

[开关设备]

36 kV气体绝缘负荷开关绝缘设计优化

文/ABB(中国)有限公司 涂占淑

结构小型化与高压绝缘水平的提高是高压开关设计中的重要组成部分，以36 kV SF₆负荷开关的绝缘设计为例，采用有限元分析软件对开关气室内部触头和灭弧栅等进行了设计优化，产品通过了IEC标准中36 kV开关的绝缘水平测试。

随着经济的发展，开关站对减小占地面积及对开关的可靠性要求越来越高，对金属封闭开关设备结构小型化要求日益明显。同时随着智能电网的发展，一二次融合，对封闭金属开关的绝缘设计提出了更高的要求，因此实现结构小型化和高压绝缘水平的提高是高压电器设计中的重要组成部分。

SF₆气体作为负荷开关设备中的绝缘和灭弧介质，对开关结构、电场均匀性十分敏感，其绝缘水平会因电场分布不均匀而急剧下降，对高压开关的触头结构等设计进行优化，改善其电场分布是影响其耐压水平的关键因素。

本文结合软件Proe simulation 和ABB绝缘分析模块TOOLBOX及实际测试，对某型额定电压为24 kV的SF₆绝缘负荷开关的绝缘设计进行分析，对开关的内部结构进行优化，使其提升到额定电压36 kV的绝缘水平。

现状

本文先对研究对象即额定电压为24 kV的SF₆负荷开关进行了高于产品本身的绝缘水平测试，通过观察窗直观上了解现有的开关产品的耐压极限水平、绝缘薄弱部位和主要放电路径，以便为产品升级设计提供改进的方向。

图1～图3为实际绝缘测试中抓取的部分放电

照片，高压施加在动触头侧（图中右侧），静触头侧（图1～图3中左侧）和开关壳体接地。

从照片来看，放电基本集中在高压对地之间，放电电压为140 kV左右，即动静触头为场强相对集中的区域。

图1的放电路径为动触头和壳体（接地）之间。中间灭弧栅为悬浮电位。

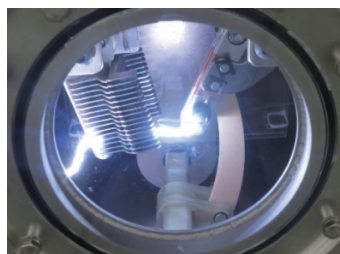


图1 动触头对金属壳体（地）放电

图2为动触头和下方的开关操作轴（接地）之间的放电。



图2 动触头对金属轴（地）放电

图3为断口间放电，金属壳体为悬浮电位。

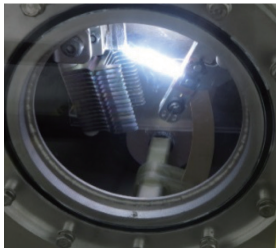


图3 断口间放电

根据IEC标准36 kV的绝缘要求，相间及对地的冲击耐压水平为170 kV，以上实际测试放电电压基本在140 kV上下，相差比较远，且放电呈现多样化，而箱体内部结构中存在动静触头、灭弧栅片、操作轴及相关互感器等，结构复杂，属于极不均匀电场类型。对此类绝缘问题的改进和提升，如果仅依靠经验和大量反复试验，不仅耗时久，且改进效果未必好。因此有必要先建立开关的模型，借助电场分析软件Proe和TOOLBOX进行分析和设计优化。

