

基于线性 Lagrange 插值法的变电站 IED 采样值接口方法

周 斌, 鲁国刚, 黄国方, 沈 健

(国网南瑞科技股份有限公司, 江苏省南京市 210003)

摘要: 随着电子式互感器技术的发展和 IEC 61850 标准的推广, 变电站间隔层智能设备的交流采样技术将由传统的对模拟信号 A/D 转换技术变革为以太网通信技术。为了不改变传统保护、测控装置算法, 分析了采用线性 Lagrange 插值原理对合并单元输入的采样值进行数据抽取的方法, 进行了误差分析, 并分析了谐波信号对插值算法的影响。最后简要介绍了该方法在新型数字化变电站测控装置中的应用, 经测试, 精度满足要求。

关键词: 变电站; 智能电子设备(IED); 电子式互感器; 采样值; 信号抽取; Lagrange 插值; 谐波

中图分类号: TM764

0 引言

在电力系统中, 长期以来一直使用常规电磁式电流、电压互感器或电容式电压互感器转换变送一次电流、电压信号, 在高压、超高压电力工程的应用中, 由于系统电压的增高, 致使互感器的绝缘结构复杂、体积增加, 造价也随之升高, 同时, 电磁式电流互感器还存在着磁饱和、铁磁谐振、动态范围小等缺点, 已难以满足电力系统的应用发展要求^[1]。随着技术的发展, 采用磁光、电光变换原理或由无铁心线圈构成的新型电子式互感器应运而生^[2], 其具有体积小、重量轻、动态范围宽、无饱和现象、绝缘结构简单可靠等优点^[3], 是未来互感器发展和变电站系统数字化发展的必然趋势^[4]。

国际电工委员会(IEC)已经制定了电子式电压、电流互感器的标准: IEC 60044-7^[5] 和 IEC 60044-8^[6]。目前, 为实现变电站自动化系统的标准化和互操作性, 已制定了 IEC 61850 标准, 它是基于网络通信平台的变电站自动化系统惟一的国际标准^[7-8]。根据 IEC 60044-8 和 IEC 61850-9-1 的规定, 位于过程层的电子互感器经合并单元(MU)输出数字信号, MU 经以太网发送采样值数据至位于间隔层的智能电子设备(IED)^[9]。传统的变电站 IED 通常必须对由电力电缆输入的电压、电流信号进行隔离变换, 然后进行 A/D 转换、交流采样, 再进一步完成各自的功能。现在交流输入改为由 MU 传入的数字采样值信号, 这就有必要对新型变电站 IED 的采样值接口技术进行研究。

1 采样值数据接收

IEC 60044-8 举例的电子式互感器接口框图如图 1 所示, 一个间隔的电压、电流互感器通过 MU 分成组接至二次装置^[6]。间隔层 IED 通过以太网或光纤接收由 MU 输入的采样值数据。间隔层 IED 取消了传统的交流采样软硬件模块, 代之以以太网或光纤通信接口。

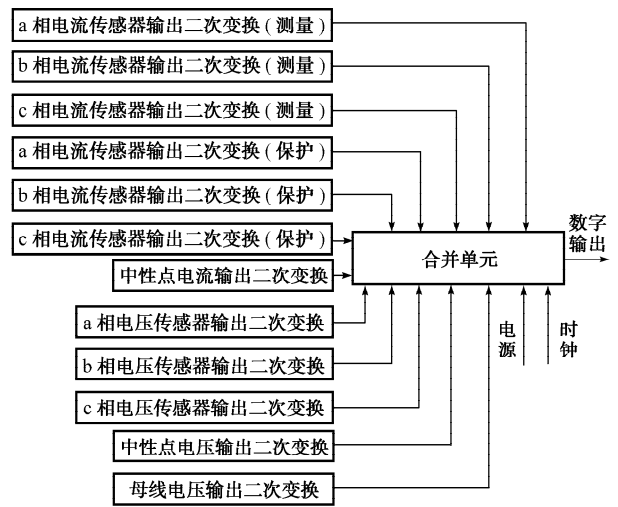


图 1 电子式互感器配置示例
Fig. 1 Example for electronic transformers configuration

被 IEC 61850-9-1 引用、在 IEC 60044-8 中定义的采样值传输的通用数据集内容如表 1 所示。

通用数据集中编排了 12 个通道的采样值, 类型为 16 位整数。MU 的采样速率在通用数据集中占用 1 B, 它表示 MU 的交流采样频率, 一般为 $40f_r$, $80f_r$, $200f_r$ 等(f_r 为电网额定频率, 一般为 50 Hz), 采样频率是固定不变的。目前国内变电站使用的保护、测控等 IED 的采样率一般为每周期 24 点、32 点

