

变压器绝缘油处理技术研究进展

Research Progress on Treatment Technology for Transformer Insulating Oil

张保平 沈涛

Baoping Zhang Tao Shen

水电十四局大理聚能投资有限公司 中国·云南大理 671000

Dali Juneng Investment Co., Ltd. of the Hydropower 14th Bureau, Dali, Yunnan, 671000, China

摘要: 变压器是电力系统的核心设备之一,其绝缘状况和健康水平对电网的安全稳定运行起着至关重要的作用。变压器绝缘油(简称变压器油)是变压器的关键绝缘介质,在变压器的运行中起到绝缘、散热、灭弧等作用,其质量的优劣直接影响变压器的绝缘性能,进而影响变压器的寿命。运行中的变压器油在电场、温度、氧气等外界环境下会发生劣化,导致其理化性能和电气性能降低,绝缘性能随之下降,由此造成变压器绝缘破坏,严重威胁电网的安全运行。论文分析了变压器油劣化的原因,总结了变压器油的处理技术,为变压器油的运行维护提供参考。

Abstract: Transformer is one of the most important equipment of the power system, the insulation status and health level of which play an important role in the safe and stable operation of the power grid. Transformer insulating oil (transformer oil for short) is the key insulating medium of the transformer, which plays the roles of insulation, heat dissipation, arc extinction, etc. during the operation of the transformer. The quality of transformer oil directly affects the insulation performance of the transformer, thus affecting the service life thereof. During operation, transformer oil may be deteriorated under the external environment such as electric field, temperature, oxygen, etc., resulting in the decrease of its physical and chemical properties and electrical properties, along with the decrease of the insulation performance, which will cause insulation damage of the transformer and seriously threaten the safe operation of the power grid. This paper analyzes the reasons for the deterioration of transformer oil and summarizes the treatment technologies for transformer oil, thus providing a reference for the operation and maintenance of transformer oil.

关键词: 变压器; 绝缘油; 再生; 净化

Keywords: transformer; insulating oil; regeneration; purification

DOI: 10.12346/etr.v4i12.7398

1 引言

变压器油是天然石油经蒸馏、精炼得到的一种矿物油,具有性质稳定、粘度小、绝缘性能好等优点,在变压器的运行中发挥着绝缘、散热、灭弧等作用^[1]。运行中的变压器油在氧气、温度、电场、电弧、水分、杂质、金属催化剂等的作用下会发生氧化、裂解等化学反应,生成大量的过氧化物以及醇、醛、酮、酸等氧化产物,再经过缩合反应生成油泥等不溶物,大大降低了变压器油的理化性能和电气性能,导致变压器油的绝缘性能下降,甚至引发变压器事故,严重威胁电网的安全稳定运行^[2]。

通常情况下,劣化的变压器油中只有部分组分发生变质,油中的绝大部分组分仍然具有良好的性能^[3]。因此,可通过特定的工艺将变压器油中的杂质去除,使其各项性能指标恢复到运行标准,从而实现劣化变压器油的再生净化,减少资源浪费,节约变压器的运行维护成本,同时减少废弃物的排放,避免环境污染。

2 变压器油劣化的原因

变压器油的油质劣化在宏观上通常表现为颜色变深、不透明、有可见杂质或油泥沉淀物^[4],通过进一步油质分析,

【作者简介】张保平(1983-),男,中国云南弥渡人,本科,高级工程师,从事风电、光伏工程建设和运维管理研究。

可检测到击穿电压、介质损耗因数、电阻率、酸值、水分含量、油中溶解气体组分含量等指标异常。导致变压器油劣化的原因有溶胶杂质、金属离子、水分、含气量、微生物污染等。

2.1 溶胶杂质

在变压器出厂之前，变压器油和固体绝缘材料之间存在部分杂质、尘埃等物质，随着变压器运行时间的延长，杂质和尘埃逐渐形成直径为1~100纳米的胶体颗粒，并在变压器油中缓慢扩散，逐渐聚集形成粗分散系，当胶体颗粒的粒径超出胶体范围时，在重力的作用下会发生沉积，使得变压器油的电导率显著增大，介电损耗因数也相应增大^[5]。

2.2 金属离子

变压器本体的铜金属构件、铜导线材料、铁芯及外壁的铁材料等在设备严重过热或烧损时会部分溶入油中，产生金属离子，从而加速变压器油的氧化，导致油质劣化，介质损耗因数升高^[6]。

2.3 水分

水分通常是通过大气中的湿气或冷凝作用进入变压器油中的，在电场作用下，水分易发生电离分解，增大变压器油的电导电流，导致介质损耗因数增大、击穿电压和电阻率降低。此外，水分是变压器油发生氧化的重要催化剂，可以加速变压器油的氧化作用，导致油质劣化^[7]。

