

某 500 kV 组合电器断路器分闸不到位 故障发现及分析

张仕民 李卫伟 杨 洋 时士峰 蔡英俊 陈安明 岳小斌 李 坚 周 旭 卢贵有
(国网四川省电力公司检修公司 四川 成都 610041)

摘 要: 介绍了一起 500 kV 组合电器断路器分闸不到位的故障。通过 SF₆ 分解产物测试发现其内部没有击穿现象发生,而 X 光检测发现该断路器在机械显示分闸的情况下实际处于合闸状态。后对该故障断路器进行返厂解体,发现连接断路器主传动杆的连接臂金属断裂。通过对连接臂金属的各种检测分析(包括成分分析、金相及显微分析、断口分析)结果以及对连接臂金属臂断裂部分的外观检查,综合分析认为由加工工艺质量缺陷产生连接臂连接孔位置的凸楞是造成本次缺陷的根本原因。

关键词: 组合电器; 断路器; 分闸不到位; X 光检测; 连接臂; SF₆ 分解产物; 凸楞

中图分类号: TM561 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2020)01-0067-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.01.014

Analysis on Opening Failure of A 500 kV GIS Breaker

Zhang Shimin, Li Weiwei, Yang Yang, Shi Shifeng, Cai Yingjun, Chen Anming,
Yue Xiaobin, Li Jian, Zhou Xu, Lu Guiyou
(State Grid Sichuan Maintenance Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: An opening failure of a 500 kV GIS breaker is introduced. Through testing SF₆ decomposition products, no discharge breakdown is found in the breaker. Through X-ray detection, it is found that the breaker is actually in opening status. The metal fracture is found in the inner connecting arm after the disassembly of the faulted breaker. Based on the various metal tests of the connecting arm and the visual inspection of the fracture position, the corrugations in the connecting hole due to the manufacturing defects is the root cause for the opening failure of the breaker through comprehensive analysis.

Key words: GIS; breaker; opening failure; X-ray detection; connecting arm; SF₆ decomposition products; corrugation

0 引 言

四川某 500 kV 变电站某主变压器年检完成后,运行维护人员开始进行该主变压器送电操作。运行维护人员首先对该主变压器 500 kV 侧电气相连的某 500 kV 组合电器断路器及隔离开关开始倒闸操作。送电操作时,运行维护人员将该组合电器断路器两侧隔离开关合闸后,在该断路器三相机机械显示尚处于分闸状态(即该断路器尚未进行合闸操作)的情况下,与该断路器电气相连的主变压器突发空载励磁异响,主变压器 500 kV 侧引流线、CVT、避雷器表面都有明显的电晕放电现象;同时,主变压器及该组合电器断路器保护装置发出交流 PT 断线

告警,监控后台显示:该组合电器断路器 C 相存在交流电压波形,主变压器高压侧 C 相存在 60 V 左右的相电压。将该组合电器断路器两侧隔离开关分闸后,以上现象消失。

1 断路器故障的初步分析

在该组合电器断路器机械显示尚处于分闸状态(见图 1)的情况下,仅将其两侧隔离开关合闸后,就出现以上现象,这说明该组合电器断路器 C 相内部出现了显而易见的缺陷。出现缺陷的可能原因有:一是该组合电器断路器 C 相内部出现绝缘击穿现象,导致两侧隔离开关合上后主变压器就带电;二是该断路器 C 相内部存在分闸不到位的故障,该断路

器实际上并不是处于分闸状态,而是处于合闸状态,或者说该断路器 C 相的分合闸机械显示并不真实,尽管显示的是分闸状态,但内部可能处于合闸状态。为判断第一种原因是否成立,应开展 SF_6 气体试验^[1-15];而为判断第二种原因是否成立,应对该组合电器断路器动静触头状态开展 X 光检测^[16-20]。



图 1 组合电器断路器 C 相机械显示(分闸状态)

