

文章编号:1007-290X(2005)06-0028-04

# 关于绝缘油体积电阻率试验和 介质损耗因数试验的分析

何冰

(广东省电力试验研究所, 广东 广州 510600)

**摘要:** 结合具体实例, 分析了在反映绝缘油油质方面, 绝缘油的体积电阻率试验和介质损耗因数试验的相同和差异之处, 阐述了同时开展体积电阻率试验和介质损耗因数试验的必要性, 指出不应简单地以等同的概念去理解和实施这两项试验。

**关键词:** 绝缘油; 介质损耗因数; 体积电阻率

**中图分类号:** TM855      **文献标识码:** B

## Analysis of volume resistivity tests and dissipation factor tests for insulating oil

HE Bing

(Guangdong Power Test & Research Institute, Guangzhou 510600, China)

**Abstract:** Combined with specific examples, this paper analyzes the similarities and differences between the volume resistivity test and the dissipation factor test for insulating oil, and expounds the necessity of making both tests in simultaneity to reflect the quality of insulating oil. Thus, it is concluded that these two tests can not be regarded as repetitious.

**Key words:** insulating oil; dissipation factor; volume resistivity

在变压器油质量分析中, 我国一直是用介质损耗因数试验值来衡量变压器油的品质的, 因其能有效地反映油的劣化和受污染程度。在国外, 如美国、日本和法国, 早在 20 世纪 70 年代和 80 年代, 就在有关变压器油的标准中要求进行绝缘油体积电阻率的测量, 将其测量值代替我国一直以来进行的绝缘油介质损耗因数测量。目前的许多进口变压器, 厂家所提供的绝缘油电气测量参数仍为体积电阻率。我国在 1986 年开始实施的 GB/T 5654—1985《液体绝缘材料工频相对介电常数, 介质损耗因数和体积电阻率的测量》中, 才对体积电阻率的试验方法做出规定, 而当时相应的标准中尚未对这一试验的指标提出明确的规定。

随着超高压、大容量变压器的不断发展, 变压器的用电量在不断增加, 随着经济的发展, 供电设备经常以满负荷运行, 要确保变压器油良好的绝缘

性能, 就要保证变压器油有良好的品质。随着超高压进口设备的日益增加, 进口绝缘油的使用也不断增多。一些在日本、法国以及 IEC 标准中早有规定的, 而我国只在近几年才开展的绝缘油试验项目, 也从非国标项目正式纳入了国家标准。绝缘油的体积电阻率试验就是其中之一。

笔者根据近几年的绝缘油试验工作体会, 就绝缘油的体积电阻率试验和介质损耗因数试验, 谈谈与一些参考资料所持观点不同的看法。

### 1 介质损耗因数试验与体积电阻率试验的异同

#### 1.1 相同点

介质损耗因数和体积电阻率都是有效反映电力用油油质劣化程度的参数, 正因为如此, 它们才被许多国家作为判断油质老化或受污染程度的依据, 并一直沿用至今。

介质损耗因数试验和体积电阻率试验对试验条件的要求在许多方面都有一致的地方，比如，对仪器分辨率、电极杯材料和光滑度、加热元件及其控温精度等的要求都很高。目前，借助于国外设计技术而研发的、既能进行绝缘油介质损耗因数测量又可进行体积电阻率测量的一体化设备，正逐渐取代分体的、只能进行单项测量的设备。

## 1.2 相异点

### 1.2.1 物理意义的差异

介质损耗因数  $\tan \delta$  反映的是，在交流回路中，由于油中内部电荷不平衡，导致与施加电压同相位的电阻性泄漏电流产生有功损耗。体积电阻率  $\rho_V$  反映的是，在直流电场下，油中电离杂质尤其是极性分子引起的损耗电流，即电导电流通过两极的能力。与介质损耗因数不同的是，体积电阻率反映的是直流电场下电导电流的大小，它的结果更多地反映了油中极性物质对油质的影响。

