

14 73-78

# 高压电气设备绝缘监测的传感器研究

唐炬 李剑<sup>✓</sup> 孙才新 陈伟根

(重庆大学电气工程系, 重庆, 400044; 第一作者 38岁, 男, 副教授)

TM85  
TP 212

**摘要** 通过理论计算和实验研究, 分析了传感器性能, 研制出了适用于电气设备绝缘状况在线监测的三种传感器。

**关键词** 高电压绝缘技术; 在线; 监测; 传感器

中国图书资料分类法分类号 TM83

## 0 引言

由于状态维修具有能及时发现电气设备运行中的缺陷, 减少设备停电维护维修的盲目性和更能准确反映电气设备绝缘在运行电压下的安全性等优点, 近年来, 已成为人们研究的热点课题。实施状态维修的基础是准确地、可靠地在线获取电气设备绝缘运行工况特征量。由于运行设备的工作环境存在严重的电磁干扰, 要准确获得所需信号变得非常困难, 而采集信号用的传感器性能好坏是能否准确获取信号的关键, 对此, 国内外同行花了大量的人力物力来进行研究, 取得了长足的进展, 但还远不令人满意。作者结合电气设备现场运行情况, 从需要获取的信号特点和大小差异入手, 研制成功了适合不同信号的传感器, 并从理论和实验上进行了深入研究。

## 1 EJA型稳态电流传感器

电气设备中绝缘泄漏电流是直接和间接反映绝缘劣化或缺陷的主要特征量之一, 各种在线监测装置都把它作为重要的信号加以采集。由于设备的容量、电压等级和尺寸的不同, 绝缘泄漏电流大小差别较大, 有的只有几百微安, 有的可达几百毫安甚至到安, 因此, 用类似互感器原理研制的电流传感器, 要求所选用铁芯材料具有高导磁率且工作线性范围宽, 但它对频率特性要求不高, 因为绝缘泄漏电流的主频为 50 Hz, 在相对较长的时间内不会突变, 可视为稳态信号。

EJA型稳态电流传感器选用高导磁率的环形铁芯, 放入有机绝缘盒内并填入缓冲剂, 避免绕制线圈过程中对铁芯损伤和变形, 而引起导磁率下降。如图 1 所示是 EJA 型稳态电流传感器结构图。

在实际应用中, 设备的接地线(或未屏接地线)作为原边从传感器中心传过。当原边流过交流稳态电流  $I_1$  时, 在副边的负载电阻上有感应电压信号  $U_2$ , 可用如图 2 所示的交流等值

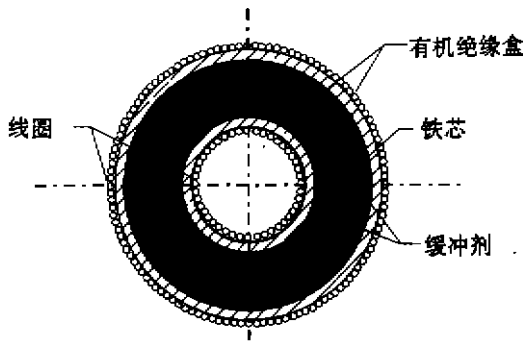


图1 EJA型稳态电流传感器结构

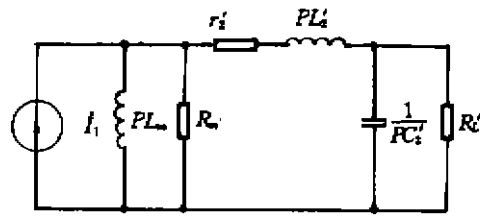


图2 稳态电流传感器交流等值电路

电路来计算该电流传感器的传输特性。 $L_m$  为激磁电感,  $R_m$  为磁损电阻,  $L_2'$  为归一化的负边绕组漏电感,  $r_2'$  为归一化的负边绕组线圈电阻,  $C_2'$  为归一化的负边等值总电容,  $R_L'$  为归一化负载电阻, 其幅频特性  $H(\omega)$  和相频特性  $\theta(\omega)$  分别为\*

$$H(\omega) = \frac{R_L R_m L_m \omega}{\sqrt{[R_m R_L - \omega^2 L_m (R_L R_m C_2' + R_L C_2' r_2')]^2 + [R_L L_m + R_m L_m + R_L C_2' (R_m r_2' - \omega^2 L_m L_2')]^2} \omega^2} \quad (1)$$

$$\theta(\omega) = \arctg \frac{R_m R_L - \omega^2 L_m (R_L R_m C_2' + R_L C_2' r_2')}{\omega [R_L L_m + R_m L_m + R_L C_2' (R_m r_2' - \omega^2 L_m L_2')]} \quad (2)$$