2 断路器故障的诊断试验

2.1 SF_6 气体试验及分析

为验证第 1 种导致缺陷的可能原因是否成立,在事故发生后,立即对该组合电器 C 相断路器、隔离开关气室开展了 SF_6 气体试验,试验数据无异常。

在故障发生 24 h 后,再次对该组合电器 C 相断路器、隔离开关气室开展了 SF_6 气体试验,试验数据依然无异常。

两次气体试验结果见表 1。

表 1 故障组合电器断路器 C 相 SF_6 气体试验结果

设备名称	20 ℃ 气体湿度 /($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$)	纯度 /%	CO	SO ₂	结论
5012 断路器	83.5	99.99	19.7	0	合格
50121 隔离开关	70.5	99.99	22	0	合格
50122 隔离开关	91.5	99.96	31.6	0	合格
5012 断路器	59.8	99.99	20.3	0	合格
50121 隔离开关	85.8	99.99	20	0	合格
50122 隔离开关	59.7	99.97	30	0	合格

气体分解产物试验无异常说明该断路器 C 相在主变压器送电操作时灭弧室内部应当没有大电弧现象,也没有发生内部放电现象、闪络现象、绝缘击穿现象。如果该组合电器断路器内部发生了放电故障,在放电的作用下,内部 SF_6 气体将会发生分解,

放电的主要分解产物是 SOF_2 (氟化亚硫酸), SOF_2 水解生成 SO_2 和 HF ^[1-15]。 SF_6 气体分解产物检测具有受外界环境干扰小、灵敏度高、准确性好等优点^[1-15]。然而两次 SF_6 气体试验都没有检测到任何 SO_2 分解产物成分,这说明该组合电器断路器内部没有发生任何放电故障,这样就排除了在运行维护人员倒闸操作合两侧倒闸过程中该组合电器断路器内部放电击穿导致主变压器带电的可能。

2.2 X 光检测

为验证第 2 种导致缺陷的可能原因是否成立,对该故障组合电器断路器动静触头状态开展 X 光检测。

组合电器断路器的外壳使用的是铝合金材料,通过 X 光检测透过铝合金外壳材料探知组合电器内部状态是近年来发展起来的一种带电检测手段^[16-20],可以在不拆卸、不解体、不破坏组合电器断路器的情况下高效、准确地检测其内部状态。

1895 年伦琴发现了 X 射线,后来 X 射线技术得到了广泛的工业应用^[16-20]。20 世纪 70 年代以来开始了对 X 射线数字化成像的研究;20 世纪 70 年代末至 80 年代中期开发了 X 射线计算机数字摄影技术(X-ray computed radiography, X-CR);20 世纪 90 年代中期,出现了直接数字 X 射线摄影技术(X-ray digital radiography, X-DR)^[16-20]。CR 与 DR 成像技术是目前应用最广泛的两种技术,其原理如图 2 所示^[16-20]。

X-CR 技术是将 X 射线透过工件后的残留量透照在成像板上,成像板会记录下来,再通过扫描装置读取,最后由计算机生成数值化图像的技术^[16-20]。而在 X-CR 技术基础上发展起来的 X-DR 技术是利用电子技术将 X 射线透过工件后的信息转化为数字化电子载体的 X 射线成像方法^[16-20]。本次 X 光检测采用的就是 X-DR 技术。

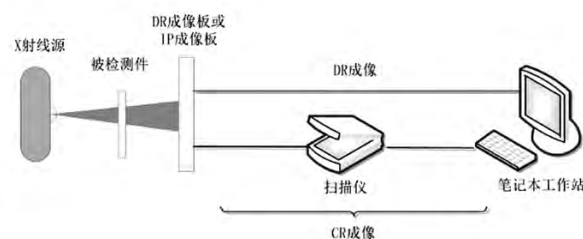


图 2 X 射线 CR 及 DR 检测技术^[16-20]

通过 X 光检测发现的三相灭弧室动静触头状态对比如图 3。通过图 3 的 X 光检测图像对比分

析,可以清晰地发现,该故障断路器 C 相灭弧室动静触头实际上处于合闸状态,这与分合闸机械指示完全不符,或者说出现了分闸不到位的缺陷。而该断路器 A 相、B 相灭弧室动静触头如图 3 所示都处于分闸状态,与分合闸机械指示相符。



A 相灭弧室动静触头状态 (分闸)



B 相灭弧室动静触头状态 (分闸)



C 相灭弧室动静触头状态 (合闸)

图 3 故障断路器三相灭弧室动静触头状态对比

3 故障断路器解体检查

初步判断 C 相故障断路器绝缘拉杆与连接臂之间发生了脱扣或断裂现象。将该故障断路器返厂进行解体。将故障断路器灭弧室从罐体内部整体取出,发现断路器灭弧室连接臂端头连接孔部位断裂,如图 4 所示。

