

重采样移相技术在过程层 IED 中的应用

闫志辉, 胡彦民, 周丽娟, 马朝阳

(许继电气技术中心, 河南 许昌 461000)

摘要: 介绍了一种重采样相位补偿算法, 该算法可对异步采样造成的相位误差进行补偿。分析了同步采样和异步采样的优缺点, 介绍了重采样移相技术中常用的插值算法, 在异步采样系统中应用抛物线插值算法, 实现对采样值的相位补偿, 并从理论上分析了该算法对工频信号中的基波和高次谐波的精度影响。经实验验证, 对于采用异步采样模式的过程层 IED, 应用重采样移相技术可以达到补偿相位的效果, 补偿后的精度能够满足电子式互感器标准的精度要求。

关键词: 重采样; 过程层; IED; 插值算法

Application of resample phase shifter technique in process layer IED

YAN Zhi-hui, HU Yan-min, ZHOU Li-juan, MA Zhao-yang
(XJ Electric Technology Center, Xuchang 461000, China)

Abstract: This paper introduces a resample algorithm that can compensate phase error caused by the asynchronous sampling. It analyzes the advantages and disadvantages of the synchronous and asynchronous sampling, and introduces the commonly algorithms of resample techniques. The parabolic interpolation algorithm is applied to compensate the sampling's phase in asynchronous sampling system, and the algorithm's effect is theoretically analyzed to fundamental and the high-order harmonic on the precision. By experiment test, for process layer IED with asynchronous sampling system, the interpolation algorithm can achieve the effect of phase compensation. Compensated sampling value will be able to meet the standard of electronic transformer accuracy.

Key words: resample technique; process layer; IED; interpolation algorithm

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)06-0064-03

0 引言

在数字化变电站中, 数据采集单元和保护测控单元分别属于不同的层次, 数据采集在过程层中实现, 然后通过过程层网络送至间隔层, 保护及测控单元从过程层网络取得采样值完成保护功能。这样就要求过程层的数据采集装置具有较高的幅值和相位精度, 以满足间隔层不同装置的需要。

传统的采样电路采用如图 1 所示的结构, 这种结构可以节省硬件开支, 但会造成通道间采样时刻的差异, 假定一个通道的采样时间为 $6 \mu\text{s}$ 左右, 对于一个拥有 11 个通道的系统, 那么最后一个通道与第一个通道之间的采样时刻差可达 $60 \mu\text{s}$ 左右, 换算为相位偏差为 1° 左右, 这样的偏差对于测量单元来说, 是不能容忍的。为了消除这种偏差, 通常有两种做法, 一种是在硬件回路中使用同步采样的方法, 在同一时刻进行采保, 这种做法会增加硬件成本, 且在成型的硬件产品上无法实现。另一种做法就是用软件对采样值进行重采样, 实现相位的修

正, 这种方法不会增加硬件成本, 易于实现^[1]。

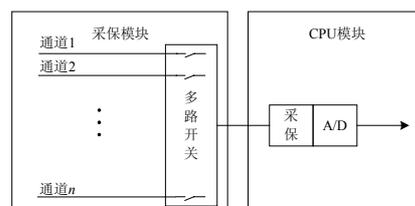


图 1 传统采样电路结构示意图

Fig.1 Traditional sampling circuit diagram

通常, 重采样方法一般采用插值算法, 插值算法的算法简单, 能够在很短的时间内完成, 适合采样间隔比较短的情况^[2-3]。插值算法是函数逼近的一种最简单的方法, 利用插值算法可以通过函数在有限点处的取值状况估算出该函数在其它点处的值。

1 插值算法

设已知区间 $[a, b]$ 上的实值函数 f 在 $n+1$ 个相异点 $x_i \in [a, b]$ 处的函数值 $f_i = f(x_i)$, $i=0, 1,$

..., n , 要求估算 f 在 (a, b) 中某点 x 的值。插值法就是用一个便于计算的简单的函数 ψ 去替代 f , 使得^[4]: $\psi(x_i) = f_i$ $i=0, 1, \dots, n$, 并以 $\psi(x)$ 作为 $f(x)$ 的近似值。

插值算法主要包括 Lagrange 插值, Newton 插值等方法, 这里使用的是 Lagrange 插值, 其公式为:

$$L_n(x) = \sum_{i=0}^n f_i l_i(x) \quad (1)$$

其中: $l_i(x) = \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \frac{(x-x_j)}{(x_i-x_j)}$ 。

