

基于虚拟仪器的光纤电压互感器数字化实现

肖庆亮, 李传生, 张朝阳, 杨德伟, 李立京

(北京航空航天大学仪器科学与光电工程学院, 北京 100191)

摘要: 针对变电站数字化发展需要, 采用虚拟仪器技术, 在一种基于晶体 Pockels 效应的光纤电压互感器上构建信号检测平台, 并在该检测平台上实现以太网接口输出。整个检测平台作为一套完整的检测系统, 具有很好的人机控制界面, 能够对电压互感器的输出进行实时监测与在线控制, 并能为二次设备提供标准以太网接口。该检测平台符合数字化变电站智能化一次设备和网络化二次设备的要求。

关键词: 光纤电压互感器; 虚拟仪器; LabVIEW; 数字闭环检测; IEC 61850; 以太网接口

Digital realization of optical fiber voltage transformer based on virtual instrument

XIAO Qing-liang, LI Chuan-sheng, ZHANG Chao-yang, YANG De-wei, LI Li-jing

(School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: For the demand of digital transformer substation, with the help of virtual instrument technology, signal detection platform is constructed on optical fiber voltage transformer, which is based on the crystal Pockels effect. And then Ethernet interface is realized through the platform. As a complete set of detection system, this detection platform has an excellent man-machine control interface. It can provide not only real-time monitoring and online control, but also standard Ethernet interface for secondary equipment, which meets the requirements of intelligent one side equipment and network of secondary side equipment in digital transformer substation.

Key words: optical fiber voltage transformer; virtual instrument; LabVIEW; digital closed-loop detection; IEC61850; ethernet interface

中图分类号: TM451+7; TP212 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)12-0107-04

0 引言

随着光电式互感器的不断发展, 新一代变电站网络通信标准—IEC 61850^[1]的制定, 以及网络通信技术的发展, 使得数字化变电站成为未来变电站自动化系统发展的必然趋势。数字化变电站是一个不断发展的概念, 目前它是由电子式互感器、智能化一次设备、网络化二次设备在 IEC 61850 通信规范基础上分层构建, 能够实现智能设备间信息共享和互操作的现代化变电站。电压互感器作为变电站中的重要设备, 主要应用于电网高压的测量和保护。光纤电压互感器是一种基于光纤技术的新型电子式互感器, 具有体积小、重量轻、无饱和、绝缘性好、测量精度高等诸多优点^[2]。

根据智能化的一次设备和网络化二次设备的要求, 在虚拟仪器上实现光纤电压互感器的数字化,

主要考虑两个方面的问题: 一是利用虚拟仪器的界面优势, 设计虚拟仪器数字信号检测平台, 对电压互感器的输出进行实时监测与在线控制; 二是以此检测平台为基础, 设计满足 IEC 61850 协议的以太网接口输出, 将数据传送给二次设备, 为二次设备网络化管理提供基础。本文利用基于数据采集卡和 LabVIEW 的虚拟仪器技术构建光纤电压互感器信号检测平台, 检测功能更易实现, 人机交流界面清晰美观, 克服了传统硬件实现方式结构复杂、调试困难、开发周期长、功能单一等诸多不足, 在保证系统性能的同时, 增加了系统功能和设计灵活性^[3-4], 目前该系统处于实验室试运行阶段。

1 光纤电压互感器原理

基于 BGO 晶体的 Pockels 效应^[5]的光纤电压互感器如图 1 所示, 光路设计成互易性结构, 使该光

路具有较高的抗干扰能力。光路原理如下：由 SLD 发出的光经过环形器后在起偏器的位置成为线偏振光，起偏器的尾纤与相位调制器的尾纤以 45° 对轴熔接。这样偏振光就被平分为两份，分别沿保偏光纤的 X 轴和 Y 轴传输。

