

文章编号:1671-251X(2017)06-0025-07 DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2017.06.007

邓世建,张宽,胡继普,等.油浸式电力变压器故障与其本体外表面温度关系分析[J].工矿自动化,2017,43(6):25-31.

油浸式电力变压器故障与其本体 外表面温度关系分析

邓世建¹, 张宽¹, 胡继普¹, 吕忠友², 祁建山², 魏东²

(1. 中国矿业大学 信息与控制工程学院, 江苏 徐州 221008;

2. 上海铁路局 徐州供电段, 江苏 徐州 221000)

摘要:采用“部件-故障原因-温升现象”的3层结构对油浸式电力变压器故障进行了分类,总结了各类故障产生的原因,分析了各类故障对变压器外表面温度变化的影响。结果表明:铁芯及夹件、绕组及引线、分接开关、绝缘系统和油箱及底座等故障都会引起变压器外表面温度升高;冷却系统故障必然导致变压器外表面温度升高;一部分进出线套管故障会引起变压器外表面温度升高;大多数保护和测量装置故障会引起变压器温度升高。从而得出了油浸式电力变压器故障与其本体外表面温度的初步关系,即变压器故障大多会导致变压器外表面温度升高。

关键词:煤矿电力系统;油浸式电力变压器;故障诊断;故障分类;变压器外表面温度

中图分类号:TD611 文献标志码:A 网络出版时间:2017-05-26 09:42

网络出版地址:<http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20170526.0942.007.html>

Analysis of relationship between faults and outer surface temperature of oil-immersed power transformer

DENG Shijian¹, ZHANG Kuan¹, HU Jipu¹, LYU Zhongyou², QI Jianshan², WEI Dong²

(1. School of Information and Control Engineering, China University of

Mining and Technology, Xuzhou 221008, China;

2. Xuzhou Power Supply Depot, Shanghai Railway Administration, Xuzhou 221000, China)

Abstract: Different faults of oil-immersed power transformers were classified with three-layer structure of 'parts-fault causes-temperature rising phenomenon' and the fault causes were summarized, impacts of the different faults on outer surface temperature of transformer were briefly analyzed. The results show that fault will lead to outer surface temperature rising which including iron core and clamping pieces, winding and leading wires, tapping switch, insulation system, tank and base of the transformer; the faults of cooling system inevitably lead to outer surface temperature rising; part of bushing failures of outlet and inlet line will cause outer surface temperature rising of the transformer; most of failures of protection and measurement device will cause temperature rising of the transformer. Thus the preliminary relations between faults and its outer surface temperatures of the oil-immersed power transformer were obtained, namely most faults of the transformer will lead to outer surface temperature rising.

收稿日期:2016-11-28;修回日期:2017-03-01;责任编辑:张强。

基金项目:上海铁路局科研计划项目(2013049)。

作者简介:邓世建(1962-),男,江苏铜山人,教授,博士研究生导师,研究方向为检测技术与自动化装置,E-mail:cumtdsj@126.com。

Key words: coal mining electric system; oil-immersed power transformer; fault diagnosis; fault classification; outer surface temperatures of transformer

0 引言

煤矿电力系统是保障煤矿安全生产的重要设备之一。电力变压器是电能传输与变换的核心设备,其正常运行直接影响供电质量和经济效益。为保证系统的长时间无故障运行,多年来,状态监测和故障诊断一直是电力变压器领域的研究重点和热点。

目前,油浸式电力变压器故障在线监测方法主要有顶层油温监测法、气体分析法、放电检测法、振动分析法、频率响应检测法、绕组温度监测法、红外热像法、接地电流监测法、油中水分分析法等^[1-3]。除了顶层油温监测法外,其他方法因监测设备可能影响变压器电气性能、覆盖故障类型不全面,且维护工作量大、成本较高等原因,均没有得到普及应用。

笔者在总结变压器故障监测方法时,发现变压器出现故障时大多伴随着热量产生。从变压器组成与结构来看,故障产生的热量必然通过变压器油传递到变压器外表面,而使外表面温度发生变化。同时变压器外表面是接大地的,测量外表面温度不仅完全不影响变压器的电气性能,且安装简单、易于设备维护。如果通过变压器外表面温度可以监测其故障,那么将能够克服现有监测方法的许多不足。