在实际应用中,  $C_2'$  为皮法级,  $L_2'$  为微亨级, 因此, 对于工作在低频下,  $\omega^2 L_2' C_2' \ll 1$ , 且当  $R_m \gg R_L$  时,  $\left| \frac{R_L R_m}{\omega^2} - L_m R_L R_m C_2' \right| \ll L_m (R_L + R_m)$ , 可将(1)、(2)式简化为:

$$H(\omega) \doteq R_L = NR_L \quad (3)$$

$$\theta(\omega) \doteq 0 \quad (4)$$

$N$  为副边线圈匝数, 在工频下  $H(\omega)$  正比于负载电阻  $R_L$  和线圈匝数  $N$ ; 传输的信号几乎不产生相移。因此, 可以采用适当增大负载电阻和增加副边线圈匝数来提高输出信号的幅值, 增大传感器的灵敏度。当  $N = 2000$  匝,  $R_L = 2.7 \text{ k}\Omega$  时, 测试数据对应的伏安特性曲线如图3所示。

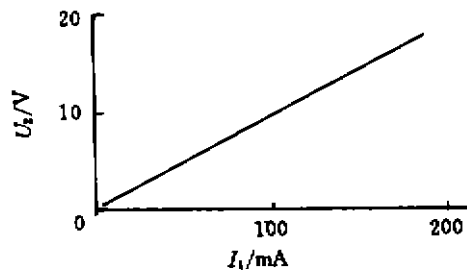


图3 EJA型稳态电流传感器伏安特性曲线

为使它的输出信号能直接有效地进行长线传送, 实验研究表明, 在变电站中, 只要被传送信号大于 3 V, 用同轴电缆就能稳定、可

靠地对它进行长线传送。因此, 对于绝缘泄漏电流在几十毫安及以上的不同类型的电容型设备, 可适当调节负载电阻  $R_L$  的大小, 来感应被测信号, 使之达到最佳的长线传送效果。但  $R_L$

\* 唐炬. 电设备绝缘在线监测系统. 研究报告, 重庆大学, 1995

的取值不宜超过 10 kΩ, 否则感应的信号稳定性较差。对于微安级信号, 用自动电源控制的有源放大器将信号放大后传送。

## 2 MXO 型脉冲电流传感器

国内外都普遍认为准确测试局部放电是发现大型变压器和发电机绝缘潜伏性故障的重要特征量。由于局部放电是以脉冲形式出现, 放电频率大都在几十千赫到几兆赫之间, 放电电量在几十到几千皮库, 并且是可重复出现的微弱信号, 在有严重电磁干扰的环境中, 为准确获取局部放电信号, 重点是研究高性能传感器。

研究表明局部放电信号可示为一种高频暂态信号, 不能用稳态微电流传感器去采集, 也不能用研究稳态电流传感器的等值电路去研究用于暂态信号的传感器。作者用罗可夫斯基线圈原理(简称罗氏原理), 研究出了一种用于采集局部放电信号的脉冲电流传感器。利用高频性能优良的环型铁氧体磁芯, 结构类似于稳态电流传感器。在使用时配备有源控制高性能放大器, 可提高采集信号的长线输出能力。

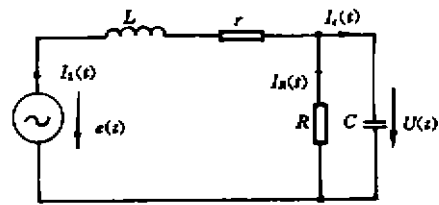


图 4 罗氏线圈简化等值电路

设线圈匝数为  $N$ , 磁芯导磁率为  $\mu$ , 平均磁路长度为  $l$ , 磁芯截面积为  $S$ , 忽略副边电流对原边电流的影响, 可用罗氏线圈简化等值计算电路来计算传输特性, 如图 4 所示,  $L$  为线圈自感,  $C$  为杂散总电容,  $r$  为线圈电阻,  $R_L$  为负载电阻, 罗氏线圈幅频特性和相频特性分别为:

$$H(\omega) = \frac{R_L}{N \sqrt{\left(\frac{R_L + r}{\omega L} - \omega R_L C\right)^2 + \left(1 + \frac{R_L r C}{L}\right)^2}} \quad (5)$$

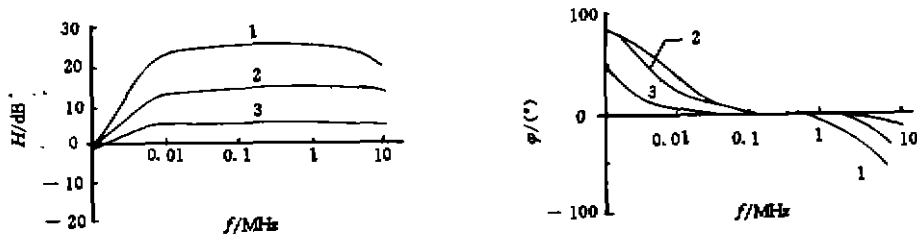
$$\theta(\omega) = \arctg \frac{\left(\frac{R_L + r}{\omega L} - \omega R_L C\right)}{\left(1 + \frac{R_L r C}{L}\right)} \quad (6)$$