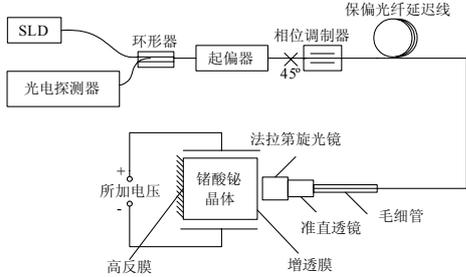


图 1 光纤电压互感器原理图

Fig.1 Principle of optical fiber voltage transformer

这两个正交模式的线偏振光在相位调制器处受到相位调制，之后两正交光沿延迟线传播，到达传感头后由准直透镜准直扩束，再由法拉第旋光镜将两光的偏振面都旋转 45° 后，垂直入射进入 BGO 晶体。右行的两正交光将分别沿晶体内的两个规定振动方向振动，获得相位延迟 φ 。之后两光被反射镜反射，又一次经过 BGO 晶体，累计获得 2φ 的相位差，这两束光出 BGO 晶体后左行至法拉第旋光镜，继续向原来的旋转方向转过 45° 。此时，原来沿保偏光纤 X 轴传播的光与原来沿保偏光纤 Y 轴传播的光互换，而分别沿保偏光纤 X 轴、Y 轴传播的光在光纤起偏器处发生干涉。最后，携带相位信息的光由环形器耦合进探测器。由于发生干涉的两束光，在光路传输过程中，分别都通过了保偏光纤的 X 轴和 Y 轴，只在时间上略有差别，因此，返回探测器的光只携带了传感头对它们的相位调制信息。

2 数字闭环信号检测平台

2.1 数字闭环检测原理

检测电路本质上是以相关检测为基础的数字锁相放大器^[6]，探测器处的光强信号为

$$I_{\text{out}} = -\frac{E_x^2}{2} [1 + \cos(\Phi(t - \tau) - \Phi(t) + \varphi_p)] \quad (1)$$

其中： $\varphi_p = 2\varphi$ ； $\varphi = \pi \frac{V}{V_\pi}$ ； V 为加在晶体上的电压， V_π 是使晶体中的两光束产生 180° 相位差的外加电压，又称为半波电压^[7]； $\Phi(t)$ 是相位调制器调制引入的相位。

采用方波调制，当 $\Phi(t - \tau) - \Phi(t) = \pm \frac{\pi}{2}$ 时，

$$\text{采用方波调制，当 } \Phi(t - \tau) - \Phi(t) = \pm \frac{\pi}{2} \text{ 时，}$$

有：

$$I_{\text{out}} = -\frac{E_x^2}{2} [1 \mp \sin(\varphi_p)] \quad (2)$$

这样在同一束传输的光之间人为地引入相位差，变余弦响应为正弦响应，从而提高光纤电压互感器检测的灵敏度。然而，此时系统的检测仅在接近零相位的地方线性度好，在非零相位的地方线性度不好，并且测量动态范围小。

为解决该问题，采用闭环检测方案^[8]。通过相位调制器的相位调制，在其非互易的相位偏置上再叠加一个相位差。即在同一束传输光波之间人为地引入一个与 Pockels 相移 φ_p 大小相等、方向相反的相位差 φ_f ，用以抵消 Pockels 相移，如公式 (3)：

$$I_{\text{out}} = -\frac{E_x^2}{2} [1 \mp \sin(\varphi_p + \varphi_f)] \quad (3)$$

当 $\varphi_p + \varphi_f \rightarrow 0$ 时，系统则工作在零相位状态，此时由 $\varphi_f \approx -\varphi_p$ ，系统输出 φ_f ，从而可以检测到 Pockels 相移 φ_p 。

