

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181247

# 考虑高次谐波影响的智能配电合并单元 改进采样数据同步方法

李博<sup>1</sup>, 孙建军<sup>1</sup>, 王朝亮<sup>2</sup>, 许烽<sup>2</sup>, 查晓明<sup>1</sup>

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 国网浙江省电力公司电力科学研究院, 浙江 杭州 310014)

**摘要:** 通过合并单元进行不同电子式互感器间的采样数据同步过程中, 当信号内存在谐波尤其是高次谐波时, 现有方法难以准确地还原采样间隔处的数据, 导致同步误差较大。针对这一问题, 提出了一种改进采样数据同步方法。基于三样条插值理论, 研究了采样数据的整体特征, 用连续的分段三次函数描述采样点间的波形, 提高了重采样精度。再根据插值算法原理与采样特征, 通过归一化处理、矩阵变换、收敛性分析等方法, 减小了计算量。最后通过仿真验证, 该方法能够保证不高于21次谐波的重采样数据不失真, 且计算时间仅为同等精度插值算法的10%左右。改进算法提高了采样数据同步精度, 同时又解决了高精度插值运算量大的局限性, 具有工程应用价值。  
**关键词:** 合并单元; 采样同步; 高次谐波; 三样条插值理论

## Improved sampling synchronization method used by merging unit in smart distribution network considering higher harmonic effects

LI Bo<sup>1</sup>, SUN Jianjun<sup>1</sup>, WANG Chaoliang<sup>2</sup>, XU Feng<sup>2</sup>, ZHA Xiaoming<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China)

**Abstract:** The sampling signals from different electronic transformers need to be synchronized in the merging unit. However, when harmonics, especially when the higher harmonics, exist in the signal, it's difficult for the existing methods to restore the original data at the sampling interval accurately, leading to a large error during the synchronization process. To solve this problem, an improved sampling data synchronization method is studied. Based on the cubic spline interpolation theory, the global feature of sampling data is analyzed, and a continuous piecewise cubic function is used to describe the waveforms between the sampling points to improve the re-sampling accuracy. Then, based on the principle of interpolation algorithm and the sampling characteristics, the normalization process, matrix transformation, convergence analysis and other methods are used to reduce the amount of calculations. Finally, through simulation and verification, this method can ensure that the resampling data no higher than the 21th harmonic is not distorted, and the calculation time is only about 10% of the equal precision interpolation algorithm. In summary, this method can not only improve the accuracy of sampling data synchronization with the influence of higher harmonics, but also solve the limitation of high precision interpolation operation. Therefore, it is valuable for engineering applications.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0903100), National Natural Science Foundation of China (No. 5177145), and Science and Technology Program of State Grid Corporation of China (No. 521104170043).

**Key words:** merging unit; synchronized data-sampling; higher harmonics; cubic spline interpolation

## 0 引言

作为智能配电的关键环节, 智能变电站以全站

基金项目: 国家重点研发计划资助(2017YFB0903100); 国家自然科学基金面上项目资助(5177145); 国家电网公司科技项目资助(521104170043)

信息数字化, 通信平台网络化和信息共享标准化为基本要求。其中, 合并单元作为电子式互感器与间隔层设备之间的信息中转站, 在IEC61850标准和IEEE1588协议的基础上, 对初始采样数据进行合并、同步处理, 是智能电网在信息传输过程中必不可少的一个关键环节<sup>[1-5]</sup>。

