

基于二次插值理论的电子式互感器数据同步的研究

乔洪新¹, 黄少锋^{1, 2}, 刘勇²

(1. 华北电力大学四方研究所, 北京 106206; 2. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

摘要: 首先介绍了电子式互感器的数据同步问题, 并针对线性插值的同步算法进行了分析, 指出了该算法的不足之处。在此基础上, 提出了基于二次插值理论的同步算法, 并进行了误差的理论和仿真分析。结果表明, 二次插值同步算法可以有效提高同步的精度, 尤其在包含高次谐波的数据同步方面, 优势极为明显。二次插值同步算法符合 IEC60044-8 的误差要求, 微机测量装置中易于实现, 适于实际应用。

关键词: 数字化变电站; 电子式互感器; 同步; 二次插值; 误差分析

Discussion on data synchronization of electronic current transducer based on quadratic interpolation

QIAO Hong-xin¹, HUANG Shao-feng^{1, 2}, LIU Yong²

(1. Sifang Institute of North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. Beijing Sifang Automation Co., LTD, Beijing 100085, China)

Abstract: In this paper, data synchronization of ECT is proposed. Synchronization method based on linear interpolation is analysed. Then, a new approach based on quadratic interpolation is presented in the paper, and the simulation and error analysis are given. The simulation results show that this method is more accurate, especially in synchronization of harmonic components, and it is very suitable for practical application on consideration of complexity and sampling point requirement of the method.

Key words: digital substation; ECT; synchronization; quadratic interpolation; error analysis

中图分类号: TM734 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)15-0048-05

0 引言

在电力系统电流差动保护中, 两侧数据一般在同一时刻的前提下保护理论才能正确应用, 保护装置才能可靠动作。传统的电磁式互感器输出连续的模拟量, 各个模拟量之间基本同步。但是, 电子式互感器输出为离散的数字量, 在代入保护算法计算之前必须保证各相以及各侧数据是同一时刻的, 由此便引入了数据同步问题。

1 同步问题的几个层面及时间同步的精度等级

1.1 同步问题的几个层面

随着电子式互感器的实用化, 其同步问题越来越凸现出来, 主要表现在如下几个方面^[1,2]:

1) 同一间隔内的各电压电流量的同步。本间隔的有功功率、无功功率、功率因数、电流电压相位、序分量及线路电压等问题都依赖于对同步数据的测量计算。IEC60044 标准规定, 每间隔最多可有 12

