

油浸式变压器状态检测方法研究^①

潘 云, 张 倩

贵州电网有限责任公司凯里供电局, 贵州 凯里 556000

摘要: 介绍了几种油浸式变压器状态检测方法, 包括油中溶解气体分析法、红外热成像法、超声定位法和可见光成像法, 阐述了各种检测分析方法及优缺点, 并对前 2 种方法进行了案例分析. 针对各种方法的优缺点, 建议采用多种方法结合分析手段, 对变压器潜伏性故障进行诊断, 开展状态检修, 有利于节约电网停电时间.

关键词: 油浸式变压器; 油中溶解气体分析; 红外热成像; 超声定位; 可见光成像

中图分类号: TM411

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2017)09-0116-05

变压器是电力系统中的重要设备, 电厂和电网架构中 90% 的变压器均为油浸式变压器^[1]. 变压器一旦发生故障, 非计划停电会给电厂和电网造成巨大的经济损失. 大部分变压器故障均由潜伏性故障累积效应发展而来, 因此通过检测技术发现变压器潜伏性故障, 预防非计划停电造成的事故(件)非常重要. 目前, 油中溶解气体分析方法是不停电判断变压器故障的经典方法, 判断变压器的运行状态, 曾发现多起变压器潜伏性故障^[2-7]. 随着检测技术的发展, 红外热成像法、超声定位法、可见光成像法也开始逐渐实现应用^[8]. 由于变压器结构复杂, 故障类型多样, 单一方法不能完全准确地判断变压器运行状态, 多元手段结合分析能进一步提高变压器故障诊断的正确性, 制定合理的停电检修计划, 有利于节约停电时间.

1 油中溶解气体分析法

油中溶解气体分析法(Dissolved Gases Analysis), 又称 DGA 方法, 通过变压器油中溶解气体分析可判断变压器故障, 准确性高, 是国际电工委员会(IEC)和国家标准都认可的判断方法. 通过油中溶解气体组分判断变压器的潜伏性故障, 其分析方法包含特征气体法、改良三比值法、大卫三角形法等, 故障类型主要包含放电类故障和过热类故障. 放电类故障又可分为电弧放电、局部放电和低能量放电等; 过热类故障分为低温、中温和高温过热故障. 还有可以识别放电和过热类的复合型故障^[9-10], 且可通过跟踪气体组分的增长速率判断故障的发展程度, 及时制定检修计划, 避免非计划停电导致事故(件)发生.

目前, 离线的实验室检测主要采用色谱检测法, 但随着状态监测技术的发展, 油中溶解气体在线监测装置的应用逐步得到推广, 在线监测方法主要包括色谱、光声光谱、气体传感器法等, 可以实时监测变压器油中溶解气体组分, 发现变压器的突发性故障. 目前, 通过在线监测发现变压器故障案例较少, 贵州电网曾通过油色谱在线监测装置发现变压器的突发性故障, 对变压器进行状态评价和故障诊断, 具有一定的参考价值.

2016 年 8 月 22 日, 贵州电网 110 kV 某变压器油色谱在线监测装置发出越限预警, 第 2 天实验室随后进行了色谱数据复测, 油色谱在线监测装置和实验室检测 110 kV 某变压器油中溶解气体组分的部分数据见表 1. 从表 1 中数据可知, 2016 年 8 月 21 日色谱在线监测数据无异常, 乙炔、总烃、氢气等特征气体均

① 收稿日期: 2016-11-02

作者简介: 潘 云(1977-), 男, 贵州凯里人, 助理工程师, 主要从事电气设备检测研究.

未超过注意值(注意值分别为 5 $\mu\text{L/L}$,150 $\mu\text{L/L}$ 和 150 $\mu\text{L/L}$). 22 日在线监测数据超出注意值,越限报警. 实验室检测数据进一步证实了该变压器在 2016 年 8 月 22 日发生了突发性故障.

