

特高压气体绝缘开关设备中特快速瞬态过电压 测量用电容传感器的标定

丁卫东¹, 李峰¹, 张乔根¹, 陈国强², 刘洪涛², 岳功昌³, 张博⁴

(1. 电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学), 陕西省 西安市 710049; 2. 国家电网公司, 北京市 西城区 100031; 3. 清华大学, 北京市 海淀区 100084; 4. 华北电力大学, 北京市 昌平区 102206)

Calibration of the Capacitive Sensor Used in the Very Fast Transient Overvoltage Measurement of Ultra High Voltage Gas Insulated Switchgear

DING Weidong¹, LI Feng¹, ZHANG Qiaogen¹, CHEN Guoqiang², LIU Hongtao²,
YUE Gongchang³, ZHANG Bo⁴

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, Shaanxi Province, China; 2. State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China; 3. Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China; 4. North China Electric University, Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: It is necessary to calibrate the hand hole capacitive sensors used for very fast transient overvoltage (VFTO) measurement in ultra high voltage (UHV) gas insulated switchgear (GIS) to ensure its accuracy. The calibration system developed in this paper consists of three impulse generators and corresponding measurement components. The system adopts a low voltage steep pulse generator to verify the sensor's high frequency characteristics, a high voltage steep pulse generator to verify the stability of the sensor under high voltage, and a long tail impulse generator to verify the sensor's low frequency characteristics. A water resistance divider and a metal film resistance divider were developed to measure the waveforms generated by the three impulse generators. The frequency characteristics and linearities of these resistance dividers used for calibration were verified. The calibration results show that the two types of capacitive sensors developed by North China Electric Power University and Tsinghai University function well in frequency characteristics, linearity and stability; and could meet the requirements of VFTO measurement in UHV GIS.

KEY WORDS: ultra high voltage (UHV); gas insulated

switchgear (GIS); very fast transient overvoltages (VFTO); capacitive sensor; calibration; resistance divider; steep pulse generator

摘要: 为保证特高压气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)中特快速瞬态过电压(very fast transient overvoltage, VFTO)测量用手孔式电容传感器的准确性, 必须对其进行标定。研制了用于电容传感器的标定系统, 它由3种不同幅值及波形的脉冲源及相应测量系统组成。其中: 低电压陡脉冲源用于校验电容传感器的高频特性; 高电压陡脉冲源用于校验传感器在高压下的稳定性; 低电压长波尾电源用于校验传感器的低频特性。水电阻分压器及金属膜电阻分压器用于测量3种脉冲源的输出波形, 在标定电容分压器前, 对电阻分压器的频率特性及线性度特性进行了试验。电容传感器的标定试验结果表明, 华北电力大学和清华大学研制的电容传感器均具有良好的频率特性、线性度和稳定性, 可以满足特高压 GIS 设备 VFTO 测量工作的需要。

关键词: 特高压; 气体绝缘开关设备; 特快速瞬态过电压; 电容传感器; 标定; 电阻分压器; 陡脉冲源

0 引言

由于特快速瞬态过电压(very fast transient overvoltage, VFTO)本身的特殊性^[1-9], 它对于其测量的系统提出了相当严格的要求, 例如用于气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)中 VFTO 测量的系统应该同时具有高上限截止频率和

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973 项目)(2011CB209405); 国家电网公司科技项目(SGKJJSKF[2009]776)。

The National Basic Research Program of China (973 Program)(2011CB209405); Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (SGKJJSKF[2009]776)。

低下限截止频率。为确保测量 VFTO 时的正确性，必须对所用测量系统进行恰当的标定。

目前国内外虽对测量 VFTO 的方法已经进行了长期的研究，提出了电容传感器法和微积分法等^[10-13]多种方法，并开展了一些实际测量，但在测量系统的标定问题上仍然未能达成共识，也没有形成完善的标定方法。为考核 VFTO 测量用传感器的高频性能，大多数研究者采用了在 GIS 母线或者同轴传输单元上施加方波或快前沿冲击电压的方法，所施加的电压上升时间一般为数 ns，满足标定高频性能的要求，但其幅值都比较低，而电容传感器的分压比较大，标定时的输出电压较小，难于测量^[10-15]。也有研究者采用对电容传感器低压臂及传输系统进行扫频的方法，该方法可避免使用较高电压的信号源并可确定电容传感器的高、低频截止频率，但标定时的工况与实际使用时有一定差异^[16]。

针对目前 VFTO 测量用电容传感器标定中的不足之处，本文对电容传感器的实验室标定方法进行了研究。首先，特高压 GIS 设备中产生的 VFTO 可能同时具有快至 ns 量级的上升沿和高达 MV 量级的幅值，故用于标定的装置必须能产生前沿快、幅值尽可能高的脉冲；其次，对于通常的冲击电压测量系统，国际上尚且没有普遍认可的标准存在，很多情况下都需要进行国际间的比对^[17]，对 VFTO 测量系统而言也是如此，要标定特高压 GIS 设备中 VFTO 测量用电容传感器，必须有作为比对基准的优质测量系统，并采用相互比对的方法进行。

基于以上考虑本文提出采用不同波形、不同幅值的 3 种脉冲源作为信号源，以电阻分压器作为比对基准，对电容传感器的频带进行标定的方法。结合特高压 GIS 中 VFTO 测量的需要，研制了标定用实验装置，对华北电力大学和清华大学研制的手孔式电容传感器进行了标定，并报告了标定结果。