或 64 点等,两者之间并不相等。为了不改变原来装置的成熟算法,我们考虑能否对 MU 输入的采样值信号进行抽取,这样可以只将现在保护、测控装置的交流采样模块升级为采样值接收、抽取模块,而其他功能模块可以直接采用,对数字化 IED 的开发非常有利。线性 Lagrange 插值抽取的方法由于其原理简单、计算快速、实时性高,是首选的方案,因此有必要研究插值的具体方法,同时进行可行性分析。

表 1 IEC 60044-8 定义的通用数据集内容
Table 1 Contents of the universal data set based on the specification in IEC 60044-8

ASDU 通用数据集内容	字节数
ASDU 报头	2
逻辑节点名	1
数据集名	1
逻辑设备名	2
额定相电流	2
额定零序电流	2
额定相电压	2
额定延时	2
采样值 1~12 通道	24
状态字 1	2
状态字 2	2
采样计数器	2
采样速率	1
配置版本号	1

2 线性插值抽取方法和误差估计

设原始模拟信号为 $x(t) = \sum_{k=0}^N A_{km} \sin(k\omega t + \phi_k)$, 并设 f_s 为 MU 采样频率, T_s 为对应的采样周期, 由 MU 采样并输入变电站 IED 的采样值信号序列为 $x(n) = x(nT_s)$, 设变电站 IED 采样频率为 f_s' , T_s' 为对应的采样周期, 则其理想的采样序列应为 $y(n) = x(nT_s') = x\left(n \frac{f_s}{f_s'} T_s\right)$ 。由于 $n \frac{f_s}{f_s'} T_s$ 一般不是整数, 不能直接抽取, 因此可以对其相邻的 2 个采样值点进行线性 Lagrange 插值。设 $u = n \frac{f_s}{f_s'} T_s$, 并设 m 是小于 $n \frac{f_s}{f_s'} T_s$ 的最大整数, 将 $y(n)$ 在 $x(m)$ 和 $x(m+1)$ 间进行线性插值, 其线性插值公式如下:

$$y(n) = x(m)(m+1-u) + x(m+1)(u-m) \quad (1)$$

线性 Lagrange 插值余项为:

$$R_1 = \frac{x''(\xi)}{2!} (u-m)(u-m-1) T_s^2$$

$$\xi \in (mT_s, (m+1)T_s)$$

利用 Lagrange 插值余项估计插值点的插值误差为:

$$|R_1| \leq \frac{|x''(\xi)|}{8} T_s^2 \leq \frac{1}{8f_s^2} \sum_{k=1}^N A_{km} (k\omega)^2 \quad (2)$$

可见, MU 的采样频率 f_s 越高, 误差越小; 插值误差与再采样的频率 f_s' 无关; 原信号的幅值越大, 插值的误差越大; 原信号中的直流分量不会增加插值的误差; 随着谐波次数的增加, 其插值的误差以平方倍的关系增加。

3 对额定频率信号的插值分析

大多数情况下, 电网的谐波含量较低, 同时, 电网的频率是额定频率, 这时可以认为输入信号是只含额定工频分量的交流信号。此时由式(2)得插值误差:

$$|R_1| \leq \frac{1}{8f_s^2} A_{1m} \omega^2 \quad (3)$$

如果 MU 采样频率 $f_s = 80f_r$, 经计算经过插值抽取误差最大点相对误差约为 0.1%; 如果 $f_s = 200f_r$, 相对误差约为 0.017%, 误差已经非常小, 与 16 位 A/D 转换电路的量化误差差不多, 可以忽略。

根据 IEC 60044-8, 测量用电子式互感器数字输出的额定标准均方根值为十六进制的 2D41H(十进制为 11 585)^[6], 其幅值为十进制 16 384。图 2 给出了当原始信号为 $x(t) = 16\,384 \sin 100\pi t$, 经 MU 以 $80f_r$ 的采样频率采样, 然后由 IED 进行插值抽取为每周期 32 点得出的新序列 $y(n)$ 。由图 2 可见, 采样效果是非常理想的。经过 MATLAB 仿真, 采用离散傅里叶变换(DFT)或快速傅里叶变换(FFT)算法进行运算, 任意改变信号相位, 插值误差造成信号均方根值的相对误差小于 0.04%, 如果电压、电流信号都采用此方法进行插值, 造成的功率计算的相对误差小于 0.08%; 如果 MU 采样频率为 $200f_r$, 则插值影响基本可以忽略。

