

电子式互感器高频数据采集与传输方案

陈勇¹, 李聪², 刘升鹏³

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 昆明 650217;

2. 特变电工南京智能电气有限公司, 南京 210000; 3. 江苏金智科技有限公司, 南京 210000)

摘要: 针对当前电力系统电子式互感器采样率偏低, 难以满足行波测距装置准确定位电力故障的问题, 提出了电子式互感器高频信号采集与传输方案; 电子式互感器内部为 Rogowski 线圈, 电网电流信号被其微分作用转换为小电压信号并附加了 90° 超前相差, 设计积分电路补偿该相差; 设计采样率为 2 MSps 的高频信号采集电路, FPGA 通过 LVDS 接口读取采样数据, 并进行幅值处理, 最后利用大容量 FIFO (先入先出单元) 进行缓存; 由于千兆网数据传输速率有限, 利用 FPGA 设计吉比特以太网传输特定格式报文, 把电流数据传输至电力行波测距装置; 解决了积分电路由于运放输入偏置电压带来的积分饱和问题, 以及高速 ADC 输入量程小于输入信号幅值等技术难点; 试验结果表明, 高频信号采集及传输方案能够满足行波测距装置百米级别的测距精度要求, 具有一定工程应用价值。

关键词: FPGA; 积分电路; 高频采样; 吉比特以太网, 电子式互感器; 行波测距; Rogowski 线圈

A Design Scheme of Electronic Transformer High-frequency Signal Acquisition and Transmission

Chen Yong¹, Li Cong², Liu Shengpeng³

(1. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd, Kunming 650217, China; 2. TBEA Nanjing Intelligent Electric Co., Ltd., Nanjing 210000, China; 3. WISCOM System Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: As electronic transformer with low sample rate cannot meet the needs of power fault location accuracy, high-frequency signal acquisition and transmission technology is introduced. Current signal of power grid was converted to low voltage signal with 90° angle ahead by Rogowski coil in electronic transformer, which was compensated by the subsequent integrator circuit. Sample rate of signal acquisition circuit was designed to be 2 MSps. Sample data were read via LVDS interface, processed and buffered with FIFO by FPGA. Due to the mass traveling-wave data, instead of 100 M Ethernet, gigabit Ethernet was used. Frames of special form were transmitted to traveling-wave location devices. Technical difficulties such as integration saturation due to input bias voltage of operational amplifier, and small measuring range of high-speed ADC, were solved. Experiment result showed that this design of signal acquisition and transmission meet the needs of location accuracy and has some engineering value.

Keywords: FPGA; integrator circuit; high-frequency acquisition; gigabit Ethernet; electronic transformer; traveling-wave location; Rogowski coil

0 引言

电力系统中输电线路的准确故障测距可以减轻巡线负担, 缩短故障修复时间, 对于提高电力系统供电可靠性、减少停电损失, 提高电力系统的运行和管理水平具有重要意义, 因此行波测距装置得到了大量应用^[1]。随着电力系统继电保护的发展、设备自动化程度的提高及光纤通信技术的普及应用, 智能化变电站有逐渐取代常规变电站的趋势, 而电子式互感器作为智能化变电站的重要组成部分, 成为了研究与分析的热点^[2]。基于 Rogowski 线圈原理的电子式电流互感器制作工艺成熟、精度高、抗电磁饱和、频率响应特性好、适应环境能力强^[3-4], 非常满足继电保护、行波测距装置对故障波形快速响应的需求。

根据暂态信号提取故障信息的行波测距装置所需要的频带宽度为 MHz 级, 根据奈奎斯特采样定律, 采样频率至少需要达到 2 MSps。而现有电子式互感器的采样频率基本小于 12.8 kHz^[5], 不满足上述行波测距装置的需求。

本文介绍了一种用于行波测距的电子式互感器高频信号采集与传输方案, 其采样频率达到 2 MSps 甚至更高, 并通过吉比特以太网传输高频采样数据给行波测距装置, 故障测距精度达到百米级别, 具备了在工程上应用的技术条件。

1 整体方案

高频信号采集与传输的整体方案包括信号采集部分和信号传输部分, 如图 1 所示。

信号采集部分包括一次部分和二次部分。一次部分, 电子式互感器的 Rogowski 线圈通过微分作用把电网线路的大电流信号转换为小电压信号; 二次部分包括信号处理电路和 FPGA 功能模块。其中, 信号处理电路包括积分电路、比例电路及高采样率 ADC (模数转换器), FPGA 功能模块包括 ADC 数据接口、比例放大模块和高频数据缓存模块。

