

基于频率跟踪的定频采样测量算法

卜广金¹,戴 静²,李 明²,李玉平²

(1. 江苏省电力公司,江苏 南京 210024;

2. 国电南京自动化股份有限公司,江苏 南京 210003)

摘要: 针对传统测量算法的改进,提出一种基于软件的频率跟踪测量算法,应用于固定频率的保护和测控一体化装置。在较低的固定采样频率下根据采样值实时计算出被测量的实际频率,再根据频率偏差用软件算法补偿修正被测量,进而得到准确的测量值。仿真结果表明,该算法可以在较宽的频率范围内,对含有谐波的交流流量实现精确测量。该算法应用于实际的数字式保护测控装置,既不影响继电保护动作,又能满足测量精度,取得了良好的效果。

关键词: 频率; 异步采样; 谐波; 测量; 装置

中图分类号: TM 935

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)04-0068-03

0 引言

电力系统运行状态变化比较大,尤其是频率发生变化时,对测量精度会产生较大的影响。对于专用测控装置在测量准确度方面已经有很多的研究成果,包括硬件采样技术、软件采样技术,能够减小或者消除频率变化对频率测量的影响^[1]。但对于当前电力系统中大量使用的数字式保护测控一体化装置,继电保护功能^[2-3]和测控功能^[4]的采样均由一个微处理器实现。除了成本原因,继电保护计算需要数据窗保持稳定^[5],不能由于测控功能而影响保护功能的动作行为,这类装置通常不使用变频采样技术^[6]来保证测量的精度。为此,必须从其他途径寻求解决方法。

对被测电气信号进行交流采样,如果信号周期和采样周期存在整数倍的关系并且采样点间的时间间隔保持一致,则成为同步采样。异步采样实际上是假定电网频率为某一定值,根据这一定值和每周期内的采样点数确定定时器的定时值,以此实现同步^[7]。当电网频率与这一定值不符或发生变化时,这种采用固定采样频率的装置会产生测量偏差。如果不对测量偏差进行补偿,最终会形成装置的测量误差,并且,被测模拟量的频率相对额定频率偏离越大,这种误差也越大。然而,如果能根据被测模拟量的采样频率对数值计算的偏差进行有效补偿,就能得到满足精度要求的模拟量测量值。按照这一思路,在此提出一种基于软件的频率跟踪测量算法,应用于固定采样频率的保护和测控一体化装置,根据采样值计算出被测量的实际频率,采取相应的软件补偿措施,可以使测量精度满足要求。

1 频率测量

应用所提出的算法,首先需要实时计算被测量量的实际频率。传统软件频率测量方法有零交法^[8-9]和基于傅里叶变换的测频原理^[10-13]等,为了减小算法复杂性,实际应用采用后者。

假设输入信号是角频率为 ω 的正弦波电压:

$$u(t) = A \sin(\omega t + \varphi) = A \sin(\omega_0 t + \psi) = A \sin \psi \cos \omega_0 t + A \cos \psi \sin \omega_0 t \quad (1)$$

式中 $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$; $\psi = \Delta\omega t + \varphi = 2\pi\Delta f t + \varphi$, φ 为初相位; A 为幅值; $\omega_0 = 2\pi f_0$, $f_0 = 50$ Hz。

对于 $u(t)$ 信号每周期采样 N 次,产生的采样序列 $\{u_k\}$,对离散的采样序列进行傅氏变换,可以得到:

$$u_1 = A \sin \psi, \quad u_N = A \cos \psi \quad (2)$$

由式(2)可以求出基波分量相位变化 ψ :

$$\psi = \arctan(u_1 / u_N) \quad (3)$$

为了测量频率的变化 Δf ,并从 $f = f_0 + \Delta f$ 求得频率 f ,根据每周期采样 N 次得到 N 个采样值,求得 u_1 和 u_N ,然后得到基波分量^[14]相位变化 ψ_1 ,同样利用后 N 次采样值可求出 ψ_2 ,利用下式即可求出频率变化 Δf 。

