

数字量输出型电子式互感器校验系统的研制

马永跃, 黄梅

(北京交通大学电气工程学院, 北京 100044)

摘要: 对电子式互感器进行准确测量和校验是数字化变电站安全和稳定运行的重要保证。针对目前电子式互感器校验过程中存在的问题, 提出了一套符合电子式互感器数字输出要求的校验方法和设计方案; 引入基于准同步算法与 DFT 相结合的误差测量方法并对其实现过程进行了讨论, 有效地抑制了因电网频率波动而导致的非同步采样对校验结果的影响。最后对校验方法的实现过程进行了仿真, 实验结果表明, 基于上述校验方法的电子式互感器校验系统能够满足测试的精度要求。

关键词: 电子式互感器; 合并单元; 校验; 准同步算法

Development of calibration system for electronic transformer with digital output

MA Yong-yue, HUANG Mei

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Making accurate measurement and calibration of electronic transformer provides an important guarantee for the security and stable operation of digital substation. A new calibration method which meets the requirements of digital output of electronic transformer is presented in order to solve existent problems of actual calibration course. The measurement method based on the combined principles of the quasi-synchronous algorithm and Discrete Fourier Translation (DFT) is introduced and its realization is also discussed. This measurement method can effectively restrain the impact of grid frequency fluctuation on the accuracy of calibration results. At last, the realization process of new calibration method and its simulation results are achieved, which show that the performance and accuracy of new calibration system are satisfied.

Key words: electronic transformer; merging unit; calibration; quasi-synchronous algorithm

中图分类号: TM45 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)01-0083-04

0 引言

随着数字化变电站的建设, 电子式互感器 (ECT/EPT) 开始在电力系统中得到广泛应用, 由于电子式互感器的工作原理和输出方式与传统互感器有很大的区别, 故电子式互感器的校验不能采用传统互感器的校验方法。对电子式互感器进行准确校验是数字化变电站安全和稳定运行的重要保证, 是数字化变电站建设和推广的重要基础, 其现场测量问题已经成为数字化变电站建设和运行的突出问题。目前国内外还没有一套成熟的针对电子式互感器的测量和校验系统, 因此, 研制出一套符合电子式互感器数字输出要求的校验系统具有十分重要的现实意义。

目前, 国内外电子式互感器的研制已向实用化阶段发展, IEC 已制定相关标准, 对于数字输出的电子式互感器也有相应的标准化工作, 并给出了新

的误差定义, 采用绝对测量法检测, 误差测量系统也与传统互感器测差原理不同。本文将重点研究电子式互感器的校准原理、技术要求及校验方法。

1 电子式互感器的误差定义

与传统电磁式互感器的模拟输出量相比, 电子式互感器输出的是一组数值序列, 是一种新的输出形式。定义代表一次电流的第 i 个数据点被采样的时刻为 t_i , 采用等距采样, 其数字输出通过下列关系式阐述:

$$i_s(i) = I_{scc} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(2\pi f \cdot t_i + \varphi_s) + I_{sdc}(i) + i_{sres}(i)$$

式中: i_s 为合并单元的数字输出, 代表一次电流的瞬时值; I_{scc} 为合并单元输出的基波有效值; I_{sdc} 为包括指数部分的二次直流输出; i_{sres} 包括谐波和次谐波分量的二次剩余电流输出; i 为数据组计数器的计数; t_i 是一次电流的第 i 次数据组被采样时刻; f

为基波频率； φ_e 为二次相位差。

电流测量中电子式互感器的电流误差（比值误差 $\varepsilon\%$ ）为实际变比不等于额定变比所引起的误差，其定义如下式表示： $\varepsilon\% = (K_{rd} \cdot I_s - I_p) / I_p \times 100\%$ ，其中 K_{rd} 为额定变比； I_p 为实际一次电流在其谐波分量 $i_{press}(t)=0$ 时的有效值； I_s 为当 $I_{sdc}(i) + i_{sres}(t_i) = 0$ 时的数字输出二次电流的有效值。因此电子式互感器的比差可按照电磁式互感器的比差 ε 理解。

