

一起换流变压器油箱局部过热分析与维修

许巧云¹, 王渝淇², 杜文娇¹, 殷江¹, 陈红日³, 熊紫兰²

(1.广东电网有限责任公司江门供电局, 广东 江门 529030; 2.华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 3.国网电力科学研究院武汉南瑞有限责任公司, 湖北 武汉 430074)

摘要:对一起换流变压器油箱局部过热现象进行了分析,详细介绍了故障概况、试验结果及分析过程,通过有限元仿真换流变压器的漏磁场分布情况,验证了故障分析的正确性,并提供了改进方案。

关键词:换流变压器;局部过热;调压引线;漏磁;仿真分析

中图分类号:TM406 文献标识码:B 文章编号:1001-8425(2021)07-0083-05

DOI:10.19487/j.cnki.1001-8425.2021.07.017

Analysis and Maintenance of Partial Overheat of a Converter Transformer Oil Tank

XU Qiao-yun¹, WANG Yu-qi², DU Wen-jiao¹,
YIN Jiang¹, CHEN Hong-ri³, XIONG Zi-lan²

(1.Jiangmen Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Company, Jiangmen 529030, China;2.State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3.Wuhan NARI Limited Liability Company of State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract:The partial overheat phenomenon of a converter transformer oil tank is analyzed. The fault phenomenon, testing results and analysis process are introduced in detail. The leakage magnetic field distribution of the converter transformer is calculated through finite element method, the accuracy of the fault analysis is verified. The improvement plan is provided.

Key words:Converter transformer; Partial overheat; Voltage regulation leads; Leakage magnetic; Simulation analysis

1 引言

换流变压器是直流输电系统中的关键设备,负责连接交流电网和直流线路,其运行可靠性至关重要。变压器的使用寿命与绝缘材料的寿命息息相关,绝缘材料在长期的高温作用下会很快老化损坏。若正常运行中变压器的油顶层或绕组温升过高,绝缘材料的老化速度将会加快,严重缩短了变压器的使用寿命。因此,GB 1094.2-2013《电力变压器 第2部分:液浸式变压器的温升》中对变压器的温升限值作了明确的规定。

漏磁场的大小及分布对大容量变压器的温升有着极大的影响。换流变压器的漏磁场有一部分是由调压引线电流产生的,其值与引线电流的大小以及引线的几何位置都有着密切的关系。

漏磁在结构件中引起很大的附加损耗,不仅会降低变压器的效率,而且由于漏磁场分布十分复杂,某些结构件可能会因损耗过大而导致局部温升过高,影响变压器的寿命,威胁变压器的安全运行,严重时将造成事故。因此,对大容量变压器进行漏磁场计算分析,其结果可作为理论依据,指导实际生产中减小漏磁的相关措施,具有重要的工程意

基金项目:中国南方电网有限责任公司科研项目:GDKJXM20184425(030700KK52180140)

义。

本文中笔者对一台换流变压器进行温升试验,对试验过程中油箱局部过热的现象进行了故障原因查找与仿真分析,并针对试验现象和仿真结果提出了相应的改进措施。

2 故障换流变压器基本情况

2.1 换流变压器基本参数

本台换流变压器结构为单相四柱式(两个心柱、两个旁柱),绕组为两柱并联,采用单相双绕组结构。产品额定容量 390.43MVA;电压比为 $520/\sqrt{3}$ kV/165.65kV;联结组别为 Ii0。

2.2 故障情况介绍

按照相关标准依次对该换流变压器开展如下测试:变比-直阻-绝缘电阻-介损-负载,试验结果均正常。当使用最小分接挡位进行温升试验时,红外测温监测发现油箱表面出现两处过热点,过热点位置如图 1 所示,此时环境温度为 33.85℃。两处过热点位置的最高温度分别达到 133.2℃和 129.0℃,对应的铁件温升分别达 99.35K 和 95.15K,超出了 75K 的温升限值,不符合要求。