在对变压器故障进行分类的基础上,笔者总结了各类故障产生的原因,分析了各类故障对变压器外表面温度变化的影响,得出油浸式电力变压器故障与其本体外表面温度的初步关系,即变压器故障大多会导致变压器外表面温度升高,为变压器故障在线监测提供了一种新的思路。

1 变压器故障分类及产生原因

油浸式电力变压器由多种材料构成的部件组成,不同的部件可能出现多种类型的故障。下面以油浸式三相电力变压器为例进行故障分类。

1.1 变压器故障的3层分类

根据分类原理与原则^[4],为了探索变压器各类故障在其表面产生的温度变化,采用“部件-故障原因-温升现象”的3层分类方案:

第1层:按部件属性分类,列出所有部件。

第2层:按部件故障的产生原因分类,囊括导致故障的所有原因。

第3层:按部件故障的温度现象分类,判别是否

有温度变化现象。

第1层的部件属性分类如图1所示^[2,4]。

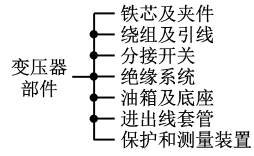


图1 变压器部件属性分类

1.2 铁芯及夹件故障分类

铁芯及夹件故障分类如图2所示^[1,5-6]。

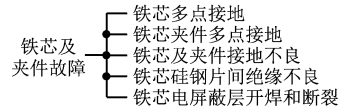


图2 铁芯及夹件故障分类

导致铁芯多点接地的主要原因有铁芯绝缘纸板或木块脱落、铁芯接地线绝缘不良、硅钢片翘凸部分触及接地部位、铁芯绝缘间隙存在导电污垢或异物、铁芯底部木垫脚绝缘不良和铁芯与夹件间绝缘不良等。当夹件与铁芯间绝缘不良、夹件接地线过长且绝缘不良时,可能出现铁芯夹件多点接地故障。如果接地线连接螺栓松动、锈蚀、烧损等,将使铁芯及夹件接地不良。

铁芯硅钢片间绝缘不良往往是因硅钢片间绝缘材料性能下降、铁芯与夹件间绝缘不良或铁芯及夹件接地线绝缘不良等造成的。若制造工艺或材质出现问题,则可能使铁芯电屏蔽层开焊和断裂,造成更严重的绝缘不良。

1.3 绕组及引线故障分类

绕组及引线故障分类如图3所示^[7-9]。



图3 绕组及引线故障分类

绕组变形故障由负载冲击电流(如短路)、运输或安装过程中受到冲撞和绕组固定强度降低等因素引起。而当绕组导线有毛刺、绕组变形导致绝缘介质损坏、绕组没有完全浸入变压器油中或绕组间隙有导电杂质时,匝间或层间将出现绝缘性能下降。如果绕组端部到套管连接不良、绕组内部焊接不可靠、分接开关触头接触不好,绕组直流电阻必然出现异常。

1.4 分接开关故障分类

分接开关有无励磁分接开关和有载分接开关

2种,二者既有相同类型的故障,也有不同类型的故障,综合起来可按图4进行故障分类^[2,10-12]。

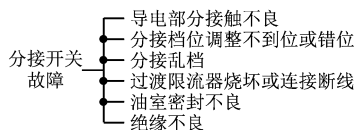


图4 分接开关故障分类

导电部分接触不良包括触头接触不良和引线连接不良,当触头氧化或粗糙、压力弹簧压力不够时就会出现触头接触不良,若引线连接处紧固件松动或焊接质量差就会使引线连接不良。

分接档位调整不到位或错位通常是因操动机构失灵、控制器故障、内部存在异物等造成的。生产或维修时若分接开关接线错误就会使分接乱档。过渡限流电阻器或电感器质量差、接线有误、切换开关某个部位与油箱相碰或切换负载电流过大等都可能引起过渡限流器烧坏或连接断线。

对于有载分接开关,若放油阀门螺丝松动、与变压器本体连接处O型密封圈损坏等,则会出现油室密封不良故障。绝缘件损坏或受潮、绝缘油性能下降、绝缘件上堆积污物等易导致分接开关绝缘不良。

