

# 一起换流变压器产气故障的分析与诊断

杨在葆<sup>1</sup>, 杨城<sup>2</sup>, 刘永<sup>1</sup>, 韩凯<sup>1</sup>, 伊峰<sup>3</sup>, 高志新<sup>3</sup>

(1. 山东电力设备有限公司, 山东 济南 250022; 2. 大唐临清热电有限公司, 山东 聊城 252600;  
3. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 山东 济南 250003)

**摘要:**介绍了一起换流变压器的典型运维检修案例。首先,对返厂后进行的常规试验、耐压试验、感应电压试验、长时空载试验和过电流试验等成品试验结果进行了分析,确定了换流变压器内部存在过热故障;然后,通过吊芯解体发现换流变压器铁芯存在片间短接情况和绕组存在烧熔现象,印证了之前的试验判断;最后,对该系列产品后续的工艺改进和出厂试验提出了几点建议。

**关键词:**换流变压器;感应电压试验;长时空载试验;过电流试验;拆解检查

**中图分类号:**TM 406 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2024)02-0107-04

**DOI:**10.16527/j.issn.1003-6954.20240218

## Analysis and Diagnosis of A Gas Production Fault of Converter Transformer

YANG Zaibao<sup>1</sup>, YANG Cheng<sup>2</sup>, LIU Yong<sup>1</sup>, HAN Kai<sup>1</sup>, YI Feng<sup>3</sup>, GAO Zhixin<sup>3</sup>

(1. Shandong Power Equipment Co., Ltd., Jinan 250022, Shandong, China; 2. Datang Linqing Thermal Power Co., Ltd., Liaocheng 252600, Shandong, China; 3. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250003, Shandong, China)

**Abstract:** A typical operation and maintenance case of converter transformer is introduced. Firstly, the conventional test, withstand voltage test, induced voltage test, long-time no-load test and overcurrent test are analyzed after the converter transformer being returned to the manufacturer, and it is determined that there exists overheating fault inside the converter transformer. And through the disassembly of hanging core, it is found that the core of converter transformer is short circuited between pieces and the winding is burnt, which confirms the previous test judgment. Finally, some suggestions are put forward for the following process improvement and factory test of this series of products.

**Key words:** converter transformer; induced voltage test; long-time no-load test; overcurrent test; disassembly inspection

## 0 引言

随着旨在构建数字经济时代的关键基础设施上升为中国国家战略,作为新型基础设施建设代表的特高压工程迎来了又一个发展高潮。对于特高压直流工程来说,换流变压器是换流站中交、直流转换的关键设备,它能否安全、可靠、长期稳定运行关乎整个直流输电工程的成败与否<sup>[1-2]</sup>。目前,距中国最早建成的特高压直流输电工程已有将近10年的时间,已积累了较丰富的设备运维检修经验。

此前的换流变压器检修均基于现场故障后的就地分析判断进行<sup>[3]</sup>,方向性和目的性比较明确。但是与原厂检修相比,异地工厂化检修在设备、环境等条件方面会存在一定的差异。考虑到换流变压器内部结构复杂,且在工作过程中易受外界因素干扰,这些差异必将影响换流变压器最终的质量。同时,在工厂内以查找故障原因的诊断性试验尚无经验和参照标准可循。因此,换流变压器的异地工厂化检修是一个周期性、高风险性和技术含量都较高的过程。

下面介绍一台故障换流变压器返厂后的试验检测和解体检查,重点对故障区域的定位过程和故障

点的排查分析进行了探讨, 以期为换流变压器的异地工厂化检修提供参考借鉴。

## 1 故障概况

某直流输电工程中的一台高端 D 接换流变压器, 型号为 ZZDFPZ-386000/500-660, 额定电压为  $515/\sqrt{3}+(27/-3)\times 1.25\%$  kV/269.7 kV, 出厂日期为 2010 年 10 月, 投运日期为 2011 年 3 月, 交接试验与出厂试验数据接近且均无异常, 投运以来一直稳定运行。但 2016 年 12 月开始, 在线色谱检测装置检测到该换流变压器本体内总烃含量出现阶段性增长。2019 年 7 月, 油中总烃含量突增, 由  $375.18 \mu\text{L/L}$  增长至  $515 \mu\text{L/L}$ , 绝对产期速率为  $2\ 779.4 \text{ mL/d}$ , 远超注意值; 乙炔含量也略有增长, 从  $0.22 \mu\text{L/L}$  增长至  $0.43 \mu\text{L/L}$ , 绝对产期速率为  $4.17 \text{ mL/d}$ 。返厂前现场离线油样色谱数据见表 1, 初步判断该换流变压器内部存在过热点<sup>[4]</sup>。随后该换流变压器退出运行, 返厂进行试验检修和故障排查, 查找产气原因。