路的测量量(如图 1 所示), 经同一合并单元处理后送出, 这 12 路数据首先必须是同步的。

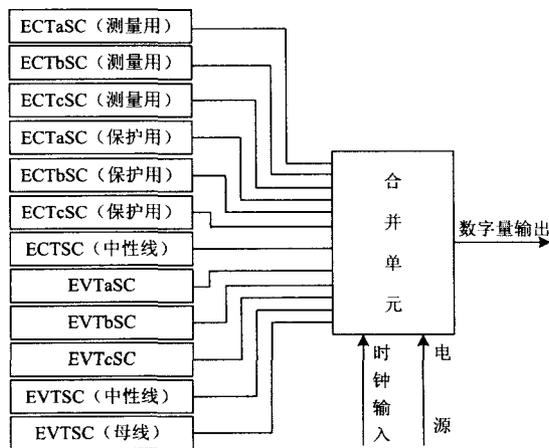


图1 合并单元的数字接口框图

Fig.1 Digital interface of merging unit

2) 关联多间隔之间的同步。变电站(电站)内存在某些二次设备需要多个间隔的电压电流量, 典

型的如母线保护、主设备纵联差动保护装置等, 相关间隔的合并单元送出的测量数据应该是同步的。

3) 关联变电站间的同步。输电线路保护采用数字式纵联电流差动保护(如光纤纵差)时, 差动保护需要两侧的同步数据, 这有可能将数据同步问题扩展到多个变电站之间。

4) 广域同步。大电网广域监测系统需要全系统范围内的同步相角测量, 在大规模使用电子式互感器的情况下, 必将出现全系统内采样数据同步。

1.2 时间同步的精度等级

在时间同步的问题上, IEC61850-5 根据不同的目的规定了 5 个精度等级^[3], 如表 1。

表1 时间同步精度等级

Tab.1 Range of synchronization

时间性能类	精度	目的	
保护和控制事件 用 IED 时间同步	T1	±1ms 事件时标	
	T2	±0.1ms 分布同期的过零时标	
互感器用 IED 时间 同步	T3	±25us	P1
	T4	±4us	P2 M1
	T5	±1us	P3 M2/3

表1中, P1、P2和P3都是指控制保护性能类。性能类P1应用于配电线路间隔以及其他要求较低的地方也可应用; 性能类P2应用于输电线路间隔中用户未指定的地方; 性能类P3应用于输电线路间隔, 具备满足同步和断路器开断时间差的最好性能。M1、M2和M3指计量和电能质量性能类, 三者测量精度不同对时间同步的精度要求也各不一样。

同时, 这是功能要求, 实现中(如智能电子装置IED)时钟同步精度必须高于具体功能要求的精度一个等级。

2 时间同步方法

IEC60044—8 标准中规定了电子式互感器数据同步的两种方法: 统一时钟同步法与插值法。

2.1 统一时钟法

统一时钟同步法^[4], 是指在每个合并单元具有时钟输入接口的前提下, 统一时钟每秒发布一次, 用于同步各合并单元的内部主时钟。各间隔测量系统将统一时钟倍频产生同步采样信号, 将其传送给采集器, 从而控制各采集器同步采样, 这样合并单元接收到的数据即为同步的数据。这种方法需要合并单元与采集器有额外的时钟同步接口, 适用于采用以太网传输的数字化变电站, 成本较高。

2.2 插值法

插值法, 是指各路数据采集系统进行采样频率

相同的非同步采样, 合并单元接收到数据的同时给各个数据帧打入时标, 然后利用插值法计算出各路测量量在同一时刻的采样值。

应用该方法时, 必须保证各路测量量从采集到合并单元打时标的延时是一样的; 如若不同, 这些延时时间我们是可测量得到的, 利用它们进行时间的补偿, 然后才能应用插值法进行同步。因此, 插值同步法适用于采用点对点串行口通信的数字化变电站。

插值法的实现比较简单, 降低了成本。比如, 同一间隔内高压侧作A/D变换的有源式ECT/EPT, 利用同一时钟同步法, 为防止同步采样脉冲信号受到干扰, 需将其先变换成光信号再经光纤传送到高压端, 而应用插值法便可以避免这类繁琐的过程。同时, 对于差动保护各间隔的合并单元如果没有进行过站级同步, 其数据也可以用插值法同步, 如图2所示。

同时, 插值算法容易引入误差, 不同的插值方法有不同的精度、计算量、可靠性与应用范围。文献[5]提出了分段线性插值的方法进行同步, 并对误差进行了分析。由此, 我们可以进一步计算出该方法中基波、二次谐波以及三次谐波在不同采样频率下的最大采样误差如表2。

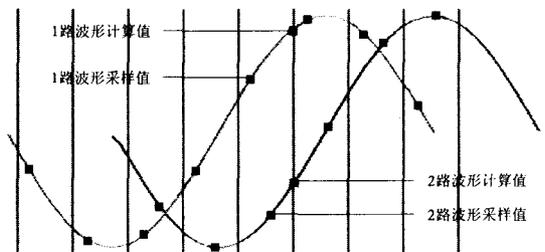


图2 插值法同步的原理图

Fig.2 Sketch map of synchronization using interpolation method

表2 线性插值算法各次谐波最大采样值误差

Tab.2 Error of linear interpolation method

采样点数	20/周波	48/周波
基波	1.234%	0.214%
二次谐波	4.935%	0.856%
三次谐波	11.106%	1.926%

IEC60044标准规定, 电子式互感器的稳态测量精度0.2级(即稳态传变误差在±0.2%之间)。同时, 暂态分量最大瞬时值误差应小于±1%。因此, 插值同步应避免引入较大的误差。总之, 线性插值不利于进行高精度的采样同步, 尤其是不适用于包含高

