

局部放电校准仪的研究与设计

王万岗^{1,2}, 吴广宁¹, 雷 栋¹, 何常红¹, 张雪原¹

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 成都纺织高等专科学校, 四川 成都 611731)

摘要: 介绍了局部放电校准仪的设计原理,建立了局部放电校准仪的电路模型。通过对模型进行分析、计算,得出校准仪的输出电量与电阻分压比成正比。改变分压比就可以实现不同的输出电量。利用此校准仪进行测量实验,结果表明:其输出的实际电荷量满足 IEC 60270 标准中规定的指标。

关键词: 局部放电; 校准仪; 电荷测量

中图分类号: TM866

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)04-0059-04

Investigation and Design of Partial Discharge Calibrator

WANG Wan-gang^{1,2}, WU Guang-ning¹, LEI Dong¹, HE Chang-hong¹, ZHANG Xue-yuan¹

(1. Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 2. Chengdu Textile College, Chengdu 611731, China)

Abstract: This paper introduces the design principle of a partial discharge calibrator, and establishes a circuit model of the calibrator. Calculation with the model shows that the electric charge output of the calibrator is directly proportional to the voltage on resistance divider, and different charge output can be achieved by changing the dividing ratio of voltage. Experiment with the designed calibrator indicates that the charge output of the calibrator meets the index in the standard IEC 60270.

Key words: partial discharge; calibrator; charge measurement

0 引言

多年来的研究表明,局部放电信号的数量、幅度和极性可以直接反映高压电力设备绝缘系统的状况。目前利用局部放电现象评估电力设备的绝缘寿命仍是一门发展中的基础理论和应用技术紧密结合的前沿学科^[1,2]。局部放电现象的存在将加速绝缘层的老化,甚至击穿绝缘层,导致设备的损坏,造成电力系统的瘫痪,给生产、生活带来极大的影响。局部放电测试通过对视在放电量、放电相位、放电重复率、放电电流以及功率等参量的测量来判定绝缘性能和电力设备的状态,而这些值的准确性与在局部放电测试中承担校准任务的校准仪的性能密切相关^[3-6]。因此,校准仪的设计研究显得十分重要。

