

气体绝缘开关设备中特快速瞬态过电压的全过程测量方法

岳功昌¹, 刘卫东¹, 陈维江², 关永刚¹, 李志兵³, 王浩³

- (1. 电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084;
2. 国家电网公司, 北京市 西城区 100031; 3. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

Measurement Methods of Very Fast Transient Overvoltage in Gas Insulated Switchgear With Complete Process

YUE Gongchang¹, LIU Weidong¹, CHEN Weijiang², GUAN Yonggang¹, LI Zhibing³, WANG Hao³

- (1. State Key Lab of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments (Department of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China; 2. State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China; 3. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: In the design and operation of ultra high voltage (UHV) and extra high voltage (EHV) gas insulated switchgear (GIS), there is a big concern on the very fast transient overvoltages (VFTO). Experimental investigations are necessary for the full understanding of the VFTO in UHV and EHV GIS. Research was performed in this paper on VFTO measurement method. VFTO includes not only the very fast transient components, but also power frequency component and quasi-DC component (residual voltage in the floating busbar). Also, the VFTO in different GIS positions have significant different waveforms depending on the propagation and superimposition of travelling waves in GIS. Therefore, the whole process measurement of VFTO, including two aspects of the full time processes and the site distributions in GIS, is required. Based on the port-hole capacitive sensor and an impedance converting circuit, wide frequency band measurement of VFTO was realized; the measurement systems with frequency band of 0.003 Hz~100 MHz and recording time of 200 ms were developed. Synchronous measurement of VFTO in different sites of GIS was performed using several such measurement systems simultaneously; and the synchronous triggering was realized by using the electromagnetic radiation signal generated during the switching operation of the

GIS disconnecter.

KEY WORDS: ultra high voltage (UHV); gas insulated switchgear (GIS); very fast transient overvoltages (VFTO); capacitive sensor; impedance match; impedance converting

摘要: 特快速瞬态过电压(very fast transient overvoltages, VFTO)是超/特高压气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)设计和运行中十分关心的问题, 试验研究VFTO的特性是非常必要的。VFTO包含特快速瞬态分量、工频分量和准直流分量(空载母线残余电荷电压), 其中VFTO的瞬态分量在GIS中以电压波的形式传播, 致使不同位置的VFTO波形具有显著差异。因此, 试验研究VFTO的关键是对VFTO时间过程和空间分布的全过程测量。研究了VFTO测量方法, 采用手孔式电容传感器与阻抗变换器相结合的方法实现了全过程测量, 研制出测量频带为0.003 Hz~100 MHz和波形记录时间为200 ms的测量系统; 采用多个测量系统, 并基于隔离开关触头间隙击穿时的电磁波辐射信号, 研制出了同步触发装置, 实现了对GIS上不同位置的VFTO空间分布的测量。

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; 阻抗匹配; 阻抗变换

0 引言

气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)中隔离开关切合空载短母线时, 开关触头间隙会发生多次重复击穿, 产生特快速瞬态过电压(very fast transient overvoltages, VFTO)^[1-5]。在超高压系

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 SGCC (SGKJJSKF[2009]776).

统中，曾发生过隔离开关操作引起的设备故障^[6-7]，特高压系统中 VFTO 问题更加突出，因此开展 GIS 中 VFTO 特性的研究是非常必要的。

研究 VFTO 特性包括仿真计算和测量 2 种方法。由于仿真计算模型精度受到限制，实际测量就尤为重要。VFTO 为连续多次击穿过程，波形包含瞬态高频、工频和残余电荷电压(准直流)分量，且重复击穿过程持续时间长，因此要揭示 VFTO 波形特征及其参量，就需要全过程测量，准确记录 VFTO 的全过程波形。高频瞬态波在 GIS 腔体中传播时，由于衰减和折反射，在空间不同位置 VFTO 瞬态波形具有较大的差异，为了掌握 GIS 中 VFTO 的分布规律，有必要开展 VFTO 的多点同步测量研究。而这些方面的研究目前都未见报道。

国内外曾经对超高压系统 GIS 中 VFTO 的测量方法和装置开展了大量研究，研制了电容传感器测量系统，应用于实验室和现场实测。这些测量大多采用 2 套装置，一套用于测量工频和阶梯波，另一套用于测量高频瞬态波形。每次试验，仅记录一次击穿的高频瞬态过程，并认为每次击穿的高频瞬态波形具有相似性，根据击穿电压幅值线性推演出其他击穿的高频瞬态波形。这一方面是由于当时示波器可记录波形长度有限，不能在高采样率下记录 VFTO 全过程的波形，另一方面，开发的传感器的低频特性不能满足全过程测量的要求。

加拿大研制的测量频率范围分别为 1 Hz~100 MHz 和 100 kHz~500 MHz 的 2 种手孔式电容传感器测量系统，只记录 GIS 隔离开关操作中某一次击穿的 VFTO 波形，不能准确反映多次击穿的全过程，致使 VFTO 测量结果的精度较低。

为配合国家电网公司开展的特高压 GIS 设备的 VFTO 实测及仿真研究工作，全面掌握 VFTO 特性，本文对 VFTO 波形特征及其对测量系统的要求进行分析，研究了基于手孔式电容传感器和高频阻抗变换器相结合的 GIS 中，单点 VFTO 全过程的测量方法和装置，研制适用于 VFTO 多点测量的同步触发装置，有效地解决了 VFTO 测量中的电磁干扰问题，实现了 VFTO 单点全过程和多点同步的准确测量。

