「变压器」

影响变压器油介损升高的因素分析

文/江苏方天电力技术有限公司　窦　鹏

研究了变压器油介质损耗因数的影响因素，通过正交试验分析了金属杂质、水分、温度对介质损耗因数的综合影响，试验结果表明变压器油介质损耗因数升高的主要影响因素是金属杂质，其次是水分，温度影响最小。

变压器油介质损耗因数主要反映油中泄漏电流引起的功率损失，对变压器油的劣化与污染程度很敏感。当变压器油介质损耗因数升高到一定程度时，会引起变压器绝缘性能下降，影响变压器安全运行。影响油介损的因素较多，主要影响因素有：①电压频率。当电压频率过高时，则因电极的二次效应和试样放电，会造成测试结果的重复性明显增大。②温度。介质损耗因数值会随试样加热及恒温时间不同而变化。③金属杂质。试样中含有微量可电离的杂质或胶体颗粒对介质损耗因数影响很大，因此，测量液体的介电特性对发现电离杂质很有价值。④水分。变压器油中含有较多水分、介损仪电极未洗净或没有被烘干等原因，都会使测试结果出现偏差。⑤样品存放时间较长。样品贮藏期间，长期暴露在强光下也会导致样品变质，使测试值增大。⑥微生物细菌影响。主要是在制造、安装和大修环节中侵入蚊虫、苍蝇及细菌类造成的。而且这些微小虫类、霉菌类、细菌类等大多生活在胶体特性都带有电荷，同样在电场作用下产生电泳现象，使油的电导增大，从而导致油的介损值增大。

本文研究了电压频率、温度、金属杂质、水分等主要因素对介质损耗因数的影响，采用正交试验分析了金属杂质、水分、温度对介质损耗因数的综合影响。

油介损升高主要因素的试验研究

试验采用DTLC型自动油介损测试仪（奥地利保尔公司生产）。

1. 电压频率对介质损耗因数的影响

表1　变压器油介损与电压频率的关系

电压频率/Hz	40	50	60	70	80	90
tanδ(%)	0.4	0.45	0.48	0.42	0.35	0.23

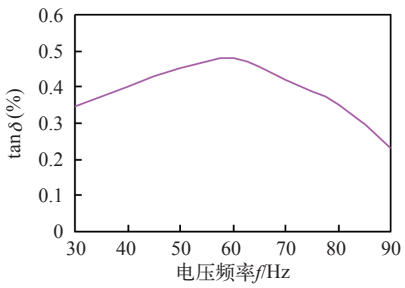

图1　介质损耗因数tanδ与电压频率 f 的关系曲线图

从图1看出，随着电压频率的升高，tanδ呈现出先增加，后降低的变化规律；当电压频率达到50～60 Hz时，tanδ值最大；这是因为变压器油的介质损耗因数由油的电导、空间电荷和双极分子三个因素决定。当电压频率较低时，油的电导所

产生的损耗是比较明显的，当电压频率逐渐升高时，离子获得的能量越大，既离子在电场中互相牵制的越强，其介质损耗就会越小。试验表明当电压频率达到50～60 Hz时，tanδ值最大，这与GB 5654—2007规定的测量tanδ值的电压频率为50 Hz相一致。

2. 温度对介质损耗因数的影响

表2　不同温度下的介质损耗因数

温度t/℃	60	70	80	90	100	110
tanδ(%)	0.31	0.42	0.49	0.51	0.55	0.60

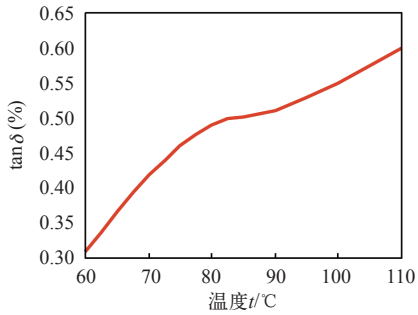

图2　介损tanδ与油温t的关系曲线

从图2可以看出，tanδ随温度t的变化呈现指数增长的趋势，变压器油的电导是随温度变化而变化，故当温度升高时，介质的电导随之增大，泄漏电流也会增大，故介质损耗因数增大。另一方面，温度的升高时，分子的热运动加强，通常温度每升高10 ℃，油的氧化速度约加快1倍，当温度超过115～120 ℃时，油不仅出现氧化的进一步加速，还可能伴随有油本身的热裂解，因此损耗会急剧增大。

3. 水分对介质损耗因数的影响

表3　不同含水量变压器油的介损

水分含量/$\times10^{-4}$%	20	40	60	80	100	120
tanδ(%)	0.06	0.09	0.11	0.18	0.24	0.32

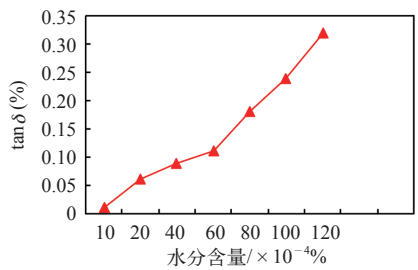

图3　介质损耗因数与水分的关系

水份含量在（10～50）$\times10^{-4}$%对tanδ影响不大；但当水分含量大于60×10^{-4}%，tanδ急剧上升。造成这种现象的主要原因是油中水分在60×10^{-4}%以上时，析出性最强，使油杯内部的水蒸气上升，改变了体积电导系数，从而导致tanδ增加。

