

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.02.033

一起750 kV变压器内部故障分析与处理

程 锦, 钟 义, 兰孝富

(国家电网公司运行分公司, 上海 201413)

摘要: 描述了变压器套管底座松动故障的处理过程, 从发现色谱分析数据异常, 到采用特征气体、三比值法、三角图示法进行故障诊断, 结合试验方法进行故障定位, 阐述了油色谱分析方法和电气试验方法的内在联系。提出乙炔升高但未“超标”时, 查找其原因的方法、步骤及注意事项, 同时对大型变压器内部故障诊断及处理提供了经验。

关键词: 变压器; 油色谱; 试验; 分析

Analysis and Treatment of the Inner Fault in a 750 kV Transformer

CHENG Jin, ZHONG Yi, LAN Xiaofu

(Grid Operation Branch of State Grid Corporation of China, Shanghai 201413, China)

Abstract: The process for a fault of loosen bushing bottom pedestal in the transformer is described. Abnormal chromatographic data is discovered, then characteristic gas method, three-ratio method and David triangle method are used to analyze the fault type, and electrical test methods can be used to judge the position of fault. Thus the combined relation is verified effectively. The methods, steps and attentions are suggested when the content of acetylene in the oil is increased but still in the specified range. Meanwhile, some useful experiences for diagnosis and treatment of the inner fault in large transform are provided.

Key words: transformer; oil chromatogram; test; analysis

0 引言

随着国内特高压输变电技术的发展, 750 kV 变压器及 1 000 kV 变压器逐步投运。晋东南—南阳—荆门交流特高压工程中, 晋东南、南阳、荆门 3 站均装设两组容量 300 万的 1 000 kV 变压器; 哈密—郑州特高压直流工程中, 天山换流站装设两组容量为 210 万 kVA 的 750 kV 变压器, 且新扩建两组容量为 210 万 kVA 的 750 kV 变压器。由于电压等级高、输电容量大、绝缘水平高, 750 kV 及以上电压等级的变压器基本上都是单相自耦变压器^[1-2]。

750 kV 变压器采用 2 台结构相同或相近的小容量变压器, 通过并列或绕组并联的方式来代替单台大容量变压器, 在中国西北地区得到大范围的使用。在国外, 组合式变压器已有成熟应用经验, 在韩国新安城 765 kV 变电站内即采用了组合式变压器方式^[3]。

天山换流站 750 kV 联络变采用中性点变磁通调压, 并采用分体结构, 变压器分为主体变和调压补偿变两部分。主体变和调压补偿变连接组合后可以作为一台完整的变压器使用, 也可以将主变单独使用。主体变油箱外设调压补偿变, 内有调压和补偿变双器身, 设置有载分接开关。调压器身为两柱并联, 调压线圈通过主变低压线圈励磁调压, 并连接调压开关。补偿器身为单柱套线圈。联络变低压和中性点利用主体变和调压变两部分各自的套管通过外部管母线连接在一起, 并通过调压补偿变相应套管连接到线路。

750 kV 变压器在直流换流站及交流变电站中均为关键设备, 发生故障后, 对直流输送功率和交流网架有很大的影响。天山换流站 750 kV 联络变为西北电网 750 kV 第二通道重要设备, 同时, 由于天山换流站内 750 kV 交流线路和 500 kV 交流线路同时保障直流输送功率, 因此, 750 kV 联络变的地位尤其重要, 及时监测和发现变压器内部故

障,快速进行故障定位、处理内部故障,对安全生产运行十分重要。绝缘油气相色谱分析用于判断充油设备内部故障已有数十年经验,可通过油色谱提前发现设备内部故障,并利用电气试验确认故障^[4]。

1 变压器内部故障情况及处理

2014年1月8日,哈郑直流工程极Ⅱ高端换流器大负荷试验期间,天山换流站750 kV 2号联络变A相的主体变轻瓦斯报警,现场排气复归报警,油色谱分析含有微量乙炔和乙烯。由于历史油色谱数据中无乙炔组分,再次取样进行油色谱分析,发现乙炔体积分数急剧增长,且处于持续增长趋势。