1 VFTO 波形特点和测量要求

图 1 为 GIS 隔离开关 DS 切合空载短母线发生触头间隙重复击穿产生 VFTO 的电路原理图，下文

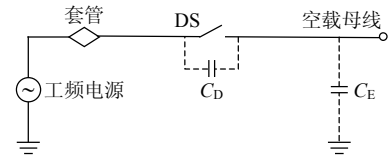


图 1 隔离开关切合空载短母线电路图

Fig. 1 Circuit for a disconnector to switch an unloaded busbar

以 DS 一次分闸操作为例，说明触头间隙重复击穿产生 VFTO 的过程。

在 DS 分闸过程中，当 DS 触头分离后，空载母线处于悬浮电位状态，空载母线电压为残余电压和工频感应电压的叠加，残余电压取决于空载母线上的残余电荷，为直流量；工频感应电压取决于开关触头间隙电容 C_D 和空载母线对地电容 C_E 之间的分压。空载母线电压和工频电源电压之差，作用在触头间隙上，为 DS 触头间隙的恢复电压。当触头开距不够大，触头间隙介质强度不足以承受恢复电压时，触头间隙击穿产生电弧，并在电路中产生特快速瞬态。当特快速瞬态衰减结束时，空载母线电压等于电源电压，触头间隙的电弧电流等于零时，电弧熄灭，空载母线回到悬浮电位状态，并留有残余电压，幅值等于电弧熄灭时刻的工频电源电压。电弧熄灭后，触头间隙重新出现恢复电压。如此，恢复电压、间隙击穿、特快速瞬态衰减和电弧熄灭交替进行，形成重复击穿过程。随着触头开距的增大，触头间隙介质强度增大，击穿电压也增大，当触头间隙介质强度增大到足以耐受恢复电压时，不再发生击穿，重复击穿过程结束。

图 2 为计算机仿真的 DS 分闸操作的重复击穿过程电压波形，其中：图 2(a)为 DS 的空载母线侧电压，也称负载侧电压；图 2(b)为 DS 的电源侧电压。重复击穿过程中，负载侧电压以击穿跳变的方式跟随电源电压变化，具有近似阶梯的形状，每个阶梯高度为击穿电压。

在重复击穿过程中，每次击穿产生一个特快速瞬态，在 DS 的负载侧，特快速瞬态叠加于阶梯波上，形成负载侧 VFTO；在 DS 的电源侧，特快速瞬态叠加于工频电压上，形成电源侧的 VFTO。图 3 为典型的 VFTO 波形^[8]，此暂态波形通常包含 3 个主要频率成分，分别为由 GIS 内部相邻部件的波反射形成的频率 f_1 、陡行波在 GIS 内部发展形成的特快速瞬态频率 f_2 和基本振荡频率 f_3 。这些波形的特

点主要取决于触头间隙击穿所产生的行波在GIS中的传播、折反射和叠加,频率分量在数 MHz 至 100 MHz 范围,波头上升时间在数 ns 量级。

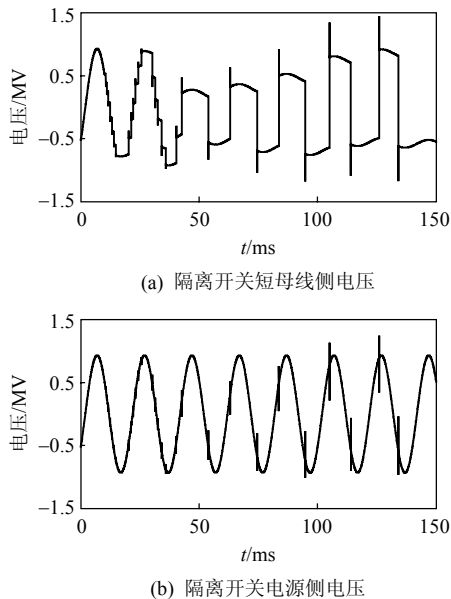


图2 隔离开关分闸操作重复击穿过程仿真波形

Fig. 2 Simulation of the repeated breakdown process in opening DS

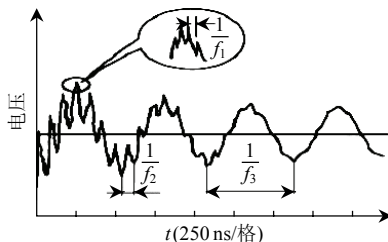


图3 VFTO 的特快速瞬态脉冲的典型波形

Fig. 3 Typical waveform of the very fast transient of VFTO

在重复击穿过程中,最高击穿电压为工频峰值,即空载母线残余电压为一个极性的工频峰值,电源电压为相反极性的工频峰值,此时出现最高幅值的 VFTO,严重场合可接近 $3 pu^{[5]}$ 。

重复击穿过程的持续时间决定于隔离开关的分合闸速度,另外还受隔离开关操作时的工频相位以及触头间隙击穿电压的分散性等随机因素影响,因而具有随机性。对于试验中所使用的 110 kV GIS 隔离开关,它的平均操动速度约为 0.55 m/s,重复击穿过程持续时间最长约为 150 ms。

根据上述 VFTO 的波形特点,得到 VFTO 测量的基本要求。

1) 分压比: 估计最大被测电压 $\pm 3 pu$, 考虑示

波器量程(50Ω 输入电阻),分压比为 10^6 量级;

2) 频率特性: 特快速瞬态测量要求测量系统的高频特性至少到 100 MHz,重复击穿过程测量要求测量系统低频特性满足对工频和阶梯波(准直流)的测量;