4. 金属杂质对介质损耗因数的影响

变压器内部主要金属材料有铁、铜和铝，这些金属材料对运行变压器油有催化劣化的作用。

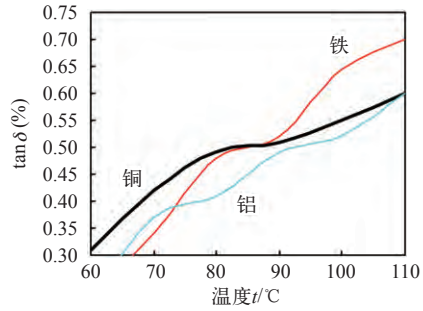

图4　介损tanδ与金属杂质的关系曲线

金属离子作为电子传递物能够分解油品氧化过程中产生的中间产物过氧化物ROOH，生成RO—或OH—，这两种离子在油品中进一步反应生成带电的胶质微粒，从而增加电泳电导现象。此外，铜离子自身能与油品的氧化产物作用生成有机皂化物。这些皂化物也会导致电泳电导现象的产生，从而增加油品的tanδ值。

正交试验方案的设计

试验选取温度、金属杂质、水分三个影响因素。称取100 g变压器油，温度选定80 ℃、90 ℃、100 ℃3个水平，这是根据变压器的运行温度决定的。金属杂质选定Fe粉、Al粉和铜粉3种，加入量都为0.25 g，在变压器油中分别加入0.5 mL，1.5 mL和2.5 mL水。

选定用L9(34)正交表，通过极差分析和方差分析，定性判断影响油品介质损耗因数增高的主次因素。

1. 试验结果与分析

采用极差分析和方差分析方法分析试验结果：根据水平极差R的大小，可以判断影响试验指标的主要因素和次要因素。其中某一因素的极差值$R=(Kmax-Kmin)$，K为试验指标。极差R值越大，说明该因素在该试验中水平变化对指标影响越大，以此判断温度、水分和金属杂质三因素

表4　正交试验方案表

试验号	温度 / ℃	金属杂质 /g	水分 /mL	介质损耗因数 tanδ
1	80	Fe	0.5	0.005 39
2	80	Cu	1.5	0.006 02
3	80	Al	2.5	0.006 63
4	90	Fe	1.5	0.006 44
5	90	Cu	2.5	0.007 15
6	90	Al	0.5	0.006 86
7	100	Fe	2.5	0.007 10
8	100	Cu	0.5	0.008 05
9	100	Al	1.5	0.012 54

中，哪种因素对变压器油的介质损耗因数的影响最大。

（1）极差法分析

根据试验的结果，分析各因素对介质损耗因数的影响。

1）温度

80℃的总介质损耗因数：$T_{80℃}=0.018\ 04$

90℃的总介质损耗因数：$T_{90℃}=0.020\ 45$

100℃的总介质损耗因数：$T_{100℃}=0.021\ 69$

将上总介质损耗因数取平均值，分别得到：

$$x80℃=T_{80℃}/3=0.006\ 01$$

$$x90℃=T_{90℃}/3=0.006\ 81$$

$$x100℃=T_{100℃}/3=0.007\ 23$$

可见，100 ℃的介质损耗因数平均值最大，80 ℃的介质损耗因数平均值最小，极差R温度＝0.001 22。

2）水分

水分为0.5mL的总介质损耗因数是：$T_{0.5mL}=0.020\ 3$。

水分为1.5mL的总介质损耗因数是：$T_{1.5mL}=0.020\ 8$。

水分为2.5mL的总介质损耗因数是：$T_{2.5mL}=0.025$。

将上述总介质损耗因数取平均值，分别得到：

$$x0.5mL=T_{0.5mL}/3=0.006\ 76$$

$$x2.5mL=T_{2.5mL}/3=0.008\ 33$$

$$x1.5mL=T_{1.5mL}/3=0.006\ 96$$

可见，水分为2.5mL的总介质损耗因数最大，水分为0.5mL的总介质损耗因数

最小，极差$R=0.001\ 57$。

3）金属杂质

Fe总介质损耗因数：$T_{Fe}=0.018\ 93$。

Al的总介质损耗因数：$T_{Al}=0.021\ 22$。

Cu的总介质损耗因数：$T_{Cu}=0.026\ 03$。

将上总介质损耗因数取平均值，分别得到：

$$xFe=T_{Fe}/3=0.006\ 31$$

$$xCu=T_{Cu}/3=0.007\ 07$$

$$T_{Al}=T_{Al}/3=0.008\ 68$$

可见，Al的介质损耗因数平均值最大，Fe的介质损耗因数平均值最小，极差R金属杂质＝0.002 37。

影响变压器油介质损耗因数升高的主要因素是金属杂质，其次是水分，温度影响最小。

2. 方差分析

方差的大小反映该因素对试验指标均值偏离的程度。数值越大，表明该因素水平的微小变动会导致指标值的较大波动，即所谓灵敏度很高，因此，方差最大的应是主要因素。相反，方差值很小，甚至比试验误差SE 计算值还小，说明该因素水平值的很大变动所导致试验指标值的波动却很微弱，反映十分迟钝。

表5　试验数据的方差分析

方差来源	平方和	方差
温度	0.000 009	0.000 004
水分	0.000 019	0.000 09
金属杂质	0.000 029	0.000 014

从表5分析可得出，对于试验条件下研究的影响变压器油介质损耗因数升高的因素的主次顺序是：金属杂质、水分、温度。

结论

1）随着电压频率的升高，tanδ呈现出先增加，后降低的变化规律。tanδ随温度的变化呈现出指数增长的趋势，水份含量在（10～50）$\times10^{-4}$%对tanδ影响不大；但当水分含量大于6×10^{-3}%，tanδ急剧上升。金属杂质对tanδ影响显著。

2）采用L9(34)正交试验方案研究了金属杂质、水分、温度对介质损耗因数的综合影响，变压器油介质损耗因数升高的主要影响因素是金属杂质，其次是水分，温度影响最小。**EA**

（收稿日期：2017.06.18）

（编辑：白文亭）