将灭弧室进一步解体,将连接臂取出,取出的连接臂断裂状态如图 5 所示。然后将连接臂断裂部分进行拼接,拼接状态见图 6。断裂的连接臂与完好的连接臂对比如图 7 所示,在图 7 中,左侧的是完好的连接臂,右侧的是断裂的连接臂。

与该断裂连接臂相连的断路器主传动杆如图 8 所示,正是该主传动杆连接着断路器主绝缘拉杆和两个断口间的分绝缘拉杆。对于正常的断路器



图 4 连接臂装配状态



图 5 断裂的连接臂



图 6 断裂的连接臂碎片拼接

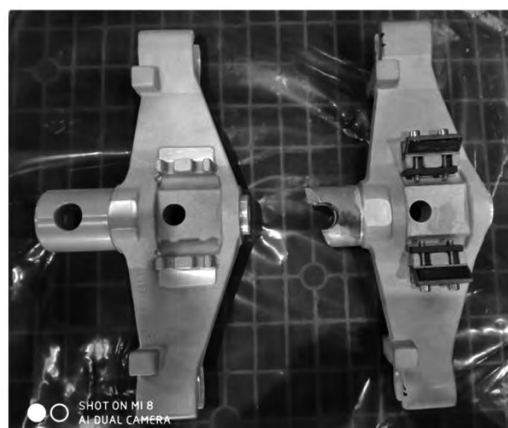


图 7 完好连接臂与断裂连接臂对比情况
而言,该连接臂被装配入主传动杆上部的金属空心部分,并将二者孔洞对准,通过插入二者孔洞的金属



图8 与故障连接臂相连的主传动杆

销子固定连接在一起。然而该连接臂的断裂直接导致主传动杆脱落,从而造成绝缘拉杆脱落及分闸不到位。

4 连接臂金属的检测情况

解体后,委托第三方对断裂的连接臂金属进行检测,检测项目包括:成分分析、金相及显微分析、断口分析。通过这三项检测没有发现任何金属材质质量缺陷,这说明造成该故障的根本原因不是金属材质质量缺陷。

4.1 成分分析

通过成分检测,样品组成为:基体 Al,中量 Si,少量 Mg、Fe,微量 Cu、Mn、Zn,质量分数占比情况为:Si 9.18%、Mg 0.26%、Fe 0.23%、Cu 0.019%、Mn 0.030%、Zn 0.023%。连接臂成分及比例符合标准要求。

4.2 断口分析

通过对样品断口进行微观形貌查看,显示该连接臂断口组织细密,无低倍组织缺陷,均为韧窝断口及少量解理断口,为正常铸硅铝合金断口。

4.3 金相组织纤维分析

对样品金相组织显微查看,检测结果如下:

变质显微组织特征显示 α 枝晶与共晶体分布均匀,共晶硅为点状或蠕虫状,变质正常,如图9。

过烧显微组织特征显示共晶硅边角已圆滑,但不聚集长大,为正常组织,如图10。

5 连接臂断裂的根本原因分析

对断裂的连接臂送交第三方检测,连接臂成分、断口、金相检测结果正常,这说明连接臂自身金属材

质无质量问题,连接臂断裂故障的根本原因不是金属材质缺陷。

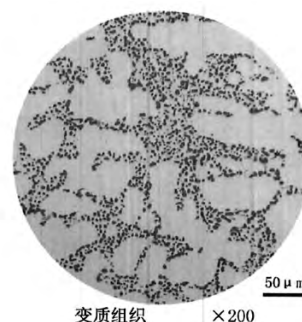


图9 变质显微组织检测结果

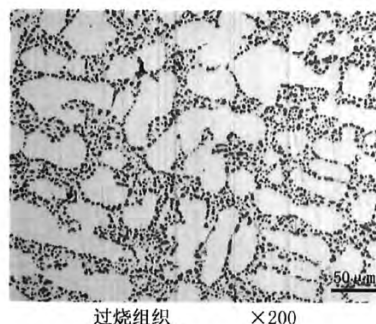


图10 过烧显微组织检测结果



图11 连接臂连接孔断裂位置凸楞

对故障断路器解体检查中发现灭弧室连接臂端头部位断裂部位的连接孔表面(断裂位置)有一条明显的凸楞,如图11所示,凸楞表面已挤压摩擦变亮。而同类结构的连接臂连接孔表面圆滑,无凸楞现象。