1 校准仪设计原理

1.1 放电量定律

通过测量已知电容的电压来推导出脉冲发生器对电容注入的电荷量。其电压的测量可以采用数字示波器。图 1 为局部放电电荷发生器的原理图。耦合

电容为 C_{int} , 阻抗 Z 连接在局部放电发生器上,其电流为 i 。 U_{gen} 为注入电压脉冲,其波形见图 2。电路的响应电流波形见图 3。

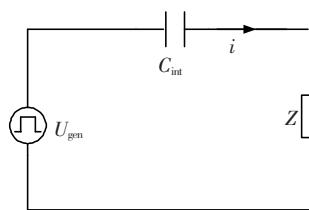


图 1 局部放电电荷发生器原理图

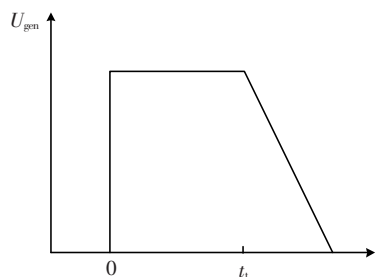


图 2 电压波形图

收稿日期:2008-11-16; 修回日期:2009-02-11

作者简介:王万岗(1975),男,博士研究生,讲师,目前主要从事智能仪器仪表、在线监测与故障诊断方面的研究工作。

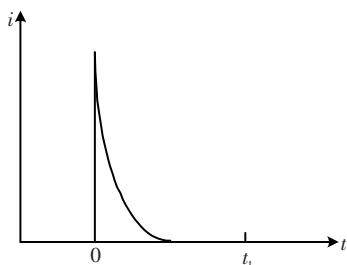


图3 电流波形图

根据图1和图3,校准器产生的电荷为

$$q = \int_0^{t_1} i(t) dt \tag{1}$$

由电容的定义以及图1、2可以得到注入电荷的另外一个表达式

$$q = U_{gen} C_{int} \tag{2}$$

由图3可以看出,电容的充电时间较短。因此阻抗Z上的电压分量可以忽略不计。

1.2 放电量的测量

图4为校准器校准局部放电测量的电路图,从图中可以得到

$$U_{ext} = U_{gen} \cdot \frac{C_{int}}{C_{int} + C_{ext}} \tag{3}$$

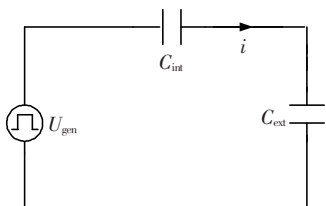


图4 校准测量原理图

这样可以得到产生的电荷

$$q = U_{gen} \cdot C_{int} = U_{ext} (C_{int} + C_{ext}) \tag{4}$$

由此可见,输出的电压和注入的电荷是成比例的。因此,可以通过测量电压来实现放电量的测量。

1.3 放电量的分度原理

在接入校准仪进行校准时,假设此时局部放电测试仪上的读数是V₀,校准仪输出电量为q₀(由式(2)确定),则定义分度系数K_i为

$$K_i = q_0 / V_0 \tag{5}$$

拆去校准仪,在试样两端加上高压使其产生局部放电现象。对试样进行测量时,若局部放电测试仪上的读数是V,则可以计算出放电电量:

$$q = K_i V \tag{6}$$

分度系数中K_i取决于全套测量系统中各元件(试样、外接耦合电容器、连接线、测量元件以及测量装置)的参数及其接入位置。因此对每一套测量系统及每一种试样都应该做一次校准。但从测量局部放电特性的允许误差看,在用同一测量系统测试相似的产品系列时,若试样电容值的变化不超过30%,则

不必对每一试样做一次校准。建议根据测试需要按被测值的各变化范围分别进行校准。

2 校准仪的实现

校准仪由电源部分、方波发生部分、局部放电信号发生和分度电容组成。

2.1 校准仪电源

电源电路见图5。电源部分实现将4节5号电池输出的电压转化为稳定的4V电压给方波发生和局部放电信号发生部分供电。

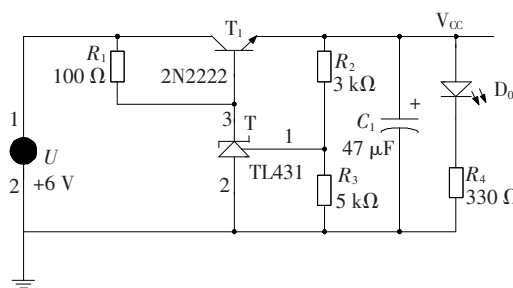


图5 电源电路

2.2 方波信号发生

方波信号产生部分采用低功耗CMOS电路,其方波发生原理见图6。

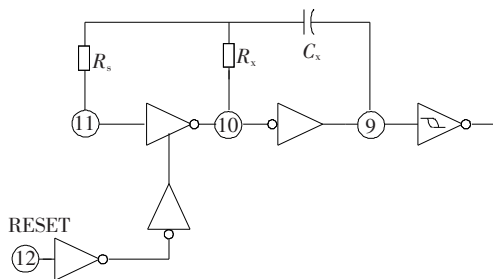


图6 方波信号发生器原理图

RC产生的振荡频率为

$$f = \frac{1}{2.2R_x C_x} \tag{7}$$

选择C_x=10 nF;由Q₆输出50 Hz的方波,所以R_x=14.204 kΩ。其中R_x由一个阻值为10 kΩ的固定电阻和一个5.6 kΩ的多圈可调电位器组成的,从而实现50 Hz的精确方波信号的产生。

2.3 局部放电信号发生器的设计

基于前面的分析,笔者设计了一个二阶微分电路模型,见图7。其中C₀的初始条件为-4V(t=0),C₁的初始条件是0(t=0)。C₀可等效一个周期的方波信号,C₁为分度电容和被测试样相串联的等效总电容。

