

2.5 MV 特快速瞬态过电压发生器

殷禹¹, 刘石², 时卫东¹, 王绍武³, 张璐², 李龙²,

张翠霞¹, 张乔根², 赵文强⁴, 武可⁴

(1. 中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192; 2. 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; 3. 国家电网公司, 北京市 西城区 100031; 4. 河南平高电气股份有限公司, 河南省 平顶山市 467001)

Research and Design of the 2.5 MV Very Fast Transient Overvoltage Generator

YIN Yu¹, LIU Shi², SHI Weidong¹, WANG Shaowu³, ZHANG Lu², LI Long²,
ZHANG Cuixia¹, ZHANG Qiaogen², ZHAO Wenqiang⁴, WU Ke⁴

(1. China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China; 3. State Grid Corporation of China, Xicheng District, Beijing 100031, China; 4. Henan Pinggao Electric Co. Ltd., Pingdingshan 467001, Henan Province, China)

ABSTRACT: Gas insulated switchgear (GIS) has a wide range of acceptance in power systems due to its good compactness and tightness, slight environment effect, and long maintenance cycle. But, the disconnecter operation in GIS can generate very fast transient overvoltage (VFTO), which does great harm to GIS, especially when the voltage level of GIS is higher than 330 kV. In order to simulate VFTO in ultra high voltage (UHV) GIS, an experimental platform for generating VFTO was designed by using impulse voltage generators and voltage sharpening devices. To the generate voltage waveform with amplitude of up to 2.5 MV and oscillating frequency up to 35 MHz, the amplitude of output voltage was controlled by adjusting the breakdown voltage of sharpening gap; and the length of bus bar in GIS was increased to reduce the influence of circuit inductance. A capacitive sensor with a RC integrator was developed for measurements of VFTO. The result of the test indicates that the capacitive sensor is able to measure the VFTO waveform with higher accuracy.

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

摘要: 气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)以其占地面积少、密封性好,受环境影响小,运行可靠、维修周期长等优点在中国电网中得到了广泛应用。在 330 kV 以上电压等级的系统中,开关动作产生的特快速瞬态过电压(very fast transient overvoltage, VFTO)对系统有很大危害。为满足特高压 GIS 中 VFTO 的模拟,利用 6 MV 敞开式冲击电压发生器与陡化装置结合的方法,研制出一种模拟 VFTO 产生的装置。通过增加 GIS 母线长度来补偿回路固有电感的影响,以及通过控制陡化间隙的击穿电压来控制输出电压幅值,使该装置可以输出幅值为 2.5 MV、高频振荡达到 35 MHz 的电压波,能够满足特高压试验对 VFTO 模拟的要求。采用外加积分器方式,制作了一种锥形电容传感器来测量该装置产生的电压波,测试结果表明该电容传感器可以满足试验的要求。

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

0 引言

在气体绝缘开关设备(gas insulated switchgear, GIS)中,当隔离开关操作时,因触头间击穿和多次重燃会产生一种特快速瞬态过电压(very fast transient overvoltage, VFTO)^[1-2],这种过电压具有上升时间极短(3~100 ns)而幅值较高(最高 3 pu)^[3-4]的特点。运行经验表明,在 330 kV 及以上电压等级系统中, VFTO 引发的绝缘击穿事故率超过了雷电

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).

和操作过电压引起的绝缘击穿事故率^[5-8],而迄今为止尚未确定 VFTO 作用下 GIS 绝缘特性和 GIS 绝缘击穿的原因。研究特快速瞬态过电压下 GIS 绝缘特性和放电机制已成为 20 世纪 80 年代以来国际高压领域的一个研究热点^[9-11]。

为了研究特快速瞬态过电压下 GIS 的绝缘特性和放电机制,需要在实验室模拟产生特快速瞬态过电压,并对其进行准确测量。模拟 VFTO 的产生目前主要有 2 种方法:一是利用实际 GIS 隔离开关的操作来产生 VFTO,该方法产生的 VFTO 波形具有随机性,幅值不易控制,而且波形重复性不好,很难用于绝缘特性的研究;另一种为用 VFTO 模拟发生器产生陡波电压叠加单一频率的衰减振荡波来模拟 VFTO。在现有的 VFTO 模拟发生器中,除日本电力中央研究所采用了全封闭模拟试验装置外,其他都是采用小型冲击电压发生器与陡化间隙相结合的方法,西安交通大学、德国 Archen 大学、慕尼黑大学等均采用这种方法^[12-15]。由于冲击电压发生器回路及高压引线电感会影响冲击源向陡化间隙提供能量的速度,导致陡化间隙击穿后输出电压的上升时间和主振荡频率难以提高,这种影响在采用高电压等级的大型冲击电压发生器时尤其严重。在现有模拟装置中,日本研制的装置很具代表性,其中日本电中研的全封闭模拟装置可产生上升时间为 20 ns、幅值为 1 MV 的高压方波,但只能模拟 VFTO 的陡上升沿,无法模拟 VFTO 的振荡分量;东京电力公司采用冲击电压发生器与陡化间隙结合研制的 VFTO 模拟发生器,输出的幅值接近 1 MV^[16],但上述装置都无法输出雷电波,不能满足比较 VFTO 与雷电电压波绝缘特性的要求。仿真和试验表明,特高压 GIS 中的 VFTO 一般不超过 2.5 pu,对应的幅值约为 2.5 MV,现有的试验装置不能满足试验要求。为了掌握特高压 GIS 在 VFTO 作用下的绝缘特性,并与雷电作用下的绝缘特性进行比较,有必要研制能同时产生相应电压幅值 VFTO 和雷电电压波的模拟发生装置,并进行准确测量。