### 1.2.2 影响检测结果的因素的差异

#### 1.2.2.1 油品自身因素的影响

介质损耗因数与油的净化程度和老化程度密切相关，与油中所含水分的状态有关。实践中发现：水在油中呈游离水或乳化水状态时，对介质损耗因数造成的影响明显。

体积电阻率与油中的极性分子，即油本身的分子或杂质分子离解成离子形成的电导有关，与油自身的黏度有关，与油的离子传导损耗密切相关。另外，油中弥漫状态水分（溶解水）的存在会明显地降低体积电阻率，但只有当溶解的水接近饱和程度时才会对体积电阻率有明显的影

#### 1.2.2.2 试验条件的影响

影响介质损耗因数试验结果的外部因素有：

a) 取样瓶的洁净度，如取样瓶是否曾接触不同类油品，取样瓶是否洁净等。

b) 试验温度。绝缘油  $\tan \delta$  试验结果与试验温度的关系呈指数变化规律，老化油品受温度影响尤为明显。

c) 施加的电压和试验频率。一般采用电场强度 1 000 V/mm、频率 50 Hz 的交流电进行试验。

影响体积电阻率试验结果的外部因素有：

a) 试验温度。如温度增加 50%，则试验结果约减小到温度变化前的 1/10。

b) 试验电场强度。在其它条件相同的情况

下，电场强度越大，则损耗电流越大。要求在电场强度为 200~300 V/mm 时进行试验，通常的试验电场强度是 250 V/mm。

c) 充电时间。施加试验电压后，由于介质的吸收，不同测量时间测得的电流值不同，因此得出的试验结果有差别。

## 2 实例分析

一直以来，鉴于介质损耗因数和体积电阻率都是用来反映电力用油油质劣化程度的，许多人认为：介质损耗因数小的油品，体积电阻率必定大，反之亦然，两者的变化是有规律可循的。

但从表 1 的实例可以看出：介质损耗因数数值相近的油品，其体积电阻率值不一定很接近；同样地，体积电阻率相近的油品，其介质损耗因数数值也会存在不小的差别。

表 1 变压器油品  $\tan \delta$  和  $\rho_V$  的测量值 (在 90 °C 下)

样品编号	$\tan \delta / \%$	$\rho_V / (\Omega \cdot m)$
1 号	0.101	$1.0 \times 10^{12}$
2 号	0.104	$4.5 \times 10^{11}$
3 号	0.099	$4.2 \times 10^{12}$
4 号	0.342	$1.2 \times 10^{11}$
5 号	0.754	$1.0 \times 10^{11}$
6 号	0.931	$9.8 \times 10^{10}$

有些参考书提出：介质损耗因数测量值与体积电阻率测量值之间有相关性，两者之间的数量关系可通过如下公式进行换算：

$$\{\rho_V\}_{\Omega \cdot m} = \frac{1.8 \times 10^{12}}{\{\epsilon\}_{F/m} \{f\}_{Hz} \tan \delta} \cdot \quad (1)$$

式中： $\epsilon$ ——油的介电常数；

$f$ ——电场频率。

本文想指出的是：如果  $\tan \delta$  和  $\rho_V$  之间的关系纯粹是式(1)的换算关系的话，还有必要这么麻烦地开展  $\rho_V$  的测量工作么？笔者在多年的绝缘油试验工作中发现，无论是投运前还是运行后的绝缘油，其介质损耗因数与体积电阻率之间几乎都不能以式(1)进行互换算，一些参考资料上给出的测量结果与换算结果几乎吻合的例子，应该只是在某些特定条件下才成立。

对表 1 的样品以式(1)进行换算处理,可看出差别,换算结果见表 2。

表 2 变压器油品按式(1)换算的结果

样品 编号	$\epsilon$ 测量值/ ( $F \cdot m^{-1}$ )	$\tan \delta$ 测量值 (90 °C 下)/%	$\rho_V$ 测量值(90 °C 下)/( $\Omega \cdot m$ )	$\rho_V$ 换算值/ ( $\Omega \cdot m$ )
1 号	2.14	0.101	$1.0 \times 10^{12}$	$1.17 \times 10^{11}$
2 号	2.10	0.104	$4.5 \times 10^{11}$	$1.65 \times 10^{11}$
3 号	2.12	0.099	$4.2 \times 10^{12}$	$1.72 \times 10^{11}$
4 号	2.06	0.342	$1.2 \times 10^{11}$	$5.11 \times 10^{10}$
5 号	2.07	0.754	$1.0 \times 10^{11}$	$2.32 \times 10^{10}$
6 号	2.09	0.931	$9.8 \times 10^{10}$	$1.85 \times 10^{10}$