电子式互感器的相位误差 φ_e 却比电磁式互感器的复杂，后者指互感器的一次电压（或电流）相量与二次电压（或电流）相量的相位之差 φ ，即相位差 φ 就是相位误差 φ_e （见图 1a）。电子式互感器由于数据处理和传输时间要产生延时，因此产生的相位差可能很大，把它当作相位误差 φ_e 显然不合适，所以电子式互感器的相位差 φ 和相位误差 φ_e 应分别定义。数字输出的电子式互感器相位差 φ 与传统互感器的相同，即一次与二次电流的相位之差，指在一次接线端子上出现某一电流的时刻起到对应的数字信号启动传输的时刻止所经历的时间折算到基波频率的相位角；而相位误差 φ_e 则为相位差 φ 减去由于额定相位差 φ_{or} （电子式互感器因选用的技术产生的额定相位差）和额定延时时间 t_{dr} （数据处理和传输所需时间的额定值）所引起的偏移量（见图 1b），即一个同步时钟脉冲到与数字传输值对应的一次电流的采样之间的时间差，即

$$\varphi_e = \varphi - \varphi_{or} + 2\pi f \cdot t_{dr}。$$

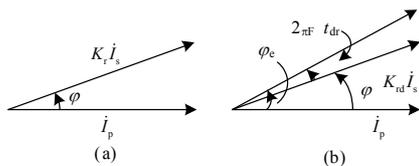


图 1 电磁式与电子式互感器的相位误差

Fig.1 Phase error of electro-magnetic and electronic transformer

2 电子式互感器的校准原理

电子式互感器分为电压互感器和电流互感器两种，对其进行校准时，标准信号仍然由电磁式互感器提供。由于其输出的标准信号是模拟信号，必须考虑将模拟信号进行 A/D 转换后再利用计算机或者微处理器进行分析和处理。

电子式互感器的校准系统参考 IEC60044-8^[1] 的校验标准，采用目前常用的数字校验方法，其借助数据采集装置将标准电磁式互感器和待测电子式互

感器的输出信号读入计算机，通过软件分析计算得出电子式互感器的精度等级、谐波大小、电子式互感器输出幅值及相位等附加信息。图 2 给出了数字输出型电子式电流互感器校准系统原理框图^[2]，测量时将升流器、电子式电流互感器一次端子、标准电流互感器一次端子接成闭环。由数据采集装置产生同步脉冲并分别送给参考 A/D 转换器(HP3458A)和电子式电流互感器。经过参考 A/D 转换器转换的标准电流互感器二次输出和电子式电流互感器的二次输出接至数据采集装置。调节调压器，使测量值覆盖标准要求的每个测量点。通过上位机对采集的标准信号和待测信号进行分析，利用校准算法可以计算出各信号的基波分量，进而得到待测电子式互感器的精度指标并生成测试报告。

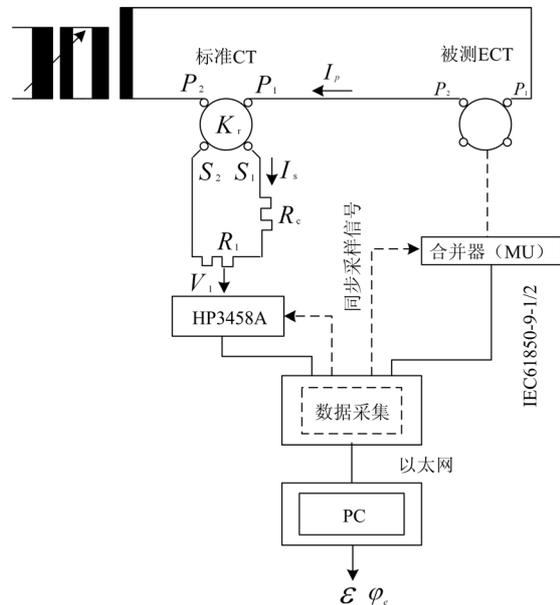


图 2 数字输出型电子式互感器校验系统原理框图

Fig.2 Principle diagram of calibration system for electronic transformer with digital output

