

# 基于分布电容的暂态电压传感器研制

唐峰, 谢俊文, 刘顺桂

深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000

## Development of Transient Voltage Sensor Based on Distributed Capacitance

TANG Feng, XIE Jun-wen, LIU Shun-gui

Shenzhen Power Supply Co, Ltd, Shenzhen, Guangdong 518000

**ABSTRACT:** The safe operation of power system and equipment is threatened by overvoltage at any time, the existing voltage measuring device, in the substation, cannot meet the requirements of transient overvoltage measurement. In this paper, a transient voltage sensor based on distributed capacitance is proposed. The high arm of the sensor is composed of distributed capacitance C1, which is between the high voltage conductor and the induction electrode. High arm and low arm capacitance C2 series to achieve divider. Through the analysis of the equivalent model of the sensor divider circuit, the influence factors of its frequency characteristics are obtained. On the self-made platform, the performance of the sensor was tested and the test results were obtained. The amplitude-frequency characteristic curve of the sensor is relatively flat within 30Hz~1MHz, and the ratio is relatively stable under power frequency and impulse high voltage, which meet the requirements of the full wave measurement of the transient voltage.

**KEY WORD:** distributed capacitance; sensor; frequency characteristics; ratio

**摘要:** 广泛存在的过电压时刻威胁着电力系统以及设备的安全运行, 而变电站现有的电压测量装置不能满足暂态过电压的测量要求。对此, 本文提出一种基于分布电容的暂态电压传感器, 利用高压导体与感应极板之间的分布电容 C1 作为高压臂, 与低压臂电容 C2 串联, 从而实现分压。通过对传感器分压电路的等效模型进行分析, 得到其频响特性的影响因素。搭建平台对传感器进行性能测试, 测试结果表明, 传感器幅频特性曲线在 30Hz~1MHz 内较为平坦, 在工频和冲击下的分压比基本相同, 满足暂态电压全波测量的要求。

**关键词:** 分布电容; 传感器; 频响特性; 分压比

## 1 引言

电力系统过电压是威胁电力设备以及系统

安全运行的重大隐患<sup>[1]</sup>。为进一步保护系统和设备, 对过电压产生机理以及危害程度进行研究十分必要, 而研究的首要任务就是对过电压进行准确测量。目前, 系统中运行的各类电压互感器高频特性较差, 无法满足变化速度较快的暂态过电压的测量要求。故需研制频带宽度较大的传感器, 实现对电力系统中暂态过电压的测量。

为此, 国内外学者已展开部分工作, 测量方法大多采用电容分压式。清华大学以及华北电力大学通过手窗将感应电极置于 GIS 腔体内, 利用导电杆与感应电极间形成的分布电容作为高压臂, 再在低压端串入大电容实现分压<sup>[2-4]</sup>。由于感应电极安装在 GIS 内, 使得此方法不适用于其他位置的过电压测量。此外, 华北电力大学还提出一种基于套管末屏的测量方法, 将变压器套管末屏通过大电容接地来实现分压<sup>[5]</sup>, 但由于套管末屏未直接接地, 给设备的安全运行带来了隐患。重庆大学曾提出一种非接触式架空输电线路测量方法, 将感应极板置于架空输电线路下方, 利用导线与极板间的分布电容作为高压臂<sup>[6]</sup>。利用此方法研制的传感器不与一次设备连接, 有较高的安全性。但重庆大学在研制过程中, 没有将传感器在高低频下的分压比进行对比实验, 未能充分说明其频率特性。

针对上述不足, 本文将在非接触式架空输电线路测量方法的基础上, 提出一种基于分布电容的暂态电压传感器, 把电压测量对象拓展到输电线路以外的高压设备。通过对传感器的频率特性分析, 得到其高频特性和低频特性的影响因素。最后在实验室及现场环境下, 对传