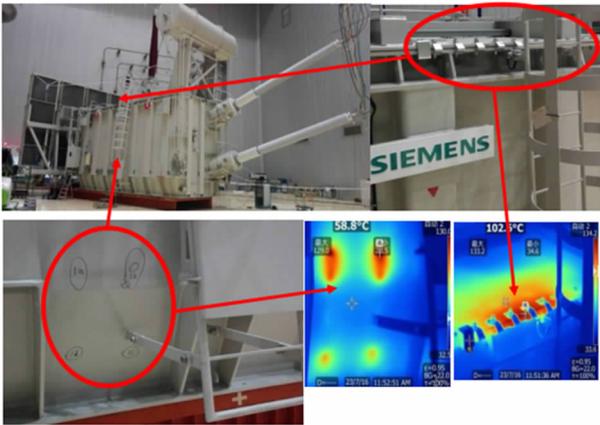


图 1 油箱过热点位置

3 故障查找与分析

3.1 故障原因查找

根据试验现象,检测到箱壁过热点位于爬梯处,此处对应于器身引线的垂直部分。由于本台换流变压器容量大,结构复杂,根据工程相关经验,可知大容量换流变压器调压分接引线电流产生的强大漏磁场,会在夹件、拉板等结构件组成的回路中产生感生环路电流,引起较大的损耗。据此,该项目在设计阶段,为了降低夹件和拉板上由于环流产生的附加损耗,调压引线采取了从两柱中间走线的布置方式,如

图 2 所示。

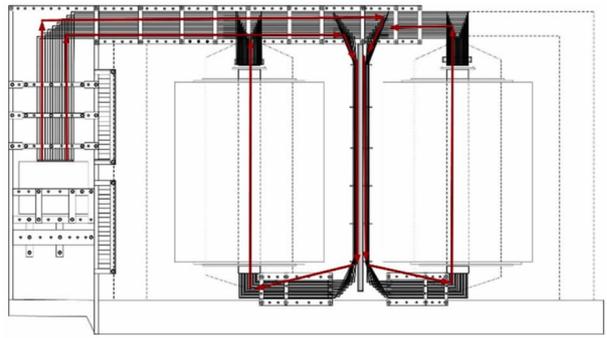


图 2 调压引线布置方式以及调压引线电流方向

进一步了解最小分接运行时油箱局部温升试验异常的原因,发现在最小分接位置上,调压绕组共有 15 级引线连结成环。受限于空间位置以及结构的设置,15 根调压引线从端部并排引出,且每根引线的电流流向是一致的,这就相当于单柱的调压引线电流可以等效为 15 根相同电流方向的引线电流叠加总和。在最小分接挡位做温升试验时,调压绕组电流处于最大值,此时调压绕组中每根引线中的电流为 1 514.5A,根据 1.05 倍的额定损耗,因此可得单柱引线中总的电流为 $15 \times 1\ 514.5/2 = 11\ 358.75\text{A}$ 。而该项目的引线布置方式导致两柱垂直部分调压引线中流过的电流方向相同。也就是说在两柱中间的垂直引线中总的电流为 $(15 \times 1\ 514.12/2) \times 2 = 22\ 717.5\text{A}$ 。高达两万多安培的引线电流可能导致该引线区域漏磁偏大,漏磁穿过油箱导致箱壁铁件损耗过大,出现局部过热点。

3.2 故障建模仿真

为了进一步验证故障原因,使用 COMSOL Multiphysics 软件建模进行了电磁场模拟计算。

图 3 为本台换流变压器的油箱内部器身实物图,可见实际的换流变压器几何结构十分复杂,要使用软件对其仿真计算,重要前提是进行合理的结构简化。



图 3 油箱内部器身

为了模拟换流变压器最小分接挡位运行时的漏磁场真实情况,根据实际换流变压器的结构,建立了简化后的三维电磁场仿真模型。

换流变压器三维模型由铁心、夹件、网侧绕组、阀侧绕组、调压引线、磁屏蔽以及油箱组成,图 4a 为内部绕组与引线结构模型图,图 4b 为加了磁屏蔽后的模型图。其中,根据分析,单柱的调压引线电流可以等效为 15 根相同电流方向的引线电流叠加总和,因此,在不影响计算精度的前提下,建模时将 15 根调压引线等效为一根大的铜排引线。