信号传输部分, 由 FPGA 实现的吉比特 MAC 模块从数据缓存模块中获取采样数据, 组成特定格式的以太网数据帧, 通过以太网 PHY 和光纤模块传输至行波测距装置。

2 信号采集部分

在信号采集的一次部分, 电网线路的电流信号由 Rogowski 线圈转换为小电压信号; 二次部分, 小电压信号经过积分

收稿日期: 2016-10-17; 修回日期: 2016-11-11。

作者简介: 陈勇 (1977-), 男, 湖北钟祥人, 工程师, 硕士, 主要从事电力系统继电保护方向的研究。

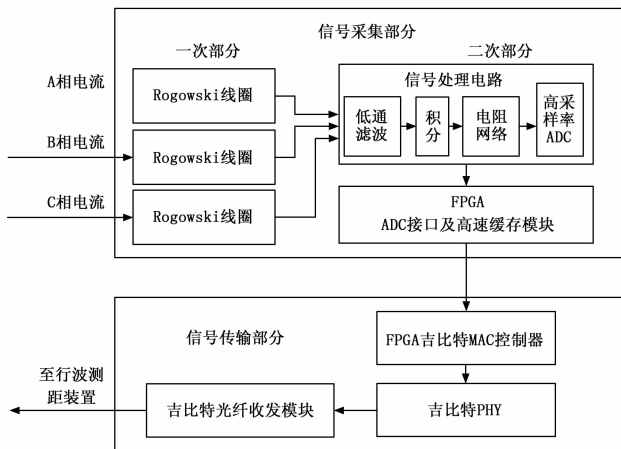


图 1 整体方案

电路、比例电路调制成幅值和相角满足要求的信号，然后输入 ADC，而后由 FPGA 通过 LVDS 数据接口将采样数据接收并缓存。

2.1 Rogowski 线圈

Rogowski 线圈又称空心线圈，均匀环绕在圆形非铁磁性骨架上，一次电流导体沿圆环线圈轴线穿过，相比于传统电磁式互感器，不会出现磁饱和和磁滞等问题^[6]。假设线圈截面积为 S ，单位长度匝数（线匝密度）为 n ，则线元长度内的线圈匝数为 ndl 。当线圈截面积 S 非常细小时，可认为截面上磁感应强度 B 处处相等，则 dl 长度线圈内的磁通为：

$$d\Phi = nSB\cos\alpha \cdot dl \quad (1)$$

整个线圈的磁链为：

$$\Psi = \oint_L d\Phi = nS \oint_L B\cos\alpha \cdot dl = \mu_0 nSi \quad (2)$$

式中， μ_0 为真空中磁导率^[7]， $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m。当被测电流发生变化时，根据法拉第电磁感应定律，线圈输出端的感应电势为：

$$e(t) = -\frac{d\Psi(t)}{dt} = -u_0 nS \cdot \frac{di(t)}{dt} = -M \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (3)$$

式中， M 为线圈与载流导线之间的互感。

线圈的感应电势与被测电流成微分关系，因此后面需要通过积分电路将输出电压转变为被测电流 $i(t)$ 的相角一致。假设电流为余弦函数，则进一步计算感应电势为：

$$e(t) = -M \cdot \frac{dI_m \cos(\omega t + \varphi)}{dt} = -M \cdot \omega \cdot I_m \cdot \cos\left(\omega t + \varphi - \frac{\pi}{2}\right) \quad (4)$$

其中： $\omega = 2\pi f$ ， f 为电网线路电流的频率，基波分量频率为 50 Hz，二次谐波为 100 Hz，依此类推。

可以看出，基波分量、各次谐波经过 Rogowski 线圈微分作用产生的电压信号的幅值增益与频率成正比，越高次的谐波幅值越被放大。但是由于越高次谐波的电流本身幅值越小，因此小电压信号不会过大。相反的，在后续的积分电路中，幅值增益与频率成反比，最终产生的效果是基波分量、各次谐波的幅值增益在微分及积分作用后基本一致。

在电网线路额定电流条件下，设计 Rogowski 线圈的参数使感应电势，即输出的小电压信号的基波有效值为 150 mV，相位超前电流波形 90° 。

2.2 信号处理电路

信号处理电路包括信号处理电路包括积分电路、比例电路及高采样率 ADC。

2.2.1 积分电路

由于电网线路电流经过 Rogowski 线圈变为小电压信号后基波分量和各次谐波分量的相位超前了 90° ，因此需要利用积分电路补偿该相位差。积分电路由集成运算放大器、电容及电阻组合实现，如图 2 所示。