次谐波电量的二次设备的数据同步。本文将提出一种精度更高的插值方法,实现高次谐波的采样同步。

3 基于二次插值数据同步的原理

合并单元对每一路数据依据统一的时钟进行标记,延时补偿后,使各路的数据能够在时间轴上具备可比性。然后,以固定的采样时间序列为标准,各路数据通过二次插值的方法,将数据变换到该标准时间序列下的计算值,利用新得到的各路数据进行各种保护理论的计算。

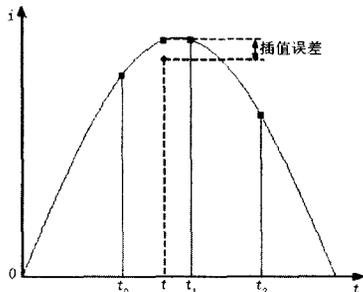


图3 二次插值原理图

Fig.3 Sketch map of quadratic interpolation method

二次插值的数学模型如图3,可以表述为:已知函数 $i(t)$ 的等时间间隔的三个连续的离散点 $[t_0, i(t_0)]$ 、 $[t_1, i(t_1)]$ 、 $[t_2, i(t_2)]$,利用插值基函数很容易得到拉格朗日插值多项式^[6]:

$$L_2(t) = i(t_0) \cdot \frac{(t-t_1)(t-t_2)}{(t_0-t_1)(t_0-t_2)} + i(t_1) \cdot \frac{(t-t_0)(t-t_2)}{(t_1-t_0)(t_1-t_2)} + i(t_2) \cdot \frac{(t-t_0)(t-t_1)}{(t_2-t_0)(t_2-t_1)} \quad (1)$$

式(1)在工程计算中很不方便,将其表示为如式(2)便于计算的形式:

$$L_2(t) = i(t_0) + \frac{i(t_1) - i(t_0)}{T}(t-t_0) + \frac{i(t_2) - 2i(t_1) + i(t_0)}{2T^2}(t-t_0)(t-t_1) \quad (2)$$

其中:, $T = 0.02 / N$ 。 T 为采样间隔, N 为每周波采样的点数。通过式(2),我们可以得到区间 $[t_0, t_2]$ 上的任何一个 $i(t)$ 的近似值。

4 误差分析

利用 Lagrange 插值误差公式,进行误差分析:

$$R_2(t) = \left| \frac{i'''(\xi)}{3!}(t-t_0)(t-t_1)(t-t_2) \right| \quad (3)$$

式中: $R_2(t)$ 为二次插值误差; $i'''(\xi)$ 为 $i(t)$ 在 $t = \xi$ 处的3阶导数,其中 $\xi \in [t_0, t_2]$ 。

在电力系统暂态情况下,电流统一的表达式可表示为直流分量和各次谐波叠加的形式:

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [I_n \sin(n\omega t + \varphi_n)]。 可得:$$

$$R_2(t) = \left| -\frac{1}{6} f'''(\xi)(t-t_0)(t-t_1)(t-t_2) \right| \leq \frac{1}{6} \omega^3 \sum_{n=1}^{\infty} [n^3 I_n^3] \cdot |(t-t_0)(t-t_1)(t-t_2)| \quad (4)$$

式(4)中, $|(t-t_0)(t-t_1)(t-t_2)|$ 在距离 t_1 ($\sqrt{3}/3$) T 处取得最大值,为 $(2\sqrt{3}/9)d^3$ 。