根据IEC61850标准, 采样数据同步的方法有脉

冲同步法和插值同步法两种。其中脉冲同步法由合并单元发出触发脉冲, 控制各互感器同时进行采样<sup>[6-8]</sup>, 此类方法需要在现有设备上加装硬件, 造价较大, 且触发脉冲和采样数据在传输过程中也会存在延时, 产生误差。插值同步法基于数学原理, 通过对采样信号进行重采样处理实现数据同步, 现阶段应用于重采样的插值算法可分为滤波插值和函数插值两类。Nyquist滤波<sup>[9]</sup>、粒子滤波<sup>[10-11]</sup>、有限冲击响应滤波<sup>[12]</sup>等算法均被应用于滤波插值重采样过程中, 但此类插值方法会导致高次谐波信号衰减, 重采样数据失真, 不适用于含有高次谐波信号的采样数据同步。函数插值通过构造插值函数的方法实现重采样, 以一、二阶Lagrange<sup>[13-16]</sup>插值算法为代表的传统插值算法, 在谐波次数较低的情况下, 能够保证插值精度, 但由于其计算过程仅考虑局部数据特征, 在含有高次谐波的采样数据同步处理中, 无法真实反映曲线的波动情况, 因而误差较大。三样条插值算法<sup>[17]</sup>、B样条插值算法<sup>[18-19]</sup>等高精度插值算法已应用于FFT频谱分析、谐波检测等相关领域, 在曲线波动性强的情况下具有更好的插值效果, 但由于其计算过程中引入大量的中间变量, 且需要进行迭代求解, 具有计算量大, 计算速度慢的缺陷, 难以应用于合并单元的采样数据同步处理中。目前还缺少一种精度高, 计算量小的插值方法。

本文应用三样条插值算法进行重采样处理, 从采样数据的整体特征出发, 建立起一、二阶导数连续的插值函数, 并针对现有方法计算复杂, 运算量大的问题, 从数字特征与运算机理的角度出发, 通过应用等间隔特征进行归一化处理; 通过矩阵变换将修正量求解方程组化简为特殊方程组; 引入特定解法简化求解过程等方式, 提出一种计算量小、计算精度高、适用于含有高次谐波的改进采样数据同步方法。

## 1 合并单元中的采样数据同步

### 1.1 采样数据同步的基本原理

智能变电站母线、出线端和一些电网重要节点都会加装二次测量设备, 这些电子式互感器采集到的电气信号会传输到智能变电站进行综合分析<sup>[20-21]</sup>。

但对于如图1(a)所示情况, 各电子式互感器都有其各自的触发单元, 采样信号 $W_1$ 和 $W_2$ 无法保证采样时间点的一致性, 如果通过合并单元直接输出, 最大可能导致一个采样间隔的时间误差。因此, 需要进行如图1(b)所示的通过插值重采样实现的采样数据同步。在实际工程中, 由于电子式互感器的触发频率无法随着电网频率的波动而进行调整, 不同

信号接收端(如继电保护设备、电能质量监测设备等)对采样频率的需求不同, 有时还需兼顾采样频率的同步。对于需要进行采样频率同步的重采样过程, 插值位置是不断变化的, 具有一定的周期性。变化周期如式(1)所示。