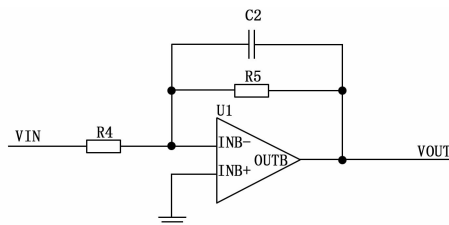


图 2 积分电路

图中， R_4 和 C_2 完成积分功能，而由于运放一般存在输入偏置电压，积分电路的输出很快便会饱和，因此在电容两端并联 R_5 ，消耗电容的累积电荷。输入输出信号的传递函数为：

$$u_o = -\frac{R_5}{R_4} \cdot \frac{1}{1 + j\omega R_5 C_2} u_i = -\frac{R_5}{R_4} \cdot \frac{1}{1 + j\frac{\omega}{\omega_0}} u_i \quad (5)$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0 = \frac{1}{R_5 \cdot C_2} \quad (6)$$

幅频特性为：

$$A = -\frac{R_5}{R_4} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}} \quad (7)$$

取 $R_4 = 31.8$ K， $C_2 = 0.1$ μ F， $R_5 = 12.5$ M，基波幅值增益约为 1，有效值仍为 150 mV。

对于高次谐波，根据第一节所述，Rogowski 线圈微分作用使越高次的谐波幅值越被放大，而此处越高次的谐波幅值越被衰减，因此刚好抵消，整体的幅频特性会与基波基本一致。

相频特性为：

$$\varphi = -\arctan \frac{\omega}{\omega_0} \quad (8)$$

根据上述取值，基波相移为 -89.854° ，而高次谐波相移非常接近为 -90° 。相角误差在基波时最大，随着谐波次数的增加而减小^[8]。

2.2.2 比例电路

由于设计信号采集的采样频率达到 2 MSps 甚至更高，因此需选用高采样率 ADC，而目前各大厂商的这类 ADC 模拟量程都比较小，本方案选用的 ADC 芯片的量程为 $2 V_{p-p}$ ；而行波测距采集系统需要考虑在电网线路故障情况下，电流瞬间增大，甚至达到 30 倍额定电流的情况，此时小电压信号的基波峰峰值计算如下：

$$u_{p-p} = \pm 150 \text{ mV} \times \sqrt{2} \times 30 = \pm 6.36 \text{ V} \quad (9)$$

此时输入小电压信号幅值将超过 ADC 的量程，因此需要通过比例电路将输入信号幅值降低。设计比例 1:7 的衰减系数将峰峰值衰减至 ± 1 V 以下。该幅值衰减将在后续的 FPGA 比例放大模块中得到补偿。而高次谐波幅值很小，不需考虑超出量程的问题。由于 AD 模拟量输入端采用差分输入，且正负两端的共模电压均不能为负，因此 $VIN+$ 端需增加直流偏置，

根据上表，首先将数字量交流化，方法是减去共模值，即二进制数 100 000 000 000。交流化后的数字量为有符号数，二进制数的最高位为有符号数，与交流正弦信号相对应。

然后使用 FPGA 的 IP 核生成 12×4 的乘法器，被乘数为表 2 格式的数字量，乘数为 7；被乘数为有符号数，乘数为无符号数，积为 16 位有符号数。

2.3.3 数据缓存模块

本方案使用 FPGA 的 IP 核生成先入先出存储器 (FIFO) 来实现数据缓存。根据信号传输部分关于吉比特以太网数据传输率的计算，每帧数据有 200×3 共 600 个采样数据，而 FIFO 的深度至少满足 1.5 帧数据的缓存要求，因此定义 $1024 \times 16\text{bit}$ 的 FIFO。

FIFO 的读写时钟独立，写时钟为 DCO，上升沿写入乘法器的积；读时钟为吉比特以太网模块的主时钟。

3 信号传输部分

本方案设计采样率为 2 MHz，并考虑 10% 左右的附加信息 (如 MAC 地址、参数) 的情况下，传输数据率计算如下：

$$(1 + 10\%) \times 2 \text{ M/s} \times 16 \text{ bit} \times 3 = 105.6 \text{ Mb/s} \quad (12)$$