3) 记录时间: 完整记录重复击穿过程,约为 10 个工频周期(200 ms)。

2 手孔式电容传感器的研制

GIS 的 VFTO 测量传感器主要采用电容分压原理^[9-10]和基于 Pockels 效应的光学电场传感原理^[11-12]。采用电容分压原理的电容传感器大多利用电极和中心导体间的耦合电容作为高压臂电容,有手孔内置电极^[13-14]和盘式绝缘子预埋电极^[15-16]2 种方式,其中利用手孔内置电极的电容传感器具有较好的高频特性。根据文献[17],基于手孔式电容传感器的 VFTO 测量系统,高频特性达到了 1 GHz。

本文研究了一种手孔式电容传感器,结构如图 4 所示。在手孔内安置一个圆盘形电极,电极和高压母线之间的耦合电容构成电容传感器的高压臂,电极和接地的手孔盖板之间的耦合电容构成传感器的低压臂。

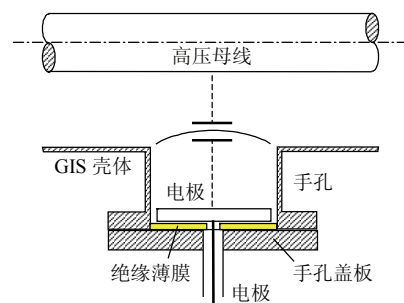


图4 手孔式电容传感器结构

Fig. 4 Structure of the porthole type capacitive sensor

在电容传感器设计中,首先需要选择手孔和电极直径,对此需要考虑以下影响因素。

1) 获得尽量大的低压臂电容。低压臂电容决定于电极直径、绝缘薄膜材料和薄膜厚度。增大低压臂电容有利于提高低压臂电路的时间常数,改传感器的低频特性。从增大低压臂电容的角度考虑,需要选择较大的电极直径。

2) 避免电极上的寄生振荡。当 VFTO 的行波经过与电极相对的高压母线时,如果电极尺寸较大,则在电极上感应出显著的波过程,产生寄生振荡。因此,电极直径的选择应使得行波经过母线时,

电极的不同位置基本处于等电位^[18]。设行波的波头上升时间为 4 ns，行波在 GIS 中的传播速度为真空中的光速 $c(\text{mm/ns})$ ，电极直径为 $D(\text{mm})$ ，如果要求在电极直径的距离下行波波头幅值的变化小于其总幅值的 10%，则有

$$D / 4c < 10\% \tag{1}$$

$$D < 120 \text{ mm} \tag{2}$$

3) 避免放电辐射干扰。隔离开关触头间隙击穿能够在 GIS 同轴管道中产生复杂模态的电磁波，高次模电磁波对 VFTO 测量产生干扰。试验显示，减小手孔直径能够降低高次模电磁波的干扰。

综合以上因素，设计选取电极直径为 110 mm，手孔直径为 134 mm。选择聚四氟乙烯薄膜作为电极和手孔盖板之间的绝缘介质，薄膜厚度为 100 μm 。以此参数制作 4 个电容传感器，它们的低压臂电容(20 $^{\circ}\text{C}$ 环境温度)如表 1 所示。取其中一个电容传感器进行温度稳定性试验，结果如图 5 所示，在 -30~70 $^{\circ}\text{C}$ 变化范围内，低压臂电容变化小于 3.5%。

表 1 电容传感器样品的低压臂电容

Tab. 1 Capacitances of low voltage arms of the capacitive sensors

样品	低压臂电容/nF	实际分压比
1	1.415	610 000
2	1.446	669 400
3	1.448	814 400
4	1.406	800 700

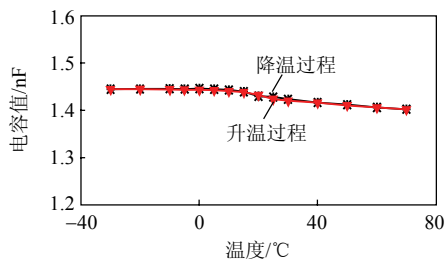


图 5 低压臂电容随温度变化关系

Fig. 5 Change of the low voltage arm capacitance with temperature

根据已确定的电容传感器分压比和低压臂电容，可以确定高压臂电容。给定 GIS 结构尺寸、手孔直径、电极直径和厚度，通过选择手孔深度，可以获得需要的高压臂电容。

借助静电场仿真，可以计算多导体系统导体间的耦合电容。根据需要的高压臂电容值，确定 GIS

手孔的设计尺寸。经过计算，得到手孔式电容传感器的结构设计：手孔直径为 134 mm；手孔深度为 120 mm；电极直径为 110 mm；电极厚度为 10 mm；低压臂电容为 1.4 nF；高压臂电容值为 0.001 598 pF；分压比为 8.76×10^5 。

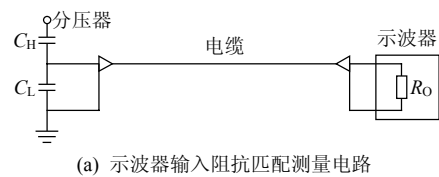
4 个电容传感器安装在 GIS 试验装置上后，实际得到的分压比如表 1 所示。每个电容传感器所处 GIS 位置的实际结构存在差别，因此它们的分压比和设计值存在一些差异。