本文利用 6 MV 敞开式冲击电压发生器,通过增加 GIS 母线长度来补偿回路固有电感的影响,以及通过控制陡化间隙的击穿电压来控制输出电压的幅值。在脉冲功率领域已有相关研究,本文将该思想应用于 VFTO 的模拟装置中,研制出可同时输

出幅值达 2.5 MV 的 VFTO 和雷电电压波模拟装置,满足特高压 GIS 中比较 VFTO 与雷电电压波绝缘特性的要求。同时设计了一种同轴锥体电容传感器来准确测量 VFTO 的幅值和波形。目前已利用该 VFTO 模拟发生器开展了大量的试验研究工作,结果将在后续论文中发表。

1 VFTO 发生器输出参数及电路分析

1.1 VFTO 发生器输出波形参数的确定

国内外对 VFTO 的大量研究表明, VFTO 的波形有 3 个主要频率分量:1) 几百 kHz 低频振荡,主要由 GIS 整体结构决定,其幅值不高,装置的绝缘水平设计不取决于它;2) 10 MHz 左右的高频振荡频率,它由陡行波在 GIS 内发展形成,叠加到基本振荡过程上构成 VFTO 最重要的部分,并决定绝缘的设计;3) 高达百兆 Hz 的特高频振荡,由 GIS 相邻部件间波的反射形成,通常幅值较低。IEC 60071-1 1993^[17]推荐的陡波前过电压波形前沿为 3~100 ns,峰值叠加振荡频率为 0.3~100 MHz。

根据 VFTO 特征频率分布及其对 GIS 绝缘水平的影响程度,综合考虑 IEC 标准对陡波前过电压波形前沿的推荐指标以及特高压 GIS 设备中 VFTO 的仿真和试验结果,结合 VFTO 发生器本身结构、参数对输出波形的影响,确定研制的 VFTO 发生器输出波形的参数应满足以下要求:波形上升沿小于 50 ns;波形叠加 8~30 MHz 的高频振荡;考虑到将输出 VFTO 波形与雷电波形进行对比,波形半峰时间为 50 μ s;最大幅值为 2.5 MV。

1.2 VFTO 发生器电路分析

使用敞开式冲击电压发生器与陡化间隙相结合产生 VFTO 电压波的方法,在控制陡化间隙击穿时,由于冲击电压发生器回路及高压引线电感很大,会抑制冲击源向陡化间隙提供能量的速度,导致陡化间隙击穿后输出电压的上升时间和主振荡频率难以提高。

为解决此问题,尝试在陡化间隙之前加装储能电容,储能电容可以在陡化间隙击穿前储存冲击电压波的波头能量,当陡化间隙击穿时迅速将能量释放,从而在试品上产生快前沿的 VFTO 波形。本文研制的 VFTO 发生器的模拟回路如图 1 所示,图中: R_1 和 R_2 为调波电阻; C 为储能电容。

陡化间隙动作的瞬间,储能电容 C 迅速释放储

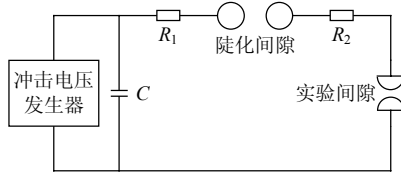


图1 VFTO发生器模拟回路

Fig. 1 Simulation circuit of VFTO

存的能量,从而产生VFTO的陡前沿部分;由于冲击电压发生器等值电感很大,在陡前沿波形产生过程中起到瞬时隔离冲击源的作用,使得波头上升时间主要由储能电容 C 与试品电容 C_t 决定,储能电容 C 远大于 C_t ,这样才满足快前沿时向 C_t 传输能量的需要,其等效电路如图2所示。

