

一种 10 kV 电压等级非接触式电压互感器研究

刘 刚¹, 王秀茹¹, 凌万水², 王科龙²

(1. 国网江苏省电力有限公司宿迁供电分公司, 江苏 宿迁 223800; 2. 上海金智晟东电力科技有限公司, 上海 200233)

摘 要:与电磁式电压互感器相比,电力系统中常用的电容式电压互感器存在诸如耐冲击电压强度高、造价较低以及维护成本及工作量小等优点,但仍存在一些常见问题,例如所占空间大,所需绝缘设计水平高(与高压直接接触),恶劣环境下绝缘失效等问题。针对这些问题,设计一种适用于 10 kV 及以下电压等级的非接触式耦合型电压互感器。首先基于电磁感应原理,利用电压互感器测量端与电缆内芯、输电线路、绝缘套管内部引出引入线等形成的耦合电容充当高压端电容,利用电压互感器测量端与大地间形成的电容充当低压端电容。然后理论分析电压互感器电容对频率特性的影响,通过有限元仿真计算并优化耦合式电压互感器测量端与高压输电线之间的电场和电容。最后在单相 10 kV 电压等级输电电缆上进行试验,结果表明所设计的互感器可以准确、实时的测量电压,能够为建立智能电力系统、电网实时在线监测、继电保护现场运行提供参考。

关 键 词:非接触式;电压互感器;频率特性;有限元数值仿真

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2023.03.022 中图分类号:TM451 文章编号:1673-9140(2023)03-0197-08

Research on a 10 kV voltage level contactless voltage transformer

LIU Gang¹, WANG Xiuru¹, LING Wanshui², WANG Kelong²

(1. Suqian Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Suqian 223800, China;

2. Shanghai Jinzhi Shengdong Power Technology Co., Ltd., Shanghai 200233, China)

Abstract: Compared with electromagnetic voltage transformer, capacitor voltage transformer commonly used in power system has many advantages, such as high impulse withstand strength, low production cost and low maintenance workload. However, some common problems that large space occupation, high insulation design level required (contact with high voltage directly), and insulation failure in severe environment are still exist in capacitor voltage transformer. In order to solve these problems, a non-contact capacitor-coupling voltage transformer suitable for 10 kV and below voltage level is designed in this paper. Based on electromagnetic induction principle, the coupling capacitors formed between the measuring end of voltage transformer and the inner core of cable, the transmission line or the wire inside the insulating bushing are designed as the high-voltage terminal capacitance. The capacitor formed between the voltage transformer measuring end and the earth is acted as the low-voltage terminal capacitance. Then the influence of voltage transformer capacitance on frequency characteristics is analyzed theoretically. The electric field and capacitance between the

收稿日期:2020-11-17;修回日期:2021-01-19

基金项目:江苏省软件专项(2017880);国家集聚计划(2015359)

通信作者:凌万水(1975—),男,博士,正高级工程师,主要从事智能配电网研究;E-mail:lingws2010@foxmail.com

measurement end of coupling voltage transformer and high voltage transmission line is calculated and optimized by finite element simulation. Finally, experimental test is carried out on a single-phase 10 kV power transmission cable. The results show that the designed voltage transformer is capable of measuring the voltage accurately in real time, which can provide references for the establishment of intelligent power system, real-time online monitoring of power grid and field operation of relay protection.

Key words: non-contact; voltage transformer; frequency characteristics; finite element numerical simulation

在电力系统中,电压互感器具有极其重要的职能。在电力系统稳定运行期间,电压互感器用于测量稳态电压,并结合电流互感器测量电流以计算电能^[1]。当电力系统发生故障时,电压互感器测量电压的故障向量(零序或负序电压),与电流互感器测得的电流向量共同为继电保护设备提供触发电力系统保护机制的依据^[2]。总体而言,电压互感器的主要作用如下:测量线路电压;与其他测量设备联合测量线路功率和负荷;在系统发生故障时保护线路内电气设备。通常,电压互感器的名义容量较小,仅为几到几十伏安,最大不超过 $1 \text{ kV} \cdot \text{A}$ ^[3]。目前,电力系统广泛采用的电压互感器主要有电容式电压互感器(capacitive voltage divider, CVT)和传统电磁式电压互感器(potential transformer, PT)。随着电力系统电压水平的不断提升,传统PT面临诸多问题,如绝缘难度增大、占用空间较大等^[4]。此外,在电力系统发生短路故障时,电压分量中存在大量高频分量,而传统PT的高频响应存在一定误差^[5]。与此不同,CVT通过电网高压电容和中压电容的分压来测量电压,从而降低了绝缘设计难度、减小了设备体积,并降低了设备成本。另外,CVT中的耦合电容器与电力系统载波通信接口相连,可直接用于电力系统的载波通信,降低了成本,简化了系统^[6-7]。因此,在220 kV及以上电压等级的电力系统中,CVT的应用已超过90%。而对于110 kV及以下电压等级的电压测量,尽管CVT可能不具备成本优势,但其绝缘设计难度低、体积较小等优势也使其在此领域得到广泛应用^[8]。