$$n_r = n_2 / \text{gcd}(n_1, n_2) \quad (1)$$

式中:  $n_1$ 、 $n_2$ 分别为插值处理前、后每周期采样点数;  $\text{gcd}$ 表示最大公约数。

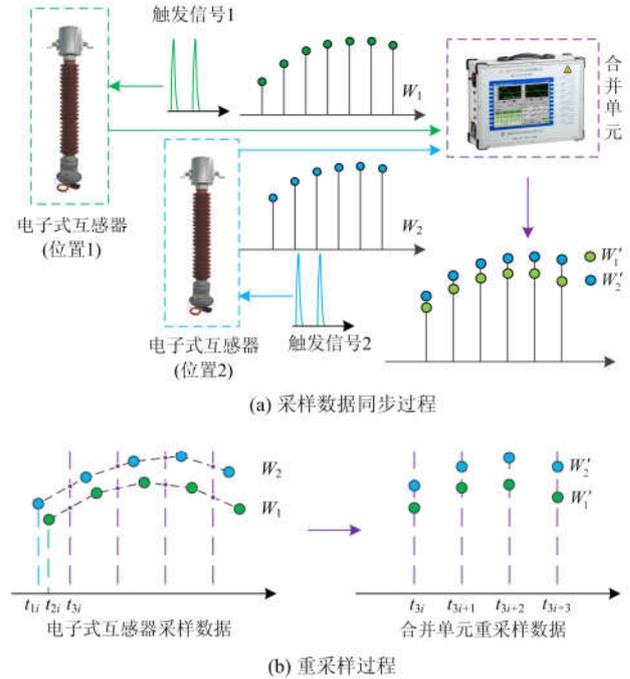


图1 采样数据同步示意图

Fig. 1 Schematic diagram of synchronized data-sampling

### 1.2 高次谐波影响下的采样数据同步

以一阶Lagrange线性插值为例, 进行高次谐波影响的采样数据同步误差分析。如图2所示, 相比较标准正弦波形, 含有高次谐波的电压、电流信号, 其相邻采样点间曲线斜率变化更加剧烈, 插值函数对离散采样信号的还原精度更差, 这也就导致了采样数据同步精度无法满足需求。基于此, 需要从曲线的整体变化趋势出发, 更深一步地挖掘数字信息, 建立起精度更高的插值算法。

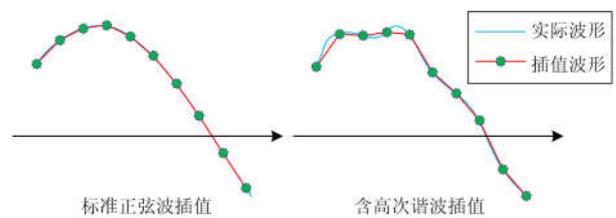


图2 插值效果示意图

Fig. 2 Schematic diagram of interpolation



度下降, 但是对修正量  $I_i''$  的求解过程最为复杂, 如何简化该方程组的求解过程, 是本文研究的关键所在。

观察式(6), 可以发现, 系数矩阵中存在大量0元素, 非零元素主要集中在三对角线上, 如果想办法消去  $\alpha_n$  和  $\gamma_n$  元素, 就可以利用三对角线性方程组的特定解法求解, 计算过程将会得到极大简化。为此, 将方程组系数矩阵分解为  $A = A_1 + A_2$ , 其中:

$$A_1 = \begin{bmatrix} 2 & \alpha_1 & & & & \\ \gamma_2 & 2 & \alpha_2 & & & \\ & \ddots & \ddots & \ddots & & \\ & & \gamma_{n-1} & 2 & \alpha_{n-1} & \\ & & & \gamma_n & 2 & \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} & & & \gamma_1 & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ & & & & & \\ \alpha_n & & & & & \end{bmatrix}_{n \times n} \quad (12)$$

对式(6)进行下述矩阵转换

$$A \cdot I_{2S} = A_1 I_{2S} + A_2 I_{2S} = A_1 (I_{2S} + P) = A_1 N = B \quad (13)$$

由式(13)可以得到

$$N = (1 + A_1^{-1} A_2) I_{2S} \quad (14)$$

表 1  $A_1^{-1} A_2$  数据表

Table 1  $A_1^{-1} A_2$  data table

$A_1^{-1} A_2$	列1	列2-79	列80
行1	$<10^{-45}$	0	0.267 9
行2	$<10^{-45}$	0	-0.071 8
行3	$<10^{-44}$	0	0.019 2
行4-77	$10^{-44} \sim 10^{-3}$	0	$10^{-3} \sim 10^{-44}$
行78	0.019 2	0	$<10^{-44}$
行79	-0.071 8	0	$<10^{-45}$
行80	0.267 9	0	$<10^{-45}$

以 80 点采样数据的插值计算为例, 矩阵  $A_1^{-1} A_2$  元素数据如表 1 所示。

由表1可知, 矩阵  $A_1^{-1} A_2$  中97.50%的元素是0, 99.91%的元素小于0.01, 且较大元素主要集中在采样边界点上。分析这些非零数据对插值效果的影响。

(1) 当采样起始点相位是0时,  $I_1''$  和  $I_{80}''$  大小为0,  $A_1^{-1} A_2$  中非零数据不产生影响;