1月8日下午17:00,极Ⅱ高端换流器1.05 p.u.过负荷试验已持续1 h,离完成试验还有1 h,考虑到2号联络变A相的主体变油色谱显示乙炔持续上涨,且增长速度有加速的趋势,终止大负荷试验,2号联络变停运。

2 油色谱分析

2.1 油色谱数据

联络变主体变共有取油口6个,分别为本体上部、中部、底部,本体主瓦斯集气盒,750 kV套管A升高座,500 kV套管Am升高座。

常规进行油色谱分析,均在本体底部取样口取油样,具体数据见表1。

表1 底部油色谱数据

Table 1 The oil chromatographic analysis data for the bottom of transformer							μL/L	
时间	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	总烃	CO	CO ₂
2013-12-29	3.119	0.611	0.252	0.148	0.000	1.011	26.773	79.025
2014-01-08T11:40	3.169	0.713	0.230	0.494	0.436	1.873	23.360	79.267
2014-01-08T14:10	5.513	1.798	0.565	3.766	6.876	13.015	24.944	64.311
2014-01-08T16:10	8.073	3.831	1.153	9.570	11.896	26.450	25.591	69.303

后期再次取样发现主体变乙炔体积分数增长后,17:30在所有取样口取油样进行对比分析。由于

本体上部取样口位置过高,出于安全考虑不予取样,具体数据见表2。

表2 不同部位油色谱数据

Table 2 The oil chromatographic analysis data for different positions of transformer							μL/L	
部位	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	总烃	CO	CO ₂
中部	21.12	11.35	2.76	23.48	23.90	61.49	35.21	124.54
底部	12.16	7.85	2.19	18.16	20.03	48.23	30.41	89.45
750 kV 套管 A	8.55	4.82	1.42	11.06	13.60	30.90	21.94	104.76
500 kV 套管 Am	10.73	6.38	1.81	14.61	16.58	39.38	22.40	74.86
主瓦斯集气盒	841.50	398.65	24.83	547.40	1 227.74	2 198.61	21.34	178.57

2.2 特征气体法分析

由表1分析可发现,当该台变压器刚发生轻瓦斯动作时,内部开始产气。由于产气时间短,此时绝缘油中C₂H₂体积分数低,仅0.436 μL/L,其后迅速增长。整个过程中,仅C₂H₂体积分数增长,其他气体组分变化不大。

轻瓦斯动作后,现场不具备取气条件,无法对气体进行分析,但设备故障时绝缘油中产生的气体积聚在瓦斯继电器内,并溶解进入邻接绝缘油中。因此,从该部件的排气口取油样进行油色谱分析,各气体组分体积分数明显偏大,相当于长时间设备故障运行后的油中溶解气体数据,对进一步分析故障类型有很大的参考意义。对表2中瓦斯排气口油样进行油色谱分析,主要气体组分为C₂H₂和H₂,次

要气体组分为C₂H₄、CH₄、C₂H₆,同时,CO和CO₂气体一直保持稳定,可确定内部故障与固体绝缘无关,属于油中电弧放电^[5]。

2.3 三比值法分析

根据表1数据,计算C₂H₂绝对产气速率(mL/d)为

$$\gamma = \frac{C_2 - C_1}{\Delta t} \times \frac{G}{\rho} = \frac{11.896 - 6.876}{1/12} \times \frac{92}{0.8781} = 6\,311.45。$$

C₂H₂绝对产气速率6 311.45 mL/d,远大于0.2 mL/d;同时,C₂H₂体积分数超过1 μL/L,可采用三比值法对设备故障进行分析。

三比值法是用H₂、CH₄、C₂H₆、C₂H₄、C₂H₂等5种气体的三对比值以不同的编码C₂H₂/C₂H₄、CH₄/H₂、C₂H₄/C₂H₆表示,不同的故障类型对应不同的编码规则^[6-10]。