CVT的基本结构^[9]如图1所示。其中, C_1 为高压电容, C_2 为中压电容,T为中压互感器,P为保护电阻和保护间隙组成的保护设备,L为补偿电抗器, T_1 、 T_2 、 T_3 均为CVT低压输出端口,Z为防止谐振过电压阻尼器。

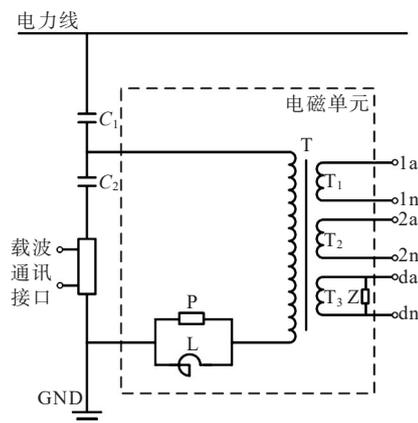


图1 CVT基本结构

Figure 1 Fundamental structure of CVT

CVT工作时,首先由高压电容 C_1 和中压电容 C_2 分压,将电力线的高电压 U_1 变为中等电压 U_2 ,故电容 C_2 上分得的电压为

$$U_2 = \left(\frac{C_1}{C_1 + C_2} \right) U_1 \quad (1)$$

随后,中压电容 C_2 测量获得电压 U_2 ,然后通过中间变压器 T_1 、 T_2 、 T_3 将其变换为较低的电压,直接供应给电气二次设备和继电保护设备^[10]。与电磁式电压互感器相比,电容式电压互感器能够防止由于铁芯饱和和高频谐振引起的测量电压波形畸变。

然而,由于采用了高压电容 C_1 和中压电容 C_2 进行一级降压,再由中压变压器T进行二级降压的测量方法,CVT测得的电压信号与一次侧实际高压信号之间会产生较长的时间延迟,导致两者之间的相位差较大。在电力线上出现瞬态过电压时,由于高压电容 C_1 直接受到高电压影响,高压电容 C_1 和中压电容 C_2 有可能因为瞬态过电压而发生绝缘损坏或击穿,甚至可能导致中间变压器绝缘失效和测量端仪器损坏^[11]。此外,外部环境、系统高频谐波和二次侧负载等因素的影响,也会导致CVT的等效电气参数发生变化,进而导致输出稳态电压偏移,产

生测量误差。

针对上述问题,本文设计了一种适用于 10 kV 及以下电压等级的非接触式电压互感器。这种非接触式电压互感器通常安装在可以用柱坐标系表示的电力设备上,即柱对称电力设备。通过电磁感应原理,处于电场中的导体(测量端口)在变化的电场中会产生感应电荷。通过测量感应电极相对于大地电势和电力线上实际电压之间的关系,可以获得电力线的实际电压值。本文结合测量原理和等效电路分析,研究了电压互感器的频率特性。随后,通过有限元仿真计算了非接触式电压互感器测量端与电力线之间的电场和电容关系,发现设计的电压互感器满足绝缘设计和测量需求。最后,通过在单相 10 kV 出线套管上进行试验,验证了所设计的互感器可以准确、实时地测量电力线上的电压。

1 非接触式电压互感器测量原理

1.1 互感器测量电压原理

本文设计的非接触式 CVT,通过将高压端与 CVT 测量端之间的有效测量面积作为高压电容,同时将互感器测量端的有效测量面积与接地外壳之间的电容作为低压电容,实现了电压的测量。在正常使用情况下,将 CVT 安装在电气设备上,其测量原理和等效电路如图 2 所示。

