

# 一起变压器铁芯油道堵塞导致过热的缺陷分析与治理

李馨博

(国网四川省电力公司天府新区供电公司,四川 成都 610041)

**摘要:**文中分析了一起220 kV变压器因铁芯油道堵塞造成的发热缺陷。通过油中溶解气体分析判断变压器内部存在中温过热问题,内部绝缘存在劣化隐患。返厂解体后,发现铁芯柱内部、铁芯柱与低压线圈内纸筒之间的油隙较小以及部分硅钢片毛刺较大,导致铁芯内部和外表面油流不畅、铁芯散热能力较低,造成铁芯、夹件绝缘材质老化。利用仿真建模方法,发现拉板温升异常。对铁芯柱内部油道绝缘、铁芯结构、散热器进行改进,提高了铁芯散热性能。

**关键词:**变压器;油道;发热;老化

中图分类号:TM 41 文献标志码:B 文章编号:1003-6954(2023)01-0073-05

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20230114

## Analysis and Treatment on Transformer Core Overheating Caused by Blockage of Oil Channel

LI Xinbo

(State Grid Tianfu New Area Electric Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** A heating defect caused by a blocked oil channel of 220 kV transformer core is analyzed. The dissolved gas-in-oil analysis determines that there is a medium-temperature overheating problem inside the transformer and a potential risk of deterioration of the internal insulation. After the disassembling in the factory, it is found that the oil gaps inside core limbs and between core limb and paper cylinder in low-voltage coil are small, and some of silicon steel pieces have large burrs, so it causes the poor oil flow on the inner and outer surfaces of core and the low heat dissipation capacity of core, which causes the aging of insulation materials of core and clamps. Using the simulation modeling method, abnormal temperature rise of pulling plate is found. The improvement for internal oil channel insulation, core structure and radiator of core limb are carried out, thus to improve the heat dissipation performance of the core.

**Key words:** transformer; oil channel; heating; aging

## 0 引言

变压器作为电网系统的核心,其健康状态直接影响整个电网运行的安全稳定<sup>[1]</sup>。发热导致的绝缘受损是常见的多发性故障,会对变压器的使用寿命和安全稳定运行造成不利影响<sup>[2]</sup>。变压器内部包括绝缘油、绝缘纸在内的绝缘材料在温度过高的状态下会产生劣化,影响绝缘性能,危及变压器的正常运行<sup>[3]</sup>。

下面分析了一起某220 kV变压器内因铁芯油道

堵塞而造成过热,最终导致铁芯夹件绝缘老化的缺陷。通过长周期油化监督、现场吊罩检查和返厂维修,发现内部多处绝缘受损,并通过仿真模拟辅助分析故障原因,对主变压器内部结构进行针对性改进。

## 1 设备缺陷概况

变压器油中溶解气体可以反映设备内部的绝缘状态,采用基于色谱分析法的油化试验可以辅助判断设备运行状况<sup>[4]</sup>。变压器因绝缘老化、劣化会产生包括 $H_2$ 、 $CH_4$ 、 $C_2H_6$ 、 $C_2H_4$ 、 $C_2H_2$ 、 $CO$ 及 $CO_2$ 在内

的多组分气体。依靠各特征气体的组分及含量可以有效判断变压器内部的绝缘情况,是变压器故障诊断的重要手段<sup>[5]</sup>。

某 220 kV 主变压器于 2007 年投运,型号为 SF-SZ-180 000/220。从 2017 年 4 月起,该主变压器油中溶解气体含量超过注意值。

从 2007 年投运至 2021 年 5 月,该主变压器总共开展 54 次油化监督试验(油化监督试验数据节选见表 1)。2017 年 4 月前的 19 次试验,结果均正常。2017 年 4 月后,总烃相对产气速率明显上升,超注意值(10%);2019 年 1 月后,总烃含量超注意值(150  $\mu\text{L/L}$ ),其主要增长气体为甲烷、乙烯,无乙炔,初步判定变压器内部无放电现象。按照行业标准<sup>[6]</sup>中的故障判断方法,三比值编码 021,  $\text{CO}_2/\text{CO} > 7$ ,属于中温过热(300~700  $^{\circ}\text{C}$ ),怀疑主变压器内部存在局部过热造成固体绝缘劣化。

