

主变压器铁芯与夹件多点接地故障的分析及处理研究

文胜良¹ 赵鸿文²

1 中国电建集团海外投资有限公司, 北京 100048

2 老挝南欧江发电有限公司, 老挝 琅勃拉邦 060000

[摘要]主变压器是发电厂的核心电气设备之一, 在运行过程中, 时常会因为各种原因发生变压器铁芯或夹件多点接地故障。轻者造成发电量损失, 重则会发生电弧放电烧损铁芯、局部高温造成绝缘受损、变压器油分解出的气体引起差动、重瓦斯主保护动作导致机组甩负荷停机等设备事故, 造成巨大的经济损失和社会影响。文中结合水电站运行案例, 通过对主变压器铁芯与夹件接地故障的及时排查、处理和对故障原因的详细分析, 有针对性地制定出日常管理办法, 为进一步提升设备管理, 确保主变长期、安全、可靠、稳定运行提供了技术依据和指导。

[关键词]变压器; 铁芯; 夹件; 接地故障; 设备管理

DOI: 10.33142/hst.v3i2.1706

中图分类号: TM41

文献标识码: A

Analysis and Treatment of Multi-point Grounding Faults of Main Transformer Iron Core and Clamp

WEN Shengliang¹, ZHAO Hongwen²

1 PowerChina Resources Limited, Beijing, 100048, China

2 Namou Power Co., Limited, Luang Prabang, 060000, Laos

Abstract: The main Transformer is one of the most important electrical equipment of the power plant. During the operation, the multi-point grounding fault of transformer iron core and clamp often occurs due to various reasons, which causes the light or heavy loss in economy and society, such as loss of power generation, or even burn the iron core due to arc discharge, insulation damage due to partial higher temperature, differential motion due to gas decomposed from the transformer oil, load dump and shut down of the generator unit due to heavy gas main protection actions. This paper based on the case of the operation of the hydropower station, through the timely investigation, analysis, and treatment of the grounding fault of main transformer iron core and clamp, formulated the specifically daily management measures, and provided technical support and guidance for improving equipment management and ensuring the safe, reliable and stable operation of main transformer in long-term.

Keywords: transformer; iron core; clamp; ground fault; equipment management

引言

某水电厂装机容量为 3×55MW, 采用一机一变单元接线方式, 安装有 3 台 SSP10-H-75000/220kV 强迫油循环水冷双绕组分相式主变压器, 1 号机组单元于 2007 年 04 月投产发电。2018 年 03 月 04 日, 1 号机组带 55MW 负荷并网运行, 运维人员在开展每月一次的测量主变压器铁芯、夹件接地电流定期工作时发现, 1 号主变 B 相铁芯、夹件接地电流分别为 10.2A、10.3A, 远远超出要求不大于 100mA 的规定值^[1], 立即向调度中心申请停电检查, 并组织专业人员对故障进行分析和处理。

1 主变铁芯、夹件接地电流超标原因排查

(1) 查阅最近四个月测量 1 号主变压器铁芯、夹件接地电流定期工作记录台帐, B 相接地电流均小于 10mA, 满足规程要求, 见表 1。

表 1 1 号主变铁芯、夹件接地电流定期测试记录表

被试设备	测试时间	测试位置	A 相 (mA)	B 相 (mA)	C 相 (mA)
1 号主变	2017. 11. 05	铁芯	2.56	5.82	14.02
		夹件	8.32	8.50	14.71

(续表)

被试设备	测试时间	测试位置	A相(mA)	B相(mA)	C相(mA)
1号主变	2017.12.05	铁芯	2.67	6.58	3.14
		夹件	9.30	7.65	6.17
1号主变	2018.01.05	铁芯	2.80	6.75	3.36
		夹件	9.45	7.89	6.92
1号主变	2018.02.05	铁芯	2.80	6.75	3.36
		夹件	9.45	7.89	6.92

(2) 查阅2018年1月10日1号主变C级检修时的预防性试验报告,绕组连同套管直流电阻、绝缘电阻、 $\tan \delta$ 值、泄漏电流等各项试验数据均正常,铁芯、夹件对地以及铁芯对夹件绝缘良好,试验结论合格,见表2~表6。