该罗氏线圈匝数设计在几十匝内, 杂散电容和线圈电阻很小, 且  $L = \mu \frac{N^2 S}{l}$ , 代入(5)、(6)式可能简化为:

$$H(\omega) = \frac{R_L}{N} \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{R_L l}{\omega \mu N^2 S}\right)^2}} \quad (7)$$

$$\theta(\omega) = \arctg \left(\frac{R_L l}{\omega \mu N^2 S}\right) \quad (8)$$

由此可以清楚看到,线圈匝数  $N$ 、负载电阻  $R_L$ 、磁芯尺寸  $l$  和导磁率  $\mu$ , 同时影响传感器的特性。选用导磁率和工作频率高的材料,可提高罗氏线圈的灵敏度,同时,还将使它在更宽的频率范围内,保持平坦的幅频和相频特性。因此,调节罗氏线圈匝数  $N$  和负载电阻  $R_L$ , 可得到性能满意的脉冲电流传感器的幅频特性和相频特性测试曲线如图 5 所示。



(a) 幅频特性 (b) 相频特性  
图 5 MXO 型脉冲电流传感器传输特性

从曲线看到,要想获得高的响应,相频特性曲线的平坦区域变窄,这不利于后续电路对信号的处理,但过分考虑相频特性,输出信号太弱,降低了信噪比,因此,取  $R_L = 150 \Omega$ ,配以恰当的有源控制放大器,可以得到如图 6 所示线性度好的输出特性。

将上述电流传感器用环氧树脂封装在 10 mm 厚的镀锌铁盒中,外加密封铝合金外套,能很好地防止外界的各种电磁干扰和潮气腐蚀,实用后能达到理想效果。

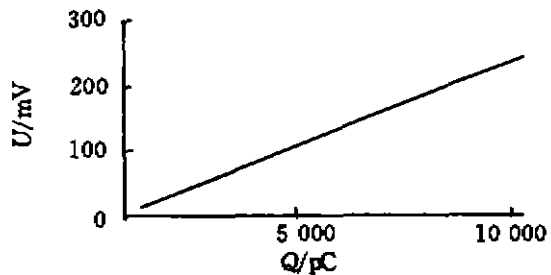


图 6 MXO 型脉冲电流传感器伏库特性

### 3 $F_{46}$ -GDX- $\text{SnO}_2$ 型复合气体传感器

在线监测油中溶解气体含量也是准确反映大型电力变压器内部存在潜伏性故障的有效手段。通过大量的理论分析和应用研究, $F_{46}$ -GDX- $\text{SnO}_2$  型复合色谱传感器能很好地进行油中气体采样,它主要由油气分离薄膜室、多路混合气体分离柱和气体敏感元件等组成,原理框图如图 7 所示。能对油中 6 种气体成分( $\text{H}_2$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{CH}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$ 、 $\text{C}_2\text{H}_2$ ) 同时进行油气分离、混合气体分离和分别感应。

当油气分离达到动态平衡时,从透气膜渗透出的混合气体总量为<sup>[1]</sup>:

$$Q = \frac{HA t (p_1 - p_2)}{d} \quad (9)$$

$H$  为透气膜渗透系数, $A$  为透气膜有效面积, $t$  为透气时间, $p_1$  为油侧压强, $p_2$  为气体侧压



图 7  $F_{46}$ -GDX- $SO_2$  原理性框图

强,  $d$  为透气膜厚度。由于油中气体压强  $p$  与气体浓度  $v$  有正比关系<sup>[1]</sup>,  $p = kv$ , 考虑到  $p_1 \gg p_2$ , 由(9)式可得到:

$$Q = \frac{HAkcv}{d} \tag{10}$$

$k$  为常数与材料性质有关, 可通过实验测得, 在同一渗透时间  $t$  和气体浓度  $v$  一定时, 渗透气体总量  $Q$  正比于  $H \cdot A$ , 反比于  $d$ 。因此, 要想得到多的渗透气体, 可增大透气膜与循环油接触的有效面积。在现场应用中, 把油气分离室装在变压器主油管道上, 尽量减小死油区域。提高透气膜渗透系数。经过长期实验研究, 用  $F_{46}$  配方得到的透气膜较为理想。提高承受油压强度, 减小透气膜厚度,  $F_{46}$  厚度为  $20 \mu m$ 。用  $F_{46}$  做成的油气分离室, 对变压器油中 6 种气体渗透时间  $t$  与浓度关系  $v$  的测量数据通过最小二乘法拟合的关系曲线如图 8 所示。从中可看出需要 3 天 6 种气体的渗透就达到饱和, 由此可决定在线监测大型变压器油中气体含量的最小监测周期。