解调时是在周期为 2τ 的方波上，正负半周期各采样 M 次，然后用正半周期的数据之和减去负半周期的数据之和，所得值 S_{out} 即为相关检测^[9]的输出值。同时，把 S_{out} 阶梯波反馈数字信号，由 D/A 转换对应关系， S_{out} 满足公式 (4)：

$$\frac{S_{\text{out}}}{2^N} = \frac{\varphi_p}{2\pi} \quad (4)$$

式中： N 为 D/A 转换器的位数。

$$S_{\text{out}} = \frac{\varphi_p}{2\pi} \cdot 2^N = \frac{2^{N-1}}{\pi} \cdot \frac{2\pi V}{V_\pi} = 2^N \frac{V}{V_\pi} \quad (5)$$

光纤电压互感器变比：

$$K = \frac{S_{\text{out}}}{V} = \frac{2^N}{V_\pi} \quad (6)$$

检测平台硬件上使用 NI7813R 智能数据采集卡，板卡上包含 FPGA 模块，它是通过 PCI 插槽插入采集计算机中。软件上使用 LabVIEW FPGA^[10] 在计算机上设计 FPGA VI，经编译转化为 HDL 语言后，下载到 FPGA 上，完成对 FPGA 的配置，实现信号检测电路算法；另一方面，使用 LabVIEW 在计算机上设计 HOST 主机 VI，通过 DMA 通道直接对 FPGA 上信号处理后的结果输出进行读取，读取的结果放到主机上进行分析和显示。

2.2 FPGA VI 程序设计

由以上数字闭环检测原理，在 FPGA 上完成信

号检测, 主要包括三个模块的设计: (1) 基准频率与各控制时序的生成模块。在基准频率的基础上, 通过相应的算法实现采样时钟信号、调制方波信号、解调方波信号、D/A 时钟信号、数字解调时序控制等。(2) 信号解调模块。利用相关检测原理, 对 A/D 采样输入的信号进行解调。(3) 数字阶梯波反馈模块。由解调数据运算生成数字阶梯波, 形成闭环反馈并对其进行控制。

时序是整个闭环算法的核心, 因此对时序的生成与时序之间的关系要准确地把握, 利用 LabVIEW 在主机上进行时序仿真, 然后再移植到 FPGA 上实现, 这种模式可以大大提高工作效率。图 2 是利用 LabVIEW 在主机上的时序信号仿真图。

采集卡 7813R 有 160 个 DIO, 分为 4 个 connector 接口, 每个接口有 40 个 DIO。使用接口 0connector0 (DIO0-DIO39) 和接口 1connector2 (DIO0 2-DIO39 2) 定义所需端口。光电探测器输出信号经放大、滤波、A/D 转换将数据并行送入接口 0 上的 DIO, 然后在采集卡上的 FPGA 上进行解调运算, 产生数字输出。把每个周期的数字输出按 D/A 位数的要求, 并行送入接口 0 上的 DIO, 再经 D/A 转换电路转化为模拟电压值, 加到相位调制器上, 形成闭环反馈。

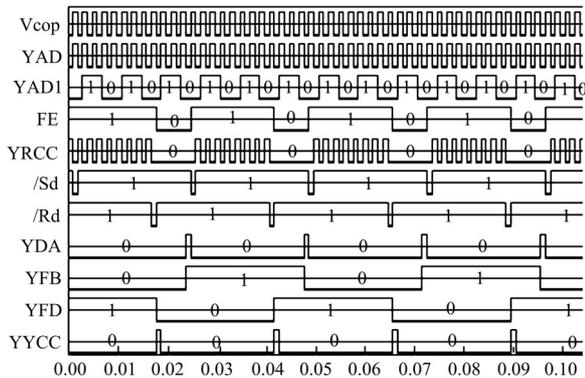


图 2 时钟信号仿真图

Fig.2 Figure of clock signal simulation

接口 1 主要分配采样控制信号, 调制信号, 解调信号以及一些中间过程信号, 这些 DIO 端口可以连接到接线端子盒上, 通过示波器查看信号是否正常, 从而更加方便地进行调试。