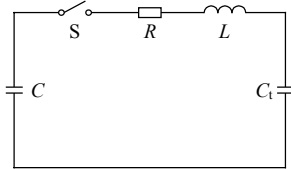


图2 波头等效电路

Fig. 2 Wavefront Equivalent circuit

图2中: S 为球隙开关; R 为回路总等值电阻; L 为回路总等值电感; C_t 为试品入口总电容; C 为储能电容值,则电路的回路方程为

$$L \frac{d}{dt} i(t) + \frac{C + C_t}{CC_t} \int_0^t i(t) dt + Ri(t) = U_0 \quad (1)$$

式中 U_0 为储能电容上的初始充电电压。

令 $C_t' = C_t C / (C_t + C)$,要求回路波形为振荡波形,应满足 $R < 2\sqrt{L/C_t'}$,可得:

$$i(t) = \frac{U_0}{\omega L} e^{-\alpha t} \sin \omega t \quad (2)$$

式中: $\alpha = R/(2L)$; $\omega = \sqrt{1/(LC_t') - \alpha^2}$ 。所以试品电容两端电压的简化表达式为

$$U_c = \frac{C}{C + C_t} U_0 (1 - e^{-\alpha t} \cos \omega t) \quad (3)$$

由式(3)可知,在试品两端得到的电压为冲击输出电压叠加衰减振荡波,衰减振荡波的频率为

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC_t'} - \alpha^2} \quad (4)$$

第1个电压峰值的上升时间约为高频振荡周期的1/2。因此,通过合理选择电路参数,可产生高频振荡的VFTO^[18-19]。选取回路总负载电容为

60 pF(其中盆式绝缘子15 pF,末端母线20 pF,试验间隙25 pF),当回路电感为4 μ H时的振荡频率为10.27 MHz,波头上升时间约为48 ns。

2 VFTO发生器的设计

2.1 VFTO发生器的结构

VFTO发生器的结构如图3所示,利用开放式冲击电压发生器产生冲击电压,经高压引线和1000 kV交流高压套管传输至第一母线段,该高压套管和第一母线段用作中间储能,在陡化前将冲击电压波头部分的能量进行暂时储存。当陡化间隙击穿时,高压套管和第一母线段将储存的能量释放,从而产生VFTO。图3中电阻用作调节VFTO波形的波头时间。装置中陡化间隙的距离可以通过调节气室的气压来改变,从而起到调节VFTO峰值的作用。

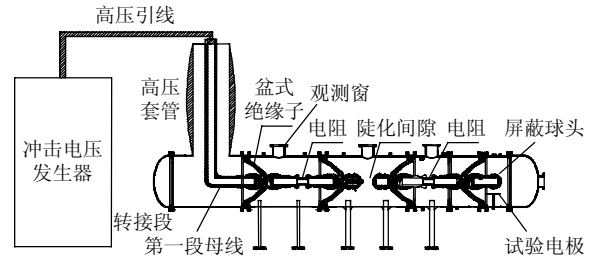


图3 VFTO发生器的基本结构

Fig. 3 Basic structure of the VFTO generator

2.2 陡化开关的设计和参数的确定

陡化开关的设计是整个装置的关键,根据Bradley经验^[20],微秒脉冲电压和稍不均匀电场下应选择的SF₆气体间隙为

$$d = \frac{U^{1.2}}{577 \left(\frac{P}{P_0}\right)^{0.6}} \quad (5)$$

式中: d 为气体间隙距离,cm; U 为脉冲电压,kV; P/P_0 为工作压强与标准大气压强的比。

根据式(5)计算得到的不同电压和气压下主开关SF₆气体的间隙距离如表1所示。

选择陡化间隙为单间隙,由于间隙可在0~14 cm间进行调节,根据表1结果,以开关工作气压为

表1 不同电压和气压下SF₆气体开关的间隙距离Tab. 1 Space of SF₆ gap in different voltage and pressure

U/MV	开关间隙距离/cm		
	P=0.6 MPa	P=0.4 MPa	P=0.3 MPa
3.5	10.90	14.0	16.6
3.0	9.12	11.6	13.8

0.4 MPa 为例, 此时间隙的工作电压可达到 3.5 MV, 完全满足 VFTO 发生器输出需达到 2.5 MV 的要求。

2.3 VFTO 发生器仿真研究

采用 Pspice 软件对整个装置进行仿真, 电路如图 4 所示, 图中虚线框中为冲击电压发生器的等效电路。冲击电压发生器由 60 只 1.5 μF 的电容串联,

