

一起500 kV变压器的内部短路故障分析及处理

对一起500 kV主变压器内部故障进行了分析,通过对故障电流的分析、故障点的检查和电场仿真,指出了变压器在高压套管均压罩处存在绝缘裕度不足的问题,并提出了解决方法,为变压器的设计和制造提供了经验。

万四维/广东电网公司东莞供电局



万四维/高级工程师

作为500 kV变电站的主设备,500 kV主变压器一直为主电网的核心设备,是电能传输枢纽。500 kV变压器故障将严重影响电网的安全稳定性。本文对一起500 kV主变压器内部短路故障进行分析,并针对存在的问题提出了相应的解决方法。

故障经过

500 kV某变电站1[#]主变压器为单相自耦壳式变压器,额定容量为1 000 MV·A。自2003年投运以来一直运行稳定。在2013年8月3日20:03:50,该主变压器B相故障,差动保护动作,跳开主变压器三侧开关。故障发生时,天气良好,1[#]主变压器负荷为460 MV·A,故障前后该主变压器B相的电流、电压值如表1、表2所示。

由主变压器保护及录波装置信息分析,2013年8月3日20:03:50,1[#]主变压器B相差动保护区内发生故障,经12 ms延时,1[#]主变压器主一差动保护、主二差动保护和分相差动保护动作,跳开1[#]主变压器三侧开关,故障持续时间约60 ms。

通过核算故障期间套管和开关的一次零序电流是相等的,且相位一致,推断出套管和开关的B相故障电流大小相等,方向一致。因此,故障点不是发生套管TA与开关TA之间,而是位于主变

表1 故障前后该主变压器B相的电流状况

(单位: kA)

项目		故障前	故障时
高压侧	开关TA	I_a	0.51
		I_b	49.85
		I_c	0.44
		$3I_0$	48.4
	套管TA	I_b	49.5
中压侧	开关TA	I_a	1.186
		I_b	2.350
		I_c	0.953
		$3I_0$	2.73
低压侧	开关TA	I_a	0
		I_b	0.05
		I_c	0.05
公共绕组	套管TA	I_a	0.67
		I_b	0.6
		I_c	1.16
		$3I_0$	0.53

表2 故障前后该主变压器B相的电压状况

(单位: kV)

项目		故障前	故障时
高压侧	U_a	306.7	327
	U_b	306.7	8.1
	U_c	305.8	320
	$3U_0$	0.07	310.7
中压侧	U_a	132	135
	U_b	132	40.7
	U_c	132	134
	$3U_0$	0.7	116.87

压器高压侧套管TA靠主变压器箱体侧区域,因此排除了主变压器套管上部故障的可能性。

停运后的检查

1. 故障现场检查情况

1) 1[#]主变压器B相箱体明显损坏,

关键词/Keywords

变压器·
高压套管均压罩·
内部短路故障·

如图1所示,箱体在500 kV一侧已全部熏黑,且500 kV侧套管升高座底部位置的箱盖开裂,并有绝缘油漏出。



图1 故障变压器箱体

2) 500 kV侧的套管整个瓷套已破碎散落油池地面,套管仅剩余金属导电杆及少量绝缘层纸,如图2所示。



图2 故障变压器变高侧套管

3) 从开撕裂口进入箱内检查发现,发现升高座底部的油箱内壁存在三个放电点,最大放电点面积约1 cm²,如图3所示。高压侧套管上部瓷套和



图3 升高座底部的油箱内壁放电点

下部瓷套均已碎裂,套管整体下坠入箱体0.86 m。高压侧套管检查发现高压套管均压罩有明显的放电烧穿孔,如图4所示。由均压罩放电损伤程度来推断,图3的放电点是接地侧主要电流通过产生的痕迹。通过放大镜对放电痕迹进行观察,油箱表面有溶融的迹象。



图4 均压罩的放电烧穿孔

2. 返厂解体检查情况

通过对损坏变压器解体检查,再次验证本次变压器跳闸放电位置在高压套管尾部均压罩与箱体内壁之间,未发现其他放电点,与现场调查结果相吻合。通过对均压罩的放电痕迹确认,发现箱壁的放电痕迹存在散开的现象,可以判断是从均压罩(放电的始发点)向箱壁(接地侧)放电。同时通过对内部铁心和线圈的解体检查,并未发现铁心、线圈和箱体内部有放电痕迹和过热痕迹,可以排除铁心和线圈内部故障。

