

数字变电站 IED 采样的一种改进算法

李冰¹, 周斌²

(1.河海大学电气工程学院,江苏南京 210098;2.国电南瑞科技股份有限公司,江苏南京 210003)

摘要: 针对 Lagrange 线性插值算法在谐波次数高的情况下误差过大和 Lagrange 抛物线插值算法在合并单元(MU)低采样频率下误差改进不明显,提出了一种改进算法。根据改进算法的计算思路,运用 Matlab7.0 编程,对算法进行仿真和模拟。与线性插值算法相比,该算法大大降低了各采样点的相对误差,提高了电流、电压、功率幅值的测量精度;同时通过分析一种典型谐波信号,验证了在同样插值条件、计算量相当的情况下,加权算法在 80 Hz 的低采样频率下,误差较二阶 Lagrange 算法有显著的改善,有效地抑制了谐波对算法的影响。仿真结果表明该算法计算精度高,可以满足新型变电站智能设备的采样值信号接口技术的要求。

关键词: 智能电子设备(IED);采样值;Lagrange 插值;抛物线插值;加权函数;谐波

中图分类号: TM63

文献标志码: A

文章编号: 1009-0665(2010)03-0001-04

为了彻底改造现有的能源利用体系,最大限度地开发电网体系的能源效率,智能电网的思想应运而生^[1-3]。智能变电站作为智能电网总体框架中的重要一环,引起越来越多用户的关注。随着电子式互感器的研究和应用,其与保护、测控等二次设备的接口问题越来越突出。为实现变电站自动化系统的标准化和互操作性,国际电工委员会(IEC)制定了 IEC 61850-9-1 作为变电站统一通信协议的国际标准。根据 IEC 60044-8 和 IEC 61850-9-1 的规定,合并单元(MU)接受过程层的 ECT/EVT 输出数字信号,并对采样值进行验证、合并,以通信的方式发送采样值数据到位于间隔层的智能电子设备(IED)。MU 的采样频率,一般为 $40f_r$, $80f_r$, $200f_r$ 等(f_r 为电网额定频率,一般为 50 Hz),而与现有变电站使用的保护、测控等装置的采样频率不同。对于这样的问题可以通过选择合适方法来解决^[4-9]。而为了减少计算量、不改变原来装置的成熟算法,现在一般都采用线性插值或者抛物线插值方法来实现。线性插值虽然计算量小,但是其抽样算法误差较大,尤其是在有高次谐波叠加时引来更大误差,需要 200 点采样频率才能满足精度要求^[8]。而抛物线插值算法虽然能够降低高次谐波叠加带来的误差,但在采样频率较低的情况下,其误差改进不明显。文中在线性 Lagrange 插值算法的基础上,提出了一种通过构造加权函数,对原算法的前后两项进行加权平均,组成新的插值算法。此算法经仿真验证,能在 80 点采样频率下满足 IED 高测量精度的要求。

1 Lagrange 插值算法的不足

插值的常用的方法有 Lagrange 插值、Newton

插值、差商插值等方法。从计算速度和处理复杂程度考虑,一般选用 Lagrange 插值,而在变电站 MU 采样算法中也通常采用 Lagrange 插值。根据文献[9]可得一阶 Lagrange 插值的误差:

$$|R_1| = |(l-m)(m+1-l)T_s^2| \leq \left| \frac{x''(\xi)T_s^2}{8} \right| \quad (1)$$

由式(1)可见,当 T_s 越大,即 f_s 越低时,误差越大。随着谐波次数的增加,其插值误差以平方倍的关系增加。当谐波次数较高时, $x(t)$ 的二阶导数较大,会产生比较大的误差。二阶 Lagrange 插值的误差如下:

$$|R_2| \leq \left| \frac{x'''(\xi)T_s^3}{162} \right| = \left| \frac{x'''(\xi)T_s^2}{8} \right| \times \left| \frac{4}{81} \times k\omega T_s \right| \leq \left| \frac{4}{81} \times k\omega T_s \right| \times |R_1| \leq \left| \frac{8\pi k}{81n} \right| \times |R_1| \quad (2)$$

