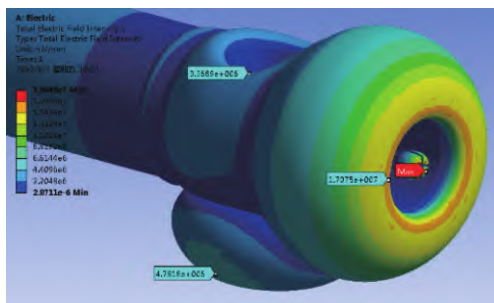


图5 静触头侧电场分布云图

工况2为对动触头施加-206 kV的额定雷电冲击电压,对静触头施加1 050 kV的峰值相电压,对壳体施加地电位,动触头侧与静触头侧电场计算结果如图6、图7所示,计算结果见表3。

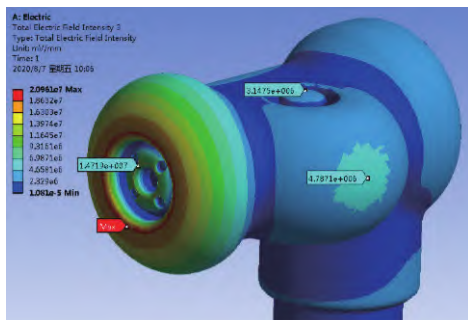


图6 动触头侧电场分布云图

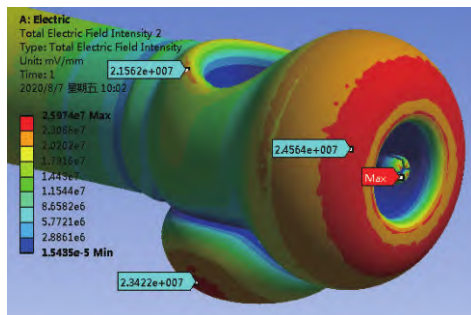


图7 静触头侧电场分布云图

表3 计算结果

工况序号	动触头侧/ (kV/mm)	静触座侧/ (kV/mm)	动触头侧 设计裕度	静触座侧 设计裕度
1	24.78	19.84	1.11	1.39
2	20.96	25.97	1.31	1.06

注：最低运行压力为0.45 MPa时，最大允许场强27.5 kV/mm。

计算结果分析：在同一工况下，由电场分布云图可知（红色越深的区域代表电场越高，蓝色越深的区域代表电场越低），隔离断口的动触头侧与静触头侧结构的不同，导致在施加电压后其表面电场分布不同。高电场区域均出现在高压侧导体屏蔽圆弧处。整个导体同种颜色所占面积较大，且不同颜色的色块过渡缓和，说明设计方案电场整体分布均匀，有利于隔离断口的绝缘。

在不同工况下，同一结构的电场分布云图截然不同，说明动触头侧与静触头侧施加正向与反向电压对电场分布影响很大。高压侧的电场最大值与高电场区域面积均大于低压侧，虽然动触头侧与静触头侧结构完全不同，但是两种工况下高压侧与低压侧电场的最大值相似，云图分布相似，且有着相近的绝缘裕度。

该方案的电场最大值出现在工况2的静触头侧，电场强度值为25.97 kV/mm，小于设备最低运行压力为0.45 MPa时的最大允许场强27.5 kV/mm，各部位设计满足绝缘要求。对于该方案断口施加反向电压、高压的一端设计裕度总是偏低的问题，可以通过适当增加断口开距、增大断口屏蔽圆角等方法，提高该断口方案的设计裕度。

结束语

本文设计了一种小型化252 kV隔离开关断口方案，在此基础上建立了完整的额定开断距离下隔离开关电场仿真计算模型。使用ANSYS有限元分析方法，得到了对动触头侧施加高电压，静触头侧施加低电压与动触点侧施加低电压，静触座侧施加高电压这两种工况下断口的电场分布与最大电场值，确认了该方案满足断口绝缘需要。结合该方案设计过程与仿真计算的结果，得出如下结论：

1) 隔离断口的屏蔽圆弧处电场分布较为集中，易产生电击穿。此处外形在以后气体绝缘隔离开关的设计与优化中应高度重视。

2) 断口施加正向或反向电压对动触头侧与静触

头侧的电场分布差异很大，两种工况下高压侧与低压侧的电场分布相似。

3) 隔离断口电场分布规律为：断口施加正向或反向电压，导体电场分布较均匀，由屏蔽圆弧处高电场区域向远离断口方向逐渐降低。

4) 经验公式有助于在设计之初高效地确定方案的关键尺寸。在确定初始方案后，使用ANSYS有限元分析法能够确定方案的绝缘薄弱位置，进行针对性的调整。

5) ANSYS有限元分析法能够有效处理不规则的电场求解域，适用于隔离开关的设计，充分实现了数值计算的作用，具有重要的实际意义。EA

(收稿日期：2022-08-23)

参考文献

- [1] 王春艳, 巫世晶, 王亚鸽, 等. 紧凑型252 kV GIS产品研发及单元化设计[J]. 高压电器, 2018, 54(10): 215-220.
- [2] 胡辉. 新型252 kV GIS产品设计理念及关键技术[J]. 电气技术, 2013(5): 103-104, 117.
- [3] 郑记玲. 252 kV GIS中隔离开关电弧模型的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [4] 崔洪舰, 陈国顺, 刘涛. 一种新型小型化252 kV GIS设备的研制[J]. 高压电器, 2014, 50(2): 105-108, 114.
- [5] 杨镇宁, 王廷华, 李春艳, 等. 基于静电场仿真分析的绝缘套管优化设计[J]. 电工电气, 2017(8): 31-34.
- [6] 周健, 郭世永, 王保光. 复杂模型的有限元分析方法[J]. 机械研究与应用, 2013, 26(3): 57-58.
- [7] 额定电压72.5kV及以上气体绝缘金属封闭开关设备: GB/T 7674—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [8] 黎斌. SF₆高压电器设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
- [9] 郑殿春. SF₆介电特性及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [10] 杨旭, 张长虹, 王奇, 等. 一种非轴对称结构的GIS双隔离开关气室电场优化设计及试验验证[J]. 电气应用, 2020, 39(6): 68-75.