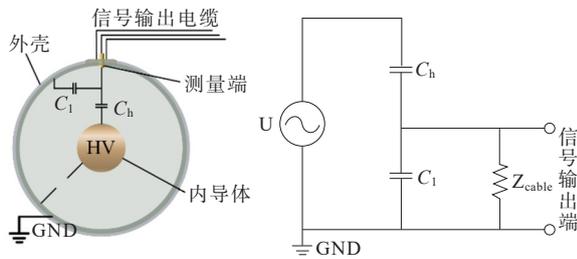


图 2 等效模型和等效电路

Figure 2 Equivalent model and circuit

图 2 中, U 为高压电极相对于大地的电位, Z_{cable} 为输出电缆的等效阻抗, C_h 为互感器测量端电极截面与高压电极之间的耦合电容, C_1 为互感器测量端有效测量端面与接地外壳之间的寄生电容(虽然测量端子侧面与接地外壳之间存在寄生电容,但是无

限长直导线产生电场与此面平行,故此电容并不参与测量过程)。由图 2 可知,高压侧等效阻抗为

$$Z_h = \frac{1}{j\omega C_h} \quad (2)$$

低压侧等效阻抗为

$$Z_l = \frac{Z_{cable}}{j\omega Z_{cable} C_1 + 1} \quad (3)$$

故电压互感器系统的传递函数可写为

$$H(j\omega) = \frac{U_{out}}{U} = \frac{j\omega C_h Z_{cable}}{j\omega(C_h + C_1)Z_{cable} + 1} \quad (4)$$

一般来说,电压互感器的工作状态分为以下 2 种情况。当 $j\omega(C_h + C_1)Z_{cable} \gg 1$ 时,电压互感器工作在频率较高或者电容较大的场合,由式(4)可知,此时互感器输出只与高压电容和低压电容有关,称为互感器的自调节工作状态或自积分工作状态。当 $j\omega(C_h + C_1)Z_{cable} \ll 1$ 时,电压互感器工作在频率较低或电容较小的场合,此时称为互感器的积分工作状态,具体工作原理如图 3 所示。

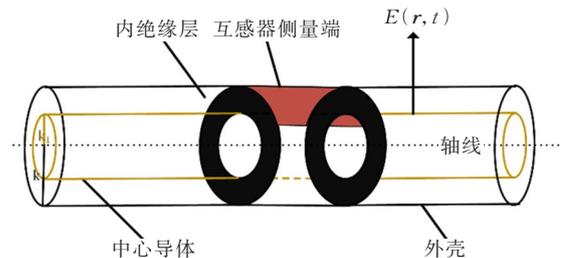


图 3 非接触式 CVT 测量电压原理

Figure 3 Voltage measuring principle of non-contact CVT

由图 3 可知,假设中心导体为无限长直导线,其相对于大地电位为 φ ,内绝缘层为良好绝缘体,其相对介电常数为 ϵ_r ,互感器测量端为金属薄片,测量端在与中心导体同轴的圆柱面,其面积为 S ,中心导体轴线距离外壳的距离为 k ,中心导体半径为 k_1 ,则由泊松方程和第一类边界条件可得:

$$\varphi(r, t) = \frac{1}{\epsilon_0 \epsilon_r F(r)} \cdot E(r, t) \quad (5)$$

其中, ϵ_0 为真空介电常数, $F(r)$ 为互感器测量端至中心导体的距离向量, $E(r, t)$ 为中心导体电位在互感器测量端面所在位置产生的电场强度。在此电场作用下,互感器测量端金属电极表面会出现感应电荷 Q 。此时在金属电极表面取一极小微元

dS ,其法向方向与电场 $E(\mathbf{r},t)$ 同向。则由高斯定理可知,在此面积微元上产生的感应电荷量为

$$\frac{dQ}{dt} = \int_S \epsilon_0 \epsilon_r \frac{dE(\mathbf{r},t)}{dt} dS \quad (6)$$

由式6可知,在面积微元上产生的感应电荷会随着中心导体电位在电压互感器测量端面位置产生的电场强度变化而变化。因此,感应电荷在与输出电缆连接的采样电阻 Z_{cable} 上产生的电压为

$$U_{\text{out}} = Z_{\text{cable}} \frac{dQ}{dt} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S Z_{\text{cable}} k_1}{k^2} \cdot \frac{d\varphi}{dt} \quad (7)$$

