

# 改进埃特金插值理论在智能变电站中的应用

王雪, 雷胜华

(华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003)

**摘要:** 分析了电子式互感器数据同步采样方面的问题, 指出了二次插值理论和三次样条插值理论同步算法的不足。只有当数据采样频率较高时, 才能使二次插值误差精度得到明显提高。三次样条插值的边界问题使计算过程变得复杂、计算量显著增大。提出了一种基于改进的三阶埃特金插值理论的同步算法, 并对该算法的误差进行了理论分析和仿真。仿真验证结果与理论分析基本吻合。不同运行状态下, 基波和各次谐波幅值及相角误差精度均满足 IEC60044-8 标准规定。改进后的三阶埃特金插值计算量小、精度高, 在微机测量装置中易于实现, 适于实际应用。  
**关键词:** 智能变电站; 电子式互感器; 采样同步; 埃特金插值; 误差分析

## Data synchronization based on improved Aitken interpolation in intelligent substation

WANG Xue, LEI Shenghua

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,  
North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** The problem of synchronous data acquisition in the electronic transformer is analyzed. Meanwhile, the deficiencies of the synchronous data acquisition of the quadratic interpolation and cubic spline interpolation are pointed out. The accuracy of error is clearly insufficient in the quadratic interpolation with low sampling frequency. However, the boundary conditions of cubic spline interpolation significantly increase the amount of computation. The synchronous data acquisition based on the advanced third-order Aitken interpolation theory is put forward, and the error is theoretically analyzed and simulated. The result of simulation is matched with the theoretical analysis. Under the various atmospheres, the fundamental and the harmonic amplitude and phase angle's error follows the standard of IEC60044-8. The advanced Aitken interpolation with higher precision and less simulation is easy to implement in the microcomputer measurement device, adapted to practical applications.

**Key words:** digital substation; electronic transformer; sampling synchronization; Aitken interpolation; error analysis

中图分类号: TM45; TM76

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)15-0073-06

## 0 引言

电子式互感器具有绝缘性能好, 无磁饱和、铁磁谐振, 动态范围大, 频率响应宽等优点, 完全弥补了传统电磁式互感器的不足, 可以有效减少保护误动和拒动次数。在电子式互感器的实用化过程中, 采集、传输数字信号必须基于统一的时序和时钟标准, 即时钟同步, 这样才能保证间隔层智能电子设备 (IED) 接收数据的准确性、可靠性和有效性, 进而使保护装置能够可靠动作, 保证智能变电站正常运行。传统集中式的实时电气量采集方式变为分布式实时采集后, 电子式互感器采样数据精度的高低很大程度上取决于采样同步<sup>[1-3]</sup>技术。

目前, 电子式互感器的数据采样同步方法主要

有三类: 脉冲同步法、插值法和基于 IEEE1588 协议的采样同步法<sup>[4-11]</sup>。脉冲同步法需要在合并单元和数据采集模块之间连接额外的硬接线, 增加了设备成本。同时, 同步时钟信号的丢失会导致较大范围的采样值失步。基于 IEEE1588 协议的采样同步法可以通过在主从时钟之间彼此传输包含时间标记的信息计算出时钟偏差和网络延时, 采样精度能达到亚微秒级, 但合并单元与数据采集模块之间仍需额外的硬接线, 相对同步脉冲法改革并不完善。插值法节省了合并单元与数据采集模块之间连接的硬接线, 只需要合并单元单方向接收数据采集模块发送的非同步采样, 而不要求合并单元向数据采集模块上行传输同步采样脉冲。插值法不仅原理简单, 而且降低了设备成本, 但是不同的插值法具有不同

的精度、收敛性、可靠性和计算量,因此,对不同插值法在电子式互感器数据采样同步中的应用研究具有重要的理论意义。

## 1 几种常见的插值法

电子式互感器在实际应用中比较常见的插值算法有线性插值、二次插值、三次样条插值等。不同的插值算法会有不同的计算量、精度、可靠性和应用范围,需要综合考虑各个方面选择合适的插值算法。