利用式(1)进行插值所引起的误差可用式(2)表示:

$$R_n(x_i) = f(x_i) - L_n(x_i) = \frac{f^{(n+1)}(\xi)}{(n+1)!} \omega_n(x) \quad (2)$$

其中: $\omega_n(x) = \prod_{j=0}^n (x-x_j)$ 。

在实际应用中, 低次插值多项式是经常使用的。一次插值多项式即为线性插值多项式, 二次插值多项式的图形为抛物线, 所以二次插值也称为抛物线插值法。对于重采样算法, 通常取 $n=2$, 采用二次插值法, 从而可以得到抛物线插值法的计算公式。

$$L_2(x) = \frac{(x-x_1)(x-x_2)}{(x_0-x_1)(x_0-x_2)} y_0 + \frac{(x-x_0)(x-x_2)}{(x_1-x_0)(x_1-x_2)} y_1 + \frac{(x-x_1)(x-x_0)}{(x_2-x_1)(x_2-x_0)} y_2 \quad (3)$$

误差计算公式为:

$$R(x) = \frac{1}{6} (x-x_0)(x-x_1)(x-x_2) f^{(3)}(\xi) \quad (4)$$

假设采样的信号是频率为 50 Hz 的正弦波, 即 $f(t) = \sin(100\pi t)$, 采样频率为每周波 80 点, 采样间隔为 250 μs , 对每一个采样点, 取其前两个点参与重采样计算, 如图 2 所示, 为了方便计算, 我们可以取 x_0 为坐标零点, 这样就可以得到抛物线插值的三个点为 $x_0(0, f(x_0))$, $x_1(250 \times 10^{-6}, f(x_1))$, $x_2(500 \times 10^{-6}, f(x_2))$, 取 $x = 450 \times 10^{-6}$, 把这些点代入式(3)可以求得该采样点重采样后的值, 并由式(4)可以得到抛物线插值重采样引起的误差为:

$$|R_n(x_i)| \leq 2.3 \times 10^{-5}$$

由式(2)可以看出, 对于给定的坐标点, 频率越高, 计算误差越大。同样, 可以计算出 13 次谐波的计算误差。

$$|R_n(x_i)|_{13} \leq 5.0 \times 10^{-2}$$

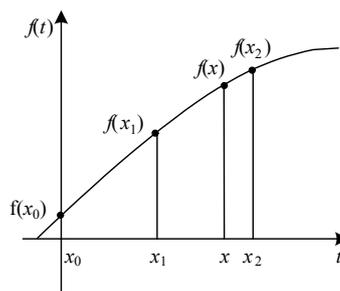


图 2 重采样示意图

Fig.2 Schematic resampling

由上面的误差计算可知重采样引起的基本误差符合 IEC60044-8 标准中附录 C 对电子互感器的要求^[5]。

2 程序实现

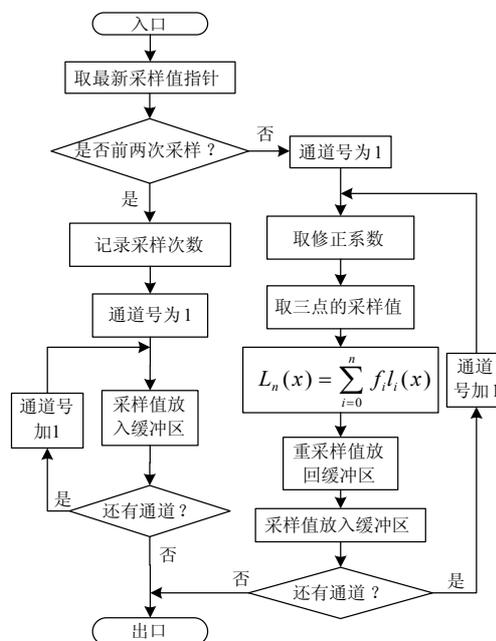


图 3 重采样流程图

Fig.3 Resampling flow chart

重采样移相技术主要用于数字化变电站中过程层设备, 目前常用的采样频率为每周波 80 点, 采样间隔只有 250 μs 。在过程层智能设备中, CPU 还要担负其它的功能, 例如开入信号的采集, 继电器开出的驱动, 这些功能对实时性的要求也比较高, 所以就要求重采样算法实现简单, 耗时小。

根据式 (1), 只要图 2 中的 x 的坐标给定, 那么抛物线插值的系数也就可以算出来了。在过程层智能设备的重采样中, 由于每个通道的采样延时可以确定, 其重采样的坐标也就是固定的, 所以我们