3 阻抗匹配的 VFTO 测量

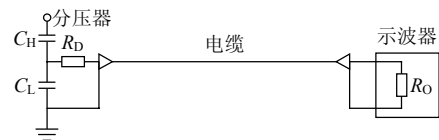
3.1 阻抗匹配方式的选择

VFTO 测量系统由电容传感器、信号电缆和示波器构成。测量系统的频率特性不仅取决于电容传感器特性，还与示波器特性和电缆匹配有关^[19]。

图 6 为阻抗匹配测量电路，图 6 所示为普遍使用的电缆匹配方式，图中： C_H 和 C_L 分别为电容传感器的高压臂和低压臂电容； R_D 为电缆首端匹配电阻； R_O 为示波器输入电阻。在特快速率脉冲测量中，广泛采用图 6(a)所示的示波器输入阻抗匹配的测量电路，其中示波器输入电阻 R_O 选择为 50 Ω ，和电缆波阻抗相同。这种测量电路具有很好的高频特性，但对低频特性有很大限制。在低频情况下，测量系统可简化为图 7 的等效电路，图中 U_{IN} 和 U_{OUT} 分别为测量系统的输入和输出，示波器输入电阻 R_O 与低压臂电容 C_L 并联。



(a) 示波器输入阻抗匹配测量电路



(b) 分压器端阻抗匹配测量电路

图 6 阻抗匹配测量电路

Fig. 6 Measurement circuit using impedance matching

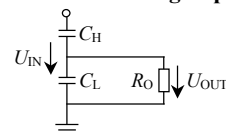


图 7 测量系统低频等效电路

Fig. 7 Low frequency equivalent circuit of the measurement circuit

图7电路的幅频特性和相频特性分别为

$$|H(j\omega)| = \frac{U_{OUT}}{U_{IN}} = \frac{C_H}{C_L} \frac{\omega R_0 C_L}{\sqrt{1 + \omega^2 R_0^2 C_L^2}} = \frac{C_H}{C_L} \frac{\omega \tau}{\sqrt{1 + \omega^2 \tau^2}} \quad (3)$$

$$\varphi(\omega) = \frac{\pi}{2} - \arctan(\omega R_0 C_L) = \frac{\pi}{2} - \arctan(\omega \tau) \quad (4)$$

式中 $\tau = R_0 C_L$ ，为低压臂电路的时间常数。式(3)具有高通滤波特性，当 $\omega^2 \tau^2 \gg 1$ 时，幅频特性近似为常数 C_L/C_H ，测量系统具有基本恒定的分压比；随着频率降低，分压比减小，当 $\omega \tau = 1$ 时，分压比减小 0.707 倍，对应的频率为测量系统的 3 dB 低频截止频率，有

$$f_{CUTOFF} = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (5)$$

可知，低压臂电路的时间常数 τ 越大，系统低频截止频率越低，低频特性越好。

当电容传感器低压臂电容为 1.4 nF，示波器输入电阻为 50 Ω 时，低压臂电路的时间常数约为 70 ns，低频截止频率约为 2.3 MHz，即使测量 VFTO 的特快速瞬态脉冲，此低频特性也不能很好地满足。

为了改善测量系统的低频特性，采用了图 6(b) 所示的传感器端阻抗匹配测量电路^[20]，示波器为高阻输入 ($R_0 = 1 \text{ M}\Omega$)，电容传感器经过匹配电阻 R_D 与电缆连接。在此匹配方式下，低压臂电路的时间常数约为 1.4 ms，低频截止频率约为 114 Hz，低频特性能够满足 VFTO 的特快速瞬态脉冲的测量，但仍不能满足工频和阶梯波的测量。

传感器端的阻抗匹配不是完全的匹配，匹配效果取决于低压臂电容、电缆长度和匹配电阻等电路参数。以下通过试验研究传感器端阻抗匹配测量电路的匹配效果和高频特性。

3.2 测量系统高频特性试验

为了研究测量系统的高频特性，建立了图 8 所示的试验电路，用理论波形和测量波形进行对比。

采用一段 252 kV GIS 短母线(长度为 1.5 m，外导体内径为 0.32 m，内导体直径为 0.1 m)，在其端部 A 的内、外导体之间设置一个 SF₆ 放电间隙。通过充电电路给内导体充以直流电压，升高电压直至 SF₆ 间隙击穿，产生陡的行波，在短母线上往返反射，形成特快速瞬态。根据行波理论，理想状况下，母线端部 B 的特快速瞬态电压为周期方波，幅值是 SF₆ 间隙击穿电压的 2 倍，周期是行波在短母线上

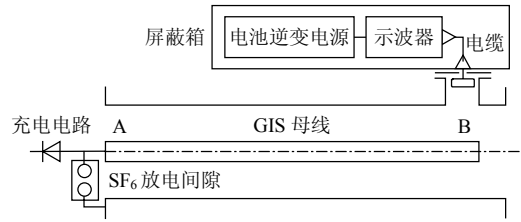


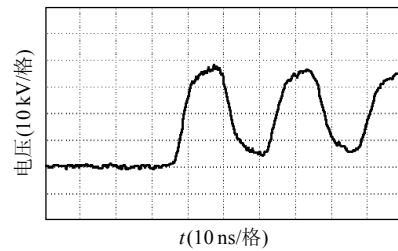
图8 电容传感器测量系统试验检验电路

Fig. 8 Circuit for testing the measurement system based on capacitive sensor

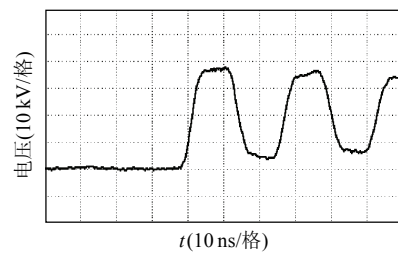
单个行程时间的 4 倍。在短母线端部 B 放置电容传感器，通过对比测量波形和理论波形，来检验测量系统。