由式(7)可得中心导体电压为

$$U(t) = \frac{k^2}{\epsilon_0 \epsilon_r S Z_{\text{cable}} k_1} \int U_{\text{out}} dt \quad (8)$$

在本设计中,通过结合仿真计算和实际测量,发现CVT主要在微分工作状态下运行。实际中心导体电压可以通过后续的积分电路或微机计算得出。

在电力系统正常运行时,输电电缆或电气设备上的电压高次谐波成分较少。然而,当电力系统发生故障时,输电电缆或电气设备上的电压会出现突变,不再呈现周期性的正弦波,而是以高次谐波成分为主。尽管被测电压中存在较多的高频分量,但由于电容 C_h 和 C_l 的极小值,条件 $j\omega(C_h + C_l)Z_{\text{cable}} \ll 1$ 仍然成立。在这种情况下,CVT工作状态被称为微分状态,其输出正比于 dU/dt 。

1.2 仿真计算

在实际试验中,为了满足绝缘套管的要求,非接触式CVT需安装在绝缘套管上。因此,本文使用电磁场有限元软件COMSOL Multiphysics对绝缘套管、中心导体和CVT测量端进行建模,以计算互感器测量端引入绝缘套管电场的影响。这有助于验证互感器的结构设计是否符合绝缘套管的绝缘设计要求^[12]。仿真模型如图4所示。仿真以型号为AH JCTGZ-15/200的加长绝缘套管座为模型,套管总长度为191 mm,绝缘子串直径设为70 mm,套管外径设为40 mm,套管内径设为30 mm,中心导体直径设为8 mm。在模型中,套管材质选用环氧树脂,周围介质为空气,中心导体材质选用纯铜。仿真模型置于直径为10 m的球形区域内,该区域内部充满空气,且忽略了空间电荷对电场的影响。球

形边界被设定为电势为零的边界。因此,我们可以得出第一类边界条件为

$$\begin{cases} \varphi|_{\Gamma_0} = 0 \\ \varphi|_{\Gamma_m} = U \end{cases} \quad (9)$$

其中, Γ_0 为10 m的球形边界, Γ_m 为中心导体边界。

在仿真模型中,本文采用四面体作为基本单元对整个模型进行了网格划分。考虑到导线尺寸远小于整个空气域的尺寸,为了提高计算效率并减少软件运行时间,本文选择了局部细化的网格划分方法,以实现导线和测量端等复杂的小区域进行高精度划分。本文选择了最小网格尺寸为0.5 mm,以确保计算精度。对于尺寸较大且规则的空气域,采用了粗略的网格划分,以减少计算负担。因此,三维模型中空气域的最大网格尺寸可以设为50 mm。在保证一定精度的前提下,可以在一定程度上提高计算速度。

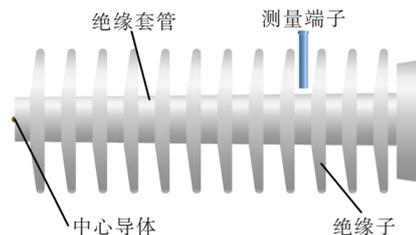


图4 仿真模型

Figure 4 Simulation model

仿真中,本文设定了绝缘套管中心导体电压为10 kV。在不引入和引入互感器测量端时的套管电场分布情况如图5所示。在未引入测量端时,靠近绝缘套管座内侧与绝缘套管外侧的电场强度约为55 kV/m,随着距离套管的增加,电场强度逐渐减小。然而,引入测量端使得互感器位置处的电场强度减弱,但在CVT测量端边缘,电场强度增强。经过计算分析,虽然引入CVT测量端对测量区域电场和套管座电场分布产生了一些畸变,但套管座外侧电场强度仅从CVT未引入时的52 kV/m降至约50 kV/m。这种畸变效应不会导致绝缘失效,且对CVT的测量影响较小,不会引起显著干扰。

为深入了解不同中心导体电压下引入CVT测量端对套管座电场强度的畸变效应,本文计算了中心导体电压在1 kV至10 kV范围内的情况,在不引入和引入CVT测量端的2种情况下,套管座的电场

强度如表 1 所示。根据表 1 可知,随着中心导体电压从 1 kV 增加到 10 kV,不论是否引入测量端子,套管座外侧的最大电场强度都增加。然而,当引入测量端口后,电场分布会发生不同程度的变化,且套管座外侧的最大电场强度会减弱,其减弱幅度最大约为 10%。