电场相关理论

由高斯定律得

$$\nabla E = \frac{\rho}{\varepsilon} \quad (1)$$

基于斯托克斯公式， $\nabla E = 0$ 则场域中各点的电场强度 E 可以由标量势梯度 V 表示为

$$E = -\nabla V \quad (2)$$

代入高斯定律中，可以得到泊松方程为

$$\nabla^2 V = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (3)$$

式中， Δ 为拉普拉斯算子； ρ 为电荷密度； ε 为介电常数。

对于场域中无电荷时可以简化为拉普拉斯方程 $\Delta^2 V = 0$ 。

在介质分界面上的边界条件为

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

边界条件包含以下两类。

第1类边界条件是给定边界上的值 $f_1(p)$ ($f_1(p)$ 是边界点 p 的函数或常数)。

第2类边界条件是给定边界上法向导数的值为

$$f_2(p) = \frac{\partial \varphi}{\partial n} \quad (5)$$

考虑在工频电压下，电位分布满足拉普拉斯

方程，则静电场的边值问题对应的变分问题就是求泛函的极小值

$$F(\varphi) = \int_V \frac{1}{2} (\varepsilon |\Delta \varphi|^2 - 2\rho \varphi) dV + \int_S \frac{1}{2} (f_1 \varphi^2 - f_1 \varphi) dS \quad (6)$$

式中， V 为 φ 的定义域； S 为定义域的闭合边界。

有限元法中，需将连续场域剖分成有限个数的单元，如在二维场中，常用三角形剖分，这样，式中的泛函的面积分表示成每个单元上面积分的综合，即有

$$F(\varphi) = \sum_{e=1}^{e_0} \int_{S_e} \frac{1}{2} \left\{ \varepsilon \left[\left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 \right] - 2\rho \varphi \right\} dx dy + \int_{l_2} \varepsilon \left(\frac{1}{2} f_1 \varphi^2 - f_1 \varphi \right) dl \quad (7)$$

式中， S_e 表示单元 e 的面积， e_0 表示场域由 e_0 个单元组成。

求 $F(\varphi)$ 的极限值，令其对每个节点电位的一阶偏导数为零，就可以得到联立线性代数方程组的矩阵形式为

$$[K][\varphi] = [0] \quad (8)$$

式中， $[K]$ 为刚度方阵； $[\varphi]$ 为节点电位组成的阵列。

利用边界条件，就可以求得每个节点的电位，进而得到电场强度、电荷密度和电流密度等物理量。

通过建立所要分析开关的三维模型，再用有限元计算软件便可方便地实现上述计算，得到所需要的电场强度等结果。

建立电场模型及设置仿真参数

1. 仿真模型简化

考虑到本次仿真的开关的三相是对称的，而且难点主要是相对地及隔离断口的绝缘问题，因此为了减少仿真节点数量，提高运算效率，选取开关中的A相进行仿真，这一相因为和机构箱有相关的交互连接，电场分布最复杂，选取这相进行仿真具有代表意义。

另外，本仿真只针对气室内部，所以气室外部的相关特征如伞裙绝缘子等也做了相应的简化以便提高仿真速度。

2. 参数设定

1) 材料属性根据产品的实际加工材料从材料库中选取，选取时注意确认材料的弹性模量和泊

松比。

2) 介电常数, 环氧树脂为4。

3) 设定电场物质为 SF_6 , 压力为开关的最低功能压力。

4) 施加电压根据IEC标准, 36 kV的开关雷电冲击耐受电压, 相间对地为170 kV, 隔离断口为195 kV。

电场分析及优化措施

图4为开关的简化模型, 经过材料属性, 边界条件定义后, 导入分析软件TOOLBOX绝缘分析模块后计算得到的结果, 和图1~图3的实际测试一样, 高压施加在动触头侧(图4中左侧), 电压值为170 kV, 右侧的静触头及壳体部分接地。

从图4中结果来看, 动触头顶端场强最高, 结合其电力线的走向等来看, 其可能的放电路径和实际结果(见图1~图3)也是吻合的。因此, 绝缘水平的提高, 重点还在改进刀触头等结构设计, 降低其局部场强。以下分别就动静触头、屏障采用和灭弧栅优化等介绍本次场强优化的措施。