传感器各项性能进行实验测试。

## 2 暂态电压传感器工作原理及结构设计

本文提出的基于分布电容的暂态电压传感器，工作原理及结构设计如图 1 所示。利用高压导体与感应极板之间的分布电容  $C_1$  作为高压臂，在感应极板与地之间串入电容  $C_2$  作为低压臂，以此实现电容分压。采用同轴线缆将极板上的电压信号传输至后端匹配阻抗，经后端匹配阻抗再次分压后，输入到采集装置。

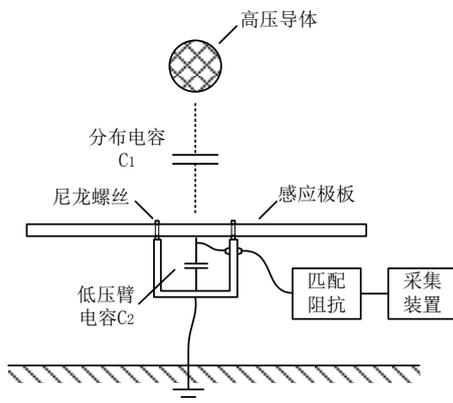


图 1 传感器工作原理及结构设计示意图

传感器结构主要包括感应极板、低压臂电容、传输电缆和后端匹配阻抗。感应极板通过尼龙螺丝与底座隔离，并固定在底座上，底座通过接地线完成接地。低压臂电容一端接于感应极板，一端通过底座接地。感应极板通过一个  $50\ \Omega$  匹配电阻与传输电缆连接，传输电缆另一端接于后端匹配阻抗。

## 3 传感器等效模型及频率特性分析

根据传感器工作原理示意图，可将传感器电路等效为如图 2 所示电路。 $L_1$ 、 $C_1$  为高压臂电感、电容， $L_2$ 、 $C_2$  为低压臂电感、电容， $R$  为  $50\ \Omega$  匹配电阻， $R_3$ 、 $C_3$  为二次阻容分压系统的高压臂电阻、电容， $R_4$ 、 $C_4$  为采集装置输入电阻、电容。

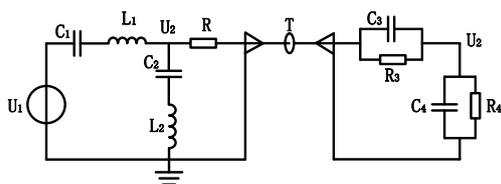


图 2 传感器等效电路图

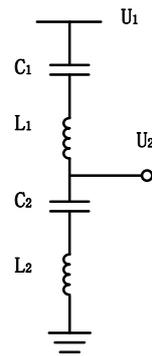


图 3 高频下等效电路图

高频下，后端二次阻容分压元件的阻抗远大于一次分压系统，可将后端电路视为开路。而一次分压系统中存在的杂散电感在高频下的感抗较大，不可忽略。最后得到高频下等效电路如图 3 所示。

由高频下等效电路可以得到系统传递函数为

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{(1 - \omega^2 L_2 C_2) C_1}{C_1 + C_2 - \omega^2 C_1 C_2 (L_1 + L_2)} \quad (1)$$

由上式可知，传递函数存在两个谐振点。考虑所需分压比较大， $C_2$  取值将远大于  $C_1$ ，得到谐振点对应的两个角频率为

$$\omega_1 = \sqrt{\frac{1}{L_2 C_2}} \quad (2)$$

$$\omega_2 = \sqrt{\frac{(C_1 + C_2)}{(L_1 + L_2) C_1 C_2}} \approx \sqrt{\frac{1}{(L_1 + L_2) C_1}} \quad (3)$$

由于无法求得  $L_1$ 、 $L_2$  的准确值，在此不对两个角频率的大小做对比。但由式 (2)、(3) 可知，电感、电容值越小，传感器的高频截止频率越高。

低频下， $L_1$ 、 $L_2$  的感抗远小于  $C_1$ 、 $C_2$  的容抗， $C_3$ 、 $C_4$  的容抗远大于  $R_3$ 、 $R_4$  的阻抗，故可将  $L_1$ 、 $L_2$  和  $C_3$ 、 $C_4$  忽略，得到低频下等效电路如图 4 所示。