因为

$$\psi = 2\pi\Delta f t + \varphi, \quad \frac{d\psi}{dt} = 2\pi\Delta f$$

所以

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi} \frac{d\psi}{dt} = \frac{1}{2\pi} \frac{\psi_2 - \psi_1}{N\Delta t} = \frac{1}{2\pi} \frac{\psi_2 - \psi_1}{T_0}$$

式中 Δt 为采样间隔, $\Delta t = T_0 / N$, $T_0 = 1 / f_0$, $f_0 = 50$ Hz; N 为每周期采样次数。

文献[4]利用傅氏变换测量得到的频率调整硬件采样间隔,达到同步采样的效果,使得测量精度能够得到保证。但对于数字式保护和测控一体化装置,考虑到简化硬件设计和保护软件的复杂度等原因,宜根据实际频率采用软件补偿的方法,得到精确的

有效值。表 1 列出了在实际频率 f_s 从 45~55 Hz 变化时,利用傅氏变化测频算法测量出的频率 f_j 的值。可以对比观察误差值小于 0.01 Hz。

表 1 利用傅氏变换得到的测频值

Tab.1 Frequency measurement with Fourier arithmetic						Hz
f_s	f_j	f_s	f_j	f_s	f_j	
45.000	44.994	49.000	49.000	53.000	53.010	
46.000	45.992	50.000	50.000	54.000	54.023	
47.000	46.995	51.000	51.000	55.000	55.042	
48.000	47.998	52.000	52.003			

2 实际有效值计算

交流模拟量有效值^[15]的算式为

$$A=\sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T a^2\mathrm{d}t}$$
 (4)

式中 A 为信号有效值; T 为信号周期。
同步采样的采样频率是信号频率的整数倍,见图 1,此时可直接得到有效值计算的离散算式:

$$A=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^N[a_k]^2}$$
 (5)

式中 N 为每周期采样点数(下同); a_k 为模拟量 k 点的采样值。

异步采样的采样频率不是信号频率的整数倍,如图 2 所示,需要对式(5)进行软件算法补偿,得到基于频率跟随补偿的有效值算法如下:

$$A=\sqrt{\frac{f}{F}\left(\sum_{k=1}^N[a_k]^2+\frac{\text{mod}(F,f)}{f}a_N^2\right)}$$
 (6)

式中 $\text{mod}(F,f)/f$ 为图 2 中 Δt ,表示异步采样时误差修正值; F 为采样频率; f 为通过傅氏变换后计算得到的频率值。

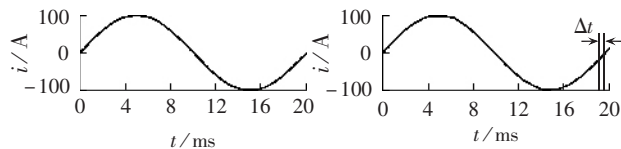


图 1 同步采样示意图 图 2 异步采样示意图
Fig.1 Synchronous sampling Fig.2 Asynchronous sampling

3 误差分析

对比图 1 和图 2,异步采样时仍用同步采样时的式(5)计算,则计算误差产生在 Δt 区间,因此需要设计算法对 Δt 区间误差值进行修正。

设采样频率为 F ,模拟量信号频率为 f ,则模拟信号在一个周期内采样点数为 $N=[F-\text{mod}(F,f)]/f$, $\Delta t=\text{mod}(F,f)/f$ 。

因此,根据矩形公式,在式(5)基础上增加 Δta_N^2 项,以修正误差。根据采样误差修正后得到算式(6),可得影响误差的关键因素在于采样频率 F , F 越大, Δt 值越小,带来的误差影响也越小。在实际应用中, F 取值由于受保护算法影响不可能取太大,因此需要增加积分区间,增大数据窗,以减小 Δt 的误差。

