

用于纳秒脉冲高压测量的同轴型电容分压器

刘轩东¹, 李登云¹, 孙凤举², 邱爱慈^{1,2}

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049; 2. 西北核技术研究所, 陕西 西安 719613)

摘要: 阐述了电容分压器的电路原理, 根据同轴型电容分压器的容值计算公式计算了电容分压器的理论分压比, 研制了一种用于测量上升沿小于 10 ns 脉冲高压的同轴型电容分压器, 并利用方波源和电阻分压器对其进行进行了标定。实验测试表明, 该电容分压器满足测量要求, 能很好地测量快前沿的陡脉冲电压信号。

关键词: 电容分压器; 高压脉冲; 微分信号

中图分类号: TM531.6

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)01-0032-02

A Coaxial Capacitive Voltage Divider for Nanosecond Pulse Measurement

LIU Xuan-dong¹, LI Deng-yun¹, Sun Feng-ju², QIU Ai-ci^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: The circuit and its physics of the capacitive voltage divider were recounted, and the formula to calculate the capacitance of capacitive voltage divider was analyzed. A coaxial capacitive voltage divider for measuring the high voltage impulse voltage with rise time less than 10 ns was designed and then scaled by using a square wave generator and resistance voltage divider. The experimental result indicates that the present coaxial capacitive voltage divider is satisfactory for the measurement requirement.

Key words: capacitive voltage divider; pulsed high voltage; differential signal

0 引言

电容分压器是一种传统的电压测量装置, 其原理简单、响应快、功率较大、测量失真较小, 广泛应用于高压实验系统。电容分压器一般可分为平板型、分立型和同轴型。笔者以普通高压同轴电缆为基础, 研制了一种结构紧凑的同轴型电容分压器, 用于 100 kV 多路同步触发系统陡化回路的电压测量。标定和实验表明, 该分压器测量波形稳定可靠, 可用于纳秒脉冲高压信号的测量。

1 原理分析

电容分压器的电路原理见图 1^[1]。其中有高压臂电容 C_0 、低压臂电容 C_1 、特性阻抗为 Z_0 的传输线。文中采用的是普通高压同轴电缆, Z_0 为 50 Ω , R 为示波器的等效输入阻抗, 可以根据需要选择两种不同的模式(低阻模式下等效输入阻抗为 50 Ω , 高阻模式下等效阻抗为 1 M Ω), U_i 为待测信号, U_o 为示

波器输出信号。

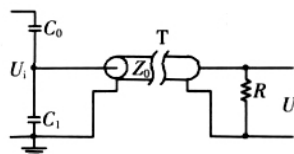


图 1 电容分压器电路原理图

电容分压器的分压比 $= U_o/U_i = (C_0+C_1)/C_0 = 1+C_1/C_0$, 测量中示波器取得的信号为示波器等效输入阻抗 R 上的压降 U_o , 根据电路可知

$$U_o = (C_0 \frac{dU_{C_0}}{dt} - C_1 \frac{dU_{C_1}}{dt}) R$$

显然, $\frac{dU_{C_0}}{dt}$ 与 $C_1 \frac{dU_{C_1}}{dt}$ 是相同量级的, 若 $C_1 \gg$

C_0 , 则有

$$U_o \approx -C_1 R \frac{dU_{C_1}}{dt} = -C_0 R \frac{dU_i}{dt}$$

即示波器所测得的信号是源信号的微分, 计算电容分压器分压比时, 要对测量所得的微分信号进行积分处理。

收稿日期: 2007-04-10; 修回日期: 2007-08-27

基金项目: 国家自然科学基金资助(50477019)。

作者简介: 刘轩东(19-), 男, 博士研究生, 从事高电压及脉冲功率技术研究。

2 分压器设计

电容分压器采用同轴结构,其结构见图2。剥去普通高压同轴电缆的外皮和接地铜网,在其外筒壁上装上特制的铜夹,铜夹接地,在铜夹内侧覆一层聚乙烯薄膜,在薄膜内层覆一层铜箔,这样分压器的高压臂电容由电缆芯线和铜箔构成,低压臂电容由铜箔和接地铜夹构成,电缆绝缘层和聚乙烯薄膜分别构成两级电容器的介质。

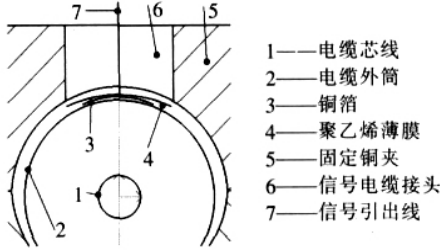


图2 电容分压器结构示意图

与一般的电容分压器相比,笔者设计的同轴型电容分压器的特点是:聚乙烯薄膜和铜箔都非常薄,紧贴在电缆外筒外壁上,特制铜夹和接地铜网连接在一起,既固定了电容分压器内部的聚乙烯薄膜和铜箔,保证分压器容值不变,又起到了很好的屏蔽作用,基本不影响电缆的电场分布,而且也不影响电缆内的主波传输,保证波形不畸变。该分压器结构非常简单,拆装方便,拆装之后一般也不需要重新标定。