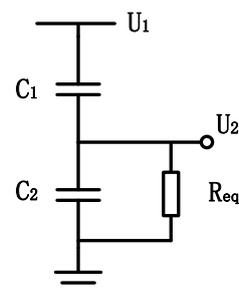


图 4 低频下等效电路图

图 4 中,  $C_1$  为高压臂电容,  $C_2$  为低压臂电容, 等效电阻  $R_{eq}$  为  $R_3$ 、 $R_4$  之和。

由低频下等效电路可以得系统传递函数为

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{C_1}{C_2} \frac{\omega R_{eq} C_2}{\sqrt{1 + \omega^2 R_{eq}^2 C_2^2}} \quad (4)$$

由上式可知, 传感器低频截止频率为

$$f_{3dB-low-Cutoff} = \frac{1}{2\pi R_{eq} C_2} \quad (5)$$

根据式 (5),  $R_{eq}$ 、 $C_2$  值越大, 传感器低频截止频率越低。

#### 4 性能测试及波形结果分析

为进一步验证测量方法的可行性和传感器频响特性, 在实验室环境下搭建实验平台, 对传感器进行性能测试。实验平台布置示意图如图 5 所示。该实验平台包括传感器、标准阻容分压器、采集装置、高压源和扫频信号源。传感器感应电极与标准阻容分压器高压端距离为 1 米, 传感器低压臂电容  $C_2$  为 1nF, 匹配阻抗中电阻  $R_3$  为 9M $\Omega$ , 电容  $C_3$  为 13pF。采集装置采用 Pico 示波器, 输入电阻 1M $\Omega$ , 入口电容 2pF, 带宽 100MHz。标准阻容分压器的分压比为 3000, 幅频特性在 1Hz~500kHz 内较为平坦。扫频信号源可输出频率为 0.0001Hz~160MHz 的正弦波信号, 输出幅值最大为 20V。高压源包括工频试验变压器和冲击电压发生器, 当工频试验变压器和冲击电压发生器需同时接入时, 通过一个 50 $\mu$ F 的电容器实现二者隔离。高压实验和低压扫频实验分开进行, 进行其中一项实验时, 另一信号源断开。

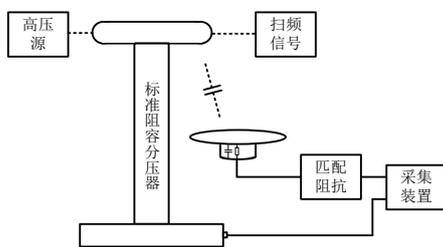


图 5 实验平台布置示意图

扫频实验中, 将扫频信号输出频率设置为 1Hz~10MHz, 通过示波器测量结果, 得到传感器幅频特性曲线如图 6 所示。由扫频结果可知, 传感器幅频特性曲线在 30Hz~1MHz 内较为平坦, 满足工频及暂态电压的测量要求。传感器

分压比约为 32000, 推算一次分压系统的高压臂电容为 0.5pF。在现场测量时, 考虑安全距离为 2 米及以上, 高压臂电容将会更小, 根据公式 (2)、(3), 认为传感器会有更好的频响特性。

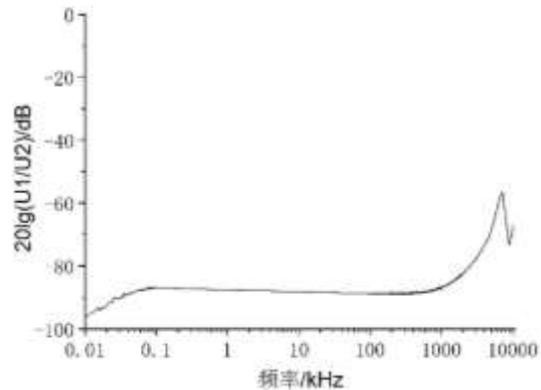


图 6 传感器幅频特性

由于扫频实验中扫频信号电压较低, 不能代表传感器高压下的性能, 因此还需在高压下对传感器的频率特性进行验证。高压源输出信号采用工频叠加冲击信号, 将标准阻容分压器作为参考, 与传感器测量信号进行对比。在全波下, 将传感器和标准分压器测得的工频幅值调节到相近位置, 如图 7 所示。保持此刻度因数不变, 将波形时间轴展开, 得到冲击波形如图 8 所示。由两图对比可知, 传感器在工频和冲击下的分压比基本相同, 满足暂态电压全波测量的要求。

