

准同步采样法在配电综合测控仪中的应用

曹 晖¹, 袁世英¹, 易 璐², 曹 东³

(1. 华东交通大学, 江西 南昌 330013; 2 广东药学院, 广东 广州 510640; 3 华南理工大学, 广东 广州 510640)

摘要: 通过研究准同步采样法, 分析准同步采样法准确度与频率偏差的关系, 提出通过减少频率偏差来提高准同步采样法准确度的两种方法, 提出准确计算信号频率的公式。计算机仿真结果表明该方法能有效提高测量信号的有效值和谐波的准确度。最后把准同步采样法应用于配电综合测控仪中, 进行硬件和软件设计, 实现了仪器体积小, 抗干扰能力强, 而且测量速度快, 测量精度高的目标。

关键词: 准同步采样; 配电综合测控仪; 变频采样法; 二次逼近法

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)17-0045-04

0 引言

配电综合测控仪是用电侧电能管理系统中的最重要的一个环节, 它一般以低压网中的供配电变压器为监测对象, 使电力部门及时了解设备运行状况, 为线损分析、负荷预测、电压合格率、配电规划等提供科学的依据。

因为配电综合测控仪都安装在现场, 需要体积小, 成本低, 所以数据采样方式的设计显得很重要。数据采样方式主要有同步采样和准同步采样。同步采样通过硬件来实现同步, 体积大, 测量精度高。但是在现场情况, 硬件同步采样容易被干扰, 严重影响测量精度。准同步采样是非同步采样, 它由软件实现, 体积小, 不会受外界干扰的影响。

通过分析比较, 配电综合测控仪的数据采样方式采用准同步采样。

1 准同步采样原理^[1]

如果对基波频率为 F_S 的周期信号 $f(t) = A_0 + \sum_{m=1}^M A_m \sin(2 m f t + \varphi_m)$ 采用固定采样频率 F_{NS} 进行等间隔采样。其中 $F_S = F_{NS} / N + F$, F 为频率偏差。

图 1 所示为准同步采样的过程示意图。在 $[t_0, t_0 + T_{NS}]$ 区间上等间隔采样 $N + 1$ 次, 则在 $t_0, t_1, t_2, \dots, t_N$ 时刻, 相应的采样值为 $y_0, y_1, y_2, \dots, y_N$, 并且 $y_i = f(t_i)$ 。

不论周期信号波形为正弦或非正弦值, 对它的特征量进行测量可看作为是进行一种积分求均值运算。即对被测量信号的离散量进行积分运算。根据数值计算的相关理论, 对于数值积分运算, 可以采用

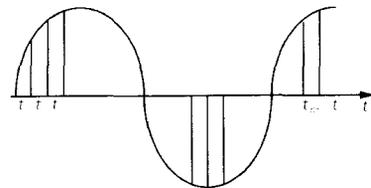


图 1 准同步采样过程示意图

Fig 1 Illustration of quasi-synchronous sampling process

不同的积分算法, 如复化矩形, 复化梯形, 复化辛普生等。经过分析各种积分算法的特点^[2], 确定某种求积公式, 得相应的权系数, 做递推运算。即可求出相应的值。

1.1 信号有效值的计算

首先把全部的 $J \times N + 1$ (J 为采样周波数) 个采样数据 $f(t_i)$ 进行平方后, 得新的数据 $f_1(t_i)$, 按复化梯形求积公式 (1) 进行递推运算:

$$F^1 = \frac{1}{N + i_0} \sum_{i=i_0}^{N+i_0} i f_1(t_i) \quad (1)$$

式中上标“1”表示第 1 次求积运算, i 为相应数据求积公式所对应的权系数。对于复化梯形求积, $i_0 = N + 0.5$, 而其它 $i_1 = i_2 = \dots = i_{N-1} = 1$ 。

接下来把全部的 $J \times N + 1$ 个采样数据, 分别按公式 (2) 进行递推运算:

$$F^J = \frac{1}{N + i_0} \sum_{i=i_0}^{N+i_0} i F^{J-1} \quad J = 2, 3, \dots \quad (2)$$