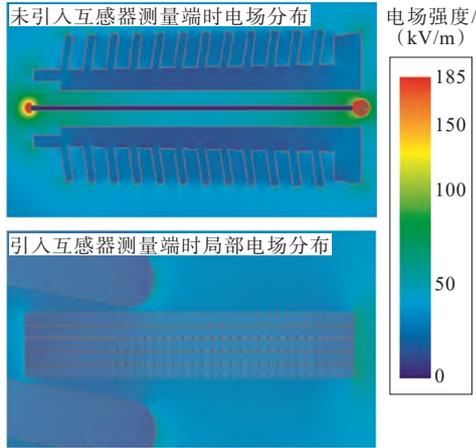


图 5 套管电场分布情况

Figure 5 Electric field distribution of casing

表 1 不同中心导体电压下的电场强度

Table 1 Electric field with different inner conductor voltages

中心导体电压/kV	电场强度/(kV/m)		中心导体电压/kV	电场强度/(kV/m)	
	未引入测量端子	引入测量端子		未引入测量端子	引入测量端子
1	4.91	4.82	6	30.01	27.67
2	9.82	9.54	7	34.48	31.94
3	14.70	13.54	8	39.64	37.17
4	19.81	18.79	9	44.25	41.84
5	24.57	22.68	10	52.13	49.61

然而,在 CVT 稳定工作情况下,CVT 与套管座之间的最大电场强度应小于中间介质的临界电场强度。在电力系统发生故障时,由于电路谐振等原因,套管座内的中心导体电压有可能高于额定工作电压数倍。在这种情况下,中心导体和 CVT 之间的电介质绝缘强度应远高于正常工况下的电场强度,以确保在电力系统发生瞬态过电压时,不会发生局部放电或由高压电极之间的短路引起的故障或事故^[13]。在选择电气套管材料时,若选用环氧树脂,经过计算可得知在中心导体电压为 10 kV 的情况下,套管上的最大电场强度约为 50 kV/m,远低于

空气的击穿场强(在均匀电场下约为 30 kV/cm)。因此,考虑到 CVT 的实际使用情况,其在绝缘性能方面表现良好,并有一定的裕量,足以满足绝缘设计的要求。

2 电压互感器测试

为了验证 CVT 的特性,本文搭建了一个实验平台,包括调压器、变压器、电力线和绝缘套管座。整个实验平台的示意如图 6 所示。在实验过程中,首先由调压器产生频率为 50 Hz、幅值可调的标准正弦电压波。这个标准正弦电压波经过变压器升压后,产生幅值在 2 kV 至 10 kV 范围内的电压,然后将这个电压输送到负载上。为了确保实验中负载电压的相位与调压器电压的相位一致,采用了纯阻性负载。CVT 的测量端子被固定在套管座上。

由于本文设计的非接触式 CVT 在微分区域工作,所以 CVT 的测量信号需要经过输出电缆连接到运算放大电路(放大测量信号)、积分电路(计算实际电压)和移相电路(调整信号相位),然后输入到示波器中进行观测。

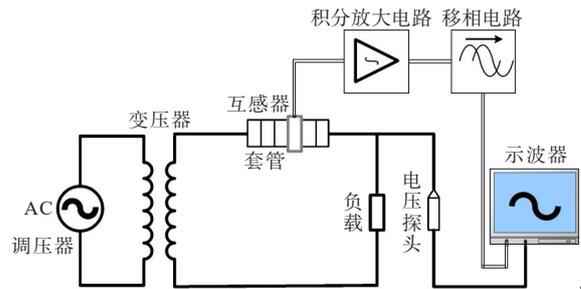


图 6 电压互感器标定与实验原理

Figure 6 Schematic diagram of voltage transformer calibration and experiment

实际负载电压经过电压探头后,再经过衰减比为 10:1 的衰减器传送至示波器上。所使用的电压探头型号为 Tektronix P6015A,其测量高压范围为 AC 1.5 kV-20 kV,带宽为 75 MHz,衰减比为 1 000:1。示波器的型号为 Tektronix TDS3032B,带宽为 300 MHz,采样率为 2.5 GS/s。在电压小于 10 kV 的情况下,高压探头的测量精度达到小于 1.5%。因此,本实验可以利用高压探头的测量结果对 CVT 进行标定和校准。

