

[开关设备]

GIS母线导体放电问题的分析和处理

文/特变电工中发上海高压开关有限公司 常 越 孟珍政 唐华超 汤 伟 魏俊梅

通过对一个工程实例GIS母线导体放电问题的分析，阐述了GIS零件在设计、加工和质量管控等多个方面需要注意的问题，以及零部件质量缺陷造成的不良影响，说明了GIS的质量控制是从设计、加工到管控一条龙的系统工程，为从事相关产品设计和管理人员提供一些借鉴。

近年来，由于气体绝缘金属封闭开关设备（GIS）具有体积小、输送容量大、可靠性高、损耗低和免维护等优点，日益受到各类电力用户的青睐，工程应用日益增多。对于GIS制造厂来说，其零部件的质量控制则是重中之重。

GIS母线放电导体放电描述

GIS母线属于高压电器，需要承受工作电压和各种过电压，具有较高的电场强度。GIS母线电场强度受导体形状、加工质量、粗糙度和清洁度等因素影响较大。GIS母线在工程生产上需要控制的环节较多，一旦其中一个环节出现问题，将导致放电的严重后果。国家标准明确规定了GIS出厂所需的各项验证试验。国家电网公司为确保产品质量，增加了GIS出厂绝缘试验需要进行正负极性各三次全电压的雷电冲击试验。

某550 kV GIS工程母线，导体在出厂的绝缘试验过程中，多次在雷电冲击试验时发生放电故障，对正常的GIS工程生产造成了极大的困扰。

故障现象及相关检查

2016年3~9月，公司某550 kV GIS母线出厂绝缘试验时多次发生放电问题，严重制约了公司生产进度。通过统计汇总及母线解体后复查，发现

放电位置有着高度的一致性，放电点均发生在L型母线导体上。问题导体如图1所示。



图1 问题导体

50%放电点发生在屏蔽罩螺栓把接孔口圆角R3部位，50%放电点出现在导体与屏蔽罩相邻的位置。技术人员及质检人员对发生问题的导体、屏蔽罩进行复检，重点检查导体、屏蔽罩的各尺寸及表面质量。通过检查发现3处明显问题：①屏蔽罩把接螺栓孔边沿R3倒角有楞，不符合图样圆滑过渡的要求；②球形导体与屏蔽罩配合不严，经检测证明是球形导体外轮廓的部分区域尺寸偏小或向内凹陷；③屏蔽罩、导体表面粗糙度偏低：R3处存在刀纹，导体表面打磨痕迹明显，有可见的打磨条纹。

设计结构及电场强度仿真分析及优化

1. 圆角不良问题的分析

孔口圆角 $R3$ 的质量不良是引发放电故障的首要原因， $R3$ 处本就是高场强区域，此处出现的棱边，进一步增大了该处场强，增加了对地放电的可能性。该处圆角为不规则形状，不能使用常规刀具进行加工，因此供应商采用的是手工加工，因此外观质量存在一定缺陷。质量管控人员说服供应商，优化圆角加工方式，采用成型刀具加工。特殊磨制的成型刀具加工效果良好，从源头上杜绝了棱边的产生，大幅优化了圆角处的电场情况。

2. 原结构的电场分析

为了进一步澄清问题的机理，技术人员对放电部位的导体、屏蔽罩在试验电压下的电场强度进行了有限元数值仿真，计算结果如图2所示。

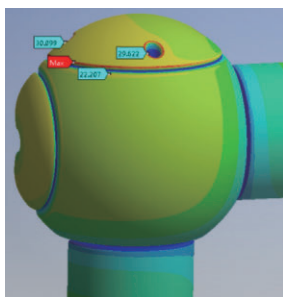


图2 原结构电场仿真结果

从电场仿真计算结果得知，该结构的孔口倒角处场强最高，达到了30.98 kV/mm。原因是：①该处圆角仅为 $R3$ ，相对偏小；②该孔的位置在象限点处，距离壳体距离相对较近；③孔口附近就是屏蔽罩与导体配合处的间隙，本身场强就偏高。

3. 优化结构的电场强度分析

根据前述原因，技术人员对设计结构进行了针对性的优化，优化后的电场强度仿真结果如图3所示，最大电场强度降至27.56 kV/mm。其中，孔口位置旋转 45° ，拉大了导体与壳体表面的距离，孔分布圆直径减小，进一步增大了对地距离。

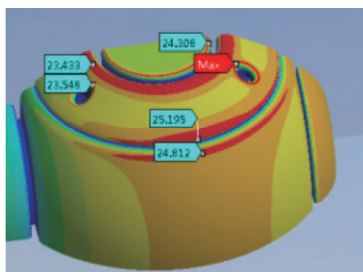


图3 优化结构电场仿真结果

4. 球形导体外形缺陷的分析

球形导体为铸造结构，其形状缺陷与铸造关系密切。与供应商进行沟通，导体表面并未过度打磨，因此形状缺陷应在铸造的浇注过程就已形成。与供应商就导体的铸造工艺和模具进行进一步沟通，了解到发生形状缺陷的位置与浇口距离很近，浇注成形后，由于补缩效应，浇口附近的材料形变明显高于其他部位。因此技术人员要求供应商改变浇口位置，移动到低场强区域。之后供货的导体重点区域形状缺陷基本消除。

5. 球形导体表面粗糙度偏低问题的分析

球形导体完成铸造后表面需要打磨清理，因此打磨的质量直接决定了导体的表面粗糙度。

经过对供应商打磨工序的检查，发现供应商使用的角磨机配置的是硬质砂轮，打磨痕迹较深，不利于降低表面粗糙度。为此，技术人员要求供应商更换软质砂轮。经过此项工艺改进，导体的表面粗糙度大幅降低， R_a 值达到 $1.6 \sim 2.3 \mu\text{m}$ 的水平，肉眼观察十分光亮。改进工艺后的导体如图4所示。



图4 改进打磨工艺后的导体

结束语

经过以上一系列优化和改进，屏蔽罩的 $R3$ 处的电场由30.98 kV/mm降低为27.56 kV/mm。通过打磨工艺和铸造工艺的改进，球形导体的表面质量和形状精度得到了有效的提高。球形导体的高场强区域的形状也更加符合图样要求，有效保证了屏蔽导体和屏蔽罩之间的间隙。同时，装配过程中尽可能地提高了母线的内部清洁度和气体纯度，采用烘干吸附等方式降低试验用气体的水分，提高了系统的绝缘强度。经过多种方法的改进和优化，母线整体绝缘性能大幅提高。在之后的出厂试验中，该问题得到了有效的解决。EA

(收稿日期：2020.07.01)

(编辑：朱金凤)