以表2中部取油口数据进行计算: $C_2H_2/C_2H_4=1.018$ 取值1; $CH_4/H_2=0.537$ 取值0; $C_2H_4/C_2H_6=8.507$ 取值2。

以表2瓦斯排气口数据进行计算: $C_2H_2/C_2H_4=2.243$ 取值1; $CH_4/H_2=0.474$ 取值0; $C_2H_4/C_2H_6=22.046$ 取值2。

三比值编码为102,根据改良三比值法,故障类别对应电弧放电。

2.4 三角图示法分析

三角图示法是杜威法的发展,以 C_2H_2 、 C_2H_4 、 CH_4 在三者之和中所占百分比作三角图,考虑电、热两种故障可能同时作用的情况,对3个百分比的范围与故障类型进行了更仔细的划分^[1]。

以表2中部取油口数据进行计算: $C_2H_2=41.7\%$,大于29%,属于 D_1/D_2 ; $C_2H_4=40\%$,属于 $T_2/D+T/D_2$; $CH_4=19.3\%$,小于98%,属于 $D_1/D_2/D+T/T_3$;综合分析,对应故障类型 D_2 。

以表2瓦斯排气口数据进行计算: $C_2H_2=56.5\%$,大于29%,属于 D_1/D_2 ; $C_2H_4=25.2\%$,在23%~38%之间,属于 $T_2/D+T/D_2$; $CH_4=18.3\%$,小于98%,属于 $D_1/D_2/D+T/T_3$;综合分析,对应故障类型 D_2 。

综合以上分析,初步判断故障类型 D_2 :高能量放电。

2.5 故障位置分析

根据表2各部位油色谱数据和变压器结构,中部取油口 C_2H_2 最高,底部较低,故障点位于变压器中上。

变压器500 kV套管及750 kV套管升高座部位 C_2H_2 较低,可排除这两只套管内部故障。

综合分析后,初步判断故障部位有可能是夹件、铁心、地屏接地部位、低压套管及中性点套管。

3 电气试验分析

该变压器2013年5月底投运,运行时间不长,但尚未经历过长期满负荷运行考核,电流回路接触情况不明。因此,可开展多项电气试验,来判断其绝缘情况及接触情况。基于后期哈郑直流工程调试工期紧,先行安排进行直流电阻测量和长时感应耐压试验。

3.1 直流电阻

直流电阻可检查变压器绕组线圈的质量及回路是否完整,及时发现绕组线圈导线断裂、接头开焊、接触不良、匝间短路等缺陷,同时能检查出并联支路连接是否正确,分接开关实际位置与指示位置是否相符等^[12-16]。

主体变上有5只套管,分别为750 kV套管A,500 kV套管Am,低压套管a1、x1,中性点套管A01;调补变上有6只套管,分别为低压套管a、x2、x,中性点套管A02、A03、A0。对主体变进行直流电阻试验,数据见表3。

表3 不同绕组的直流电阻试验数据

Table 3 Data of DC resistance of different windings

项目	油温/℃	A-A01/ mΩ	Am-A01/ mΩ	A-Am/ mΩ	a1-x1/ mΩ
出厂试验数据	27.5	606.0	458.0	148.3	16.667
现场试验数据	0.0	650.4	546.0	132.6	14.950
现场试验数据	折算到 27.5	726.0	610.0	148.0	16.700

与出厂试验数据进行纵向比对,750 kV套管A与中性点套管A01间直流电阻初值差为19.8%,不满足规程要求;500 kV套管Am与中性点套管A01间直流电阻初值差为33.2%,不满足规程要求;750 kV套管A与500 kV套管Am间直流电阻初值差为0.2%,满足规程要求;低压套管a1与低压套管x1间直流电阻初值差为0.2%,满足规程要求。