共需要递推 J 次, 最后可求出 $F^J = A_m$ 。其中 A_m 就是所求信号的有效值。 J 为采样周期数。

1.2 信号谐波的计算

首先把全部的 $J \times N + 1$ 个采样数据 $f(t_i)$ 按复

化矩形求积公式 (3)、(4) 进行递推运算:

$$F_{ma}^1 = \frac{2}{N+i_0} \sum_{i=i_0}^{N+i_0} i f(t_i) \cos(2 \times \frac{i}{N}) \quad (3)$$

$$F_{mb}^1 = \frac{2}{N+i_0} \sum_{i=i_0}^{N+i_0} i f(t_i) \sin(2 \times \frac{i}{N}) \quad (4)$$

式中上标“1”表示第 1 次求积运算, i 为对应的数据求积公式所对应的权系数。对于复化矩形求积, $N = 0$, 而 $i_0 = 1 = \dots = N-1 = 1$ 。

接下来把全部的 $J \times N + 1$ 个采样数据, 分别按公式 (5) ~ (7) 进行递推运算:

$$F_{ma}^J = \frac{1}{N+i_0} \sum_{i=i_0}^{N+i_0} i F_{ma}^{J-1} \quad J = 2, 3, \dots \quad (5)$$

$$F_{mb}^J = \frac{1}{N+i_0} \sum_{i=i_0}^{N+i_0} i F_{mb}^{J-1} \quad J = 2, 3, \dots \quad (6)$$

$$F_m^J = \frac{\sqrt{((F_{ma}^{J-1})^2 + (F_{mb}^{J-1})^2)^J}}{\sqrt{((F_{ma}^{J-1})^2 + (F_{mb}^{J-1})^2)^{J-1}}} = A_m \quad (7)$$

$$\theta_m = \arctan \frac{F_{mb}^J}{F_{ma}^J} \quad (8)$$

式中: F_{ma}^J 和 F_{mb}^J 为谐波的实部和虚部。 F_m^J 为谐波的模。共需要递推 J 次, 最后可求出 A_m 就是所求信号对应的某次谐波幅值。同时也可以求出信号的某次谐波相位的近似值 θ_m 。实际的相位需要加一个补偿量。

对于公式 (7), 为了克服除法运算, 一般采用下两式进行计算:

$$F_m^J = \frac{\sqrt{(F_{ma}^{J-1})^2 + (F_{mb}^{J-1})^2}}{(mm)^J} = A_m \quad (9)$$

$$(mm) = \frac{1}{N} \frac{\sin(\frac{mf T_{NS}}{N})}{\sin(\frac{mf T_{NS}}{N})} \quad (10)$$

2 提高准同步采样测量精度的方法

根据准同步采样的误差理论分析^[3], 以及计算机仿真表明, 准同步采样的误差产生与频率偏差 f 相关。 f 越大, 误差越大。表 1 给出了频率偏差与信号有效值的准确度关系。表 2 为频率偏差与信号的谐波的准确度关系。

表 1 频率偏差与信号有效值的准确度关系

Tab 1 Relation between the accuracy of RMS and frequency deviation

仿真信号 频率 /Hz	信号的 有效值	仿真信 号频率	信号的 有效值
45	100.005	50	100.00
46	100.003	51	99.9999
47	100.002	52	99.9995
48	99.999	53	99.998
49	100.00	54	100.004

(采样频率为 50 Hz $\times 64$, 信号有效值为 100)

表 2 频率偏差与信号的谐波的准确度关系

Tab 2 Relation between the accuracy of harmonic and frequency deviation

基波频率 /Hz	基波 幅值	二次谐 波幅值	三次谐 波幅值	五次谐 波幅值
48	98.95	9.59	9.095	7.66
49	99.74	9.90	9.77	9.36
49.5	99.93	9.974	9.941	9.84
49.8	99.99	9.996	9.991	9.974
50	100.0	10.0	10.0	10.0
50.2	99.99	9.996	9.991	9.974
50.5	99.93	9.974	9.941	9.84
51.0	99.74	9.90	9.77	9.36
52.0	98.95	9.59	9.095	7.66
53.0	97.66	9.09	8.06	5.43

(采样频率为 50 Hz $\times 64$, 基波有效值 100, 二次 10, 三次 10, 五次 10)

从表 2 容易看出, 频偏 f 越小, 准确度越高。而且对于谐波分析而言, 在频偏 f 比较大时, 准确度明显下降。而在实际的电力系统运行中, ± 2 Hz 的频偏是正常的。因此需要对准同步采样的运算进行改进。目的就是通过设法减少频偏 f 的大小来提高测量的准确度。

