

一起换流变压器真空有载分接开关乙炔异常分析

骆欣瑜¹, 廖文龙¹, 刘睿¹, 李龙蛟², 任阿阳³

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041;
3. 国网四川省电力公司特高压直流中心, 四川 成都 610041)

摘要:真空有载分接开关是特高压换流变压器最关键的组部件之一。在某换流站年度检修中,首次报告某厂商特高压换流变压器真空有载分接开关油室乙炔异常增大,经过油色谱分析和现场吊芯检查后,发现过渡电阻与中性点连接处紧固螺栓与螺孔的配合松动引起的放电烧蚀是有载分接开关独立油室乙炔值超标的直接原因。根据异常现象的机理分析,文中针对有载分接开关的检修规程和日常运维提出了建议,为后续类似工作处置提供了宝贵经验。

关键词:换流变压器; 真空有载分接开关; 油色谱; 乙炔; 放电烧蚀

中图分类号: TM 403.4 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2023)03-0090-05

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20230316

Analysis on An Abnormal Acetylene of Vacuum On-load Tap-changers for Converter Transformer

LUO Xinyu¹, LIAO Wenlong¹, LIU Rui¹, LI Longjiao², REN Ayang³

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. State
Grid Sichuan Electric Power UHV DC Center, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The vacuum on-load tap-changer is one of most important components of UHV converter transformers. During an annual maintenance for converter stations, the abnormal increase of acetylene in the oil chamber of vacuum on-load tap-changers of UHV converter transformer is reported for the first time. Based on the oil chromatographic analysis and hanging-core inspection, it is found that the discharge ablation caused by the loose fit between the bolt and the screw hole directly leads to the abnormal acetylene. According to the mechanical analysis of abnormal phenomenon, the suggestions for maintenance standards and daily operation of on-load tap-changers are put forward, which provides precious experiences for the follow-up similar works.

Key words: converter transformer; vacuum on-load tap-changer; oil chromatogram; acetylene; discharge ablation

0 引言

在高压直流输电系统中,有载分接开关为换流变压器的关键组部件。它通过改变调压绕组接入回路的匝数来调节变压器变比,主要功能为维持网侧电压恒定,保证换流阀控制角处于最佳工作范围以及控制直流系统降压运行等^[1-2]。鉴于对换流变压器可靠性和运行安全性的高要求,真空有载分接开关在特高压换流变压器中被广泛采用。

相比于传统油灭弧有载分接开关,真空有载分

接开关引入真空泡技术,拉弧的动静开关触头处于真空泡内。由于真空泡内有屏蔽罩,当动静触头拉弧时所产生的金属蒸汽将被密闭于真空泡内,不会导致绝缘油裂解或炭化^[3]。因此,真空有载分接开关油室内乙炔含量远少于传统油灭弧式有载分接开关。根据某厂商内部资料可知,换流变压器用VR型真空有载分接开关油室中乙炔主要来源于每次正常切换时暴露于油中的主触头尾流放电。通常,在固定的切换次数下油中乙炔浓度将保持恒定。在换流变压器有载分接开关控制策略不变的前提下,每年有载分接开关的切换次数大致上保持固定^[4]。

因此,在运行1年后,有载分接开关油室中乙炔浓度不应超过一定的浓度水平。在年检时,可通过测量油室中乙炔浓度来评估单位运行时间里真空有载分接开关的设备状态。

在对某特高压换流站换流变压器进行年度检修时,发现多台换流变压器分接开关油室乙炔浓度值异常增长,超过了其切换次数下对应的乙炔浓度水平。为此,下面基于油色谱分析和切换开关芯子解体检查,分析了乙炔异常原因并提出了修复措施,为后续类似异常处置工作提供了宝贵经验。