式中: k 为谐波次数;由于 $x(t) = \sum_{k=0}^N A_k \sin(k\omega t + \phi_k)$, n 为采样点数,则 $x^{(n)}(t) \leq \frac{1}{k\omega} x^{(n+1)}(t)$ 。由式(2)可知采用二阶 Lagrange 插值算法,当采样频率较低时(即 n 较小),误差较一阶 Lagrange 插值减小不大,效果不明显。

因此,当 MU 采样频率较低或者通带范围谐波阶数较高时,采用非整数倍插值抽取会产生比较大的误差,这就有必要对原算法进行改进。

2 对额定频率信号的改进插值分析

2.1 加权函数的构造

大多数情况下,电网的谐波含量较低,同时电网频率是额定频率,这时可以认为输入信号是只含额定工频分量的交流信号。设原始模拟信号为:

$$x(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (3)$$

图 1 是截取 $x(t)$ 信号的一段进行分析,其中 y_r 为原始模拟信号(即 $x(t)$), y_1 为后 2 个点内插得到, y_2 为前 2 个点外推得到, $A_{(n-2)}, B_{(n-1)}, C_{(n)}$ 是 y_r 上的点。

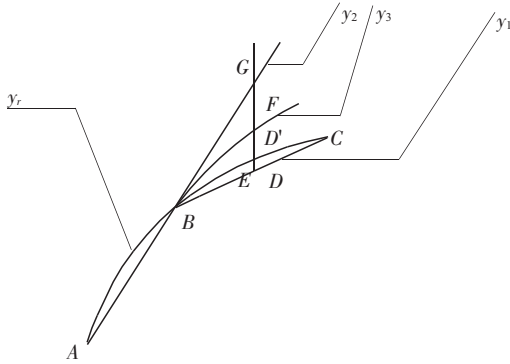


图 1 额定频率信号插值示例

线性插值算法用 B, C 两点插值算出点 D 来替代点 E 。由图 1 可知 DE 间距离即插值误差。同时因为 $x(t)$ 是标准正弦函数,它具有在任何邻域内无不可导点和一阶导数为 0 的点^[10](峰值除外)这一特征,这两点可保证 y_r 始终在 y_1 和 y_2 之间,即可用 y_1 上的对应值 D 点和 y_2 上的对应值 G 点通过一定的加权算法构造一个点 F 来替代精确值点 E ,通过选取好的点 F 使 FE 的误差要小于 DE ,这样新算法比原算法精度要高。由图 1 可知,如果点 F 落在 DD' 内(其中 D' 是点 D 关于 E 的对称点),则误差要小于 DE 。

当点 D 越靠近 B, C 两点,点 D 越接近点 E ,而点 G 随着远离 B 点越远离点 E ,即随着 $x(m) \rightarrow x(n)$,外推值 $y_2(m)$ 越不精确,而内插值 $y_1(m)$ 越来越精确,换句话说,随着 $x(m)$ 的增加, $y_2(m)$ 所占权越来越小,而相反 $y_1(m)$ 所占的权越来越大;而随着 $x(m) \rightarrow x(n-1)$,外推值 $y_2(m)$ 越精确,内插值 $y_1(m)$ 也越来越精确,也就是说,随着 $x(m)$ 的减小, $y_2(m)$ 所占的权越来越大,而 $y_1(m)$ 所占的权也越来越大。

这就是说 $y_1(m)$ 越靠近两头权越大,而 $y_2(m)$ 随着 $x(m) \rightarrow x(n)$,权越来越小。这就要构造一个函数,满足上述条件。因为权的选取是与 $x(m)$ 的位置相关,所以设权函数 $x(k)$ ($0 \leq x(k) \leq 1$),化简得:

$$k = x_i(m) - x(n-1) \quad (4)$$

因为 k 在两头都要大,即 k 要满足一个偶数次函数,即 $x = k^n$ (其中 n 为偶数),由于 $0 \leq k \leq 1$,则可以选取一种最简单的函数:

$$x(k) = \sqrt{k} \quad (5)$$

点 D 和点 G 值分别为:

$$y_{1i}(m) = y(n) \times [x_i(m) - x(n-1)] - [x_i(m) - x(n)] \times y(n-1) \quad (6)$$

$$y_{2i}(m) = [x_i(m) - x(n-2)] \times y(n-1) - [x_i(m) - x(n-1)] \times y(n-2) \quad (7)$$

则根式权函数构造的插值公式如下:

$$y_i(m) = (1 - \sqrt{k}) \times y_{2i}(m) + \sqrt{k} \times y_{1i}(m) \quad (8)$$