由电路模型可知

$$-C_0 \frac{du_0(t)}{dt} = \frac{u_1(t)}{R_1} + C_1 \frac{du_1(t)}{dt}$$

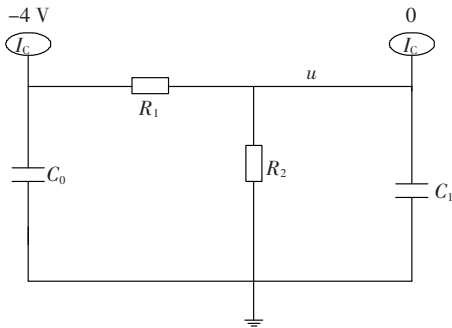


图7 局部放电信号发生器的电路模型

$$u_0(t) = u_1(t) + \left[\frac{u_1(t)}{R_1} + C_1 \frac{du_1(t)}{dt} \right] R_2 \quad (8)$$

$$u_0(t)|_{t=0} = -4; u_1(t)|_{t=0} = 0; i_1(t)|_{t=0} = \frac{U_0}{R_2}$$

式(8)中, $u_0(t)$ 、 $u_1(t)$ 为电容 C_0 、 C_1 上的电压; U_0 为电容 C_0 在 $t=0$ 时的初始电压。

由式(8)可得

$$C_0 C_1 R_2 \frac{d^2 u_1(t)}{dt^2} + [C_0 \frac{R_1 + R_2}{R_1} + C_1] \frac{du_1(t)}{dt} + \frac{u_1(t)}{R_2} = 0 \quad (9)$$

式(9)是一个二阶常系数微分方程,其

$$\Delta = (C_0 \frac{R_1 + R_2}{R_1} + C_1)^2 - 4C_0 C_1$$

在该系统中, $R_1 \geq R_2$, 因此 $\Delta > 0$, 方程的两个根为

$$P_1 = \frac{-(C_0 \frac{R_1 + R_2}{R_1} + C_1) - \sqrt{\Delta}}{2C_0 C_1 R_2}$$

$$P_2 = \frac{-(C_0 \frac{R_1 + R_2}{R_1} + C_1) + \sqrt{\Delta}}{2C_0 C_1 R_2}$$

显然 P_1 和 P_2 均小于 0。故

$$u_1(t) = A e^{P_1 t} + B e^{P_2 t} \quad (10)$$

由初始条件和式(10)得

$$A + B = 0 \quad C_1 (A P_1 + B P_2) = -\frac{U_0}{R_2} \quad (11)$$

由式(11)可得

$$C_1 A (P_1 - P_2) = \frac{U_0}{R_2} \quad (12)$$

由式(12)得

$$A = -U_0 C_0 / \sqrt{\Delta} \quad (13)$$

由于 $C_0 \gg C_1$, 所以

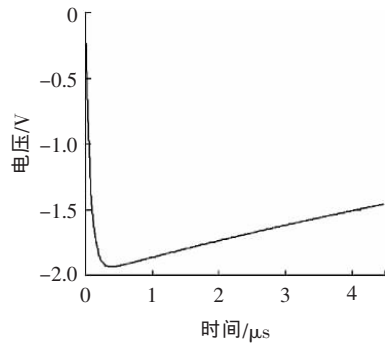
$$\sqrt{\Delta} \approx \frac{C_0 (R_1 + R_2)}{R_1}; A \approx -\frac{U_0 R_1}{R_1 + R_2}$$

由此可得到

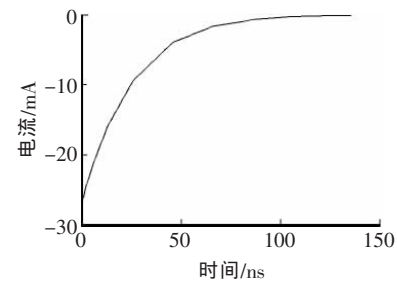
$$u_1(t) \approx -\frac{U_0 R_1}{R_1 + R_2} e^{P_1 t} + \frac{U_0 R_1}{R_1 + R_2} e^{P_2 t} \quad (14)$$