测量采用横河 DLM2054 示波器，模拟带宽为 500 MHz，采样率为 2.5 GS/s，单通道记录长度为 125 MS，输入电阻 50 Ω 或 1 M Ω 。为了消除放电干扰，示波器放置在屏蔽箱内，并采用电池逆变供电。试验中 SF₆ 间隙的击穿电压约为 20 kV，得到的瞬态方波幅值约为 40 kV。

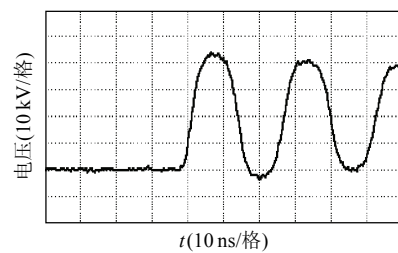
试验观测了电缆长度和匹配电阻 R_D 变化对测量波形的影响，图 9 为典型测量波形。



(a) 电缆长度为 6 cm, $R_D = 50 \Omega$



(b) 电缆长度为 6 cm, $R_D = 30 \Omega$



(c) 电缆长度为 68 cm, $R_D = 30 \Omega$

图9 电缆长度和匹配电阻对测量系统高频特性影响
Fig. 9 Influence of different cable length and match resistance on the high frequency characteristic

结果显示，电缆长度较短，匹配电阻为 30Ω 时，特快速瞬态波形最接近理论预期的方波，没有寄生振荡和干扰。

在图 9(b)中，脉冲波头上升时间约为 3 ns 。上升时间和 3 dB 高频截止频率的等效关系为

$$f_{3\text{db}} = 0.35 / T_r \quad (6)$$

式中： T_r 为波头上升时间； $f_{3\text{db}}$ 为 3 dB 带宽。因此， 3 ns 上升时间表明测量系统的高频特性达到了 116 MHz 。

在图 8 试验条件下，方波振荡频率为 38 MHz ，测量系统分压比为 $273\ 600$ (测量 SF_6 间隙的击穿电压确定方波幅值)。进一步对其他较低频率下的测量系统的分压比进行了测量。在图 8 试验电路中，通过在母线上并联电容和在放电回路中串联电感，可在母线产生不同频率的高压瞬态；同时采用高压探头 (Tektronix P6015A，量程 40 kV ，频带 75 MHz ；分压比： $1\ 000/1$) 和手孔式电容传感器进行测量，得到不同频率下电容传感器测量系统的分压比，如表 2 所示，分压比基本稳定。

表 2 实验室检验试验中分压比随频率的变化

Tab. 2 Change of the voltage dividing rate with frequency

频率/MHz	分压比	频率/MHz	分压比
38.000	273 600	0.480	286 500
5.400	271 700	0.084	290 500
1.100	282 200	—	—

试验表明，采用传感器端阻抗匹配方式，测量电缆应尽量短，匹配电阻应根据具体测量电路进行试验和选择。本文实际选择的电缆长度为 6 cm ，匹配电阻为 30Ω 。

在西安交通大学的高电压实验室，采用电阻分压器测量系统对上述的电容传感器测量系统进行了 100 kV 电压范围内的对比试验，详细内容另文介绍。图 10 为 2 个测量系统同时测量的瞬态电压波

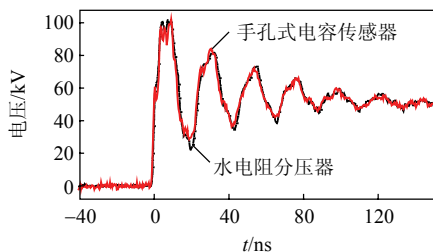
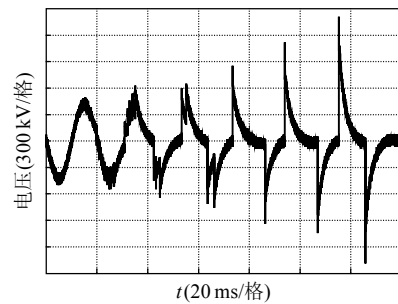


图 10 传感器端阻抗匹配电容传感器与电阻分压器对比
Fig. 10 Comparison between the capacitive sensor using impedance matching and a resistive divider

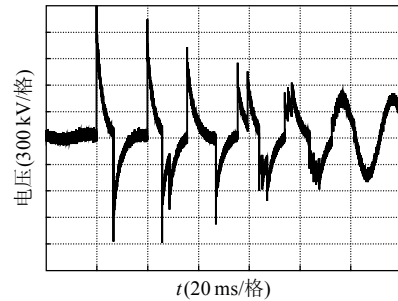
形，可见具有较好的一致性。

3.3 1100 kV GIS 试验条件下的 VFTO 测量

采用阻抗匹配测量系统，在 1100 kV GIS 试验装置上进行了 VFTO 测量 (采用横河 DLM2054 示波器，其设置采样率为 625 MS/s ，记录波形长度为 200 ms)，隔离开关分闸和合闸操作的重复击穿全过程负载侧的 VFTO 典型波形如图 11 所示。由图 11 可见，每次触头间隙击穿后，母线电压快速指数衰减，没有得到恒定的母线残余电压，此外，工频电压也存在严重失真。如上文分析的，即使示波器采用高阻输入，传感器低压臂回路的时间常数仍不够大，测量系统低频特性仍然满足不了工频和残余电压的测量。