对二次、三次谐波等高次谐波进行采样插值同步,二次插值算法比线性插值算法误差精度更高<sup>[12]</sup>,但其误差精度在采样频率较低时改进却不是特别明显<sup>[13-14]</sup>。相对二次插值算法,在较低采样频率下,三次样条插值也能显著提高基频和各次谐波的采样精度,而当每周波采样点为48点时,三次样条插值算法甚至能在二次插值算法的误差精度上将误差精度提高2个数量级以上<sup>[15]</sup>。但是,三次样条插值算法在实践应用中计算过程复杂、计算量较大。

## 2 基于埃特金插值的数据同步理论

低次插值的数据精度较差,而盲目提高插值多项式次数以获得较高数据精度不仅会显著提高计算量,而且还会产生振荡。埃特金插值理论的基本思想是将一个高次多项式逼近目标值的过程转换成多个线性插值的线性组合,将一个复杂的高次插值用多个线性计算逐步插值来实现。

埃特金插值法的基本原理是:对于已知的采样点数据序列 $(x_i, y_i), i=0, 1, \dots, n$ ,选取其中的 $m(m < n)$ 个采样点数据,组成插值数据组。在确定的插值点进行 $m-1$ 次线性插值,可得到 $m-1$ 个插值函数,再对得到的 $m-1$ 个函数进行 $m-2$ 个插值函数,依此逐步计算,最后将第 $m$ 次插值结果作为所求插值点的最终计算结果,计算结束。现取实测数据中3个数据 $(x_0, y_0)$ 、 $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ 组成插值数据组,在插入点 $x$  ( $x_0 < x < x_2$ )处进行插值说明该算法。以 $(x_0, y_0)$ 为插值基点,做线性插值。

$$P_{01}(x) = \frac{x-x_1}{x_0-x_1}y_0 + \frac{x-x_0}{x_1-x_0}y_1 \quad (1)$$

$$P_{02}(x) = \frac{x-x_2}{x_0-x_2}y_0 + \frac{x-x_0}{x_2-x_0}y_2 \quad (2)$$

令 $P_{01}(x)$ 、 $P_{02}(x)$ 为 $x_1$ 、 $x_2$ 处新的函数值,即 $y'_1 = P_{01}(x)$ 、 $y'_2 = P_{02}(x)$ 。再以 $(x_1, y'_1)$ 为插值基点进行线性组合,得

$$P_{012}(x) = \frac{x-x_2}{x_1-x_2}y'_1 + \frac{x-x_1}{x_2-x_1}y'_2 \quad (3)$$

将 $y'_1$ 、 $y'_2$ 的值代入 $P_{012}(x)$ 有

$$P_{012}(x) = \frac{(x-x_1)(x-x_2)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)}y_0 + \frac{(x-x_0)(x-x_2)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)}y_1 + \frac{(x-x_0)(x-x_1)}{(x_2-x_0)(x_2-x_1)}y_2 \quad (4)$$

由式(4)可以看出两个线性插值再经过一次线性组合可以得到这3个点的二次插值,依次类推,两个二次插值经过一次线性插值组合可以实现三次插值,最终可由两个 $m-1$ 次插值经过一次线性插值组合得到 $m$ 次插值,则埃特金插值通式为

$$P_{0,1,\dots,k-1,i}(x) = \frac{x-x_i}{x_{k-1}-x_i}P_{0,1,\dots,k-2,k-1}(x) + \frac{x-x_{k-1}}{x_i-x_{k-1}}P_{0,1,\dots,k-2,i}(x) \quad (5)$$

埃特金插值法是在确定的插值点运用线性插值的线性组合求得该点的近似函数值,增加插值组合的点数可以提高插值函数的精度。由于每次插值组合都是线性的,所以埃特金插值法计算简单,数据可靠,高次插值不会振荡。

由埃特金插值理论可知,三阶埃特金插值(以下简称埃特金插值)函数的误差与三次多项式插值误差相同。在电力系统的暂态过程中,电流公式可以表示为直流分量和谐波分量叠加的形式:

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [I_n \sin(n\omega t + \varphi_n)] \quad (6)$$

利用拉格朗日插值的误差公式,对其误差进行分析。

$$R_3(t) = \left| \frac{i^{(4)}(\xi)}{4!} (t-t_0)(t-t_1)(t-t_2)(t-t_3) \right| \quad (7)$$

式中: $R_3(t)$ 为埃特金插值误差; $i^{(4)}(\xi)$ 为 $i(t)$ 在 $t=\xi$ 处的4阶导数,其中 $\xi \in [t_0, t_3]$ 。则

$$R_3(t) \leq \frac{1}{24} \omega^4 \sum_{n=1}^{\infty} [n^4 I_n^4] |(t-t_0)(t-t_1)(t-t_2)(t-t_3)| = \frac{64.94}{N^4} \sum_{n=1}^{\infty} [n^4 I_n^4] \quad (8)$$

式(8)中: $|(t-t_0)(t-t_1)(t-t_2)(t-t_3)|$ 在 $t=t_1 - \frac{\sqrt{5}-1}{2}t_d$

处取得最大值 $t_d^4$ ,其中, $t_d$ 为电子式互感器采样周期; $N$ 为电子式互感器每周波采样点数。由式(8)可知,插值最大误差由基波和各次谐波误差线性组合而成,且采样频率越高误差越小。采样频率越高对硬件性能要求越高,而采样频率过低对精度的改善不明显,本文取采样频率为48点/周波,分析二次插值、三次样条插值、埃特金插值基波与各次谐波的理论最大误差,如表1所示。

表 1 各种插值算法理论最大误差分析  
Table 1 Analysis of theoretical maximum error of various interpolation algorithms

插值算法	二次插值	三次样条插值	埃特金插值
基波	$1.439 \times 10^{-2}$	$3.814 \times 10^{-4}$	$1.223 \times 10^{-3}$
2次谐波	0.115 1	$6.120 \times 10^{-3}$	$1.957 \times 10^{-2}$
3次谐波	0.388 5	$3.096 \times 10^{-2}$	$9.910 \times 10^{-2}$
5次谐波	1.798 5	0.238 9	0.764 6
7次谐波	4.395 1	0.917 7	2.937 2
9次谐波	10.488 9	2.507 7	8.026 3

二次插值算法计算每一个插值点需要 6 次乘法和 2 次加法。三次样条插值算法在每个分段区间的端点要进行二次插值计算, 以抛物线在端点处的斜率为端点导数值, 再采用三转角法、三弯矩法、B 样条基函数法等常规方法确定三次样条函数的系数, 系数和端点导数值确定后每个插值点还需 9 次乘法和 3 次加法<sup>[13]</sup>。埃特金插值算法计算每个插值点需进行 6 次线性插值, 共 12 次乘法和 6 次加法。

由表 1 可知, 对于基波和低次谐波, 埃特金插值相对二次插值误差精度提高了一个数量级, 随着谐波次数增高, 精度改进效果降低。埃特金插值计算量明显小于三次样条插值, 但相对二次插值改进仍然不足。综合误差精度和计算量考虑, 埃特金插值仍需改进。

### 3 埃特金插值理论的改进

取插值组合  $(x_0, y_0)$ 、 $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$ 、 $(x_3, y_3)$ , 插值点  $(x, y)$  的位置有三种情况:  $x_0 < x < x_1$ 、 $x_1 < x < x_2$ 、 $x_2 < x < x_3$ 。由埃特金插值理论分析, 当  $x_1 < x < x_2$  时, 最大插值误差最小, 故实际工程中插值区间按  $x_0 < x_1 < x < x_2 < x_3$  确定。埃特金插值具体步骤如表 2 所示, 其中  $P_{012}(x)$  和  $P_{013}(x)$  分别为  $(x_0, y_0)$ 、 $(x_1, y_1)$ 、 $(x_2, y_2)$  和  $(x_0, y_0)$ 、 $(x_1, y_1)$ 、 $(x_3, y_3)$  的二次插值, 而插值点位于  $x_1$  与  $x_2$  之间。埃特金插值数据处理采用二次插值和线性插值的组合而不是线性插值的逐步迭代。

