

孙坚明 李荫才 编著

运行变压器油 维护与管理



 中国标准出版社

运行变压器油 维护与管理

孙坚明
李荫才 编著

中国标准出版社

图书在版编目(CIP)数据

运行变压器油维护与管理/孙坚明,李荫才编著.
北京:中国标准出版社,2006
ISBN 7-5066-4132-1

I. 运… II. ①孙…②李… III. ①变压器油—维
护②变压器油—管理 IV. TM407

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 047308 号

中国标准出版社出版发行
北京复兴门外三里河北街 16 号
邮政编码:100045

网址 www.bzchs.com

电话:68523946 68517548

中国标准出版社秦皇岛印刷厂印刷
各地新华书店经销

*

开本 880×1230 1/32 印张 3.625 字数 100 千字
2006 年 8 月第一版 2006 年 8 月第一次印刷

*

定价 12.00 元

如有印装差错 由本社发行中心调换
版权专有 侵权必究
举报电话:(010)68533533

前 言

随着我国电力工业的飞速发展,输、变电设备也正向大容量、高电压方向发展,500kV 的交、直流设备已广泛地得到了应用,并已成为电网运行的主骨架。为了确保充油电气设备的安全运行,对运行油的维护和管理的技术难度也在加大,因而,对变压器油运行维护方面的技术资料的渴求也愈加迫切。

本书是对 GB/T 14542—2005《运行变压器油维护管理导则》的详细诠释,结合作者多年来的实践经验与讲课内容编写而成。标准只能是原则性地告诉读者应该怎样,不应该怎样;但广大基层油务工作人员更多的是希望了解原因以及相关的实践经验和对某些重要措施的理解。本书在内容上比较系统地总结了国内、外在运行变压器油维护管理上的研究成果和生产实践经验,以满足读者的需求。

本书还详细地介绍了几个先进国家近几年公布的有关变压器油的标准以及运行维护方面的标准要求。

由于作者水平有限,书中难免会有错误和不足之处,恳请读者批评指正。

编 者

2006 年 3 月

目 录

第一章 变压器油的性能	1
第一节 变压器油的功能	1
一、绝缘功能	1
二、散热冷却功能	1
三、灭弧功能	2
四、对绝缘材料的保护功能	2
第二节 新变压器油应具备的性能	3
一、化学性能	3
二、物理性能	4
三、电气性能	7
四、石蜡基油与环烷基油的比较评价	10
第三节 新变压器油的有关技术规范	11
一、国产变压器油技术规范	11
二、国产超高压变压器油技术规范	13
三、断路器油技术规范	14
四、国际电工委员会 IEC 60296 标准	15
五、美国 ASTM D3487 矿物绝缘油标准	17
六、英国变压器油标准	19
第二章 运行变压器油的变质及油质的试验意义和方法	22
第一节 运行变压器油变质的影响因素	22
一、变压器油劣化的基本因素	22

二、变压器油变质的影响因素	24
第二节 油质的试验方法	25
一、物理试验	25
二、化学试验	28
三、电气试验	30
第三节 水分与纤维素绝缘的关系	32
一、纤维素纸绝缘的内在问题	32
二、水的特性与其对纸纤维素的影响	36
第四节 取样	41
一、新油到货验收时的取样	42
二、从运行设备中取样	43
第三章 运行变压器油的评定	45
第一节 投入运行前变压器油的评定	45
一、新油交货时的验收	45
二、新油净化后注入设备前的检验	45
三、新油注入设备进行热油循环后的检验	46
四、新设备投入运行通电前的检验	46
第二节 运行中变压器油的评定	47
一、GB/T 14542—2005《运行变压器油维护管理导则》	47
二、IEC 60422 导则的试验项目和极限值标准	50
第三节 试验结果的解释及相应措施	54
一、试验结果的解释	54
二、相应措施	55
第四节 我国充油电气类设备运行现状	57
一、设备的运行情况	57

二、变压器事故及原因分析	64
三、变压器障碍	67
四、互感器障碍	69
五、并联电抗器故障	70
第四章 运行变压器油的维护	71
第一节 运行变压器油的防老化措施	71
一、安装油保护装置	71
二、安装净油器	75
三、添加抗氧化剂	79
四、添加静电抑制剂(BTA)	81
第二节 运行油维护的补充措施	86
一、油的相容性(混油)	86
二、变压器油泥的冲洗	88
第三节 油处理	89
一、净化处理	89
二、再生处理	96
第五章 变压器油的管理	102
第一节 变压器油的储存和输送	102
第二节 变压器油的技术管理	103
一、库存油管理	103
二、技术管理	104
第三节 变压器油的安全与卫生管理	105
一、安全管理	105
二、环境与卫生管理	106
参考文献	107