其等效参数: 串联电容 $C_p=25\text{ nF}$ 、波头电阻为 $440\ \Omega$ 、波尾电阻为 $2.8\text{ k}\Omega$ 、电感为 $20\ \mu\text{H}$; 冲击电压发生器并联 600 pF 标准电容分压器 C_1 ; 冲击电压发生器到高压套管的引线长 h 为 20 m , 当直径($2r$)为 1 cm 的架空高压引线距地高度为 10 m 时, 其等效波阻抗 $Z=60\ln(2h/r)=498\ (\Omega)$ 。

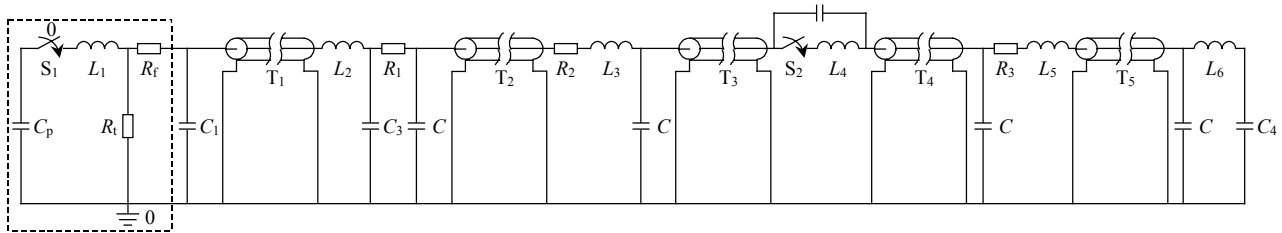


图 4 VFTO 发生器仿真模型

Fig. 4 Simulation model of VFTO generator

1 000 kV 交流高压套管的估算电感为 $2\ \mu\text{H}$ 、分布电容为 200 pF ; 1 000 kV 盆式绝缘子等效电容 C 约为 15 pF ; 对于 14 cm 的陡化间隙, 陡化间隙通道电感 L_4 为 100 nH 、电容 C_3 约 15 pF ; 试品间隙等值入口电容 C_4 约为 60 pF 、等值电感 L_6 为 50 nH 。

在波形的陡化中, 影响装置输出波形的主要因素包括中间储能电容值和回路电感值。冲击电压发生器主电容 C_p 充电电压 2 MV , 改变中间储能电容值 C_2 时, 陡化后的波形幅值如图 5 所示。

用下, 幅值趋于饱和。

改变回路调波电感值 L (调波电感 L_3 与 L_5 之和), 陡化后装置输出的 VFTO 上升时间随电感的变化如图 6 所示。随着电感变大, 输出波形上升时间变长。回路电感可以等效为随电压频率变化而变化的电阻, 因此随着回路电感增大, 中间储能电容通过回路对试验间隙充电时间变长, 使输出电压波上升时间增长, 这与式(4)相符合的。

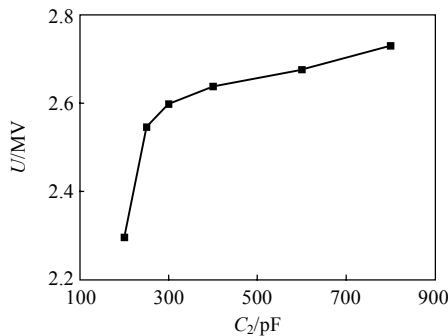


图 5 不同储能电容值下输出的电压幅值

Fig. 5 Amplitude of waveform output from the device under different energy-stored capacitance

由图 5 可以看出随着储能电容值的增大, 经过陡化后的 VFTO 幅值与原波形击穿时刻幅值之比成增大的趋势, 这是因为在一定范围内随着储能电容值的增大, 当陡化间隙击穿时其瞬间所能释放的能量也在增大。而当电容值增大到一定程度后, 幅值比例的增加开始有饱和趋势, 这是由于随着电容值的增大, 陡化回路中的 RC 常数也在增大, 使得储能电容释放能量的时间变长, 在这 2 个因素共同作

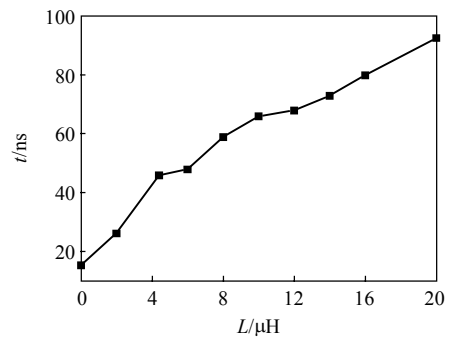


图 6 不同回路电感下输出波形的上升时间

Fig. 6 Risetime of waveform output from the device under different circuit inductance