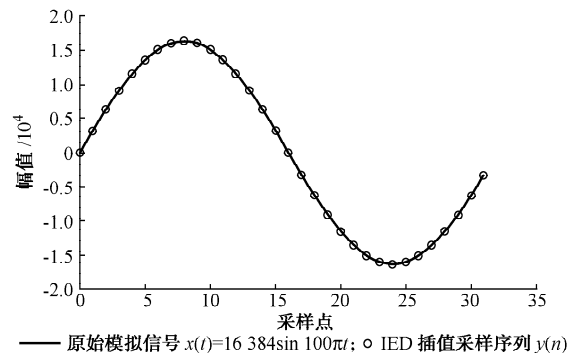


图 2 MU 以 $80f_r$ 的采样频率采样、IED 以 $32f_r$ 插值抽取效果

Fig. 2 Effect of interpolation (The sampling frequency of MU is $80f_r$, the re-sampling frequency of IED is $32f_r$)

4 频率偏离情况的插值处理

电网的频率和额定频率往往有一定偏差,间隔层 IED 对不同频率情况下的测量精度有一定的要求,根据我国电力行业标准 DL/T 630—1997《交流采样远动终端技术条件》,当输入交流信号频率在 45 Hz 至 55 Hz 范围内时,交流采样装置对信号的幅值和功率的测量变差不能超过相应的等级指数^[10]。

MU 是以额定频率的整数倍进行等间隔固定频率采样,即 f_s 固定,如果 IED 的采样频率 f_s' 也固定,然后直接进行 DFT 或 FFT 运算,可能出现频谱的栅栏效应和频谱泄露现象^[11-12],造成测量误差。目前变电站测控装置一般对交流信号进行频率跟踪采样,获得较高的测量精度^[13]。基于线性 Lagrange 插值原理的 IED 也可以根据需要进行信号的频率跟踪抽取,方法是先采用数字算法计算信号频率^[14-15],然后根据信号频率,实时调整抽取频率 f_s' 进行信号抽取,抽取后的数据即可采用传统智能设备采用的方法进行计算分析。

由于基波插值误差式(3)与信号抽取频率 f_s' 无关,与信号角频率 ω 即频率 f 有关,而信号频率 f 只在 $-10\% f_r \sim 10\% f_r$ 范围内变化,因此对抽取的精度影响较小。经 MATLAB 仿真,插值精度以及幅值、功率计算精度和额定频率时误差基本相同。

5 谐波对插值的影响

随着非线性负荷的增加以及电力电子器件的应用,电网的谐波含量越来越高,其对测量和保护的影响已经不容忽视。小于 0.5 倍 MU 采样频率 f_s 的谐波信号被 MU 采样并进入 IED^[6]。保护装置可以在插值抽取前采用数字滤波方法将其谐波分量滤除,但根据我国电力行业标准 DL/T 630—1997《交流采样远动终端技术条件》,当 13 次及以下谐波含量在 20% 以下时,测控装置必须能测出谐波和基波的总的均方根和总的有功、无功功率^[10],因此,测控装置必须能够分析 13 次及以下谐波。这里对谐波分量的输入对 Lagrange 线性插值的影响进行分析。

设信号某次谐波分量为 $x_k(t) = A_{km} \sin(k\omega t + \phi_k)$,根据式(2),其造成的插值误差为:

$$|R_1| \leq \frac{1}{8f_s^2} A_{km} 4\pi^2 k^2 f_1^2 \quad (4)$$

插值的误差与谐波次数的平方成正比,因此这里主要分析 13 次谐波的影响。设基波额定幅值为 16 384,谐波分量为 20%,即 $A_{13m} = 3\,277$,信号基波频率 $f_1 = f_r$,如果 MU 的采样频率 $f_s = 80f_r$,根据

式(4)进行误差估计,最大插值误差为 427,误差较大,数据基本不可用;如果 $f_s = 200f_r$,最大插值误差为 68,虽然仍有一定误差,但它是最大可能误差,实际插值时,大多数插值点的误差往往小于该值,而且 DFT 或 FFT 算法有滤波平滑作用,最后实际计算出的电压、电流和功率的误差一般较小。

设输入信号为 $x(t) = 16\,384\sin 100\pi t + 3\,277\sin 1\,300\pi t$,MU 采样频率为 $200f_r$,间隔层 IED 以每周期 32 点进行插值采样,图 3 为插值采样的效果图。采用 FFT 算法分解出基波至 13 次谐波的幅值见表 2。求得其均方根的相对误差为 0.05%,可见插值引起均方根误差很小,改变输入信号的相位,结果基本相同。因此,当均方根值精度等级为 0.2% 时,在信号有谐波情况下,如果 MU 的采样频率达到 $200f_r$,采用线性 Lagrange 方法能够满足精度要求。当进行电压、电流信号之间的功率计算时,经仿真计算误差小于 0.1%,一般测控装置的功率测量精度等级为 0.5%,插值方法也能满足测控装置的精度要求。