综合分析该连接臂断裂的根本原因为:连接臂在生产加工环节存在加工工艺质量缺陷,使得连接臂连接孔局部残存有一条凸起的楞。连接臂组装到产品上后,随着断路器厂内及现场分合闸操作,连接臂凸楞部位受到很强的挤压应力作用,使连接臂受力严重不均,最终造成连接臂断裂,从而导致主传动杆、绝缘拉杆无法传动以及断路器失去分合闸功能,最终发生断路器分闸不到位的故障。

6 结 语

在某主变压器本体及三侧年检完成后进行送电操作的过程中发现了与该主变压器直接电气相连的组合电器断路器 C 相分闸不到位的缺陷。故障发生后对该断路器 C 相进行了气体试验、X 光试验。通过 X 光检测,发现该断路器 C 相出现了分闸不到位的缺陷,其灭弧室动静触头实际处于合闸状态,这与分合闸机械指示完全不符。正因为其处于合闸状态,所以仅将该断路器两侧隔离开关合闸后,就会立即出现主变压器带电的情形。由于断路器内部没有电弧现象、放电现象,断路器内部气体也就没有分解物产生,SF₆分解产物测试结果为合格。

后对该故障断路器进行返厂解体,发现连接断路器主传动杆的连接臂金属断裂。综合对连接臂金属的各种检测分析(包括成分分析、金相及显微分析、断口分析)结果以及对连接臂金属臂断裂部分的外观检查,综合分析认为由加工工艺质量缺陷产生连接臂连接孔位置的凸楞是造成本次缺陷的根本原因。

为了避免今后类似故障再次发生,建议制造厂应从源头做好产品质量把控,具体措施为:

1) 在连接臂生产制造环节,加强连接臂机加工后的质量管控,将连接臂连接孔的检查列为其中的一个检查项目,防止缺陷产品流入后续;

2) 在产品制造环节,将连接臂的连接孔检查列为产品装配环节的一个检查项目,在连接臂装配前逐件检查连接臂连接孔的尺寸及内孔质量,防止问题零部件流入到产品上。

参考文献

- [1] 陈家斌. 变电设备运行异常及故障处理技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [2] 陈化刚, 张开贤, 程玉兰. 电力设备异常运行及事故处理[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1999.
- [3] 陈化钢. 电力设备预防性试验方法及诊断技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [4] 陈化钢. 电力设备预防性试验实用技术问答[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [5] 陈家斌. 电气设备故障检测诊断方法及实例[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2003.

- [6] 李景禄, 李青山, 等. 电力系统状态检修技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2011.
- [7] 许艳阳. 变电设备现场故障与处理典型实例[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [8] 陈家斌. SF₆断路器实用技术[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [9] 李喜桂, 秦红三, 熊昭序. 交流高压 SF₆断路器检修工艺[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [10] 李建明, 朱康. 高压电器设备试验方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [11] 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.
- [12] 陈晓清, 彭华东, 任明, 等. SF₆气体分解产物检测技术及其应用情况[J]. 高压电器, 2010, 46(10): 81-84.
- [13] 王宇, 李丽, 姚唯建, 等. 模拟电气设备过热故障时 SF₆气体分解产物的体积分数及其特征[J]. 高压电器, 2011, 47(1): 62-69.
- [14] 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, 34(4): 664-669.
- [15] 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, 47(12): 104-108.
- [16] 钟飞, 黄升平, 张晓春, 等. 基于 X 射线的 GIS 设备可视化检测系统[J]. 电子设计工程, 2018, 26(9): 23-27.
- [17] 张梦岑. 基于 X 射线的盆式绝缘子缺陷识别方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.
- [18] 李昭月. 基于 X 射线实时成像系统图像处理与缺陷识别的研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2008.
- [19] 闫文斌. 基于 X-DR 的电力设备结构缺陷检测技术应用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [20] 叶洪波, 吴剑敏. LW11-252 型 SF₆高压断路器在线监测系统的开发[J]. 华东电力, 2009, 37(7): 1084-1085.

作者简介:

张仕民(1964), 高级工程师, 从事超特高压设备检修与试验研究;

李卫伟(1984), 高级工程师, 从事输变电设备技术监督工作;

杨 洋(1982), 高级工程师, 从事输变电设备状态诊断研究工作。

(收稿日期: 2019-10-12)