由于B相变压器的油在抢修过程中已经受到污染,无法确认故障前油中颗粒度,因此对分析了A、C相的绝缘油的油中颗粒进行分析参考。A、C相的绝缘油在可视的范围内过滤网上没有超过1 mm的金属异物,基本上都是0.5 mm以下的纤维状的异物。

故障原因分析

1. 故障的始发点

从现场及返厂解体检查的结果,可以由以下几点原因得出放电的始发点是高压套管均压罩。

1) 油中均压罩的表面电场强度比套管升高座的表面电场强度高,如图5所示。

2) 油中均压罩的放电痕迹集中在比较狭小的

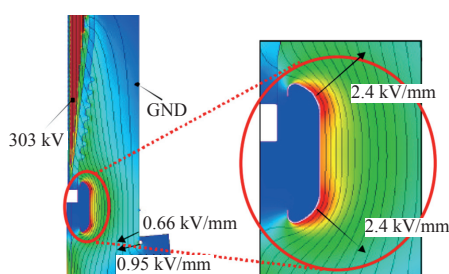


图5 均压罩的表面电场强度

范围内的3个位置并击穿形成了3个孔。

3) 套管升高座的放电痕迹分散在比较宽广的范围内。

2. 故障原因推断

故障发生时, 运行电压下油中均压罩的最大电场强度为2.4 kV/mm (见图5)。这个数值比厂家油中均压罩的电场强度设计标准值5.4 kV/mm低许多。另外, 该变压器均通过了工厂的出厂试验(运行电压的2.2倍)以及现场试验, 并且在投运后的10年里应该经历过雷电冲击和操作冲击, 都没有出现问题。而这次故障是在正常的运行电压、低电场强度状态下发生的。

据此推断可能的故障原因。

1) 异物存在于油中均压罩和套管升高座之间, 电场集中于异物, 达到高于绝缘破坏电场强度后放电。

2) 气泡存在于油中均压罩和套管升高座之间, 电场集中于气泡, 达到高于绝缘破坏电场强度后放电。

3. 相关的验证和检查结果

(1) 关于异物产生的放电

1) 如没有一定程度大小的金属异物, 是不会导致放电的。为此用三种不同的异物进行试验, 试验情况如图6、表3和图7~图9所示。样品A在2.5 kV/mm电场发生绝缘击穿, 样品B在3.2 kV/mm电场发生绝缘击穿, 样品C铁粉在3.6 kV/mm电场发生扩散且不发生绝缘击穿。试验得出: 当纤维与微小金属异物的混合物聚积到某种程度情况下, 纤维和金属异物被电极吸附, 若金属异物达到6 mm 程度大小, 就会导致绝缘在常规电压(电场强度2.4 kV/mm)被破坏。



图6 油中混杂金属异物的耐压试验

表3 金属异物的种类

样品	铁粉重量/mg	铁粉颗粒大小/ μm	绝缘压合板纤维重量/mg
样品A	450	150~700	140
样品B	90	150~700	14
样品C	18	150~700	1.4