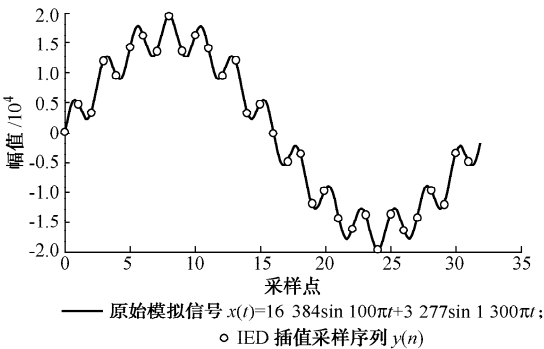


图 3 MU 以 $200f_r$ 的采样频率采样,IED 以 $32f_r$ 插值采样效果

Fig. 3 Effect of interpolation (The sampling frequency of MU is $200f_r$, the re-sampling frequency of IED is $32f_r$)

表 2 采用 FFT 算法分解插值采样序列 $y(n)$ 的基波和各次谐波幅值

Table 2 Amplitudes of fundamental and every harmonics calculated by the FFT algorithm on the re-sampled values sequence $y(n)$

谐波次数	理论幅值 X_{km}	计算幅值 X_{km}'	谐波次数	理论幅值 X_{km}	计算幅值 X_{km}'
1	16 384	16 383	8	0	0
2	0	0	9	0	0.5
3	0	8.4	10	0	0
4	0	0	11	0	15.3
5	0	18.8	12	0	0
6	0	0	13	3 277	3 234
7	0	0.51			

从表 2 还可以看出,13 次谐波相对误差为 $1.3\%U_h$,小于国家对 A 级谐波测量仪的要求($5\%U_h$)^[16],其他有些次的谐波分量虽有很小的输出,但也满足国家 A 级标准。改变信号的谐波相位和谐波次数,情况相同。因此,该方法也适合进行较低次数的谐波分析。

6 结语

由于 MU 采样频率和间隔层 IED 采样频率不同,为了不改变传统变电站保护、测控装置的成熟算法,可以对 MU 输入的采样值通过线性 Lagrange 插值方法进行信号抽取。当信号频率偏离额定值时,该方法可以对采样值信号进行频率跟踪抽取,获得较高的计算精度。当输入为基波信号时,插值抽取的精度非常高;当输入含有较高次数的谐波分量时,随着谐波次数的增加,其插值的误差以平方倍的关系增加,此时提高 MU 采样频率仍然能够获得较高精度的电压、电流均方根值和功率值,并能进行较低次数的谐波分析。

我们在研究开发的新型数字化变电站测控装置中采用基于线性 Lagrange 插值原理的采样值接口技术,并采用基于傅里叶变换原理的频率测量技术对采样值进行频率跟踪插值抽取,然后采用传统的傅里叶算法进行电力参数的测量。应用广东省电力试验研究所和国网南瑞科技股份有限公司共同研制的 MU 装置,通过以太网输入采样频率为 $200f_r$ 的三相电压、电流采样值信号,对测控装置进行测试。经测试,当信号频率在 45 Hz~55 Hz 范围内、信号的 2 次至 13 次谐波含量在规定范围内时,电力参数的测量精度满足电力行业标准 DL/T 630—1997《交流采样远动终端技术条件》规定的 0.2 级要求,效果是非常理想的。

参 考 文 献

- [1] 李 葭. 电子式互感器在特高压变电站应用的可行性探讨. 电力建设, 2005, 26(10): 56-58.
LI Wei. Applicable discussion of electronic instrument transformers in EHV substations. Electric Power Construction, 2005, 26(10): 56-58.
- [2] 张慧哲, 李伟凯, 郑绳植. 基于 IEC 60044-8 标准的电子式互感器数字输出接口的研究与设计. 高压电器, 2005, 41(8): 286-291.
ZHANG Huizhe, LI Weikai, ZHENG Shengxuan. Study and design of digital output interface on electronic transformers according to IEC 60044-8. High Voltage Apparatus, 2005, 41(8): 286-291.
- [3] 李萌, 李红斌, 冯凯, 等. 基于嵌入式以太网的电子式互感器数字输出口. 电力系统自动化, 2004, 28(13): 93-96.