在实验开始时,调节调压器使变压器的二次侧电压幅值为8 kV。然后,调节移相电路,使CVT的输出波形几乎与高压探头的输出波形完全重合。通过比较确定CVT输出波形幅值与高压探头测量实际负载电压幅值,就能够确定CVT的衰减比。实验测量结果如图7所示。从图7可知,在电力线上的电压幅值为8 kV时,经过高压探头及衰减器衰减10 000倍后,其幅值约为0.8 V。而CVT的输出电压幅值约为0.6 V。此时CVT的波形几乎没有发生畸变,仍然是标准的正弦波。通过计算可得CVT的衰减比 $10\,000 \times 0.8 / 0.6 \approx 13\,333.33$ 。

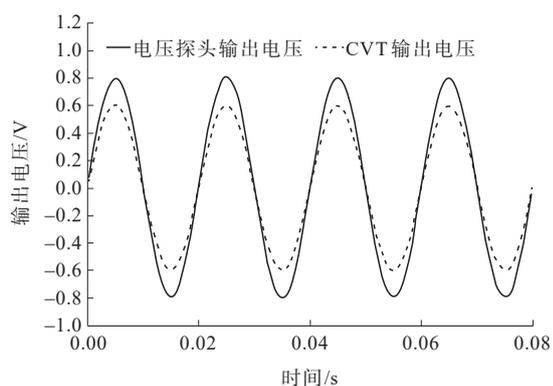


图7 电压互感器输出波形与高压探头输出波形

Figure 7 Output waveforms of CVT and high voltage probe

此外,可以观察到此时CVT测量得到的波形与电压探头测量得到的波形几乎是同相位的(实际相位滞后 $2n\pi$, n 取正整数)。这表明在这种情况下, CVT不仅能够准确测量电压的幅值和波形,还能够准确测量电压的相位(呈现周期性的滞后)。

为了验证这一点,本文通过调节调压器,使得变压器的二次侧电压幅值在2 kV至10 kV范围内变化。然后,使用电压探头和CVT来采集并记录在电压幅值为2~10 kV时CVT输出的波形。通过对比分析电压探头测量的波形与CVT测量的波形,计算CVT测量结果与实际电压信号之间的幅值误差为

$$\epsilon_{\text{amp}} = \frac{U_p - U_m}{U_p} \times 100\% \quad (10)$$

其中, U_m 为CVT衰减比乘以CVT输出电压之后计算得到的中心导体电压值, U_p 为电压探头衰减比乘以电压探头输出电压之后的中心导体电压值。实验数据如表2所示。

表2 电压探头和互感器测量结果

Table 2 Voltage measuring results of voltage probe and voltage transformer

电压探头测量计算得到 电压/kV	互感器测量计算得到 电压/kV	幅值误差/ %
2	1.997	0.15
3	2.992	0.27
4	3.991	0.23
5	4.983	0.34
6	5.986	0.23
7	7.011	-0.16
8	8.015	-0.19
9	9.017	-0.19
10	10.024	-0.24

表3 电压探头和互感器测量得到电压相位差

Table 3 Phase difference of voltage measured by probe and voltage transformer

电压幅值/kV	相位差/分	电压幅值/kV	相位差/分
2	51	7	37
3	48	8	0
4	34	9	36
5	39	10	42
6	45		

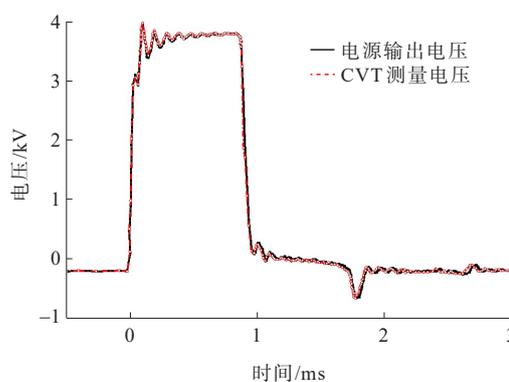


图8 高压发生器输出电压与CVT测量电压波形

Figure 8 Voltage waveforms of high voltage source output and CVT output

为了测试设计的CVT的频率特性,本文采用了一台自制的固态Marx高压发生器,将图6中的调压器和变压器替换为高压发生器。高压发生器的输出波形如图8中的实线所示。其上升时间约为0.07 ms,脉宽约为1 ms。在输出电压达到最大值附近,高压发生器的输出呈现出典型的震荡特性,其

