

一起 110 kV 变压器有载重瓦斯跳闸故障及分析

左美洋¹, 李久福², 朱永超¹, 崔兆亮¹, 张甲辉¹, 董旭¹, 秦铮¹

(1. 国网山东省电力公司济南供电公司, 山东 济南 250012; 2. 中建八局第一建设有限公司, 山东 济南 250100)

摘要: 对某供电公司一起 110 kV 变电站主变有载重瓦斯故障跳闸事故进行分析, 通过现场变压器油气分析和电气试验, 确定了有载开关的真空灭弧室应断未断是导致此次重瓦斯跳闸事故的原因。随后对有载开关吊芯进行解体检查, 分析了真空灭弧室卡死的原因并还原了故障过程, 最后提出了相应的预防措施。

关键词: 重瓦斯; 有载调压变压器; 分接开关; 真空灭弧室

中图分类号: TM407

文献标识码: A

文章编号: 1008-8032(2024)03-0001-04

变压器作为电力系统中的主要组成部分, 保证了供电的可靠性和连续性。目前国内主要采用有载调压变压器。有载开关是调压变压器中唯一运动的重要部件, 它的运行维护及检修水平直接关系到有载调压变压器的安全^[1-5]。本文对某供电公司一起 110 kV 变电站主变有载重瓦斯跳闸事故进行分析, 通过对现场变压器的油气分析和电气试验, 确定了有载开关的真空灭弧室卡死是导致此次跳闸事故的原因。随后对有载开关吊芯进行解体检查, 得出了真空灭弧室卡死的原因, 并提出了相应的预防措施。

1 现场情况及初步分析

1.1 故障情况

2023 年 3 月, 某供电公司运维人员执行 110 kV 某站 1#主变由 3 挡调整至 2 挡的操作, 在调挡过程中, 主变有载重瓦斯动作跳闸。

1.2 主变外观检查情况

110 kV 某站 1#主变型号为 SZ11-63000/110, 有载分接开关型号为 VKM-Ⅲ 500Y-72.5B-10193W。现场检查 1#主变有载分接开关机构“挡位指示”在 2 挡, 但“分接变换指针”显示未到位, 指示为 27.5 格(共 33 格); 有载开关头盖顶部有油迹, 防爆盖凸起变形, 周边不断有油渗出; 有载开关油位在 4, 有载瓦斯看窗内有气体, 现场轻瓦斯动作信号未复归; 主变本体油位正常, 本体瓦斯看窗未见气体, 本体无渗油, 无其他异常信号。

1.3 主变油化及电气试验情况

对主变有载及本体绝缘油、有载瓦斯上部气体进行取样检测, 结果显示有载开关油气内含大量乙炔、氢气等特征气体。随后开展变比试验、直流电阻试验, 根据试验结果可知, 主变故障后挡位为 3 挡, 说明故障发生时 3 挡至 2 挡调挡动作并未完成。

1.4 现场吊芯检查情况

电气试验结束后, 对有载开关开展吊芯检查。放油过程中发现, 真空灭弧开关绝缘油总体呈炭黑色, 与正常颜色不符。当开关芯体被吊出后, 发现底部绝缘油呈炭黑色, 油室底部遗留有两根带白色绝缘套的短引线, 油箱内壁有两个触头存在放电烧蚀痕迹, 如图 1 所示。



(1 为开关室内壁静触头烧蚀, 2 为开关室底部遗留短接线)

图 1 吊芯检查情况

对开关芯体做进一步检查, 发现开关 C 相的 K1、K4 两支真空灭弧室与静触头连接线缺失, 与之相连的静触头存在放电烧蚀痕迹, 真空灭弧室布局如图 2 所示。这说明切换过程中存在过流, 导致引线烧断、触头烧蚀。

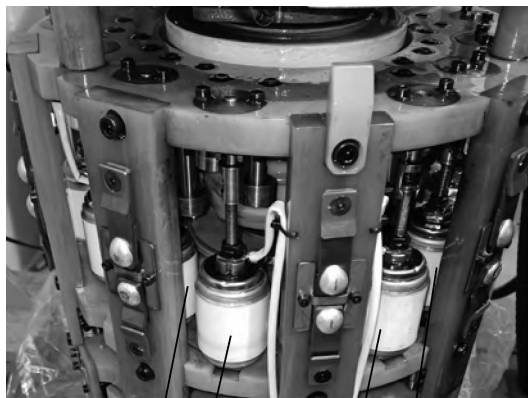
1.5 原因初步分析

现场对开关芯体进行初步检查分析, 通过真空开关导通测试发现, K1 真空灭弧室虽然看起来拉杆处于拉出状态(拉出高度略低于 K2), 但实际测量后发现其处于导通状态, 因此基本确定故障点在 K1 真空灭弧室。具体过程如下: 切换开关动作过程中, K1 真空开关因某种原因应断未断, 导致在分接变换

收稿日期: 2023-12-04

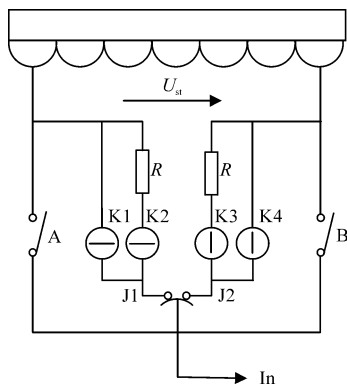
作者简介: 左美洋(1985-), 高级工程师, 研究方向为高低压客户管理、高压试验技术。

过程中,两分接头桥接形成环流时,K1、K4两支路将K2、K3的过渡电阻支路短接,由级电压形成的环流不经过过渡电阻,直接通过K1、K4回路,导致K1、K4与静触头连接引线被烧断、拉弧,开关油室压力剧增,进而引起有载重瓦斯动作,如图3所示。



(1 为 K1, 2 为 K2, 3 为 K3, 4 为 K4)

图2 开关C相真空灭弧室布局



(K1、K4 为主通断触头, K2、K3 为过渡触头, A、B 为主触头, J1、J2 为单双数换向触头, R 为过渡电阻, U_{st} 为级电压, I_n 为中性点电流)

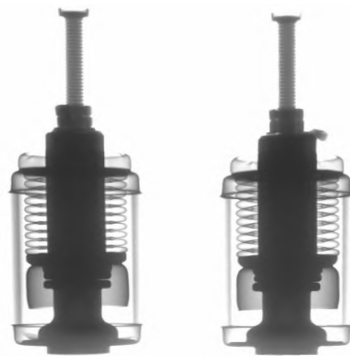
图3 分接变换电路图

2 解体检查情况

2.1 开关芯体检查

对开关芯体进一步检查发现, K1 真空灭弧室存在卡死现象, 即在开关切换过程中, 真空灭弧室拉杆实际上并未进行分合操作。将 K1 真空灭弧室单独拆下后发现, 真空灭弧室拉杆与腔体完全卡死, 人力无法使其活动, 而其他正常的真空灭弧室有明显的活动间隙。

因真空灭弧室在导通状态下无法无损测量其真空度, 为进一步判断内部触头状态, 利用 X 射线对 K1 及另外 1 支正常的真空灭弧室进行无损检查。检查发现, 2 支真空灭弧室的 X 射线照片无明显差异, 如图 4 所示。



(a) 故障真空灭弧室 (b) 正常真空灭弧室

图4 X射线照片对比

2.2 真空灭弧室解体检查

综合当前 K1 真空灭弧室卡死的现象, 初步判断导致卡死的原因:

- 1) 真空灭弧室拉杆与轴套之间卡死;
- 2) 真空灭弧室动静触头熔焊卡死。

为进一步确定真空灭弧室卡死的原因, 利用车床对真空灭弧室进行逐步拆解。首先, 在不破坏真空灭弧室腔体的前提下, 拆除黑色非金属轴套和导套后, 拉杆仍无法活动, 可以肯定内部触头存在熔焊现象。随后, 采取两步法拆解腔体, 先从真空灭弧室上部切开腔体, 发现内部并无绝缘油等杂物流出, 且此时动静触头仍无法活动。再将已经熔焊的触头取出, 从真空灭弧室底部的静触头处切开, 发现内部触头存在明显烧蚀熔焊现象, 如图 5 所示, 其余波纹管部分无明显弯曲变形, 真空灭弧室陶瓷内部无明显异常。



图5 真空灭弧室动触头烧蚀状态

随后, 对同相的 K4 真空灭弧室进行解体, 发现 K4 真空灭弧室内部触头同样存在烧蚀现象, 烧蚀部位为触头侧边及屏蔽罩内壁。

2.3 开关芯体机构检查

为进一步查找真空灭弧室卡死原因, 将解体真空灭弧室更换为完好真空灭弧室后对芯体复原, 进行开关机械特性试验。试验结果合格, 开关三相不同步时间满足要求 (小于 3 ms); 将 12 个弹簧逐一拆下, 进行弹簧压紧力试验, 结果如表 1 所示, 弹簧

压紧力均满足要求。在后续驱动连杆部分的检查中发现,驱动连杆无结构变形等异常情况;拆解快速机构及传动转轴部分,也未发现异常。

表1 三相开关弹簧压紧力试验结果 N

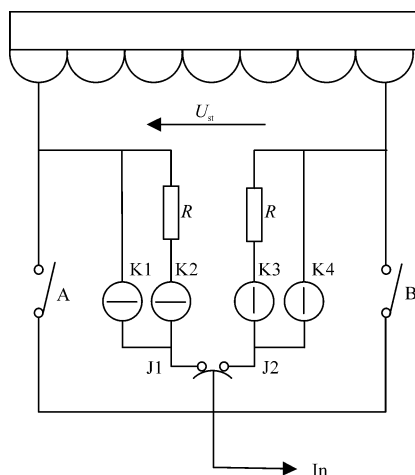
相位	F_{K1}	F_{K2}	F_{K3}	F_{K4}
A	53.5	55.8	55.8	53
B	52.3	55.8	56.2	55.9
C	55.8	53.2	55.2	53

3 故障原因分析及下一步措施

3.1 故障计算

3.1.1 变压器级间短路的环流计算

此故障的环流是有载分接开关由3挡降挡至2挡的过程中,因K1未正常打开且K4闭合而产生的。故障过程中,级电压形成的环境直接流经图6中的K4-J2-J1-K1回路。



(K1、K4为主通断触头,K2、K3为过渡触头,A、B为主触头,J1、J2为单双数换向触头,R为过渡电阻, U_{st} 为级电压, I_n 为中性点电流)

图6 环流回路1

回路电阻按50 mΩ估算,产生的环流约为16 kA,因为J1触头未拉弧,所以在J1断开之前,K1、K4的真空灭弧室与静触头的连接引线已烧断,持续时间从K4闭合开始,到J1断开结束,最长环流时间约为2 ms。

根据真空灭弧室厂家提供的参数,真空灭弧室可开断电流为3.2 kA,且持续1 s,实际测量导通状态下的真空灭弧室电阻约为50 μΩ,其动稳定电流为

$$I_{sh} = K \times \sqrt{2} \times I_{Nbr} \quad (1)$$

式中: K 为冲击系数,取1.8; I_{Nbr} 为真空灭弧室额定开断电流,取3.2 kA。

经计算,动稳定电流约为8 kA,小于所承受的环流,因此,真空灭弧室触头将在电动力的作用下弹开,形成电弧并发生熔焊,与K1触头的烧蚀情况

一致。

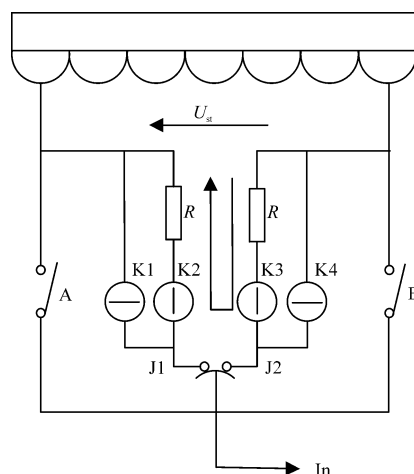
3.1.2 真空灭弧室承受的电压值计算

故障前,当K1断开时,其两端电压差为

$$U = I_N \times R_l \quad (2)$$

式中: I_N 为1#主变高压侧电流,为80 A; R_l 为有载开关过渡电阻,约为1.5 Ω。

经计算,K1两端电压为120 V。K3闭合时,级电压形成环流,如图7所示。此时K1所承受的电压为负荷电流所产生的压降与级电压(794 V)的矢量和,其值大于794 V。



(K1、K4为主通断触头,K2、K3为过渡触头,A、B为主触头,J1、J2为单双数换向触头,R为过渡电阻, U_{st} 为级电压, I_n 为中性点电流)

图7 环流回路2

3.2 故障过程推断

综合之前分析结果,可得出以下结论。

1) 根据真空灭弧室的拆解情况可知,由于其内表面无任何油迹和脏污,可基本确定故障时真空灭弧室的真空度无异常。

2) 根据K1触头的烧蚀痕迹,可基本确定K1的熔焊是大电流单次烧蚀的结果,而非多次放电烧蚀。

3) 根据K1和K4真空灭弧室的烧蚀情况可知,触头烧蚀是由变压器绕组级间短路所产生的大电流造成的,因此K1触头的熔焊是故障的结果,而非原因。

因此,目前故障过程可能有以下两种可能。

1) K1由于某种原因在图8第4步时,应断未断,此时K1真空灭弧室接触良好,接触电阻约为50 μΩ;在图8第7步时,K4在闭合过程中,变压器级间短路,K4触头被电弧烧蚀,产生弧电压。此时产生的短路电流为

$$I = (U_{st} - U_{dk4}) / R_c \quad (3)$$

式中: U_{st} 为级电压,取794 V; U_{dk4} 为K4电弧电压,取50 V; R_c 为其他回路电阻,取50 mΩ。

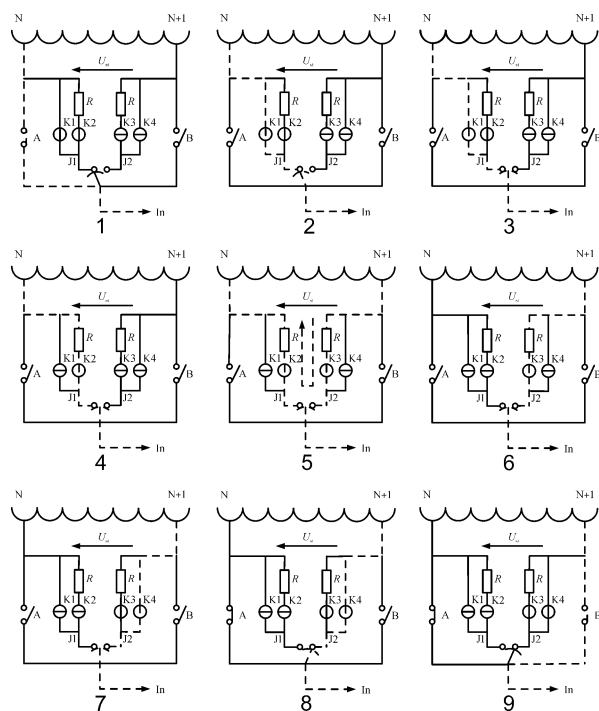
经计算,电路电流约为 15 kA,此短路电流流经真空灭弧室 K1,产生电动力使 K1 触头弹开并拉弧,随后发生熔焊,引线断裂,故障发生。

2) K1 由于某种原因在图 8 第 4 步时,应断未断,而 K1 真空灭弧室动静触头已分离,但开距不足,其两端电压约为 120 V,到第 5 步时,端电压大于 794 V,可能导致 K1 动静触头起弧,到第 7 步时, K4 在闭合过程中,变压器级间短路, K4 触头被电弧烧蚀,此时产生的短路电流为

$$I = (U_{st} - U_{dK} - U_{dK4}) / R_c \quad (4)$$

式中: U_{st} 为级电压,取 794 V; U_{dK4} 为 K4 电弧电压,取 50 V; U_{dK1} 为 K1 电弧电压,取 50 V; R_c 为其他回路电阻,取 50 mΩ。

经计算,电路电流约为 13.88 kA,此短路电流流经真空灭弧室 K1,产生电动力使 K1 触头弹开并拉弧、熔焊,导致引线断裂,引发故障。



(K1、K4 为主通断触头, K2、K3 为过渡触头, A、B 为主触头, J1、J2 为单双数换向触头, R 为过渡电阻, U_{st} 为级电压, I_n 为中性点电流)

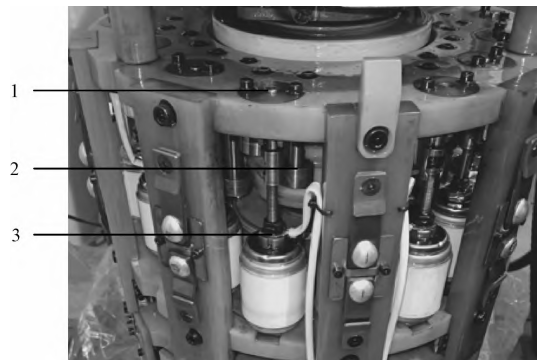
图 8 开关动作时序图

3.3 K1 未拉开的原因分析

通过对开关芯体及真空灭弧室的拆解,初步确定可能因以下 3 处位置卡滞导致 K1 应开未开。

1) 真空灭弧室拉杆与轴套之间卡滞

在真空灭弧室合闸过程中,可能由于机械配合问题,导致真空灭弧室拉杆落入轴套内,轴顶端顶在轴套台阶处(非正常位置),如图 9 位置 1 所示。



(1 为可能卡滞位置 1, 2 为可能卡滞位置 2, 3 为可能卡滞位置 3)

图 9 开关卡滞位置

2) 拨杆与轴销之间的旋转连接卡滞

真空灭弧室分合闸是利用杠杆原理,通过凸轮旋转,将拉紧力传递给真空灭弧室拉杆,从而实现真空灭弧室的分合。轴销的卡滞也是造成 K1 无法拉开的原因之一,如图 9 位置 2 所示。

3) 真空灭弧室动触头与导套间卡滞

真空灭弧室动触头与非金属导套应存在一定间隙,但原真空灭弧室动触头与导套间隙较小,如图 9 位置 3 所示,可能因为拉杆提升角度的问题产生偶发性的卡滞,从而导致 K1 发生应断未断或者开距不足的故障。

3.4 下一步工作措施

综合分析本次故障情况,确定为开关拉杆提升机构、真空灭弧室的偶发性卡滞所导致。据此制订以下预防措施。

1) 针对同批次 2#主变有载分接开关,采取直接更换切换开关芯体的方案,并对更换下来的开关进行解体检查,重点检查同批次真空灭弧室和开关分闸提升机构。

2) 加强有载分接开关试验管理,严格按照变压器有载分接开关治理方案,开展有载分接开关绝缘油试验(在油灭弧分接开关处进行耐压及微水检测,在真空开关处进行耐压、微水及油色谱检测)和切换动作特性试验(测量分接变换程序、电流连续性、三相开断不同步时间)。

3) 针对公司所辖其他同型号的有载分接开关,每 10~14 年或分接变换 10 万次的进行一次吊芯检查,重点检查真空灭弧室分合闸机构。

4) 组织山东泰开等有载分接开关厂家,编制《变压器有载分接开关专项治理工作方案》,明确运维、检修、试验标准,逐型号制订油流继电器校验定制、检修计划。

(下转第 22 页)

- 究[D]. 石家庄: 河北科技大学, 2018.
- [20] 周玮, 雷雨秋, 董勤晓, 等. RFID 无源无线温度传感器与空心电抗器的融合设计与试验[J]. 高压电器, 2021, 57(7): 144–153.
- [21] 花之蕾, 贾璐瑞, 樊冰. 面向双碳行动目标的配电传感技术提升策略[J]. 电测与仪表, 2021, 58(11): 16–22.
- [22] 陈勇. 智能配电设备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2022.

A Study on the Application and Trend of Development of the Technology of Internet of Things in Power Distribution Equipment

JIANG Xiping¹, WAN Haiyi², LI Gen², ZHANG Shihai¹

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 401123, P. R. China; 2. Yongchuan Power Supply Branch of State Grid Chongqing Electric Power Company, Chongqing 402160, P. R. China)

Abstract: This paper discusses about the application and trend of development of the technology of Internet of Things in power distribution equipment, which provides reference for its research and practice in power distribution equipment. First, this paper introduces the current situation of its application in power distribution equipment and points out related problems and challenges. Then, it analyzes its trend of development in power distribution equipment. Finally, it puts forward relevant suggestions on its promotion in power distribution equipment.

Key words: Internet of Things; power distribution equipment; edge computing; 5G technology; artificial intelligence

(上接第4页)

5) 加强后续新设备验收中对有载分接开关的验收力度, 要验证其具有良好的动作性能, 保证其可靠运行。

6) 结合主变停电工作, 对有载分接开关调挡时出现卡涩的设备及时跟进检查, 排查设备缺陷。

参考文献:

- [1] 孙逸翀, 赵书涛, 陈志华, 等. 有载调压变压器分接开关在线故障诊断技术综述[J]. 仪器仪表与分析监测, 2023(3): 24–28.
- [2] 王绍武, 李鹏, 李金忠, 等. 变压器真空有载分接开关研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6893–6908.
- [3] 鲍鹏飞, 李晓明, 范文魁, 等. 干式变压器新型有载分接开关[J]. 电气应用, 2020, 39(1): 82–87.
- [4] 王相锋, 郭傲, 陈习文, 等. 一起换流变有载分接开关轻瓦斯跳闸故障的分析与处理[J]. 变压器, 2021, 58(11): 73–75, 79.
- [5] 范利东, 刘军, 沈雅凤, 等. 一起 150 kV 电力变压器有载开关相间击穿故障分析[J]. 电气技术与经济, 2023(增刊1): 42–47.

An On-Load Heavy Gas Tripping Fault of the 110 kV Transformer and Its Analysis

ZUO Meiyang¹, LI Jiufu², ZHU Yongchao¹, CUI Zhaoliang¹, ZHANG Jiahui¹, DONG Xu¹, QIN Zheng¹

(1. Jinan Power Supply Company of State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan Shandong 250012, P. R. China; 2. The First Company of China Eighth Engineering Bureau Ltd., Jinan Shandong 250000, P. R. China)

Abstract: This paper analyzes an on-load heavy gas tripping fault of the main transformer of the 110kV substation in a power supply company. Through on-site oil and gas analysis and electrical tests of the transformer, it has been determined that the fault was caused by the fact that the vacuum bubble of the on-load switch had not been broken. Then, the hanging core of the on-load switch was disassembled and inspected, the cause of the stuck vacuum bubble was analyzed, the process of the fault was restored, and corresponding precautionary measures were proposed.

Key words: heavy gas; on-load regulating transformer; tap changer; vacuum arc-extinguishing chamber