2.2 各算法的计算量分析

由于插值算法的计算速度直接影响到数字化变电站 IED 的效率,这里就线性插值、二阶插值及改进加权插值这 3 种算法计算每个插值点的计算量进行分析比较。

线性 Lagrange 插值计算每个插值点需要进行 2 次乘法和 1 次加法^[11]。

二阶 Lagrange 插值由于计算 3 个插值点,所以根据两点的 Lagrange 插值类推,需要进行 3 次 3 式相乘的乘法(即 6 次乘法)和 2 次加法^[11]。

根式函数权函数前一部分计算相当于计算 2 次线性 Lagrange 插值,即 4 次乘法和 2 次加法;后一步加权,由于是等分插值, \sqrt{k} 就固定几个值,所以可把 \sqrt{k} 的计算量忽略。最后求加权是做 2 次乘法和 1 次加法。因此,整个算法需要进行 6 次乘法和 3 次加法。

可以看出后 2 种算法都比线性插值计算量大,而后 2 种算法计算量又基本一致。因此,在精度要求不是很高、速度要求又较高的情况下,可采用线性插值算法;而在精度要求高的情况下,则可选取后 2 种实际精度高的一种,因为这 2 种计算量基本相当。

2.3 改进算法的仿真实证

电子电压、测量电流互感器经 MU 送出的额定有效值是 11 585^[9],则 $A=16\ 384$,表 1 给出了当原始信号为 $x(t)=16\ 384\sin(100\pi t)$,经 MU 以 $80 f_r$ 采样,IED 以 $32 f_r$ 插值重采样的各算法比较。由表 1 可得线性插值算法最大的相对误差为 0.11%,而二阶插值算法和权函数插值算法最大相对误差分别为 0.004% 和 0.019%,由此可见,对于额定频率的信号,二阶插值算法和改进算法都比线性插值算法精度要高。而二阶插值算法精度很高,比改进算法精度高出一个数量级,从这里可看出改进算法对于额定频率的信号插值误差较二阶插值算法大很多,这时改进算法没有意义,但电网中实际信号都含有谐波分量。目前 16 位 A/D 转换电路实际精度一般为 14 位,其量化误差为 4 个量化码(即其量化误差为 0.024%),而改进算法插值误差 0.019% 已经小于量化误差。所以,当通带范围谐波含量较小、阶数较低时,改进算法能使 MU 在低采样频率下满足高精度要求。

3 谐波信号对插值精度的影响

3.1 谐波对插值的影响

实际电网中信号频率总是时变的,而随着非线性负荷的增加以及电力电子设备的大量应用,电网

表 1 IED 应用 3 种插值算法以 $32f_r$ 插值采样各点相对插值误差

%

采样点	线性 Lagrange 插值算法	二阶 Lagrange 插值算法	根式权函数插值算法	采样点	线性 Lagrange 插值算法	二阶 Lagrange 插值算法	根式权函数插值算法	采样点	线性 Lagrange 插值算法	二阶 Lagrange 插值算法	根式权函数插值算法
0	0	0	0	11	-0.061	-0.004	0.006	22	0	0	0
1	0.110	-0.001	-0.019	12	0	0	0	23	-0.021	0.004	0.009
2	0	0	0	13	-0.091	-0.003	0.013	24	0	0	0
3	0.091	-0.002	-0.018	14	0	0	0	25	0.021	0.004	0.001
4	0	0	0	15	-0.110	-0.001	0.017	26	0	0	0
5	0.061	-0.003	-0.014	16	0	0	0	27	0.061	0.004	-0.006
6	0	0	0	17	-0.110	0.001	0.019	28	0	0	0
7	0.021	-0.004	-0.009	18	0	0	0	29	0.091	0.003	-0.012
8	0	0	0	19	-0.091	0.002	0.018	30	0	0	0
9	-0.021	-0.004	-0.001	20	0	0	0	31	0.110	0.001	-0.017
10	0	0	0	21	-0.061	0.003	0.014				