(a) 分闸操作全过程波形



(b) 合闸操作全过程波形

图 11 阻抗匹配方式测量的负载侧 VFTO 波形

Fig. 11 VFTO at load side measured using impedance matching

4 阻抗变换的 VFTO 测量

4.1 阻抗变换测量电路

为了满足对工频电压和空载短母线残余电压的测量，实现 VFTO 的全过程测量，需要进一步增大低压臂电路的时间常数^[21]，为此，本文提出了在电容传感器和信号电缆之间增加阻抗变换电路的测量方案，测量电路如图 12 所示。阻抗变换电路具有高输入阻抗和低输出阻抗，并联于电容传感器的低压臂，可显著提高低压臂电路的时间常数，同



图 12 阻抗变换测量电路

Fig. 12 Measurement circuit using impedance converting 时使得示波器可选择 50Ω 输入电阻，实现良好的阻抗匹配。

采用高频运算放大器构建射极跟随电路，实现了阻抗变换，设计参数：输入电阻为 $1\text{T}\Omega$ ；输出电阻为 0.04Ω ；最大驱动电流为 70mA 。

图 13 为采用阻抗变换的电容传感器测量系统的阶跃响应，测得传感器的低压臂时间常数为 55.6s ，根据式(5)，对应的低频截止频率为 0.003Hz ，低压臂并联电阻为 $0.04\text{T}\Omega$ 。此并联电阻远小于阻抗变换电路所设计的输入电阻，这是由于传感器电极引出线的密封使用了 O 型橡胶圈，其绝缘电阻不够大。

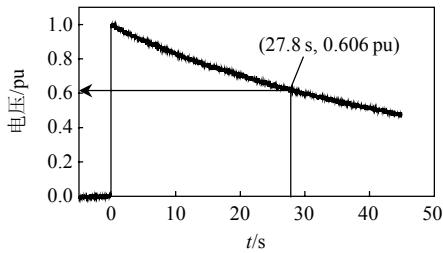


图 13 阻抗变换方式下测量系统的阶跃响应

Fig. 13 Step response of the measurement system using impedance converter

已知重复击穿过程的持续时间小于 200ms ，当传感器低压臂时间常数为 55.6s 时， 200ms 时间内衰减为 0.996 ，不会产生显著误差。按照加拿大的测量系统，其测量低频截止频率为 1Hz ，其低压臂时间常数为 159ms ，此时如果 2 次击穿间隔 10ms ，则直流电压会衰减 6% ，在 200ms 范围内衰减更厉害，所以 1Hz 带宽并不能准确地测量准直流分量。

4.2 测量系统高频特性试验

阻抗变换电路必须满足 VFTO 测量的高频特性的要求。首先采用正弦信号发生器对阻抗变换电路的频率特性进行测量，得到图 14 所示的幅频特性和相频特性。结果显示，在所测量的 $0.1\text{Hz}\sim 100\text{MHz}$ 频率范围内，阻抗变换电路具有基本恒定的幅频特性和线性相频特性，满足 VFTO 信号的不失真传输。

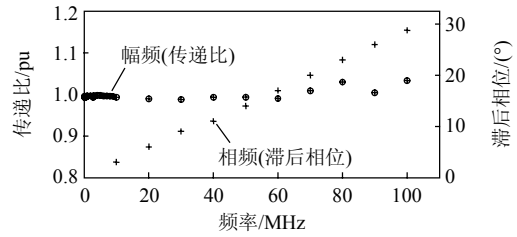
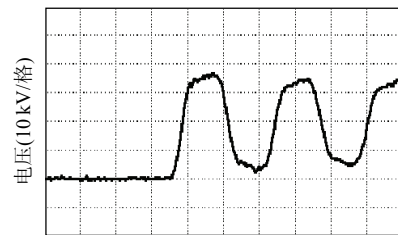


图 14 阻抗变换电路的频率特性

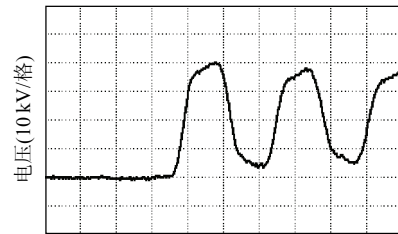
Fig. 14 Frequency characteristic of the impedance converter

采用图 8 试验装置对阻抗变换方式下测量系统的高频特性进行检验。设置示波器输入电阻为 50Ω ，电缆长度分别为 6 和 68cm ，此 2 种情况测得的波形基本相同，如图 15 所示。此实验表明，传感器端阻抗变换测量系统的高频特性也能够达到 100MHz ，且可以采用较长的电缆。

同样在西安交通大学的高电压实验室和电阻分压器测量系统进行对比，得到图 16 的测量结果，



(a) 电缆长度为 6cm



(b) 电缆长度为 68cm

图 15 阻抗变换电路对测量系统高频特性的影响

Fig. 15 Influence of the impedance converter on the high frequency characteristic

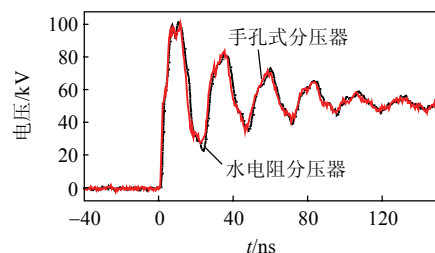


图 16 传感器端阻抗变换与电阻分压器对比
Fig. 16 Comparison between the capacitance sensor using impedance converter and a resistive divider