该传输速率已经超过千兆网的最大速率了，因此选择吉比特光纤以太网传输，并为以后更高采样率的系统留出一定裕量。

3.1 吉比特 MAC 控制器

本方案使用 Altera 公司 Triple-Speed Ethernet v13.1 IP 核生成吉比特以太网控制器。主要配置选项有：

(1) 选择接口为 MII/GMII。

(2) 使用内部 FIFO。

(3) 使能 MDIO 空间，将 IP 核内部寄存器的一段空间映射为 PHY 寄存器空间，则访问相应内部寄存器会触发一次 MDIO 操作；

(4) 设置 FIFO 位宽为 8 bit，深度为 2048，超过以太网最大帧长即可。

生成的吉比特 MAC 控制器主要包括接收模块、接收 FIFO、发送模块、发送 FIFO、GMII 接口、配置寄存器及 MDIO 模块。而 FPGA 主要完成上电后的寄存器配置工作和发送 FIFO 的报文填写任务。

寄存器配置主要包括：

(1) 设置网络速度为 1 Gb/s；

(2) 设置本地 MAC 地址及是否用该地址替换 FIFO 报文中的 MAC 地址。

(3) 设置 FIFO 字节数超过一帧报文字节数 (1270Bytes) 时启动发送模块。

(4) 使能接收和发送模块。

3.2 行波测距用以太网帧说明

试验用的行波测距装置对以太网帧的格式规定如表 2 所示。

表 2 以太网帧格式

字节	内容
0~13	MAC 地址等
14~63	参数段
$N \times 2$	通道品质
$N \times M \times 2$	采样值

表 2 中，参数段包含数据长度、帧序号、通道数、采样点数、采样频率、额定延时、一次额定值、二次额定值等信息。N 为采样通道数，本方案中，共有 A、B、C 三相电流，通道数为 3；考虑每帧报文的采样点数 M 为 200，则每帧报文长度为：

$$64 + 3 \times 2 + 3 \times 200 \times 2 = 1270 \text{ Bytes} \quad (13)$$

按照上述设计，2 M/s 的数据被分为 10 000 帧/s，则两帧报文间隔 100 μs 。

4 试验结果及分析

在仿真试验室模拟现场环境，对该方案的可行性和故障测距精度进行试验验证。电力系统动模实验是基于物理仿真的动态模拟，能用来进行电力系统机电暂态以及动态过程的实时仿真研究，但是由于无法产生高频暂态行波，无法满足行波测距装置的检测需要^[11]。本试验设备选择博电公司的 PH02 型行波测距测试仪，其能够输出高达数百 KHz 的高频暂态行波信号。其他试验设备还有本方案所述电子式互感器和中元华电公司的 ZH-8301 型号行波测距装置。

试验过程中，首先使用行波测试仪模拟在 A 相 2 550 m 处发生单相接地故障，行波测距装置根据互感器的高频数据，准确判断出了故障类型，并给出故障距离为 2 100 m。然后模拟在 B 相 1 800 m 米处发生单相接地故障，同样的，行波测距装置正确判断故障类型并给出百米级别精度的故障测距结果。

根据试验结果，本文所述高频行波信号采集与传输方案在电子式互感器应用场合，能够为行波测距装置提供有效的采样数据，从而缩短故障修复时间，提高供电可靠性。

5 结束语

电子式互感器高频采集与传输技术解决了当前电子式互感器采样率偏低，难以满足行波测距装置准确定位电力故障的问题，具有很高的工程指导意义和实用价值。

参考文献：

[1] 何军娜, 陈剑云, 艾颖梅, 等. 电力系统行波测距方法及其发展 [J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42 (24): 148.

[2] 王涛, 张宁, 刘琳, 等. 有源电子式互感器故障诊断技术的研究与应用 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43 (18): 74.

[3] Koiovic L. Rogowski coils suit relay protection and measurement [J]. IEEE Computer Application in Power, 1997 (7): 47-52.

[4] 孔庆源, 戴敏. 冲击电流测量中的 Rogowski 线圈的应用 [J]. 高电压技术, 2005, 31 (11): 6-7.

[5] 国家电网公司. Q/GDW 396-2009 IEC61850 工程继电保护应用模型 [S]. [S. l.]: IEC, 2010.

[6] 王红星, 张国庆, 郭志忠, 等. 电子式互感器及其在数字化变电站中应用 [J]. 电力自动化设备, 2009, 29 (9): 115.

[7] 邱关源. 电路第四版 [M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.

[8] 郭乐, 申狄秋, 卢家力. 电子式互感器积分方案的比较 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (18): 112.

[9] 蒋臻. 模数转换技术的分析与应用 [J]. 电子与封装, 2007, 7 (3): 40.

[10] 童子权, 白锦玲. LVDS 传输技术在高速数据采集系统中的应用 [J]. 国外电子测量技术, 2009, 28 (2): 59.

[11] 刘慧海, 张晓莉, 姜博, 等. 行波故障测距装置的检测与评价 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43 (1): 145.