

一起220 kV GIS内部微粒放电引起母线跳闸的原因分析

通过分析一起220 kV GIS内部放电击穿而导致母线短路跳闸的故障案例，描述了结合SF₆气体成分分析GIS故障的判断方法，并通过故障气室的解体检查，确认了该气室放电故障由金属微粒引起，分析了放电路径及跳闸原因。

肖 华 刘圣辉/国网四川省电力公司检修公司



肖 华/工程师

GIS具有结构紧凑、绝缘性能良好和维护量小等优点，在如今的电网建设中被广泛采用。但正因为GIS结构紧凑，导致其内部空间极为有限，工作场强很高且绝缘裕度相对较小，一旦出现因安装工艺不良、安全环境较差等极易造成设备故障，给GIS的使用带来了安全隐患。某500 kV变电站220 kV GIS在2013年9月投运时，其中1个PT间隔隔离开关气室出现闪络击穿故障，导致母线差动保护动作跳开了母线及线路开关^[1-3]。本文对这次停电事故的过程、现场调查解体过程和事故原因进行了分析，并提出预防GIS设备故障的建议。

故障情况

2013年，某500 kV变电站220 kV GIS在完成了SF₆气体压力、微水量、泄漏量和气体纯度检测及SF₆密度继电器校验、耐压试验等合格后于9月投运。在带电运行10 h后出现220 kV 母线1号保护PCS-915GC、2号保护CSC-150D差动保护动作，220kV II母线上212、266开关三相跳闸，故障选相A相，初步判断为220 kV II母线A相接地故障，母线保护正确动作；220 kV母线1号保护故障差流为3.41 A，220 kV母线2号保护故障差流为

2.62 A。在接到故障报告后，试验人员快速赶到该站对故障母线及相关气室进行了微水试验和SF₆气体成分分析试验。试验数据如表1、表2所示。

表1 微水测量值

序号	气室名	测量值	交接值
1	228隔离开关气室	85	80
2	228隔离开关旁支气室	93	88
3	II 母线气室	81	75

表2 SF₆气体成分分析测量值

序号	气室名	气体名称	测量值/(μL/L)
1	228隔离开关气室	SO ₂ +SOF ₂	167.4
		H ₂ S	0
		HF	0
		CO	27
2	228隔离开关旁支气室	SO ₂ +SOF ₂	0.1
		H ₂ S	0
		HF	0
		CO	0
3	II 母线气室	SO ₂ +SOF ₂	0
		H ₂ S	0
		HF	0
		CO	0

表1中，3个气室的微水含量均接近于交接试验值，且在GIS气室微水含量标准范围内，排除了气室受潮引起放电导致母线跳闸的可能。

SF₆气体分解机理很复杂，国内外已有大量研究。据多年的检测数据表明，SF₆电气设备中断路器、隔离开关（灭弧室、均压环完好情况下）正常开断时几乎不会产生分解产物，亦不会与其他材料发生反应。当SF₆电气设备内部存在故障时，故障区域的SF₆气体和固体绝缘

关键词/Keywords

SF₆ ·
跳闸 ·
分解产物 ·
内部微粒 ·

材料在热和电的作用下将裂解产生 SO_2 、 SOF_2 、 SO_2F_2 、 H_2S 、 CO 、 CO_2 、 H_2 、 CF_4 和 C_3F_8 等特征组分,分解产物的种类及含量与故障的类型、位置及程度有直接关系^[4-6], SF_6 气体在电弧作用下的分解反应示意图如图1所示。 SO_2 是放电或高温过热(500℃以上)的代表产物。目前一般认为, SO_2 浓度超过1 $\mu\text{L/L}$,即表示设备内可能存在放电或高温过热的故障。特别是不存在放电现象的非灭弧气室,理论上是不应该有 SO_2 存在的。有机绝缘材料的裂解,会释放出 CO 、 CO_2 等气体^[7-8]。

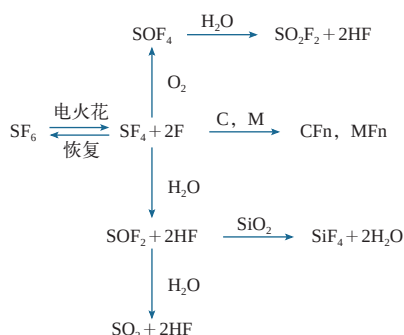


图1 SF_6 气体在电弧作用下的分解反应示意图

从表2中可以看出,Ⅱ母线PT间隔隔离开关气室 SF_6 气体成分异常, SO_2 、 SOF_2 气体分解物含量较其他气室高,达到167.4 $\mu\text{L/L}$,远远超过1 $\mu\text{L/L}$,根据分解产物测量值初步判断该隔离开关气室有放电或高温过热的现象,异常出现于Ⅱ母线PT间隔A相隔离开关—接地开关气室,如图2所示。打开A相气室人孔盖,发现在该气室内有大量白色粉末物,如图3所示。