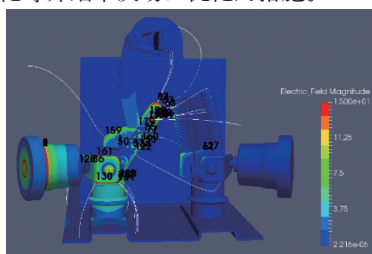


图4 开关总体结构

1. 动触头结构

从图5的动触头仿真结果来看, 其最高场强为22.4 kV/mm。刀触头的中间的狭缝倒角过小, 造成了其端部局部场强集中。

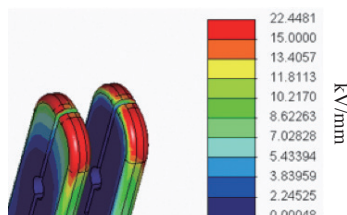


图5 优化前动触头场强

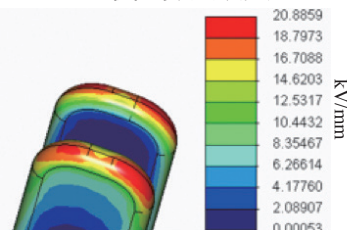


图6 优化后动触头场强

刀触头上的弹簧夹紧部件卡簧上的场强更是达到了25.5 kV/mm。如图7所示。这是典型的针状突起物, 当电极表面有针状突起物时, 电场分布可以归结为极不均匀, 因而很容易出现异常击穿现象, 通过进一步仿真还可以得出其起始放电电压为130 kV左右, 这与36 kV系统要求的170 kV的绝缘水平差距较大。

图6和图8是优化后的仿真结果, 通过取消针状结构和狭槽, 从仿真结果来看, 效果比较明显, 特别是通过改变卡簧设计, 大大降低了弹簧夹紧部位的电场强度。

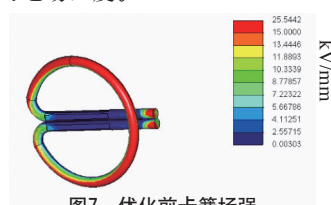


图7 优化前卡簧场强

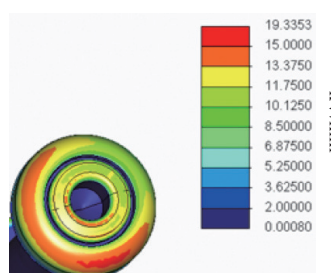


图8 优化后弹簧夹紧装置场强

2. 静触头结构

图9、图10为静触头侧施加170 kV的仿真结果, 可以看到静触头本身倒角很小, 局部场强为28.69 kV/mm。图11为优化后的结果, 局部场强降低为20.58左右。

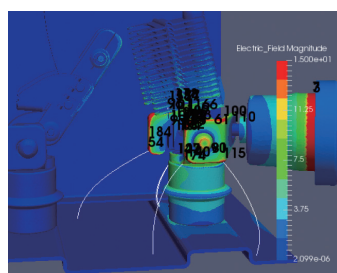


图9 静触头侧仿真结果

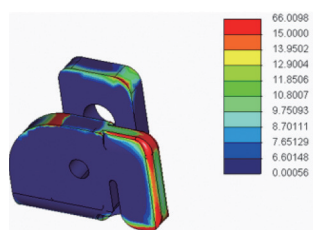


图10 静触头场强

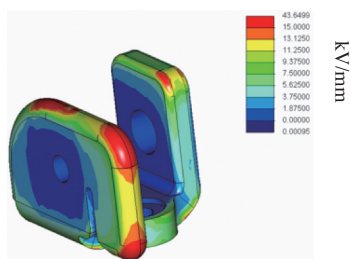


图11 静触头场强优化

下表列出了各触头表面的优化前后的场强变化情况。从表中可以看出，静触头和弹簧夹紧卡簧的表面的最大电场强度都有较大幅度的减小，尤其是优化后的弹簧夹紧部件，其变化率为39.5%，优化后的起始放电电压达到了175 kV。