因此,式(4)可变为

$$R_{\max} = \frac{15.912}{N^3} \sum_{n=1}^{\infty} [n^3 I_n^3] \quad (5)$$

得出结论如下:

- 1) 误差中不含直流分量,原电流中的直流分量不会因为插值算法产生误差;
- 2) 插值误差是各次谐波误差的线性组合(如式(5)),越高次的谐波对误差的贡献率越大;
- 3) 对于不同的采样间隔,不同次的谐波,最大误差如表3。

表3 二次插值算法各次谐波最大采样误差

Tab.3 Error of quadratic interpolation method

采样点数	20/周波	48/周波	80/周波
基波	0.198%	0.014%	0.003%
二次谐波	1.584%	0.112%	0.024%
三次谐波	5.346%	0.378%	0.054%

从理论误差上来看,二次插值的同步算法具备更高的精度,选择好采样频率可使误差远远小于电子式互感器的传变误差,特别是在高次谐波的同步方面具备较大的优势。

5 仿真与分析

本文以 Matlab 为工具,对于该同步算法进行了仿真实验验证。

IEC60044标准规定电子式互感器的采样频率可取为20点/周、48点/周、或80点/周,本文采用了48点/周的采样频率。针对系统的不同运行状态,对采样值最大误差、各次谐波的幅值及其相位误差进

行了仿真。

5.1 采样值误差

1) 稳态采样值误差

稳态状态下, 电流为 $i(t) = I_1 \sin(\omega t + \alpha_1)$, 考虑最大误差的情况, 即插值点距离第二个离散点 $(\sqrt{3}/3)T$ 处。进行仿真, 得出的误差波形如图4。

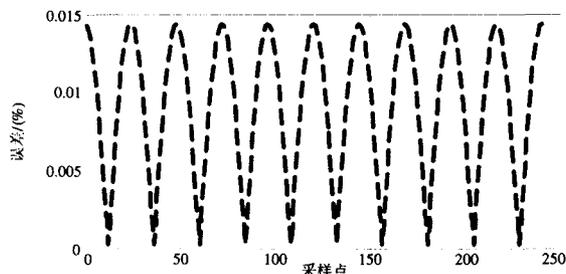


图4 稳态采样最大值误差图

Fig.4 Static sample value error

由图4可知, 稳态的采样值误差最大约为 $0.014\% I_1$, 与理论分析一致。

2) 暂态采样值误差

此时电流为 $i(t) = I_1 e^{\frac{t}{0.02}} + I_1 \sin(100\pi t + \alpha_1) + 0.35I_1 \sin(200\pi t + \alpha_2) + 0.1I_1 \sin(300\pi t + \alpha_3)$, 得出的最大误差波形如图5。

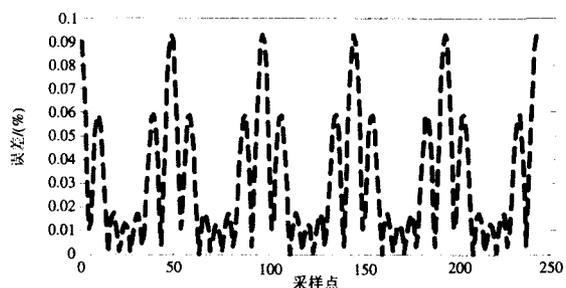


图5 暂态情况下采样值误差图

Fig.5 Transient sample value error

由图5可知, 采样值误差小于 $0.1\% I_1$, 而波形中所包含的三次谐波, 理论分析的最大误差为 0.378% , 从这一点上看, 仍然与理论分析吻合。

5.2 幅值、相位误差

实际工程中, 各种保护设备最关心的是各次谐波的幅值和相位。通过二次插值得出的新的“采样序列”虽然各自误差都很合理, 但由它们计算出的幅值和相位误差仍需分析。

1) 稳态幅值、相位误差

电流波形为 $i(t) = I_1 \sin(\omega t + \alpha_1)$, 其中初相角 α_1 以 1° 为步长, 在 $0^\circ \sim 15^\circ$ 共16个初相角下, 对