电容 C_1 上的电压由两个指数衰减函数相减而成, 由于 $|P_1| \gg |P_2|$, 可得到电容 C_1 上的测量点的电压的极值近似等于 $\frac{U_0 R_1}{R_1 + R_2}$ 。设 $R_1 = R_2 = 150 \Omega$ 时, 其电

压、电流波形见图 8(a)、8(b)。



(a) 电压信号



(b) 电流信号

图8 电容 C_1 上的电压、电流信号

从上面的分析可知, 电容 C_1 的充电量

$$q = \frac{C_1 R_1 U_0}{R_1 + R_2} \quad (15)$$

因此可以通过改变 R_1 和 R_2 的比值来实现对被测电容性电力设备不同的电荷量的注入。

从上面的分析可以看出, 电容 C_0 越大越好, 但是如果 C_0 过大, 就会使得 τ 值过大, 充电时间过长, 不可能在 10 ms 内完成电容的充电, 从而会使得式(14)中的 U_0 不等于 V_{CC} 。基于此考虑, 电路中 C_0 的取值为 47 nF。校准器对 C_1 注入的电荷量与 C_1 、电阻和电源有关, 故在电容上选择稳定性较好的 C_{BB} 电容, 分压电阻选择精密电阻, 并对电池供电系统作稳压处理。

局部放电信号发生器的原理图见图 9, 电容 C_{in} 选用稳定性较好的 C_{BB} 电容, 以保证校准电量的稳定性。场效应管选择开关速率较快的场效应管。电阻 $R_{X0} \sim R_{X6}$ 为精密型电阻, 以保证输出电压的稳定性。表 1 列出了电阻的阻值及其输出的电压和注入的电量。

图 10 为当开关选择输出 100 pC 时电容 C_1 的电压波形和校准器未接被校准对象时一个周波的电压输出波形, 图 9 电路的 C_1 和被校准设备的电容的串联。笔者测试了该电路的输出电压的实际值, 给出实际值和理论值的关系图见图 11。从图 11 中可以看出: 测量值和理论值非常接近, 只是测量值略低于理论值, 其误差范围在 IEC 60270 标准的规定范围内。

3 测试结果

采用 IEC 60270-2000 标准的要求对校准仪进行

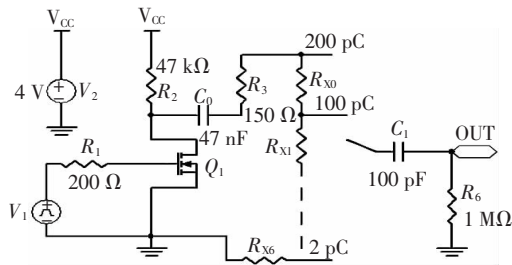


图9 局部放电信号发生器的原理图

表1 R_x 的阻值选择及输出电量

编号	R_{X0}	R_{X1}	R_{X2}	R_{X3}	R_{X4}	R_{X5}	R_{X6}
阻值/ Ω	75.00	37.50	22.50	7.50	3.75	2.20	1.50
理论电压/V	2.00	1.00	0.50	0.20	0.10	0.05	0.02
理论电量/pC	200	100	50	20	10	5	2

测试, 测试结果为: 电压脉冲上升时间 t_r 小于 50 ns; 脉冲信号重复频率 N 为 50 Hz; 输出电荷电量为 200、100、50、20、10、5、2 pC, 共分 7 个输出电荷值。该局部放电校准仪采用 4 节电池供电, 不需要外接电源供电, 使用方便。其产品的技术指标满足标准的设计要求。