(2) 当采样起始点相位是90°时,  $I_1''$  和  $I_{80}''$  大小为峰值, 但同样  $I_1$  和  $I_{80}$  大小也是峰值, 且根据式(4),  $I_i''$  对插值结果的影响最大只占  $I_i$  的12.5%, 因此, 矩阵  $A_1^{-1} A_2$  中非零点对插值结果造成的最大影响也不超过4%, 可忽略;

(3) 边界条件的插值运算相对中心点, 自身误差较大。

综上, 可近似认为  $N = I_{2S}$ , 得到

$$A_1 I_{2S} = B \quad (15)$$

此时,  $I_i''$  求解方程组已转化为三对角线性方程组, 可根据其特定求解方法求解。

### 2.3 修正量求解过程简化

对于式(15)方程组, 本文应用追赶法<sup>[22]</sup>进行求解, 其求解过程可分为Crout分解和回代求解两部分, 计算公式如下:

$$\begin{cases} p_1 = 2 \\ p_2 = \alpha_i / p_i \\ p_{i+1} = 2 - \gamma_{i+1} q_i \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} m_1 = \beta_1 / p_1 \\ m_i = (\beta_i - \gamma_i m_{i-1}) / p_i \\ I_n'' = m_n \\ I_i'' = m_i - q_i I_{i+1}'' \end{cases} \quad (17)$$

显然, 应用追赶法后求解过程得到了极大的简化。再将  $\alpha_i$ 、 $\gamma_i$  的值代入式(16), 将 Crout 分解简化为

$$p_{i+1} = 2 - \frac{1}{4p_i} \quad (18)$$

即初值是2的迭代过程, 其又可看作是以式(19)为迭代函数的方程(18)的迭代法求解的迭代方程。

$$\varphi(p) = 2 - \frac{1}{4p} \quad (19)$$

$$p + \frac{1}{4p} - 2 = 0 \quad (20)$$

根据迭代法收敛判别公式, 本迭代方程满足:

- (1) 当  $p \in [1, 2]$  时,  $\varphi(p) \in [1, 2]$ ;
- (2) 当  $p \in (1, 2)$  时,  $|\varphi'(p)| \leq 0.25 < 1$ 。

由此可知, 式(18)的迭代过程中,  $p_i$  收敛于式(20)的解1.866 0, 同时, 可以计算出  $q_i$  收敛于0.268 0。因此, 当  $\varepsilon_1 = |1 - p_i / p_\infty|$ 、 $\varepsilon_2 = |1 - q_i / q_\infty|$  足够小时, 便可使用1.866 0代替  $p_i$ 、用0.268 0代替  $q_i$ , 简化迭代过程。计算  $\varepsilon$  大小如表2所示。

表 2 相对误差  $\varepsilon$  表

Table 2 Relative error  $\varepsilon$  table

项数	$\varepsilon_1$	$\varepsilon_2$
2	0.48%	0.46%
3~n	<0.1%	<0.1%

由此可见, 迭代过程中, 第2项迭代结果便与收敛值十分接近, 相对误差低于5%, 简化造成的误差较小, 因此将  $p_i$ 、 $q_i$  代入式(17),  $I_i''$  的求解过程可以简化为

$$\begin{cases} m_1 = 0.5\beta_i \\ m_i = 0.5359\beta_i - 0.2680m_{i-1} \\ I_n'' = m_n \\ I_i'' = m_i - 0.2679I_{i+1}'' \end{cases} \quad (21)$$

仅需要 $(3n-2)$ 次乘法运算和 $(2n-2)$ 次加法运算。

综上依次应用式(9)、式(21)进行计算即可完成修正函数的计算过程,再代入式(3)即可完成采样数据同步处理,总共仅需要 $9n-2$ 次乘法运算和 $8n-2$ 次加法运算,远低于简化之前的计算量,简化过程基于数学原理与数字特征,不影响插值的可靠性且造成的误差较小。同时,可以得到改进算法的同步处理流程如图3所示。