2.4 含气量

油中存在的气泡会引起油纸绝缘层中的局部放电，使油和纸绝缘层分解产生气体，产生新的气泡或使原来的气泡膨胀。当通过高电场区域时，膨胀的气泡向上移动并再次放电，甚至发生闪络，导致气泡和油分解，生成附着在绕组表面的水、油泥和酸，从而影响冷却效果。同时，油中的气泡也会降低变压器油的绝缘强度^[8]。通常，油中含气量在1%以下时，不易产生气泡，故现场滤油要求将油中含气量过滤到1%以下。

2.5 微生物污染

微生物通常是在安装或检修变压器的过程中引入的，其本身及排泄物富含蛋白质，具有胶体的性质，因此微生物污染本质上也是一种胶体污染。微生物胶体表面携带的电荷会使变压器油的电导率增大，介质损耗相应增大。此外，在变压器的正常运行温度（40℃~80℃）下，微生物能够快速生长和繁殖，加速介质损耗的增大。

3 变压器油处理技术

变压器油处理技术按照处理目的不同分为净化处理和再生处理。净化处理指的是仅用物理方法将油中的水分、固体杂质和气体分离的过程，是变压器的有效防护措施，常用的方法有压力过滤、离心分离、真空过滤和膜分离。再生处理采用物理吸附、化学方法和机械方法相结合的处理技术，将油中可溶和不可溶的污染物除去，尽可能改善变压器油的各项性能指标，以满足变压器运行的要求。

3.1 变压器油净化处理技术

3.1.1 压力过滤

压力过滤技术通常采用压力式过滤机处理变压器油。在压力作用下，变压器油通过滤纸或其他过滤介质（如金属编织物网等），以除去变压器油中的水分、油泥、游离碳、纤维及其他机械杂质，从而改善变压器油的电气性能。然而，压力过滤技术不能有效去除油中溶解的杂质或胶状物，也不能脱除气体。

3.1.2 离心分离

离心分离技术利用转鼓高速旋转时产生的离心力使油中的水分、杂质快速沉淀，达到净化变压器油的目的。转鼓的转速越快，分离效果越好。通常情况下，离心分离能够处理变压器油中较高浓度的污染物，但不能完全去除某些固体物质，也不能去除油中溶解的水分。因此，离心分离只能用作含有高浓度污染物的油的粗滤处理方式，需在其出口处连接一个机械过滤器才能达到净化的目的。

3.1.3 真空过滤

真空过滤是目前使用最广泛的油净化处理技术，它在高真空和一定温度条件下使油雾化或使油流形成薄膜，以脱除油中的气体、水分、挥发性物质等，适用于对变压器油进行深度脱水、脱气处理^[9]。

真空滤油通过真空滤油机来实现，真空滤油机通常包括加热系统、过滤系统和真空分离系统。在真空过滤处理过程中，真空度和油温是影响净化效果的关键因素。在一定范围内，真空度越高，温度越高，净化效果越好，但温度过高会加速油的氧化，因此油温一般控制在60℃。提高真空度可提高变压器油的净化处理效果，一般真空滤油机采用一级或二级真空机，适合220kV及以下电压等级的变压器油净化处理。针对超高压、特高压变压器油的净化处理，采用三级真空滤油机，具有真空度高、抽气速度快、运行稳定可靠等显著优点，可实现500kV及以上电压等级变压器油中水分、气体与挥发性物质的有效去除。

3.1.4 膜分离

膜分离技术主要利用膜的选择透过性对不同化学特性的物质进行分离，具有分离效率高、设备简单、易于操作、成本低廉等优点。

江雷课题组首先提出了将超疏水材料应用于油水分离的设想，即利用超疏水表面对油和水的不同亲和力来实现油水混合物的分离，目前已广泛应用于含油废水的处理中。随后，黄相璇等研制了四种水性环氧树脂乳液浸渍滤纸，用于油中水分的滤除。郭新良等^[10]将纳米SiO₂-环氧树脂超疏水复合膜应用于电力设备油水分离系统中，实现了电力用油中微量水分的有效滤除。王飞鹏等将氟化无纺聚丙烯驻极体滤膜用于变压器油的净化，过滤后油样的绝缘性能得到恢复，击穿电压升高，微水含量、相对介电常数和介质损耗因素降低。

3.2 变压器油再生处理技术

变压器油再生处理技术是一个物理吸附、化学方法、机械方法相结合的过程,用于除去油中的可溶性和不溶性污染物。再生处理之前通常要先进行净化处理,以除去油中的水分、杂质等,再生处理后的油也要进行精滤才可使用。

吸附处理技术利用吸附剂对油中的酸性组分、树脂、沥青质、不饱和烃类、水分等物质的强吸附能力实现变压器油中有害组分的去除,是目前变压器再生处理中应用最广泛的方法,具有再生效果好、工艺流程简单、运行成本低等优点。

作为吸附处理技术的核心,吸附剂的吸附容量和吸附选择性对吸附效果起着决定性的作用。目前,常用于变压器油再生处理的吸附剂有活性白土、硅胶、活性氧化铝、硅铝吸附剂、分子筛等。

