

宽频暂态电场测量装置的研究

董乘甫^{1,2}, 熊振中^{2,3}, 谢施君², 郑连清¹, 王若瀚¹, 向 军⁴

- (1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044;
2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041;
3. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 4. 国网攀枝花供电公司, 四川 攀枝花 617000)

摘要: 暂态过电压是影响电网安稳运行的重要因素之一,对暂态过电压的准确测量具有十分重要意义。为此,基于空间电场效应的测量方式设计了一种宽频暂态电场测量装置。首先,介绍了基于非接触式电容互感器测量电场的原理;其次,完成了外部传感器结构及内部电路设计;最后,在实验室条件下对研制的测量装置进行了工频和冲击电压试验。结果显示,该测量装置的测量误差在5%以内,同时测量装置频率响应在5 Hz~5 MHz间较为平坦,对于工频电压及1.2 μs/50 μs的标准雷电全波可有效捕捉。

关键词: 过电压测量; 电场测量; 空间电场效应; 耦合电容; 频率响应

中图分类号: TM727.2 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2020)03-0012-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.03.003

Research on Measuring Device for Wideband Transient Electric Field

Dong Chengfu^{1,2}, Xiong Zhenzhong^{2,3}, Xie Shijun², Zheng Lianqing¹, Wang Ruohan¹, Xiang Jun⁴

- (1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan, China; 4. State Grid Panzhihua Electric Power Supply Company, Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: Transient overvoltage is one of the important factors affecting the stable operation of power grid, and the accurate measurement of transient overvoltage is of great significance. For this reason, a measuring device for wideband transient electric field is designed based on the measurement method of space electric field effect. Firstly, the principle of measuring the electric field based on non-contact capacitive transformer is introduced. Secondly, the design of its external structure and internal circuit is completed. Finally, under laboratory conditions, power frequency and impulse voltage tests are performed on the developed measuring device. The results show that the measurement error of the proposed measuring device is within 5%, and its frequency response covers 5 Hz and 5 MHz. It can effectively capture the power frequency voltage and the standard lightning full wave of 1.2 μs/50 μs.

Key words: overvoltage measurement; electric field measurement; space electric field effect; coupling capacitance; frequency response

0 引言

电力系统故障统计表明,电网过电压是引发设备事故的重要原因之一,而已知的过电压种类多样,有波前时间为纳秒级的快速暂态过电压(very fast transient overvoltage, VFTO)、纳秒级的雷电过电压、

数百纳秒级的操作过电压和毫秒级的工频过电压^[1-2]。随着电网的迅速建设和发展,虽然已经有大量的设备用于过电压的监测与防护,但过电压现象依然时常发生。为了电网的安稳运行,对过电压的监测和分析具有十分重要的意义。

近年来,国内外学者对过电压的监测展开了许多研究工作,其中最传统的测量方法是基于分压器

的过电压监测。该方法按照分压器类型分为电阻式、电容式、阻容式等^[3-5],然而分压器属于离线设备,往往难以在运行中应用。文献[6]中又提出基于套管末屏的过电压测量方法,但不接地的测量方式又会带来许多安全隐患。部分学者提出了基于新型传感器的过电压监测方案,如利用光纤电压传感器^[7-12]。但这种测量方式因为其测量的特殊性,极易受到外界环境和机械条件的影响,多数仍处于调试阶段。除此之外,还有应用非接触式电容电压互感器的过电压测量方法,相比而言,该方法能够实现在线监测,同时便于应用,因此在实际的过电压检测中逐步得到应用。文献[13]中提出一种非接触式传感器用以测量高压架空输电线路的过电压。该方法主要利用传感器与输电线路之间存在的杂散电容与传感器分压电容构成电容分压器,替代传统方式获取架空输电线路的电压波形。但此方法中的杂散电容易受环境影响而变化,因此测量精度一般。

基于上述研究现状和应用需求,下面从基于空间耦合电容分压的过电压测量方法出发,运用电路设计及传感器结构优化拓宽其测量频带,并在实验室条件下对其雷电冲击特性进行了试验,最终设计一种新型的测量装置。