表 1 主变压器油化监督数据(节选) 单位: $\mu\text{L/L}$

组分	测试值			
	2017-04	2019-01	2020-05	2021-04
H <sub>2</sub>	6.40	29.60	35.12	28.05
CO	29.90	288.60	326.95	265.38
CO <sub>2</sub>	551.70	2041.90	2297.12	1342.03
CH <sub>4</sub>	0.60	116.20	172.55	208.95
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	6.20	51.40	90.69	123.18
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1.40	45.80	68.76	86.74
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	0	0	0	0
总烃	98.20	213.50	332.00	418.87

利用红外热成像技术对电力设备进行检测的方法可以有效发现设备中的发热缺陷<sup>[7]</sup>。如图 1 所示,红外测温结果表明,变压器整体温度无异常,但受其外观结构影响,无法精确检测低压侧套管温度,仅能从低压侧散热器缝隙测量极少部分低压侧箱体温度。同时,变压器油作为散热介质,具有流动性,无法直接反映出变压器内部某处发热点。因此,红外测温结果不能作为该变压器发热缺陷诊断的直接依据。

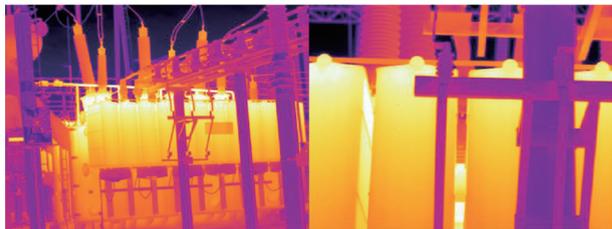


图 1 红外测温成像

2019 年 11 月,低压侧直流电阻测试结果为三相互差为 1.9%,超过标准值(1%)。该主变压器的首检(2008 年 11 月)测试数据为三相直流电阻互差 1.1%,也超过标准值。铁芯、夹件间绝缘测试发现,夹件对铁芯的绝缘仅为 75 M $\Omega$ ,但无历史数据进行对比。其余试验数据正常。

该主变压器高频电流测试与铁芯电流测试结果无异常,铁芯、夹件泄漏电流均远小于标准值,排除环流引起发热可能。

结合例行试验数据,初步分析造成该主变压器试验数据不合格有以下两种可能:1) 低压侧绕组接头存在接触不良;2) 铁芯过热造成铁芯夹件绝缘老化。

## 2 解体及故障原因分析

现场吊罩后,开展铁芯对地、夹件对地和铁芯对夹件绝缘电阻测试。结果如表 2 所示,当铁芯(夹件)接地,铁芯(夹件)对地绝缘电阻低于 100 M $\Omega$ ,使用 5000 V 绝缘电阻表测试时,铁芯-夹件 B 相靠低压侧下部处有放电声。因该主变压器底部为船型结构,无法准确观测放电位置。综合诊断,该主变压器铁芯-夹件间绝缘已受损。

表 2 铁芯、夹件绝缘电阻测试数据

测试项目	测试状态	测试电压/ V	绝缘电阻/ M $\Omega$	放电位置
铁芯对地 绝缘电阻	夹件未接地	2500	>10 000	无
		5000	>10 000	无
	夹件接地	2500	80	无
		5000	2	B 相下部
夹件对地 绝缘电阻	铁芯未接地	2500	>10 000	无
		5000	>10 000	无
	铁芯接地	2500	100	无
		5000	2	B 相下部
铁芯对夹件 绝缘电阻	未接地	2500	60	无
		5000	2	B 相下部