2.3 主机 VI 程序设计

HOST VI 是对信号的解调结果、数字输出等进行显示的主机功能模块。因为主机采用的是 DMA 的方式对内存进行直接访问, 所以 FPGA 上的解调结果、数字输出等数据能快速导入到主机中, 完成数据的实时显示, 与此同时, 这些数据将被记录到指定的文件中去。LabVIEW 对数据的读写操作以

及波形显示是非常方便和直观的, 而且利用 LabVIEW 提供的多种信号处理工具, 可以实现数据统计分析、时/频域分析、数字滤波、曲线拟合等多种操作。图 3 给出了在互感器所加电压为 350 V 到 0 V 时, 闭环解调算法的数字输出的显示结果(非 1:1 标定)。

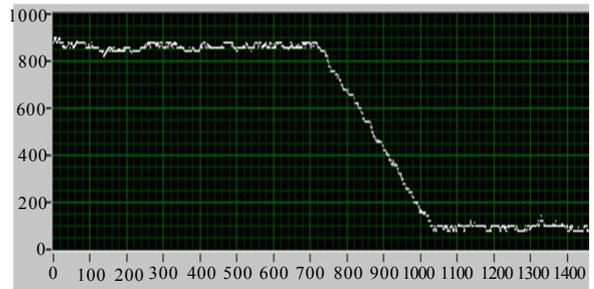


图 3 电压 350 V 到 0 V 时数字输出

Fig.3 Digital output when the voltage ranges from 350 V to 0 V

3 以太网输出接口设计

3.1 硬件设计

合并单元是电子式互感器与数字化变电站二次设备如保护、测控设备的数字接口。高压侧数据采集系统将转换完成的电流、电压信息通过光纤传送到低压侧的合并单元, 合并单元按照标准规定的格式发送给二次保护、测控设备。

结合合并单元, 在虚拟仪器检测平台上实现以太网接口输出, 其硬件连接如图 4 所示, 合并单元的 SYN 同步光信号经光电转换转化为数字信号送入 NI7813 R 采集卡的 DIO 口; 采集卡在收到同步信号后, 把采集到的光纤互感器的信号处理成合并单元通信协议要求的数据格式, 经光电转换送入合并单元, 合并单元与数据采集卡之间数字信号的交换都是通过光纤进行传输的, 采用光纤作为传输介质, 这使得传输信号的抗干扰能力得到很大提高。

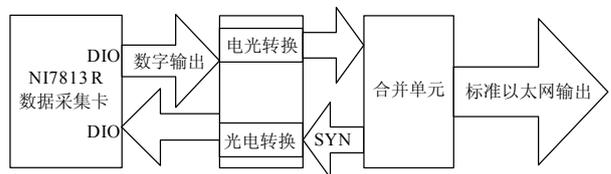


图 4 虚拟仪器检测平台上实现以太网接口

Fig.4 Ethernet interface realization on virtual instrument detection platform

3.2 软件设计

数据采集卡通过数字 I/O 与合并单元进行通信, 数据采集卡在收到合并单元发送的同步脉冲信号 SYN 后, 将数据发送到合并单元。这要包括以下

程序模块的设计：(1) 异步检测 MU 信号；(2) 时钟分频（产生收、发时钟）；(3) 同步码校验模块；(4) CRC 校验模块；(5) 串行数据发送模块。具体程序流程图如图 5 所示。

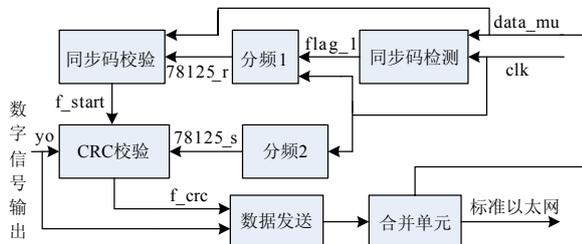


图 5 接口程序设计流程图
Fig.5 Programming flow chart of interface design

4 检测系统主界面

LabVIEW 最大的特点就是前后面板共同构建的图形化编程方式。在后面板进行程序的编写，而需要显示的数据、波形都可以放到前面板的界面中，本文的检测系统的主界面设计如图 6 所示，主界面包括：