1 电场测量方法

1.1 基本原理

所研究的暂态电场测量装置实际是通过一平行电极板放置在空间电场中获得感应电压信号,从而精确测量电场,进行电压的监测。其测量原理如下。

如图1电场测量示意图所示,将一平行板电容器放置在电场强度 $e(t) = E_m \sin \omega t$ 的正弦电场中,其两板之间的感应电流 i_c 为

$$i_c(t) = \frac{dq(t)}{dt} = \omega \cdot \epsilon_0 \cdot A \cdot E_m \cdot \cos \omega t \quad (1)$$

式中: ϵ_0 为真空介电常数, F/m; A 为极板表面积, m^2 ; E_m 为电场强度幅值, V/m。

取平行板之间放置的外部测量电容器的电容值为 C_B , 则该电容器在电场 E 的影响下,其电势的大小为

$$u_c(t) = \frac{1}{C_B} \int i_c(t) dt \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)则有

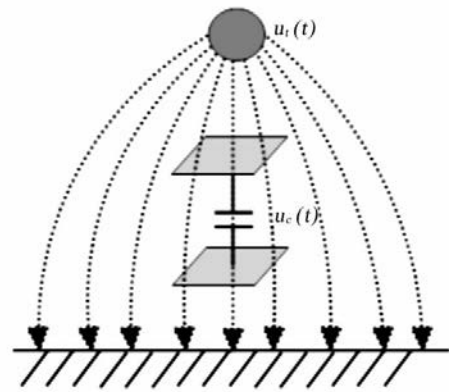


图1 电场测量

$$u_c(t) = \frac{\epsilon_0 A}{C_B} E_m \sin \omega t \quad (3)$$

根据式(3)设转换系数 k_E , 令

$$k_E = \frac{\epsilon_0 \cdot A}{C_B} \quad (4)$$

代入式(3)可得

$$u_c(t) = k_E \cdot e(t) \quad (5)$$

已知在2个导体之间产生的电场 $e(t)$ 取决于电势差 $u(t)$ 的大小。在2个电极是平行板且间隔距离 d 的特定情况下,令几何常数 k_G 为 $1/d$ 。它们之间的关系可表示为

$$E(t) = k_G \cdot u(t) \quad (6)$$

结合式(5)和式(6),可得到

$$u_c(t) = k_E \cdot k_G \cdot u(t) \quad (7)$$

考虑到电场传感器与测量设备之间会存在一定的电压增益 G_V 以适应采集的要求,测量设备最终获取的电压 $u_{c0}(t) = G_V \cdot u_c(t)$ 。最终计算得到平行板两端施加的电压 $u(t)$ 为

$$u(t) = \frac{u_{c0}(t)}{G_V \cdot k_E \cdot k_G} \quad (8)$$

因此即可通过测量电容感应得到的电压准确反映出电场变化情况,从而实现对过电压的在线监测。同时,因为电场变化是基于工频电压的基础上,所以无需得知常数 G_V 、 k_E 、 k_G 就足以验证电压波形变化的情况。但若得到准确的测量数值,考虑到现场复杂电场情况,必须首先进行工频电压试验进行校准以确定变比常数。

1.2 电路设计

测量示意图如图2所示, B_1 、 B_2 为金属极板,将电压加在两金属极板上后可产生如图1所示的电场; C_2 为测量设备电容; R_2 为测量设备输入电阻;

C_1 、 R_1 和 C_3 、 R_3 分别为测量装置上下两端和 B_1 、 B_2 之间空气间隙形成的电容和电阻。如果直接使用示波器测量 C_2 端电压,此时 R_2 的阻值为兆欧级,而空气间隙形成的 R_1 、 R_3 可达吉欧级甚至更大,为了做到阻抗匹配,不得不增大设备的输入电阻 R_2 以匹配 R_1 、 R_3 。

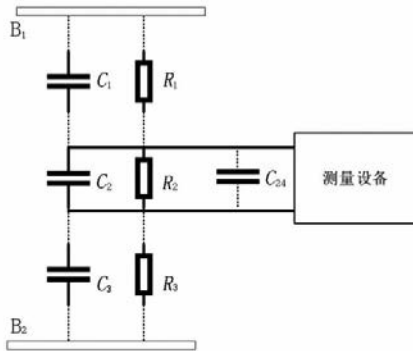


图2 直接测量

在采集设备输入端并联电容 C_{24} ,可有效改善跟随器在 50 Hz ~ 5 MHz 范围变化时的输出响应特性。如图 3 所示,在输入幅值为 8.2 V 的正弦波电压时,随着频率的升高,跟随器输出电压在 C_{24} 取不同的电容值时而有所不同。在选择适当的电容值时,跟随器输出的幅频特性会得到改善,减小信号失真,保持一致的输入输出比。