该主变压器返厂后解体检修。铁芯为三相五柱四框式结构,三相芯柱呈现中间断开,有 6 mm 油道,内嵌约 5 mm 油道绝缘纸板,分为 4 个口字型框,如图 2 所示。

拆除上铁轭后,分别拆除调、高、中、低压线圈,如图 3 所示。拔出低压线圈的过程中,阻力非常大,尤其是 B 相低压线圈内撑条无规则排列,内纸筒上



图 2 吊罩绕组、铁芯、夹件结构

端部有重压变形现象。检查低压线圈内侧匝绝缘的方向,发现上、下和侧面都有挤压和摩擦痕迹,说明在制造阶段,低压线圈套装时过紧,在反复转动和重压下套装,导致线圈内匝绝缘破损、纸筒上端部损伤、撑条排列不规则等问题。



图 3 B 相铁芯及低压绕组内侧

破开低压内纸筒后,铁芯柱绑扎的无纬玻璃丝粘带破损严重,铁芯拉板、拉板绝缘、无纬带、绝缘纸板多处存在发黑变色情况,如图 4 所示。经现场测量,铁芯柱直径为 880 mm,内纸筒内直径为 885 mm,无纬带厚度为 2 mm,铁芯柱与内纸筒纵向油通道不到 1 mm。



图 4 多处拉板、无纬带、绝缘纸板发黑

进一步解体铁芯,发现部分硅钢片毛刺较大(达到 0.03~0.04 mm),B 相铁芯油道绝缘有破损并发黑,铁芯柱叠片端面有锈迹,铁芯柱油道两侧硅钢片有过热痕迹,B 相铁芯柱油道绝缘表面碳化发黑,B 相铁芯柱硅钢片及油道之间的绝缘板发黑,如图 5 所示。



图 5 铁芯解体后多处碳化发黑

检查低压绕组导体无异常,各接头无松动、无明显发热痕迹,如图 6 所示。低压侧直流电阻三相互差超标原因为低压绕组 A 相至 C 相连接为单铜排且接线过长。因此,排除该主变压器内局部过热是由低压侧绕组接头接触不良引起。



图 6 低压绕组接头无松动、发热痕迹

初步分析结果为:铁芯柱内部油道有效宽度仅 3 mm,铁芯柱与低压线圈内纸筒之间的油隙不足 1 mm,部分硅钢片毛刺较大,这造成油流不畅、散热不良,使得铁芯柱和拉板产生的热量不能有效释放,出现局部过热现象。这是导致铁芯、夹件绝缘老化的原因。

### 3 温升仿真分析

该变压器铁芯为三相四框式结构,变压器器身

及油箱为沿长轴侧近似呈左右对称的结构。为了有效简化计算模型,采用半模型进行仿真计算。基于 EImag-3D 软件,按照解体实测参数建立仿真模型,如图 7 所示。铁芯芯柱由内到外依次套装低压绕组、中压绕组、高压绕组及调压绕组。

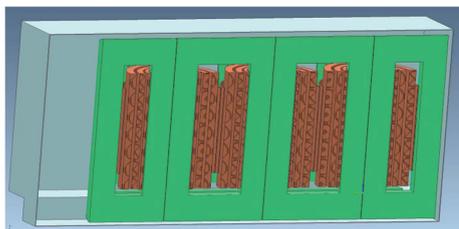


图 7 变压器模型

设环境温度为 40 ℃,选取变压器中压满载(中压 180 MVA 有功负载、低压不带负载)和该变压器近年最大负荷(中压 160 MVA 有功负载、低压 40 MVA 容性负载)两种情况进行仿真,得到各结构件温升结果如表 3 所示。

表 3 变压器结构件局部最热点温升

部位	温升/K	
	中压 180 MVA 负载, 低压不带负载	中压 160 MVA 负载, 低压 40 MVA 容性负载
油箱箱壁	37.2	35.5
油箱箱盖	32.1	32.5
上夹件腹板	33.5	32.1
下夹件腹板	34.1	32.5
拉板	96	105.5