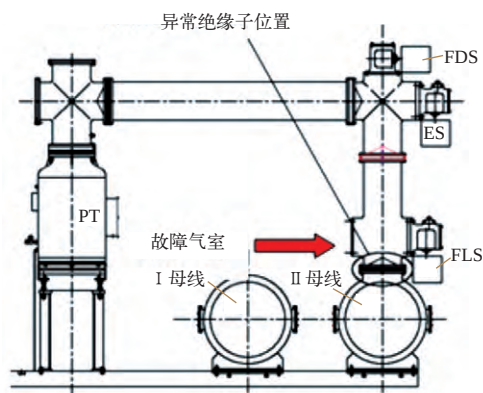


图2 异常绝缘子位置图



图3 故障气室内部实物图

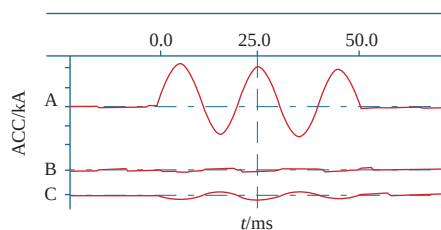
将该故障气室进行解体检查。解体前查看接地隔离开关处于分闸位置。拆查发现,Ⅱ母线PT间隔A相隔离开关与母线气室盆式绝缘子上表面灼伤发黑,绝缘材料分解粉尘弥漫,母线接地开关A相触座表面有明显烧蚀痕迹,接地开关动、静触头和壳体内表面有烧蚀。

检查接地隔离开关的动、静触头,发现动、静触头的端部被高温电弧喷溅物污染。将接地隔离开关手摇至分闸位置后,发现很长一段导电杆仍光洁,未受到高温电弧喷溅。整个动触头未发现起弧及灼烧痕迹。这表明事故时的接地隔离开关处于分闸到位状态。

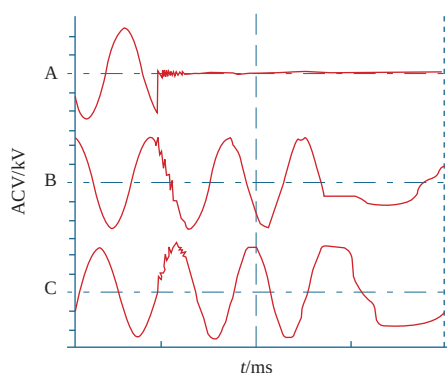
原因分析

根据现场故障录波情况看,未出现过电压,220 kV母线故障前差流为0 A,故障时220 kV母线1号保护故障差流为3.41 A,220 kV母线2号保护故障差流为2.62 A,排除因操作或雷击过电压引起的A相跳闸故障。图4为故障时的电压及保护动作电流,显示母线跳闸的原因是由于有单相短路接地引起过电流导致的母线差动保护动作。

结合故障发生的过程、 SF_6 分解产物测试结果以及解体检查可知,此次放电为气室内盆式绝缘



(a) 保护动作电流



(b) II 母线电压

图4 故障录波波形图

子沿面闪络。放电点已在图5中用圆圈示出，放电点发生放电后在电弧的作用下盆式绝缘子表面被烧黑，且绝缘子内壁（地电位）对导电杆放电，在击穿放电过程中金属蒸汽离子迅速上升，弧根向上漂移，如图5中箭头所示，导致接地开关动、静触头接触处发生放电击穿，产生烧蚀。图5中的GIS内部结构对应到图2为箭头所指部分，放电的



(a) 动触头燃弧痕迹



(b) 燃弧路径

图5 故障盆式绝缘子的燃弧痕迹

盆式绝缘子为图2中圈出的异常绝缘子位置。

查阅该气室的出厂资料及交接资料，肯定该气室经过了耐压、局部放电在内所有出厂试验并均符合试验规程要求，且现场安装完成后再次进行并通过了耐压试验。结合该气室解体后检查分析，认为放电原因可能为母线接地开关A相内部某个零件上可能存在细小且分散的金属颗粒，安装时未能发现，耐压试验过程中微粒积累还未到引起电场畸变的程度，所以通过了耐用试验。在运输过程、现场操作和充气过程中，受到气流和震动的影响，掉落到气室下部的绝缘盆上。由文献[9]可知，当微粒在接地外壳内侧时高压导体和接地外壳的电场强度明显高于微粒在高压导体上时，高压导体和接地外壳间的场强差异不大，且两种情况下电场强度最大值和最小值均在固定微粒处。在运行中电场的作用下，金属颗粒在绝缘子表面振动、集聚，最终形成局部放电，并由于电荷的累积效应，破坏了盆式绝缘子表面原有的电场分布，影响了电场的均匀性能，形成自持性放电，使盆式绝缘子表面发生贯穿性放电，导致沿面闪络。在电弧的作用下，绝缘子表面被烧黑，外壳及一次导体被烧蚀^[10-11]。