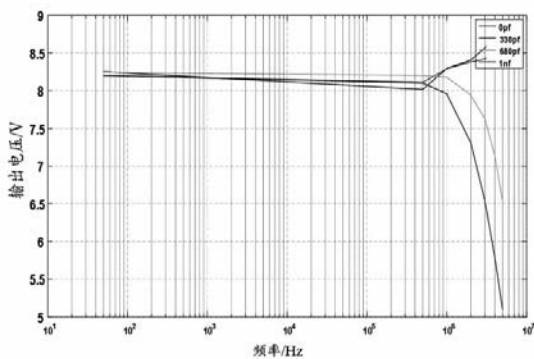


图3 C_{24} 取不同电容值时的频率响应

1.3 结构设计

根据前述理论,测量装置的传感器部分设计为两块平行金属板所构成的电容。考虑到测量时外界电磁干扰问题以及使用的便利性,因此将该测量装置的结构设计成圆筒形结构,如图 4 所示,其中顶盖(不锈钢材质)作为平行金属板电容的上极,圆筒(不锈钢材质)和底座(不锈钢材质)的组合作为平行金属板电容的下极,在顶盖和圆筒之间添加环氧树脂材质的绝缘介质。另外,测量电路板固定在筒

中连接柱处,以达到屏蔽外部电磁干扰的作用。



图4 装置成品

2 测量装置试验结果分析

2.1 工频电压试验

首先,对测量装置进行工频高压试验,以检验测量装置在工频条件下的运行情况,同时考虑现场电场分布的复杂情况,工频试验可以更好地获取装置的测量变比。

工频电压测量原理图如图 5 所示。图中左侧框中所示为工频高压发生器,试验变压器可输出工频高压 u_1 。随即在施加电压 u_1 的两金属极板 B_1 、 B_2 间就会产生稳定的工频电场。测试装置 C_2 同样置于 B_1 、 B_2 之间,会在电场中感应出电压 u_2 。通过测量 u_2 的大小,即可以反推出 u_1 的大小。

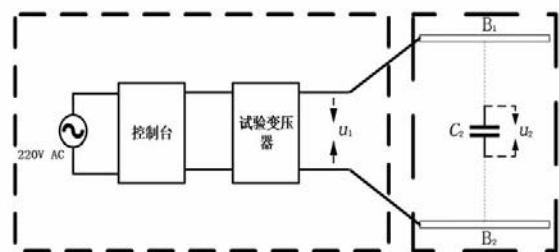


图5 工频电压试验电路

工频试验的其中一组测量结果如图 6 所示。从图中可以看出,工频试验结果较为理想,可准确反映跟随电压变化情况。对图 6 数据进一步做归一化处理,得到的结果如图 7 所示。试验结果显示,两波形归一化结果十分吻合,测量装置的工频跟随特性良好。