在中压 160 MVA 负载、低压 40 MVA 容性负载的情况下,仿真模型的温度分布云图如图 8、图 9 所示。

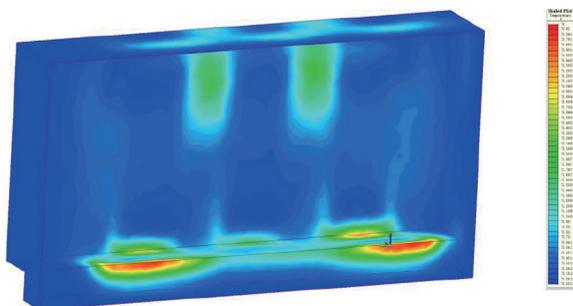


图 8 变压器油箱温度分布云图

根据仿真计算结果可知,该变压器油箱箱壁、油箱箱盖、上夹件腹板、下夹件腹板温升正常,但拉板存在温升较高的局部过热异常现象。仿真结果与解体表象基本一致。

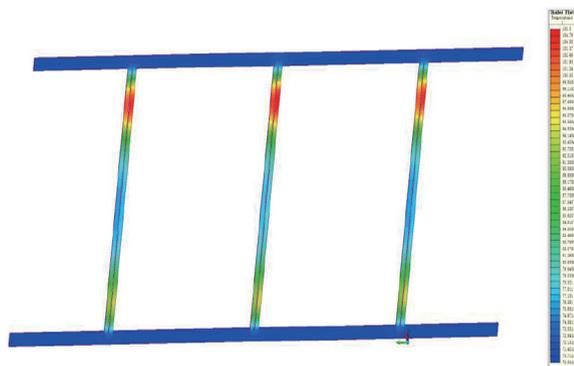


图 9 变压器夹件腹板温度分布云图

## 4 结构改进方案

国家标准<sup>[8]</sup>中对于变压器结构件局部过热的要求是:对于铁芯、裸露的电气连接钱、电磁屏蔽及油箱上的结构件,均不规定温升限值,但仍要求其温升不能过高,以免使其相邻的部件受到热损坏或使绝缘液体过度老化。

基于吊罩解体检查及仿真分析结果,设计了针对性的结构性改进方案。

### 4.1 受损材料处理

铁芯仍使用原件,放倒重新叠装。在叠片过程中清理端面锈迹、表面污物、毛刺等,更换表面有烧蚀和凹坑的硅钢。铁芯柱内部的油道绝缘、拉板绝缘、夹件绝缘等绝缘件全部更换。中压、高压、高调线圈检查清理后继续使用原件。除低压线圈内绝缘件外,其他绝缘件清理后继续使用,更换个别破损绝缘件。

### 4.2 芯柱内部油道绝缘改进

取消薄的绝缘隔板,改进绝缘垫板结构。与铁芯接触的两个侧面开槽增加油道,增加铁芯散热面。改进铁芯芯柱和旁柱的绑扎结构,采用聚酯带绑扎结构。取消拉带下纸板,在保证绑扎强度的条件下,减少铁芯表面覆盖。

### 4.3 铁芯结构改进

在不改变结构框架的前提下,改进铁芯绑扎结构、铁芯绝缘件结构和低压线圈内纸筒套装结构,是提高油流散热能力的有效措施。铁芯绝缘件全部采用耐热性能较高、绝缘性能良好的环氧酚醛玻璃布板。低压线圈内纸筒内径增大 4 mm,纸筒厚度由 5 mm 改为 3 mm,铁芯柱与内纸筒纵向油流通道由不足 1 mm 改进至 3 mm,增加进入铁芯