表 2 埃特金插值具体步骤

Table 2 Concrete steps of Aitken interpolation

采样点	第一次插值	第二次插值	第三次插值
$(x_0, y_0)$			
$(x_1, y_1)$	$P_{01}(x)$		
$(x_2, y_2)$	$P_{02}(x)$	$P_{012}(x)$	
$(x_3, y_3)$	$P_{03}(x)$	$P_{013}(x)$	$P_{0123}(x)$

采样模块完成数据采样至传送到合并单元的时延确定后, 插值区间也随之确定, 插值点与插值区

间内每一个采样点的时间差可以计算得到, 而合并单元的采样周期为定值, 则改进后埃特金插值数据处理的前两次二次插值可以表示为

$$\begin{cases} P_{012}(x) = C_0 y_0 + C_1 y_1 + C_2 y_2 \\ P_{013}(x) = C'_0 y_0 + C'_1 y_1 + C'_2 y_3 \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $C_0$ 、 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C'_0$ 、 $C'_1$ 、 $C'_2$  为定值, 均可通过时延确定。事先将这几个系数储存在合并单元中, 则完成前两次二次插值只需 6 次乘法和 4 次加法; 同理最后一次线性插值只需 2 次乘法和 1 次加法, 改进的数据处理方法使得该算法计算过程更加简单, 计算量接近二次插值。

### 4 仿真与分析

电力系统具有复杂的运行状态, 而不同运行状态下插值精度不同。本文就电力系统稳态和暂态情况, 对采样插值的最大误差进行了仿真验证。其中, 合并单元每周波的采样点数取 48 点/周波。

#### 4.1 采样值误差

1) 稳态状态下, 电流为  $i(t) = I_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$ 。

在电流过零点和电流达到最大值附近分别取 1 个插值区间, 将插值区间分成 16 等分, 每一个等分点为一个插值点, 每一等分时间为  $\Delta t = 3t_d / 16$ , 仿真得到同一插值区间 15 个插值点对应的插值误差, 如图 1。由图 1 可知, 插值点附近电流越大, 插值误差越大, 但插值点在每个插值区间的正中间时对应插值误差最小。因此, 根据  $x_1 < x < x_2$  选择合适的插值区间可以在一定程度上提高插值精度, 后续仿真过程均按此选择插值区间。

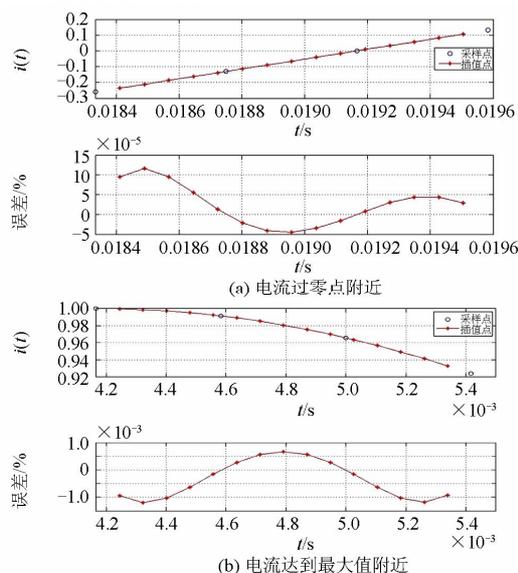


图 1 不同情况下同一插值区间不同插值点插值误差

Fig. 1 Interpolation error of different interpolation points in the same interpolation range under different circumstances

图 2 为仿真得到的稳态时一个周波内采样值、插值以及插值点误差的变化图。由图 2 可知, 插值误差随着插值时刻周期变化而变化, 稳态采样插值的最大误差为  $0.000686\%I_1$ , 满足电子式互感器稳态测量误差精度 0.2 级的要求, 且最大插值误差与三次样条插值为同一数量级。