表 1 110 kV 某变压器油中溶解气体组分的部分数据 $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$

试验时间	检测方式	油中溶解气体组分体积分数值							
		CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	总烃	H ₂	CO	CO ₂
2016-8-24	在线监测	64.7	9.8	161	9.7	245.2	170	241	553
2016-8-23	在线监测	47.8	7.2	113	6.4	174.4	148	174	562
2016-8-22	在线监测	46.1	6.4	106	5.2	163.7	136	178	564
2016-8-21	在线监测	7.5	0.8	17.3	0	25.6	54.2	171	530
2016-8-23	实验室检测	82.8	27.1	291.1	15.2	416.2	54.1	209	2856

在线监测数据总体趋势虽然较为可靠,但由于在线监测装置长期在现场运行,不能标定,检测时存在一定的数据误差,计算时以实验室检测数据为依据可靠性更高,利用改良三比值法来判断变压器故障的性质.

$$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4=15.2/291.1\approx0.05$$

当 $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$ 的比值 <0.1 时,比值范围编码为 0.

$$\text{CH}_4/\text{H}_2=82.8/54.1\approx1.5$$

当 CH_4/H_2 的比值 $\geq 1\sim <3$ 时,比值范围编码为 2.

$$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6=291.1/27.1\approx18.6$$

当 $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$ 的比值 ≥ 3 时,比值范围编码为 2.

上述三比值范围编码为(0,2,2),根据《变压器油中溶解气体分析和判断导则》(DL/T 722-2014)推断,故障性质为“高于 700℃ 的高温过热”.对应的故障部位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;涡流引起铜过热,铁芯漏磁;局部短路和层间绝缘不良;铁芯多点接地等.且从表 1 中在线监测数据趋势可知,乙炔、总烃、氢气等特征气体组分数据每天增长,变压器过热故障在快速发展.为保障变压器的安全运行,2016 年 8 月 24 日立即停电进行电气试验,变压器直流电阻、绕组变形、介损和绕组绝缘电阻测试均无异常,但进行铁芯绝缘电阻测试时,初始绝缘电阻为 1.1 G 欧,变压器内部持续传出放电声,铁芯绝缘电阻持续降低至 0 欧.根据电气试验结果,判断为铁芯多点接地故障.

对变压器的铁芯多点接地故障,采用直流电容放电冲击法处理,经过多次冲击后铁芯绝缘恢复至 2 G 欧,铁芯多点接地故障消除.对油进行脱气处理后,变压器重新投运,电气试验和色谱跟踪数据表明,重新投运后的变压器运行状态正常,故障已消除.

由贵州电网实际案例可知,无需停电就可以根据油中溶解气体分析法预判变压器故障类型和初步定位,且可判断故障发展的程度,油色谱在线监测装置在发现变压器突发性故障和跟踪故障发展程度过程中均起到了重要作用.但油中溶解气体分析法判断变压器故障位点存在不足,需要停电进行电气试验来判断故障具体位点.油中溶解气体法主要用于判断变压器内部油浸部位的故障,有些故障不涉及到变压器内部油浸式部位,油中溶解气体组分不会出现异常,此时可借助其他方法进行故障诊断,如红外成像法.

2 红外热成像法

红外热成像技术是一种较为成熟的探测技术,通过对物体进行热辐射间接扫描,并将扫描结果转换成红外图像,主要可用于变压器本体、套管、冷却器及储油柜的局部发热缺陷检测^[11].红外热成像无需停电,也是一种重要的状态检测技术.贵州电网曾通过红外成像测试技术确诊了变压器轻瓦斯动作的原因为变压器少油,通过补充油解决了轻瓦斯动作问题,实际案例如下.

2011 年 9 月,贵州电网 220 kV 某变压器频发油位异常告警,并出现告警后自动复归,对主变的回路、油位进行检查后无异常.9 月 20 日,运行中的变压器突发轻瓦斯告警信号,变压器被迫停止运行转为检修状态.取油样进行色谱试验,主变油中溶解气体组分无异常,结果表明主变本体无故障.在变压器下部集气盒尝试取气,当打开集气盒取气阀门时气流向集气盒内部倒吸,立即停止气体采集.将主变油枕排气管

道阀门打开,无明显气体流进或流出。现场检查瓦斯继电器,观察到瓦斯继电器玻璃窗内仅有一半变压器油。尝试打开上面取气阀门,发现也有内吸现象,观察到瓦斯继电器玻璃窗内油面位置达到观察窗的一半,油面位置无明显变化,此时油枕应该和变压器本体已经连通(实际未连通),初步判断变压器可能存在油量不足。检查发现“断流阀”处于关闭状态,导致油枕和本体未连通。打开油枕和变压器之间的“断流阀”,此时瓦斯继电器和变压器本体已经连通,油枕呼吸器下部油杯内有气泡,有油排出,瓦斯继电器排气阀门也有油流出,排完气体后瓦斯继电器信号复归。