可见，校验方法是确保整个校准系统性能的关键因素之一，但是在信号频率波动的情况下，如何抑制其对最终运算结果的影响却缺乏有效的解决方法。

3 校验算法的研究

国家标准规定的电网频率可在 49.5~ 50.5 Hz 之间波动，因此若不考虑信号频率实时变化这一因素，仍然用固定采样率的数据进行傅里叶变换来求取基波分量的话，则校验精度将会受到很大影响。因此，本文提出利用准同步采样算法与 DFT 相结合的基波分析方法，以提高校验的精度。

文献[3]提出了一种基于准同步采样的谐波分

析方法, 能有效地减少同步误差(采样周期和信号周期的偏差)对测量结果的影响, 使信号的基波与高次谐波均能获得相当高的测量准确度, 其算法的基本原理如下: 引入一个周期信号 $g(t)$, 将一个周期等分成 N 段, 均匀采样得到 $N+1$ 个数据 $g(x_i)$, ($i=0, 1, 2, \dots, N$), 并按某种数值求积公式做如下定义的运算:

$$G^1 = \frac{1}{\sum_{i=0}^N \rho_i} \sum_{i=0}^N \rho_i g(x_i) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \rho_i g(x_i)$$

式中上标“1”表示第一次求积运算, ρ_i 为对应数值求积公式的权系数, 本文采用的是精度较高的复化梯形求积公式,

所以, $\sum_{i=0}^N \rho_i = N$ 。

同理将积分区间延长至 n 个周期, 并将 n 个周期的积分区间等分成 $n \times N$ 段, 采样得到 $n \times N + 1$ 个数据 $g(x_i)$, ($i=0, 1, 2, \dots, n \times N + 1$), 做如下定义的递推运算:

$$G^n = \frac{1}{\sum_{i=0}^N \rho_i} \sum_{i=0}^N \rho_i G^{n-1}, \quad n=2, 3, \dots$$

式中: 上标“ n ”为递推序号。

综合上述两式, 可得:

$$G^n = \frac{1}{\sum_{i=0}^N \rho_i} \sum_{i=0}^N \rho_i \left[\frac{1}{\sum_{i=0}^N \rho_i} \sum_{i=0}^N \rho_i G^{n-2} \right] = \frac{1}{\sum_{i=0}^N \rho_i} \sum_{i=0}^N \rho_i \dots \frac{1}{\sum_{i=0}^N \rho_i} \sum_{i=0}^N \rho_i g(x_i) = \frac{1}{N^n} \sum_{i=0}^{nN} \eta_i g(x_i)$$

式中: η_i 为一次加权系数^[4], 为了便于计算机处理, 用求和代替积分, 从而使算法离散化。这样采样得到每一个 $g(x_i)$ 后只需一次加权求和, 就可以得到最终结果。

根据上述结论, 我们分别令

$$g(x_i) = \cos(k \frac{2\pi}{N} i) g_i, \quad g(x_i) = \sin(k \frac{2\pi}{N} i) g_i$$

并分别定义下面 2 个公式:

$$G_{ma}^n = \frac{2}{N^n} \sum_{i=0}^{nN} \eta_i \cos(m \frac{2\pi}{N} i) g_i$$

$$G_{mb}^n = \frac{2}{N^n} \sum_{i=0}^{nN} \eta_i \sin(m \frac{2\pi}{N} i) g_i$$

式中: m 代表第谐波次数, N 代表每个周期采样的点数, n 代表采样的周期数, g_i 为对应的采样值, η_i 是一次加权系数。同理共采样 $n \times N + 1$ 个数据, 并进行如下递推运算:

$$G_{ma}^n = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \rho_i G_{ma}^{n-1}, \quad G_{mb}^n = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \rho_i G_{mb}^{n-1}$$