结合 VFTO 电路分析和仿真结果, 选择回路电感为 $4\ \mu\text{H}$, 储能电容为 250 pF , 控制陡化间隙在冲击电压发生器输出电压上升到 1900 kV 时刻发生击穿, 装置输出 VFTO 波形如图 7 所示, 陡化后输出的波形幅值约为陡化前波形幅值的 1.3 倍, 波形前沿上升时间约为 45 ns , 波形叠加主振荡频率约为 8.5 MHz , 满足设计输出 VFTO 的波形要求。

若直接将陡化间隙短接, 装置其他参数不变, 输出电压的波形如图 8 所示。

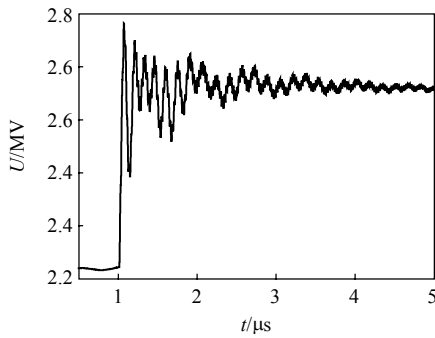


图7 VFTO发生器输出的VFTO波形

Fig. 7 Output waveform from the VFTO generator

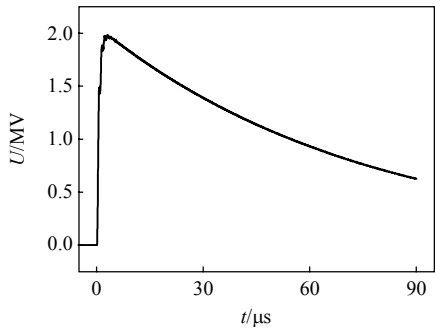


图8 陡化间隙短接装置输出波形

Fig. 8 Waveform output from the device while bridging the peaking gap

冲击电压发生器输出上升时间为 $1.2 \mu\text{s}$ 、半峰时间为 $50 \mu\text{s}$ 、幅值为 2000 kV 的标准雷电波时,将模拟器陡化间隙短接,此时模拟器输出上升时间为 $1.2 \mu\text{s}$ 、半峰时间为 $52 \mu\text{s}$ 、幅值为 1981 kV 的雷电波,此波形符合国际电工委员会对标准雷电冲击全波的规定^[17]。可以看出,该装置既可输出 VFTO 模拟波形,也可输出雷电波。

3 测量系统

3.1 测量装置的结构

锥形电容传感器的结构如图9所示,图中高压臂电容由母线、锥形电容及其之间的气体组成,低压臂电容为同轴锥体电容器,采用聚酰亚胺薄膜做低压臂电容的介质,其相对介电常数为3.3。

与普通的电容传感器相比,该锥形电容传感器具有以下特点:使用同轴锥体作为低压臂电容,使得在相同感应电极面积下,增大了低压臂电容值;由于整个低压臂电容采用的是同轴锥体结构,而同轴锥体到电缆接口处波阻抗是一个渐变的过程,低压臂电容上极板采集到的波形信号在锥体中传输不会发生剧烈的折反射,可减小波形传输中的畸

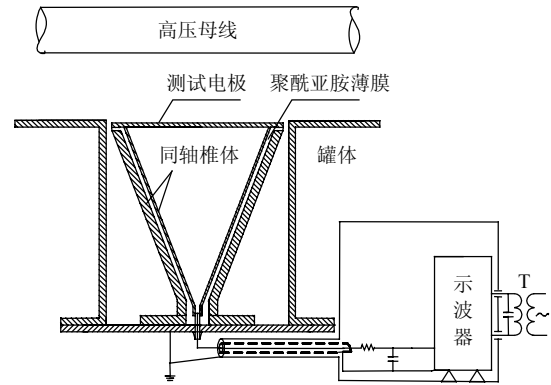


图9 锥形电容传感器结构图

Fig. 9 Structure of conical capacitive sensor

变。此外,在电容传感器末端加装同轴积分器,改善了传感器的低频响应特性。

3.2 测量装置的标定

电容传感器响应特性标定的装置如图10所示,可知输出波形参数由脉冲源本身及加在GIS筒末端的负载共同决定。由于VFTO波形的频带范围很宽,其高频分量能达几十MHz,低频分量达到几十kHz到上百kHz,为满足VFTO波形测量的需要,本文分别对电容传感器的高频响应和低频响应进行了标定。