带有大量的谐波信号,不能保证其任意邻域内无不可导点和一阶导数为 0 的点,所以不能保证所有的 y_r 在 y_1 和 y_2 之间,即用改进的插值算法不能使每个采样点都减小误差,相反有时还增大误差。但此方法改进了很多点的误差,一般都是采用离散傅里叶变换(DFT)或者快速傅里叶变换(FFT)算法来求其电压、电流,其算法有滤波平滑作用,最后实际得到的幅值在一定程度上比原插值算法的精度要高。

根据式(1),某次谐波分量插值误差为:

$$|R_k| \leq \frac{1}{8f_s^2} A_k 4\pi^2 k^2 f_r^2 \quad (9)$$

由式(9)可知,插值算法的误差与谐波次数的

平方成正比,根据 DL/T 630—1997《交流采样远动终端技术条件》^[12],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均方根有功、无功功率。因此,主要分析 13 次谐波的影响。

3.2 仿真实验

设基波幅值为 16 384,谐波分量为 20%,即 $A_{13}=3 277$ 。则输入信号为:

$$x(t) = 16 384 \sin(100\pi t) + 3 277 \sin(13 \times 100\pi t) \quad (10)$$

MU 分别以 $80f_r$ 和 $200f_r$ 采样,IED 装置分别用 3 种插值算法进行每周波 32 点的插值重采样,表 2 给出了各算法基波和各次谐波的幅值;表 3 给出了各算法的均方根值和相对误差。

表 2 3 种插值算法分别在 $80f_r$ 和 $200f_r$ 基波到 13 次谐波的幅值

谐波次数	$f_s = 80f_r$			理论值	谐波次数	$f_s = 200f_r$			理论值
	线性插值	二阶插值	根式权函数			线性插值	二阶插值	根式权函数	
1	16 378	16 384	16 385	16 384	1	16 383	16 384	16 384	16 384
2	2.94e-12	2.18e-12	1.10e-12	0	2	3.2e-12	1.27e-12	2.02e-12	0
3	208.9	103.0	112.3	0	3	8.444	1.712	2.615	0
4	5.82e-12	5.28e-12	4.79e-12	0	4	3.7e-12	5.39e-12	6.51e-12	0
5	1.77e-12	2.59e-12	3.26e-12	0	5	18.78	3.947	8.379	0
6	2.96e-12	3.20e-12	3.29e-12	0	6	3.7e-12	3.38e-12	3.62e-12	0
7	2.82e-12	3.20e-12	2.90e-12	0	7	0.510	0.008	0.140	0
8	6.70e-12	6.88e-12	7.01e-12	0	8	6.2e-12	7.51e-12	7.25e-12	0
9	9.21e-12	1.22e-12	1.33e-12	0	9	0.501	0.008	0.124	0
10	7.31e-12	7.78e-12	7.71e-12	0	10	5.4e-12	7.16e-12	7.77e-12	0
11	5.72e-12	6.69e-12	7.57e-12	0	11	15.68	3.179	1.68	0
12	4.94e-12	5.60e-12	4.94e-12	0	12	6.1e-12	5.05e-12	5.18e-12	0
13	3 068	3 240	3 270	3 277	13	3 234	3 275	3 284	3 277

从表 2 可见,当 $f_s = 80f_r$ 时,线性插值算法谐波最大插值误差为 208.9,已经非常大,数据不可用。这时传统的做法是通过提高 MU 采样频率来降低插值误差,改进插值算法可以在不改变 MU 采样频率的前提下,降低误差,其 13 次谐波为 3 270;而二

阶插值算法其 13 次谐波为 3 240,这里二阶插值算法谐波误差要比改进算法大,这就应证了关于额定信号改进算法的精度不如二阶插值算法,而对于带谐波的信号则不尽然;这也应证了带谐波的信号不能使每个采样点都减小误差,但其整体误差却得到

表 3 3 种插值算法分别在 $80f_r$ 和 $200f_r$ 的均方根值及相对误差

项 目	$f_s=80f_r$		
	线性插值	二阶插值	根式权函数
均方值	16 382	16 701	16 708.5
理论值	16 708	16 708	16 708
相对误差	1.9%	0.05%	0.003%

项 目	$f_s=200f_r$		
	线性插值	二阶插值	根式权函数
均方值	16 699	16 708	16 710
理论值	16 708	16 708	16 708
相对误差	0.05%	0.000 7%	0.011%