1 标定方法

标定装置的组成如图 1 所示，它由脉冲源、锥形传输线、GIS 母线筒、电阻分压器及匹配电阻构成。脉冲源产生某种波形的电压信号，通过锥形传输线施加于 GIS 母线筒，GIS 母线筒上实际形成的电压波形与脉冲源、电阻分压器及末端的匹配电阻参数有关。

如前所述，标定装置必须能够产生前沿快、幅

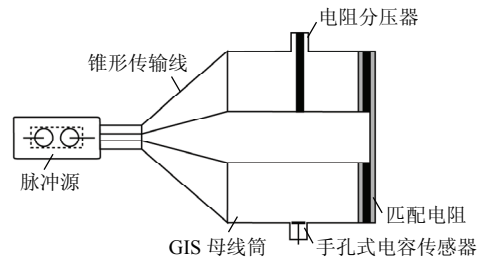


图 1 标定装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the calibration setup

值足够高的脉冲，此外 VFTO 波形叠加于工频电压上并受到残余电荷的影响，测量用电容传感器应该有足够低的下限频率，相应地也需要能考核电容传感器低频性能的信号源。为满足上述要求，本文采用了不同波形、不同幅值的 3 种脉冲源作为信号源，即低电压陡脉冲源、高电压陡脉冲源以及低电压长波尾脉冲源。

GIS 母线筒外壳内直径为 880 mm，内导体直径为 180 mm，长为 500 mm。外壳中间位置安装待标定的电容传感器和电阻分压器。GIS 筒末端可选择安装匹配电阻，该电阻由 12 根水电阻按辐射状均匀分布构成。

锥形传输线连接脉冲源和 GIS 母线筒，其波阻抗计算如下：

$$Z = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln \frac{\tan(\frac{\theta_2}{2})}{\tan(\frac{\theta_1}{2})} \quad (1)$$

式中： θ_2 和 θ_1 分别为锥形传输线外壳和内导体的锥角； μ 为磁导率； ε 为介电常数。锥形传输线的波阻抗应与 GIS 母线筒一致，以避免在两者的连接处发生折反射而产生波形过于复杂的脉冲。

对应于不同的脉冲源，标定用电阻分压器应保证在相应的频带范围内满足测量精度的要求，另外对于高电压陡脉冲源，标定用电阻分压器除必须有足够快的响应外，还应在高电压下稳定工作。

电容传感器的标定试验将分别在低电压陡脉冲、高电压陡脉冲以及低电压长波尾脉冲 3 种波形下进行，在每种激励电压波形作用下分别对比华北电力大学、清华大学的电容传感器和标定用电阻分压器的测量波形，并分析电容分压器的分压比、上升时间和重复性，以确保电容传感器在测量准确度、频率特性和稳定性方面满足特高压 GIS 设备 VFTO 测量的要求。

2 标定系统的研制

2.1 标定用脉冲源

2.1.1 低电压陡脉冲源

本文研制了低电压陡脉冲源,用于标定电容传感器的高频性能,其原理如图2所示。直流电源通过充电电阻 R_1 、 R_2 对 1 nF 电容器充电,火花间隙 K 动作后,电容器对与之相连的负载(此处为锥形传输线、GIS 母线筒及匹配电阻)放电得到所需的陡脉冲,其幅值约数十 kV ,为区别于幅值数百 kV 的陡脉冲源,称之为低电压陡脉冲源。

当 GIS 母线筒末端匹配时,低电压陡脉冲源的输出电压波形如图 3(a)所示(使用水电阻分压器测

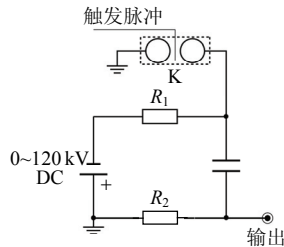
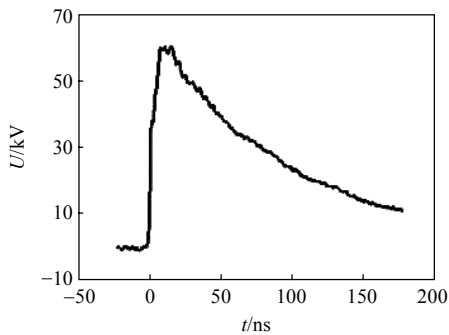
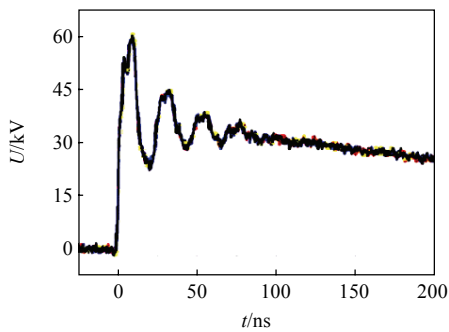


图2 低电压陡脉冲源电路图

Fig. 2 Schematic diagram of the low voltage steep impulse generator



(a) GIS 母线筒末端匹配时输出的电压波形



(b) 低电压陡脉冲源的输出波形(5次重复)

图3 低电压陡脉冲源的输出电压特性

Fig. 3 Output characteristics of the low voltage steep impulse generator

量),此时波形近似为双指数波;当 GIS 母线筒末端电阻为 $340\ \Omega$ (不匹配)时,典型输出波形如图 3(b)所示,该波形近似为振荡衰减的指数波。采用振荡衰减的指数波进行标定有利于控制实验条件的一致性并简化实验方法,因此在本文的标定工作中,全部采用此波形。图 3(b)中重叠显示了连续 5 次试验所测得的电压波形,可知低电压陡脉冲源的输出具有良好的重复性,它的参数指标如表 1 所示。