表 1 返厂前现场离线油样色谱数据

测试时间	油中溶解气体组分含量/ $(\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1})$						
	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>
2019-06-25	71.35	482.8	5054.7	179.3	63.0	132.6	0.22
2019-07-02	101.50	484.7	5027.4	244.3	83.4	186.8	0.43

注: 档位 28, 负荷 2000 MW。

## 2 工厂试验分析

### 2.1 常规试验

换流变压器进厂后, 对其进行了常规试验, 包括绕组直流电阻测量、电压比测量、绝缘电阻测量和绕组绝缘系统电容量和介质损耗因数测量试验结果正常且与出厂值比较差异不大, 该换流变压器可以进行后续的高电压绝缘特性试验和强度试验<sup>[5]</sup>。

### 2.2 耐压试验和感应电压试验

对换流变压器进行绝缘强度试验, 包括阀侧、网侧外施交流电压耐受试验和感应电压试验及局部放电测量, 外施交流电压耐受试验施加电压为出厂试验电压的 80%, 感应电压试验测量电压为  $1.3U_m/\sqrt{3}$ , 持续时间 1 h, 激发电压为  $1.5U_m/\sqrt{3}$ , 持续时间  $30 \text{ s}$ <sup>[6]</sup>, 试验频率为 200 Hz。

阀侧、网侧外施交流电压耐受试验期间无异常, 但在感应电压试验期间, 铁芯、夹件测试通道始终可以监测到 100 pC 左右局部放电量, 放电脉冲稀疏且

不对称<sup>[7]</sup>, 但是由于铁芯、夹件测量通道本身信噪比较大的缘故<sup>[8]</sup>, 目前阶段只能对此判断持谨慎态度。

### 2.3 长时空载试验

为判断该换流变压器磁路上是否存在故障, 进行长时空载试验。开启油泵, 阀侧施加  $1.1U_m$ , 持续时间 8 h, 期间每隔 2 h 对本体绝缘油进行色谱分析, 试验期间逐渐产生乙炔等特征气体, 产气量随时间的变化曲线如图 1 所示。根据 DL/T 722—2014《变压器油中溶解气体分析和判断导则》中故障类型判断依据, 三比值编码为 022, 故障类型为高温过热, 初步判断铁芯上存在多点接地或者片间局部短路的情况。

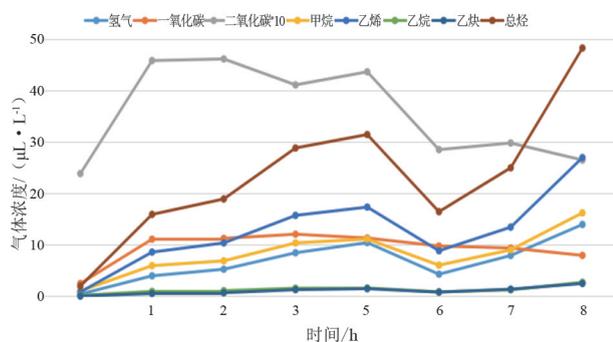


图 1 长时空载试验期间本体色谱变化曲线

### 2.4 过电流试验

为判断该换流变压器通流回路上是否存在故障, 经滤油后, 进行过电流试验, 试验过程中每隔 2 h 进行一次本体油色谱分析。试验以网侧送电, 阀侧短接的形式进行, 分接置额定 28 挡, 施加 1.1 倍额定电流。试验开始 2 h 后的色谱分析显示本体中氢气、乙炔及总烃的含量均超出注意值, 根据 DL/T 722—2014 中故障类型判断依据, 三比值编码为 021, 故障类型为中温过热, 判断典型故障可能为分接开关接触不良、引线连接不良、导线接头焊接不良、股间短路引起过热。