变压器油的性能

第一节 变压器油的功能

变压器油除了应用于变压器外,还应用于其他许多电器设备上。这些设备包括绝缘套管、断路器、隔离开关、分接头切换开关以及互感器和电抗器等。

一、绝缘功能

在电器设备中,变压器油可将不同电位(势)的带电部分隔离开来,使其不致于形成短路。因为空气的介电常数为 1.0,而变压器油的介电常数为 2.25,所以,油的绝缘强度要比空气的绝缘强度大得多。假设,变压器的线圈暴露在空气中,在设备运行时很快就会被击穿;而在变压器线圈之间充满了变压器油,则增加了介电强度,就不会被击穿,并且随着变压器油的质量的提高,设备的安全系数就越大。所以变压器油具有的可靠绝缘性能,是其主要的功能之一。

二、散热冷却功能

变压器在带电运行过程中,由于线圈有电阻,铁心有磁蚀和涡流损失,当电流通过时,它必然像其他电器一样发热。如果不将线圈内的这一热量散发出来,它必然会使线圈和铁心内聚积的热量越来越

多,从而使铁心和线圈内部的温度急剧升高,损坏线圈外部包覆的固体纤维绝缘,以致于烧毁线圈。若是使用变压器油作为冷却介质,那么线圈内部产生的这部分热量,先是被油吸收,然后通过油的循环使热量散发出来,而不会在线圈内部产生热量的聚积,从而保证了设备的安全运行。吸收了热量的变压器油其冷却方式有自然循环冷却、自然风冷却、强迫油循环风冷却和强迫油循环水冷却等方式。一般大容量的电力变压器大部分采用强迫油循环的冷却方式。所以散热冷却是变压器油的第二大功能。

三、灭弧功能

在开关设备中,变压器油主要起灭弧作用。当油浸开关在切断电力负荷时,其固定触头和滑动触头之间会产生电弧,此时的电弧温度很高,并且随开断电流的大小而不同。如果不设法将弧柱的热量带走,使触头冷却,那么在初始电弧发生之后,还会有连续的电弧产生,从而很容易使设备烧毁,同时还会引起过电压的产生而使设备损坏。

当油浸开关在最初开断受到电弧作用时,由于电弧的高温使得油发生剧烈的热裂解,在其裂解产物中约有 70% 的氢气。由于氢气的导热系数较大(为 41),此时氢气就可以吸收大量的热量,并且将此热量传导至油中,而直接将开关触头冷却,从而达到了灭弧的目的。所以变压器油的灭弧作用是其第三大功能。

四、对绝缘材料的保护功能

由于变压器油的粘度相对较低,因此流动性较好,它可以很容易地充填到绝缘材料的空隙之中,所以可起到保护铁心和线圈组件的作用。由于油充填在绝缘材料的空隙之中后,它可将这些空隙中的气体置换出来,从而使易于氧化的纤维素和其他材料所吸附的氧的含量减少到最低程度。也就是说,油会使混入设备中的氧首先起氧化作用,从而延缓了氧对绝缘材料的侵蚀。

概括起来说,变压器油在变压器、电抗器、互感器和套管中主要起绝缘和散热冷却作用,但若在上述设备中有电弧产生时,也可起灭弧作用,在油开关中主要起灭弧和绝缘作用。

第二节 新变压器油应具备的性能

充入电器设备的变压器油运行的可靠性,取决于变压器油的某些基本特性参数,而这些特性参数将能改变电器设备整个工况的综合性能。为了有效地完成变压器油的绝缘、散热冷却以及灭弧等多方面的功能作用,变压器油本身必须具备良好的化学、物理和电气等方面的性能。

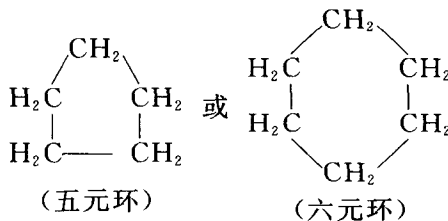
一、化学性能

1. 成分组成特性

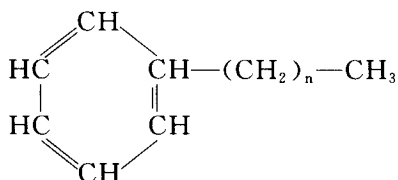
变压器油是由矿物石油精炼而成的一种精加工产品。其成分组成主要为碳氢化合物,即烃类。它包括烷烃、环烷烃和芳香烃。

烷烃通常被看做是饱和的碳氢化合物,以直链为其结构特征,在有机化学上被归入脂(肪)族化合物,其结构特征为 $\text{H}_3\text{C}-(\text{CH}_2)_n-\text{CH}_3$ 。

环烷烃被归入环状化合物,又称脂环族化合物。根据构成环的碳原子数目,可以是三元环、四元环、五元环和六元环的结构;而根据环的数目,环烷烃可以是单环的和双环的结构。其结构特征为:



芳香烃是以苯环为基本结构的具有一个或多个芳香环为特征，其结构式为：



此外，变压器油中还含有少量的非烃类物质，它们也有类似于烃类的骨架，只是其中的部分碳原子被硫、氧或氮所取代。它们在油中的含量经过精炼加工后仅有 0.02% 左右，一般对油品的特性影响不大，新油中铁和铜的含量也极少。

一般情况下，变压器油中的芳香烃成分应有一定的控制。虽然某些类型的芳香烃具有天然抗氧化剂的功能，能提高油的安定性，但是含量太高则会降低油的绝缘或冲击强度，并增大对浸于油中的许多固体绝缘材料的溶解能力。

2. 中和(或酸)值

经过精加工处理的变压器油要求总的酸值含量必须低，以减少油的电导和对金属及绝缘材料的腐蚀，并使绝缘系统的寿命达到最长。

3. 含水量

为了达到足够的绝缘强度，要求变压器中含水量相当低是必要的，以最大限度地延长绝缘系统的寿命，并使金属的被腐蚀程度降低到最小。

二、物理性能

1. 粘度

粘度被认为是油流动阻力的度量标准，而且对热传导和浸于油

中的活动部件都是至关重要的。粘度指数($V \cdot I$)是用来表示油的阻力随温度变化而粘度也改变的关系。高粘度指数的油比低粘度指数的油对温度的变化更稳定。通常石蜡基油的 $V \cdot I$ 值较环烷基油为高。但是,在 0°C 及以上温度时(大多数变压器油在此温度下运行),石蜡基型变压器油的粘度值往往较环烷基型变压器油的粘度值稍微低一些。

2. 密度

油品的密度与温度有关,因此需要根据不同的温度予以校正。在相同粘度条件下,石蜡基型变压器油的密度通常比环烷基型变压器油的密度低。通常情况下,变压器油的密度为 $0.8\text{g}/\text{cm}^3 \sim 0.9\text{g}/\text{cm}^3$ 。

3. 凝固点

在规定条件下,油刚刚开始流动的最低温度被称为凝固点。变压器油的这个特性是相当重要的,对于气候寒冷的地区,低凝固点的油具有特别的意义。因为低凝固点将能保证油在这种气候条件下仍可以循环,从而起到绝缘和冷却介质的功能,同时也不会对像断路器那样的机构的动作造成妨碍。我国变压器油的牌号是根据凝固点的不同而划分为 10 号、25 号和 45 号三种牌号。根据我国各地区纬度的不同和最寒冷时的气候条件,用户可选用上述不同的牌号。

一般来讲,借助于变压器油的凝固点有助于鉴别不同类型的油基。例如:大多数环烷基油其凝固点低(-40°C 以下),而石蜡基油凝固点高。大多数石蜡基油都有一个固化点,而环烷基油则没有。这里还应指出,由于现代炼油工艺和高效催化剂的出现,用高温、高压下进行全加氢精制的变压器油,不管是石蜡基原油炼制还是环烷基油炼制,其凝固点都很低($<-40^{\circ}\text{C}$)。

4. 挥发性

油品的挥发性实际是与变压器油在使用环境条件下的安全性有

一定的内在联系。具体说,挥发性是在一定温度、时间及火焰大小等条件下的闪点和着火点。这里必须指出,闪点和着火点不是一个等同的概念。

闪点是指油品加热到有足够的油气产生,并在其上外加一个火焰,使油—气表面在一瞬间着火的最低温度;着火点则是指当油品加热到有足够的油气连续产生,外加的火焰于其上能维持 5s 燃烧时的最低温度。在变压器油的标准中只有闪点要求而没有着火点的要求。

从分子运动的观点看,闪点低则表示烃类分子运动达到某种激烈的程度所需要的能量低,或者说以较少的热量就能迫使它运动。闪点的高低与油中烃类组成的分子结构以及低分子量的组分多少有关。

一般情况下,环烷基油的挥发性要比石蜡基油高。这从我国变压器油的标准(GB 2536)中也可以看出。如 45 号变压器油的闪点限值要比 25 号和 10 号油的闪点低 5°C 左右,因为我国 45 号变压器油主要以环烷基的原油炼制而成。

5. 氧化安定性

运行中变压器油老化的因素很多,如外部因素(包括温度、空气、电场、金属材料和金属化合物催化剂、水分等)的影响,而内部因素则与油品的组成有关。

变压器油是由结构复杂的混合烃类所构成,由于各种烃类化学结构及在油中所占比例不同,因此其氧化安定性也就有所差异。通常环烷烃的抗氧化性能差,容易生成酸和其他产物,但不会生成不溶的氧化物沉淀,同时环烷烃对抗氧化剂的感受性较好,从而弥补了它的不足之处;同样烷烃的抗氧化能力也较差,而且它在强电场的作用下容易发生脱氢反应,形成高分子的聚合物通常称为 X 蜡;芳香烃对变压器油的氧化安定性起着重要作用,但由于其结构不同而对油

品性能的影响也各不相同,双环芳香烃具有一定的抑制氧化的能力,多环芳香烃是一种很好的天然抗氧化剂,但其氧化后容易产生沉淀,同时使油的颜色变深。所以采用环烷基原油并经适度精制,然后加入抗氧化剂调合,是较为理想的具有较好氧化安定性的变压器油。

6. 界面张力

界面张力对反映变压器油质劣化产物和从固体绝缘材料中产生的可溶性极性杂质是相当敏感的。

所谓界面张力是指在油—水两相交界面上,由于两相液体分子都受到各自内部分子的吸引,且各自都力图缩小其表面积,这种使液体表面积缩小的力称为表面张力。习惯上将被试液体表面与空气接触时(气—液相)所测得的力称为表面张力;而将被试液体与其他液相接触时(液—液相)所测得的力称为界面张力。

如果纯净的油,通常在水相的界面上部产生 $40\text{mN/m} \sim 50\text{mN/m}$ 的力,但由于油的氧化产物和其他杂质是亲水性的,因此它既对水分子有吸引力,又对油分子有吸引力。那么在油和水的界面之间形成了纵向的联系,从而减弱了油和水相界面之间的横向联系,于是界面便不明显,其界面张力也就减小了。所以油的界面张力值的大小是与油的氧化程度密切相关的。

用界面张力值的高低这一特性数字,可以反映出新油的纯净程度和运行油的老化状况。

三、电气性能

1. 绝缘强度(击穿电压)

绝缘油的绝缘强度或击穿电压是衡量它在电气设备内部能耐受的电压的能力而不被破坏的尺度。也就是检验变压器油性能好坏的主要手段之一。它是在规定的试验条件下,两个电极之间发生击穿时的电压。一般干燥清洁的油品具有相当高的击穿电压值,国产变

压器油的击穿电压都在 40kV~55kV 范围内,有的可达 60kV 以上。但当油中含有游离水分、溶解水分或固形物时,由于这些杂质都具有比油本身大的电导率和介电常数,它们在电场(电压)作用下会构成导电桥路,从而降低油的击穿电压值。击穿电压试验可以判断油中水分、杂质和导电颗粒的污染程度,但它不能判断油品是否存在有酸性物质或油泥。

对于新变压器油而言,这一性能指标的好坏反映了油中是否存在有污染杂质。当然实际应用时,在将油注入设备之前,都必须经过适当的处理设备至完全符合要求后,才能注入电气设备中,这是为了充分保证电气设备在投运时的安全性。石蜡基油的击穿电压与环烷基油相类似。

有关物质的介电常数参见表 1-1。

表 1-1 有关物质的介电常数

物 质	介 电 常 数	物 质	介 电 常 数
空 气	1.0	陶瓷制品	7.0
矿物油	2.25	水(纯水)	81.0
橡 皮	3.6	冰(纯)	86.4
纸	4.5(平均)		