- (1) 系统监控：监控的数据包括 A/D 输入数据、半周采样点之和、解调结果、积分 lurk、台阶高度；监控的状态包括 DMA 状态和接口状态。
- (2) 参数设定与控制：分为五个方面，分频与采样、方波幅值控制、阶梯波复位控制、SDA 控制和反馈控制。
- (3) 运行控制：开始、停止、写 SDA、复位。



图 6 检测系统主界面
Fig.6 Main interface of the detection system

5 结论

采用基于数据采集卡和 LabVIEW 的虚拟仪器信号检测平台，设计光纤电压互感器的数字闭环检测电路，并结合合并单元在该平台上实现以太网输出，实现了光纤电压互感器的数字化检测。该检测

平台具有很好的人机控制界面，方便对电网电压的实时监测与控制，方便对二次设备的网络化管理。系统有很大的灵活性，可以根据需要修改和重新定义功能，容易升级。通过实验与仿真，该检测平台运行状态良好，对于检测精度，还有待于进一步优化检测算法来进行提高。总之，以光纤电压互感器的数字化实现作为切入点，为以后在虚拟仪器上构建数字化变电站检测与控制系统的研究有重要的参考价值。

参考文献

- [1] Christoph Runner. IEC61850 process connection-a smart solution to connect the primary equipment to the substation automation system[C].//15th Power Systems Computation Conference. Liege (Belgium):2005.
- [2] Minoru S, Kazuo K, Yasuhiro M. Development of the electronic instrument transformers for intelligent substation[J]. TMT&D Review, 2003, 1(1): 1-6.
- [3] 张民, 徐迅. 用LabVIEW和数据采集卡实现信号检测[J]. 北方交通大学学报, 2000, 25(5): 78-81. ZHANG Min, XU Xun. Signal detection based on LabVIEW and data acquisition card[J]. Journal of Northern Jiao Tong University, 2000, 25(5): 78-81.
- [4] 康泉, 张之敬, 张艳. 基于LabVIEW的数字信号控制及检测技术[J]. 机械加工与自动化, 2004(8): 6-8. KANG Quan, ZHANG Zhi-jing, ZHANG Yan. Detection technique of digital signals based on LabVIEW[J]. Mechanical Processing and Automation, 2004(8): 6-8.
- [5] Li Chang-sheng, Toshihiko Yoshino. Optical voltage sensor based on electrooptic crystal multiplier[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20 (5): 843-849.
- [6] 杨志怀, 马慧莲, 金仲和. 谐振式光纤陀螺数字锁相放大器设计[J]. 浙江大学学报, 2008, 42(4): 624-625. YANG Zhi-huai, MA Hui-lian, JIN Zhong-he. Design of digital lock-in amplifier in resonator fiber optic gyro[J]. Journal of Zhejiang University, 2008, 42(4): 624-625.
- [7] Josemir Coelho Santos, Taplamacioglu M C. Pockels high-voltage measurement system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 9-12.
- [8] 袁玉厂, 冯丽爽, 王夏霄, 等. 全光纤电流互感器检测系统的设计[J]. 光电工程, 2006, 33(5): 95-98. YUAN Yu-chang, FENG Li-shuang, WANG Xia-xiao, et al. Design of measurement system on all-fiber-optical current transducer[J]. Opto-Electronic Engineering, 2006, 33(5): :95-98.
- [9] 胡广书. 数字信号处理一理论、算法与实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997. HU Guang-shu. Digital signal processing-theory, algorithm and implementation[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.