表1 低电压陡脉冲源的性能参数

Tab. 1 Parameters of the low voltage steep impulse generator

上升沿/ns	半高宽/ns	峰值
<5	70~80	GIS 母线筒末端开路时 可输出幅值 90 kV 左右的脉冲

2.1.2 高电压陡脉冲源

本文采用高电压陡脉冲源检验电容传感器在较高电压下的性能,该电源原理为:标称电压 $600\ \text{kV}$ 的 MARX 发生器经调波电感对中储电容充电,经 SF_6 气体间隙陡化,最终通过锥形传输线施加在 GIS 母线筒上。

高电压陡脉冲源输出的典型波形如图 4 所示(使用水电阻分压器测量),此脉冲的幅值约为 $350\ \text{kV}$ 。图 4 中的波形为高电压陡脉冲源 5 次重复性试验波形的重叠,可知高电压陡脉冲源的输出具有良好的重复性。

在标定用的工况下,高电压陡脉冲源的性能指标如表 2 所示。

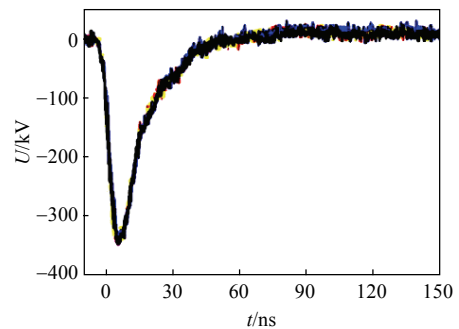


图4 高电压陡脉冲源输出波形(5次重复)

Fig. 4 Output waveforms of the high voltage steep impulse generator(5 shots)

表2 高电压陡脉冲源的性能参数

Tab. 2 Parameters of the high voltage steep impulse generator

上升沿/ns	半高宽/ns	峰值/kV
4~7	14~17	200~350

2.1.3 低电压长波尾脉冲源

采用低电压长波尾脉冲源标定电容传感器的低频性能，该电源原理如图 5 所示。工频高压通过整流硅堆对约 1 μF 的脉冲电容器充电，当充电电压达到气体开关的自击穿电压时，电容通过自击穿气体开关对负载放电，形成的指数衰减波表示如下：

$$u_1(t) = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2)$$

$$\tau = R_0 C_0 \quad (3)$$

式中：U₀ 为电容器充电电压；R₀ 为电阻分压器并联 GIS 母线筒终端匹配电阻；C₀ 为脉冲电容器容量；τ 为衰减时间常数。该指数衰减波的半高宽为 0.693τ。

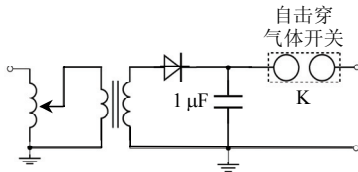


图 5 低电压长波尾脉冲源原理图

Fig. 5 Schematic diagram of the low voltage and long tail impulse generator

当 GIS 母线筒末端电阻值为 340 Ω 时，低压长波尾脉冲源的典型输出波形如图 6 所示(使用金属膜电阻分压器测量)，此时波形半高宽约为 200 μs，与计算基本一致。另外，试验结果显示低电压长波尾脉冲源也具有良好的重复性。

低电压长波尾脉冲源的性能指标如表 3 所示。

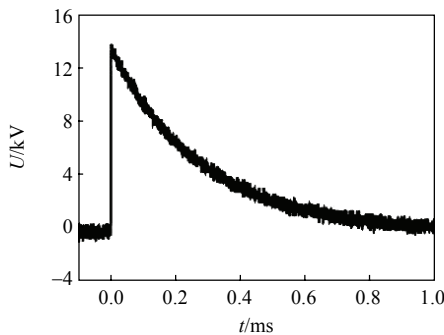


图 6 低电压长波尾脉冲源的输出电压波形

Fig. 6 Output waveform of the low voltage long impulse generator

表 3 低电压长波尾脉冲源的性能参数

Tab. 3 Parameters of the low voltage long impulse generator

上升沿/ns	半高宽/μs	峰值/kV
<30	40~200	15

2.2 标定用测量系统

2.2.1 水电阻分压器

水电阻分压器具有阻值可调范围宽、热容量大和响应快等优点，经常用于测量高电压纳秒脉冲。为标定电容传感器的高频性能，本文采用高、低电压陡脉冲源作为信号源，两者的上升沿均为数 ns，在此情况下水电阻分压器被用作比对的基准。

如图 7 所示，该水电阻分压器是一个同轴结构的 2 级分压器。第 1 级分压由被金属电极分割开的作为高、低压臂的水柱(NH₃Cl 溶液)构成，其理论分压比仅与高、低压臂的长度比有关，而与高、低压臂的具体阻值无关。水电阻分压器的总阻值可根据需要调节 NH₃Cl 溶液的电导率来调整。第 2 级分压由金属膜电阻构成，电缆首、末两端均匹配。

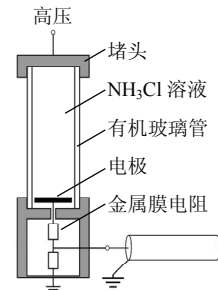


图 7 水电阻分压器

Fig. 7 Water resistance divider

在高频下水电阻的阻值会随频率而变化，为确保水电阻分压器的性能，必须使电磁波在水中的趋肤深度大于分压器水柱的半径。趋肤深度 d 计算^[18]如下：

$$d = \frac{1}{\omega \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{\gamma^2}{\omega^2 \epsilon^2}} - 1 \right)}} \quad (4)$$