图7 样品A试验情况

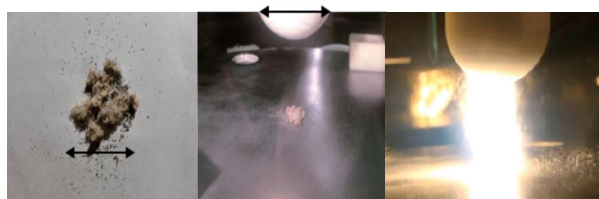


图8 样品B试验情况

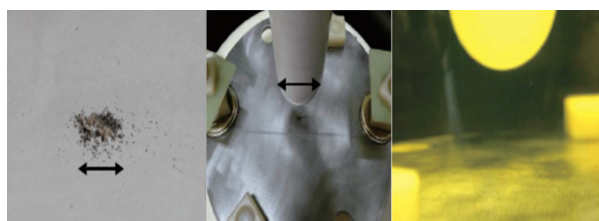


图9 样品C试验情况

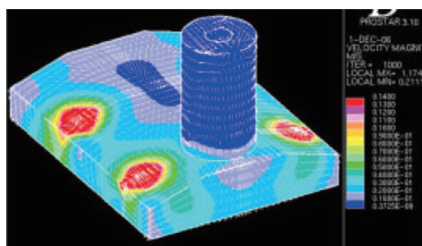
2) 确认没有发现输油油泵的叶轮存在缺损或者磨损的痕迹, 确认了油泵不是异物的发生源。

3) 在返厂的检查发现烧损的部件以及套管瓷片等落在了绕组线圈的上面, 因此难以进行严密的异物分析。

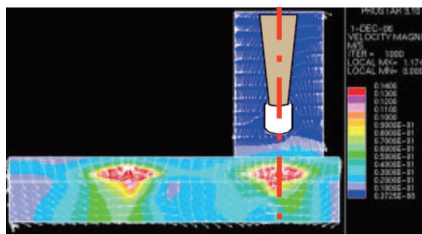
4) A、C相的油中颗粒分析得出存在不能导致绝缘故障非常小的非金属异物, 不存在与本次故

障有直接关系的异物。

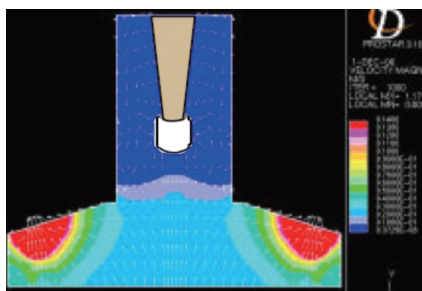
5) 通过变压器内部的油流解析油泵工作时的油流分布,如图10所示。套管升高座内的油中均压罩附近的油流流速为2 cm/s左右(与自冷却时即油泵不起动时的流速相同)。在这个范围内,微小异物聚集,通过油中均压罩的电场将异物吸附至均压罩附近,异物聚集超过6 mm也可能导致放电。



(a) 上部油箱整体油流分布图



(b) 上部油箱横截面积油流分布图



(c) 图7b的AA横截面积油流分布图

图10 变压器油箱内油流分布解析

6) 假定直径0.1 mm,长1 mm铝合金异物,通过计算在运行电场2.4 kV/mm向异物的作用静电力为28.2 μ G,因为重力为14.3 μ G,所以异物停留在套管挡板附近成为可能。在异物长度短和比重大的情况下,由于重力下落,但是与纤维混杂时,浮力增大不下落有可能浮游。

7) 综上所述,没有发现导致故障原因的异物,根据3)却难以证明没有异物,因此保留异物为故障原因的可能性。

(2) 关于气泡产生的放电

变压器内部的气泡来源可能是变压器外部空气侵入产生的气泡或者是由于变压器局部过热产生的气泡。

针对变压器外部空气侵入产生气泡的可能性,根据以下理由,可以判断没有可能在均压罩和套管座之间从变压器外部侵入气泡。

1) 均压罩和套管座之间以及以下部位为若干正压,即使假设在油箱和配管等发生针孔等开口,只是油渗出,而空气不会进入。

2) 故障变压器投运以来一直未发生过漏油缺陷。

3) 在故障就要发生之前,气体(瓦斯)继电器没有发出警报,所以故障前没有可能空气侵入。

而针对变压器内部发生的过热而产生气泡的可能性,依据以下理由,可以认为没有发生变压器内部局部过热引发的气泡:①在故障就要发生之前,气体(瓦斯)继电器没有发出警报,所以故障前没有产生大量气体;②变压器以往进行的过油气体分析中,其结果没有异常,可以认为在变压器内部没有局部过热;③故障后在变电站以及返厂的检查结果,上节油箱内的引线和绕组上面均没有发现局部过热的痕迹;④通过试验验证,由于变压器油的压力作用,只用当局部温度到达900 $^{\circ}$ C以上的高温,该变压器油中才能产生气泡。但通过绕组内部的解体检查,以及油中气体分析变压器没有局部过热,所以不可能发生气泡。