在程序初始化的时候把所有的系数都计算好，而在重采样的过程中每次重新计算系数，从而可以节省大量的计算时间。

由于在重采样计算中，要用到前两次的采样值，所以至少要保留前两次采样的原始值用于重采样计算，这样 IED 最初两次的采样就不能进行重采样了。重采样的流程图如图 3 所示。

3 结论

利用上述的理论及程序流程，在过程层 IED 中实现了重采样移相。该 IED 有 10 个交流通道，通道采样延时约为 6 μs。在额定值范围内，使用同样的硬件，对使用和不使用重采样技术的软件分别进行试验。

把 10 个通道的输入都接到同一个信号源上，这样以第一个通道的采样结果为标准，可以计算出各通道的相位偏差。下面分别施加基波 1 000 mV，3 次谐波 500 mV，13 次谐波 200 mV 电压对使用和不使用重采样的软件进行了比较。试验结果如表 1~表 3 所示，其中幅值的单位为 mV，相位的单位为度。

表 1 基波
Tab.1 Fundamental

通道号	重采样		不使用重采样	
	幅值	相位	幅值	相位
1	1 000.7	0	1 000.4	0
2	1 000.5	-0.054	1 000.2	0.03
3	1 000.3	-0.002	1 000.1	0.176
4	1 000.8	-0.079	1 000.1	0.197
5	999.9	-0.001	1 000.5	0.364
6	1 000.4	-0.013	999.9	0.456
7	1 000.5	-0.017	999.9	0.543
8	1 000.1	-0.02	1 000.7	0.634
9	1 000.7	-0.008	1 000.3	0.735
10	1 000.2	0.008	1 000.8	0.846

表 2 3 次谐波
Tab.2 3rd harmonic

通道号	重采样		不使用重采样	
	幅值	相位	幅值	相位
1	499.1	0	499.5	0
2	499.5	-0.16	499.8	0.336
3	499.6	-0.009	500	0.682
4	499.3	-0.084	499.9	0.908
5	499	-0.114	499.9	1.173
6	499.8	-0.121	500.6	1.457
7	499.9	-0.125	500.6	1.957
8	498.9	-0.132	499.8	2.14
9	499	-0.116	499.9	2.445
10	499.9	-0.204	500.8	2.644

表 3 13 次谐波

Tab.3 13th harmonic

通道号	重采样		不使用重采样	
	幅值	相位	幅值	相位
1	199.9	0	199.3	0
2	199.2	-0.264	199.5	1.431
3	198.5	-0.61	199.5	2.477
4	197.8	-0.983	199.1	3.501
5	197.4	-1.218	199.1	4.866
6	197.7	-0.93	199.8	6.247
7	197	-1.227	199.4	7.746
8	196.4	-1.233	199.3	8.932
9	195.6	-1.621	199.1	9.538
10	195.8	-1.707	199.5	10.841

经过比较，使用重采样移相技术可以实现对相位误差的修正，修正结果可以保证基波相位偏差在 10' 以内，3 次谐波相位偏差在 20' 以内，13 次谐波相位偏差在 2° 以内。同时，重采样算法对采样值的影响也在要求的精度范围之内，从实验数据中可以看出，重采样后基波的误差在 0.2% 以内，3 次谐波的误差也在 0.2% 以内，而 13 次谐波的误差也不超过 2%，满足数字化变电站对采样值的要求。

试验证明，在过程层 IED 中使用重采样移相技术可以达到修正采样值相位的目的，修正后的精度可以满足 IEC60044-8 标准中附录 C 中对电子互感器的要求，从而可以在不改变硬件结构的情况下，保证过程层 IED 的采样值精度。

参考文献

- [1] 刘青松. 一种交流采样的补偿算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1999, 11(5-6): 111-115.
LIU Qing-song. A Compensation Method for AC Sampling[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 1999, 11(5-6): 111-115.
- [2] 张秀丽, 李萍, 陆光华. 高精度软件同步采样算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(4): 24-27.
ZHANG Xiu-li, LI Ping, LU Guang-hua. High-accuracy Method for Software Synchronous Sampling[J]. Proceedings of Electric Power System and Automation, 2005, 17(4): 24-27.
- [3] 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 Yi-gang, JIANG Ya-qun, et al. Analysis and Improvement of Synchronization Technique for AC Sampling[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 38-42.
- [4] 李庆阳. 数值分析 (第四版) [D]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2006.

