

## 宽带脉冲电流法局部放电检测中的脉冲定量

阮 羚<sup>1</sup>, 高胜友<sup>2</sup>, 郑 重<sup>3</sup>, 阮江军<sup>4</sup>, 杜志叶<sup>4</sup>

(1. 湖北省电力试验研究院, 湖北 武汉 430074; 2. 清华大学电机系电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084; 3. 华北电力大学电气学院, 北京 102206; 4. 武汉大学电气学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 与传统的脉冲电流法相比, 宽带测量方法可以获取更多的局部放电信息, 有助于提高测量的灵敏度和抗干扰能力。研究了基于宽带脉冲电流法的局部放电检测中的脉冲定量技术, 介绍了脉冲校准器的设计原理, 分析了校准脉冲的波形特征和频谱特征, 实测了定量的准确性和线性度。同时在局部放电的实际测量中对两种方法进行了对比, 证明了两种方法的等效性。

**关键词:** 局部放电; 宽带脉冲电流法; 定量; 校正脉冲

中图分类号: TM835

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)05-0080-03

## Pulse Quantitative Determination in Partial Discharge Detection Using Wide Bandwidth Pulse Current Method

RUAN Ling<sup>1</sup>, GAO Sheng-you<sup>2</sup>, ZHENG Zhong<sup>3</sup>, RUAN Jiang-jun<sup>4</sup>, DU Zhi-ye<sup>4</sup>

(1. Hubei Electric Power Test &amp; Research Institute, Wuhan 430074, China; 2. State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments, Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 4. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Compared with traditional IEC method, the wide bandwidth pulse current method could get more information about partial discharge, which will be helpful to improve the sensitivity as well as the ability of anti-interference. This paper study the pulse quantitative determination technology used by partial discharge detection based on wide bandwidth pulse current method. The design principle of pulse calibrator is introduced and the wave and spectrum characteristic of calibration pulse is analyzed. The accuracy and linearity are tested. The equivalence of two methods is proven by partial discharge practical partial discharge measurement.

**Key words:** partial discharge; wide bandwidth pulse current; quantitative determination; calibration pulse

## 0 引言

局部放电测量中, 研究最早、应用最广泛、同时被 IEC 标准和中国国家标准所认可的方法是脉冲电流法。它的优点是离线测量灵敏度高, 而且可用已知电荷量的脉冲注入校正定量, 从而测出放电量<sup>[1]</sup>。

局部放电的电信号具有非常宽的频谱, 约从数百赫兹到数百兆赫兹<sup>[1]</sup>。而目前广泛使用的脉冲电流法为了避开无线电干扰, 主要利用局部放电信号频谱中的较低频段部分, 一般为数千赫兹至数百千赫兹(至多为数兆赫兹), 因此信号中包含的信息少, 同时抗干扰能力也较差, 在应用于在线监测时尤其明显。而近年来所采用的超高频方法主要测量局部

放电所产生的超高频信号(300 MHz~3 GHz), 其优点是躲开了几百兆赫兹以下的现场干扰, 信噪比比比较高。但由于局部放电能量主要集中在几百兆赫兹以下, 超高频部分能量很弱, 很难进行局部放电的定量和模式识别, 另外该方法对绝缘内部气隙放电的检测灵敏度不高。

如果能够在获取尽可能多的放电信息前提下, 又有效地滤除现场的干扰, 将非常有利于局部放电的测量和在线监测。基于宽带脉冲电流法的局部放电检测则是对传统脉冲电流法的有益扩展, 该方法利用高速数据采集技术(100 MS/s)比较准确地记录较长时间的局部放电信号的脉冲电流波形, 利用现代计算机的强大处理能力, 根据放电信号与干扰信号在脉冲波形特征和相对于工频试验电压相位的差

收稿日期: 2009-06-29; 修回日期: 2009-08-19

作者简介: 阮 羚(1961), 男, 高级工程师, 主要从事高电压工程与电气绝缘方面的研究和测试方面的工作。

异来分离放电信号与干扰,进而进行放电的定量、定位与放电模式识别,为故障诊断和维修提供有效的依据。

视在放电量是局部放电测量中最重要的参数之一,而只有经过定量校正后才能确定放电量的大小数值。放电量的校正是局部放电测量中的重要环节之一,它直接影响了定量的准确性。从理论上讲,校正脉冲的电压波形应与实际局部放电产生的脉冲电压波形相似,在测量中才不至于产生很大的误差。因而要求校正脉冲发生器的前沿应该尽量小,才能接近气隙放电的相应特性。由于传统的脉冲电流法中使用的频带较低,同时过分要求降低前沿,对发生器的制作有一定难度,现行的 IEC 和国家标准规定,校正脉冲发生器的前沿不得超过  $60 \text{ ns}^{[2]}$ 。

