

④

20-24

在线测量介质损耗的方法与误差分析

唐炬 孙才新 苟海丰 陈荣柱

TM835.4

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

摘要 以电压、电流过零相位差原理为基础。分析了测量的误差来源, 给出了计算公式; 利用单片计算机和配套的软件, 作为信号采集、数据处理和计算的工具有, 实现了对高电压电容型设备介质损耗($\text{tg}\delta$)、等效电容(C)和系统频率(f)的在线测量。

关键词 电容; 介质损耗; 测量 / 计算机

中国图书资料分类法分类号 TM83

高层电容型设备

0 引言

在线测量 误差分析

电容型电气设备主要常指套管 BUSH、电流互感器 CT、耦合电容 OY、电容式压变 CVT 和电压互感器 PT 等, 绝大部分故障是因绝缘介质损坏而引起, 直接和间接的经济损失是巨大的。为了确保电力系统电气设备的安全运行, 规程要求定期对电气设备停电进行绝缘预防性试验和检修, 这不仅具有一定的盲目性, 而且还不能及时发现电气设备的绝缘潜伏性故障, 同时, 需要短时的停电和大量的人力、物力, 这不符合高速发展的经济要求。近年来, 国内外都在研制各种在线测试设备, 进而发展在线监测系统。用在线代替离线是一个必然的发展方向。

由于绝缘介质的损耗与 $\text{tg}\delta$ 成正比, 而 $\text{tg}\delta$ 的值与绝缘物体的形状和尺寸大小无关, 它是电介质的固有值。因此, $\text{tg}\delta$ 、电容量 C 和绝缘电阻 R 是表征电容型电气设备绝缘状况的特性参数, 在设备出厂、交接以及预防性试验中, 它们都作为非破坏性试验的主要项目。为了减少试验带来的停电, 对电容型电气设备的特性参数进行在线测试是很有必要的。为此, 在传统的离线测试基础上, 以电压、电流过零相位差为原理, 利用微机对高压电容型设备介质损耗进行在线测试的方法与应用作了较深入的研究, 并对测量误差的处理进行了分析。

1 测试原理

电容型电气设备的绝缘介质损耗($\text{tg}\delta$), 可以用串联或并联的电容和电阻的等值电路来计算^[1], 对于串并联电路有:

$$\text{tg}\delta = \omega R_s C_s \quad (1)$$

$$\text{tg}\delta = \frac{1}{\omega R_p C_p} \quad (2)$$

其中： R_g 表示极化损耗电阻， R_p 表示绝缘电阻，对于性能良好的绝缘介质来说， R_g 很小， R_p 很大， C_p 和 C_s 相差不大， $\text{tg}\delta$ 很小，与绝缘材料的性质有关而与绝缘材料的几何尺寸无关。

介质损耗角 δ 可以用电压、电流相量图来表示，如图 1 所示，它等于电压、电流相位差的余切角，即

$$\delta = \pi/2 - \Psi \tag{3}$$

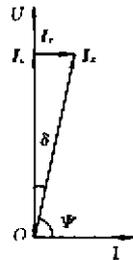


图 1 介质损耗角的电压、电流相量图

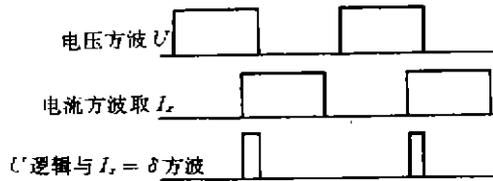


图 2 电压、电流和介损角方波信号

笔者采用电压、电流方波过零原理求取介质损耗角 δ 的大小，图 2 所示为通过硬件电路产生的电压 U 、电流 I_x 方波进行逻辑与运算后得到的介损角 δ 方波信号图。图 3 所示为测试介损角 δ 方波信号的硬件原理框图， I_x 来自于用高精度抗干扰微电流传感器取得的电容型设备末屏电流信号， U 取自电压互感器 (PT) 的电压信号，经过信号处理单元进行放大、滤波和整形，变成两路方波信号，将电流方波取反后，与微调后的电压方波一起送入逻辑与单元相与，可得到一窄方波信号，它