为查明故障点具体所在, 决定从两个极限分接和中间分接 (1、16、31) 对其进行持续的发热试验。每隔一段时间调整一次分接, 调整分接后, 适当升降电流, 以施加总损耗不变为基准<sup>[9]</sup>。试验共持续了 46 h, 如表 2 所示, 试验期间产气量随时间的变化曲线如图 2 所示。

表 2 变换分接的过电流试验

分接	阀侧电流/A	网侧电流/A	施加损耗/kW	持续时间/h
31	1460	1376	940	16
16	1570	1246	940	12
1	1615	1079	940	18



图 2 过电流试验期间本体色谱变化曲线

## 2.5 试验分析总结

根据常规试验结果数据判断,未发现该换流变压器存在绕组匝间短路、绕组断股、分接开关以及导线接头接触不良等故障。虽然绝缘电阻值较出厂值偏低,但比对本次试验值与出厂值的吸收比和极化指数相差不大,且介质损耗因数没有明显增大现象,考虑到该产品已运行多年,因此判断该换流变压器没有整体受潮情况<sup>[10]</sup>。

根据阀侧交、直流耐压试验结果判断,该换流变压器阀侧不存在绝缘问题;但由于感应电压试验时铁芯、夹件存在 100 pC 左右的局部放电量<sup>[11-12]</sup>,因此怀疑铁芯、夹件上存在金属性放电点。

根据长时空载试验和不同分接下过电流试验的油色谱数据的变化,得出以下几点判断:

1) 长时空载试验过程中,各种烃类气体增长明显,且上部含量大于下部,说明该换流变压器上部磁路存在故障点。

2) 过电流试验时,改变分接位置,在施加损耗保持不变的情况下,随着分接挡位的不断减小,阀侧电流一直不断增加,而网侧电流一直在下降;此时总烃随时间延长呈下降趋势,说明故障点与网侧通流回路施加电流大小有关<sup>[13]</sup>。

3) 1 分接下,阀侧通流回路电流最大,而此时总烃反而最小,判断故障点与阀侧通流回路无关。

4) 16 分接下,总烃含量随时间延长呈上涨趋势,而此时调压线圈及其相关部位均未在通流回路之中,判断故障点不在调压线圈、引线及开关上。

综上所述,通过开展一系列的检修试验并结合各试验项目对产品性能的考核范畴<sup>[14]</sup>,能够确定该换流变压器内部存在两个过热故障点,判断一个故障点位于主磁路上,一个故障点位于网侧通流回路上。

## 3 吊芯解体检查

基于成品试验分析,对该换流变进行吊芯解体

检查,检查发现以下问题:

1) 拆除上铁轭时,在上铁轭下部纸板上发现 1 处三角形硅钢片有烧蚀痕迹,下表面对应位置的硅钢片烧蚀,与其接触的纸板烧蚀,如图 3 所示。



图 3 三角形硅钢片烧蚀痕迹

分析判断此三角形硅钢片造成铁芯硅钢片片间短接,产生的内部环流引起铁芯局部过热是换流变压器长时空载试验时油中产生特征气体的主要原因。这也是试验阶段判断的主磁路上故障点所在。

2) 在拆除阀线圈上部手拉手位置的屏蔽铝管时,发现靠近线圈的屏蔽铝管上部存在过热痕迹,如图 4 所示。

分析认为此现象是屏蔽铝管与纸筒之间接触过于密实而形成了“死油区”,导致高温过热损坏绝缘。根据绝缘表面碳化的痕迹与程度来判断,这一情况应该是长期运行工况下热油持续不断影响所致,并不是试验阶段产生的,此处损伤痕迹并不是产生特征气体的故障点之一。



图 4 铝屏蔽管发热痕迹

3) 在拆除网线圈绝缘检查时,发现柱 2 网线圈第 3 饼和第 4 饼之间纠结线有严重烧熔现象,如图 5 所示。

根据纠结线烧熔的情况并结合各项试验数据分析,此处纠结线熔断的原因是纠结线焊点虚焊造成的。运行过程中该位置已出现了过热熔化现象,而

工厂检修进行过电流试验时,由于试验施加电流高于运行电流,使得该部位绝缘进一步碳化,进而产生特征气体。由此能够明确此处纠结线烧熔是试验阶段判断的网侧通流回路上的故障点所在,同时也是造成现场运行过程中总烃超标的根本原因。