结束语

1) 检测SF₆气体分解产物是初步发现和分析GIS设备故障的有效手段，可利用SF₆气体分解产物检测数据对GIS设备内放电类型进行定性分析。

2) 开展GIS现场局部放电检测技术，及时发现GIS内部的局部放电现象并进行处理，避免局部放电继续发展导致击穿等故障，引起设备损坏，影响电网安全。

3) GIS的装配、安装过程对环境的要求很高，固体金属微粒、灰尘和脏污等常常会引起局部电场畸变，可能导致GIS某部位发生局部放电，通过电荷的累积效应，发展为沿面闪络、电弧放电等，引起SF₆气体间隙放电击穿故障。所以在装配和安装过程中应严格执行安装工艺标准，加强监督和管理，并按规程进行耐压试验和局部放电试验。

(下转第91页)

- [4] 栗文义, 王银莎, 郭鑫, 等. 基于well-being 模型的风力发电系统可靠性评估 [J]. 华东电力, 2011, 39 (7) : 1062-1065.
- [5] 周明, 冉瑞江, 李庚银, 等. 风电并网系统可用输电能力的评估 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (22) : 14-21.
- [6] 孙元章, 程林, 刘海涛. 基于实时运行状态的电力系统运行可靠性评估 [J]. 电网技术, 2005, 29 (15) : 6-12.
- [7] 汪兴强, 丁明, 韩平平. 互联电力系统可靠性评估的改进等效模型 [J]. 电工技术学报, 2011, 26 (9) : 201-207.
- [8] 何剑, 程林, 孙元章, 等. 条件相依的输变电设备短期可靠性模型 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (7) : 39-46.
- [9] 孙元章, 刘海涛, 程林, 等. 运行可靠性在线短期评估方案 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (3) : 4-8.
- [10] 刘海涛, 程林, 孙元章, 等. 基于实时运行条件的元件停运因素分析与故障率建模 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (7) : 6-11.
- [11] 孙荣富, 程林, 孙元章, 等. 基于恶劣气候条件的故障率建模及电网充裕度评估 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33 (13) : 7-12.
- [12] 林智敏, 林韩, 温步瀛. 天气条件相依失效模型的电力系统可靠性评估 [J]. 华东电力, 2008, 36 (1) : 81-84.
- [13] 刘洋, 周家启. 计及气候因素的大电力系统可靠性评估 [J]. 电力自动化设备, 2003, 23 (9) : 60-62.
- [14] 邱威, 张建华, 刘念, 等. 计及运行风险的多目标发电优化调度 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32 (22) : 64-72.
- [15] 丁明, 戴仁昶. 影响输电网可靠性的气候条件模拟 [J]. 电力系统自动化, 1997, 21 (1) : 18-20.
- [16] 林韩. 电网防灾减灾应急管理系统建设与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
- (收稿日期: 2014-05-14) EA

(上接第78页)

参考文献

- [1] 陈家斌. SF₆断路器实用技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [2] 罗学琛. SF₆气体绝缘金属封闭开关设备 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [3] 谢衍文. SF₆气体绝缘全封闭组合电器事故后的检修 [J]. 电力安全技术, 2003 (6) : 5-6.
- [4] 郭伟. 气体分解产物应用于SF₆电气设备故障查找的分析 [J]. 绝缘材料, 2012, 45 (4) : 69-72.
- [5] 张晓星, 姚尧, 唐炬, 等. SF₆放电分解气体组分分析的现状和发展 [J]. 高电压技术, 2008 (4) : 37-42, 120.
- [6] 葛猛, 陶安培. 一起SF₆封闭式组合电器故障的原因分析 [J]. 高压电器, 2008, 44 (1) : 95-96.
- [7] 季严松, 王承玉, 杨韧, 等. SF₆气体分解产物检测技术及其在GIS设备故障诊断中的应用 [J]. 高压电器, 2011, 47 (2) : 100-103.
- [8] 杨俊坤, 彭詠涛, 谭向宇, 等. GIS设备中通过SF₆气体分解产物检测判定放电类型的研究 [J]. 绝缘材料, 2012, 45 (2) : 61-64.
- [9] 陈文会, 李忠, 景占荣, 等. 基于有限元法的含固定微粒的GIS静电场分析 [J]. 高电压技术, 2006, 32 (1) : 16-17, 31.
- [10] 徐世山, 孟可风, 刘文泉. 一起363 kV GIS充电网络故障的原因分析 [J]. 高压电器, 2007, 43 (1) : 74-76.
- [11] 李国兴, 姜子秋, 王晓丹. SF₆分解产物体积分数检测在SF₆电气设备故障诊断中的应用 [J]. 高压电器, 2011, 7 (12) : 104-107.
- (收稿日期: 2014-05-06) EA