与低压线圈内纸筒之间油路的油流量。

#### 4.4 散热器改进

该主变压器增加 2 组散热器,抬高散热器中心高度。在保障该变压器自身绝缘结构完好的基础上,进一步增强主变压器的散热能力。

结构改进后,在环境温度 40 ℃、中压 160 MVA 负载、低压 40 MVA 容性负载的运行工况下,拉板温升值约为 85 K,较改进前降低约 20 K。

## 5 结 论

上面某 220 kV 主变压器因设计和安装工艺不良,铁芯柱内部油道、铁芯柱与低压线圈内纸筒之间油隙过小,导致油流不畅、散热能力下降,造成主变压器内部中温过热使铁芯、夹件绝缘材质老化,绝缘性能降低甚至失效。通过改进铁芯柱内部油道绝缘结构、铁芯绑扎结构、绝缘件材质,增大进入铁芯内部油道和铁芯与低压线圈内纸筒之间油路的油流量,提高了铁芯散热能力,通过增加两组散热器,提高该主变压器整体散热能力,改进后拉板温升降低 20 K。

在长期的变压器油化监督中发现了这起重大缺陷并及时治理,成功消除了变压器事故隐患,这也为变压器相关缺陷诊断和检修提供了参考。

#### 参考文献

- [1] 罗杨,杨红权,刘彦琴,等.一起主变压器高压绕组损坏事故检测与分析[J].四川电力技术,2021,44(5):59-63.
- [2] 温建,程汉湘.变压器绕组异常发热故障的检查及预防[J].广东输电与变电技术,2007(2):60-63.
- [3] 李惠明.主变压器中性点套管端部发热分析[J].电力安全技术,2022,24(1):54-57.
- [4] 李志军,周淙,邢来,等.一起主变 C 相套管连接结构发热故障的分析[J].变压器,2019,56(2):78-81.
- [5] 王稼轩.变压器故障特征气体拉曼光谱检测反向传播人工神经网络定量方法研究[D].重庆:重庆大学,2021.
- [6] 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 7252—2014[S].北京:中国电力出版社,2015.
- [7] 罗舜.电力变压器套管将军帽发热故障的红外诊断分析[J].变压器,2018,55(1):50-53.
- [8] 全国变压器标准化技术委员会.电力变压器 第 2 部分:液浸式变压器的温升:GB/T 1094.2—2013[S].北京:中国标准出版社,2014.

#### 作者简介:

李馨博(1984),女,硕士,高级工程师,主要研究方向为电网安全及资源管理。

(收稿日期:2022-08-08)

(上接第 17 页)

- [8] 王巨丰,吴东,李国栋,等.10 kV 多断点灭弧防雷间隙熄弧特性研究及应用[J].高电压技术,2017,43(5):1589-1595.
- [9] 郭婷,周文俊,黄海鲲,等.多间隙灭弧结构熄灭工频电弧的仿真与试验[J].中国电机工程学报,2016,36(10):2853-2861.
- [10] 司马文霞,贾文彬,袁涛,等.多段微孔结构中电弧的磁流体模型及气吹弧性能仿真[J].高电压技术,2016,42(11):3376-3382.
- [11] PODPORKIN G V, ENKIN E Y, KALAKUTSKY E S, et al. Overhead lines lightning protection by multi-chamber arresters and insulator-arresters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1): 214-221.
- [12] 熊佳明,李黎,戴宏宇,等.基于爆炸波及能量平衡理论的大电流冲击电弧的冲击波超压作用分析[J].中国电机工程学报,2018,38(22):6746-6753.

- [13] TAYLOR G. The formation of a blast wave by a very intense explosion. II. The atomic explosion of 1945 [J]. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences, 1950, 201(1065): 175-186.
- [14] 张宝坪,张庆明,黄风雷.爆轰物理学[M].北京:兵器工业出版社,2001.
- [15] 罗兴柏,张玉令,丁玉奎.爆炸力学理论[M].北京:国防工业出版社,2016.
- [16] 电力行业过电压与绝缘配合标准化技术委员会.配电网架空绝缘线路雷击断线防护导则:DL/T 1292—2013[S].北京:中国电力出版社,2014.

#### 作者简介:

唐佳雄(1997),男,硕士,主要研究方向为输配电网防雷接地。

(收稿日期:2022-09-25)