2.1 变频采样法

变频采样法是在测量过程中, 根据信号的频率值, 改变采样频率, 使信号频率与采样频率的偏差最小。首先采用一个采样频率对信号进行采样, 根据准同步采样算法, 计算出信号的有效值, 谐波等, 再计算出信号的频率, 其次, 根据这个频率去设置系统的采样频率。一般来说是设置系统定时器的计数值。每采样一次, 就计算一次, 再调整一次采样频率。使采样频率实时跟踪信号频率。这种方法硬件实现简单, 测量精度高。不过它的前提条件是要求信号的频率是缓慢变化的。实际电力系统的情况是满足这种条件的。

2.2 二次逼近法

二次逼近法是采用固定的采样频率 (50 Hz $\times N$) 对信号进行采样。接下来用准同步采样算法计

算出信号频率。再根据计算出来的信号频率,计算用固定的采样频率采样一个完整的周波所需要的采样点数。计算公式为

$$N_1 = \frac{F_{NS}}{F_s} \times N \quad (11)$$

式中: N_1 为计算出来的采样点数的取整数。它比原来的 N 可能大,也可能小。因此在实际的采样的过程中,需要采样的点数为 $J \times N + N$, N 为需要增加的采样点数,具体的值根据信号的最低频率按公式(11)来确定。

求出新的采样点数后,再根据新的采样点数,再一次应用准同步采样算法计算出信号的有效值,谐波值等。这种方法,是通过增加运算量来实现的。它的运算时间比原来的增加一倍,测量精度明显提高,但不需要实时改变采样频率。

表3给出了经过二次运算与一次运算结果仿真对比。

表3 二次运算值

Tab 3 Values of secondary calculation

信号基波频率 / Hz	基波幅值	二次谐波幅值	三次谐波幅值	五次谐波幅值
48	99.35	10.60	9.84	9.6
49	99.986	9.994	9.987	9.96
49.5	99.93	9.974	9.941	9.84
49.8	99.99	9.996	9.991	9.974
50	100.0	10.0	10.0	10.0
50.2	99.99	9.996	9.991	9.974
50.5	99.93	9.974	9.941	9.84
51.0	99.91	9.96	9.92	9.77
52.0	99.95	9.98	9.995	9.876
53.0	97.975	9.99	9.98	9.94

这两种方法都要求准确地求出信号的频率。这可以通过相位与时间差之间的关系求出。对于一个正弦波,它的频率等于两点的相位差除以这两点之间的时间差。频率的计算过程如图2如示。时间差是由采样频率决定的。相位差可以通过谐波分析中得到。如果从 t_0 时刻开始进行谐波分析,可以根据公式(9)求出此时刻的相位 ψ_0 。同样如果从 t_1 时刻开始进行谐波分析,也可以根据公式(9)求出此时刻的相位 ψ_1 。根据这两个相位差,可以根据公式(12)准确地求出信号的频率。

$$F_s = \frac{2 \times \arctan \frac{F'_{ma}(t_1)}{F'_{mb}(t_1)} - \arctan \frac{F'_{ma}(t_0)}{F'_{mb}(t_0)}}{2 \times (t_1 - t_0)} \quad (12)$$

这个公式对于以上的两种改进方法的频率计算都是适用的。对于变频采样法, $t_1 - t_0$ 是一个不断变化的值,具体的值由当前的采样频率决定。而对于二次逼近法, $t_1 - t_0$ 是固定不变的值,它的值也是由采样频率决定的。

表4给出了应用公式(12)仿真求出的采样频率的准确度仿真结果。从表4中可以看出,频率的计算的准确度是非常高的。

表4 计算所得的信号频率与实际信号的频率对比

Tab 4 Frequency comparison of calculated signal

信号实际频率	计算所得频率	信号实际频率	计算所得频率
46	46.002 4	51	50.999 9
47	47.003 68	52	51.999 96
48	48.001 47	53	53.000 14
49	49.000 14	54	54.000 34
50	50.0	55	54.999 05

(采样频率为 50 Hz ×64)