宽带脉冲电流法具有较宽的检测频带( $30 \text{ kHz} \sim 10 \text{ MHz}$ ),因而对校正脉冲提出了更高的要求。笔者针对宽带脉冲电流法局部放电测量中的校正脉冲发生器的原理、所产生的校正脉冲波形及频谱特征进行了研究,并在实际的局部放电测量中对采用传统的脉冲电流法和宽带脉冲电流法两种方法时的放电电量校准和测量进行了对比,证明了两种方法具有等效性。

## 1 宽带检测系统中校正脉冲的特性

宽带局部放电检测系统中使用的校正脉冲发生器的原理见图 1。由 CPU 根据通过键盘设定的放电电量以及脉冲重复频率,控制 12 位 D/A 转换器产生一个稳定的、与设定放电电量成正比的直流电压,同时由 CPU 的通用输出口控制一个高速模拟开关,使其按照设定的重复率接通由 D/A 输出并经驱动的直流电压,从而产生一个与控制脉冲形状基本相同,但前沿很陡的方波信号,该方波经分度电容  $C_0$  和匹配电阻  $R_0$  输出即为校正脉冲<sup>[3]</sup>。

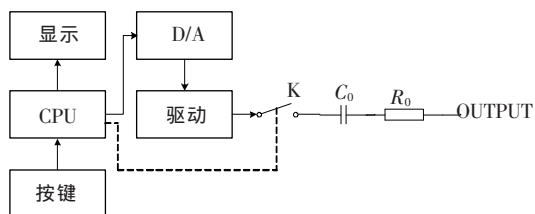


图 1 宽带局部放电检测系统中校正脉冲发生器的原理框图

图 2、3 分别是由校正脉冲发生器产生的校正脉冲的全波波形和前沿部分的细节波形。测量中采用的是 TDS2012 型数字存储示波器,模拟带宽  $100 \text{ MHz}$ ,采样率  $1 \text{ GS/s}$ 。图 2 中水平刻度为  $25 \mu\text{s}/\text{div}$ ,图 3 中水平刻度为  $5 \text{ ns}/\text{div}$ 。所注入的电荷量为  $50 \text{ pC}$ 。

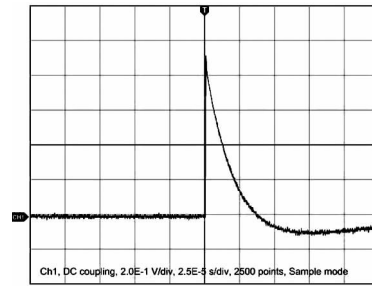


图 2 宽带测量系统中脉冲信号源的波形(全波)

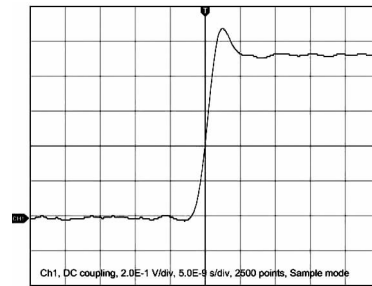


图 3 宽带测量系统中脉冲信号源的波形(前沿)

图 4、5 分别是传统的窄带局部放电测试仪配套用脉冲源的全波波形和前沿部分波形。图 4 中水平刻度为  $50 \mu\text{s}/\text{div}$ ,图 5 中水平刻度为  $50 \text{ ns}/\text{div}$ 。所注入的电荷量也为  $50 \text{ pC}$ 。

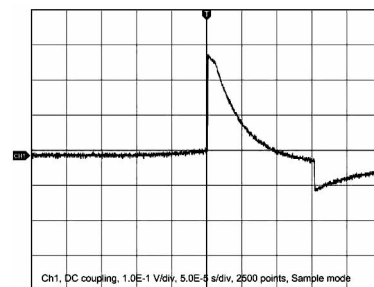


图 4 窄带测量系统中脉冲信号源的波形(全波)

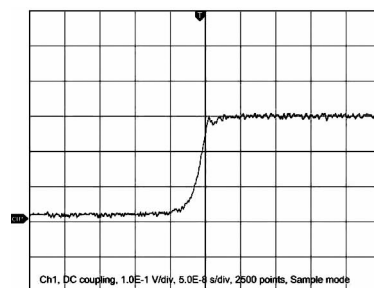


图 5 窄带测量系统中脉冲信号源的波形(前沿)

从图中可以看出,宽带测量系统中校正脉冲的上升沿时间小于  $5 \text{ ns}$ ,而窄带系统中所使用的校正脉冲则在  $100 \text{ ns}$  以内。也就是说,前者包含了更宽频带范围内的能量,更适合于宽带测量系统。

图 6、7 则分别是宽带脉冲和窄带脉冲的频谱分析结果,其水平刻度为  $25 \text{ MHz}/\text{div}$ 。

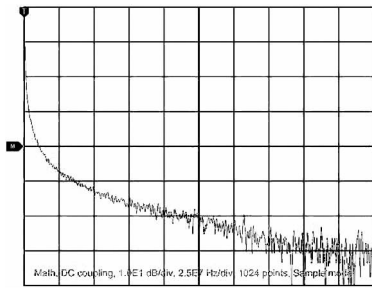


图6 宽带校正脉冲的频谱分布 (25 MHz/div)