根据文[2-5],电容分压器两级电容值可根据以下公式近似计算

$$C_0 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_1}{\ln(r_2/r_1)} (z); C_1 = \frac{\epsilon_0 \epsilon_2}{\ln(r_3/r_2)} (z)$$

式中 $\epsilon_0 = \frac{1}{36} \times 10^{-9} \text{ F/m}$; $r_1 = 1.05 \text{ mm}$ 为电缆芯线半径; $r_2 = 8.5 \text{ mm}$ 为电缆外筒半径; $r_3 = 8.76 \text{ mm}$ 为聚乙烯薄膜到轴心的距离(铜箔厚 0.06 mm, 聚乙烯薄膜厚 0.2 mm); $\epsilon_1 = 2.0$; $\epsilon_2 = 2.0$ (电容介质均为聚乙烯); $l = 13 \text{ mm}$ 为铜箔的纵向长度; $s = 21.5 \text{ mm}$ 为铜箔的圆周弧长(铜箔的尺寸: $21.5 \times 13 \text{ mm}$); $(z) = 2.53$ 为其圆周张角。

计算得 C_0 为 0.278 pF, C_2 虽然理论上可以由上式计算得到,但是 r_2 和 r_3 非常接近,而且 r_2 不能精确测定,用公式计算难免存在人为误差,因此, C_1 的值一般由实测得到。实验中,用电桥测得 C_1 为 27 pF, 带入分压比计算公式可知: $\beta = 1 + C_1/C_0 = 98$ 。

3 分压器标定

为了标定电容分压器对测量脉冲的响应时间和分压比,采用图3所示的标定系统。系统主要由ENS-24XA脉冲发生器、数字存储示波器、电容分压器及普通高压电缆组成,由于该分压器的分压比较

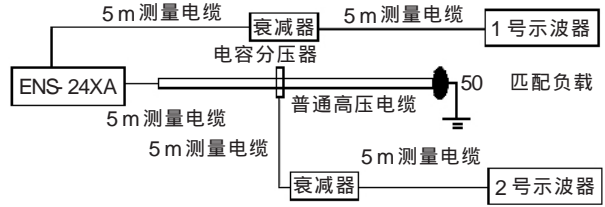


图3 电容分压器标定系统组成

小,使用了 40 dB 的衰减器。

当脉冲发生器产生幅值为 1.4 kV、脉宽为 200 ns 的方波时,示波器测得的脉冲发生器的源信号波形和电容分压器的波形分别见图4、5。

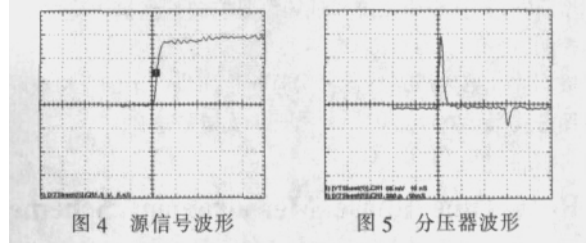


图4 源信号波形

图5 分压器波形

由图5可得电容分压器的上升时间 t_r 约为 0.9 ns,经数据处理计算得到分压比为 93,标定结果和理论计算值基本一致。由于普通高压电缆的波阻抗为 78 Ω ,所加匹配头为 50 Ω ,故在电缆头有一个小反射,这在图5的波形中也有反映。

电容分压器也可以用已知分压比的电阻分压器来标定,其标定系统框图见图6。

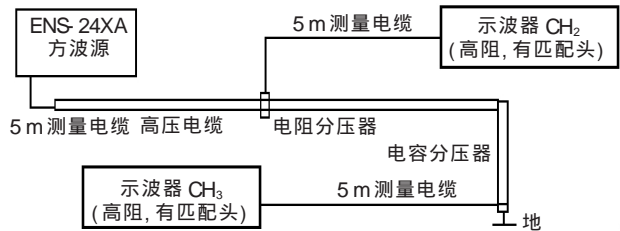


图6 用电阻分压器标定电容分压器的结构

示波器取得的电阻分压器信号和电容分压器信号见图7。

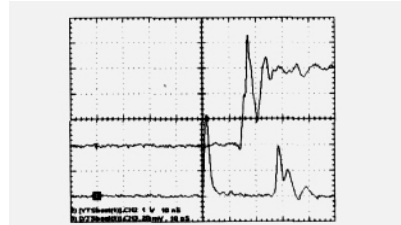


图7 电容分压器和电阻分压器的波形

电容分压器置于 5 m 电缆的中部,电阻分压器置于电缆的端部,电阻分压器电阻为 2 k Ω ,高压电缆波阻抗为 78 Ω ,故在两者相连的地方相当于断路,电压翻倍,电阻分压器测得的电压实际上是电缆电压的两倍。从示波器波形中可以看到,电阻分压器和电容分压器信号之间有约 12.5 ns(电缆长度相差 2.5 m)的延迟;电容分压器的波形上面距主波 25 ns 左右有一个反射波信号。(下转第 36 页)

电网技术, 2002, 26(1): 39-42.