每种情况做插值, 插值点位置选取前两个离散点之间的16等分的等分点上, 共计15个插值位置。由此共得240种算例。罗列出幅值、相位误差如图6。

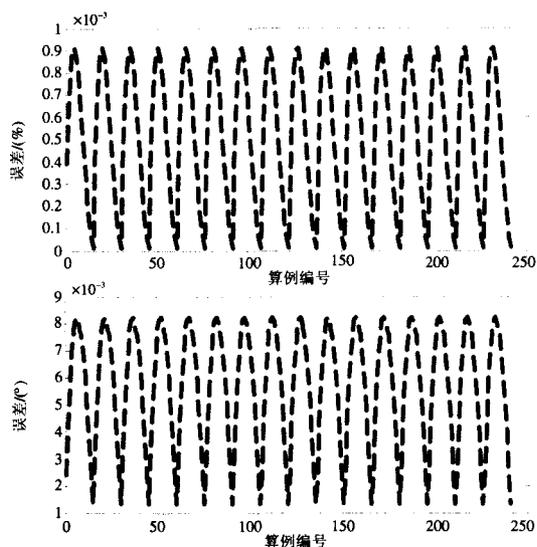


图6 稳态下幅值、相位误差

Fig.6 Static amplitude and phase error

由图6可知, 稳态下幅值误差小于 0.001% , 相位误差小于 0.01° 。

2) 暂态情况下各次谐波幅值、相位误差

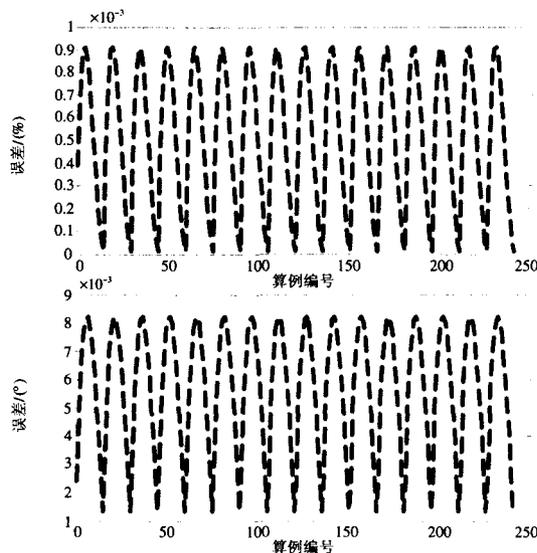


图7 暂态下基波幅值、相位误差

Fig.7 Transient error of fundamental-wave

电流波形为

$$i(t) = I_1 e^{\frac{t}{0.02}} + I_1 \sin(100\pi t + \alpha_1) + 0.35I_1 \sin(200\pi t + \alpha_2) + 0.1I_1 \sin(300\pi t + \alpha_3)$$

用同样的处理方法，得到各个谐波的 240 种算例。但同时必须注意，在进行傅里叶算法之前，先采取措施尽量消除衰减直流分量对结果的影响，以保证只有插值因素才是误差的唯一来源。由此，可得到暂态情况下：基波幅值、相位误差；二次谐波幅值、相位误差；三次谐波幅值、相位误差。