式中：ω 为电磁波角频率；γ 为电导率。按照 γ=1.8 S/m，ω=2π×10⁸ rad/s 计算，d 约为 4.2 cm，大于分压器水柱半径 1 cm，因此是满足要求的。

采用上升沿约 3 ns、宽度为 100 ns、幅值数十至数百 V 的方波信号对水电阻分压器进行了方波试验。试验回路如图 8 所示，方波信号通过功分器分为两路，分别通过同轴衰减器(频带范围 0~4 GHz)和水电阻分压器分压，由示波器(Tektronix，模拟带宽 500 MHz)测量。方波响应试验结果如图 9 所示，水电阻分压器测得的波形与同轴衰减器的基本重合，上升沿约为 2.8 ns。即使假定方波是完全理想

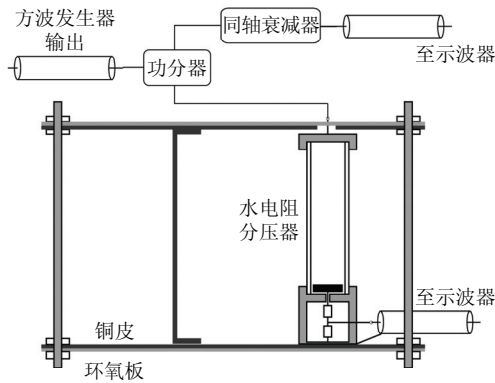


图8 水电阻分压器方波试验回路

Fig. 8 Experimental setup for step response test of the water resistance divider

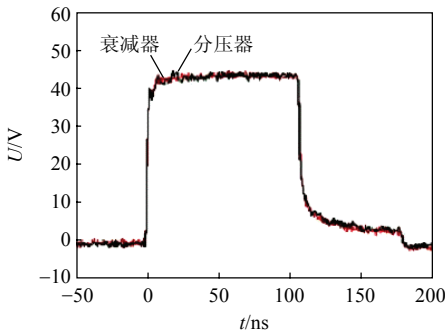


图9 水电阻分压器方波试验结果

Fig. 9 Experimental result of the step response test

的,水电阻分压器测量方波的上升沿也小于 3 ns,因此满足高频信号的测试要求。

采用低电压陡脉冲源对水电阻分压器进行了线性度试验。在 GIS 母线筒末端匹配的情况下,改变低电压陡脉冲源的充电电压,使用水电阻分压器测量了低电压陡脉冲源输出的电压波形和幅值。图 10 为充电电压为 1~60 kV 变化的情况下,水电阻分压器输出的电压峰值与低电压陡脉冲源充电电压的

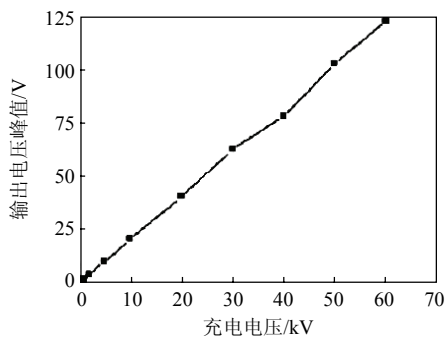


图10 水电阻分压器线性度试验结果

Fig. 10 Experimental result of linearity test of the water resistance divider

关系。试验结果表明,随着充电电压的升高,水电阻分压器测得的电压波形基本不变,测得的电压峰值随充电电压基本保持线性关系,故认为水电阻分压器的线性度良好。

2.2.2 金属膜电阻分压器

由于水电阻分压器通常仅用于短脉冲测量,在低电压长波尾脉冲的情况下采用金属膜电阻分压器替代水电阻分压器。金属膜电阻分压器具有很好的低频响应特性,能够测试从工频到兆赫兹级的电压信号,其缺点是热容量有限。

本文研制的金属膜电阻分压器结构如图 11 所示,由 2 只同轴圆柱结构的金属膜电阻连接而成。

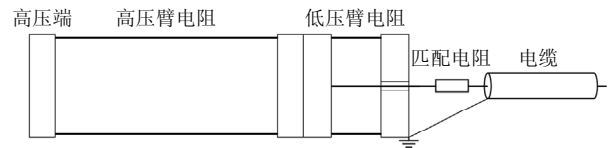


图11 金属膜电阻分压器的结构

Fig. 11 Structure of the metal film resistance divider

对电容传感器进行低频响应标定所使用的低电压长波尾波形包含几千赫兹到上百千赫兹的频率分量,为保证在此条件下作为基准使用的金属膜电阻分压器能准确测量,需对其进行频率特性的测试。测试使用的信号发生器可输出峰峰值 0~20 V,频率 1 Hz~80 MHz 的正弦波电压。图 12 示出了金属膜电阻分压器分压比随频率变化的关系,在直流及 50 Hz~5 MHz 范围内,金属电阻分压器的分压比在 ±10% 的范围内(虚线所示的范围)有较小浮动,可以满足低电压长波尾标定时对频带宽度的要求。

为确认金属膜电阻分压器的线性度,采用低电压陡脉冲源,在 GIS 筒末端电阻阻值约 900 Ω 的情

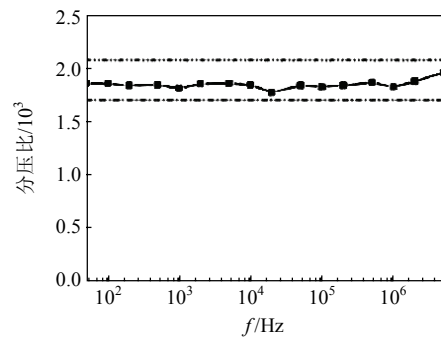


图12 金属膜电阻分压器的频率特性

Fig. 12 Frequency characteristic of the metal film resistance divider

况下，在 2~20 kV 范围内改变低电压陡脉冲源的充电电压，测量了金属膜电阻分压器的输出信号。试验得到图 13 所示的金属膜电阻分压器输出电压峰值与充电电压的关系，可知二者具有良好的线性特性。

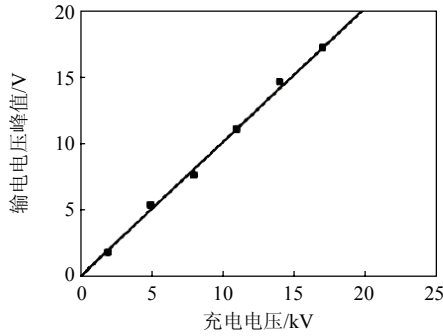


图 13 金属膜电阻分压器线性度试验的结果

Fig. 13 Experimental result of linearity test of the metal film resistance divider

采用低电压长波尾脉冲源，通过观察金属膜电阻分压器和电容传感器两者输出的吻合情况，由此判断电容传感器的低频特性。

采用电容传感器测量低电压长波尾脉冲的电路原理如图 14 所示。

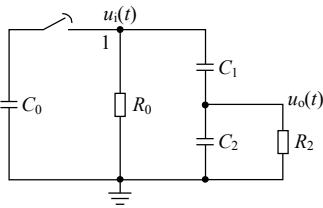


图 14 利用电容传感器测量低电压长波尾脉冲波形的电路原理

Fig. 14 Schematic diagram of measurement system based on capacitive sensor for low voltage long impulse

图 14 中： C_1 为电容传感器高压臂； C_2 为电容传感器低压臂； R_2 为示波器输入阻抗。则测量系统的幅频特性为

$$H(\omega) = \frac{U_o(\omega)}{U_i(\omega)} = \frac{\frac{1}{j\omega C_2} R_2}{\frac{R_2}{j\omega C_2} + \frac{1}{j\omega C_1} (\frac{1}{j\omega C_2} + R_2)} \quad (5)$$

令 $|H(\omega')| = (\sqrt{2}/2) \times H(\omega)|_{\omega \rightarrow \infty}$ ，可求出测量系统的下限频率 ω' 为

$$\omega' = \frac{1}{R_2(C_1 + C_2)} \quad (6)$$

另一方面，利用拉普拉斯变换可求出施加衰减指数波时，电容传感器的输出 $u_o(t)$ 为

$$u_o(t) = L^{-1} [L(U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}) \frac{\frac{1}{sC_2} R_2}{\frac{R_2}{sC_2} + \frac{1}{sC_1} (\frac{1}{sC_2} + R_2)}] = \frac{U_0 C_1 R_2}{(C_1 + C_2) R_2 - \tau} [e^{-\frac{t}{\tau}} - \frac{\tau}{(C_1 + C_2) R_2} e^{-\frac{t}{(C_1 + C_2) R_2}}] \quad (7)$$

在 $(C_1 + C_2) R_2 \gg \tau$ 的情况下，式(7)可简化为

$$u_o(t) = \frac{U_0 C_1}{(C_1 + C_2)} \times [e^{-\frac{t}{\tau}} - \frac{\tau}{(C_1 + C_2) R_2} e^{-\frac{t}{(C_1 + C_2) R_2}}] \quad (8)$$

在示波器输入电阻为无穷大的理想情况下，测量系统的输出应为

$$u'_o(t) = \frac{U_0 C_1}{(C_1 + C_2)} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (9)$$

故实际情况与理想情况下的相对偏差为

$$\delta = \frac{u_o(t) - u'_o(t)}{u'_o(t)} = \frac{-\tau}{(C_1 + C_2) R_2} e^{-\frac{1}{(C_1 + C_2) R_2} \frac{1}{\tau} t} \quad (10)$$

在 $(C_1 + C_2) R_2 \gg \tau$ 的情况下，式(10)可简化为

$$\delta = \frac{-\tau}{(C_1 + C_2) R_2} e^{\frac{t}{\tau}} \quad (11)$$

若以波形幅值等于峰值一半处作检测点，则 $t = 0.693\tau$ ，此处的相对偏差为

$$\delta = -2\omega'\tau \quad (12)$$

因此，在标定波形的半峰值处，利用测量系统输出与基准分压器测量系统的输出之差，可估算其下限截止频率：

$$f' = \frac{\omega'}{2\pi} = \frac{-\delta}{4\pi} \quad (13)$$

3 电容传感器的标定

3.1 概述

分别对华北电力大学、清华大学研制的各 2 个批次、总共 20 只电容传感器在低电压陡脉冲、高电压陡脉冲以及低电压长波尾脉冲 3 种波形下进行了标定。分别从波形、分压比、上升时间和重复性 4 个方面对数据进行了分析。

在高、低电压陡脉冲情况下的标定，华北电力大学和清华大学的电容传感器的标定结果基本一致，以下仅分析介绍一组典型结果。在低电压长波尾脉冲情况下的标定，仅分析介绍华北电力大学一典型电容传感器的标定结果，清华大学的电容传感

器设计只测量 VFTO 高频分量, 测量系统通过采用阻抗变换器以提升低频特性, 详细内容不在此介绍。

3.2 低电压陡脉冲测试结果及分析

如图 15 所示, 低电压陡脉冲源充电电压为 60 kV 时, 其输出脉冲幅值约为 90 kV, 在此情况下清华大学的 5 号电容传感器和水电阻分压器测得的波形具有较好的一致性, 电容传感器测得的波形上升时间略小于水电阻分压器。充电电压为 40 和 20 kV 时的测试结果与 60 kV 时的情况基本一致。

图 16 为根据多次实验结果计算出的清华大学 5

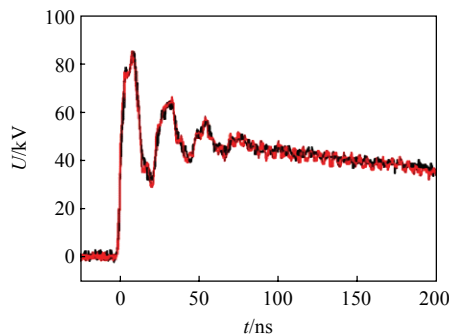
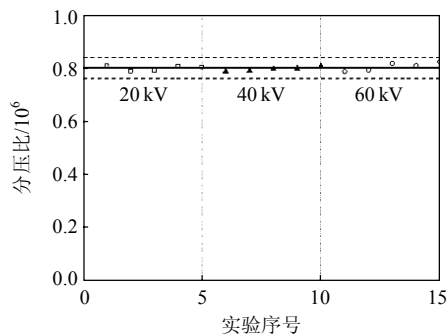
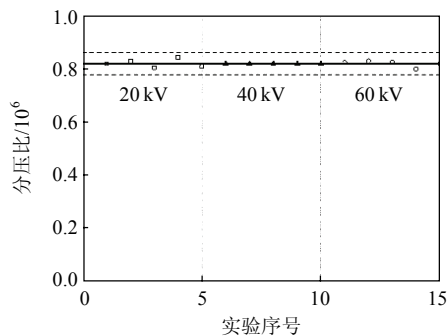


图 15 5 号电容传感器与水电阻分压器的波形对比(充电电压 60 kV)

Fig. 15 Comparison of waveforms measured by 5# capacitive sensor and the water resistance divider (charging voltage is 60 kV)



(a) 电容传感器波头分压比



(b) 电容传感器波尾分压比

图 16 5 号电容传感器波头与波尾分压比

Fig. 16 Voltage ratio of 5# capacitive sensor

号电容传感器的波头段与波尾段分压比, 由图可知, 该电容传感器的波头平均分压比为 801 500, 变化范围小于 2.9%, 波尾平均分压比为 820 700, 变化范围小于 3%。

表 4 为低电压陡脉冲电压的测量结果比较, 清华大学 5 号电容传感器 5 次试验测得的波形平均上升时间为 3.4 ns, 而水电阻分压器的相应值为 3.9 ns, 两者基本一致。根据电容传感器测得的上升时间, 可估算其高频截止频率高于 100 MHz。

表 4 5 号电容传感器与水电阻分压器 5 次试验所得上升时间比较(充电电压 60 kV)

Tab. 4 Comparison of risetime measured by 5# capacitive sensor and the water resistance divider (charging voltage is 60 kV, 5 shots)

数据编号	水电阻分压器上升时间/ns	电容传感器上升时间/ns
20	4.14	3.48
21	3.70	3.20
22	3.78	3.35
23	3.98	3.54
24	3.96	3.45

图 17 为充电电压 60 kV 的情况下, 清华大学的 5 号电容传感器 5 次试验测得的电压波形, 由图 17 可知重复性较好。

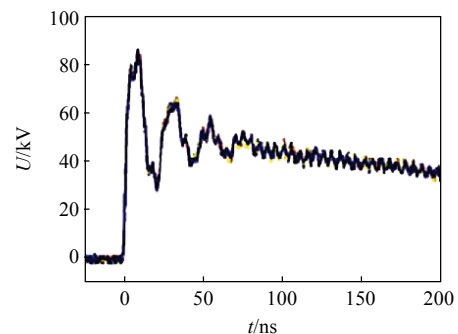


图 17 5 号电容传感器 5 次重复性试验

Fig. 17 Repeatability of 5# capacitive sensor in 5 shots

采用低电压陡脉冲源(充电电压分别 60、40 和 20 kV), 对 2 所大学的电容传感器逐个进行了标定, 结果表明均可满足快前沿低电压陡脉冲的测量要求, 且具有良好的稳定性。

3.3 高电压陡脉冲测试结果及分析

图 18 为 350 kV 高压陡脉冲电压的测量结果比较, 清华大学的 5 号电容传感器和水电阻分压器测得的波形基本吻合。

图 19 为根据多次实验结果计算出的清华 5 号

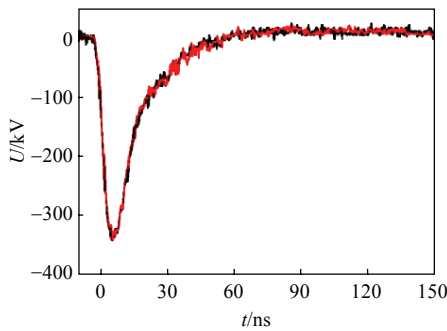


图 18 5 号电容传感器与水电阻分压器的高电压陡脉冲波形对比(电压 350 kV)