### 3 开展绝缘油体积电阻率试验的必要性

#### 3.1 利于绝缘油电气性能的综合评定

从理论上说,在一般情况下,电力用油的介质损耗因数较小时,应该有较大的体积电阻率。但介质损耗因数反映的是交变电场下电导电流、极化电流二者相对电容电流的比例关系,而体积电阻率反映的是直流电场下电导电流的大小。对于不同的试样,在某些情况下,在测量  $\rho_V$  时施加直流电场的短时间内,极化电流在电导电流的基础上先上升而后下降,最后消失,即两电极上极化电荷量不再变化,只剩下电导电流,当电导电流很小时,测出的  $\rho_V$  很大,而在此电导电流变化过程中测出的  $\tan \delta$  也可能较大。由这一机理可以看出:电阻率极大,即电导电流极小的变压器油,其介质损耗因数也可能较大,两者在某些情况下,存在反映趋势不同的可能。所以,对体积电阻率试验的充电时间必须有明确的规定,且严格执行。

对变压器施加直流电压时,流过绝缘介质的泄漏电流就是绝缘介质内部或表面移动的带电粒子所产生的传导电流,其值不随时间而变化;而绝缘电导率的大小取决于材料分子和杂质分子离解的电子数。作为变压器主要绝缘介质的变压器油,其传导电流的大小,对设备绝缘电阻和泄漏电流的测量结果有较大的影响。因此,当变压器绝缘电阻值下降,而泄漏电流上升时,有必要测量绝缘油的体积电阻率。需要了解电导电流对介质损耗的影响有多大时,也有必要测量绝缘油的体积电阻率。

如前所述,体积电阻率是反映油品受潮和生成极性物质程度的指标,尤其对油的离子电导损耗的反映最为灵敏,无论是酸性或中性氧化产物,都能引起电导率的显著变化,而且,它的这种反映比电气强度试验精确,不会像电气强度试验存在那么大的分散性。我们知道,外界水分和胶体杂质对电气强度和介质损耗的影响,可以通过真空过滤和吸附过滤去除;而油本身的分子或杂质分子离解成离子,在电场下构成离子电导,离子电导还会在油中形成电解产物,这是通常的过滤和吸附手段所无法排除掉的。对油中存在大量极化分子、体积电阻率测量值极低的油品,只能作换油处理。可见:体积电阻率是一个既对油质劣化,又对油受潮都有中和反应的指标。因此,对介质损耗因数和体积电阻率均进行测试,更便于综合评定绝缘油的电气性能。

#### 3.2 与国际接轨

GB/T 7595—2000《运行中变压器油质量标准》3.1 条中规定:对进口变压器油应按国际标准和合同规定验收。而进口变压器油往往只提供体积电阻率的验收标准,合同规定项目中也要求出示体积电阻率测定值。目前,国内绝大部分 500 kV 变压器都是进口设备,为了利于试验结果与国际标准、国外提供数据的比较,有必要进行绝缘油体积电阻率的测定。

#### 3.3 便于变压器的状态检修工作

目前电网已开始进行状态检修的工作,油样的测试,是简便而有效地监测变压器重要绝缘部分的手段,绝缘油的电气性能综合评定,有利于及时消除事故隐患。

### 4 对介质损耗因数试验和体积电阻率试验的几点看法

#### 4.1 国产仪器和进口仪器测试手段的区别

目前,国产测试仪器与进口测试仪器的差别之一是:国产测试仪器只能在外电极上施加正极性电压来进行测定,每次只有一个测量结果;进口测试仪器可在外电极上分别施加正极性电压和负极性电压来进行测定。至今沿用的、GB/T 5654—1985《液体绝缘材料工频相对介电常数,介质损耗因数和体积电阻率的测量》提供的试验方法中要求:两次测量结果偏差小于 35% 的试验才为有效测量。因此,使用国产设备测试必须进行两次以上的试