根据文献推导^[3], 有如下结论:

$$G_m^n = \frac{[(G_{ma}^{n-1})^2 + (G_{mb}^{n-1})^2]^{n/2}}{[(G_{ma}^n)^2 + (G_{mb}^n)^2]^{(n-1)/2}} \approx A_m \tag{1}$$

$$\varphi_m^n = \tan^{-1} \frac{G_{mb}^n}{G_{ma}^n} \approx \theta_m \tag{2}$$

式中: A_m 是 m 次谐波的幅值, θ_m 是 m 次谐波的相位, 式(1)(2)即为准同步算法幅值和相位的最终求解公式。在实际应用中, 当同步采样误差较小时, 可以证明^[1]当采样 3 到 4 个周期后, 通过式(1)(2)就可以准确算出信号的幅值和相位, 进而准确得到电子式互感器的比值误差和相位误差。

4 校验系统的硬件和软件设计

4.1 硬件电路设计的原理与方案

参考电子式互感器校验系统的原理框图(图2), 校验系统的硬件设计应该包括数据传输、解码、存储和同步脉冲的发生。其中数据处理单元包含一个以太网接口用于接收从待测 ECT 合并器(MU)输出的数字量, 一个 488 接口用于接收从标准数字表(HP3458A)输出的数字量, 一个电以太网口用于与计算机进行通讯, 一个电同步口输出具有 TTL 电平的同步采样信号, 一个光口输出具有光接口的同步采样信号。转换装置通过 GPS 接口接收外部 GPS 脉冲来输出高精度的同步信号。数据采集装置原理框图如图 3 所示。

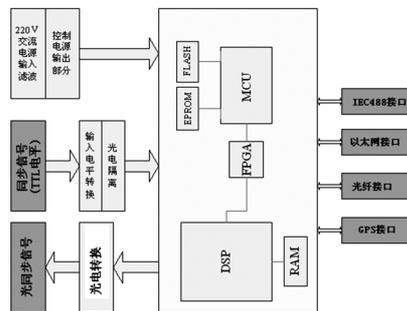


图 3 数据采集装置原理图

Fig.3 Principle diagram of data acquisition device

为了满足测试校验的需要, 校验系统的硬件采用的是一个最基本和经典的单片机+DSP的实时系统。使用的单片机具有的一个10/100 Mbps的以太网接口, 能很好的满足通信的要求。而它和用来产生

实时波形数据和控制实时数据流的DSP都是在工业领域得到了广泛的使用。采用这种硬件方案的原因是：一个单片机不可能完成繁重的计算、通信和数据处理任务。并且它也无法具有像DSP那样的计算速度。

嵌入式微处理器构成的中央处理单元实现采样数据的打包和发送，并通过以太网与上位机进行数据交换，通过数据总线与数据处理单元进行数据交换。

DSP构成的数据处理单元，凭借其强大数据处理能力和高运行速度，主要完成数据传输和解码工作。通过接收标准数字表（HP3458A）和合并单元（MU）输出的数字量进行采样数据的实时处理，并通过FPGA实现与中央处理单元通信。数据采集装置通过100M的以太网与上位机进行通信，速度快、抗干扰性强，并可实现多机同步输出。