随后进行了多组试验,计算其变比结果,其变化趋势如图 8 所示,变比基本维持在 5500 左右。

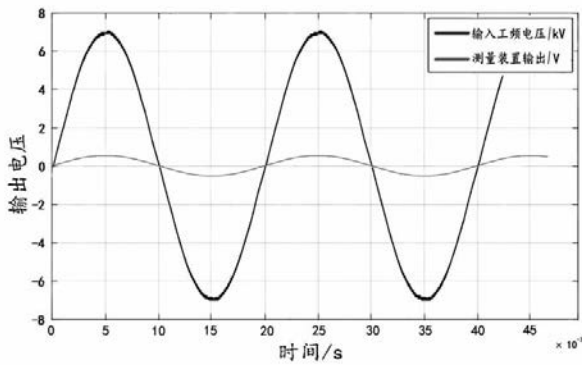


图6 工频试验结果

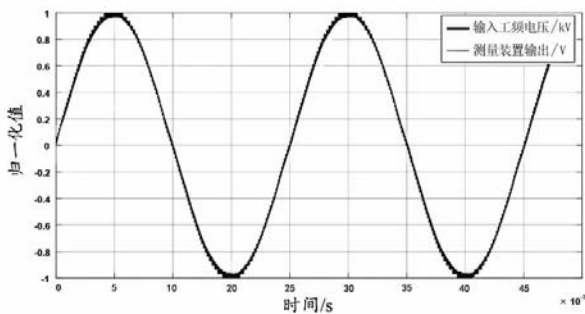


图7 归一化处理结果

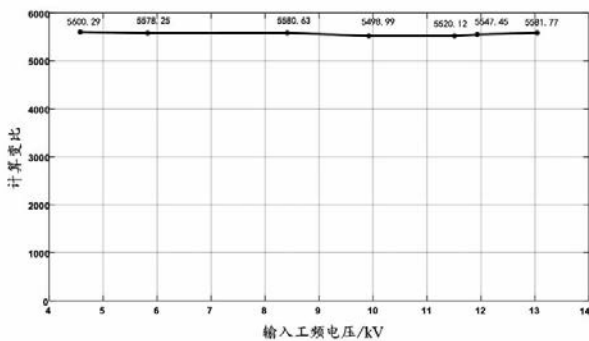


图8 工频试验变比变化情况

2.2 冲击电压实验

在实验室条件下对测量装置进行了冲击电压试验。

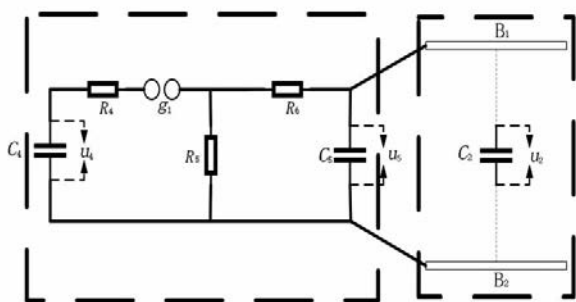


图9 冲击电压测量原理

整体测量系统如图9所示,左侧虚线框中为冲击电压发生器等效电路图,电容 C_4 在初始时刻即存

在电压 u_4 , 发生器工作时, C_4 上的电荷通过球隙 g_1 放电, 在电容 C_2 上产生标准雷电冲击电压 u_5 , 然后将该电压通过导线引到右侧虚线框所示的 B_1 、 B_2 所构成的金属极板上。此时, 即在 B_1 、 B_2 之间产生跟随 C_2 电压变化的电场。与工频试验同理, 在获得该设备的测量变比之后, 即可通过测量 u_2 的电压, 计算出 u_5 的电压, 达到测量的目的。

由此可见, 在过电压的测量中, 该方法可以无需与高压侧有任何电气接触而获得被测端的电压, 具有安全可靠的性能。

2.3 实验结果及分析

选取一组冲击电压下的测量结果如图10所示, 图中较深部分为高压探头输出原始电压波形(单位为kV), 较浅部分为测量装置输出的感应电压波形(单位为V)。原冲击电压发生器输出的电压波形波前时间为 $1.2 \mu\text{s}$, 半峰值时间等于 $50 \mu\text{s}$ 的标准雷电冲击全波。归一化后的结果如图11所示, 从图中可看出两组电压波形变化趋势基本一致, 可见测量结果理想, 感应电压的输出能够跟随冲击电压的波形。