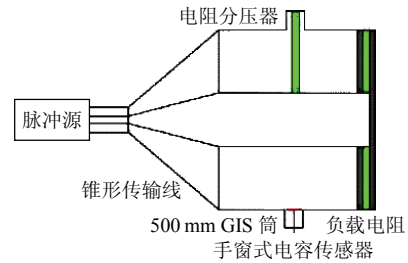


图10 分压器标定装置结构图

Fig. 10 Device for calibrating divider's attenuation ratio and response time

用 4 GHz 同轴衰减器标定水电阻的方波响应,对于同一方波源,二者测得的上升时间一致,都为 2.8 ns ,可知该标定的电阻分压器上升时间可达到 2.8 ns 。采用水电阻分压器作为标准分压器对锥形电容传感器进行高频部分的标定,此时采用气体火花开关所产生上升沿在 5 ns 以下,幅值为 $0 \sim 60 \text{ kV}$ 的低压陡脉冲波形作为标定波形。

对电容传感器低频特性进行标定时,采用高热容量、稳定性良好的金属膜电阻分压器作为标准分压器。在 $50 \text{ Hz} \sim 2 \text{ MHz}$ 频率范围内,该标准分压器的分压比在 $\pm 1\%$ 的范围内波动,可以满足对电容传感器低频响应特性的标定要求。同时采用 $1 \mu\text{F}$ 大电

容通过自击穿火花开关对负载放电得到的半高宽为 200~300 μs 、幅值为 15 kV 左右的低压长波尾波形, 作为标定电容传感器的低频性能的电电压源。

标定电容传感器高频响应的典型波形如图 11 所示, 由图可知: 在陡脉冲电压波下两者所得波形吻合度较好; 标准分压器的波头上升时间为 6.35 ns, 电容传感器的波头上升时间为 6.92 ns, 两者相差 0.57 ns, 电容传感器的分压比为 58 494。

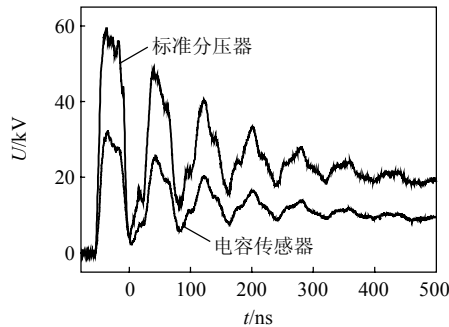


图 11 电容传感器陡波头标定图

Fig. 11 Fast risetime waveform calibrating result of capacitive sensor

标定电容传感器低频响应的典型波形如图 12 所示, 在长波尾电压波下标准分压器所测波形半峰时间为 204 μs , 电容传感器所测波形半峰时间为 199 μs , 两者相差 5 μs , 此时电容传感器变比为 59 041。

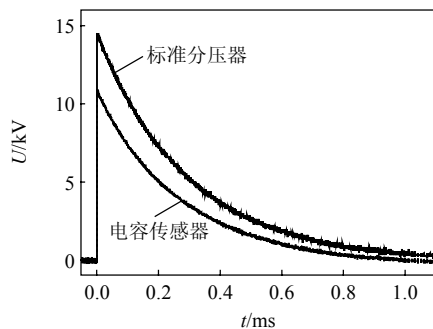


图 12 电容传感器长波尾标定图

Fig. 12 Long wavetail calibrating result of capacitive sensor

在 2 种波形下传感器的平均分压比为 58 767.5, 误差小于 1%, 可知测量系统满足波形前沿小于 50 ns, 半高宽为 50 μs 、波形叠加高频振荡、频率约为 8~35 MHz 的测量要求。

4 VFTO 发生器输出波形

4.1 VFTO 波形

该试验装置主要用来产生 2 种波形: 雷电波和

VFTO 波形。试验中采用冲击电压发生器的输出波形与该装置输出波形进行对比来分别验证该装置输出 VFTO 电压波和标准雷电波形的有效性。

图 13 为测得的冲击电压发生器输出波形, 其输出雷电击穿在陡化间隙时刻的幅值为 1 940 kV。图 14 为对应于该冲击电压发生器波形的 VFTO 发生器中电容传感器测得的 VFTO 波形, 其上升时间约为 50 ns, 叠加高频振荡频率约为 8 和 35 MHz。电容传感器输出 VFTO 的幅值为 2 510 kV。