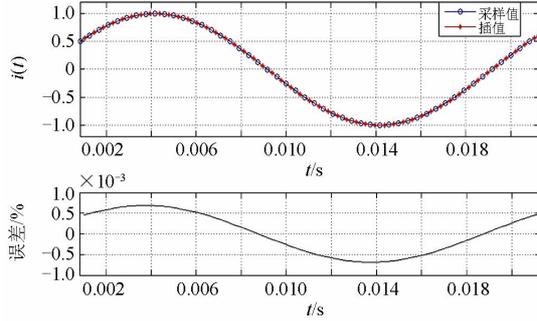


图 2 改进埃特金插值在稳态时最大误差  
Fig. 2 Maximum steady-state error of advanced Aitken interpolation

2) 暂态情况下, 电流为

$$i(t) = I_0 e^{-\frac{t}{0.02}} + I_1 \sin(100\pi t + \varphi_1) + 0.35I_1 \sin(200\pi t + \varphi_2) + 0.1I_1 \sin(300\pi t + \varphi_3) \quad (10)$$

图 3 为仿真得到的暂态时每一个周波内采样值、插值以及插值点误差变化图。由图 3 可知, 插值误差将随着插值时刻周期变化而变化, 最大插值误差小于  $0.1\%I_1$ , 满足电子式互感器暂态测量误差小于  $\pm 0.1\%$  的要求。

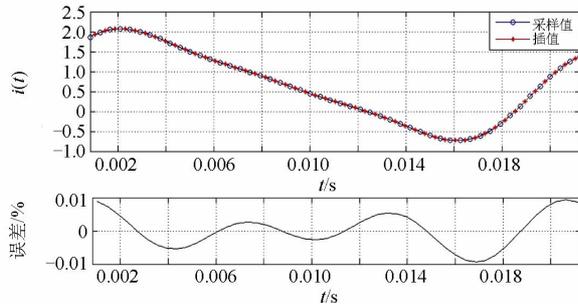


图 3 改进埃特金插值在暂态时最大误差  
Fig. 3 Maximum transient-state error of advanced Aitken interpolation

#### 4.2 幅值与相位误差

1) 稳态幅值、相位误差

实际工程中, 暂态情况下各次谐波的幅值及其相位对保护的正确动作有很大影响, 本文具体分析了二次和三次谐波相位及幅值误差。稳态电流为  $i(t) = I_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$ , 对应每一个初相角  $\varphi_1$ , 插值时

刻滞后插值区间中第二个采样点的时间以  $\Delta t'$  为步长从  $\Delta t' \sim 15\Delta t'$  变化, 其中  $\Delta t' = t_d / 16$ 。当  $\varphi_1 = 1^\circ$  时, 仿真得到一个周波内不同插值时刻基波幅值和相位误差变化如图 4。由图 4 可知, 幅值和相角误差均随插值时刻周期变化, 当插值时刻位于插值区间正中间时, 幅值误差最大, 相角误差为 0。

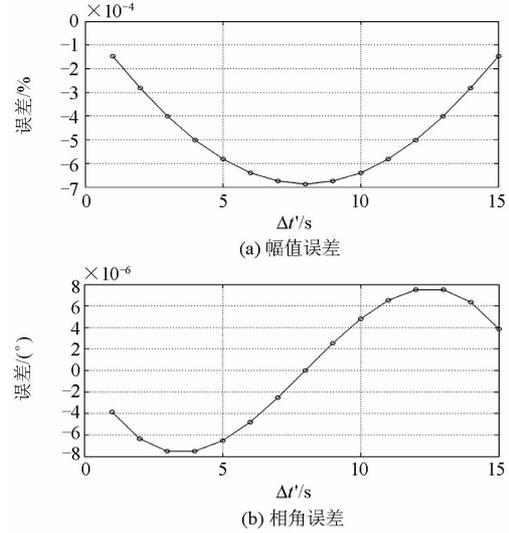


图 4 不同插值时刻改进埃特金插值基波幅值和相角误差  
Fig. 4 Fundamental amplitude and phase angle error of advanced Aitken interpolation in different interpolation time