Fig. 18 Comparison of waveforms measured by 5# capacitive sensor and the water resistance divider under high voltage steep impulses (350 kV)

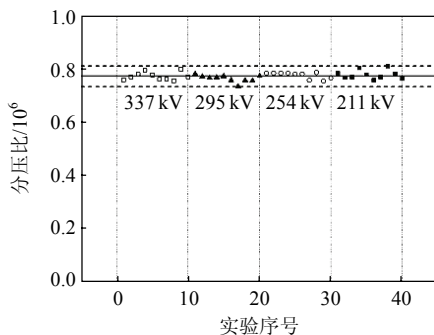


图 19 5 号电容传感器在高电压陡脉冲下的分压比

Fig. 19 Voltage ratio of 5# capacitive sensor under high voltage steep impulses

电容传感器在各电压下的分压比(每电压进行 10 次试验), 由图 19 可知, 其平均分压比为 804 200, 各电压下平均分压比变化范围小于 4.3%, 可见其分压比是比较稳定的。

表 5 为在 350 kV 的高压陡脉冲作用下, 清华大学在 350 kV 高电压陡脉冲的作用下 5 号电容传感器与水电阻分压器 10 次试验所得的上升时间及半高宽的对比

Tab. 5 Comparison of risetime and full width half maximum measured by 5# capacitive sensor and the water resistance divider (350 kV, 10 shots)

数据编号	水电阻分压器	电容传感器	水电阻分压器	电容传感器
	上升时间/ns	上升时间/ns	半高宽/ns	半高宽/ns
1	4.54	4.67	13.95	13.94
2	5.96	5.82	13.95	13.94
3	5.69	5.32	13.58	13.94
4	5.00	5.10	13.38	14.59
5	4.76	4.45	13.15	14.31
6	4.56	5.11	13.80	14.28
7	4.73	4.86	13.21	14.14
8	4.52	4.87	13.21	14.48
9	5.10	4.66	11.71	13.52
10	4.78	5.35	13.47	13.66

学的 5 号电容传感器测得的波形上升时间、半高宽与水电阻分压器的对比。由表 5 可知, 不论是上升时间还是半高宽, 两者都基本一致。

在高电压陡脉冲的作用下, 华北电力大学的电容传感器的标定结果与清华大学的类似, 也满足特高压 GIS 设备 VFTO 测量的需要。

3.4 低电压长波尾波形测试结果及分析

图 20 为低电压长波尾脉冲电压的测量结果比较, 华北电力大学的 1 号电容传感器和金属膜电阻分压器测得的波形具有较好的一致性, 该电容传感器测得的脉冲半高宽和金属膜电阻分压器基本一致。

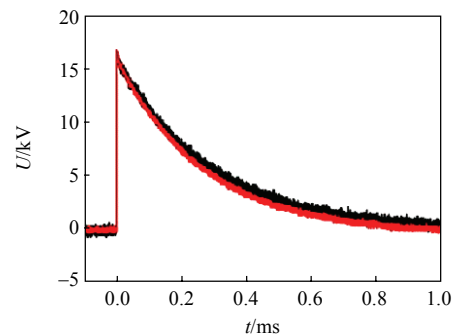


图 20 1 号电容传感器与金属膜电阻分压器波形对比

Fig. 20 Comparison of waveforms measured by 1# capacitive sensor and the water resistance divider

表 6 为华北电力大学 1 号电容传感器与金属膜电阻分压器试验测得的半高宽, 可知在低电压长波尾脉冲作用下, 1 号电容传感器测得的脉冲半高宽, 各次试验值基本稳定, 平均分压比为 305 000。利用式(13)对该传感器的低频截至频率进行估计, 其低频截止频率低于 20 Hz。

清华大学研制的电容传感器具有比较小的低压臂电容, 在低电压长波尾脉冲作用下, 其半高宽

表 6 1 号电容传感器与金属膜电阻分压器 5 次试验所得半高宽

Tab. 6 Comparison of full width half maximum measured by 1# capacitive sensor and the water resistor divider (5 shots)

数据编号	电容传感器的	电阻分压器测得的	电容传感器测得的
	分压比	半高宽/ μ s	半高宽/ μ s
255	300 000	182.40	189.10
256	300 000	188.60	181.70
257	320 000	179.30	178.60
258	300 000	184.02	183.00
259	305 000	193.00	183.00

明显小于电阻分压器所测得的值,电容传感器自身的低频截止频率较高,但采用运算放大器进行阻抗转换后,其低频特性得到大幅度改善。

4 结论

1) 提出了采用不同波形不同电压幅值的3种脉冲源作为信号源,以电阻分压器作为比对基准对电容传感器进行标定的方法。研制的标定装置中低电压陡脉冲电源的输出脉冲上升沿小于5 ns,最大电压幅值为90 kV;高电压陡脉冲电源的输出脉冲上升沿在4~7 ns范围,最大电压幅值达到350 kV;低电压长波尾脉冲源的幅值为15 kV,半高宽在40~200 μ s范围可调。研制的水电阻分压器的方波响应上升时间小于3 ns,金属膜电阻分压器在0~5 MHz频带范围内分压比稳定。

2) 对华北电力大学和清华大学的电容传感器进行的标定试验表明,2所大学研制的电容传感器在高低电压和高低频信号测试时性能良好,频带宽度优于20 Hz~100 MHz,能满足特高压GIS中VFTO测量的要求。

