

# 介质损耗因数试验浅析

张纬怡 吴 凯

(国网江苏省电力有限公司 镇江供电分公司, 江苏 镇江 212000)

**摘 要** 介质损耗因数试验是判断电气设备绝缘性能较为有效的方法,能直接、明显地反映出绝缘的整体受潮、劣化变质等分布性缺陷。因此,在电气设备(如电力变压器、高压开关、互感器、套管、耦合电容等)交接和例行试验中,介质损耗因素试验已得到广泛的应用。本文较为系统地阐述了介质损耗因数的定义、试验等值电路及向量图、试验目的、测量仪器及影响试验结果的因素。

**关键词** 介质损耗因数 电气试验 西林电桥

中图分类号:TM93

文献标识码:A

文章编号:1007-0745(2021)09-0058-02

## 1 介质损耗因数的基本概念

### 1.1 电介质损耗的组成

电介质损耗由以下三部分组成:

1. 电导损耗。当给电介质施加交流电压时,电介质中会有电导电流流过,电介质因此而发热产生损耗,通常这部分电流都很小。

2. 游离损耗。电介质中局部电场集中处(如固体电介质中的气泡,气体电介质中电极的尖端等),当电场强度高于某一值时,介质局部就会产生放电,同时伴随能量损耗。

3. 极化损耗。由于介质结构的不均匀,在交流电场作用下,使不均匀介质边界面上的电荷,时而积聚,时而消失,电荷积聚和消失都要通过介质内部,这样就造成了一定的能量损耗。

### 1.2 介质损耗因数的定义

介质损耗因数( $\tan \delta$ ) =  $\frac{\text{被测试品的有功功率 } P}{\text{被测试品的无功功率 } Q} \times 100\%$

与介质损耗不同的是,介质损耗因数  $\tan \delta$  只与材料的性质有关,而与材料的尺寸已经体积大小等外部因素无关,这样可以便于不同设备之间进行比较。

### 1.3 介质损耗的等值电路及相量图

根据绝缘介质在交流电压作用下的等值电路及相量图,可推导出介质损耗各物理量之间的关系。

如下图1所示,当对一绝缘介质施加交流电压时,介质上将流过电容电流  $I_{C1}$ 、吸收电流  $I_2$  和电导电流  $I_{R1}$ 。其中又可以将吸收电流  $I_2$  分解成有功分量  $I_{R2}$  和无功分量  $I_{C2}$  两部分。电容电流  $I_{C1}$  和  $I_{C2}$  是不消耗能量的,只有电导电流  $I_{R1}$  和吸收电流中的有功分量  $I_{R2}$  才消耗能量。<sup>[1]</sup>

介质的功率损耗:

$$P = UI \cos \varphi = U \cdot I_R = U \cdot I_C \cdot \tan \delta = U^2 \omega C \cdot \tan \delta$$

$$\tan \delta = \frac{I_R}{I_C} = \frac{U/R}{U\omega C} = \frac{1}{\omega CR}$$

式中:  $U$ ——电源电压  $\omega$ ——电源角频  $\tan \delta$

$C$ ——介质的电容  $R$ ——介质的电阻  $\tan \delta$ ——角的余角的正切

由上面的式子可知,介质损耗与电源电压的平方  $U^2$ 、角频率  $\omega$ 、电容  $C$  以及  $\delta$  角的正切值  $\tan \delta$  成正比。当电压  $U$ 、角频率  $\omega$  及电容  $C$  一定时,介质损耗和  $\tan \delta$  成正比。

将  $\delta$  角定义为介质损耗角,  $\tan \delta$  即为介质损耗角正切值,定义  $\tan \delta$  为介质损耗因数。

### 1.4 介质损耗因数试验目的

1. 能较为灵敏地发现中小型容量电气设备的绝缘整体受潮、老化、油质劣化和局部缺陷。

2. 能非常灵敏地发现绝缘油质量的优劣。

3. 对容量较大的电气设备,若绝缘缺陷占据的体积只占总体积的一小部分,则测量介质损耗因数较难发现设备存在的绝缘缺陷。所以我们在测量大型变压器整体的介质损耗因数之后,还应再测量其电容型套管的介质损耗因数,原因后面会具体解释。

## 2 测量介质损耗因数的仪器

测量介质损耗因数常用的仪器有西林电桥、M型介质试验器、电流比较型电桥三类,本文主要介绍第一类和第三类。

### 2.1 西林电桥

西林电桥是80年代以前广泛使用的现场介损测试仪器,它有两种接线方式,正接线和反接线。

#### 2.1.1 正接线

试品两极对地均绝缘,此方法在日常试验中经常使用,如对电容型套管、耦合电容器、电容式互感器等电气设备均采用正接线方式测量  $\tan \delta$ 。正接线使用时,电桥处于低电位,测量结果比反接线方法正确,电桥三根导线(出线)处于低电位。在被试品具有足够绝缘水平时,允许施加大于10kV的电压作为试验电压,但必须使用与额定电压相适应的标准电容器。

