

# 基于电容分压器的电子式电压互感器的研究

王化冰, 赵志敏

(平顶山学院, 河南 平顶山 467002)

**摘要:** 在分析传光型电压互感器当前技术和发展的基础上, 系统地总结并提出了电子式电压互感器的基本原理和设计要求。分析了基于电容分压器为感应探头的电子式电压互感器的基本原理和结构。给出了以因瓦合金为材料的同轴电容分压器的原理和设计方法。论述了电子式电压互感器的优点和性能。

**关键词:** 电子式电压互感器; 同轴电容分压器; 因瓦合金; 阻尼器

## Research of electronic voltage transformer based on capacitive voltage divider

WANG Hua-bing, ZHAO Zhi-min

(Pingdingshan University, Pingdingshan 467002, China)

**Abstract:** Based on the analysis of current development and techniques of light transmission type voltage transformer, this paper sums up and abstracts the principle and design requirement of electronic voltage transformer. It analyses the principle and construction of electronic voltage transformer that used as the sensor head based on capacitive voltage divider. It gives the principle and method of design that coaxial capacitive voltage divider by the invar alloy. The advantages and function of electronic voltage transformer are discussed.

**Key words:** electronic voltage transformer; coaxial capacitive voltage divider; invar alloy; damper

中图分类号: TP206 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)18-0046-04

## 0 引言

电压互感器的主要作用是将一次侧的高电压转换成适合于继电保护装置和测量仪表等工作的低电压, 要求一次、二次系统电气隔离。新型互感器的开发与电子技术的发展密切相关, 我们把依赖电子元件取样、处理乃至输出信号的电压互感器称为电子式电压互感器。电子式电压互感器采集电压信号, 结构紧凑, 并且结合了现代传感器技术、数字技术和计算机技术, 体现了新型互感器的优点。电子式电压互感器与传统的电磁式互感器相比具有高精度, 高线性度, 宽频带, 体积小, 重量轻等优点。电子式电压互感器可以根据需要输出低压模拟量和数字量, 可直接用于微机保护和电子式计量设备, 而且能实现在线检测和故障诊断, 适应了电力系统数字化、智能化和网络化的需要。与传统电磁式互感器相比, 光学电压互感器凭借其原理上的优势, 成为电子式高压互感器研究的新方向, 受到国内外研究人员的广泛关注。光学电压互感器又可分为传

感型和传光型两种<sup>[1]</sup>。

## 1 电子式电压互感器的基本原理和结构

### 1.1 传感型电压互感器

传感型电压互感器的测量原理大致可分为基于Pockels效应和基于逆压电效应或电致伸缩效应两种。现在研究的光学传感型电压互感器大多是基于Pockels效应的。Pockels效应就是某些晶体在外加电场作用下, 其折射率发生相应的变化, 这种微小的变化将产生明显的光学效应。可以借助双折射效应和干涉的方法精确地测量出来。经过多年的研究, 光学传感型电压互感器日趋成熟, 但是并未达到产品化, 其主要原因是光学传感型电压互感器技术较复杂, 加工精度要求高, 性能不易做到稳定, 成本高, 实用化进程缓慢<sup>[2]</sup>。

### 1.2 传光型电压互感器

传光型电压互感器采用电阻分压器或电容分压器作为传感单元, 利用光纤来传输信号, 是目前最接近实用化的测量方案。

通过一次侧的采样传感器对被测信号取样, 可以根据需要直接输出模拟信号, 也可利用有源器件

对信号进行数字变换。以光纤作为信号通道, 把高压侧转换的光信号传送到低压侧进行信号处理, 还原得到被测信号。在电压等级很高的地方, 使用光纤进行信号传输, 保持了光纤具有高绝缘性、抗电磁干扰强的优点。图1是电子式电压互感器的基本系统框图。根据传感单元所采用的分压器不同又可划分为2种基本类型: ① 电阻分压器, 高低压臂均为电阻。② 电容分压器, 高低压臂均为电容, 又可分为串联电容式和集中的双电容式<sup>[3]</sup>。