图 5 纠结线烧熔痕迹

## 4 结 论

上面介绍了一起换流变压器的内部特征气体超标现象的试验判断与处理案例,在综合考虑换流变压器损坏程度、拟修复执行情况等多种因素且具备试验条件的情况下,以尽量全面和严格为原则作为工厂化检修与故障诊断的准绳,同时本着节省人力、物力的原则,快速、准确的判断产品故障将是工厂化检修的主要目标。

由于与传统发生的单故障点不同,该台换流变压器存在两处不同的故障点,在试验判断和拆解检查中增加了很多不确定因素。排查过程中,首先,通过吊罩检修前的试验分析,初步确定了两处故障点,分别是铁芯、夹件上的放电问题和网侧线圈上的过热问题;然后,通过放油、吊罩及有目的解体检查,最终发现了故障点的具体位置。

针对两处不同类型的过热故障原因,在生产工艺和试验分析上提出以下建议:

1) 因该换流变压器夹件结构为板式结构、无侧梁,无法放置梯木垫块支撑,导致铁芯在加紧后边角出现松动现象,此为裁剪铁片进入铁芯的直接原因。建议改进铁芯钢拉带固定板固定方式和铁芯夹紧工艺,固定方式由单向紧固改为双向紧固,同时用纸板条填充铁芯间隙位置。填充前纸板条表面涂胶确保与铁芯片粘接可靠。

2) 对故障产品进行的修理前试验,应该根据不同部件的功能进行全方位和有针对性的试验诊断,

原则上每个功能部件都应该在绝缘强度和载流发热上进行考核。

3) 试验时可适当改变原有试验项目规定的施加电压、电流和施加时间,以便能够更明显地暴露该部位的缺陷。

### 参考文献

- [1] 李原. 直流电压下油纸复合绝缘局部放电特性研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2018.
- [2] 李军浩, 韩旭涛, 刘泽辉, 等. 电气设备局部放电检测技术述评[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2583—2601.
- [3] 王有元, 龚森廉, 廖瑞金, 等. 电力变压器油纸绝缘可靠性与老化特征参量间的相关性[J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1100—1105.
- [4] 全国高电压试验技术和绝缘配合标准化技术委员会. 高电压技术 局部放电测量: GB/T 7354—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [5] 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: 中国标准出版社, 2015.
- [6] 电力行业高压试验技术标准化技术委员会. 电力设备局部放电现场测量导则: DL/T 417—2006[S]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [7] 杨在葆, 时东伟, 马华辉. 双柱式 1000 MVA/1000 kV 特高压自耦变压器消磁线圈的研究[J]. 变压器, 2018, 55(11): 7—10.
- [8] 国家电网公司. 电力设备高频局部放电带电测试技术现场应用导则: Q/GDW 11400—2015[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [9] 薛继印, 杨在葆, 韩克俊, 等. 剩磁对变压器感应电压试验影响的研究与分析[J]. 变压器, 2020, 57(5): 37—39.
- [10] 杨在葆. 基于并联谐振原理对±800 kV 换流变压器进行局部放电试验的研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- [11] 王健, 李喆. 模拟变压器内部放电及局部过热对油中气体含量的影响[J]. 绝缘材料, 2017(3): 62—65.
- [12] 廖瑞金, 杨丽君, 郑含博, 等. 电力变压器油纸绝缘热老化研究综述[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 1—12.
- [13] 欧小波, 周丹, 林春耀, 等. 油浸式电力变压器老化及寿命评估研究综述[J]. 南方电网技术, 2015, 9(9): 58—70.
- [14] 李清泉, 李斯盟, 司雯, 等. 基于局部放电的电力变压器油纸绝缘状态评估关键问题分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(8): 2558—2565.

### 作者简介:

杨在葆(1983), 男, 硕士, 高级工程师, 从事高压、超高压、特高压试验工作。

(收稿日期: 2023-05-04)