当插值时刻取滞后插值区间中第二个采样点  $\Delta t'$ ,  $\varphi_1$  以  $1^\circ$  为步长从  $1^\circ \sim 15^\circ$  变化, 仿真得到一个周波内基波幅值和相位误差如图 5。由图 5 可知,

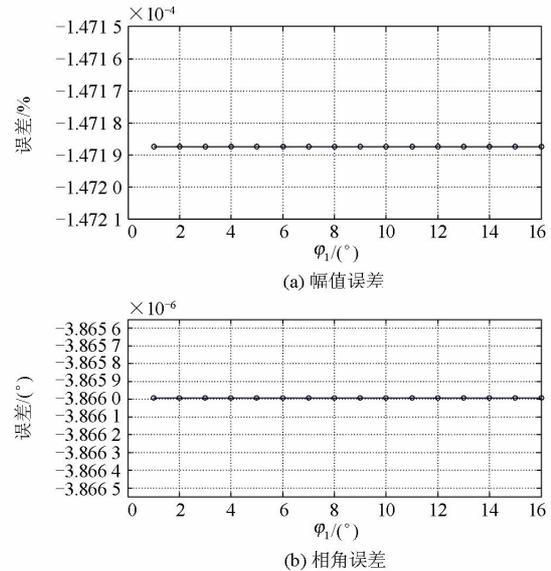


图 5 不同初相角改进埃特金插值基波幅值和相角误差  
Fig. 5 Fundamental amplitude and phase angle error of advanced Aitken interpolation in different initial phase angle

当初相角变化时,幅值和相角误差变化几乎为零,可以忽略。由此可以得出结论:采样频率确定后,插值误差只与插值时刻有关,与初相角无关。

2) 暂态情况下基波和各次谐波幅值相位误差暂态电流为

$$i(t) = I_0 e^{-\frac{t}{0.02}} + I_1 \sin(100\pi t + \varphi_1) + 0.35I_1 \sin(200\pi t + \varphi_2) + 0.1I_1 \sin(300\pi t + \varphi_3) \quad (11)$$

按照上述同样的方法可以得到基波和各次谐波误差。为了简化仿真过程,此处假设基波与各次谐波初始相位相同。在电力系统暂态情况下得到基波和各次谐波幅值及相位插值最大误差如表3所示。由表3可知,暂态时电流的幅值和相位误差由基波和各次谐波的相位和幅值误差组成,且次数越高的谐波其幅值和相位误差越大。

表3 暂态下改进埃特金插值的基波和各次谐波幅值、相位插值误差

Table 3 Fundamental and harmonic amplitude, phase angle error of advanced Aitken interpolation during the transient-state

插值误差	幅值/%	相位/(°)
基波	0.000 687	0.000 007 51
二次谐波	0.003 8	0.000 239
三次谐波	0.005 5	0.001 8

## 5 结论

本文首先详细分析了埃特金插值原理及特点,并结合二次插值、三次样条插值的原理及优缺点从最大误差、计算量等方面作了比较分析。埃特金插值可以在二次插值满足二次、三次谐波误差精度的基础上将精度提高一个数量级,又避免了采用三次样条插值而带来的边界问题和端点导数值计算,提高了计算速度,降低了对硬件性能的要求。通过进一步剖析埃特金插值的本质,对埃特金插值理论进行了改进,改进后其数据处理方法的计算量与二次插值相差不大且具有更高的精度,更适于实际应用。仿真验证,结果与理论分析吻合,该算法适用于对高次谐波精度要求较高的 IED。

## 参考文献

[1] 罗彦,段雄英,邹积岩,等. 电子式互感器中数字同步和数字通信技术[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(9): 77-81.  
LUO Yan, DUAN Xiongying, ZOU Jiyan, et al. Digital synchronization and communication technology for electronic transformer[J]. Automation of Electric Power