- LI Meng, LI Hongbin, FENG Kai, et al. Digital output for electronic instrument transformers based on embedded Ethernet. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(13): 93-96.
- [4] 黄智宇, 段雄英, 张可畏, 等. 电子式高压互感器数字接口的设计及实现. 电力系统自动化, 2005, 29(11): 87-90.
HUANG Zhiyu, DUAN Xiongying, ZHANG Kewei, et al. Design and realization of digital interface of electronic high voltage instrument transduce. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(11): 87-90.
- [5] IEC 60044-7 Instrument transformers; Part 7 electronic voltage transformers. 1999.
- [6] IEC 60044-8 Instrument transformers; Part 8 electronic current transformers. 2002.
- [7] 谭文恕. 传输协议现状及国内外相关标准. 电力设备, 2004, 5(7): 11-14.
TAN Wenshu. Present status of transmission protocol and relative domestic and international standards. Electrical Equipment, 2004, 5(7): 11-14.
- [8] 赵希才. 2004 年国际大电网会议系列报道——电力系统保护与自动化. 电力系统自动化, 2005, 29(4): 1-5.
ZHAO Xicai. A review of CIGRE' 2004 on protection and automation. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4): 1-5.
- [9] 殷志良, 刘万顺, 杨奇逊, 等. 一种遵循 IEC 61850 标准的合并单元同步的实现新方法. 电力系统自动化, 2004, 28(11): 57-61.
YIN Zhiliang, LIU Wanshun, YANG Qixun, et al. New method for implementing the synchronization of merging unit according to the IEC 61850 standard. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(11): 57-61.
- [10] DL/T 630—1997 交流采样远动终端技术条件. 1997.
DL/T 630—1997 Technical requirement for RTU with a. c. electrical quantities inputs, discrete sampling. 1997.
- [11] 张伏生, 耿中行, 葛耀中. 电力系统谐波分析的高精度 FFT 算法. 中国电机工程学报, 1999, 19(3): 63-66.
ZHANG Fusheng, GENG Zhongxing, GE Yaozhong. FFT algorithm with high accuracy for harmonic analysis in power system. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3): 63-66.
- [12] 赵文春, 马伟明, 胡安. 电机测试中谐波分析的高精度 FFT 算法. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 83-87, 92.
ZHAO Wenchun, MA Wenming, HU An. FFT algorithm with high accuracy for harmonic analysis in the electric machine. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 83-87, 92.
- [13] 曾院辉, 李延新. 一种软件频率跟踪方法. 电力系统自动化, 2005, 29(21): 92-94.
ZENG Yuanhui, LI Yanxin. Method of software frequency tracking. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(21): 92-94.
- [14] 吴笃贵, 贺春, 易永辉. 一种新颖的频率跟踪算法. 电网技术, 2004, 28(14): 39-43.
WU Dugui, HE Chun, YI Yonghui. A novel frequency tracking algorithm. Power System Technology, 2004, 28(14): 39-43.
- [15] 磨少清, 李啸骢. 一种高精度的改进傅立叶测频算法. 电力系统

自动化, 2003, 27(12): 48-49, 54.

MO Shaoqing, LI Xiaocong. An improved high-accuracy algorithm for frequency measurement based on Fourier transform. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 48-49, 54.

[16] GB/T 14549—93 电能质量——公用电网谐波. 1993.

GB/T 14549—93 Quality of electric energy supply——harmonics in public supply network. 1993.

周 斌(1970—), 男, 高级工程师, 从事变电站自动化设备的开发研究工作。E-mail: zhoub@naritech.cn

鲁国刚(1964—), 男, 教授级高级工程师, 从事变电站自动化设备的开发研究管理工作。

黄国方(1971—), 男, 高级工程师, 从事变电站自动化设备的开发研究工作。

A Sampled Values Interface Method for Substation IED Based on the Linear Lagrange Interpolation Algorithm

ZHOU Bin, LU Guogang, HUANG Guofang, SHEN Jian

(NARI Technology Limited Company, Nanjing 210003, China)

Abstract: With the development of electronic transformers and the extensive utilization of the international standard IEC 61850, the sampled values technology in IED in the substation bay layer will be developed from A/D conversion of analog signals to Ethernet communication technology. In order to apply the traditional algorithms in IED in the substation automation system, the linear Lagrange interpolation algorithm for sampled values from the merging unit is studied. The error and the effect of the harmonic signal on the interpolation algorithm are analyzed. Finally, the application and test results of the novel digitalized measuring and control device using the linear Lagrange interpolation algorithm are briefly described. The accuracy is satisfactory.

Key words: substation; IED; electronic transformer; sampled values; signal extraction; Lagrange interpolation; harmonics