由图7可知，暂态下基波幅值误差小于0.001%，相位误差小于0.01°。

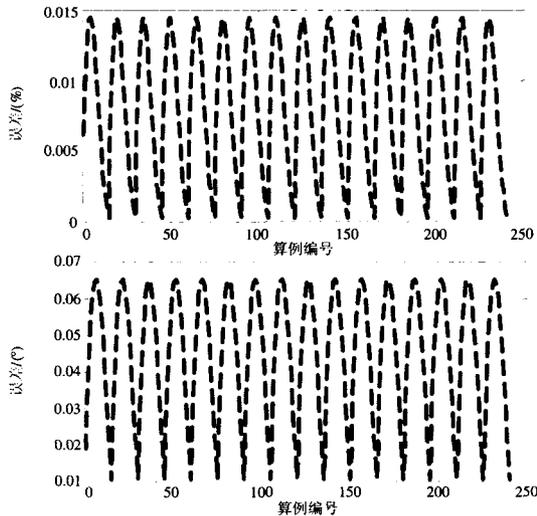


图8 暂态下二次谐波幅值、相位误差
Fig.8 Transient error of second harmonic

由图8可知，暂态下二次谐波幅值误差小于0.015%，相位误差小于0.07°。

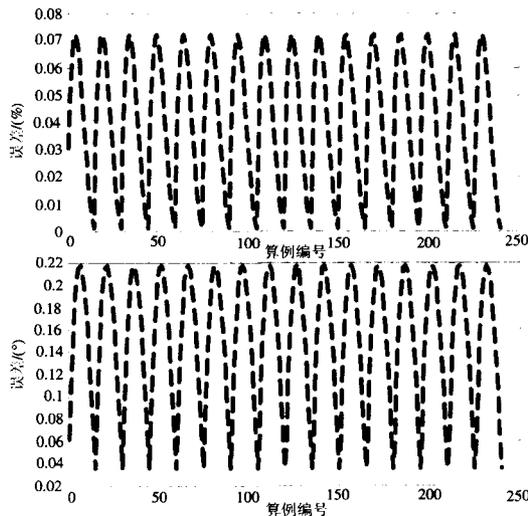


图9 暂态下三次谐波幅值、相位误差
Fig.9 Transient error of third harmonic

由图9可知，暂态下三次谐波幅值误差小于0.08%，相位误差小于0.22°。

6 总结

本文首先对线性插值同步算法进行了分析，依照 IEC60044 标准，线性插值不适合包含高次谐波的采样同步。在此基础上，本文提出了二次插值采样同步的理论，并对其进行了理论误差分析和仿真试验，最终表明该算法在二次、三次谐波等高次谐波同步方面相对线性插值有着更高的精度，适合应用在包含高次谐波电量的采样同步。

本算法相对线性插值只增加一个采样点，但极大地提高了精度，适合于基于电子式互感器的保护、录波装置中应用。

参考文献

- [1] IEC60044-8,Instrument Transformers, Part8: Electronic Current Transformers[S].
- [2] IEC61850-9,Communication Networks and Systems in Substations. Part9-1: Specific Communication Service Mapping (SCSM) Sampled Values Over Serial Unidirectional Multidrop Point to Point Link[S].
- [3] IEC61850-5,Communication Networks and Systems in Substations-Part 5: Communication Requirements for Functions and Device Models[S].
- [4] 刘琨, 等. 电子式互感器合并单元时间同步问题的解决方法[J]. 电力系统通信, 2006, 27: 71-75.
LIU Kun, et al. A New Method of Synchronization in MU of ECT[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2006, 27: 71-75.
- [5] 曹团结. 电子式互感器数据同步的研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19 (2): 108-113.
CAO Tuan-jie, et al. Discussion on Data Synchronization of Electronic Instrument Transformers[J]. Proceedings of the Electric Power System and Automation, 2007, 19 (2): 108-113.
- [6] 李庆扬, 等. 数值分析(第4版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2001.
LI Qing-yang, et al. Numerical Analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2001.

收稿日期: 2008-09-04; 修回日期: 2008-11-04

作者简介:

乔洪新(1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向电力系统微机保护; E-mail:qiaohongxin@163.com

黄少锋(1958-), 男, 教授, 从事电力系统继电保护理论、故障分析理论和微机保护技术的研究。

刘勇(1974-), 男, 工程师, 主要研究方向为数字化变电站。