Systems, 2012, 36(9): 77-81.  
[2] 李宝伟,倪传坤,唐艳梅,等. 智能变电站组网传输采样值光纤差动保护同步方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 145-147.  
LI Baowei, NI Chuankun, TANG Yanmei, et al. Research of the sample synchronization scheme for optical differential protection based on sampled value transmit by network in smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 145-147.  
[3] 胡浩亮,吴伟将,雷民,等. 计量用合并单元及电子式互感器计量接口规范化探讨[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1415-1417.  
HU Haoliang, WU Weijiang, LEI Min, et al. Discussion on standardization of merging unit for metering and electronic transformer metering interface[J]. Power System Technology, 2014, 38(5): 1415-1417.  
[4] IEC60044-7 instrument transformers-part 7: electronic voltage transducers[S]. 2002.  
[5] IEC60044-8 instrument transformers-part 8: electronic current transducers[S]. 2002.  
[6] 张籍,彭昌勇,杜治. 三种同步方式下电子式互感器误差校验比较研究[C]// 中国电机工程学会, 2013.  
ZHANG Ji, PENG Changyong, DU Zhi. Comparative study of calibration method of electronic transformer based on three kinds of time synchronization modes[C]// Chinese Society of Electrical Engineering, 2013.  
[7] 殷志良,刘万顺,杨奇逊,等. 基于 IEEE1588 实现变电站过程总线采样值同步新技术[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(13): 60-63.  
YIN Zhiliang, LIU Wanshun, YANG Qixun, et al. A new IEEE 1588 based technology for realizing the sampled values synchronization on the substation process bus[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(13): 60-63.  
[8] 刘琨,周有庆,张午阳,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(161): 71-74.  
LIU Kun, ZHOU Youqing, ZHANG Wuyang, et al. Method for solving the synchronization of merging unit in electronic transducer[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2006, 27(161): 71-74.  
[9] 刘曲波,李红斌,谢经东. GPS 时钟同步在电子互感器合并单元中的应用[J]. 电气应用, 2007, 26(5): 42-44.  
LIU Qubo, LI Hongbin, XIE Jingdong. The application of GPS clock synchronization in electronic transformer merge units[J]. Electrical Applications, 2007, 26(5):

- 42-44.
- [10] 卜强生, 宋亮亮, 张道农, 等. 基于 GPS 对时的分散采样差动保护同步测试方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(42): 149-154.  
BU Qiangsheng, SONG Liangliang, ZHANG Daonong, et al. Research on the test method of distributed sampling differential protection synchronization based on GPS time[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 149-154.
- [11] 朱超, 梅军, 黄潇贻, 等. 站域信息实时同步采集中同步采样时钟的设计[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(6): 107-110.  
ZHU Chao, MEI Jun, HUANG Xiaoyi, et al. Design of synchronous sampling clock in real-time synchronous acquisition of substation area information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(6): 107-110.
- [12] 曹团结, 尹项根, 张哲, 等. 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): 109-113.  
CAO Tuanjie, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Discussion on data synchronization of electronic instrument transformers[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007, 19(2): 109-113.
- [13] 乔洪新, 黄少锋, 刘勇. 基于二次插值理论电子式互感器数据同步的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 48-51.  
QIAO Hongxin, HUANG Shaofeng, LIU Yong. Discussion on data synchronization of electronic current transducer based on quadratic interpolation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(15): 48-51.
- [14] 张雷, 张国, 邱亚琴. Lagrange 插值的改进算法研究及误差分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 66-70.  
ZHANG Lei, ZHANG Guo, QIU Yaqin. Research and error analysis of an improved Lagrange interpolation algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 66-70.
- [15] 董义华, 孙同景, 徐丙垠. 基于三次样条插值理论电子式互感器数据同步[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(5): 102-107.  
DONG Yihua, SUN Tongjing, XU Bingyin. Data synchronization based on cubic spline interpolation for electronic instrument transformers[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(5): 102-107.

---

收稿日期: 2014-10-22; 修回日期: 2015-01-12

作者简介:

王雪(1978-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统继电保护与控制;

雷胜华(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护与控制。E-mail: leishenghua1014@qq.com

(编辑 周金梅)