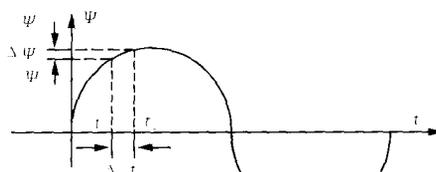


图2 由相位差计算频率示意图

Fig 2 Illustration of frequency calculation through phase difference

3 配电综合测控仪中的应用

3.1 硬件设计

根据配电综合测控仪的功能与特点,硬件部分配置了输入电路(电压变压器 PT,电流互感器 CT),2 ×4路同步采样的14位 A/D转换器 MAX125。运算与控制的核心部分采用 TI 的 DSP 芯片 TMS320LF2407A。

系统的整体硬件电路的原理框图如图3所示。输入的电压电流信号通过 PT,CT后,把大信号变成 ±2 V 小信号。通过运放进行信号处理,加入到 MAX125同步转换。MAX125的转换控制频率由 DSP 的定时器来控制。DSP 读取 A/D 的转换数据。再应用准同步采样算法。计算出所需要的值并送显示。

整个电路装在采取内外机壳双层屏蔽的机箱内,以利于抗干扰。测量数据可以通过大屏的 LCD 显示出来。同时也可以通过 RS232 或 RS485 接口传给 PC 机。

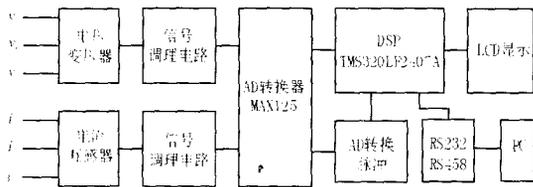


图3 硬件电路原理框图

Fig 3 Hardware circuit

3.2 软件设计

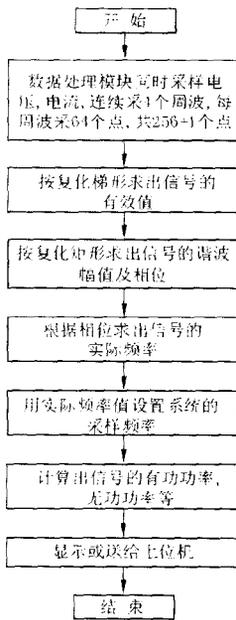


图4 软件流程框图

Fig 4 Flw chart of software

全部软件按模块分为数据采集模块,数据处理模块,显示模块,通讯模块,系统调试模块。其中最核心的模块是采用准同步采样算法的数据处理模块。在本设计中,为了提高测量速度,采用了准同步采样中的变频采样法。首先数据采集模块对数据进行采样,共采样4个周波,每个周波采样64个点,共采样 $256+1=257$ 个点。接下来对采样的数据进行平方后,按复化梯形算法求出信号的有效值。再按复化矩形算法求出信号的各次谐波以及各次谐波的相位,进而求出信号的频率。再用信号的频率去设置新的系统的采样频率。最后计算出信号的有功功率,无功功率等并把相关的值显示出来。软件流程图如图4所示。

4 结论

准同步采样的理论分析,计算机仿真及测量装置的测量结果表明,准同步采样应用于采样系统中

不仅方法简单,而且测量达到了相当高的准确度,完全满足现场测量精度要求。

在本系统中,通过选用高速的DSP芯片和准同步采样算法,设计的配电综合测控仪不仅体积小,抗干扰能力强,而且测量速度快,测量精度高。通过现场实际运行表明,本仪表完全满足设计要求。准同步采样算法作为一种有效的采样分析算法,在现场仪表中有很好的应用前景。

参考文献:

- [1] 戴先中. 准同步采样及其在非正弦功率测量中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 1984, 5(4): 390-396
DAIXian-zhong The Quasi-synchronous Sampling and Its Application in the Measurement of Nonsinusoidal Power [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1984, 5(4): 390-396
- [2] 潘文. 准同步采样方法应用中的几个问题 [J]. 电测与仪表, 1990, (6): 6-8
PAN Wen Some Question about the Application of the Quasisynchronous Sampling Method [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 1990, (6): 6-8
- [3] 潘文. 准同步采样补偿方法及其误差估计 [J]. 仪器仪表学报, 1990, 11(2): 192-199.
PAN Wen Compensations for Quasisynchronous Sampling and Error Estimates in the Frequency Domain and in the Time Domain [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1990, 11(2): 192-199.
- [4] 沈国峰. 进一步提高准同步采样谐波分析准确度的方案 [J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(5): 455-457.
SHEN Guo-feng Designed Plan for Improving Accuracy of Quasisynchronous Sampling Harmonics Analysis [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, 22(5): 455-457.
- [5] 李真芳. DSP程序开发——MATLAB调试及直接目标代码生成 [M]. 西安:西安电子科技大学出版社, 2003.
LI Zhen-fang DSP Program Development——MATLAB Debug and Product Object Code Directly [M]. Xi'an: Xidian University Press, 2003.
- [6] TMS320F2047A DSP CONTROLLER [Z]. TI Corporation, 2003.