3.2.1 活性白土

活性白土是黏土经酸化后得到的一种吸附剂,用于脱除油中的酸性组分和残留酸渣。与传统白土相比,活性白土具有更大的比表面积、更高的活性和更强的吸附能力。L NASRAT 等采用活性白土对劣化变压器油进行吸附处理,与普通物理净化方法处理的变压器油相比,活性白土处理过的变压器油各项性能指标均得到有效提升。王晋华等探究了活性白土净化变压器油的机理,研究表明,含蒙脱石的膨润土经酸化后,蒙脱石晶层间含有的 Mg^{2+} 、 K^{+} 等阳离子被 H^{+} 取代,活性大大增强。此外,镁、铝等离子以及可溶性杂质的溶出也增大了活性白土的比表面积,同时形成微孔状结构,增加空穴,进而增大其活性。

3.2.2 硅胶

硅胶的主要成分是含结晶水的二氧化硅,其表面含有硅烷醇特征基团,可吸附水分、气体及有机酸等氧化产物。用于油处理的通常是粗孔硅胶,主要用于去除油中的水分、酸性组分、油泥等。杨鸿森等发现,经球型硅胶吸附处理的废旧变压器油,其介质损耗、酸值和含水量都大大降低。

3.2.3 活性氧化铝

活性氧化铝是铝矾土经加工、精制、活化而形成的一种吸附剂,其主要成分是含结晶水的 Al_2O_3 ,能够高选择性地吸附油中的水分和酸性组分,常用作油类的吸附脱酸剂,但对树脂和油泥类氧化产物吸附效果较差。刘祥茂等提出的活性氧化铝改性产品“铝素”具有 100 埃的毛细孔径,比表面积达到 $250\sim 350m^2/g$,能够有效吸附变压器油中的老化产物。

3.2.4 硅铝吸附剂

硅铝吸附剂是近年来研制的一种人工合成吸附剂,主要成分为 $SiO_2 \cdot Al_2O_3$,孔径分布单一均匀,且具有较大的比表面积,是目前使用效果较好的油品再生吸附剂。唐金伟等制备的微孔硅铝吸附剂可用于退运变压器油的吸附处理,经处理,变压器油的酸值、介质损耗因数、体积电阻率等性能

指标显著提升,满足运行变压器油的质量要求^[11],且油中的油泥和极性老化产物含量显著降低,实现了变压器油的循环利用。

3.2.5 分子筛

分子筛也是一种人工合成吸附剂,其主要成分是 SiO_2 和 Al_2O_3 ,能够吸附溶解于油中的水分、氧化产物等物质,同时还能有效脱除色素、油泥等,具有吸附能力强、选择性强、再生成本低等优点。801 吸附剂(Y型分子筛)是油处理领域中应用较为广泛的一种吸附剂,能够有效降低油的酸值和介质损耗因数,提高变压器油的绝缘性能。

4 结语

变压器油质劣化会破坏变压器绝缘,威胁电网的安全稳定运行。劣化的变压器油通过适当的净化或再生工艺可恢复其理化性能和电气性能,实现循环利用,从而节约资源,减少废弃物的排放,避免环境污染。论文总结了变压器油的净化和再生处理技术,为变压器的运行维护提供参考,具体选用时,应根据实际需要选用合适的处理方式,以保证变压器的安全运行。

参考文献

- [1] 侯俊宏.浅谈亭子口电站500kV变压器绝缘油处理[J].水电站机电技术,2016,39(11):50-51.
- [2] 蒋明东.电力用油存在的问题、净化及最新油净化技术[J].电力建设,2004(12):15-17+35.
- [3] 李兴.绝缘油的净化处理技术[J].清洗世界,2016,32(11):36-38+48.
- [4] 陈伟.变压器油质劣化问题分析及处理[J].江苏电机工程,2003(2):39-40.
- [5] Qian Y H, Huang Y B, Fu Q, et al. Comparative study on the impurities content of hydrogenated transformer oil under static condition[J]. Advanced Materials Research,2011,421(1):129-135.
- [6] 虞金华.关于220kV变压器绝缘异常问题的思考[J].科技创新与应用,2012(8):85.
- [7] 刘玉文,魏东,于桂兰.电力用油存在的问题及净化[J].黑龙江电力,2007(6):476-477+480.
- [8] 张军,谭清.安装500kV电力变压器绝缘油的处理[J].内蒙古电力技术,2009,27(S1):25-27.
- [9] 中华人民共和国原水利电力部.GBJ148—1990电气装置安装工程电力变压器、油浸电抗器、互感器施工及验收规范[S].北京:中国计划出版社,2003.
- [10] 姚化亭,刘国跃.变压器油介损异常分析及处理[J].电气时代,2006(9):92-93.
- [11] 陈梅,陈建国.某110kV变压器油介质损耗增大原因分析[J].宁夏电力,2013(3):65-67+71.