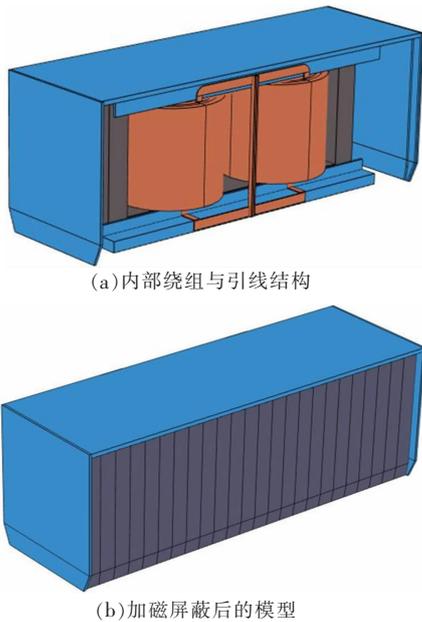


图 4 换流变压器三维仿真模型

表 1 为换流变压器各结构件的材料参数。铁心材料选择非线性的 $B-H$ 曲线来模拟磁性能,其余材料的相对磁导率设置为常数。

仿真采用有限元方法求解换流变压器的漏磁场分布,其计算的理论基础就是麦克斯韦方程组,具体求解公式如式(1)~式(4)所示。

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \tag{1}$$

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \tag{2}$$

$$\nabla \cdot D = \rho \tag{3}$$

$$\nabla \cdot B = 0 \tag{4}$$

式中, E 是电场强度, V/m ; J 是传导电流密度,

表 1 换流变压器结构件材料参数

材料	电导率/ $S \cdot m^{-1}$
(铁心) G94-2021 (硅钢片叠片(27D084))	2.22×10^7
夹件、油箱	普通钢(Q345B) 6.48×10^6
绕组、调压引线、磁屏蔽	铜 5.80×10^7

单位为 A/m^2 ; D 是电位移矢量, C/m^2 ; B 是磁感应强度, T ; H 为磁场强度, A/m , ρ 是电荷密度, C/m^3 。

当介质各向同性时,电磁场与介质特性量满足式(5)~式(7)。

$$D = \epsilon E \tag{5}$$

$$B = \mu H \tag{6}$$

$$J = \sigma E \tag{7}$$

式中, ϵ 是媒质的介电常数, F/m ; μ 是磁导率, H/m ; σ 是电导率, S/m 。

根据上述数学模型,给定正确的边界条件以使仿真模型收敛。本模型假设绕组的线径小于集肤深度,使用磁场模块中的“线圈”特征来模拟网侧绕组和阀侧绕组,且在本模型中不考虑各个绕组中的涡流。采用外接电路的方式注入励磁电流作为绕组的边界条件,根据实际工程的运行参数,设置输入电压大小、线路频率、绕组匝数等多个重要设计参数。

模型的求解速度以及计算精度与网格的剖分质量密切相关,网格剖分稀疏可能造成计算的不准确,而剖分过密又会占用大量计算机内存,严重降低计算速度,因此需要合理进行网格剖分,提高模型的计算效率。本模型在铁心处以及调压引线处采用极细化网格剖分,其余部分采用常规的网格大小进行剖分,最终网格单元数量为 253 643,网格单元质量如图 5 所示,平均网格质量为 0.62,满足该模型的电磁场求解。

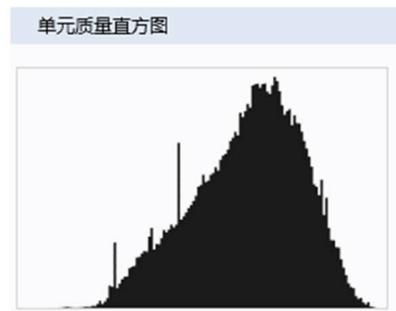


图 5 网格单元质量直方图

对于大容量变压器的模拟仿真,由于使用了非线性 $B-H$ 曲线的铁心材料,使得模型求解方程具有很高的非线性,因此需要对求解器进行设置。结合所分析的模型,选择全耦合方法进行求解,其收敛性好,迭代次数少,设置瞬态场时间步长为 $5e^{-4}$,为保证模型收敛,将最大迭代次数设为 25 次。

计算得到的油箱漏磁场分布如图 6 所示。磁场模拟结果中的漏磁偏大处分布在调压引线对应的油箱上、下端部位,上端漏磁更为集中,数值也更大,下端漏磁较为分散,但引线区域处的漏磁相较其他区