结束语

根据上述各种试验以及解析结果,本次故障是由于以下的原因导致绝缘击穿:①油中微小金属异物(长度在几百微米以上)和油中纤维纠缠在一起(以下称混合异物),在变压器制造过程中或安装时,可能由于某种原因混入了几百微米以上金属异物;②混合异物随油流到达均压罩附近;③由于浮力以及静电力,混合异物聚集在均压罩附近;④积聚到一定的量时,以至发生绝缘击穿。

异物可能是这次故障的原因。当残留在变压

器内部的极其微小的异物或者是纤维物聚集至6 mm大小,这时在正常电压下有可能导致放电。为确保稳定安全的运行,建议采取以下的解决方法。

1) 为了以后的安全稳定的运行,建议在油中均压罩加封绝缘挡板,如图11所示。当加装一层挡板,绝缘挡板表面的电场强度降低约25%,可使绝缘挡板表面电场减低至1.8 kV/mm,如图12所示。假定直径0.1 mm,长1 mm的铝合金异物,在运行电场1.8 kV/mm,向异物作用力为12.1 μ G,而异物重力为14.3 μ G,所以异物不可能停留在套管挡板附近,放电的概率明显地减少。如果覆盖两层绝缘挡板,两层挡板表面电场将降低到1.5 kV/mm。

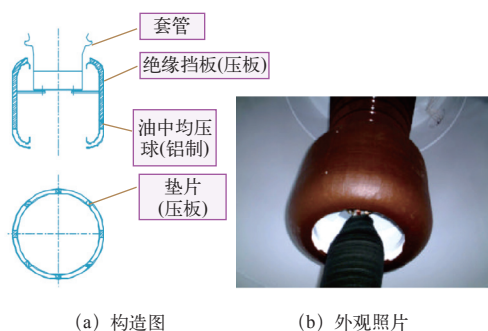


图11 加封绝缘挡板的油中均压罩



图12 加封绝缘挡板的油中均压罩的电场解析

假定直径0.1 mm,长1 mm的铝合金异物,在运行电场1.5 kV/mm,向异物作用力为8.8 μ G,所以异物不可能停留在套管挡板附近,运行安全系数增大。

2) 为确保变压器内部不产生异物,建议变压器安装或大修后的油处理应采用新的3 μ m的滤芯进行滤油处理,尽可能地减少油中颗粒,实现更为安全的变压器运行。

(收稿日期:2014-07-04) EA

(上接第82页)

源处只能设重合闸或者无电压备用电源自动投入装置。为了保障电网安全,供电局一般要求重合闸动作时间在1 s以上,即便采用无电压备用电源自动投入装置,其动作时限也必须在0.5 s以上。这时,如在厂内较低的其他电压等级采用快切装置,当220 kV线路故障,如果不采取一些技术措施,快切装置势必会先于重合闸或备用电源自动投入装置动作。快切装置这样的越级误动作,将全厂电负荷全部转由一台220 kV变压器提供,而且虽然掉电时间较短,但仍不可避免有一定大小的自启动电流,如果变压器容量不足,该变压器的过电流保护动作就会导致全厂停电的恶性事故发生。

4. 低压系统不建议采用微机快切装置

由于低压电动机的容量较小,一般不超过160 kW,其磁场能量、转动惯量都较小,母线失

电压后残压下降速度很快。当快切装置快速切换或同期捕捉切换成功,其母线电压也很可能已经降到80%以下。而且由于低压交流接触器的释放时间仅为十几毫秒,当快切成功时,接触器早已释放,快切成功失去了意义。而且,由于微机快切装置目前的价格仍然比较昂贵,在低压系统中使用微机快切装置,性价比不高,故不建议采用。

结束语

由于微机快切装置相比备用电源自动投入装置,有着不可比拟的理论优势,替代后者应该只是时间的问题。但现阶段快切装置在大型石化企业应用中仍有一些问题尚待解决,并需多多积累运行经验,经受住各种复杂情况的考验,才能得到全面推广。

(收稿日期:2014-07-04) EA