表2 绕组连同套管的直流电阻

试验时间: 2018年1月10日, 环境温度: 19.2℃, 相对湿度 62.5%				
上层油温 A: 24℃, B: 24℃, C: 24℃				
低压绕组	ab (mΩ)	bc (mΩ)	ca (mΩ)	ΔR (%)
	3.163	3.158	3.162	0.82

表3 绕组连同套管的绝缘电阻

试验部位	R_{15s} (GΩ)	R_{60s} (GΩ)	吸收比
高压-低压及地	18.4	48.6	2.64
低压-高压及地	23.7	43.3	1.83

表4 绕组连同套管的 $\tan \delta$ 和电容值

试验部位	$\tan \delta$ (%)	C_x (nF)
高压-低压及地	0.250	15.28
低压-高压及地	0.227	17.27

表5 绕组连同套管的泄漏电流

试验部位	直流试验电压 /kV	泄漏电流 / μA
高压-低压及地	40	3.9
低压-高压及地	10	1.0

表6 铁芯及夹件绝缘电阻

试验位置	A (GΩ)	B (GΩ)	C (GΩ)
铁芯-夹件及地	24.3	17.8	9.84
夹件-铁芯及地	12.7	10.7	13.3

(3) 取 1 号主变压器油样，经省电科院化验，油样色谱分析数据如下表 7。

表 7 变压器油中溶解气体分析数据表

测试结果 (uL/L)			
组 分	浓 度	组 分	浓 度
H ₂ (氢气)	8.96	CO (一氧化碳)	1784.92
CO ₂ (二氧化碳)	6387.10	CH ₄ (甲烷)	23.04
C ₂ H ₆ (乙烷)	18.14	C ₂ H ₄ (乙烯)	4.34
C ₂ H ₂ (乙炔)	0.00	总 烃	45.52

(4) 测量 1 号主变压器 B 相铁芯对夹件的绝缘电阻为 0MΩ，可判断在铁芯和夹件之间已经形成了金属性短路故障。乙炔 C₂H₂ 的生成一般在 800℃~1200℃ 的温度，是在电弧的弧道中产生的^[2]，可判断主变压器内部未发生局部、火花以及电弧放电故障；油中总烃含量（即甲烷 CH₄、乙烷 C₂H₆、乙烯 C₂H₄ 和乙炔 C₂H₂ 含量的总和）为 45.52，小于 150×10 uL/L 的注意值，可判断主变压器内部未发生高温过热故障；由于一氧化碳 CO 和二氧化碳 CO₂ 能长期积累，成为显著数量，可判断油样中一氧化碳 CO 和二氧化碳 CO₂ 密度较高是因为主变压器长期运行未进行过绝缘油净化处理导致的。

(5) 使用分析变压器油样特征气体组成的方法可初步判断设备内部是否发生故障及故障性质，为进一步精确判断变压器内部是否出现故障及故障类型，又使用了“三比值”法对变压器油样气体含量进行分析，见表 8 和表 9。

三比值计算：乙炔 C₂H₂/乙烯 C₂H₄=0/4.34=0
 甲烷 CH₄/氢气 H₂=23.04/8.96=2.57
 乙烯 C₂H₄/乙烷 C₂H₆=4.34/18.14=0.24

表 8 三比值法编码规律表

特征气体比值范围	比值范围的规律		
	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆
K<0.1	0	1	0
0.1≤K<1	1	0	0
1≤K<3	1	2	1
K≥3	2	2	2

表 9 故障类型判断方法

编码组合			故障类型	故障实例
C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆		
0	0	1	低温过热	绝缘导线过热，注意 CO 和 CO ₂ 含量和 CO ₂ /CO 值。 分接开关接触不良，引线夹件螺丝松动或接头焊接不良，涡流引起铜过热，铁心漏磁，局部短路，层间绝缘不良，铁芯多点接等。
	2	0	低温过热	
	2	1	中温过热	
	0、1、2	2	高温过热	
	1	0	局部放电	
1	0、1	0、1、2	低能放电	引线对电位未固定的部件之间连续火花放电，分接抽头引线和油隙闪络，不同电位之间的油中火花放电或悬浮电位之间的火花放电。
	2	0、1、2	低能放电兼过热	

(续表)

编码组合			故障类型	故障实例
C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆		
2	0、1	0、1、2	电弧放电	线圈匝间、层间短路,相间闪络、分接头引线间油隙闪络、引线对箱壳放电、线圈熔断、分接开关飞弧、因环路电流引起电弧、引线对其他接地体放电等。
	2	0、1、2	电弧放电兼过热	

由表 8 得出主变压器三比值编码为 020, 查看表 9, 并结合 B 相铁芯对夹件的绝缘电阻为 0MΩ 等情况, 可判断 B 相发生了低温过热故障, 其原因为铁芯多点接。为了避免故障进一步扩大, 防止由设备故障发展为设备事故, 及时组织对故障点进行了排查和处理。

2 变压器铁芯、夹件多点接地故障的危害

(1) 变压器在试验和运行过程中, 其绕组将会在通过的励磁电流作用下产生强大的电磁场, 铁芯和夹件等不接地金属构件置于这个电磁场之中, 会产生持续不断的悬浮电位, 由于在电磁场中所处的位置不同以及产生电磁场的励磁电流强度变化等原因, 铁芯及夹件所产生的悬浮电位也各不同。当铁芯及夹件等金属构件之间或金属构件对绝缘部件的悬浮电位差超过其绝缘强度时就会产生火花、电弧放电, 放电所产生的热量不仅能分解绝缘油, 使油质劣化, 还能导致绝缘板、木质绝缘、绝缘纸等固体绝缘老化、损坏, 绝缘能力降低后被击穿造成设备事故, 因此铁芯及夹件等其它所有金属构件均应可靠接地, 以消除铁芯及夹件产生的悬浮电位。

(2) 当铁芯及夹件等其它所有金属构件(夹件)发生两点以上的多点接地故障时, 接地点之间会形成闭合回路, 当主磁通穿过闭合回路时在铁芯或夹件上的涡流损耗将急剧增加。涡流损耗在消耗电能的同时, 使铁芯及夹件不断发热, 温度升高, 造成变压器油质劣化和固体绝缘老化, 并不断分解出可燃性气体, 轻者会使轻瓦斯保护动作于信号报警, 重则甚至会使重瓦斯保护动作于跳开变压器两侧断路器, 导致机组甩负荷事故发生。如果铁芯多点接地故障得不到及时处理, 持续的高温还将造成铁芯表层绝缘老化损坏, 造成铁芯烧毁的设备事故; 夹件多点接地故障不及时处理, 夹件产生的高温会使安装或绑扎在夹件上的固体绝缘及导线外绝缘老化损坏, 将造成变压器内部击穿、短路事故。因此铁芯及夹件等其它所有金属构件均应可靠接地, 且为防止形成闭合回路必须一点接地。

3 故障点排查及处理

(1) 关闭 1 号主变压器本体与储油柜之间的油管阀门, 打开上部放气塞, 从下部放油阀放出变压器油至线圈上压板以下。拆除 B 相铁芯、夹件出线套管, 使用内窥镜检查出线套管、接地引线及其周围状态, 未发现异常。

(2) 排尽全部变压器油, 打开 B 相升高座检修孔, 使用内窥镜从另一角度检查铁芯夹件接地片、接地引出线均无异常。向变压器内部注入干燥空气, 检测空气中氧气浓度大于 20.9%、小于 23.5%时, 专业人员从变压器进人孔进入油箱内部, 检查变压器铁轭铁芯片、旁柱、芯柱是否存在金属异物与夹件及引线形成金属性短路。

(3) 检查发现变压器 B 相芯柱第一片硅钢片出现了上窜, 与铁芯上部夹件加强板接触, 形成了金属性短路, 导致铁芯与夹件之间绝缘电阻为 0MΩ; 检查铁芯及绕组无过热痕迹, 绝缘层完好, 无受热变色、老化起层、龟裂脱落等现象。

(4) 由于变压器内部空间狭窄, 如要将上窜的第一片硅钢片进行复位处理, 需要吊起变压器 B 相钟罩, 即进行变压器大修。经厂家设计人员、技术人员和电厂专业人员共同分析讨论, 决定暂不进行变压器大修, 待制定出详尽的检修计划和方案后申请设备停运检修; 在确保对变压器铁芯磁路、主磁通Φ无任何影响的前提下, 对故障点进行隔离处理。在上窜的芯柱第一片硅钢片与夹件加强板之间塞入厚度为 6mm 的高密度 T4 绝缘纸板, 将硅钢片与夹件加强板隔离开来, 并对绝缘纸板进行固定, 测量铁芯与夹件之间的绝缘电阻为 1000MΩ; 对松动的铁芯紧固件螺栓进行紧固后, 检查并紧固所有器身绝缘夹件、支撑件的固定螺栓和电气连接螺栓。

(5) 对 1 号主变压器 A、C 相进行内部检查, 未发现螺栓松动等异常情况。随即对变压器抽真空、注油、热油循环、静置排气, 待油温恢复至常温后取油样化验, 各项数据均正常; 对变压器进行电气预防性试验, 各项试验数据均满足规程要求; 测试铁芯对夹件及地绝缘电阻为 5.54GΩ、夹件对铁芯及地绝缘电阻为 9.89GΩ, 绝缘良好; 变压器带 55MW 满负荷运行后, 铁芯和夹件对地电流分别为 6.55mA、7.49mA, 恢复正常。

4 故障原因分析

(1) 1号主变压器自2007年04月投入运行到故障发生时的十一年里,未按照新投产变压器在投入运行5年内和以后每间隔10年应大修一次的规定进行检修工作^[3],也未结合设备运行情况进行过内部检查。变压器长期运行过程中,在承受了无数次合闸时励磁涌流形成的强大电动力冲击后,铁芯螺栓紧固件出现个别松动,运行时产生的电磁振动导致铁芯窜片与夹件形成接触,造成铁芯及夹件多点接地故障,致使铁芯、夹件接地电流超标,见图1。

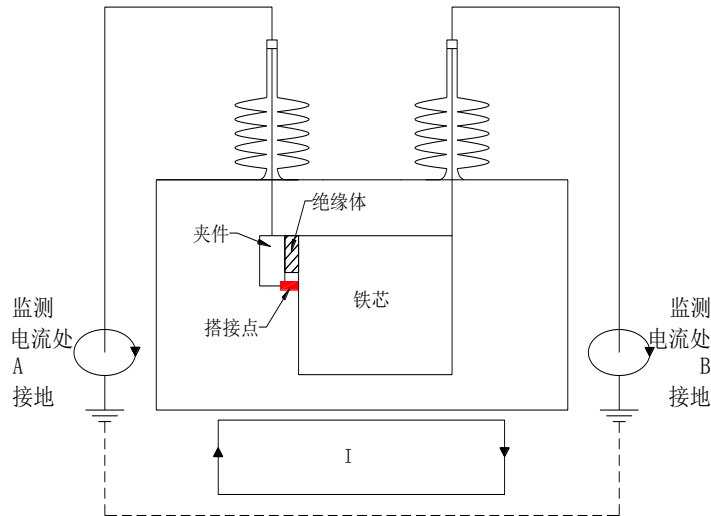


图1 1号主变压器铁芯、夹件多点接地示意图

(2) 铁芯与夹件的故障接触点和铁芯正常的接地点均在铁芯上端部,两点之间形成短路的距离较近、范围不大,即铁芯主磁通短路匝数较少,流过的涡流有限,产生的热量不太大;又因为发现及时,故障尚处于初期阶段,多点接地导致的涡流损耗只造成低温过热,还未造成恶性循环导致高温过热故障,所以变压器油中总烃含量仍在允许范围以内,铁芯层间绝缘、铁芯与夹件之间的绝缘未出现老化和损伤。

5 结束语

为了提高设备管理水平,防止设备事故及类似故障的再次发生,应加强主变压器铁芯及夹件接地电流定期监测工作,改每月测试一次为每半月测试一次,结合预防性试验报告、运行记录、监测数据等状态信息对设备实际工况进行系统的分析、诊断和评估,科学合理地制定出主变压器检修或内部检查计划并予以实施,加强设备检修和内部检查的全过程管理,确保检修、检查结果符合规程要求。

[参考文献]

- [1] 中华人民共和国原电力工业部. DL/T596-1996 电力设备预防性试验规程[M]. 北京:中国电力出版社,1997.
 [2] 中国电力科学研究院. GB/T7252-2001 变压器油中溶解气体分析和判断导则[M]. 北京:中国电力出版社,2002.
 [3] 中国电力企业联合会. DL/T573-2010 电力变压器检修导则[M]. 北京:中国电力出版社,2002.

作者简介:文胜良(1982-),高级工程师,从事水电站项目技术经济分析、项目建设管理工作。赵鸿文(1973-),变电检修高级技师,从事水电站电气设备安装、检修、维护管理工作。