1.5 绝缘系统故障分类

绝缘系统包括液态的变压器油、固态的绝缘纸与板,其故障分类^[2,13-16]如图5所示。

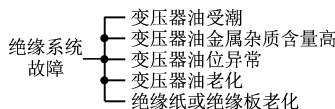


图5 绝缘系统故障分类

变压器密封不良、“呼吸作用”等会让潮湿空气甚至水进入变压器中而导致变压器油受潮。当较多的铁锈落入油中、铜等金属离子溶入油中时,变压器油金属杂质含量就会高。如果变压器密封不良或内部故障引起喷油就会引起变压器油位异常。油温高、污染、氧气、电磁场和机械振动等会使变压器油、绝缘纸和绝缘板老化。

1.6 油箱及底座故障分类

油箱及底座故障分类^[1-2,17-21]如图6所示。

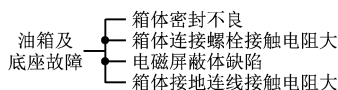


图6 油箱及底座故障分类

油箱焊接不良、密封材料失效、箱体变形、装配不当或油路阀门性能不佳等都会使箱体密封不良。箱体连接螺栓和接地连线的接触电阻大往往是由螺栓腐蚀或安装不当引起的。当磁屏蔽体绝缘层破

损、电屏蔽板焊接质量不佳时,电磁屏蔽体就会出现缺陷。

1.7 冷却系统故障分类

冷却系统由变压器油、散热器、潜油泵、风扇或水冷系统等组成,其故障分类^[1-2,22-24]如图7所示。

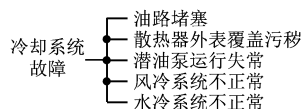


图7 冷却系统故障分类

当油中淤泥进入油路或油路中阀门未打开时,油路将被堵塞。环境中的污秽日积月累地附着在散热器上,若没有及时清理,将使散热器外表被污秽覆盖。潜油泵是机与电设备的组合,若泵、控制器等部件出现故障,将导致潜油泵运行失常。风冷和水冷系统同样是一套机电设备,人为关闭、风扇或水泵损坏、冷却水断流、电动机及控制器失灵都会引起冷却异常。

1.8 进出线套管故障分类

按照电压等级,进出线套管包括实心瓷套管、空心或充油式套管和电容式套管等,其故障分类^[1-2,25-28]如图8所示。

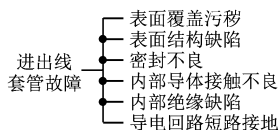


图8 进出线套管故障分类

环境中的污秽附着在套管表面,若不及时清理就有许多污秽覆盖在套管表面。长期风吹、日晒、雨淋和腐蚀等因素将导致金属漆部分脱落、瓷釉表面龟裂,使表面结构出现缺陷。如果端部密封件老化或损坏、紧固力不够或机械部分损坏等就会出现密封不良故障。

内部导体接触不良包括电流通路接触不良、导电杆断裂和套管末屏引线与引线管壁接触不良等。电流通路接触不良通常是由焊接不良、连接件松动、连接处氧化或腐蚀等引起的。如果导电杆承受过载应力就可能在薄弱部位发生断裂。虚焊和变压器振动往往会造成套管末屏引线与引线管壁接触不良。

内部绝缘缺陷包括油中有气泡或油浸纸层中有气隙、均压部件表面有毛刺或内部存在异物和穿芯引线外包绝缘不良等。若维修方法不当,就可能造成油中有气泡或油浸纸层中有气隙。制造工艺不良往往导致均压部件表面有毛刺。若套管密封不良或维修方法不当就可能使异物进入均压部件。穿芯引

线碰到内导管和外包绝缘破损都属于穿芯引线外包绝缘不良故障。除了绝缘击穿外,变压器油中的导电“小桥”若将套管下端部与接地部件短接,则使导电回路接地。

1.9 保护和测量装置故障分类

保护和测量装置主要包括储油柜、储油柜附件(吸湿器、呼吸器、油位计)、安全气道或压力释放阀、气体继电器、净油器和温度计等,其故障分类^[1-2, 29-34]如图9所示。