震荡周期约为10 kHz。由图8中的虚线可知,无论是在高压发生器输出电压上升过程中还是在电压波形达到最大值附近的震荡期间,设计的CVT都能够基本无误差地跟踪测量电压的波形和幅值。因此,可以得知,CVT可以准确测量的电压频率至少约为10 kHz,能够准确测量的瞬态电压上升率至少为 $4/0.7 \text{ kV/ms} \approx 57 \text{ kV/ms}$ 。

综合表2、3的数据可以看出,在幅值和相位测量方面,自行设计的非接触式CVT测量的电压与Tektronix P6015A电压探头测量的电压偏差较小。设计的CVT与实际电压之间的幅值误差不超过5%,相位误差不超过50分。此外,自行设计的CVT能够准确测量的电压频率至少约为10 kHz,能够准确测量的瞬态电压上升率至少约为 57 kV/ms 。因此,可以得知,自行设计的CVT可以精确地测量实际中心导体电压。

3 互感器测量误差与特性分析

由自行设计CVT实验结果可知,考虑电压互感器的绝缘性能和测量精度问题,本文设计的CVT能够有效的测量10 kV及以下电力系统单相电路电压的幅值和相位。但是,本文设计CVT也存在一些测量误差和缺点,主要来源如下。

1) 仿真分析表明,在引入CVT之后,CVT测量端口金属导体对电气设备的电压测量区域电场分布产生一定影响,但仿真计算显示这种区域电场分布的畸变对测量结果几乎没有影响。

2) 本文仅在实验室环境中对CVT进行了标定和校准。然而,在实际应用中,电缆长度等参数的变化可能会影响电压测量的准确性。因此,在现场安装和测量时,需要对CVT进行重新标定。

3) 实际应用中,设计的CVT难免会受到来自变压器等现场设备的电磁干扰。例如,多路输出的变电站内,其他输出线路故障引起的断路器跳闸和重合闸过程可能会产生强电磁场干扰和过电压,这可能导致CVT内信号处理模块停止工作,或者使测量通道输出尖峰脉冲,进而影响测量电压的幅值或波形。尽管这些电磁干扰可通过信号处理电路直接引入测量误差,但采取电磁屏蔽措施可以有效

减弱电磁干扰对测量结果的影响。

4) 环境变化等因素也可能对CVT产生影响。例如,在环境湿度较大时,高压电容和低压电容的值可能会发生变化,导致CVT的衰减比发生变化,从而引入测量误差。因此,将CVT封装在绝缘的安装座内可以降低这种影响。

4 结语

本文综合考虑了绝缘水平、电气设备体积等多方面因素,设计了一种适用于10 kV及以下电压等级的非接触式耦合型CVT。文中分析了CVT的频率特性,详细介绍了非接触式测量电压的原理,并进行了CVT场强分布的仿真计算。结果表明,所设计的非接触式耦合型电容式CVT能够满足绝缘设计的要求。在单相2~10 kV的电压等级下,进行了CVT的标定与校准实验。通过对互感器电压测量误差的分析,得出以下结论:

1) 所设计的非接触式耦合型电容式CVT的衰减比为13 333.33:1;

2) 该CVT能够准确、实时地测量10 kV及以下电压等级的单相电压;

3) 所设计的CVT在测量电压幅值方面的误差不超过5%,电压相位误差不超过50分,且可准确测量的电压频率至少约为10 kHz。

通过本文设计的非接触式CVT,有效地解决了10 kV及以下电压的精确测量问题,为电力系统电压的非接触式测量、电气参数在线监测、电气设备故障分析以及继电保护设备提供了创新的解决方案。

参考文献:

- [1] 朱梦梦,王登,廖耀华,等.直流电子式电压互感器延时特性分析与现场测试[J].电力系统保护与控制,2023,51(3):126-132.
ZHU Mengmeng, WANG Deng, LIAO Yaohua, et al. Analysis and on-site testing of delay characteristics of DC electronic voltage transformers[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 126-132.
- [2] 沈泽亮,汪金刚,王谦,等.一种基于低频窄带扫描的电磁式电压互感器杂散电容测量与精确建模方法[J].电