收稿日期: 2005-01-02; 修回日期: 2005-03-08

作者简介:

曹晖(1972-),男,工程师,从事检测技术与自动化装置的研究。E-mail: caohui2000@hotmail.com

(下转第57页 continued on page 57)

- [4] Gedra T. On Transmission Congestion and Pricing[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 14(1): 241-248
- [5] 李平,宋燕敏,曹荣章. 电力市场的阻塞调度[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(13): 11-12
LI Ping, SONG Yan-min, CAO Rong-zhang. Congestion Dispatch in Power Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(13): 11-12
- [6] 杨洪明,荆朝霞,段献忠. 电力市场下电网的可传输容量[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(2): 34-37.
YANG Hong-ming, JING Zhao-xia, DUAN Xian-zhong. Available Transfer Capability of Transmission Network in Power Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 22(2): 34-37.
- [7] 汤振飞,于尔铿,唐国庆. 电力市场输电阻塞管理[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(10): 13-16
TANG Zhen-fei, YU Er-keng, TANG Guo-qing. Transmission Congestion Management in Power Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(10): 13-16
- [8] 任震,吴杰康,等. 在竞争的电力市场下的传输阻塞管理与定价[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(2): 19-22
REN Zhen, WU Jie-kang, et al. Congestion Management and Pricing in Competitive Power Market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(2): 19-22

收稿日期: 2004-12-13; 修回日期: 2005-02-27

作者简介:

姚文峰(1980-),男,硕士研究生,主要从事电力市场理论研究及电力市场技术支持系统的软件开发;

姚建刚(1952-),男,教授,博士生导师,主要从事电力市场、配电系统自动化和新型输电方式的研究;

刘昌(1980-),男,硕士研究生,主要从事电力市场方向研究。E-mail: liuchang-2000@etang.com

Analysis of electric network opportunity cost caused by congestion

YAO Wen-feng¹, YAO Jian-gang¹, LIU Chang¹, FANG Hua¹, ZHANG Wu-yang²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan HDHL Electric & Information Tech Co., Ltd, Changsha 410012, China)

Abstract: In transmission congestion research, most of the existing researches focus on the congestion cost. However, this paper emphasizes particularly on electric network opportunity cost caused by congestion. In congestion management, congestion can be eliminated by rational transmission management. For congestion happened frequently and seriously in some lines, congestion can be eliminated by line enlargement. The paper presents a method that by reconstruction and network opportunity cost is allocated among the congestion lines. Comparison and analysis of the opportunity cost that the congestion line allocated and the enlarging expenditure for eliminating congestion lay a foundation for power system economic decision.

Key words: electricity market; transmission congestion; opportunity cost; cost budget

(上接第 48 页 continued from page 48)

Application of the quasi-synchronous sampling method in the measuring control instrument for electricity

CAO Hui¹, YUAN Shi-ying¹, YI Jun², CAO Dong²

(1. East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 2. Guangdong Phamc College, Guangzhou 510640, China;

3. South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: This paper analyzes the relation between the accuracy of quasi-synchronous sampling method and frequency deviation through studying the quasi-synchronous sampling method. Two methods of improving the accuracy of the quasi-synchronous sampling method through reducing frequency deviation are presented. The formula for accurately calculating the frequency is given. The simulation results show this method can improve the RMS value of the measured signal and the accuracy of the harmonic. Finally, this method is applied in the measuring control instrument for electricity. The purposes of small volume, strong anti-jamming ability, high measuring speed and measuring accuracy of this instrument are achieved.

Key words: quasi-synchronous sampling method; measuring control instrument for electricity; frequency adjustment sampling method; quadratic approach method