1 异常情况

2022年3月23日,在某特高压换流站年检期间开展换流变压器有载分接开关绝缘油试验时,发现4台有载分接开关油色谱乙炔值相比往年异常增长,如表1所示。极Ⅱ低Y/D-B、极Ⅱ低Y/Y-C、极Ⅰ高Y/Y-A和极Ⅱ低Y/D-A的有载分接开关乙炔值分别为14.774 $\mu\text{L/L}$ 、3.744 $\mu\text{L/L}$ 、2.588 $\mu\text{L/L}$ 和2.126 $\mu\text{L/L}$,复测后无差异,其余分接开关乙炔值均在1 $\mu\text{L/L}$ 以下。

该换流站在2020年完成了双极高低端及备用换流变压器的28台有载分接开关芯子更换和联接管路更换,并进行了换新油和滤油处理,投运时油中乙炔值应为0。2021年年检时,极Ⅰ高Y/Y-A有载分接开关油中乙炔含量为12.41 $\mu\text{L/L}$,进行了滤油处理后继续运行。由此可知,目前极Ⅰ高Y/Y-A有载分接开关的乙炔含量2.588 $\mu\text{L/L}$ 为1年运行中产生。

根据DL/T 574—2021《电力变压器分接开关运行维修导则》第7.2.1.5条可知^[5]:“运行中油浸式真空有载分接开关绝缘油含水量及击穿电压试验周

期,与变压器本体保持一致。油色谱分析,检测周期与变压器本体一致,乙炔含量的注意值为40 $\mu\text{L/L}$;若乙炔含量超过注意值,应缩短检测周期,增长量不宜大于10 $\mu\text{L/L}$;若乙炔含量超过以上数值与制造厂联系进一步分析处理”,表1中乙炔值均未达到注意值。然而,根据厂商提供的书面说明,真空有载分接开关正常切换时主触头尾流放电会有微量乙炔产生,对于该站使用的VRG型分接开关,油中乙炔值应小于每1000次4 $\mu\text{L/L}$ 。因此,可以根据有载分接开关的动作次数估算得到乙炔的注意值。

以2022年的极Ⅱ低Y/D-B有载分接开关和2021年的极Ⅰ高Y/Y-A有载分接开关为典型案例进行估算。2020年2月至2021年4月,极Ⅰ高Y/Y-A有载分接开关动作884次;2020年2月至2022年4月,极Ⅱ低Y/D-B有载分接开关动作1512次。根据厂商提供的书面说明材料可估算得到;2022年极Ⅱ低Y/D-B有载分接开关油室的油中乙炔含量应不高于6.050 $\mu\text{L/L}$ 以及2021年极Ⅰ高Y/Y-A的乙炔含量应不高于3.540 $\mu\text{L/L}$ 。然而,2022年极Ⅱ低Y/D-B和2021年极Ⅰ高Y/Y-A的有载分接开关油中乙炔含量实测值分别为14.774 $\mu\text{L/L}$ 和12.400 $\mu\text{L/L}$,均已远超厂家要求的注意值,如图1所示。