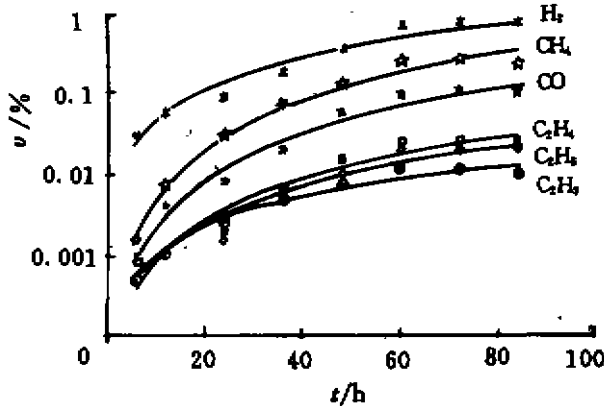


图 8 浓度与渗透时间的关系

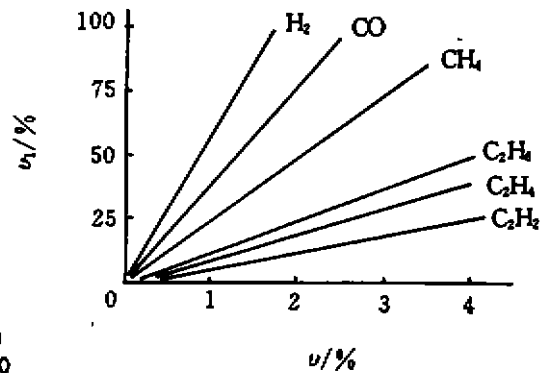


图 9 分离浓度与混合浓度的关系

GDX 复合气体分离柱用于对渗透出的混合气体进行分离, 它由多根内径为  $2 \sim 4 \text{ mm}$ 、长为  $1 \sim 2 \text{ m}$  的不锈钢管, 内填不同气体分离材料做成螺旋型, 放入恒温系统中构成。由于变压器绝缘故障性质不同, 6 种气体的含量有很大差别, 尤其是  $C_2H_2$  只有几到十几百万分之一, 用单一分离柱填充的复合材料不能同时对 6 种气体进行准确分离。对分离出的气体, 用  $SO_2$  系列气敏元件分别感应 6 种气体, 获得了较为理想的效果, 提高了对变压器油中含量较少的  $C_2H_2$  检测的准确性和稳定性, 并把原来的 7 天检测周期缩短为 3 天。如图 9 所示为多根复合型气体分离柱对 6 种混合气体进行分离的混合浓度  $v$  与分离浓度  $v_1$  关系曲线。

## 4 结 论

1) EJA 型稳态电流传感器只需改变线圈匝数和负载电阻,能对几十微安到几百毫安的电流信号线性变换,可直接对毫安级绝缘泄漏电流信号进行最佳选配的无源传送;对微安级信号,可采用自动电源控制技术,进行有源传送。

2) EJA 型稳态电流传感器对低频信号变换时,不产生相位移,可用于以电压、电流相位过零原理为基础的电容型设备在线介质损耗角的测量。

3) 环型铁芯的频率特性和导磁率是决定脉冲电流传感器性能的关键因素。用罗氏原理研究出了 MXO 型脉冲电流传感器,有较宽的高频带,优良的抗干扰能力,可用于变压器局部放电脉冲电流信号的采集。

4) 采用复合技术研究出的  $F_{46}$ -GDX-SnO<sub>2</sub> 复合型气体传感器,采集油中混合气体含量的周期为 3 天,并能提高混合气体的分离效果和对 6 种气体的敏感度,为实现对大型电力变压器准确地、高效地进行在线监测油中气体含量提供了技术保证。

### 参 考 文 献

- 1 Tsukioka H, Sugawara K. New apparatus for Detecting H<sub>2</sub>, CO, and CH<sub>4</sub> Dissolved in Transformer Oil, IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1983, EI-18, 410~412

## A Study on Sensors for On-line Monitoring Insulation of High Voltage Electric Equipment

*Tang Ju Li Jian Sun Cairin Chen Weigen*

(Department of Electrical Engineering, Chongqing University)

**ABSTRACT** According to the theoretic calculation and testing studies, the characteristics of sensors were analyzed. Furthermore, three kinds of sensors were developed to suit to on-line monitor the insulation of electric equipments.

**KEYWORDS** high voltage insulation technique; on-line; monitoring; sensors