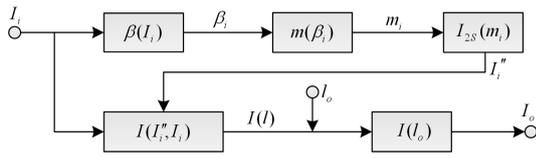


图3 基于改进插值算法的同步处理流程图

Fig. 3 Flowchart of synchronized data-sampling based on improved interpolation

### 3 仿真分析

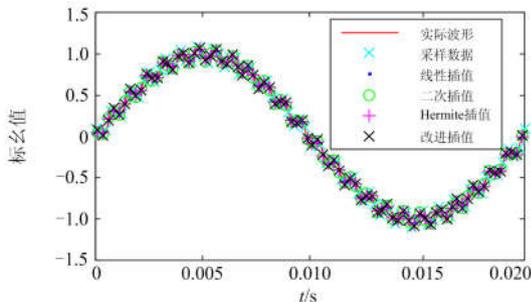
本文以Matlab为仿真平台,分别对改进采样同步方法在精度和计算速度两方面的提升进行验证分析。

#### 3.1 改进采样数据同步精度验证

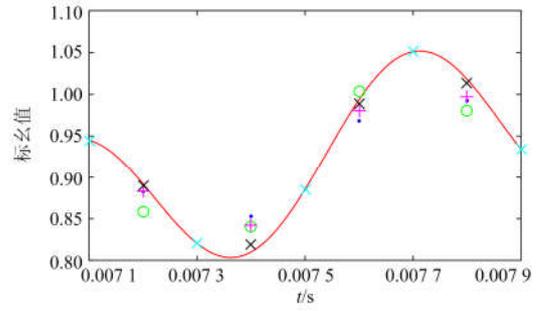
改进采样数据同步精度验证是对改进插值算法与其他传统插值算法进行精度对比,分别进行采样时间同步处理和采样频率同步处理两方面验证。

##### 3.1.1 采样时间同步处理

为验证改进插值算法在采样时间同步处理中的重采样精度,以电力系统应用最广的80点采样为例,在引入10%谐波含量的25次谐波的情况下,同时应用Lagrange一阶、二阶插值、Hermite插值和改进插值算法进行重采样处理,插值波形如图4所示。



(a) 完整周期波形



(b) 局部放大波形

图4 25次谐波影响下插值波形

Fig. 4 Interpolation waveforms under influence of 25th harmonic

由图4可知,在高次谐波的影响下,改进插值算法的重采样插值精度明显优于传统插值方法,为更加直观地对比改进插值算法与其他插值算法在同步处理精度方面的优势,依次在基波上加入10%谐波含量的3~25次奇谐波,并考虑相位对插值精度的影响,以能否保持高次谐波数据特性作为同步精度判断依据,绘制其变化趋势如图5所示。

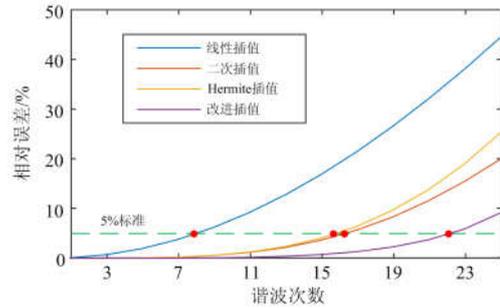


图5 重采样数据谐波分析误差变化图

Fig. 5 Harmonic analysis error for resampling data

根据图5,以国标规定的5%相对误差作为基准进行分析,相比传统插值算法最多只能保证15次谐波以内的采样同步精度,改进插值算法能够实现21次谐波以内采样同步精度,且在谐波次数相同时,不论在较低次谐波还是在较高次谐波,改进插值算法的精度都明显高于传统插值算法。

上述仿真研究只分析了单一高次谐波对插值精度的影响,为试验改进插值算法在混合高次谐波干扰下的测量精度,在3、7、11、15、19次谐波的基础上叠加10%含量的3~25次奇谐波进行综合分析,做出相对误差波动如图6所示。