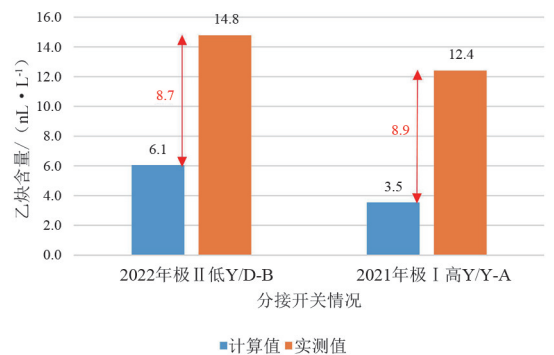


图1 有载分接开关产气计算和实测对比情况

表1 换流变压器真空有载分接开关油室油中溶解气体组分及含量

设备名称	检测时间	油中溶解气体组分及含量/ $(\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1})$							
		H ₂	CO	CO ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₂	C _n H _n
极Ⅰ高Y/Y-A有载分接开关	2022-03	35.642	227.209	2040.160	7.992	4.546	1.071	2.588	16.197
	2021-04	114.600	511.920	3294.140	18.640	9.840	1.440	12.410	42.330
极Ⅱ低Y/Y-C有载分接开关	2022-03	84.050	320.031	3695.341	17.047	5.936	2.127	3.744	28.854
	2021-04	8.200	32.050	185.360	14.300	5.790	3.760	0.440	24.290
极Ⅱ低Y/D-A有载分接开关	2022-03	64.497	388.354	2276.989	16.576	3.923	3.357	2.126	25.982
	2021-04	1.660	151.630	53.760	14.960	1.550	4.770	0	21.280
极Ⅱ低Y/D-B有载分接开关	2022-03	95.748	347.241	3270.041	17.775	12.118	1.728	14.774	46.395
	2021-04	9.350	50.900	487.820	7.470	4.090	0.510	0.100	12.170

综上所述,可推测得知:极 I 高 Y/Y-A 和极 II 低 Y/D-B 有载分接开关独立油室内部应存在其他形式的高能量放电,导致有载分接开关油室中乙炔值异常增长。此外,其他 2 台有载分接开关的乙炔值相比往年也有异常增长,可能也存在放电隐患。因此,对这 4 台有载分接开关进行吊芯检查。

2 现场吊芯检查

在对极 II 低 Y/D-B 有载分接开关进行吊芯检查时,发现在扇面过渡电阻上部的白色支撑板上存在大量黑色杂质颗粒。经无毛吸油纸擦拭后,颗粒表面呈金属光泽,判断为金属碎屑,如图 2 所示。

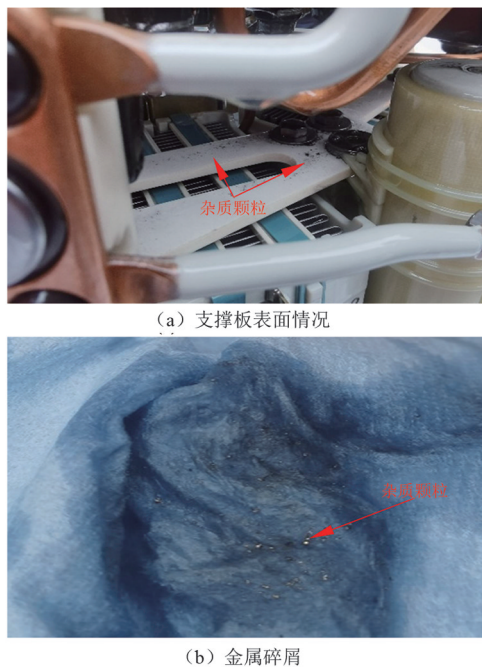
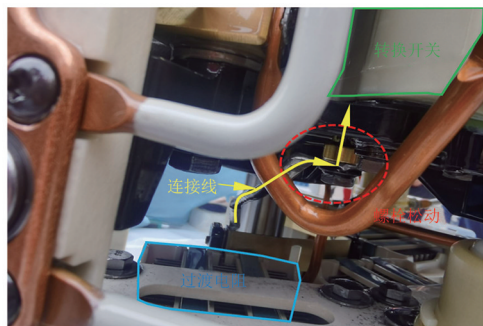


图 2 支撑板表面金属碎屑

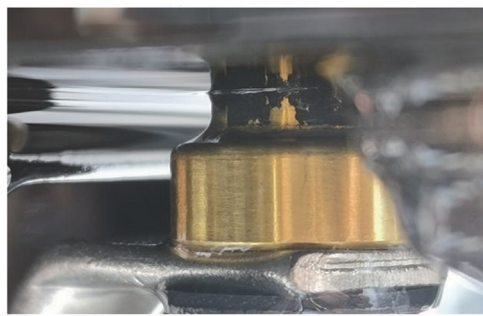
在与厂家技术人员讨论后,一致认为前述杂质及金属碎屑为非正常现象,分接开关继续运行风险大,可能导致有载分接开关严重故障,需要在现场对设备本身进行解体,查找杂质来源。根据杂质的分布情况,首先检查了过渡电阻区域。在拆除过渡电阻到转换开关连接线的紧固螺栓时,发现该螺栓存在松动,螺栓表面有放电烧蚀痕,如图 3 所示。其余 2 台有载分接开关吊芯检查后也发现了相同缺陷。