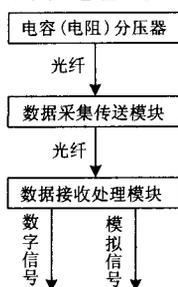


图1 电子式电压互感器系统框图

Fig.1 Electronic voltage transformer system

### 1.2.1 电子式电阻电压互感器

电子式电阻电压互感器的原理如图2所示。 $U_2$  是  $Z_2$  和  $Z_1$  对  $U_1$  的分压, 如果  $Z_2$  远小于  $Z_1$ , 可将高压的  $U_1$  按比例减小为低压  $U_2$ , 供测量和保护使用。其中分压比  $K = \frac{Z_1 + Z_2}{Z_2}$ 。由于该电阻需高阻值、耐高压, 电压系数要小, 且稳定性好, 因此分压电阻的选择非常困难。此外, 分布电容、高压电极电晕放电和绝缘支架的泄漏电流等, 都会带来测量误差<sup>[4]</sup>。

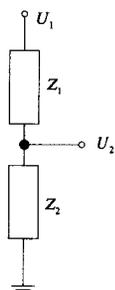


图2 电阻分压器原理图

Fig.2 Resistance divider principle

### 1.2.2 电子式电容电压互感器

电子式电容电压互感器的关键是电容分压器, 其核心是电容。电容式电压互感器是利用电容分压原理实现电压变换的, 主要由电容分压器和电磁单元构成。图3为电容分压器原理图。

其中:  $C_1$  为高压臂电容,  $C_2$  为低压臂电容, 如果  $U_1$  为一次侧电压, 则  $C_2$  上的电压  $U_{C2} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} U_1 = K U_1$ , 式中的  $K = C_1 / (C_1 + C_2)$ , 为分压器的分压比, 只要适当选择  $C_1$ 、 $C_2$  的电容值, 即可得到合适的分压比<sup>[5]</sup>。

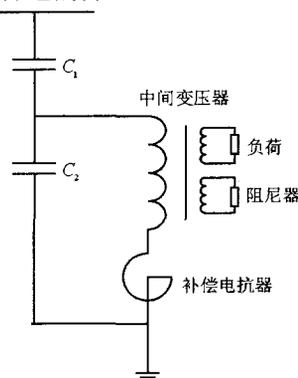


图3 电容分压器原理图

Fig.3 Capacitive voltage divider principle

中间变压器高压绕组采用分段绝缘, 可有效地提高变压器层间绝缘强度, 在一次绕组和二次绕组之间加屏蔽, 并将电容分压器低压端子通过套管单独引出, 避免了与二次绕组出线端子在同一接线板上, 使得一次回路和二次回路彻底分开, 消除了传统结构的一次回路和二次回路之间存在感应过电压的隐患, 确保了运行的安全性。

随着技术的发展, 电容式电压互感器在许多方面的性能已达到甚至超过电磁式电压互感器的各项指标, 特别在高电压下有优良的性价比。电容式电压互感器具有电场强度裕度大, 绝缘可靠性高、且分压电容可兼作耦合电容器供高频载波通道使用、不会与开关端口电容形成铁磁谐振、能消雷电波头、价格便宜等优点。经过研究分析, 选择电容分压器作为电子式电压互感器的传感单元是一种较为理想的方案。

### 1.3 传光型与传感型电压互感器的比较

传感型电压互感器技术较复杂, 成本高, 性能不易做到稳定, 实用化进程缓慢。大规模集成电路技术的飞速发展, 促进了变电站二次设备向电子化、数字化发展, 使互感器与二次设备之间通过数字接口和低电压接口实现互连成为可能。传光型电压互感器采用的传感器技术比较成熟, 运行经验多, 具有实用化优势。采用电容分压器作为电子式电压互感器的电压传感元件, 而这种测量技术在测量领域的应用已有相当长的时间, 技术发展成熟, 避开了光学传感元件工艺的复杂, 温度稳定性差以及对振

动敏感的问题。

## 2 电子式电容电压互感器实现的关键技术

电容分压器分压的信号转变成数字信号后的误差可忽略,整个系统的测量准确度就主要决定于电容分压器。因此,电子式电压互感器的传感元件:电容分压器的稳定和可靠,直接决定了互感器的性能和精度。在以往的电容分压器中,由于受温度等因素影响,漂移严重,致使应用受到了极大的限制。由于电容式电压互感器的暂态响应特性不如电磁式电压互感器,电容分压器中的阻尼器的设计也是很重要的内容。