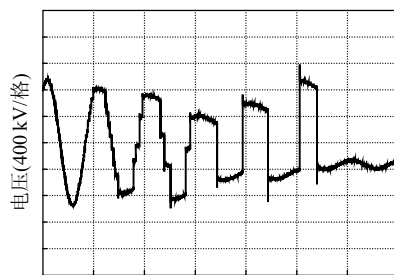
两者依然具有较好的一致性。

以上各试验表明，采用传感器端阻抗变换方式的测量系统，高频特性也能满足 VFTO 的测量。

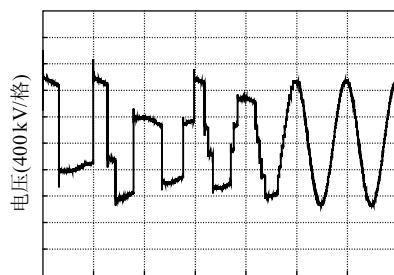
4.3 1100 kV GIS 试验条件下的 VFTO 测量

采用阻抗变换的测量系统，在 1100 kV GIS 试验装置上测量 VFTO，得到图 17 所示的隔离开关分闸和合闸操作的负载侧 VFTO 波形，此结果表明，测量系统的低频特性扩展到了准直流，能够有效地测量工频电压和母线残余电压。

将图 11 和图 17 中的电压波形水平展开，得到 2 种情况下典型的特快速瞬态脉冲波形，如图 18 所



(a) 分闸操作全过程波形



(b) 合闸操作全过程波形

图 17 阻抗变换方式测量的负载侧 VFTO 波形

Fig. 17 VFTO at the load side measured using impedance converter

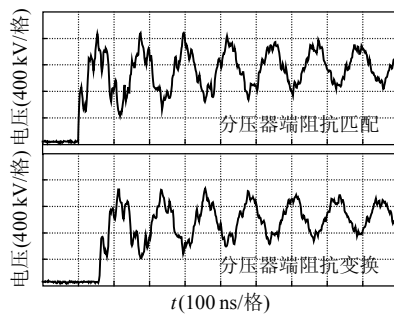


图 18 阻抗匹配和阻抗变换的特快速瞬态测量结果比较

Fig. 18 Comparison between the very fast transients measured using impedance matching and impedance converting respectively

示。比较可见，阻抗匹配和阻抗变换 2 种方式下，测量系统的特快速瞬态的测量结果基本一致。

5 GIS 中多测点同步 VFTO 测量

为了充分了解 VFTO 在 GIS 中的分布特性，并为 VFTO 的仿真建模提供试验依据，在 1100 kV GIS 试验装置进行 4 点位置的 VFTO 同步测量，为此研究了多测点同步测量方法。

图 19 为 1100 kV GIS 试验模型的布置图和 4 个测点位置(M1—M4)，每个测点设置一个测量系统，4 个测量系统通过光纤实现示波器的同步触发控制和与计算机的通讯。图 20 为多测点测量系统的结构框图。

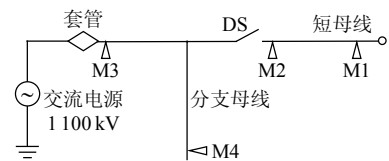


图 19 1100 kV GIS 试验模型和 VFTO 测点布置

Fig. 19 1100 kV GIS test circuit and VFTO measurement sites

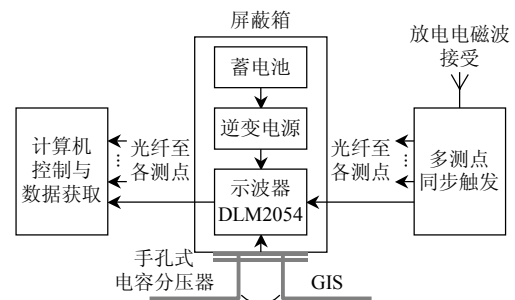


图 20 多测点 VFTO 测量系统

Fig. 20 Synchronous measurement of VFTO at spread sites in GIS

多测点同步测量由同步触发装置完成，它接收隔离开关触头间隙击穿所产生的脉冲电磁波信号，识别到击穿事件后，发出光脉冲，通过光纤传送到各测点，再转换为电脉冲，从而同步触发各示波器(横河 DLM2054)。

为了消除隔离开关触头间隙重复击穿所产生的空间辐射干扰和 GIS 壳体地电位升高的干扰，对测量系统采用屏蔽箱屏蔽，屏蔽箱固定在传感器的手孔盖板上，对地绝缘。测量系统采用电池逆变供电，供电电源也放置在屏蔽箱内。

横河 DLM2054 示波器具有网络通讯功能，采用光纤构建通讯网络，实现对各个测点示波器的控

制和数据获取。图 21 为 4 个测点同步测量的典型 VFTO 波形，由此可以观察分析 GIS 不同位置的特快速瞬态波形特点和分布规律。

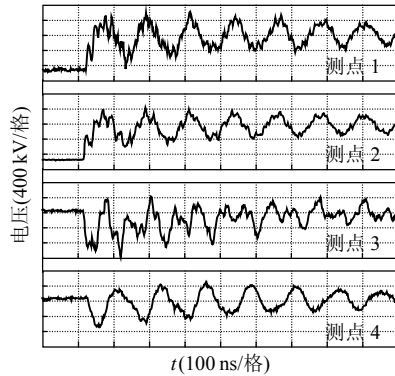


图 21 不同测点同步测量的特快速瞬态波形

Fig. 21 Fast transients measured synchronously at spread points of GIS

6 结论

1) 研究了手孔式电容传感器和传感器端阻抗匹配的 VFTO 测量方法和装置，此测量系统的频率特性高达 100 MHz 以上，能够满足 VFTO 瞬态分量的测量，但难以有效测量工频电压和母线残余电荷电压。

2) 提出电容传感器端阻抗变换的 VFTO 测量方法，并研制了测量装置。此测量系统的低频特性可扩展至 0.003 Hz，能够有效测量 VFTO 的瞬态分量、工频电压分量和母线残余电压分量，实现了 VFTO 的时间全过程波形记录。