- 工技术学报,2023,38(8):2211-2221.
- SHEN Zeliang, WANG Jingang, WANG Qian, et al. A stray capacitance measurement and accurate modeling method for electromagnetic voltage transformers based on low-frequency narrowband scanning[J]. Journal of Electrical Engineering, 2023, 38(8): 2211-2221.
- [3] 张超, 王宾, 张海, 等. 中性点直接接地电网单相串联铁磁谐振检测与类型辨识[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(19): 172-179.
- ZHANG Chao, WANG Bin, ZHANG Hai, et al. Detection and type identification of single-phase series ferroresonance in neutral directly grounded power grids[J]. Power System Automation, 2022, 46(19): 172-179.
- [4] 王香芳. 765 kV 电容式电压互感器的研究和开发[J]. 电力电容器, 2006(1): 11-12+17.
- WANG Xiangfang. Research and development of 765 kV capacitive voltage transformer[J]. Power Capacitor, 2006(1): 11-12+17.
- [5] 周洁莲, 吴少珍. 防止电压互感器的铁磁谐振过电压的有效措施[J]. 高电压技术, 2001, 27(S1): 53-55.
- ZHOU Jielian, WU Shaozhen. Effective measures to prevent ferromagnetic resonance overvoltage of voltage transformers[J]. High Voltage Technology, 2001, 27(S1): 53-55.
- [6] 戚佳金, 陈雪萍, 刘晓胜. 低压电力线载波通信技术研究进展[J]. 电网技术, 2010, 34(5): 161-172.
- QI Jiajin, CHEN Xueping, LIU Xiaosheng. Research progress in low-voltage power line carrier communication technology[J]. Power Grid Technology, 2010, 34(5): 161-172.
- [7] 刘述钢, 刘宏立. 低压电力线载波通信的无源耦合电路设计[J]. 电子技术应用, 2011, 37(4): 98-101+105.
- LIU Shugang, LIU Hongli. Passive coupling circuit design for low-voltage power line carrier communication[J]. Electronic Technology Application, 2011, 37(4): 98-101+105.
- [8] 杨鸣, 熊钊, 司马文霞, 等. 电磁式电压互感器“低频过电压激励—响应”逆问题求解[J]. 电工技术学报, 2021, 36(17): 3605-3613.
- YANG Ming, XIONG Zhao, SIMA Wenxia, et al. Solution of the inverse problem of "low-frequency overvoltage excitation to response" for electromagnetic potential transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(17): 3605-3613.
- [9] 代双寅, 刘书铭, 赵麒哲, 等. 基于 CVT 电容电流的谐波电压测量方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 141-147.
- DAI Shuangyin, LIU Shuming, ZHAO Qizhe, et al. Harmonic voltage measurement method based on CVT capacitor current[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 141-147.
- [10] 陈建民, 邱智勇, 韩学军. 大电网继电保护技术应用与发展[J]. 华东电力, 2007(11): 7-14.
- CHEN Jianmin, QIU Zhiyong, HAN Xuejun. Application and development of relay protection technology in large power grid[J]. East China Power, 2007(11): 7-14.
- [11] 刘东超, 陈志刚, 崔龙飞. 基于物联网的环网柜在线监测技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(20): 60-67.
- LIU Dongchao, CHEN Zhigang, CUI Longfei. Online monitoring technology of a ring network cabinet based on the internet of things[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(20): 60-67.
- [12] 王建林. 同走廊交直流线路混合电场的计算研究[D]. 成都: 西华大学, 2018.
- WANG Jianlin. Calculation and research on hybrid electric field of AC and DC lines in the same corridor[D]. Chengdu: Xihua University, 2018.
- [13] 朱梦梦, 束洪春, 何兆磊, 等. 接地极直流电流互感器宽频特性现场试验与分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(6): 166-172.
- ZHU Mengmeng, SHU Hongchun, HE Zhaolei, et al. Field test and analysis of broadband characteristics of DC current transformer on earth electrode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(6): 166-172.
- [14] 刘彬, 叶国雄, 郭克勤, 等. 电子式互感器性能检测及问题分析[J]. 高电压技术, 2012, 38(11): 2972-2980.
- LIU Bin, YE Guoxiong, GUO Keqin, et al. Performance testing and problem analysis of electronic transformers[J]. High Voltage Technology, 2012, 38(11): 2972-2980.
- [15] SHAHPARNIA S, RAMAHI O M. Simultaneous switching noise mitigation in PCB using cascaded high-impedance surfaces[J]. Electronics Letters, 2004, 40(2): 98-100.