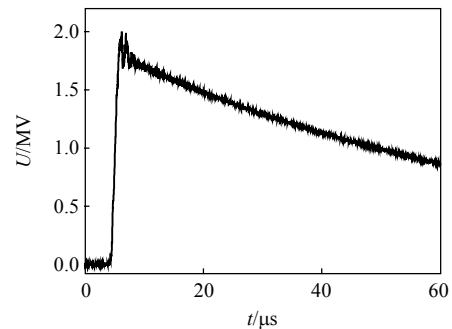


图 13 冲击电压发生器输出雷电波

Fig. 13 Lightning waveform output from the impulse voltage generator

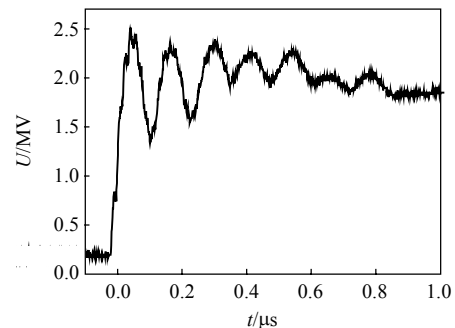


图 14 VFTO 发生器输出 VFTO 电压波

Fig. 14 VFTO waveform output from VFTO generator

可知装置输出的 VFTO 电压波形满足上升沿小于 50 ns 的要求, 波形幅值约为雷电波幅值的 1.3 倍, 与仿真计算中中间储能电容取值为 250 pF 的情况相符合。在实际装置中, 中间储能电容由高压套管和第一母线段组成, 其中套管电容约为 200 pF, 第一母线段电容值约为 60 pF。

4.2 标准雷电波

图 15 为电容分压器测得冲击电压发生器输出波形标准雷电波形, 对应幅值为 2 089 kV。图 16 为陡化间隙短接后装置中电容传感器测得雷电波波形, 其上升时间约为 1.2 μs , 半峰时间约为 51 μs ,

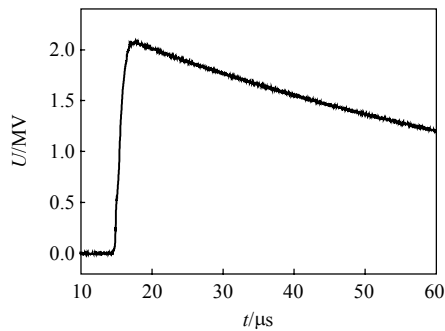


图 15 冲击电压发生器输出雷电波

Fig. 15 Lightning waveform output from the impulse voltage generator

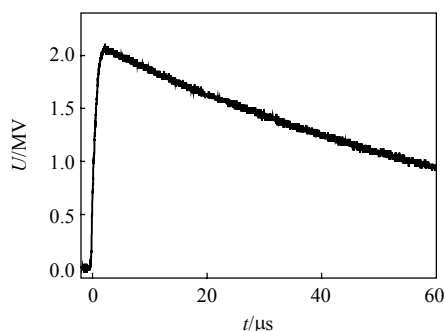


图 16 VFTO 发生器输出雷电波

Fig. 16 Lightning waveform output from VFTO generator

电压幅值为 2 111 kV。

可以看出, 装置输出波形和原波形吻合较好, 且和仿真结果相符合。

5 结论

1) 采用冲击电压发生器结合中间储能电容和陡化间隙的结构, 研制出了一种既可产生输出幅值达 2.5 MV、上升时间小于 50 ns、叠加 8 和 35 MHz 高频振荡的 VFTO 电压波形, 也可输出幅值达 2.5 MV 标准雷电波的 VFTO 模拟装置。该装置可满足特高压 GIS 在 VFTO 作用下绝缘特性研究的需要。

2) 依据仿真分析结果, 采用了延长 GIS 母线段和安装调波电阻和调波电感的结构。GIS 母线段一方面可作为中间储能电容, 增大输出的 VFTO 幅值, 另一方面可补偿回路固有电感, 减轻较大的回路电感对 VFTO 波形上升时间的延缓作用。通过选取合适的调波电阻和调波电感, 可满足输出 VFTO 波形对振荡频率的要求。

3) 通过采用锥形结构增大电容传感器低压臂电容值, 并结合同轴积分器改善传感器低频响应,

研制出了高频响应时间小于 7 ns, 低频响应可满足半峰时间达 200 μ s 的脉冲电压测量, 高频和低频分压比之差小于 1% 的锥形电容传感器。

参考文献

- [1] 周瑜, 李军, 徐世山, 等. GIS 中快速瞬态过电压的测试技术[J]. 绝缘材料, 2009, 42(2): 68-71.
Zhou Yu, Li Jun, Xu Shishan, et al. Test technology of VFTO in GIS[J]. Insulating Materials, 2009, 42(2): 68-71(in Chinese).
- [2] 史保壮, 张文远, 邱毓昌. 测量气体绝缘变电站中快速瞬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).
- [3] 项祖涛, 刘卫东, 钱家骊, 等. 磁环抑制 GIS 中特快速瞬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 of overvoltage in GIS by magnetic rings[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 101-105(in Chinese).
- [4] 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).
- [5] 陈庆国, 张乔根, 邱毓昌, 等. GIS 在快速瞬态过电压下的放电特性[J]. 电网技术, 2000, 24(9): 1-4.
Chen Qingguo, Zhang Qiaogen, Qiu Yuchang, et al. Discharge characteristics of GIS under very fast transient over voltage[J]. Power System Technology, 2000, 24(9): 1-4(in Chinese).
- [6] Wu Hao, Li Chengrong, Xu Hairui. Capacitive sensor for the measurement of transients in gas-insulated switchgears [C]//2009 IEEE Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Virginia Beach: CEIDP, 2009: 290-294.
- [7] Yamagata Y, Nakada Y, Nojima K, et al. Very fast transients in 1000 kV gas insulated switchgear[C]//1999 IEEE Transmission and Distribution Conference. New Orleans: IEEE, 2002: 501-508.
- [8] Mepplelink J, Diederich K, Feser K, et al. Very fast transients in GIS[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 223-233.
- [9] Amarnath J, Paramahamsa D P K, Narasimharao K, et al.