#### 5 结论

1) 在非接触式架空输电线路测量方法的基础上, 提出一种基于分布电容的暂态电压传感器, 把电压测量对象拓展到输电线路以外的其他高压设备。

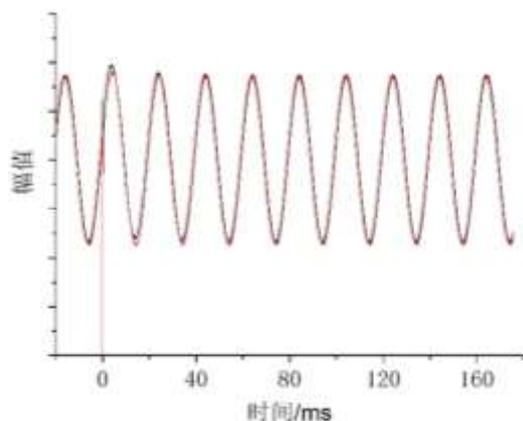


图 7 全波波形

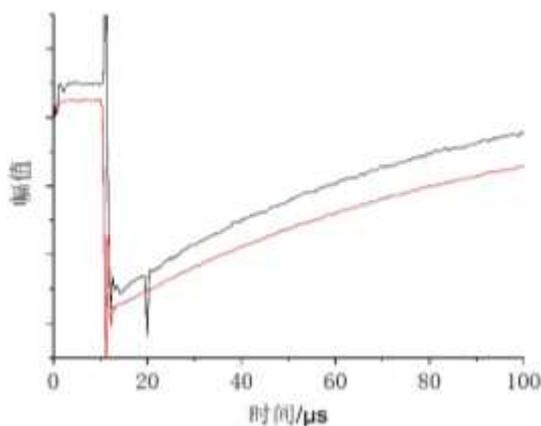


图8 冲击波形

2) 对传感器分压电路的等效模型进行分析, 得到其频响特性的影响因素。传感器高频截止频率受一次分压系统中电容、电感值的影响, 低频截止频率受低压臂电容值和后端等效电阻值的影响。

3) 在实验室搭建平台, 对传感器性能进行了测试。测试结果表明, 传感器幅频特性曲线在 30Hz~1MHz 内较为平坦, 在工频和冲击下的分压比基本相同, 满足暂态电压全波测量的要求。

4) 已安装在变电站现场环境下, 对传感器各项性能进行测定。

## 参考文献

- [1] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [2] 李建明. 电力系统过电压测量及分析 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- [3] 岳功昌, 刘卫东, 陈维江, 等. 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[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 18-27.
- [4] 孙泽来, 马国明, 郭攀辉, 等. 采用内置探头结构的1000KV 特快速暂态过电压测量用窗口式传感器设计[J]. 高电压技术, 2013, 39(6): 1426-1433.
- [5] 陈珉, 马国明, 李成榕, 等. 气体绝缘开关设备介质窗口式特快速暂态过电压测量用传感器研制 [J]. 高电压技术, 2014, 40(3): 897-903.
- [6] 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.
- [7] 岳功昌, 刘卫东, 陈维江, 等. 特高压气体绝缘组合开关设备中特快速瞬态过电压测量系统的标定[J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 342-349.
- [8] 丁卫东, 李峰, 张乔根, 等. 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[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 56-65.

收稿日期:

作者简介:

唐峰 (1969-), 男, 高级工程师, 本科, 主要致力于电网技术监督工作。Email: tangfeng@sz.csg.cn。