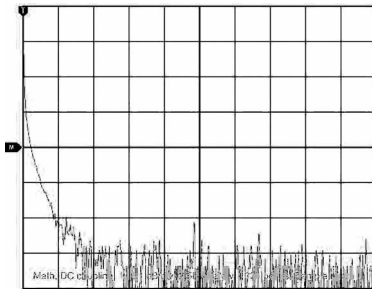


图7 窄带校正脉冲的频谱分布 (25 MHz/div)

通过对比可以发现，两者在频带分布上存在较大差异，其中宽带校正脉冲的频带宽度大概为窄带的5倍，保证了测量系统可以采集到更宽频率范围内的能量，能更真实地模拟局部放电的同时也提高了检测的灵敏度，获取局部放电更丰富的信息。

如图8所示，按照国标规定的脉冲校准器的校准回路对输出的放电量进行测量，同时进行线性度测试，图中负载电阻  $R_m$  为  $50 \Omega$ 。测试结果见图9，图中横坐标为脉冲校准器输出的标称电量，纵坐标为根据国标规定的方法测量、计算得到的电量。

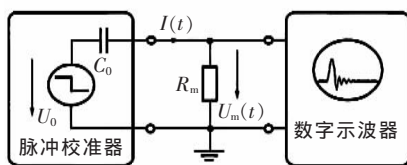


图8 脉冲校准器输出电量的测量回路

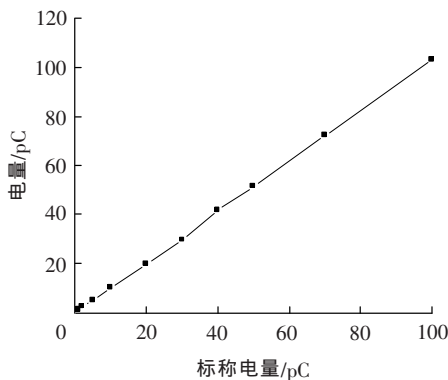


图9 脉冲校准器输出电量的测量结果

从测量、计算的结果中可以看出，脉冲校准器输

出的电量在  $3 \sim 100 \text{ pC}$  范围内，测量结果与标称输出的最大偏差为  $4.6\%$  ( $40 \text{ pC}$  时)，而在标称输出为  $1 \text{ pC}$  和  $2 \text{ pC}$  时，虽然最大偏差超过了  $5\%$ ，但其绝对值小于  $1 \text{ pC}$ ，因此在全量程范围内，其输出满足国标规定的要求。其输出电荷量呈现出良好的线性度。

## 2 局部放电测量中放电量校准的对比

在实验室中分别使用传统的局部放电测试仪和宽带局部放电检测系统对同一试品进行刻度因数的确定和视在放电量的测量。放电信号的获取分别采用窄带检测阻抗和带宽为  $30 \text{ kHz} \sim 100 \text{ MHz}$  的宽带电流传感器。测试回路见图10。

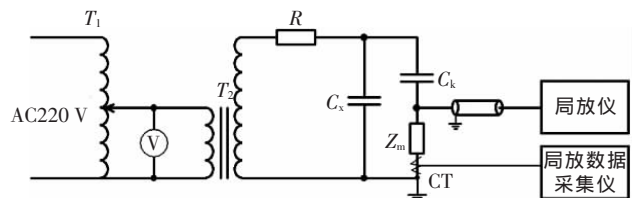


图10 放电量定量对比测试回路

表1为刻度因数标定和放电量测量的结果。可以看出，虽然两个测量系统中的刻度因数不同，但最后测得的放电量基本相近，说明在放电量的定量方面，宽带方法与传统的IEC方法具有等效性。

表1 刻度因数标定和放电量测量结果

测试仪器	刻度因数	放电脉冲幅度	放电量/pC
JFD-3 局部放电测试仪	$53 \text{ pC/div}$	$2.5 \text{ div}$	132.5
宽带局部放电数字化采集系统	$2 \text{ pC/mV}$	65	130

## 3 结语

用于宽带局部放电检测系统中的脉冲校准器具有小于  $5 \text{ ns}$  的脉冲上升时间，其输出电量具有良好的准确度和线性度，可以满足宽带测量系统中脉冲定量的要求。经过与传统IEC方法的放电量定量对比试验，证明两者在定量方面具有等效性。

## 参考文献：

- [1] 邱昌容,王乃庆.电工设备局部放电及其测试技术[M].北京:机械工业出版社,1994.
- [2] GB/T 7354-2003/IEC 60270:2000.局部放电测量[S].
- [3] 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,1998:717-720.