- Very fast transient over-voltages and transient enclosure voltages in gas insulated substations[C]//2003 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. New Mexico: IEEE, 2004: 506-509.
- [10] 康宁, 邹建华, 杨兰均, 等. 三相同壳结构 GIS 快速暂态过程模型构建和参数计算[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 112-117.
Kang Ning, Zou Jianhua, Yang Lanjun, et al. Transient parameters and numerical calculation model on VFT in three-phase enclosed GIS[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 112-117(in Chinese).
- [11] 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).
- [12] 李登云, 邱爱慈, 孙凤举, 等. 100 kV 触发器输出脉冲的陡化[J]. 高电压技术, 2008, 34(6): 1255-1260.
Li Dengyun, Qiu Aici, Sun Fengju, et al. Peaking risetime of the output pulse for 100 kV triggering generator[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(6): 1255-1260(in Chinese).
- [13] 高景明, 刘永贵, 刘金亮, 等. 陡化前沿 Marx 发生器的设计与初步实验[J]. 强激光与离子束, 2008, 20(1): 167-170.
Gao Jingming, Liu Yonggui, Liu Jinliang, et al. Design and preliminary experimental results of wave erection Marx generator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2008, 20(1): 167-170(in Chinese).
- [14] 刘轩东, 李登云, 孙凤举, 等. 用于纳秒脉冲高压测量的同轴电容分压器[J]. 高压电器, 2008, 44(1): 32-36.
Liu Xuandong, Li Dengyun, Sun Fengju, et al. A coaxial capacitive voltage divider for nanosecond pulse measurement[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(1): 32-36(in Chinese).
- [15] 乐波, 贾志东, 谢恒堃, 等. 陡波头冲击电压发生器的研制[J]. 高电压技术 1999, 25(4): 43-45.
Le Bo, Jia Zhidong, Xie Hengkun, et al. Study on impulse voltage generator with steep front[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(4): 43-45(in Chinese).
- [16] Ueta G, Kaneko S, Okabe S. Evaluation of breakdown characteristics of gas insulated switchgears for non-standard lightning impulse waveforms-breakdown characteristics in the presence of bias voltages under non-uniform electric field[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(2): 543-551.
- [17] IEC. International standard 60071-1 1993 insulation co-ordination, part 1: definitions, principles and rules[S]. Geneva: IEC Central Office, 1993.
- [18] 陈庆国, 邱毓昌, 张乔根, 等. GIS 中快速瞬态过电压的实验室模拟[J]. 高电压技术, 2000, 26(1): 1-5.
Chen Qingguo, Qiu Yuchang, Zhang Qiaogen, et al. Laboratory simulation of very fast transient overvoltage in GIS[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(1): 1-5(in Chinese).
- [19] 张仁豫, 陈昌渔, 王昌长. 高电压试验技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 99-105.
Zhang Renyu, Chen Changyu, Wang Changchang. High voltage test techniques[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 99-105(in Chinese).
- [20] 孙凤举, 邱爱慈, 尹佳辉, 等. MV 级边缘点火多级多通道电脉冲触发气体开关的设计[C]//第九届高功率粒子束学术交流会议文集. 延吉: 中国物理学会, 2004: 142-148.
Sun Fengju, Qiu Aici, Yin Jiahui, et al. Design for MV multi-gap multi-channel and electric trigger switch[C]// Proc of the 9th High Power Particle Beam Conference. Yanji: Chinese Society of Physics, 2004: 142-148(in Chinese).



殷禹

收稿日期: 2011-06-28。

作者简介:

殷禹(1975), 高级工程师, 博士, 从事高电压技术方面研究工作, yiny@epri.sgcc.com.cn;

刘石(1987), 男, 陕西汉中, 硕士研究生, 研究方向为 GIS 中快速瞬态过电压测量, 本文通讯作者, fuyun.87@stu.xjtu.edu.cn。

(编辑 胡琳琳)