(下转第120页 continued on page 120)

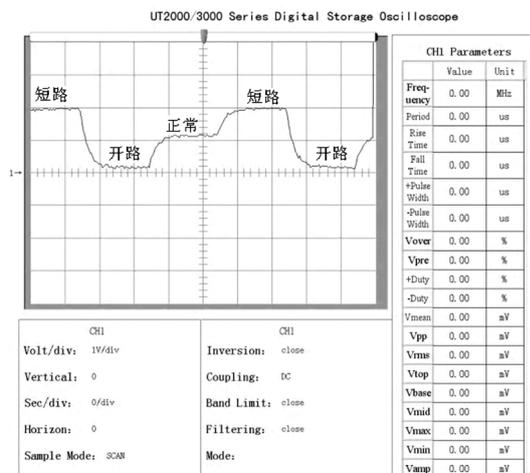


图 19 电流互感器二次侧回路正常、开路、短路状态下电压波形图

Fig.19 Voltage waveform of normal state, open circuit and short circuit at secondary side in current loop of CT

5 总结

本文从电流互感器工作机理、导纳法检测原理、终端具体电路设计等方面详细分析了导纳检测法应用于负荷管理终端等设备中，用以对电流互感器二次回路正常运行和故障情况下状态的实时智能诊断设计。经过大量的实验室试验以及现场应用表明，该设计方法是可行而有效的，其可以在电流互感器运行在轻载和超载（互感器正常计量范围内）都能准确检测。导纳法在电流回路二次侧开短路中的应用可以帮助发现二次回路的故障、减少电能损失和安全事故的发生。为提高实时检测的效率，终端设备还应同时监测同一计量回路电能表电能数据，进行相关数据实时比对，对回路中电气参数也应进行较长期的监测并记录学习。

参考文献

[1] 中国南方电网有限责任公司. Q/CSG 1 0016-2007, 负荷管理系统通用技术条件[Z]. 2007.

China Southern Power Grid, Q/CSG 1 0016-2007, power load management system technical specifications[Z]. 2007.

[2] 广东电网公司. Q104-0026-0903-5147, 广东电网公司负荷管理系统技术规范[Z]. 2009.

Guangdong Electric Power Grid. Q104-0026-0903- 5147, Guangdong electric power load management system technical specifications[Z]. 2009.

[3] 张涛. 电力电子技术[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.

ZHANG Tao. Power Electronic Technology[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2003.

[4] 王卫东. 高频电子电路[M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2009.

WANG Wei-dong. High frequency circuit[M]. Second Edition. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009.

[5] 国家标准化委员会. JJG313-1994, 测量用电流互感器检定规程[Z]. 1994.

Standardization Administration of the People's Republic of China. JJG313-94, verification regulation of current transformers of measuring service[Z].1994.

[6] 陈向群. 电能计量技能考核培训教材[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.

CHEN Xiang-qun. Electric energy measurement skills examination training textbook[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.

[7] 兰世红, 等. 导纳法在二次回路故障监测中的应用分析[J]. 电测与仪表, 2007 (3).

LAN Shi-hong, et al. Application analysis of admittance method used for fault monitoring of secondary loops[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2007(3).

收稿日期: 2010-04-19; 修回日期: 2010-05-15

作者简介:

肖勇 (1978-), 男, 工学硕士, 工程师, 主要从事电能计量、计量自动化、电测仪表技术研究和管理工作; E-mail: xiao14@sina.com

周尚礼 (1968-), 男, 硕士, 高级工程师, 电测所所长, 主要从事电能计量、高压技术研究与管理工。

(上接第 110 页 continued from page 110)

[10] Mears M L, Falcon J S. Real-time identification of sliding friction using LabVIEW FPGA[C].//2006 American Control Conference. Minnesota(USA):2006.

肖庆亮 (1985-), 男, 硕士, 研究方向为光纤电力传感技术与虚拟仪器技术; E-mail: xiaoyao.ql@163.com

李传生 (1984-), 男, 博士, 研究方向为光纤电力传感技术;

张朝阳 (1981-), 男, 博士, 研究方向为光纤传感技术。

收稿日期: 2009-08-20; 修回日期: 2009-09-28

作者简介: