

[变压器]

充油运输变压器在运输途中持续充氮造成油箱外鼓问题原因分析

文/ 保定天威保变电气股份有限公司 李彩云 王雪岗 张盛蕾 王福斌 肖颖

变压器带油运输上部空间充入一定量的氮气，对保护变压器器身不受潮是有利的，但是压力过大会造成变压器油箱外鼓，并形成永久变形。本文从变压器油的吸气性着手，对这类变压器油箱外鼓原因做了分析，并建议当采用带油运输方式时，充入的保护氮气压力不宜过大，保持微正压即可。

当变压器采用充油运输方式时，为了满足变压器油热胀冷缩的要求，变压器油都不充满变压器油箱，一般要求上部留出约 200 mm 的膨胀空间。这个空间，变压器制造厂可以抽到很高的真空。然而，受运输振动的影响，这一高真空容易导致大气通过变压器各个密封部位甚至焊缝进入变压器油箱内部。而大气的持续进入会导致大气中的水分进入变压器油中，以至于使变压器纸绝缘受潮。为了防止这一情况的发生，总是给这一体积有限的空间充入足够的高纯氮。按照经验，在变压器出厂前一般要把氮气充到压力 20 kPa。但是，在运输途中，氮气压力常常会下降。即使如此，正常情况下，带油运输的变压器，在厂内按要求充好氮气后，也不再加装压力表和补气装置，运输途中不监测氮气压力，也不补充氮气。但是近期有一台变压器在运输途中，对其补充了氮气，确保氮气压力维持在 20 kPa。这样运输的变压器到现场后发现油箱四壁明显外鼓。本文依据变压器油含气量测试实践，并结合简单的理论计算，对这一问题进行了讨论分析，希望能给各变压器制造厂提供参考。

变压器油的吸气性

虽然变压器油的吸气性因油品不同而异，但在常温常压下，大多数变压器油可以吸收 12% 的空气。这个百分数也就是变压器油在常温常压下的饱和含气量。“常温常压”是个范围，所以，饱和含气量是个大约数。变压器油对于空气的“吸收”，实质上是空气的各种分子溶解到油中，而不是以气泡的形式悬浮在油中。在这种情况下，油是溶剂，空气是溶质。那么，在溶解大量的空气后，油的体积并无明显的变化。

“12%”这个饱和含气量是指在常温常压下（应该是在某确定温度和压力下）和变压器油接触的空气压力始终是常压，即空气不因变压器油的吸收而减压。这种情况和密闭容器并不相同。所谓“密闭容器”在生产中可能是密封后的变压器、油罐或者真空净油机的脱气室。那么，在密闭容器里，随着油上部空间的气压的增减，油的饱和含气量怎样变化呢？在生产实际中，一般是把真空度抽到 10 Pa。而多家多台真空净油机的使用实践表明，在该真空度下，油的含气量（即饱和含气量）大约为 0.05%。这样得到一个经验点，即（10 Pa，0.05%）。

实际上,前面已经有一组数据,就是在常压 101 325 Pa 下变压器油的饱和含气量为 12%。在这两个点之间,还有无数个点。它们的连线可能是一条平滑的曲线,也可能是一条直线。不妨假定其为直线,其形状如图 1 所示。

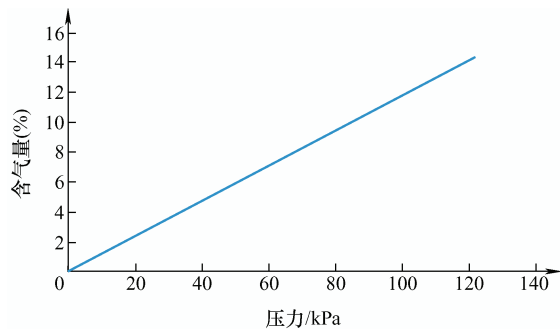


图 1 压力与油中含气量关系曲线图

表 1 变压器油在常温和不同压力下的含气量

压力/Pa	121 325	101 325	80 000	60 000	40 000	20 000	10 000	5 000	2 500
含气量(%)	14.35	12	9.48	7.12	4.76	2.41	1.23	0.64	0.34

油箱变形外鼓原因分析

以容量为 400 MV·A、电压等级为 500 kV 的单相发电机变压器为例进行分析。

假定该变压器充油总体积为 50 m³,上部空间为 5 m³。油的初始含气量一般为 2%,也就是说,刚开始充入的 50 m³变压器油中已经含有 1 m³的空气。根据前述计算,倘若再给这 50 m³变压器油补入 5 m³的氮气(假定氮气和空气相同,并且完全溶解于油中),则变压器油中的气体总量即达饱和值 12%。可是,12%这一饱和状态的前提是油上部空间的氮气压力为 1 大气压,即 101 325 Pa。为了保证这一要求,上部 5 m³的空间还必须充入 5 m³氮气。也就是说,在真空状态充油 50 m³后,接下来的上部空间充氮,必须充入 10 m³的氮气。一般刚充完氮气后的压力表不会显示 1 大气压(即表针刚好指零),而应该高于甚至远远高于 1 大气压,作业人员常常是充到工艺守则规定的 20 kPa。由于从充氮开始,氮气就往油中溶解,这是一个难以掌握的动态过程,那么,充到规定的压力值时,到底充入了多少立方米的氮气,人们并无概念,操作人员记录的也不是体积数,而是压力值。