4.2 后台软件计算和误差分析

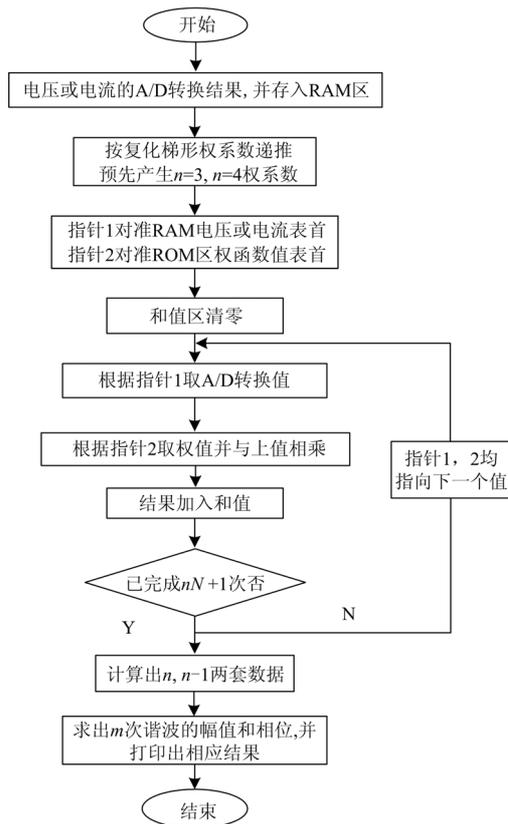


图4 校验系统软件计算流程图

Fig.4 Software flow chart of calibration system

校验系统的计算单元由PC机和应用软件组成，PC机作为上位机软件的运行平台没有特殊要求，它与数据采集装置的连接通过以太网点对点通讯来实现。上位机的应用软件包用VC++实现，关于电子

式互感器的误差则是采用基于准同步采样算法的基波分析方法进行计算。即对n个周期信号采样n×N+1个点，采用复化梯形求积方法并用一次加权对n×N+1个采样数据进行处理，并根据准同步算法原理对数据进行分析，从而计算出标准信号和待测信号基波的幅值和相位，进而生成测试报告。图4为校验系统误差计算的软件流程图。

5 实验结果

论文进行了仿真实验，采用准同步算法测量出输入信号的幅值和相位，并与普通的DFT算法进行比较。假定电网波动范围为0.25 Hz，即同步误差Δ=0.005T，仿真过程中电网频率f一直在此范围内波动，每个周期采样点数N=48，采样4个周期（即迭代次数为4）共192个点，仿真的采样数据按照实际频率和次序传送给系统，系统分析的结果如表1所示。

由表1可见，基于准同步采样算法的误差分析结果的准确度远远高于普通DFT方法，并提高了数倍以上，算法本身的误差满足精度要求。而且由于采用一次加权求和的方法，根据每周采样点数和采样的周期数，可以预先将权系数求出并保存在数组表中。在实际计算时只需要将各采样点的电压值或电流值与从此表中调出的对应权系数相乘，然后求和，即可完成一次准同步采样法的运算。这样的运算设计不仅简单，运算速度快，而且容易用编程语言实现。

表1 谐波分析中准同步算法与普通DFT比较

Tab.1 Quasi-synchronous algorithm compared with normal DFT in harmonic analysis

待测量	理论值	准同步算法		普通DFT		相对误差比(普通/准同步)
		分析结果	相对误差/ (%)	分析结果	相对误差/ (%)	
幅值	50	50.001	0.002	50.07	0.14	70
相角	11	11.0015	0.0136	11.0284	0.259	19

6 结论

针对目前数字化变电站建设过程中，电子式互感器无法在现场进行准确测量和校验的实际问题，本文研究了一套符合电子式互感器数字输出要求的校验方法和设计方案。在对采样数据进行误差计算

(下转第140页 continued on page 140)

1994, 9 (1) : 572-578.

[34] 陈雷, 杨国梁. 电力变压器温度数据采集子系统的设计[J]. 自动化技术与应用, 2008, 27 (5) : 117-120. CHEN Lei, YANG Guo-liang. Heat Protection for Electric Transformers[J]. Techniques of Automation and Application, 2008, 27 (5) : 117-120.

[35] Meliopoulos A P. State Estimation Methods Applied to Transformer Monitoring[A]. in: IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference[C]. 2001. 419-423.

[36] Ribeiro A B, Lobo Eira N. Multi-point Fiber Optic Hot-spot Network Integrated into a High Power Transformer Proceedings of SPIE[A]. in : The International Society for Optical Engineering[C]. 2007.

[37] 陈淑谨, 王世阁, 刘富家. 变压器绕组热点在线监测装置的研制与应用[J]. 变压器, 2000, 37 (8) : 23-27. CHEN Shu-jin, WANG Shi-ge, LIU Fu-jia. Development and Application of on-line Monitoring Device of Transformer Winding Heat Spot[J]. Transformer, 2000, 37 (8) : 23-27.