故障处理完毕后主变重新投运,9月23日轻瓦斯再次动作,现场观察到瓦斯继电器玻璃窗内油面已经下降到一半,对变压器油枕进行红外热成像测试(图1)。红外热成像测试通过观察“断流阀”两侧的油温是否差异过大,从而判明断流阀的状态。如果两侧温差较大,说明断流阀处于关闭状态,则本体油与油枕油是隔离状态。试验结果发现两侧温度相差不大,据此判断调整后“断流阀”处于常开状态,确认变压器缺油,从而导致轻瓦斯动作。



图1 220 kV 某变压器油枕热成像测试图

停电检查发现油枕中绝缘油已经达到最低极限,对变压器油枕补充油,瓦斯继电器信号复归,连续监测3个月均无异常。在本案例中,虽然第1次轻瓦斯动作后,当时手动操作“断流阀”使其转入“常开”状态,但由于油枕一直缺油,波纹膨胀器一旦卡阻,与之相应的负压仍然会产生,断流阀将会自动由常开状态再次自动转入关闭,因此红外热成像监测非常有必要,可以在不停电的情况下确认“断流阀”的状态,准确判断变压器是否少油,从而采取正确的消缺措施。红外热成像状态定位监测技术主要针对的是过热类缺陷,而超声波监测法主要用于对局部放电类故障进行状态定位监测。

3 超声定位法

电力设备内部局部放电时,产生的电流脉冲使得局部放电发生的局部体积因受热短时间内增大,放电结束后恢复,体积变化导致介质的疏密瞬间变化,产生超声波^[12-13]。超声波信号基本处于20~200 kHz频段内,变压器内传播的超声波信号集中在100~200 kHz。超声检测方法主要用于变压器局部放电缺陷的精确定位。按照局部放电产生的位置和机理,一般分为绝缘材料内部放电、介质表面放电、电晕放电、固体介质尖端或气泡放电、金属部位与地接触不良产生的悬浮放电等^[14]。将传感器固定在变压器油箱壁上,将采集到的超声波信号转化为电信号,进行分析和定位。当变压器内部绝缘局部放电产生超声波后,在不同介质(油纸、隔板、绕组、磁屏蔽、油等)中向外传播,传播时会发生反射、折射、绕射、透射和衰减等多种现象,最终到达固定在变压器油箱壁上的传感器,传感器接收到信号的时延,根据定位算法进行计算,能够对变压器的局部放电源进行定位。

然而,从目前的实际应用效果来看,由于变压器绕组、铁芯等关键部位均浸入油中,且局部放电产生的能量并不强,变压器内部本体通过多种介质传递到变压器油箱壁的声波很弱,且传感器受外界杂波干扰严重,通过声波采集定位变压器的局部放电存在不足之处,应用效果尚不理想。但随着技术的进步,超声

波法如果可以滤除杂波的影响,放大变压器内部局部放电产生的信号,应可以对其进行辅助定位判断,在未来具有一定的发展前景。

4 可见光成像法

由于停电时间与经济损失直接相关,大型变压器停电尤其是较长时间停电困难。通常油中溶解气体法发现变压器潜伏性故障,停电开展电气试验对故障进行定位后放出一部分绝缘油,可以通过人工进入变压器人孔检查故障具体部位和严重情况,根据故障情况针对性制定停电检修计划,例如故障部位为夹件松动等小缺陷,检修人员可以直接通过人孔消除隐患;例如引线不良等一般故障则可以在现场吊罩检修;如果出现绕组严重变形等问题则只能直接返厂。因此,通过人工进入人孔检查可以更为准确地判断变压器状态,制定状态检修计划。但人工检查可能造成检查不够全面,且对变压器带入污染的可能。随着智能化的发展,可见光成像法逐渐进入科研人员视野,代替人工检查,遥控机器人通过人孔潜入变压器内部进行可见光拍照成像,通过可视化的图像进行分析、比对找出变压器内部异常位置和判断故障的严重程度,开展状态检修。

对变压器内部成像的可移动的油下成像机器人平台,采用微型潜艇结构设计。选用环保材料,避免对油带来污染。平台底部2个螺旋桨,进行航行方向调整。平台内部搭载高清成像设备,用于对变压器内部高清成像,通过线缆可以实时将成像传输到变压器外上位机。具有亮度可调节的成像辅助光源,针对油的变化来调节亮度不同的光源。成像设备采用缆式用于控制其下潜和上升,完成对变压器内部不同部位的拍照。通过上位机可以实时看到内部成像情况,并对图像进行记录,对发现疑似问题点可进行精确定位。