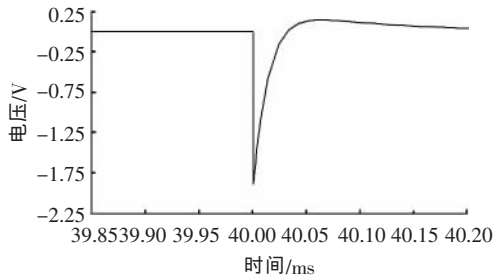


图10 电压输出波形

4 结语

利用校准仪的输出电量与电阻分压成正比

(上接第 58 页)

275 kV, 为全波雷电冲击电压 1 550 kV 的 17%。

一般认为 VFTO 不超过雷电全波冲击下该线饼的雷电梯度电压的 3 倍, 就认为绕组的导线匝绝缘和油道绝缘强度是足够的。500 kV 变压器若采用一般的纠结式绕组结构, 则在 1 550 kV 全波冲击电压作用下, 高压端 1~3 个线饼的最大梯度电压大约为 7%~9%, 若采用插入电容内屏蔽结构的绕组最大梯度电压可能要低一些。以 9% 计, 为 139 kV, 则 VFTO 允许值为 417 kV。根据表 3 计算结果, 方式 1 和 2 的 1~3 个线饼的最大梯度电压在允许范围内。方式 3 超过允许值, 因此要避免方式 3 的操作。

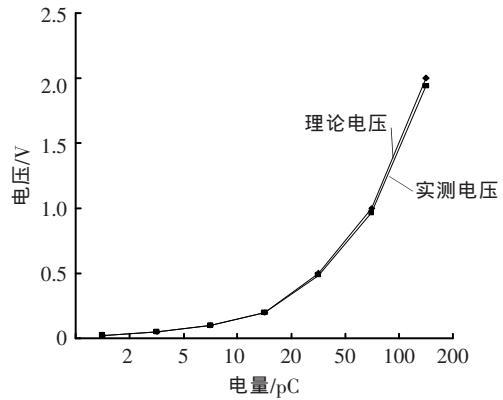


图11 实际输出电压与理论值的比较

关系, 设计出的局部放电校准仪通过改变电阻的比值可以实现多档电量的输出。其输出的实际电荷量及性能指标满足 IEC 60270-2000 标准中规定的指标^[5], 完全可以完成电力系统中容性设备局部放电测量仪器的校准工作。

参考文献:

- [1] 郭俊, 吴广宁, 张血琴, 等. 局部放电检测技术的现状和发展[J]. 电工技术学报, 2005(2): 29-35.
- [2] 吴广宁. 大型发电机故障放电在线监测及诊断技术[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2001.
- [3] WENZEL D, BORSI H, GOCKENBACH E. New Digital Calibrator with Impressed Current Pulses for Partial Discharge Measurements[C]//Proceedings of International Symposium on Electrical Insulating Materials, Toyohashi, Japan, 1998: 717-720.
- [4] CARMINATI E, GANDELLI A, OSVATH P. A Standard Calibrator for PD Teting [C]//IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Baltimore, USA, 1992: 379-382.
- [5] IEC TC 42/141 CD. Draft for IEC 60270 Ed. 3[S].
- [6] WENZEL D, BORSI H, GOCKENBACH E. New Digital Calibrator with Impressed Current Pulses for Partial Discharge Measurements[C]//Proceedings of 1998 International Symposium on Electrical Insulating Materials, Toyohashi, Japan, 1998: 717-720.

4 结语

(1) VFTO 会引起变压器绕组匝间电压分布极不均匀, 威胁变压器匝间绝缘安全。

(2) 根据文中计算结果, 隔离开关操作方式 1 和 2 的 1~3 个线饼的最大梯度电压在允许范围内, 而操作方式 3 超过允许值, 因此要避免方式 3 的操作。

参考文献:

- [1] GB 1985-2004. 高压交流隔离开关和接地开关 附录 F[S].
- [2] IEC TR60071-4. 2004 Insulation co-ordination-part4: Computational Guide to Insulation Co-ordination and Modeling of Electrical Networks. Table12[S].
- [3] IEC 60071-2. 1996. Insulation Co-ordination-part2: Application Guide. Annex E[S].