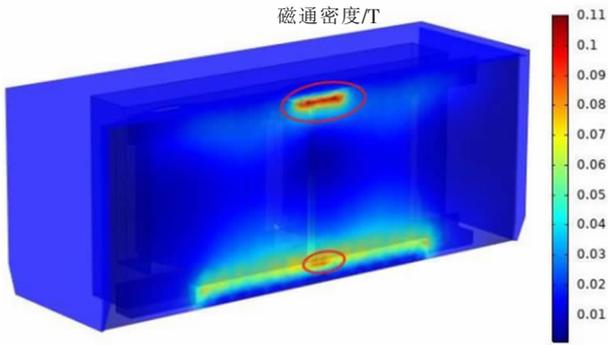


图 6 油箱漏磁场分布云图

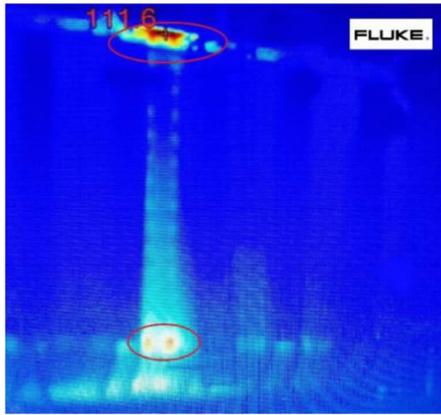


图 7 最小分接试验时热成像图

域要偏大。对比图 7 最小分接试验时热成像图可知,监测到的两处过热点也为油箱中部靠近调压引线处的端部,上端部较下端部的高温区域更大,最高温度最高达 133.2°C 。经比对可知,磁场模拟结果中的漏磁偏大处和温升试验时的过热点位置相同,由此验证了故障查找的分析,局部过热点产生的原因是由于引线电流过大导致该区域的漏磁偏大。

3.3 故障原因分析

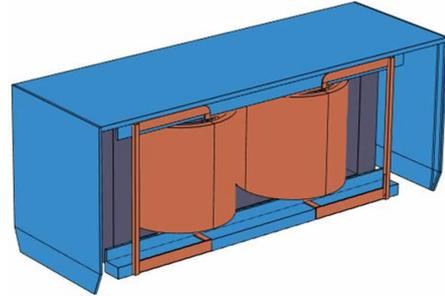
经过工程分析以及建模仿真,认为温升试验油箱局部过热的根本原因:在进行温升试验时,由于位于两柱之间的调压引线垂直部分的电流方向相同,在最小分接档位下运行时引线电流高达两万多安培,导致该引线区域漏磁偏大,漏磁穿过油箱后导致箱壁铁件出现局部过热点。

4 改进措施和返修方案

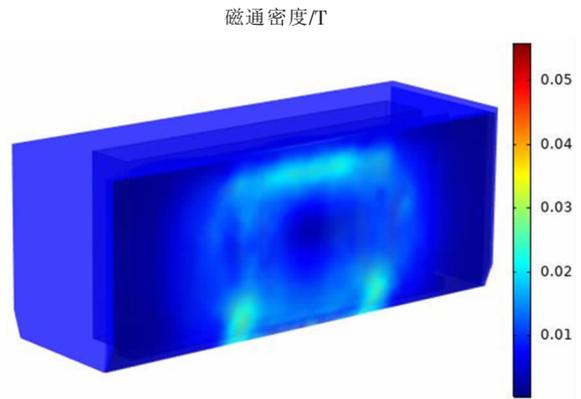
4.1 改进措施仿真分析

对该换流变压器温升异常现象进行检查和故障原因分析完毕后,根据试验现象及分析结论,重新设计调压引线布置方式,由中间走线更改为两侧走线。为保证更改调压引线布置结构后换流变压器运行的可靠性,在原有模型的基础上做相应的几何位置调整,对变压器的漏磁场分布进行计算。更改后的换

流变压器三维仿真模型如图 8a 所示,对于新的布置方式的计算验证如图 8b 所示。可以发现此时油箱漏磁场分布较为均匀,在绕组对应的油箱区域以及油箱上端部的漏磁稍大,但是油箱盖的最大漏磁通密度相比更改调压引线布置方式前从 $0.110\ 98\text{T}$ 下降到 $0.028\ 45\text{T}$ 。



(a) 换流变压器三维仿真模型



(b) 油箱漏磁场分布云图

图 8 更改引线位置后的三维仿真模型以及仿真结果

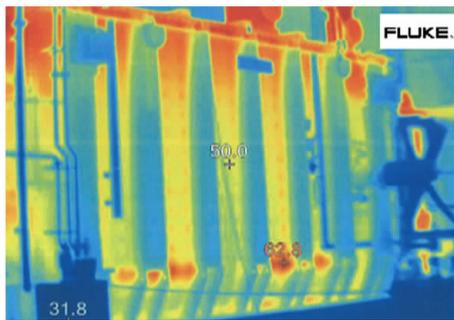
4.2 返修方案

经模拟计算验证,更改调压引线的布置方式能够改善局部过热的现象,因此在实际工程中采取如下处理措施。首先,拆除附件,排尽变压器油,吊芯并对器身进行脱油处理;然后,更改调压引线的布置方式,改为两侧走线如图 9a 所示。按照以上方案处理后,按相关工艺对器身进行下箱、抽真空、注油、静放,并再次在最小分接运行时做出厂试验。图 9b 为由红外测温监测得到的热成像图,发现更改调压引线位置后,整个换流变压器温度分布较为均匀,最高温度位于绕组对应的下端部,与磁场的模拟结果基本一致。其中油箱最高温度值为 62.8°C ,此时环境温度为 31.8°C ,铁件温升仅为 31K ,满足温升值不高于 75K 的要求。根据试验结果,更改图纸,将所有换流变的调压引线布置均按此方案执行。

5 结论



(a)更改调压引线后油箱内部器身



(b)最小分接运行时热成像图

图9 引线布置结构改进后的变压器结构以及热成像图

将按改进措施处理后的变压器进行出厂试验,温升试验结果如表2所示,所有实测温升值均在温升限值内,顺利通过全部试验。由此,证明了此温升故障的查找方法是准确的,分析方法是有效的。

表2 重复温升试验结果

	在1.05倍额定容量下的实测温升/K	保证值/K	结果
阀侧绕组平均温升	25.41	55	合格
网侧绕组平均温升	24.79	55	合格
顶层油温升	27.84	50	合格
铁件温升	66.83	75	合格

本文中笔者对一起换流变压器油箱局部过热现象进行详细分析,经过试验检查以及仿真模拟分析,可知调压引线的布置方式对换流变压器的漏磁场分布具有很强的影响作用。更改引线位置前的温升试验油箱局部过热,其根本原因为两柱之间的调压引线垂直部分的电流方向一致,引线电流过大导

致该区域漏磁偏大,漏磁分布不均匀,导致箱壁铁件出现局部过热点。将调压引线布置方式更改为从两侧走线后,换流变压器的漏磁减小了,运行时的总体温升符合工程应用要求。

由于变压器的温升试验属于型式试验,变压器温升的不合格会造成大量返工。采用检测仿真等方法综合分析造成温升异常的原因,并制定相应的解决措施,可以迅速定位至故障点,排查故障原因,保证变压器的可靠运行。

参考文献:

- [1] GB1094.2-2013, 电力变压器 第2部分:液浸式变压器的温升[S].
- [2] 徐莲环,王明胜,郭鹏鸿,等. HVDC 换流变压器绕组热点温升设计及优化[J]. 2020,57(5):7-10,28.
- [3] 康雅华,郭源成. 换流变压器肺叶式磁屏蔽对漏磁及损耗的影响分析[J]. 变压器,2019,56(11):53-56.
- [4] 张喜乐,何松坡,王建民,等. 换流变压器绕组损耗及热点温升的仿真研究[J]. 变压器,2019,56(7):24-28.
- [5] 刘 斌,张喜乐,王浩名,等. 不同负载条件下换流变压器绕组温升的计算与分析[J]. 变压器,2020,57(5):1-6,17.
- [6] 郝 钰,石华林,范瑞祥,等. 基于动态热路模型的配电变压器过载工况下温升研究[J]. 变压器,2020,57(12):22-26.
- [7] 周春阳,李亚锦,刘英男,等. 基于贝叶斯推理和多传感器信息融合的换流变缺陷分类算法研究[J]. 变压器,2020,57(11):15-20.
- [8] 赵廷志,冯新岩,李承振,等. 基于套管高频和特高频电流监测的换流变局放监测[J]. 变压器,2020,57(9):33-37.
- [9] 罗 艳,周 秀,唐长应,等. 基于声电联合定位法在换流变局部放电检测中的应用[J]. 变压器,2020,57(1):73-78.
- [10] 郭慧浩,陈江波,孙 勇,等. 两起换流变压器修复后温升超标案例分析[J]. 变压器,2019,56(12):77-79.

作者简介:

许巧云(1979-),女,广东阳江人,高级工程师。

本文彩图可以网上浏览,网址见本期52页

收稿日期:2021-01-14