针对油下的成像特点,对相机采集的高清图形进行图像预处理,主要包括对图像进行去噪、平滑处理。此外,增强图像对比度,改善图像效果,使之更易于判读。针对变压器视野狭小部位,机器人无法直观掌握探测范围,可以对图像拼接进行处理,全方位成像无死角。可见光成像法的机器人探测不仅代替了人工操作,且可提高检测的准确性,开展状态检修,节约停电时间。

5 总结与展望

油中溶解气体分析法主要用于不停电发现变压器的潜伏性故障,判断故障类型,尤其是变压器油中溶解气体在线监测装置可以实时发现变压器故障,且可以通过油中溶解气体组分体积分数的变化判断故障的发展,但油中溶解气体分析法对故障定位存在不足。红外热成像法同样不需要停电,可用于变压器本体、套管、冷却器及储油柜等一些部位引起的局部发热缺陷定位检测。以上2种方法都较为成熟,应用较为广泛。通过贵州电网的案例分析验证了这2种方法的有效性。超声方法可以用于变压器局部放电的定位检测,但应用效果尚不理想,杂波滤除和局放信号的放大是该技术需要突破的难点,但随着技术的发展,有望解决局部放电定位的问题。基于可见光成像法的机器人探测法是在油中溶解气体分析法和电气试验的基础上,代替人工操作进入变压器人孔,全方位成像发现故障位点和判断故障的严重程度,有利于合理制定停电检修时间,开展状态检修。多种状态检测方法结合使用,更有利于变压器运行状态判断和制定合理的停电检修计划,保障变压器的安全运行。

参考文献:

- [1] 操敦奎. 变压器油中气体分析诊断与故障检查 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [2] 杨振勇. 《变压器油中溶解气体分析和判断导则》判断变压器故障的探讨 [J]. 变压器, 2008, 45(10): 24—26.
- [3] 耿基明. 应用变压器油色谱分析判断变压器故障 [J]. 变压器, 2006, 43(11): 44—46.
- [4] 赵荣. 一起110kV变压器油色谱数据异常分析及处理 [J]. 变压器, 2012, 49(7): 71—72.
- [5] 陈志勇, 李忠杰. 油中溶解气体分析在变压器故障诊断中的应用 [J]. 变压器, 2011, 48(2): 64—66.
- [6] 郭惠敏, 袁斌, 李强. 一起变压器油色谱异常故障的判断及处理 [J]. 变压器, 2011, 48(11): 72—74.
- [7] 阳少军, 牛保红, 吕家圣. $\pm 500\text{kV}$ 天广直流换流变故障的分析与处理 [J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 165—168.
- [8] 陈柯良, 曾洁, 丁玉柱, 等. 电力变压器电力检测应用方法综述 [J]. 湖南电力, 2016, 36(2): 23—27.

[9] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T7252-2001 变压器油中溶解气体分析和判断导则 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2001.

[10] 中华人民共和国国家能源局. DL/T722-2014 变压器油中溶解气体分析和判断导则 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2014.

[11] 国家电网公司运维检修部. 电网设备带电检测技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.

[12] 蔡丽霞, 黄凯锋, 周 冉. 基于改进脉冲噪声检测的图像滤波算法 [J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2015, 40(7): 130-135.

[13] 李燕青. 超声波法检测电力变压器局部放电的研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2004.

[14] 徐淑珍. 小波分析用于变压器局部放电在线监测中消噪的研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2001.

On State Detection Method of Oil Immersed Transformer

PAN Yun, ZHANG Qian

Kaili Power Supply Bureau, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Kaili Guizhou 556000, China

Abstract: The kinds of oil immersed transformer state detection method have been introduced, including dissolved gases analysis, infrared thermal imaging, ultrasonic positioning, and visible light imaging. Various detection methods and advantages and disadvantages have been described, and the first two methods been analyzed. It is recommended to use multiple methods combined with analytical means, diagnosing transformer latent fault and carrying out state maintenance. It is beneficial to save power outage time.

Key words: oil immersed transformer; dissolved gases analysis; infrared thermal imaging; ultrasonic positioning; visible light imaging

责任编辑 夏 娟