3 机理分析及措施

针对吊芯检查后发现的現象,需要根据有载分接开关的电气原理和机械构造深入分析隐患机理。



(a) 连接螺栓松动



(b) 连接处存在烧蚀



(c) 正常螺栓与烧蚀螺栓比较

图 3 过渡电阻到转换开关连接线紧固螺杆菌烧蚀

图 4 为 VRG 型有载分接开关的电气原理图。当有载分接开关从分接挡位 n (tap n) 转换至分接挡位 $n+1$ (tap $n+1$) 时,在经过主触头 MC 和主通断触头 MSV 分别转移负载电流 I_L 后,负载电流由 tap n 经转换开关过渡支路 TTF 流经过渡电阻 R ,最后到达中性点 NP。本次吊芯检查中发现的烧蚀点发生在过渡电阻连接中性点的区域。

为了进一步弄清楚过渡电阻连接中性点的区域的结构,图 5 展示了图 4 电气原理图对应的机械结构、转换开关和电流从过渡电阻到中性点的电流路径。由图可知,从过渡电阻流出的电流经紧固螺栓,由长导杆传导至中性点。长导杆本身由转换开关盒子 (MTF 和 TTF) 底部竖直穿过至其顶部与中性点连接。

对于长导杆和紧固螺栓的连接,其结构设计为:过渡电阻的引出线由紧固螺栓压接于 T 型钢护套上,紧固螺栓与贯穿过转换开关的长金属导杆通过

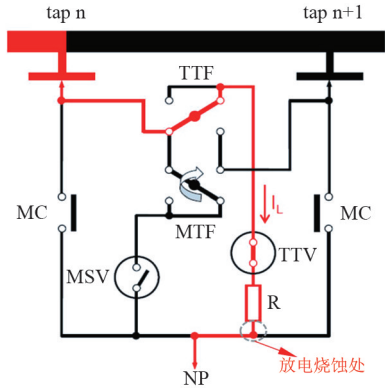


图4 VRG型有载分接开关的电气原理

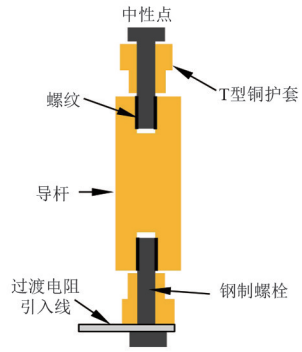
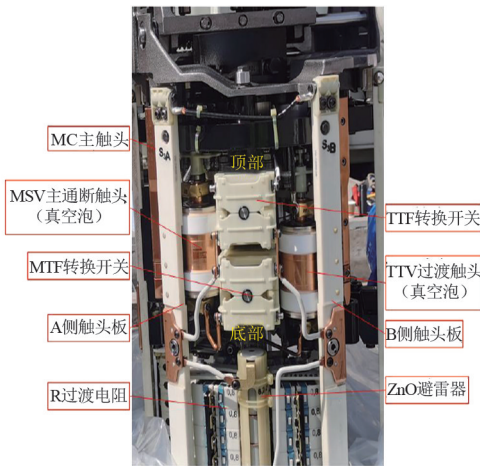