由图6可知对于改进插值算法,在混合谐波干扰下,仍能还原从单一谐波的数据信息,几乎不受其他次谐波的影响,这与傅里叶分解相类似。

### 3.1.2 采样频率同步处理

采样频率的同步处理区别在于重采样插值位置以 $n_T$ 为周期不断变化。以10%含量21次谐波作为实验波形, 进行80点向256点的采样频率同步处理, 绘制出插值波形如图8所示。并以80点采样频率为原点, 向其他采样频率变换, 绘制出谐波分析的相对误差如图7所示。

由图7、图8可知, 在采样频率的同步处理中, 改进插值算法仍具有最佳的插值精度。且变频处理后的采样频率越高, 谐波分析精度越稳定, 这是由于在采样频率过低时, 谐波分析容易受到频谱泄露和混叠误差的影响。

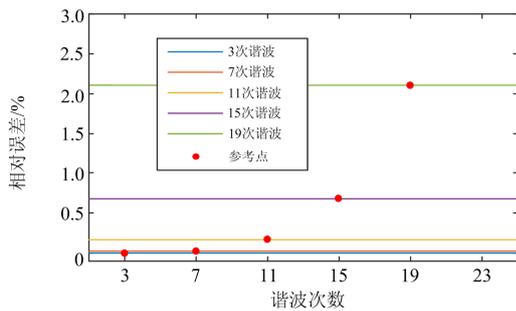
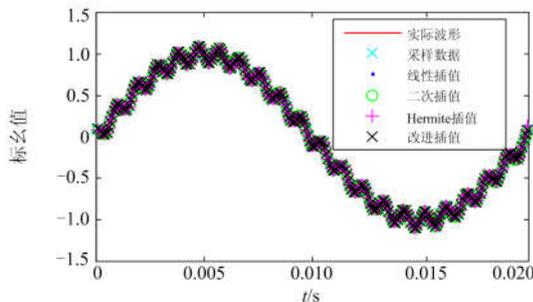
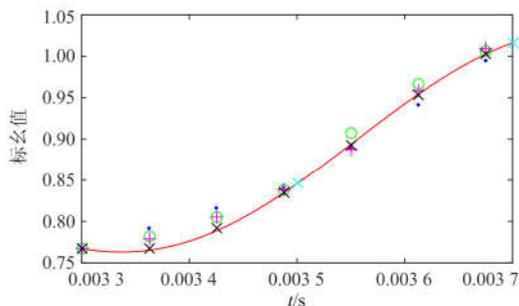


图6 考虑其他次谐波影响下的谐波分析误差

Fig. 6 Harmonic analysis error under the influence of other harmonics



(a) 完整周期波形



(b) 局部放大波形

图7 每周期256点重采样插值波形

Fig. 7 Re-sampling interpolation waveform at 256 points per cycle

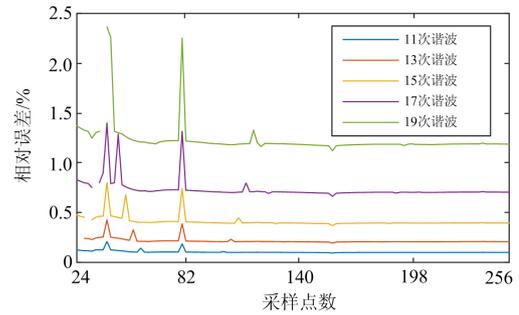


图8 不同采样频率的同步处理相对误差分析

Fig. 8 Harmonic analysis errors at different re-sampling frequencies

图8中存在空数据点, 这是由于其重采样频率处于谐波的2倍频处, 基波与谐波重合, 误差很大, 不存在分析意义。同时, 需要注意的是, 无法通过变频处理去除原始采样数据中的混叠误差。

### 3.2 改进插值算法计算时间提升验证

以计算精度高, 但运算量大的三样条插值算法作为高精度插值算法的典型作对照试验。在Matlab的同一个m文件中编写改进插值算法与三样条插值算法, 随机生成80个点的采样数据, 连续进行50次插值仿真实验, 对两种插值方法的运算时间进行统计, 并计算出重采样处理过程中, 改进算法相比较三样条插值算法在计算时间上的提升幅度如图9所示。