2. 介质损耗因数

介质损耗因数主要是反映油中泄漏电流而引起的功率损失。介质损耗因数对油中可溶性的某些污染物、老化产物或胶体物质是很敏感的,甚至当轻微污染而用化学方法检查不出时,它都可以满足检

出要求。

对于新油而言,介质损耗因数只能反映出油中是否含有污染物质和极性杂质,而不能确定存在于油中的是何种极性杂质。一般来讲,新油中的极性杂质含量甚少,所以其介质损耗因数也很小,仅为 0.000 1~0.001 范围。但当油氧化或过热而产生劣化或混入其他杂

质时,随着油中极性杂质或充电的胶体物质含量增加,介质损耗因数也会随之增大,高的可达 0.1 以上。根据这一事实就不难理解,在许多情况下,当新油的介质损耗因数是合格的,但注入设备以后,即使还没有带负荷运行,即不存在过热而引起油质劣化的问题,却发现油的介质损耗因数迅速增高。这可解释为在油注入设备后,与设备内的某些绝缘材料,如橡胶、油漆及其他有关材料等具有溶解作用而形成某些胶体杂质影响的结果,也就是油与绝缘材料的相容性不匹配的问题。

对于新变压器油而言,如果介质损耗因数在 90°C 下超过 0.005,则需要查明原因,采取适当的处理方式,以保证油的质量在规定的合格范围之内。对于超高压(500kV 及以上)设备的供油,其介质损耗因数更加严格,在 90°C 下不能超过 0.002。这里还应指出:油的介质损耗因数随温度的不同而有很大的变化。因为介质的电导率是随温度的升高而增大,相应地其泄漏电流和介质损耗因数也会增大。为了排除油中水分对介质损耗因数的影响,现在一般规定测高温情况下的介质损耗,如各国普遍采用测 90°C 下的介质损耗,我国的标准已与国际上通用的方法标准接轨。在西方的个别国家还有采用测 100°C 下的介质损耗,如美国的 ASTM 标准。这样或许更能直接的反映出油中污染物质的存在。

3. 在电场作用下产生气体的倾向

变压器油在受到电应力场的作用下,部分烃分子会发生裂解而产生气体,这部分气体以微小的气泡从油中释放出来。如果小气泡量增多,它们会互相连接而形成大气泡。由于气体与油之间的电导率存在着很大的差异,那么在高电场的作用下,油中会产生气隙放电现象,而有可能导致绝缘的破坏。这种现象在超高压输变电设备中

显得尤为突出。为了改变这种状况,所以对用于超高压设备的油品提出了更高的要求。要求超高压油应具有气体吸收性能。油品的这种性能是与其内在的成分构成有关,一般来讲芳香烃具有吸收气体的能力。当油品中的芳香烃含量达到某一限量时,油就表现为吸气性能,经研究发现单环芳烃改善吸气性能的效果要远远差于双环芳烃的吸气效果,而且还增加了油的吸潮性能和降低油的抗氧化能力。

四、石蜡基油与环烷基油的比较评价

虽然以环烷基油生产的变压器油比以石蜡基油生产的变压器油为佳,但由于环烷基石油的油源逐渐耗尽,应用石蜡基油源生产变压器油已是势在必行。但环烷基油与石蜡基油确实存在着一些差异:

1. 残炭杂质的沉降速度

在油浸断路器(开关)设备中,在开断电流下油会为电弧能量所分解而产生残炭。石蜡基油在开断后产生的残炭,由于其沉降速度缓慢,形成的这种炭粒在设备内的关键区域会使绝缘强度降低,并有可能产生相对地的闪络。而环烷基油在开断后生成的残炭会在相当短的时间内就沉降下来,因而不会影响设备的绝缘强度。

2. 低温性能

石蜡基油由于含蜡量较高,除进行深度脱蜡,否则在较低温度下(0°C 以下)会有蜡的结晶析出。由于蜡在油溶液中呈溶解状态时对绝缘无不良影响,但当蜡从溶液中沉析出来后,蜡本身是一种不良的绝缘体,既影响到设备的绝缘(蜡沉析出来后会粘附在内部的线圈和铁心上),又妨碍传热。而环烷基油即使在 -40°C 以下,都可以正常工作而不会影响绝缘性能。所以,低温性能是环烷基油的最显著的特性。