图6 连接中性点长导杆



(a) 机械结构

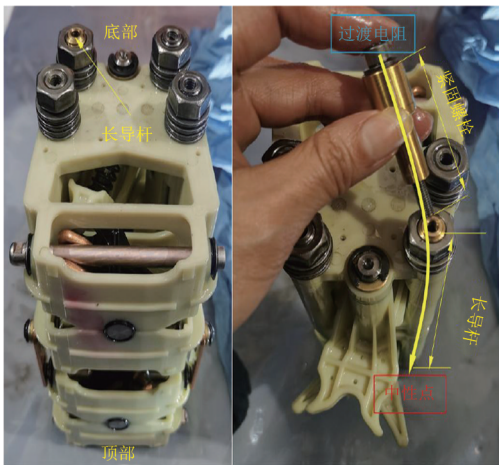


图5 过渡电阻连接中性点的区域

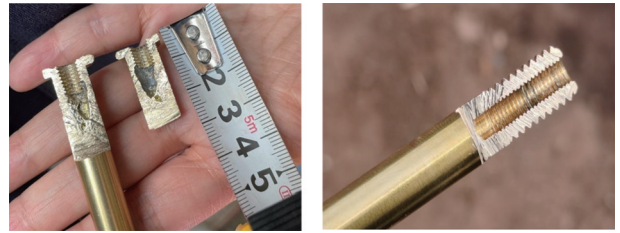


图7 导杆烧蚀螺孔行纵向切剖

综上所述,由于过渡电阻与中性点通过导杆过渡连接,导杆两端采用盲孔式平面压接载流。该结构(铜质)载流截面小,高度依赖盲头螺栓(钢质)对铜导杆的压接压力。如果压接不紧密或松动,就会造成钢质螺栓分流过热以及载流平面间间隙放电。

在现场及厂内检查,尚未发现造成螺栓松动的原因,初步认为是制造时安装工艺不到位所致。导致安装不良的因素包括:定距螺栓间隙混入异物、螺栓加工尺寸或材料性能未达到工艺要求以及力矩安装时螺栓未充分紧固等。

根据以上的原理和结构可知,螺栓松动引起接触电阻增大,导致过热烧蚀,一旦螺栓压接处烧完脱落,过渡电流支路将失去作用。由于负载电流无法转移,真空泡中电弧无法熄灭,使得主通断支路持续流过大电流,MTF转动时拉弧造成 tap n 和 tap n+1 级间短路,严重时致油室爆炸。因此,紧急更换烧蚀损螺栓和导杆,并按照厂内装配标准紧固螺栓等相关连接部位。

4 结论

上面分析了多台换流变压器的真空有载分接开关的油色谱,吊芯检查真空有载分接开关,分析造成乙炔增长的机理,提出修复措施,总结如下:

1) 过渡电阻与中性点连接处紧固螺栓和螺孔之间的松动是导致乙炔异常的直接原因;

螺纹配合。当螺纹旋紧时,T型铜护套与导杆紧密压接,负载电流可从压接端子流经铜护套,然后经金属导杆连接至中性点。

由于烧蚀发生在紧固螺栓与导杆连接处,对其中的一台的导杆烧蚀螺孔进行纵向切割,并与正常螺孔剖面比较,如图7所示。相比正常剖面,发现螺孔底部有约6丝螺纹被烧毁,并在底部形成明显烧蚀空洞,其余几台的情况均类似。

2) 目前真空有载分接开关检修规程乙炔注意值偏高, 需要进一步讨论和研究;

3) 真空有载分接开关的乙炔增长可以反映油室内部的缺陷状态, 加装油色谱在线监测装置是必要的。

参考文献

- [1] 沈大中, KRAEMER A, DOHNAL D. 真空有载分接开关在高压直流换流变压器中的运用[J]. 变压器, 2007, 5(1): 58-59.
- [2] 刘雪丽, 李金忠, 高飞, 等. ± 800 kV 换流变压器用真空式有载分接开关关键技术研究[J]. 中国电机工程

(上接第 73 页)