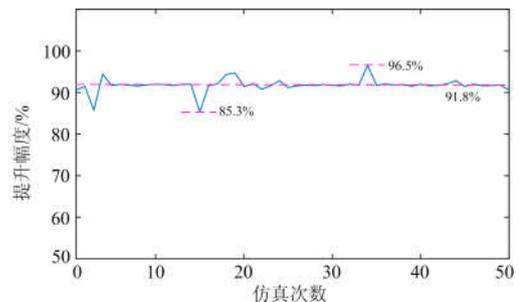


图9 改进插值算法计算速度提升幅度图

Fig. 9 Improved algorithm computational speed lifting boost

由图9可知, 改进插值算法在运算时间上的提升幅度明显, 平均节约时间幅度达到了91.8%, 且时间节省幅度稳定, 在85.3%和96.5%之间小幅度波动。由此, 可以证明改进插值算法在计算速度方面远高于传统高精度插值算法。

## 4 结论

本文基于三样条插值理论, 建立了使得插值函数一、二阶导数连续的修正函数, 提高了高次谐波影响下的采样数据同步精度。并针对传统高精度插

值算法运算量大的缺陷,通过对电力系统检测信号的特征分析,成功将原本需要多达 $n^3/3$ 次乘法和 $n^3/3$ 次加法运算的计算过程,精简为只需要 $9n-2$ 次乘法运算和 $8n-2$ 次加法运算的改进插值算法,将计算时间缩短至原来的10%左右。并通过仿真验证得出,改进插值算法插值精度远高于其他传统插值算法,在21次谐波影响下,仍能准确还原出符合国标测量标准的高次谐波特性。且经过改进插值算法同步处理后的采样数据,采样同步精度只与谐波次数有关,不同次谐波之间不相互干扰。在采样频率的同步处理中,改进插值算法的优势依旧明显,且重采样后的采样频率越高,谐波分析越稳定;在采样频率较低时,受到混叠误差的影响,谐波分析误差波动较大,其影响范围可由香农定理求取。

### 参考文献

- [1] YANG Ting, ZHAO Rui, ZHANG Weixin, et al. On the modeling and analysis of communication traffic in intelligent electric power substations[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1329-1338.
- [2] 李莉, 朱正甲, 任赞, 等. 基于绿色无线网络覆盖最优的配电通信网规划方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 56-62.  
LI Li, ZHU Zhengjia, REN Yun, et al. Research on distribution communication network planning method based on green wireless network coverage optimizing[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 56-62.
- [3] 胡国, 梅德冬. 智能变电站采样值报文安全分析与实现[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(8): 2215-2221.  
HU Guo, MEI Dedong. Research and application on network security of SMV in smart substation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(8): 2215-2221.
- [4] APOSTOLOV A. Efficient maintenance testing in digital substations based on IEC 61850 edition 2[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 407-420. DOI: 10.1186/s41601-017-0054-0.
- [5] 蒋愈勇, 习伟, 刘立斌, 等. 基于IEC61850的电子式互感器在线监测与校验系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 117-122.  
JIANG Yuyong, XI Wei, LIU Libin, et al. Design of online monitoring and calibration system for electronic transformer based on IEC61850[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 117-122.
- [6] PAN Y, WANG Y L, LAI L B, et al. Calibration of electronic transformer with digital output based on synchronous sampling[C] // 2016 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2016), July 10-15, 2016, Ottawa, ON, Canada: 1-6.
- [7] 周华良, 郑玉平, 姜雷, 等. 适用于合并单元的等间隔采样控制与同步方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(23): 96-100.  
ZHOU Hualiang, ZHENG Yuping, JIANG Lei, et al. An equal-interval sampling control and synchronization method for merging unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23): 96-100.
- [8] 姜雷, 郑玉平, 艾淑云, 等. 基于合并单元装置的高精度时间同步技术方案[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(14): 90-94.  
JIANG Lei, ZHENG Yuping, AI Shuyun, et al. A highly accurate time synchronization technology scheme based on merging unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(14): 90-94.
- [9] CAI C, LU Y P, DING T, et al. A smart resampling scheme for digital substation relay protection[C] // Power and Energy Society General Meeting, July 25-29, 2010, Providence, RI, USA: 1-6.
- [10] BOLIC M, DJURIC P M, HONG Sangjin. Resampling algorithms and architectures for distributed particle filters[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2005, 53(7): 2442-2450.
- [11] JENKINS M D, BARRIE P, BUGGY T, et al. Selective sampling importance resampling particle filter tracking with multibag subspace restoration[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2017, 48(1): 264-276.
- [12] 李帅, 龚世敏, 丁泉, 等. 一种幅值无衰减的改进线性插值方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 105-110.  
LI Shuai, GONG Shimin, DING Quan, et al. An improved linear interpolation method without amplitude attenuation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 105-110.
- [13] 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.
- [14] 吴崇昊, 陆于平, 侯喆. 基于时域连续有限冲激响应滤波器的电子互感器采样数据站间同步算法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 50-54.  
WU Chonghao, LU Yuping, HOU Zhe. Time-domain continuous FIR filter based electronic instrument transducers sampling data inter-substation synchronization arithmetic[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 50-54.