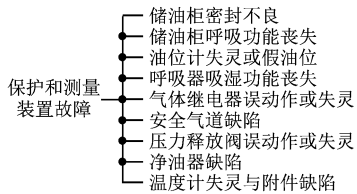


图9 保护和测量装置故障分类

油位计、注油孔、气体继电器和呼吸器等与储油柜连接处密封不良,会导致储油柜密封不良。当呼吸器堵塞、胶囊上下内壁粘连在一起、胶囊/隔膜破裂或波纹膨胀部件阻塞时,储油柜呼吸功能会丧失。若油位计内有空气、密封不良、安装不当或测量元件破损,将导致油位计失灵。当储油柜胶囊干瘪或破裂、呼吸器堵塞时,油位计就会出现假油位指示。呼吸器吸湿功能丧失往往是因为呼吸器中没有干燥剂或干燥剂吸收了足够水分。

气体继电器误动作的主要原因包括本体密封不严、受潮、电气绝缘缺陷、呼吸系统不畅通、变压器内有空气、高速油流冲击、气温骤降和整定值偏小等。整定值偏大、触点接触不良、电气连接断开、干簧管破裂、本体漏油等可能造成气体继电器失灵。因防爆膜破裂或安装不当导致的密封不严和内表面严重锈蚀等都属于安全气道缺陷。若本体密封欠佳、电气回路绝缘不良或呼吸系统堵塞,则可能使压力释放阀误动作。释放阀打开喷油时,因开关接点接触不好或电路开路而不能进行电气安全保护、因主弹簧失效使压力释放阀动作而喷油不止、因密封不良或裂纹而渗油等都表明压力释放阀失灵。

净油器缺陷包括密封不良、吸附剂失效和滤网不严密等。温度计失灵是指由机械与电气部件和外部因素导致的温度测量结果错误,温度计附件缺陷包括温度计座内部锈蚀和因焊接不良、管道开裂或锈蚀等导致的温度计座与变压器连接部位密封不严。

2 变压器故障导致的温度升高现象

2.1 铁芯及夹件类故障导致的温度升高现象

铁芯与夹件多点接地和硅钢片间局部短路都会形成闭合回路,当主磁通穿过这一回路时就会产生感应电流,感应电流在回路中环流而产生热量,出现局部温度升高现象。温度升高又可能使相邻硅钢片间的绝缘膜烧坏,引起硅钢片短路,进而引起变压器温度升高而过热^[35]。

铁芯及夹件接地不良、铁芯电屏蔽层开焊或断裂将使铁芯或夹件产生悬浮电位。悬浮电位及能量积累到一定程度时将产生局部放电,放电电流产生功耗而使局部温度升高^[36]。

2.2 绕组及引线类故障导致的温度升高现象

绕组变形一方面可能破坏匝间/层间绝缘介质而导致匝间/层间短路,另一方面减小了局部的绝缘距离,可能产生局部电场集中而形成对铁芯及夹件、油箱等放电。匝间/层间绝缘性能下降同样可能引起匝间/层间放电,甚至短路^[6-8]。放电时,小的放电电流并不会产生很大的功耗,但它会逐步破坏绕组绝缘介质而引起各种短路。匝间/层间等短路故障将造成巨大的短路电流,巨大短路电流必然会产生很大的热量而使变压器温度升高,甚至烧毁^[6-8]。

绕组直流电阻异常时,电流通过连接不良处时必然产生功耗而使局部温度升高^[9]。

2.3 分接开关类故障导致的温度升高现象

导电部分接触不良时,一方面会使触头或连接处发热,进一步导致变压器油劣化、压力弹簧过热、绕组绝缘材料烧坏而引起更严重的故障;另一方面无功功率减小,致使并联运行的变压器无功功率增大,温升过高^[1-2, 10]。

分接档位调整不到位或错位时,可能会使调压绕组短路而产生大的短路电流,使动静触头接触不良而出现放电现象,逐步导致严重的故障。对于有载分接开关,可能烧坏过渡限流器;分接档乱档时,一般仅使三相输出电压不平衡,而不会出现其他不良现象,且此故障是比较罕见的^[2, 10]。

过渡限流器烧坏会使切换开关发热甚至熔化。切换过程中,连接断线将使动静触头间出现拉弧放电,降低了绝缘油性能而使故障逐步扩大^[2]。

有载分接开关油室密封不良时,一方面会使分接开关缺油,切换开关操作时产生的可燃性气体进入变压器本体油箱中,使其色谱分析结果异常;另一

方面变压器油可能会进入分接开关油室而外溢,使变压器缺油而引发故障^[2,11]。

当分接开关绝缘不良时,分接开关相间、电极尖端、绝缘油等将会发生放电乃至闪络或对地发生短路接地等。放电和短路电流将产生热量,可能引起严重事故^[12]。

2.4 绝缘系统类故障导致的温度升高现象

在绝缘系统故障中,除了变压器油位异常外,都将使绝缘性能下降。绝缘性能下降时,一方面绝缘电阻降低而使泄漏电流增大,引起温度升高;另一方面易于在各处引起局部放电,甚至发展为闪络。放电会使绝缘老化而引起铁芯和绕组类故障^[2,14-16]。