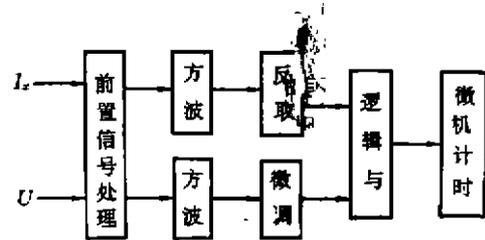


图 3 测试介损角方波信号原理框图

对应于图 1 所示 δ 的时间宽度。然后把它送到 CPU 的计数器进行计时，经计算便可得到介质损耗正切值 $\text{tg}\delta$ 。为了进行由周期引起的误差补偿计算，同时，CPU 还记下系统电压的周期时间 T 。可以推得该方法的数学计算式为：

$$\text{tg}\delta = \text{tg}(2\pi\delta_1/T) \tag{4}$$

其中， T 为测得的系统电压周期时间， δ_1 为测得的介质损耗角时间， $\text{tg}\delta$ 是经计算得到的介质损耗正切值。

2 误差分析

由于系统频率 f 容许一定的偏差 (50 ± 0.2) Hz，将使得 δ 角度时间有 $\pm 80 \mu\text{s}$ 偏差，如果不加以消出，测得的介质损耗 $\text{tg}\delta$ 就有 2.512% 的误差，它已远远超过绝大部分试品的介质损耗值，这是绝对不容许的。

设: 电压信号对应 2π 角弧度的周期为 T (可以是 $20\ 000\ \mu\text{s}$, 也可以不是, 人为设定某值也可). δ_1 为试品真实介损角, δ_2 为实验测试介损角, t 为实际测试电压周期时间, 可以推得如下关系^{*}:

$$1: \text{如果: } t - T = \Delta t \geq 0$$

$$\text{则: } \delta_1 = \delta_2 - \Delta t/2$$

$$2: \text{如果: } t - T = \Delta t \leq 0$$

$$\text{则: } \delta_1 = \delta_2 + \Delta t/2$$

$$\text{以上 2 种情况归结为: } \delta_1 = \delta_2 \pm \Delta t/2 \quad (5)$$

将(5)式测得的结果代入(4)式便可得到没有系统频率响应的介质损耗. 这里必须指出, 经信号处理单元所得的电压、电流方波占空比要相同, 否则, 公式(5)有一定误差.

在实际测试 A、B、C 三相高压电容型试品时, 会有相间干扰, 使得介损角 A 相增大, B 相基本不变, C 相减小(严重时可能为负). 相间干扰的严重性取决于试品主电流大小, 如果主电流远远大于相间干扰电流, 可忽略相间干扰的影响; 否则, 必须考虑相间干扰的影响. 对于电容型设备来说, 从未屏得到的电流信号一般都在毫安级, 而相间干扰电流只有微安级, 因此, 可以忽略其影响.

另外, 试品在额定工作电压下在线测量介质损耗时, 由于所加电压比离线测量时高很多, 试品在试验电压下轻微的和未能暴露的缺陷, 在线测试时就可能加重和暴露. 同时, 离线测量的气象条件和试品的清洁度都优于在线测量, 因而, 在线测试的介质损耗值一般要比离线测试的值大, 有的还可能大很多. 为此, 不能用规程值对在线测试数据进行简单地判断, 而是需要对在线测量值的稳定性和自身变化率进行纵向比较, 综合分析加以判断.

3 硬件和软件系统

该微机测试系统由主机、取样探头、前置信号处理和电缆等组成.

3.1 取样探头

用于从电容型设备末屏获取电流信号. 由于电流较小, 现场干扰严重, 因此, 用灵敏度高的微电流互感器, 配有长线驱动, 同时, 对电压互感器(PT)的信号进行隔离保护取样, 与电流信号一起用同轴电缆进行传送, 整个探头置于双层屏蔽中^[2].

3.2 前置信号处理

接受从探头传来的信号, 进行放大、滤波和稳定处理, 分别分成两路输入, 一路送到模数转换单元进行数值采样, 另一路送到方波单元进行电压、电流方波转换, 经过整形和取反后, 通过逻辑与而得到所需的介损方波角.

3.3 主机系统

它由采样保持、模数转换(A/D)、数模转换(D/A)、存储器、计算机中心处理器和结果显示等组成, 如图 4 所示.