### 2.1 因瓦合金为极板材料的同轴电容分压器

因瓦合金在温度变化下具有极低的膨胀系数。由于因瓦合金在居里点以上时,与一般合金热膨胀相似,但在居里点以下时,出现反常的低膨胀。这种反常的热膨胀特性是由于合金本身固有的磁效应引起的,这种磁效应引起的体积变化与热胀冷缩效应相反,两者相互抵消而得到很低的热膨胀系数。由于因瓦合金的尺寸在室温附近几乎不随温度变化,因此研究决定采用因瓦合金作为电容分压器的电容极板,从而能保证电容器的精度<sup>[6]</sup>。

电容分压器的结构种类很多,有平板型、分立型、同轴型。一般的电容分压器结构复杂、体积较大,经拆卸或重新安装后必须重新标定,使用很不方便。经研究采用同轴传输线内外筒作为分压器高低压臂电容极板,从而达到结构简单且电容值相对稳定,保证了分压比的稳定可靠。图4为同轴电容分压器结构原理图:

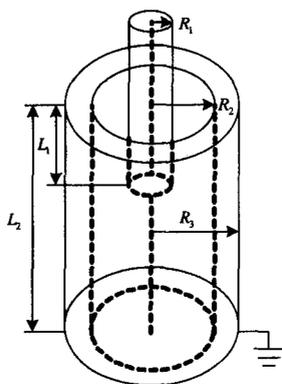


图4 同轴电容分压器结构原理图

Fig.4 Coaxial capacitive voltage divider structure

它由两个采用因瓦合金制成的同轴心圆柱筒组成,内圆柱筒接高压电极,外面圆柱筒接地,接地的目的是形成分压电容和屏蔽外界电场对分压器的

影响。

杂散电容只与主电极及屏蔽电极的几何尺寸、形状、相对位置有关,而与分压器的工况无关。杂散电容的存在,使得二次侧电压测量值比理想情况偏小。通过误差分析表明,加装屏蔽电极可以有效减少杂散电容的影响。尽可能降低本体高度对减小杂散电容最有效,故将分压器置于充油或 SF6 气体的套管内以降低高度,把杂散电容降到最低。圆柱体内可充一定压强的 SF6 气体,避免了传统油渗透的问题。

与一般电容分压器相比,同轴电容分压器具有不影响传输线内的主电场;不影响传输线内的主波传输,不畸变被测波形;传输线内外筒相对位置固定,保证了分压器电容值不变,系统拆装后不需要重新标定<sup>[7]</sup>。

### 2.2 阻尼器的原理与设计

由于电容分压器内部含有电容和非线性电感元件(中间变压器、补偿电抗器),在一次突然合闸或二次短路消除产生的过电压作用下有可能产生铁磁谐振现象,危及电容分压器本身的安全,影响二次测量、保护的正常工作。为此,在中间变压器的二次附加绕组出线端子间装设阻尼器,采用适当的阻尼器是电容分压器的一项关键技术。

铁磁谐振的发生与消除和回路中的电阻值有关。当铁磁谐振发生时,调节二次负载中的电阻值,可以使谐振突然消除或重新激发;当电容分压器二次轻载或空载时,比满载时更容易发生铁磁谐振。因此对铁磁谐振的抑制,通常采用电阻耗能的方法。具体地说,在电容分压器二次绕组上接有包括电阻的阻尼器,当谐振发生时,靠电阻来消耗谐振能量,以阻尼谐振。当发生铁磁谐振时,开关部件将阻尼器中的电阻器接入回路以消耗谐振能量,从而达到遏制铁磁谐振的目的,但正常情况下,此电阻基本上处于开路状态,能量消耗很小。

阻尼器有纯电阻阻尼器、电子型阻尼器、谐振型阻尼器等不同种类。经研究分析决定采用速饱和电抗型阻尼器,其原理图如图5所示。



图5 阻尼器原理图

Fig.5 Damper principle

此种阻尼器在系统激发过电压时电抗器快速深度饱和,电感值下降,大电流通过串联电阻  $R_f$ ,产生很大的阻尼功率,能有效阻尼铁磁谐振。在正常

运行下阻抗很大,消耗功率很小,不影响测量准确度。当谐振过电压产生后电抗器饱和,大电流通过与其串连的电阻,消耗的功率很大,能在10个工频周期内迅速阻尼铁磁谐振。采用先进的速饱和电抗型阻尼器,不仅能有效地阻尼铁磁谐振,而且会使电子式电压互感器的瞬变响应特性得到明显改善。