[3] 苗世洪, 王少荣, 刘沛, 陈时杰, 等. 基于GPS的电网状态监测系统的设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(6): 52-54

[4] 李开成, 叶妙元, 陈乔夫. 从电磁式电压互感器到光学式光电电压互感器[J]. 变压器, 1995(11): 6-8.

[5] KOBAYASHI S, HORIDE A. Development and Field Test Evaluation of Optical Current and Voltage Transformers[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1992, 7(2): 815-821.

[6] KANAI M, TAKAHASHI G. Optical Voltage and Current Measuring System for Electric System[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1986, 1(1): 91-97.

[7] 赵海翔, 杨海芳, 张源斌. 集中式电容分压器分压比稳定性的研究[J]. 高电压技术, 1998, 24(2): 66-69.

[8] MITSUI T, HOSOE K. Development of Fiber Optic Voltage Sensors and Magnetic-field Sensors[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1987, 2(1): 87-93.

[9] CRUDEN A, RICHARDSON Z J. Optical Crystal Based Devices for Current and Voltage Measurement [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1995, 10(3): 1217-1223.

[10] 谢克诚. 晶体线性电光效应的稳定性分析[J]. 压电与声光, 1990, 12(4): 33-36.

[11] 李开成, 肖霞, 戴建华, 等. 光电电压传感器光路系统误差分析[J]. 华中理工大学学报, 2000, 28(12): 88-90.

[12] KYUNGSHIL L. Electrooptic Voltage Sensor: Birefringence Effects and Compensation Methods [J]. Applied Optics, 1990, 29(30): 4453-4461.

[13] 叶嘉雄, 常大定, 陈汝钧. 光电系统与系统处理[M]. 北京: 科学出版社, 1997.

[14] 陈坚. 电力电子学-电力电子变换和控制技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.

[15] 胡寿松. 自动控制原理(第4版)[M]. 北京: 科学出版社, 2001.

[16] 于海生. 微型计算机控制技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 北京, 1999.

(上接第33页)

标定中示波器上电阻分压器电压读数为 58 mV, 电阻分压器分压比为 11 000, 故电容分压器上实际电压为 $\frac{58 \text{ mV} \times 11\,000}{2 \times 1\,000} = 319 \text{ V}$, 经积分计算, 电容分压器上电压为 3.2 V, 故电容分压器分压比为: $= \frac{58 \text{ mV} \times 11\,000}{2 \times 3.2 \text{ V} \times 1\,000} = 100$; 结果与理论计算值和用方波源的标定值都非常接近, 误差约为 2%, 可以认为该电容分压在误差允许范围内满足测量要求。

用设计的电容分压器测量 100 kV 多路同步触发系统的陡化回路电压信号, 该信号前沿约为几纳秒, 要求测量系统时间响应快, 才能真实反映待测信号的脉冲前沿。笔者设计的电容分压器上升时间很短, 完全满足测量要求, 可直接运用于实际测量。

4 结语

研制了一种基于普通高压电缆的同轴型电容分压器, 用方波源和电阻分压器分别标定了该电容分压器。应用结果表明, 该电容分压器可用于纳秒级快前沿脉冲高压信号的测量。

参考文献:

[1] 刘金亮, 怀武龙. 一种测量脉冲高电压的电容分压器[J]. 强激光与粒子束, 2000, 12(2): 122-124.

[2] 陈裕涛. 宽频带电容分压器[C]// 高功率粒子束学术交流会文集, 1998.

[3] 李丁九, 马秀荃. 测量毫微秒系统的电容耦合系统[C]// 高功率粒子束学术交流会文集, 1983.

[4] 张永辉, 常安碧. 一种同轴高压电容分压器的设计[J]. 高电压技术, 2003, 29(1): 37.

[5] 李胜利, 李艳. 一种高压 ns 脉冲测量的电容分压器[J]. 脉冲功率技术, 2002, 28(4): 39.

广告单位

彩色广告:

- 施耐德电气公司
- 厦门华电开关有限公司
- 中国·东盟电力一体化设备有限公司
- 中国·人民电器集团公司
- 西安神电电器有限公司
- 正泰电气股份有限公司
- 浙江宇光真空电器有限公司
- 上海德力西集团有限公司
- 中山市泰峰电气有限公司
- 成都旭光电子股份有限公司

- 汕头市德通开关有限公司
- 湖北武高电力新技术有限公司
- 朗松珂利(上海)仪器仪表有限公司
- 上海乐研电气科技有限公司
- 广州泰鼎电气(集团)
- 浙江黄华电气有限公司

黑白广告:

- 国家高压电器质量监督检验中心合格检验报告名录(续)
- 武汉市国电华瑞电业测试科技有限公司
- 武汉国力电气设备有限公司
- 武汉三鑫华泰电气测试设备有限公司
- 陕西维科瑞电气有限责任公司
- 武汉科新电力设备有限公司