变压器油中金属杂质含量高时,若有有电位差的裸导体之间形成“小桥”,将引起短暂的电气击穿,使变压器油绝缘性能下降而引起温度升高^[2,13]。

除了绝缘性能下降外,绝缘纸或绝缘板老化而失去弹性,在外力的作用下可能断裂或脱落,引起铁芯和绕组类故障^[14]。

油位过低会使引线或铁芯暴露在空气中,有造成内部闪络的危险;同时,油与空气接触面增大会使变压器油的绝缘性能迅速下降^[15]。

2.5 油箱及底座类故障导致的温度升高现象

箱体密封不良时,将出现渗漏油现象而导致变压器缺油;如果巡检不到位或油位监测装置失效,缺油必然引发放电类和散热类故障^[17]。

如果箱体连接螺栓接触电阻大,变压器漏磁通在螺栓与箱沿构成的闭合回路中产生的感应电流会使螺栓及油箱连接处局部过热。过热又会引起密封橡胶老化与变压器油劣化加速,从而引起更多的故障^[18]。

磁屏蔽体有缺陷时,在屏蔽体与箱体、铁芯或夹件间,甚至屏蔽体中都会形成导电环路。变压器漏磁通在环路中产生很大的环流,使变压器局部温度升高,甚至过热^[19]。电屏蔽体出现缺陷时,可能发生放电现象而导致局部温度升高,并引发其他故障^[20]。

如果接地连线接触电阻大,漏磁通在接地连线与箱体构成的闭合回路中将产生感应电流而使连接螺栓及周边发热。由于发热点在油箱外部,一般不会对油质产生不良影响^[21]。

2.6 冷却系统类故障导致的温度升高现象

油路堵塞后,油对流速度就会随堵塞情况而不同程度地减弱,变压器内部热量不能有效传递到散

热器上,使变压器温度升高^[22-23]。

如果散热器外表覆盖了污秽,将阻碍散热器中的热量辐射到大气中,使变压器温度升高^[23]。

潜油泵运行失常时,油的强迫流动速度变慢甚至停止,不能把热量有效地传导给散热器或冷却装置,会引起变压器温度升高^[1-2,23]。

风冷系统运行不正常时,散热器表面空气的强迫流动减弱,降低了散热器的散热能力而使变压器温度升高^[1-2,23]。

若水冷系统工作不正常,变压器油就不会被有效地冷却,变压器温度自然就会升高^[1-2,24]。

2.7 进出线套管类故障导致的温度升高现象

套管表面覆盖污秽、结构出现缺陷会造成表面电压分布不均匀而放电。放电时,一方面使泄漏电流增加而导致套管发热,另一方面可能发展成闪络,造成变压器进线或出线短路^[2]。

密封不良一方面可能使水分等异物进入套管内,另一方面可能出现漏油。异物和漏油都会导致套管内部绝缘性能下降而引起放电甚至绝缘击穿,使套管温度升高^[2,25]。

电流通路接触不良时,接触电阻增大,在电流的作用下套管整体发热,严重时,会使变压器三相负载不平衡而导致变压器温度升高。导电杆断裂后,变压器缺相运行,导致变压器发热。若套管末屏引线与引线管壁接触不良,将出现放电现象,加速套管油老化,从而导致泄漏电流增大,甚至绝缘击穿,使套管温度升高^[2,26]。

油中有气泡或油浸纸层中有气隙会导致局部放电,反复放电将使其绝缘性能整体下降,甚至击穿,从而使套管温度升高。若均压部件表面有毛刺或内部存在异物,同样会导致均压部件局部放电,从而使均压部件击穿而产生热量。当穿芯引线外包绝缘不良时,内导管将流过负荷电流,加上穿芯引线、将军帽与内导管构成的环路中的感应电流,使套管导电回路局部过热^[26-27]。