了有效的抑制,甚至比每个采样点误差都减小的二阶插值算法精度要高。

GB/T 13729—2002 对测量精度指标的要求是: I, U 的精度指标是 0.2%。由表 3 可见,当 $f_s=80f_r$ 时,线性插值计算的均方根值相对误差为 1.9%,远远不能满足精度要求;而二阶插值算法的均方根值误差(0.05%)比改进算法(0.003%)要大;而当 $f_s=200f_r$ 时,情况正相反,二阶插值算法精度要高于改进算法。综上所述,改进算法在带有谐波信号, MU 低采样频率下能够得到比二阶插值算法更好的精度。当改变初始相位时,得到的结果基本一致。

4 结束语

当通带范围谐波阶数较高时,线性 Lagrange 插值算法抽取信号误差过大,而二阶 Lagrange 插值算法在 MU 低采样频率下改进误差,提高精度不大,文中通过分析电网信号本身的特点,构建一种权函数来对原插值数据进行加权,改进原有线性插值方法,此改进方法与二阶 Lagrange 插值计算量相当,并在 MU 低采样频率下 ($80f_r$),精度远高于二阶 Lagrange 插值,抑制谐波对算法稳定性的影响,显著

提高电压、电流均方根值和功率值的精度。该算法计算精度高,可以满足新型变电站智能设备的采样值信号接口技术的要求。

参考文献:

- [1] 陈树勇,宋书芳,李兰欣,等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 1-7.
- [2] 谢开,刘永奇,朱治中,等. 面向未来的智能电网[J]. 中国电力, 2008, 41(6): 19-22.
- [3] 张征容. 智能电网浅述[J]. 云南电力技术, 2009, 37(3): 28-29.
- [4] MASSIMO B, JAN S, AMBRA S. Effect of Sampling Frequency and Harmonics on Delay-Based Phase-Sequence Estimation Method [J]. IEEE Transactions on Power Deliver, 2008, 23(3): 1664-1672.
- [5] 杨永标,周捷. 一种实用的高精度频率测量方法[J]. 继电器, 2007, 35(S1): 272-275.
- [6] 王若醒,贺要锋,唐云龙,等. 数字化变电站智能测控设备的一种测量方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 66-69.
- [7] 徐广辉,李友军,王文龙,等. 数字化变电站 IED 采样数据同步插值的设计[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(4): 49-52.
- [8] 周斌,张何. 基于电子式互感器的变电站智能设备采样值接口技术[J]. 江苏电机工程, 2007, 26(2): 37-39.
- [9] 周斌,鲁国刚,黄国方. 基于线性 Lagrange 插值法的变电站 IED 采样值接口方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(3): 86-90.
- [10] 徐森林,薛春华. 数学分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [11] 李庆扬,王能超,易大义. 数值分析[M]. 北京:清华大学出版社, 2005.
- [12] DL/T 630—1997, 交流采样远动终端技术条件[S].

作者简介:

- 李冰(1984-),男,江苏南京人,硕士研究生,研究方向为电力系统谐波分析和测量;
周斌(1970-),男,江苏南京人,高级工程师,从事变电站自动化设备的研究开发工作。

An Improved Linear Lagrange Interpolation Algorithm of Sampled Values for Digital Substation IED

LI Bing¹, ZHOU Bin²

(1.Hohai University, Nanjing 210098, China; 2.NARI Technology Development Co. Ltd., Nanjing 210003, China)

Abstract: As on the condition of high orders of harmonics, linear Lagrange interpolation algorithm has oversize errors, while the same situation, parabola Lagrange interpolation algorithm on the condition of low sampled frequency with MU. A new improved algorithm is presented in this paper. According to the characteristics of electric network signal, a weighted function is constructed. The new algorithm with weighted average between the two closed items in the Lagrange interpolation algorithm is formed. According to the calculation thought, the improved algorithm is simulated and modeled by matlab7.0. Compared with the original algorithm, the new algorithm decreases the relative errors of each sampled points greatly and improves the measured accuracy of current, voltage and power magnitudes. By analyzing a typical power harmonic signal, on the condition of high orders of harmonics, the errors of weighted algorithm is improved markedly, and the effect of algorithm with harmonics is compressed availably. The results show that the algorithm has high accuracy, which satisfies the requirement of the novel interface solution to sampled values for substation intelligent electronic device.

Key words: IED; sampled values; Lagrange interpolation; parabola interpolation; weighted function; harmonics