3.4 软件配制

整个软件用模块化设计完成, 采用子程序调用的方法, 增强了程序的灵活性、易读性、维

* 唐矩. 电气设备绝缘在线监测技术报告. 重庆大学科研报告, 1996

护性和扩充性。它包括自检、查巡、功能模块、逻辑判断、数学运算和输出显示等程序。

由于硬件电路处理产生的电压、电流和介损角方波信号不可避免地存在一定程度的来回摆动,加上现场不能完全屏蔽的随机干扰,使得送入 CPU 计数器的介损角方波信号存在随机误差,如果仅靠一两次测量来求得介损角,会使测量结果有较大的分散性。笔者采用软件均加滤波方法,一次测量值采样达 2 048 次,实际应用表明,该均加滤波方法完全能消除以上随机干扰,使测量数据变得相当稳定。

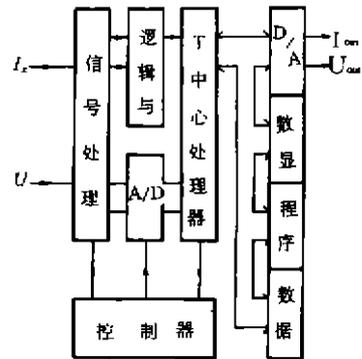


图 4 主机电路框图

4 实验数据

为了检验处理误差方法的正确性和微机测量的定量性,与 QS-1 型电桥进行了对比测量,测量结果如表 1 所示,结果表明以该原理做成的微机测量装置,用上述方法对数据进行处理和计算,测量数据的精度与 QS-1 型电桥相当。同时,为了考验微机装置的稳定性和可靠性,进行了较长时间的在线测试,将测量数据绘制成曲线如图 5 所示,结果表明能满足高电压电容型设备在线监测的要求。

表 1 与 QS-1 型电桥对比测量数据 μF

试品	微机测试		QS-1 型电桥	
	电容量(C)	介损 $\tan\delta/\%$	电容量(C)	介损 $\tan\delta/\%$
1	0.022 0	0.60	0.022 0	0.50
2	0.023 4	0.90	0.024 1	1.00

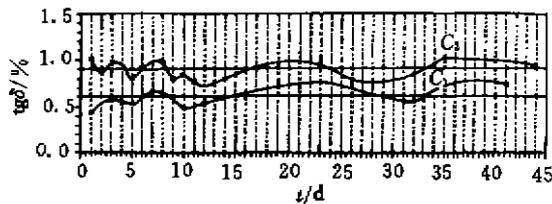


图 5 在线测试介损的时间曲线

为了考验现场的抗干扰性,在重庆双山 220 kV 变电站对主变压器套管 BUSH、电流互感器 CT 和耦合电容器 OY 进行了在线测量,该多次实测数据的平均值如表 2 所示,结果表明有较强的抗干扰能力。

表2 电容型设备的实测数据

相别	主变压器套管 BUSH $\text{tg}\delta(\%)$		电流互感器 CT $\text{tg}\delta(\%)$			耦合电容器 OY $\text{tg}\delta(\%)$		
	1号	2号	201	202	203	201	202	203
A相	0.32	0.14	0.22	0.25	0.45	0.16	0.31	0.23
B相	0.25	0.38	0.21	0.24	0.32	0.17	0.26	0.32
C相	0.30	0.32	0.31	0.32	0.36	0.22	0.29	0.30

母线电压 227 kV, 环境温度 27℃, 湿度 72%, 频率 49.98 Hz

5 结 论

1) 提出以电压、电流过零相位差原理为基础, 用本文中克服频率摆动的方法, 能较为准确地测量出电容型设备的介质损耗。

2) 采用单片计算机作为信号采集和数据处理, 为介质损耗实现在线监测奠定了基础。

3) 用硬件电路直接比较出电压、电流过零相位差, 响应速度快, 同时, 采用软件均加滤波方法, 克服了介损方波来回摆动和现场的随机干扰带来的误差, 在一定程度上提高了系统抗干扰能力。

4) 测试数据和测试曲线表明, 有一定的精度, 可靠性高, 稳定性好, 能用于电力系统电容型设备绝缘的在线检测, 具有很大的实用价值和良好的开发应用前景。

参 考 文 献

- 1 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘. 北京: 清华大学出版社, 1990. 113~115
- 2 唐炬, 李剑, 孙才新等. 高压电气设备绝缘监测的传感器研究. 重庆大学学报, 1998, 21(3): 73~78

The Method and Error Analysis of On-line Measuring the Dielectric Loss of High Voltage Capacitive Apparatus with Microcomputer

Tang Ju Sun Caixin Gou Haifeng Chen Rongzhu

(College of Electrical Engineering, Chongqing University)

ABSTRACT Based on the principle of phase difference between voltage and current at their crossing zero points, are analysed the error sources and the corresponding calculating formulae are provided. Using a single-chip microcomputer and related software as tools of signal collecting, data processing and calculating, the parameters on-line measurement of the dielectric loss ($\text{tg}\delta$), equivalent capacitance (C) of high-voltage capacitive apparatus and the power system frequency (f) is achieved.

KEYWORDS capacitance; dielectric loss; measurements / computer