3) 基于隔离开关触头间隙击穿时产生的电磁波信号，开发了用于多测点测量的同步触发装置，实现了 GIS 中多测点 VFTO 的同步测量，从而能够获得 VFTO 在 GIS 上的空间分布特性。

参考文献

- [1] Meppelink J, Diederich K J, Feser K, et al. Very fast transients in GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 223-233.
- [2] 何善庆. GIS 中的快速暂态现象[J]. 高压电器, 1995, 1(2): 41-46.
He Shanqing. Fast transient phenomenon in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 1995, 1(2): 41-46(in Chinese).
- [3] Povh D, Schmitt H, Valcker O, et al. Modelling and analysis guidelines for very fast transients[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(4): 2028-2035.
- [4] Lui C Y, Hiley J. Computational study of very fast transients in GIS with special reference to effects of trapped charge and risetime on overvoltage amplitude[J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 1994, 141(5): 485-490.
- [5] 谷定燮, 修木洪, 戴敏, 等. 1000 kV GIS 变电所 VFTO 特性研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(11): 27-32.
Gu Dingxie, Xiu Muhong, Dai Min, et al. Study on VFTO of 1000 kV GIS substation[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(11): 27-32(in Chinese).
- [6] 吉嘉琴. GIS 中的 VFT 过电压分析[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1994, 34(1): 73-82.
Ji Jiaqin. Analysis of very fast transient overvoltage in GIS[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 1994, 34(1): 73-82(in Chinese).
- [7] 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 disconnectors[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 111-114(in Chinese).
- [8] IEC. IEC61321-1. High voltage testing techniques with very fast impulses, part 1: measuring systems for very fast front overvoltages generated in gas insulated substations[S]. Switzerland: IEC, 1994.
- [9] 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.
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(in Chinese).
- [10] 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).
- [11] Chatrefou D, Pristcheva M, Uhde D. Application of optical sensors for measurement of high frequency overvoltages in power transformers[C]//Power Engineering Society Winter Meeting. Singapore: IEEE, 2000: 2257-2268.
- [12] 曾嵘, 陈未远, 何金良, 等. 光电集成强电场测量系统及其应用研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(7): 1-5.
Zeng Rong, Chen Weiyuan, He Jinliang, et al. Study on optical electric integrated electric field measurement system and application in high voltage measurement[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(7): 1-5(in Chinese).

- [13] Boggs S A, Fujimoto N. Techniques and instrumentation for measurement of transients in gas-insulated switchgear [J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1984, 19(2): 87-92.
- [14] Osmokrovic P, Petkovic D, Markovic O. Measuring probe for fast transients monitoring in gas insulated substation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1997, 46(1): 36-44.
- [15] Murase H, Ohshima I, Aoyagi H, et al. Measurement of transient voltages induced by disconnect switch operation [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(1): 157-165.
- [16] Nojima K, Nishiwaki S, Okubo H, et al. Measurement of surge current and voltage waveforms using optical-transmission techniques[J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 1987, 134(6): 415-422.
- [17] Murase H, Okubo H, Aoyagi H, et al. Development of 1 GHz GIS surge sensor[J]. Electrical Engineering in Japan, 1990, 109(2): 75-83.
- [18] 陈宇渊, 袁梅珍. 快速暂态过电压测试技术的研究[J]. 西安交通大学学报, 1992, 26(5): 81-87.
Chen Yuyuan, Yuan Meizhen. Research on measurement techniques for fast transient overvoltage[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1992, 26(5): 81-87(in Chinese).
- [19] 袁梅珍, 张文元. 电容分压器低压测量电缆的匹配问题 [J]. 高压电器, 1985, 1(4): 27-30.
Yuan Meizhen, Zhang Wenyuan. Matching for measurement cable of low voltage arm of capacitive voltage divider[J]. High Voltage Apparatus, 1985, 1(4): 27-30(in Chinese).
- [20] 张仁豫, 陈昌渔, 王昌长. 高电压试验技术[M]. 3 版. 北京: 清华大学出版社, 2009: 153-154.
Zhang Renyu, Chen Changyu, Wang Changchang.

- High-voltage testing technology[M]. 3rd ed.. Beijing: Tsinghua University Press, 2009: 153-154(in Chinese).
- [21] 陈宇渊, 袁梅珍. 阻抗变换器及其在快速暂态测量中的应用[J]. 高电压技术, 1990, 1(4): 45-49.
Chen Yuyuan, Yuan Meizhen. Impedance converter and its application in measurement of very fast transient (VFT) [J]. High Voltage Engineering, 1990, 1(4): 45-49(in Chinese).



岳功昌

收稿日期: 2011-06-28。

作者简介:

岳功昌(1984), 男, 博士研究生, 主要从事特高压 GIS 中 VFTO 的测量、仿真与抑制技术的研究, ygc09@mails.tsinghua.edu.cn;

刘卫东(1961), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事高压电器、电力设备在线检测和故障诊断方面的研究工作, lwd-dea@mail.tsinghua.edu.cn;

陈维江(1958), 男, 教授级高工, 博士生导师, 研究方向为电力系统过电压保护、绝缘配合和电磁环境等, weijiang-chen@sgcc.com.cn;

关永刚(1974), 男, 博士, 副教授。主要从事高压电器及智能化技术、操作过电压机理与防护等领域的研究, guanyg@tsinghua.edu.cn;

李志兵(1975), 高级工程师, 从事串补及高压开关设备研究, lizb@epri.sgcc.com.cn。

(编辑 胡琳琳)