造成检测结果中各组分偏低, 而且会导致连续两个测定结果的重复性偏差较大, 尤其是奥斯特瓦尔德系数较小的 H_2 、 CO , 造成的负偏差较其他组分气体更大。

3.3 进样量把控不严

在色谱检测中, 另外一个最常见的引起误差的原因, 就是样品进样量把控不严, 进样量少于 1 mL, 则会引起检测结果各组分低于真实值; 进样量多于 1 mL, 则检测结果各组分高于真实值。从 6 号实验室的比对试验结果显示, 样品一的连续两次测定值的重复性很好, 但样品二的测定值 2 各组分明显高于测定值 1 中的量值, 如表 7 所示。可排除注射器密封不严的原因, 判断为检测人员进样量把控不严导致的。

表 7 6 号实验室的比对试验结果 单位: $\mu L/L$

样品名称	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	C_2H_2	H_2	CO	CO_2
样品一	测定值 1	2.06	1.15	1.21	0.49	15.53	67.74 360.33
	测定值 2	2.01	1.16	1.21	0.50	15.22	67.30 335.04
样品二	测定值 1	28.27	21.54	15.75	6.90	64.76	503.60 2 529.44
	测定值 2	29.89	22.35	16.34	7.18	67.25	521.53 2 596.05

4 结 论

由上面的分析可知, 影响变压器油色谱检测结果的因素有多种, 包括未准确输入试验环境信息、测量仪器零部件老化、检测过程中细节把控不严等, 对检测结果的影响也不尽相同, 可能导致油中溶解气体的单组分或多组分的产生较大偏差。为了提高油色谱数据质量, 更准确地掌握充油设备的状态, 对油色谱检测中仪器的维护、试验环节的把控提以下建议:

1) 每次试验时, 准确输入当前试验环境温度、

学报, 2016, 36(19): 5350-5356.

- [3] 张德明. 变压器真空有载分接开关[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [4] 郭贤珊, 李凤祁, 阮思焯, 等. 高压直流换流变压器有载分接开关控制优化[J]. 电力建设, 2021, 42(2): 9-19.
- [5] 电力行业电力变压器标准化技术委员会. 电力变压器分接开关运行维修导则: DL/T 574—2021[S]. 北京: 中国电力出版社, 2021.

作者简介:

骆欣瑜(1991), 男, 博士, 工程师, 从事变压器故障诊断和隐患机理研究。

(收稿日期: 2022-07-27)

大气压等环境信息;

2) 气相色谱仪应定期维护, 更换老化的零部件, 确认仪器的准确性和稳定性;

3) 每次标定气体前, 对标气瓶管路进行充分清洗, 并核对标气谱图的峰高、峰位置;

4) 使用的注射器无卡涩、密封良好, 试验时可用空白油对注射器进行浸润, 杜绝使用含故障特征气体浓度较高的绝缘油进行浸润;

5) 试验时, 准确读取 1 mL 样气, 若气样量不足 1 mL, 需准确填写实际进样量;

6) 在进行样品检测时, 尤其是低浓度样品, 注意对谱图进行人工确认, 及时去除干扰峰。

参考文献

- [1] 林永平. 色谱分析在变压器故障诊断中的应用和探讨[J]. 变压器, 2008, 45(8): 58-63.
- [2] 谢荣斌, 薛静, 张霖, 等. 基于油色谱分析的变压器故障诊断与应用[J]. 广电电力, 2017, 30(8): 117-121.
- [3] 吴立增. 变压器状态评估方法的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2005.
- [4] 电力行业电力变压器标准化技术委员会. 变压器油中溶解气体分析和判断导则: DL/T 722—2014[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [5] 全国电气化学标准技术委员会. 绝缘油中溶解气体组分含量的气相色谱测定法: GB/T 17623—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [6] 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, 2015.
- [7] 牟雪云, 李东东. 利用油中特征气体诊断变压器绝缘寿命[J]. 上海电力学院学报, 2014, 30(5): 433-442.

作者简介:

田倩倩(1989), 女, 硕士, 研究方向为电气设备绝缘介质检测及分析。(收稿日期: 2022-10-25)