参考文献

- [1] Meppelink J, Diederich K, Feser K, et al. Very fast transients in GIS[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1989, 4(1): 223-233.
- [2] 郭洁, 刘振, 赵丹丹, 等. 750 kV GIS中运行方式对快速暂态过电压的影响[J]. 电网技术, 2008, 32(增刊2): 233-235.
Guo Jie, Liu Zhen, Zhao Dandan, et al. Influence of operation modes to very fast transient voltage in 750 kV GIS[J]. Power System Technology, 2008, 32(S2): 233-235(in Chinese).
- [3] 尹晓芳, 于力, 刘广维. 封闭式组合电器隔离开关产生的过电压[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 111-114.
Yin Xiaofang, Yu Li, Liu Guangwei. Overvoltage from gas insulated switchgear disconnecter[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 111-114(in Chinese).
- [4] 史保壮, 李智敏, 张文元, 等. 超高压GIS中快速暂态过电压造成危害的原因分析[J]. 电网技术, 1998, 22(1): 1-3.
Shi Baozhuang, Li Zhimin, Zhang Wenyan, et al. Analysis of the reason why VFTO may endanger GIS above 300kV[J]. Power System Technology, 1998, 22(1): 1-3(in Chinese).
- [5] 邵冲, 杨钰, 王赞基. GIS开关电弧建模及其对VFTO波形的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 200-205.
Shao Chong, Yang Yu, Wang Zanji. Modeling of GIS switching arc and its effect on VFTO waveforms[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 200-205(in Chinese).
- [6] 卢铁兵, 崔翔. 变电站空载母线波过程的数值分析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 39-42.
Lu Tiebing, Cui Xiang. Numerical analysis of wave processes for buses without load in substations using FDTD[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 39-42(in Chinese).
- [7] 林莘, 李爽, 徐建源, 等. 考虑GIS外壳传输特性的VFTO计算模型[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 203-207.
Lin Xin, Li Shuang, Xu Jianyuan, et al. Calculation model of VFTO considering transmitting characteristics of GIS enclosure[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 203-207(in Chinese).
- [8] 马国明, 李成榕, 全江涛, 等. 采用套管传感器测量变压器线端快速暂态过电压的方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(33): 122-128.
Ma Guoming, Li Chengrong, Quan Jiangtao, et al. Measurement of VFTO on transformer entrance with transformer bushing sensor[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(33): 122-128(in Chinese).
- [9] 项祖涛, 刘卫东, 钱家骊, 等. 磁环抑制GIS中特快速暂态过电压的模拟试验和仿真[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 101-105.
Xiang Zutao, Liu Weidong, Qian Jiali, et al. Simulation test and computation of suppressing very fast transient overvoltage in GIS by magnetic rings[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 101-105(in Chinese).
- [10] Boggs S A, Fujimoto N. Techniques and instrumentation for measurement of transients in gas-insulated switchgear [J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1984, 19(2): 87-92.
- [11] Osmokrović P, Petković D, Marković O. Measuring probe for fast transients monitoring in gas insulated substation [J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 1997, 47(1): 36-44.
- [12] Kumar V V, Thomas J. Capacitive sensor for the measurement of VFTO in GIS[C]//Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering. London, UK: IEEE, 1999: 156-159.
- [13] 史保壮, 张文元, 邱毓昌. 测量气体绝缘变电站中快速暂态过电压的微积分方法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(5): 59-61, 29.
Shi Baozhuang, Zhang Wenyan, Qiu Yuchang. Differentiating/integrating system for the measurement of

- very fast transient overvoltages in GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(5): 59-61, 29(in Chinese).
- [14] 欧阳佳, 刘金亮, 田亮, 等. 纳秒级不同脉宽的信号对电容分压器的影响[J]. 高电压技术, 2004, 30(12): 42-44. Ouyang Jia, Liu Jinliang, Tian Liang, et al. Influence of different input signals with nanosecond pulsewidth on capacitive voltage divider[J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(12): 42-44(in Chinese).
- [15] 卫兵, 傅贞, 王玉娟, 等. 脉冲功率装置中电容分压器的设计和应用[J]. 高电压技术, 2007, 33(12): 39-43. Wei Bing, Fu Zhen, Wang Yujuan, et al. Design and performance of capacitive divider for high-voltage pulse measurement[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(12): 39-43(in Chinese).
- [16] Seeger M, Behrmann G, Coric B, et al. Application of electrical field sensors in GIS for measuring high voltage signals over the frequency range 10 Hz to 100 MHz[C]// Eleventh International Symposium on High Voltage Engineering. London, UK: IEEE, 1999: 292-296.
- [17] 任稳柱, 冯建华, 葛震, 等. 800 kV 标准冲击电压测量系统及其不确定度的评定[J]. 计量学报, 2008, 29(2): 153-158.
- Ren Wenzhu, Feng Jianhua, Ge Zhen, et al. 800 kV standard impulse voltage measuring system and the uncertainty of evaluation[J]. Acta Metrologica Sinica, 2008, 29(2): 153-158(in Chinese).
- [18] 冯慈璋. 电磁场[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 1988: 139-142.
- Feng Cizhang. Electromagnetics[M]. 2nd ed.. Beijing: Higher Education Press, 1988: 139-142(in Chinese).



丁卫东

收稿日期: 2011-06-28。

作者简介:

丁卫东(1976), 男, 博士, 副教授, 研究方向为高电压与绝缘技术及脉冲功率技术, wdding@mail.xjtu.edu.cn;

李峰(1986), 男, 硕士研究生, 研究方向为高电压与绝缘技术。

(编辑 胡琳琳)