验，选择较大的测试值作为试验结果；而使用进口测试仪器测出的在两种极性下的结果的偏差，同样要求小于 35%。当测量结果偏差总是超出要求值时，应对电极进行彻底清洗。

#### 4.2 试验结果的处理

介质损耗因数  $\tan \delta$  和体积电阻率  $\rho_V$  都是反映油质劣化程度的指标，它们所反映的油品质状态的结论应是“与”的关系，即：只有  $\tan \delta$  和  $\rho_V$  这两个量值均合格，才可下油质合格的结论，只要其中一个量值超标，即可下油质老化的结论。对于表 3 的情况，应该对这两种绝缘油下油质已劣化的结论。

表 3 变压器油品油质测试结果

样品	$\tan \delta / \%$			$\rho_V / (\Omega \cdot m)$			最后 结论
	90℃下 测量值	标准 要求值	试验 结果	90℃下 测量值	标准 要求值	试验 结果	
样品 甲	4.62	$\leq 4$	不合格	$5.9 \times 10^9$	$\geq 5 \times 10^9$	合格	不合格
样品 乙	3.376	$\leq 4$	合格	$4.1 \times 10^9$	$\geq 5 \times 10^9$	不合格	不合格

#### 4.3 恒温时间的确定

因体积电阻率随绝对温度的倒数按指数规律变化，因此，当加热温度到达标准要求值时，即进行测量。早期的试验仪的油杯是用电阻发热方法加热，内外电极同时进行的，这样比较保证油层均匀受热。目前，大部分试验仪的加热方式都是中频感应加热，这种加热方式缩短了加热时间，但由于只对高压测量极进行加热，需要使油温均匀必须增加恒温时间，恒温时间过长必然会对油品的测量值产生影响。与早期的设备相比，目前国内生产的油介质损耗因数及体积电阻率自动测试仪已经考虑到恒温时间对试验结果的影响。有些参考书提出外电极到达设定温度后再恒温 30 min 后才进行测量，本文的看法是不能以此作为参考。在此应该提出的是：有必要对不同试验设备统一恒温时间，否则，

国产测试仪器与进口测试仪器的试验结果会有差异，且在油质已劣化的绝缘油上表现得尤为明显。只有这样才能使得不同测试仪器的测量结果之间具有可比性。

#### 4.4 应重视体积电阻率试验工作

目前，广东省电力系统内对绝缘油开展体积电阻率测试工作的较少，对运行中设备进行定期检测的工作更没有得到重视。依照 DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》和 GB/T 7595—2000《运行中变压器油质量标准》的要求：66 kV 电压等级以上或 8 MVA 容量以上的变压器，电抗器，所、厂用变压器，在以下 3 种情况下，即设备投运前或大修后、每年至少一次、必要时，都需进行该项目的检测，即每年需进行一次以上的检测。对体积电阻率测试工作的不够重视，主要是认为介质损耗因数试验和体积电阻率试验是两个重复的检测项目，持这些想法的人应该转变认识了。

#### 5 结束语

综上所述，绝缘油的介质损耗因数和体积电阻率均能反映油质的劣化程度，但反映电力用油油质劣化的指标值存在着差异，因此同时开展介质损耗因数试验和体积电阻率试验很有必要。随着用电量需求的增加，电网容量的不断增大，超高压设备和换流变电站也不断增加，对设备的绝缘状态提出了更高、更严的要求。方便、及时、有效地检测电气设备主要绝缘介质的工作应得到越来越多的重视，这样，才能及时地消除隐患，保证设备良好的绝缘状态，确保设备安全稳定运行。

#### 参考文献：

- [1] 温念珠. 电力用油实用技术[M]. 北京：中国水利电力出版社，1998.
- [2] 保定天威保变电气股份有限公司. 变压器试验技术[M]. 北京：机械工业出版社，2004.

作者简介：何冰（1966—），女，广东广州人，高电压试验工程师，工学学士，主要从事绝缘油试验工作和高电压试验工作。

加强以节电和提高用电效率

为核心的需求侧管理