导电回路短路接地后,强大的短路电流使变压器油温度迅速升高,甚至爆炸^[28]。

2.8 保护和测量装置类故障导致的温度升高现象

如果储油柜密封不良,空气里的水分将进入变压器油中,日积月累会导致绝缘系统类故障,而使变压器温度升高。

呼吸功能丧失后,一方面,随着变压器油温的升高,在气体继电器、油位计、防爆管、压力释放阀和温

度计等处可能会出现漏油。若漏油得不到及时处理就会使变压器缺油,长此以往将导致绝缘系统类故障。另一方面,油受热膨胀,变压器内气压升高,油流无法循环,热量散不出去,内部温度越来越高,最终可能使变压器爆炸^[2,29]。

油位计失灵和假油位会使油位指示错误。若指示油位低于储油柜实际油位,会导致变压器喷油;若指示油位高于储油柜实际油位,将使变压器长期缺油运行,引起绝缘类故障,而导致变压器温度升高^[2,29-30]。

呼吸器吸湿功能丧失后,空气里的水分就会进入变压器油中,日积月累会导致绝缘类故障,而使变压器温度升高^[2]。

气体继电器误动作将切断变压器电源,影响正常供电,但不会使变压器温度升高;如果气体继电器失灵,当变压器内部产生大量气体时则无法实施安全保护,使变压器温度持续升高,甚至爆炸^[2,31]。

安全气道密封不严时,空气里的水分会进入变压器油中;内表面严重锈蚀时,铁锈会落入变压器油中。二者都将降低油的绝缘性能,日积月累导致变压器出现绝缘类故障,而使变压器温度升高^[2]。

压力释放阀误动作将使主变压器跳闸,不会导致变压器温度升高;压力释放阀失灵时变压器油将从压力释放阀渗漏或喷出,若没有及时处理将使变压器在缺油状态下运行,最终导致变压器温度升高,甚至爆炸^[32-34]。

净油器密封不良时,其中的气体会进入变压器内而导致与气体相关的故障;吸附剂失效后,将不能有效滤除变压器油中的水分与杂质,降低了绝缘性能而使变压器温度升高;若滤网不严密,硅胶进入油箱,长期运行后会油循环不良,引起变压器过热^[2]。

温度计座内部锈蚀严重、温度计座与变压器连接部位密封不严时,可能造成变压器渗油或进水受潮,而引起绝缘类故障,使变压器温度升高;温度计指示不准确只可能导致温度保护系统误动或拒动^[2]。

3 结论

(1) 变压器的铁芯及夹件、绕组及引线、分接开关、绝缘系统和油箱及底座等故障都会直接或间接地产生热量而使变压器温度升高。

(2) 冷却系统故障必然导致变压器温度升高。

(3) 变压器进出线套管处于变压器本体外部,一部分故障会导致绝缘系统性能不良、三相负载不平衡等,而间接地使变压器温度升高;另一部分故障使变压器温度升高的可能性很小。

(4) 在保护和测量装置故障中,大多数会引起变压器油类、散热不良和保护功能失灵等故障而间接使变压器温度升高;极少一部分故障在切断变压器电源时,不会导致变压器温度升高。

另外,输入电压太高、过负荷、三相负载不平衡等外部因素也会使变压器温度升高。

可见,变压器绝大多数故障都会导致变压器温度发生变化。

下一步工作需要研究变压器各类故障产生的热量传导到变压器表面的过程、变压器表面温度测量技术和根据表面温度判断变压器故障的理论等。

参考文献:

- [1] 胡孔忠. 变压器运行与检修[M]. 合肥:合肥工业大学出版社,2013.
- [2] 陈家斌. 变压器[M]. 北京:中国电力出版社,2003.
- [3] 郭志红,陈颖,李俊刚,等. 智能变压器状态监测系统的设计[J]. 电气技术,2013,14(4):52-56.
- [4] 吴智慧. 科学研究方法[M]. 北京:中国林业出版社,2012.
- [5] 黄大健. 电力变压器铁芯多点接地故障处理[J]. 广西电力,2007(8):118-122.
- [6] 姜凌霄. 变压器中性点引出线接地端发热分析及处理[J]. 科技创新与生产力,2015(1):91-93.
- [7] 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.
- [8] 陈晓宏. 110 kV 变压器绕组故障分析及对策[J]. 冶金动力,2015(9):1-2.
- [9] 许蓬莱,何勇. 110 kV 变压器匝间短路故障分析[J]. 电工技术,2015(4):34-36.
- [10] 耿伟,耿洁宇. 变压器有载分接开关常见问题的分析和处理[J]. 变压器,2012,49(3):71-73.
- [11] 葛占雨. 变压器有载分接开关常见故障的综合判断与现场处理[J]. 华北电力技术,2006(4):29-31.
- [12] 张德明. 分接开关放电性故障及其诊断[J]. 变压器,2008,45(6):41-46.
- [13] 钱晖,胡旭,申积良. 几台变压器油中铜含量异常的分析及处理[J]. 湖南电力,2007,27(5):14-16.
- [14] 廖瑞金,杨丽君,郑含博,等. 电力变压器油纸绝缘热老化研究综述[J]. 电工技术学报,2012,17(5):1-12.
- [15] 刘健,解辰,蔺丽华. 基于红外图像的电力变压器油

- 位自动检测方法[J]. 高电压技术, 2010, 36(4): 964-970.
- [16] 何海燕, 王晓娟. 电力变压器绝缘老化程度的分析[J]. 陕西水利, 2011(4): 129-130.
- [17] 周文杰. 变压器油箱潜伏性渗漏油的防控[J]. 山东工业技术, 2013(9): 46-47.
- [18] 张丙旭, 郭建辉. 一例典型的变压器局部过热故障及其处理方法[J]. 变压器, 2007, 44(7): 70-71.
- [19] 李伟, 王刘芳, 余国钢. 大型电力变压器磁屏蔽异常实例及分析[J]. 安徽电力, 2005, 22(2): 1-5.
- [20] 董卓飞, 袁凤艳, 蔡玉莲. 大型变压器屏蔽板的故障分析和结构改进[J]. 变压器, 2012, 49(4): 61-63.
- [21] 金海川, 黄蕊, 刘文俊. 变压器外壳接地装置发热原因分析[J]. 机电信息, 2015(36): 78-79.
- [22] 张霁月. 主变压器油位非故障异常原因分析及策略[J]. 安徽电气工程职业技术学院学报, 2013, 18(3): 24-27.
- [23] 王世阁, 王延峰, 姜学忠. 变压器冷却系统故障分析与改进措施[J]. 变压器, 2007, 44(2): 58-63.
- [24] 刘海宾, 孙红玲, 高伟廷. 地下水冷变压器油流及止回阀异响的处理与分析[J]. 变压器, 2013, 50(2): 44-45.
- [25] 曹康, 靳新建, 毛志英. 主变压器本体及套管进水原因分析及防范措施[J]. 河北电力技术, 2007, 26(5): 53-54.
- [26] 刘志轩, 周金聪. 几起变压器套管故障原因分析[J]. 电世界, 2015(10): 17-19.
- [27] 匡新辉, 陈文连. 变压器高压进出线套管多发事故原因分析[J]. 湖南电力, 2007, 27(3): 21-23.
- [28] 易慧. 一起 500 kV 主变压器爆炸原因分析[J]. 广东电力, 2015, 28(4): 117-120.
- [29] 于波. 外油式金属波纹管储油柜油位异常分析及处理[J]. 广西电力, 2012, 35(4): 35-37.
- [30] 吉瑞. 胶囊式储油柜假油位故障的原因分析及处理[J]. 电力安全技术, 2013, 15(11): 15-18.
- [31] 崔政. 瓦斯保护动作的常见原因分析[J]. 电力安全技术, 2011, 13(8): 63-65.
- [32] 方旭光, 徐康健. 变压器压力释放阀与储油柜油位计误动作原因及对策[J]. 变压器, 2013, 50(10): 73-74.
- [33] 张建军, 韩志强. 主变压器压力释放阀异常处理[J]. 电工技术, 2007(12): 73-74.
- [34] 席风沛, 郑广轩. 变压器温度计常见缺陷及故障处理[J]. 变压器, 2015, 52(9): 41-42.
- [35] 彭清峰, 罗道军, 韩金华, 等. 利用温度比较法判断变压器铁芯多点接地故障[J]. 河南电力, 2007(4): 14-15.
- [36] 屈国民. 变压器铁芯多点接地故障的检测与处理[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2007, 23(6): 113-114.