表 优化前后触头表面的最大电场强度和起始放电电压

	优化前		优化后		变化率 (%)
	$E_{\max}$ (kV/mm)	起始放电 电压 /kV	$E_{\max}$ (kV/mm)	起始放电 电压 /kV	
动触头	22.45	122	20.89	128	6.9
卡簧	25.54	130	15.45	175	39.5
静触头	28.69	86	20.58	130	28.3

3. 屏障采用

在电场极不均匀的间隙中，通过放入薄片等固体绝缘材料，在一定条件下可以显著地提高间隙的击穿电压，屏障的作用在于屏障表面上聚集的空间电荷，使屏障与板电极之间形成比较均匀的电场，从而使得整个间隙的击穿电压提高。屏障应尽可能靠近尖电极，使比较均匀的电场区扩大。但屏障离尖电极过近的时候，屏障上的空间电荷的分布将变得不均匀而使屏障效应减弱，如图12所示，屏障的最佳位置约在 $d_1/d \approx 0.2$ 。 d_1 为屏障离尖电极的距离， d 为间隙。

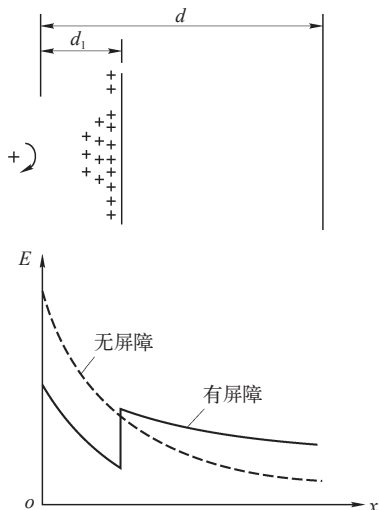


图12 针尖—板间隙中屏障作用示意

为减小本文中图1的放电，除了优化动静触头的电场分布，在灭弧栅壳体之间加入屏障，如图13所示。图13中项号1就是加入的聚碳酸酯绝缘板，很好地抑制了这一路径上的放电。类似的屏障采用也用在主轴上，通过热缩套对主轴的包覆，减少因为金属主轴的裸露，造成动触头在打开状态下对地的放电。

4. 灭弧栅结构优化

灭弧栅片是负荷开关内部的灭弧装置，由相互隔开一定距离的钢片组成，起到将弧切短、冷却以便快速灭弧的作用。这些钢片由塑料件支撑，本身是悬浮电位，场强很低。从本文图1实际测试的放电照片来看，动触头端部的高电场可以将其和壳体本身的间隙击穿形成放电通道。由图13可知，本文对灭弧栅片靠近动触头侧也进行了优化，端部增加了一个弯角，这样一方面增大了灭弧栅片 and 高压动触头的静距，同时进一步降低灭弧栅端部的电场强度；另一方面，增加折弯角后的灭弧栅片，也有利于弧停留在灭弧栅片内部，延长弧的逃逸时间，增强灭弧栅片的灭弧能力。

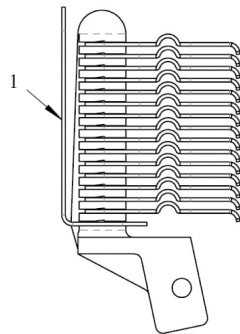


图13 灭弧栅

结束语

通过仿真软件Proe和TOOLBOX对原来24 kV的负荷开关气室内部的绝缘电场进行了仿真分析，对内部动静触头形状和结构等进行了优化设计，通过试验及方案筛选优化，设计最终通过了IEC 36 kV的型式试验。绝缘从原来的24 kV的设计提升到36 kV，绝缘设计还涉及内部断口距离和外部空气静距增大，绝缘子绝缘层及屏蔽层的优化等。

总之，利用计算仿真和实际测试数据分析相结合，可以少走弯路，避免开发初始阶段设计结构的缺陷，提高产品的研发效率，保证高压开关的小型化与高可靠性。EA

(收稿日期：2020.01.02)

(编辑：朱金凤)