- [15] 姜永晖, 温渤婴, 丁磊, 等. 基于数字化变电站IED接口的数据处理算法[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 190-193.  
JIANG Yonghui, WEN Boying, DING Lei, et al. Data processing algorithms based on IED interface in digital substation[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 190-193.
- [16] 周斌, 鲁国刚, 黄国方, 等. 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.  
ZHOU Bin, LU Guogang, HUANG Guofang, et al. Sampled values interface method for substation IED based on the linear Lagrange interpolation algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(3): 86-90.
- [17] 向珉江, 高厚磊, 安艳秋, 等. 一种提高数据同步精度的自适应插值算法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(8): 77-81.  
XIANG Minjiang, GAO Houlei, AN Yanqiu, et al. An adaptive interpolation algorithm to improve data synchronization precision[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8): 77-81.
- [18] 王继东, 杜旭浩, 杨帆. 基于三次样条插值信号重构的微网谐波及间谐波分析算法[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 7-11.  
WANG Jidong, DU Xuhao, YANG Fan. A cubic spline interpolation signal reconstruction-based harmonic and inter-harmonic analysis algorithm for microgrid[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 7-11.
- [19] HUANG X J, GUO Y J, ZHANG J. Sample rate conversion using B-spline interpolation for OFDM based software defined radios[J]. IEEE Transactions on Communications, 2012, 60(8): 2113-2122.
- [20] 黄纯, 何怡刚, 江亚群, 等. 交流采样同步方法的分析与改进[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 38-42.  
HUANG Chun, HE Yigang, JIANG Yaqun, et al. Analysis and improvement of synchronization technique for AC sampling[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 38-42.
- [21] BAI F, LIU Y, LIU Y, et al. A measurement-based approach for power system instability early warning[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 17-25. DOI: 10.1186/s41601-016-0014-0.
- [22] 李文强, 刘晓. 追赶法并行求解循环三对角方程组[J]. 科技导报, 2009, 27(18): 90-93.  
LI Wenqiang, LIU Xiao. A parallel chasing algorithm for solving cyclic tridiagonal equations[J]. Science & Technology Review, 2009, 27(18): 90-93.

收稿日期: 2018-10-08; 修回日期: 2018-12-14

作者简介:

李 博(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统信息传输、电压暂降; E-mail: 1020881978@qq.com

孙建军(1975—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 主要研究方向为微电网电能质量分析; E-mail: 278856036@qq.com

王朝亮(1986—), 男, 工学硕士, 工程师, 主要研究方向为电能计量及用电信息采集技术。

(编辑 姜新丽)