[38] Kim Myonghwan Lee June-Ho, et al. A Study on Internal Temperature Monitoring System for Power Transformer Using Optical Fiber Bragg Grating Sensors[A]. in: Proceedings of the International Symposium on Electrical Insulating Materials[C]. 2008. 163-166.

[39] 钱政, 孙焦德. 电力变压器绕组热点状态的在线监测技术[J]. 高电压技术, 2003, 29 (9) : 26-28. QIAN Zheng, SUN Jiao-de. On-line Monitoring of Hot-Spot Temperature in Transformer Winding[J]. High

Voltage Engineering, 2003, 29 (9) : 26-28.

[40] 孟庆民. 光纤温度传感器在电力高压开关在线监测中的应用[J]. 传感器世界, 2005, 7: 19-22. MENG Qing-min. Application on Temperature Monitoring for HV Switches Based on Fiber-Optic Sensors[J]. Sensor World, 2005, 7: 19-22.

[41] 毛献辉, 施清平. 光纤温度传感器在电力设备安全监测中的应用[J]. 计测技术, 2007, 27 (5) : 20-23. MAO Xian-hui, SHI Qing-ping. Application of Optical Fiber Sensor to Security Monitoring of Electrical Devices[J]. Metrology & Measurement Technology, 2007, 27 (5) : 20-23.

[42] 时斌. 光纤传感器在高压设备在线测温系统中的应用[J]. 高电压技术, 2007, 33 (8) : 169-174. SHI Bin. HV Switchgear Temperature On-line Monitoring System with Distributed Optical Fiber Sensor[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (8) : 169-174.

收稿日期: 2009-01-15; 修回日期: 2009-05-14

作者简介:

李强 (1983-), 男, 硕士, 主要研究方向为配电网优化规划、电缆故障诊断等研究; E-mail: lmk_upc@yahoo.com.cn

王艳松 (1965-), 女, 教授, 博士, 主要研究方向为电能质量分析与谐波治理, 电网的优化规划与节能技术, 电网故障诊断与配电自动化等。

(上接第 86 页 continued from page 86) 时, 提出了一种基于准同步算法与 DFT 相结合的误差测量方法, 有效地解决了校验过程中电网频率波动对校验精度的影响问题。研究表明, 基于上述校验方法的电子式互感器校验系统满足现场测试的精度要求, 今后的研究工作应重点考虑校验系统的运输、安装以及现场测试环境的要求, 为校验系统构建一个操作方便的工作平台, 以最终应用于工程实践。

参考文献

[1] IEC40044-8—2002, Electronic Current Transformers[S].

[2] 钱政, 李童杰, 张翔. 电子式互感器校验方法的设计与实现[J]. 北京航空航天大学学报, 2006, 32(11): 1316-1319. QIAN Zheng, LI Tong-jie, ZHANG Xiang. Design and Realization of Calibration Method of Electronic Transformer[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2006, 32(11): 1316-1319.

[3] 戴先中, 唐统一. 周期信号谐波分析的一种新方法[J].

仪器仪表学报, 1989, 10(3): 248 -255. DAI Xian-zhong, TANG Tong-yi. A Novel Method for Spectrum Analysis of Periodic Signals[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1989, 10(3): 248-255.

[4] 李英英, 王恒福, 葛荣尚. 用准同步离散 Fourier 变换实现高准确度谐波分析[J]. 清华大学学报 (自然科学版), 1999, 39(5): 47-50. LI Fu-ying, WANG Heng-fu, GE Rong-shang. Realization of High Precision Harmonics Analysis with Pleisiochronous DFT Arithmetic[J]. Journal of Tsinghua University (Sci&Tech), 1999, 39(5): 47-50.

收稿日期: 2009-02-07

作者简介:

马永跃 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护测试技术; E-mail: mayoyue@163.com

黄梅 (1959-), 女, 教授, 硕士生导师, 主要从事电力系统建模及应用、接入系统分析、继电保护及自动化的教学与科研工作。