根据实验结果,结合套管结构,初步怀疑中性点套管A01拉杆底部可能存在接触不良。

3.2 长时感应耐压试验 ACLD

感应耐压试验时绕组各线匝间、层间、段间都相应地提高了彼此之间的电位差,可同时对变压器的主绝缘和纵绝缘,以及绕组对地及对其他绕组和相间绝缘的电气强度进行考核。

在感应耐压试验过程中,根据变压器局部放电情况检测其内部绝缘状况,可及时发现内部绝缘缺陷^[17-19]。

A、中压Am端子悬空,中性点A01接地,低压侧a1-x1供电,x1接地。测量A、Am、a1端子及铁心接地放电量均正常。

改变接线方式,对中性点支撑后进行长时感应耐压试验,A、Am端子悬空,A01与a1短接,低压侧a1-x1供电,x1接地。在试验电压达到20~25 kV时,检测到140 pC放电信号,电压持续升高后放电反而消失,说明接触不良的放电间隙随着电压的升高击穿后接触良好,放电现象消失,故障部位在中性点套管A01尾部的可能性很大。

4 现场检查及处理

变压器停电排油拆除中性点套管后发现:A01套管中心导管和底部连接座电气结合面已严重烧蚀,结合面四周均已烧黑,变色极为明显,且中心导

管和底部连接座有明显间隙,可以直接转动底部连接座。

转动中心导管,分开导管与底座,可发现导管拉杆有明显的放电痕迹、中心导管和底部连接座也有明显的放电痕迹,见图 1。

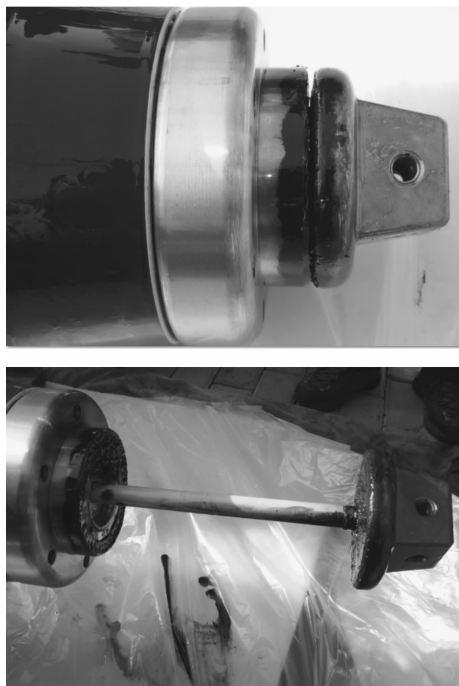


图 1 中性点套管 A01 底部连接座

Fig. 1 The bottom pedestal of neutral bushing A01

中性点套管 A01 底座松动,是导致轻瓦斯动作和油色谱数据异常的直接原因。变压器运行时,中性点套管 A01 中心导管产生悬浮电位,当电位积累至一定程度时开始放电;放电时,中心导管与底座接触良好,悬浮电位消失;放电停止后,再次产生悬浮电位,又开始新一轮放电。因此,旋开底座,可发现接触面已全部烧灼,这也与感应耐压试验的现场表现相吻合。在持续的电弧性放电过程中,对套管升高座周围的绝缘油进行裂解,从而产生大量气体,集中在本体的瓦斯继电器中,最后使得轻瓦斯动作。

更换中性点套管 A01,并对变压器进行滤油处理,然后对变压器进行绕组连同套管的绝缘电阻、介质损耗及电容量测量,直流电阻测量,高压、中压绕组连同中性点的外施工频耐压试验,试验合格,投运后变压器运行正常。

5 结论

通过油色谱及时发现变压器内部故障,结合变压器结构从不同部位取油样进一步油色谱分析,并与变压器试验进行综合判断,对变压器内部故障进

行定位,防止了变压器故障扩大,减少了设备损失。通过此次故障处理,可得出以下结论。

1)变压器正常运行过程中, C_2H_2 体积分数极少,一般为 0。当 C_2H_2 从零到有,或 C_2H_2 增长量达到 $0.3 \mu L/L$ 时,应予以注意,并持续进行油色谱分析,密切跟踪其发展趋势。

2)变压器轻瓦斯动作后,现场复归报警信号时,应同时取油样进行油色谱分析,有条件的话同时采集瓦斯集气盒或集气口内的气体进行分析,无条件的话可同时对瓦斯集气盒或集气口内的油样进行油色谱分析,以确认设备内部是否存在故障^[20-24]。

3)变压器内部存在故障时,可在同一台设备的不同取样口进行取样分析,从而初步对设备内部故障定位。

4)油色谱数据分析,可采用不同的分析方法,目前主要采用的是基于三比值法的改良三比值法,在 IEC 三比值法的基础上作了进一步改进,判断准确率更高。当碰到不确定的诊断时,可以参考三角形图示法进一步细化。

5)油色谱分析能很好地反映变压器的潜伏性故障,结合变压器内部构造和电气试验,可更有效地判明故障类型。

参考文献:

- [1] 郭慧浩,付锡年. 特高压变压器调压方式的探讨[J]. 高压技术,2006,32(12):112-114.
GUO Huihao,FU Xinian. Inquire into voltage regulating method for UHV transformer[J]. High Voltage Engineering, 2006,32(12):112-114.
- [2] 尹克宁. 变压器设计原理[M]. 北京:中国电力出版社,2003.
YIN Kening. Principles of transformer design[M]. Beijing: China Electric Power Press,2003.
- [3] 孙强,郑楠,尚勇,等. 750 kV 单相三绕组双体组合式变压器工程应用研究[J]. 电网与清洁能源,2012,28(12):7-14.
SUN Qiang,ZHENG Nan,SHANG Yong,et al. Study on engineering application of 750 kV single-phase three-winding catamaran combined transformer[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering,2012,28(12):7-14.
- [4] 王克峰,孙庆生,汪和顺,等. 一起 500 kV 变压器稳钉悬浮放电故障的诊断与分析[J]. 高压电器,2012,48(3):95-98.
WANG Kefeng,SUN Qingsheng,JIANG Heshun,et al. Fault diagnosis and analysis of stable-nail discharge in 500 kV transformer[J]. High Voltage Apparatus,2012,48

- (3):95-98.
- [5] GB/T 7252—2001 变压器油中溶解气体分析和判断导则[S]. 2001.
- [6] 巩学宾, 闫明发, 魏晶霞. 一例变压器内部故障的油色谱分析诊断和处理[J]. 高压电器, 2008, 44(3): 275-276.
GONG Xuebin, YAN Mingfa, WEI Jingxia. Oil chromatogram analysis of a fault inside transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(3): 275-276.
- [7] 梁艳丽, 曹阳. 变压器油色谱分析技术在设备状态检修中的应用[J]. 变压器, 2011, 48(12): 67-71.
LIANG Yanli, CAO Yang. Application of transformer oil chromatographic analysis technology to equipment condition maintenance[J]. Transformer, 2011, 48(12): 67-71.
- [8] 王巍, 谭小俊, 朱培刚, 等. 750 kV 并联电抗器油色谱异常原因分析及处理[J]. 变压器, 2012, 49(1): 65-67.
WANG Wei, TAN Xiaojun, ZHU Peigang, et al. Analysis and treatment of abnormal oil chromatographic data of 750 kV parallel reactor[J]. Transformer, 2012, 49(1): 65-67.
- [9] 吴冷, 毛宏智, 周建军. 色谱回归分析法在变压器过热故障诊断处理中的应用[J]. 高压电器, 2011, 47(9): 117-120.
WU Leng, MAO Hongzhi, ZHOU Jianjun. Application of chromatographic regression analysis to diagnosing overheat fault of transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(9): 117-120.
- [10] 兰淑丽, 宋昆, 刘芳. 应用气相色谱法判断 500 kV 变压器故障[J]. 高压电器, 2008, 44(4): 381-382.
LAN Shuli, SONG Kun, LIU Fang. A case study on fault diagnosis of 500 kV transformer with gas chromatography method[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(4): 381-382.
- [11] 操敦奎. 变压器油色谱分析与故障诊断[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [12] 陈化钢. 电气设备预防性试验方法[M]. 北京: 水利电力出版社, 1993.
- [13] Q/GDW 158—2007 750 kV 电力设备预防性试验规程[S]. 2007.
- [14] 袁燕岭, 甘景福, 陈震, 等. 变压器直流电阻测试数据异常分析与处理[J]. 变压器, 2011, 48(4): 60-62.
YUAN Yanling, GAN Jingfu, CHEN Zhen, et al. Analysis and treatment of abnormal data in transformer DC resistance test[J]. Transformer, 2011, 48(4): 60-62.
- [15] 严玉婷, 江健武, 王亚舟, 等. 变压器直流电阻测试原理及现场缺陷情况分析[J]. 高压电器, 2010, 46(10): 97-101.
YAN Yuting, JIANG Jianwu, WANG Yazhou, et al. Theoretic of testing direct current resistance and analysis of different kind of defects in field[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(10): 97-101.
- [16] 王建华, 黄娟. 电力变压器直流电阻测量值超标原因分析及解决对策[J]. 高压电器, 2007, 43(3): 239-240.
WANG Jianhua, HUANG Juan. Analysis and solutions for the abnormal DC resistance of power transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2007, 43(3): 239-240.
- [17] 刘江明, 骆贤华, 孙正竹, 等. 变压器交流耐压试验异常分析及处理[J]. 变压器, 2013, 50(1): 46-48.
LIU Jiangming, LUO Xianhua, SUN Zhengzhu, et al. Analysis and treatment of abnormal condition in AC withstand voltage test of transformer[J]. Transformer, 2013, 50(1): 46-48.
- [18] 吕景顺, 张宏亮, 王烜, 等. 750 kV 变压器长时感应电压试验预加电压时间的探讨[J]. 高压电器, 2012, 48(12): 98-104.
LYU Jingshun, ZHANG Hongliang, WANG Xuan, et al. Discussion on preload voltage time in 750 kV transformer long-duration induced AC voltage test[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(12): 98-104.
- [19] 聂德鑫, 伍志荣, 罗先中, 等. 特高压变压器套管局部放电试验技术分析[J]. 高电压技术, 2010, 36(6): 1448-1454.
NIE Dexin, WU Zhirong, LUO Xianzhong, et al. Analysis on the partial discharge test technology of UHV transformer bushing[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(6): 1448-1454.
- [20] 钟天翔, 金树军. 500 kV 变压器瓦斯继电器误动作原因分析[J]. 电工文摘, 2011, 47(6): 36-38.
ZHONG Tianxiang, JIN Shujun. Analysis on misoperation reasons of 500 kV transformers gas relay[J]. Electrician Abstracts, 2011, 47(6): 36-38.
- [21] 贺家李, 贺继红, 汪国新, 等. 特高压变压器的阻抗快速后备保护[J]. 电力系统保护与控制, 2014, V42(22): 1-8.
HE Jiali, HE Jihong, WANG Guoxin, et al. Impedance backup protection for UHV large capacity transformers[J]. Power System Protection and Control, 2014, V42(22): 1-8.
- [22] 何小庆, 刘淑萍, 李攀宏, 等. 一种消除单相变压器励磁涌流的预充磁策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, V42(17): 120-124.
HE Xiaoqing, LIU Shuping, LI Panhong, et al. Eliminating the single-phase transformer inrush current based on pre-magnetizing[J]. Power System Protection and Control, 2014, V42(17): 120-124.
- [23] 李国斌, 姜睿智, 刘星, 等. 基于电子式互感器的整流变压器阀侧大电流采集方案实现[J]. 电力系统保护与控制, 2014, V42(18): 139-143.
LI Guobin, JIANG Ruizhi, LIU Xing, et al. Current signal acquisition realization scheme of the valve side of rectifying transformer based on electronic current transformer[J]. Power System Protection and Control, 2014, V42(18): 139-143.
- [24] DL/T 573—2010 电力变压器检修导则[S]. 2010.
- 程锦(1981—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事跨区电网直流输电运行维护、高压试验及带电检测工作。