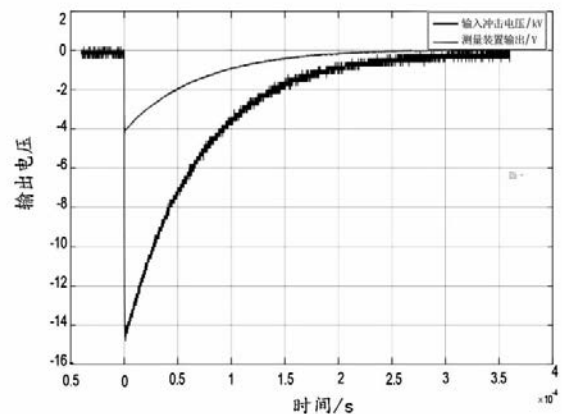


图10 冲击电压测量结果

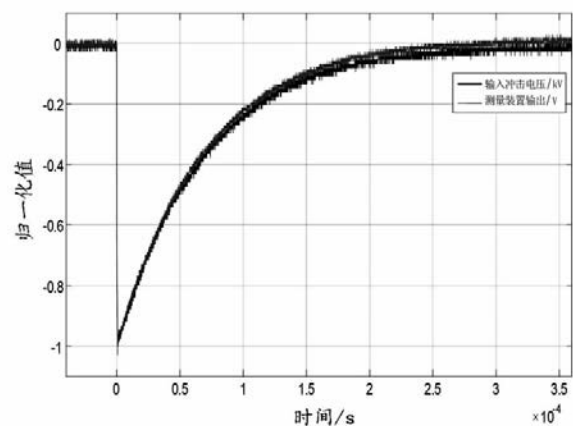


图11 归一化结果

在相同条件下进行了多组冲击电压试验,最终从各组试验数据计算出的变比值情况可以看出,随冲击电压的提升,计算变比略有变化,但基本维持在5500左右,整体误差不超过5%,同时与工频试验结果相同。结合上述分析可知,在冲击电压试验中,所设计的测量装置能够满足很好的测量精度,且灵敏度也非常理想。

3 结 语

根据空间耦合电容分压的过电压测量方法,设计了一种新的测量装置,并对电场测量原理、信号获取电路和外部结构等进行了论述,结合试验分析,得到了以下基本结论:

1) 该测量装置与传统过电压测量设备相比,其与高压侧不含任何电气接触,且结构简单,具有较强的安全性。

2) 装置测量精度较高,应用在工频电压获取的测量变比,整体测量误差不超过5%,能够有效地反映监测电压变化情况,且跟随性良好。

3) 频率响应在5 Hz ~ 5 MHz 较为平坦,测量频带较宽,可以满足工频电压到高频率的雷电冲击电压的测量。理论上可适用于电力系统各电压等级的过电压测量。

参考文献

[1] 刘振亚. 特高压交流输电系统过电压和绝缘配合[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.

[2] 曾嵘, 周旋, 王泽众, 等. 国际防雷研究进展及前沿述评[J]. 高电压技术, 2015, 41(1): 1-13.

[3] 马连英, 曾正中, 安小霞, 等. 一种用于测量快前沿高压脉冲的电阻分压器[J]. 电工电能新技术, 2010, 29

(1): 58-61.

[4] 高景明, 刘永贵, 杨建华. 一种电容补偿型高压电容分压器的设计[J]. 高电压技术, 2007, 33(6): 76-79.

[5] 周凯, 张涛, 董秀成, 等. 基于电容分压的配电网过电压在线监测[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(21): 86-89.

[6] 司马文霞, 兰海涛, 杜林, 等. 套管末屏电压传感器响应特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2006(21): 172-176.

[7] Kumada A., Hidaka K. Directly High-voltage Measuring System Based on Pockels Effect[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1306-1313.

[8] 李开成, 胡为兵, 刘建峰. 基于光电电压互感器的电压实时相位测量方案的研究[J]. 高压电器, 2008, 44(1): 34-36.

[9] 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.

[10] 谢施君, 汪海, 曾嵘, 等. 基于集成光学电场传感器的过电压测量技术[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2929-2936.

[11] Shijun Xie, Yu Zhang, Huaiyuan Yang. Application of Integrated Optical Electric-field Sensor on the Measurement of Transient Voltages in AC High-voltage Power Grids[J]. Applied Sciences, 2019, 9(9): 1951.

[12] S. Xie, S. Su, Y. Zhang. Field Measurement of Lightning Transient Voltage in Substations Using Optical Electric Sensors[J]. CIGRE, 2018, PS2, C4-208.

[13] 杜林, 常阿飞, 司马文霞, 等. 一种非接触式架空输电线路过电压传感器[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(11): 93-97.

作者简介:

董乘甫(1996), 硕士研究生, 研究方向为基于变压器套管过电压监测技术。

(收稿日期: 2020-03-30)

绿色低碳是 能源转型发展的根本理念