根据直线的两点式方程,可以求得含气量 y(%)和压力 x(kPa)之间的关系式为

$$Y=kx+0.048\ 82 \tag{1}$$

其中, $k=0.1179\ (\%/kPa)$

根据式(1)可以计算出不同压力下的油的饱和含气量。在计算时,可以考虑高于 101 325 Pa 的情景,依据式(1)可以计算得到一组数据,见表 1。

依据两对数据和假设推算得到的这些数据和客观实际会有差别,特别是当压力很低即真空度很高时更是如此。但是,在下一节会看到,这对于要讨论的问题已经无关重要了,主要是通过此计算数据可以看出压力与油中溶解气体含量的变化趋势。

根据经验来看,刚充入的高达 20 kPa 的氮气压力不能持久保持。若能持久保持,按照前表 1,油中含气量应该稳定在 14.35%以上。若 20 kPa 压力虽有所下降,但没有下降到“0”(即 1 大气压,亦即 101 325 Pa),说明油中的含气量已经超过 12%。在运输途中,随着颠簸振动,氮气持续向油中溶解。当向南方运输变压器时,气温常常是逐渐升高的。而温度升高恰恰增大了溶解度,变压器油因此溶解更多的氮气。那么,表压沿途必然下降。押运人员持续补压,相当于坚持把变压器油的含气量补到大于 14.35%。

那么,变压器油箱内压为何会增大呢?伴随着气温升高,变压器油(液体)本身的体积上升。按照 0.000 8 m³/m³·℃ 体积膨胀系数计算,假设从北方运到南方气温升高 20 ℃,那么,这台变压器的 50 m³的油体积膨胀为

$$50\times 20\times 0.000\ 8=0.8\ (\text{m}^3)$$

这样随温度升高变压器油的体积有所增加。另外,溶解氮气到过饱和的变压器油,一方面继续溶解氮气,另一方面又向上部气体区域释放气体(不仅仅是氮气,还有原本含有的氧气)。实际上这种不断变化的动态平

衡在运输途中早已存在。当变压器油溶解气体的过饱和程度持续加剧,以及变压器油的体积持续膨胀时,两者对油箱产生正压效应,内部正压超出油箱允许强度,油箱以弹性变形即外鼓减小内压。当外鼓过多、持续时间过长时,油箱的弹性变形成为永久变形,最终导致油箱外鼓变形。

结束语

根据上述分析,对于充油兼充氮运输变压器所发生的油箱外鼓,是因为运输途中持续补压充入氮气过多所造成的。内压高一些有利于防止大气的侵入,但是,和充油兼充氮但途中不补压的变压器相比,补压的必要性十分微弱,只要保证氮气微正压即可。

根据各制造厂多年现场安装经验,即使运输途中不持续补充氮气,变压器在运抵现场后依然有一定的压力

(正压)存在,很少有完全泄压(负压)的情况。变压器在运输途中是否会受潮呢?从理论上说,只要变压器内部处于正压,大气侵入的可能性微乎其微,正如自行车内胎或者工业场合用水或肥皂水试漏一样,即使存在漏点,内部气体喷出鼓泡,外界水分进不去,何况,变压器在工厂内经过严格的试漏,运输途中几乎不发生渗漏。

另一方面,充油兼充氮的变压器,油中溶解了很多气体,在安装完工后,一定要把那些气体脱除。为此,要进行抽真空处理。这样可以避免由于途中偶然受潮带来的不良影响。

作为防范,可以加装压力表和补氮装置,甚至可以加装压力-真空两用表,让押运人员能够准确观察到实际内压,如果显示负压较大,可以适当补充氮气,但没必要将氮气压力维持在出厂规定值。**EA**

(收稿日期:2021.03.09)

(上接第48页)

2. 安装方式

在安装新型楔入式防松防振螺栓时,先在螺栓的螺杆上拧入凸螺母,施加一定力矩将凸螺母拧到位后,再加装凹螺母继续施加一定力矩将其拧紧,至凹螺母内大径孔包覆弹性凸台并锁紧即可。一方面通过螺纹连接

实现初步紧固,另一方面通过凹螺母大径孔与凸螺母弹性凸台的配合,相当于在螺栓和螺母之间植入一个楔形销,达到防松防震的目的。新型楔入式防松防振螺栓的安装效果图如图6所示。

结束语

本文设计了一种新型楔入式防松防震螺栓,通过采取凹螺母偏心加工以及在凸螺母上加入的 $1\text{ mm}\times 1\text{ mm}$ 的楔子等技术措施,达到防松防震的效果,可有效解决螺栓容易松动等问题。螺栓造价低,可普遍适用于输电线路导线在中间的电气连接,同时也可广泛应用于其他行业机械装备的连接之中。**EA**

(收稿日期:2020.10.25)



图6 新型楔入式防松防振螺栓的安装效果图