### 3 结语

确定了以电容分压器为电压传感单元的电子式电压互感器集电压信号采集和传送为一体,符合相应的国际标准:IEC 60044-7(电子式电压互感器),具有明显的优点:(1)采用以因瓦合金材料作为极板的同轴电容分压器作为电压传感器,测量精度高,稳定性好;(2)具有很宽的测量范围和响应速度,没有铁芯饱和问题,可以准确测量出大的非周期分量和暂态分量;(3)用速饱和电抗型阻尼器代替谐振型阻尼器来抑制铁磁谐振;(4)用SF6代替传统的油绝缘,避免了渗透油的问题,并且可降低高度,把分布电容降到最低;(5)可在补偿电抗的两端装有带串联电阻的保护间隙,防止由于二次侧短路造成的电压升高而击穿电抗器线圈;(6)电压测量一体化设计,系统体积小、重量轻、绝缘结构简单,成本低,现场安装方便;(7)可以充分利用现代信号处理技术,校正系统误差,为实现高精度测量提供了保证;(8)可以方便地提供模拟传统电压传感器的输出信号及与上位计算机通信的数字信号。数字量接口与微机保护具有良好的兼容性。

### 参考文献

- [1] 罗苏南,叶妙元.电子式互感器的研究进展[J].江苏电机工程,2003,(3)  
LUO Su-nan, YE Miao-yuan. Research Development of Electronic Transducer[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2003, (3).
- [2] 程云国,刘会金,李云霞,等.光学电压互感器的基本原

理与研究现状[J].电力自动化设备,2004,(5).

- CHENG Yun-guo, LIU Hui-jin, LI Yun-xia, et al. Basic Principle and Current Development of Optical Voltage Transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, (5).
- [3] 方志,邱毓昌,李双.混合式光电电流互感器电流传感头的设计[J].电工技术杂志,2003,(7).  
FANG Zhi, QIU Yu-chang, LI Shuang. Design of a Sensor Head for Hybrid Optical Current Transformer[J]. Electrotechnical Journal, 2003, (7).
- [4] 徐雁,韩世忠,彭丽,等.电阻式电压互感器的研究[J].高电压技术,2005,(12).  
XU Yan, HAN Shi-zhong, PENG Li, et al. Study on the Resistive Voltage Transformer [J]. High Voltage Engineering, 2005, (12).
- [5] 时德钢,刘晔,等.高电压等级电压互感器综述[J].变压器,2003,(6).  
SHI De-gang, LIU Ye, et al. Overview of High-Voltage Potential Transformer[J]. Transformer, 2003, (6).
- [6] 李伟凯,郑绳植.高压电压互感器精密电容分压器的研究与设计[J].传感技术学报,2005,(9).  
LI Wei-kai, ZHENG Sheng-xuan. Study and Design of High Voltage Potential Transformer Using Precise Capacitive Voltage Divider[J]. Journal of Transduction Technology, 2005, (9).
- [7] 张永辉,常安碧,等.一种同轴高压电容分压器的设计[J].高电压技术,2003,(1).  
ZHANG Yong-hui, CHANG An-bi, et al. Design of a High Voltage Coaxial Capacitive Voltage Divider[J]. High Voltage Engineering, 2003, (1).

收稿日期:2007-01-29; 修回日期:2007-06-14

作者简介:

王化冰(1974-),男,讲师,硕士,长期从事电子技术、电气自动化等方向的教学与研究工作。E-mail: xiaocaosnow@163.com

(上接第45页 continued from page 45)

- [9] 朱云芳,戴朝华,陈维荣.小波消噪阈值选取的一种改进方法[J].电测与仪表,2005,42(7):4-6.  
ZHU Yun-fang, DAI Zhao-hua, CHEN Wei-rong. A Modified Method for the Wavelet De-noising Threshold Selection[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2005, 42(7):4-6.
- [10] 任震,何建军,黄雯莹.基于小波包算法的电机故障信号的压缩和重构[J].中国电机工程学报,2001,21(1):25-29.

REN Zhen, HE Jian-jun, HUANG Wen-ying. Compression and Reconstruction for Faults Signals of Electric Machines Based on Wavelet Packets[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(1): 25-29.

收稿日期:2007-01-22; 修回日期:2007-04-09

作者简介:

朱高中(1980-),男,硕士生,研究方向为信号处理、小波分析及电能质量控制。E-mail: zhugaozhong188@163.com