#### 2.1.2 反接线

多数高压电气设备外壳都是直接地的,对于一极接地

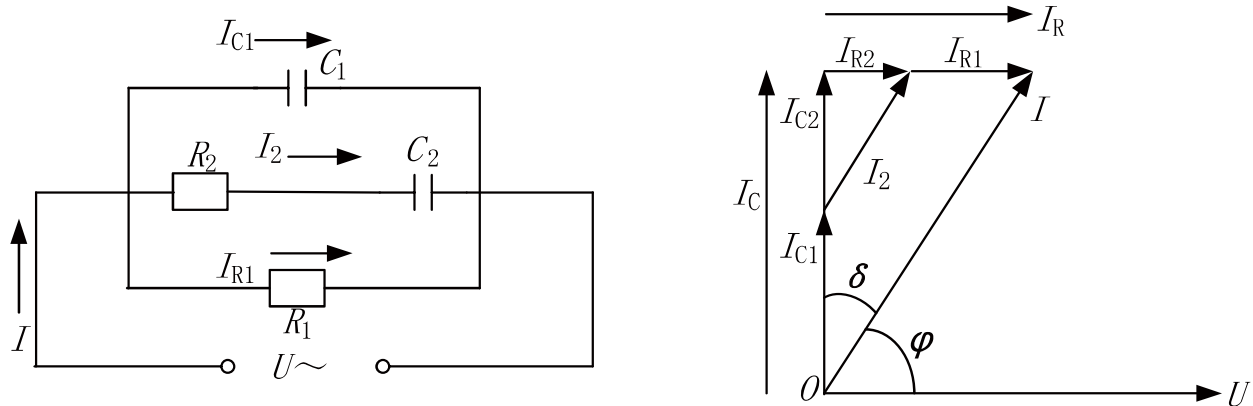


图1 绝缘介质在交流电压作用下的等值电路及相量图

的电气设备应采用反接线方式测量  $\tan \delta$ 。反接线使用时，电桥和出线均处于高电位，对地应保持一定的安全距离，最少不应低于 10cm。电桥面板上的接地端子必须牢固接地。

由于西林电桥使用比较麻烦，且抗干扰能力差，因此目前电气试验工作已不再将西林电桥作为测量  $\tan \delta$  的仪器。

## 2.2 相位差法抗干扰全自动介损测试仪

相位差法介损仪是携带型西林电桥的更新换代产品。把标准电容器和升压变压器组合在一起，称为一体化。此种介损仪采用现代微电子技术以提高测量精度和自动显示，采用红外技术和光纤传递以提高抗干扰能力，如 AI-6000 型自动抗干扰精密介质损耗测量仪。与西林电桥相比，相位差法介损仪具有操作简单、自动测量、无须换算、精度高、抗干扰能力强等优点，仪器内部附有标准电容器及升压装置，便于携带。<sup>[2]</sup>

## 3 影响介质损耗因数测量结果的因素

介质损耗因素不仅受到设备缺陷和电磁场干扰的影响，还受到温度、试验电压、试品电容的影响。

### 3.1 温度的影响

温度对  $\tan \delta$  测量的影响较大，绝大多数情况下，同一种被试品的  $\tan \delta$  随着温度的升高而增大。但由于不同绝缘介质或不同潮湿程度有着不同的随温度变化的规律，一般无法将某一温度下测得的介质损耗因数准确换算至另一温度下的数值，在 20℃ 至 80℃ 之间， $\tan \delta$  随着温度而变化的经验公式为  $\tan \delta = \tan \delta_0 e^{\alpha (t-t_0)}$ ，但这种温度换算方法所得的数据也只是近似的。最好在 10℃ 至 30℃ 范围内并与历史试验测量时相近的温度下对设备进行  $\tan \delta$  测量。

### 3.2 试验电压的影响

对绝缘良好的设备而言，在一定试验电压范围内，流过绝缘介质的电流有功和无功分量随着电压的增加成比例增加，因此介质损耗因数不会有明显变化。但对于绝缘有缺陷的设备来说，当电压上升到介质的局部放电起始电压以上时，介质中夹杂气泡或杂质的部分电场可能很强，会首先放电，产生附加损耗，使测得的介质损耗因数数值增加。因此在较高电压下测量  $\tan \delta$ ，可以较为真实地反映出设备

的绝缘状况，便于及时准确地发现设备绝缘存在的缺陷。<sup>[3]</sup>

### 3.3 $\tan \delta$ 与试品电容的关系

对于如套管、电压互感器、电流互感器等电容量比较小的设备，测量其介质损耗因数可以有效发现其存在的局部集中性缺陷和整体分布性缺陷。但若集中性缺陷的体积所占被试设备绝缘体积的比重很小，如大、中型变压器等大体积设备的局部缺陷，其引起的损耗只占总损耗中的极小部分，则测量其介质损耗因数不能灵敏的反映绝缘缺陷，应尽量进行分解试验。下面通过公式来解释这一现象。设备绝缘由多种材料、多种部件构成，可以看作是由许多并联等值回路组成。

根据：

$$P = P_1 + P_2 + \dots + P_n$$

$$P = U^2 \omega C_p \tan \delta$$

可以得出几个并联等值回路的综合  $\tan \delta$  为：

$$\tan \delta = \frac{C_1 \tan \delta_1 + C_2 \tan \delta_2 + \dots + C_n \tan \delta_n}{C_1 + C_2 + \dots + C_n}$$

从上式分析，不难看出电容量对介质损耗因数的影响。在测量多材料、多结构、多层绝缘介质的绝缘性能时，当其中某一种或某一层的绝缘介质损耗因数偏大时，并不能有效地在总介质损耗因数数值中反映出来，或者说介质损耗因数对反映绝缘的局部缺陷不灵敏。

## 参考文献：

- [1] 陈天翔, 王寅仲, 海世杰. 电气试验 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [2] 陈化钢. 电力设备预防性试验方法及诊断技术 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2009.
- [3] 李建明, 朱康. 高压电气设备试验方法 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2001.