(下转第 71 页 continued on page 71)

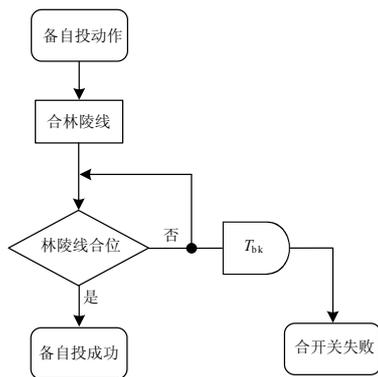


图 12 陵水变林陵线备用投动作流程图

Fig. 12 Flow chart of autoswitching on Linling line

3.2.4 林旺变和陵水变的备用投延时配合

在这一远方备用投逻辑中, 要想林旺和陵水变装置正确配合完成动作, 必须按照先林旺再陵水的顺序动作, 即在林旺变跳开林荔线后, 陵水变才可以合上林陵线, 所以动作延时需要配合。

另外, 陵水变只能采集到林陵线 A 相电压, 这不仅是林陵线 A 相电压, 也是林旺变母线、鸭荔线的 A 相电压。因此, 当鸭仔塘至林旺一线上发生三相故障或 A 相单相故障时, 保护装置立即跳开三相或 A 相, 陵水变也立即检测到林陵线 A 相电压降低, 启动时间继电器启动。而发生 B 或 C 相单相故障时, 在故障开始阶段, A 相电压不会降低, 陵水变无法检测到林陵线的故障。必须到保护装置重合失败、三相跳开时, 陵水变备用投才检测到 A 相电压降低, 从而启动启动时间继电器。

因此, 在两个远方备用投的配合中, 延时的配合尤为关键。为确保正确的动作顺序, 陵水变备用投装置动作延时必须大于林旺变备用投装置动作延时。

4 结语

限于篇幅, 本文只对该局部电网备用投系统中的两个典型备用投装置进行了介绍, 其它几个站的备用投装置都是基于这两个站的思路进行设计的。

目前我国中低压电网中, 为了保证供电的可靠性, 备用投装置被大量使用, 但加入电网稳定控制观点的装置和需要相互密切配合才能可靠动作的备用投系统不多, 本文介绍的备用投系统某种程度上又可以说是一个较为简单的电网稳定控制系统, 通过它来保证一个局部电网的安全可靠运行。

参考文献

- [1] 崔风亮, 周家春. 远方备用电源自动投入装置[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(9): 61-62.
CUI Feng-liang, ZHOU Jia-chun. Remote BZT Equipment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(9): 61-62.
- [2] 杨忠礼, 赵慧光, 张光衡. 影响备用投正确动作原因分析[J]. 电力系统保护与控制, 2002, 36(21): 106-107, 110.
YANG Zhong-li, ZHAO Hui-guang, ZHANG Guang-heng. Cause Analysis on Affecting the Correct Operation of Standby Power Source Automatic Put-in Devices[J]. Power System Protection and Control, 2002, 36(21): 106-107, 110.
- [3] 陈学辉. 一种改进的备用电源自投方案[J]. 湖北电力, 2003, 27(6): 34-36.
CHEN Xue-hui. An Innovated Self-closing Scheme for Standby Power Supply[J]. Hubei Electric Power, 2003, 27(6): 34-36.
- [4] 王雷, 于月光. 小电源接入系统对于电网保护装置的要求[J]. 电器工业, 2008(8).
WANG Lei, YU Yue-guang. Requirements for Protectors by Small Power System Connected to Grid[J]. China Electrical Equipment Industry, 2008(8).

收稿日期: 2009-04-23; 修回日期: 2009-05-20

作者简介:

田苑(1973-)男, 工程师, 主要研究方向为电力系统自动化和稳定控制; E-mail: tianyuan@nari-china.com

史开礼(1981-)男, 助理工程师, 主要研究方向为电力系统自动化和稳定控制;

邢涛(1972-)男, 工程师, 从事电力系统安全稳定控制研究和管理。

(上接第 66 页 continued from page 66)

LI Qing-yang. Numerical Analysis (Fourth Edition)[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Publishing House, 2006.

- [5] IEC IEC60044-8, Instrument Transformers-Electronic Current Transformers[S].

作者简介:

闫志辉(1978-), 男, 硕士研究生, 主要从事数字化变电站过程层产品开发工作; E-mail: yanzhahui@xjgc.com

胡彦民(1979-), 男, 工程师, 从事数字化变电站研究及过程层设备研发工作;

周丽娟(1968-), 女, 工程师, 从事数字化变电站研究及过程层设备研发工作。

收稿日期: 2009-04-20; 修回日期: 2009-04-29