实际应用中,取 $F=1\,000\text{ Hz}$,积分数据窗取 100

点。模拟量频率范围为 45~55 Hz,同时叠加多次谐波^[16]后,可以比较不进行补偿时的仿真测量误差(见表 2,表中, I_1 、 I_2 、 $\cdots$ 、 I_7 分别表示基波及 2 次、 $\cdots$ 、7 次谐波的有效值;迭加的谐波为基波有效值的 20%,即 1 A,表 3、4 同)、进行补偿后的仿真测量误差(见表 3)以及采用所提算法实际装置测试误差(见表 4),由于实际装置的采样通道存在零漂值,导致表 3 和表 4 的误差较大,可以通过进一步优化电路参数改进。

表 2 谐波影响下无补偿的交流流量
测量方法随频率变化的误差仿真

Tab.2 Harmonic influenced AC measurement errors at different frequencies without compensation								%
f/Hz	$I_1=5\text{ A}$	$\sum_{i=1}^2 I_i$	$\sum_{i=1}^3 I_i$	$\sum_{i=1}^4 I_i$	$\sum_{i=1}^5 I_i$	$\sum_{i=1}^6 I_i$	$\sum_{i=1}^7 I_i$	
45.0	1.65	1.64	1.69	1.72	1.77	1.85	1.97	
46.0	1.31	1.16	1.51	1.57	1.65	1.77	1.99	
47.0	2.08	2.07	2.17	2.25	2.41	2.68	3.12	
48.0	0.55	0.03	0.74	0.72	0.63	0.47	0.08	
49.0	2.66	2.66	2.89	3.13	3.56	4.33	5.78	
50.0	0	0	0	0	0	0	0	
51.0	3.21	2.46	2.86	3.12	3.59	4.46	6.32	
52.0	2.54	2.25	2.33	2.40	2.51	2.70	3.00	
53.0	2.26	0.16	0.41	0.34	0.16	0.27	1.27	
54.0	3.21	3.19	0.36	4.01	4.78	6.27	9.67	
55.0	2.11	2.10	2.13	2.13	2.12	2.07	1.88	

表 3 谐波影响下采用文中提出的算法
进行交流流量测量的误差仿真

Tab.3 Harmonic influenced AC measurement errors at different frequencies with compensation by proposed algorithm								%
f/Hz	$I_1=5\text{ A}$	$\sum_{i=1}^2 I_i$	$\sum_{i=1}^3 I_i$	$\sum_{i=1}^4 I_i$	$\sum_{i=1}^5 I_i$	$\sum_{i=1}^6 I_i$	$\sum_{i=1}^7 I_i$	
45.0	0.002	0.005	0.010	0.020	0.036	0.062	0.102	
46.0	0.022	0.051	0.114	0.202	0.322	0.458	0.595	
47.0	0.006	0.012	0.026	0.050	0.092	0.160	0.268	
48.0	0.011	0.037	0.096	0.163	0.236	0.283	0.256	
49.0	0.019	0.038	0.081	0.155	0.282	0.486	0.811	
50.0	0	0	0	0	0	0	0	
51.0	0.038	0.080	0.171	0.313	0.527	0.822	1.261	
52.0	0.005	0.010	0.021	0.041	0.076	0.132	0.217	
53.0	0.004	0.032	0.103	0.164	0.204	0.165	0.036	
54.0	0.004	0.032	0.103	0.339	0.594	0.989	1.650	
55.0	0.002	0.004	0.009	0.016	0.028	0.045	0.055	

表 4 实际装置中应用所提算法在频率变化且
谐波影响下交流流量的测量误差表

Tab.4 Harmonic influenced AC measurement errors at different frequencies in real equipment								%
f/Hz	$I_1=5\text{ A}$	$\sum_{i=1}^2 I_i$	$\sum_{i=1}^3 I_i$	$\sum_{i=1}^4 I_i$	$\sum_{i=1}^5 I_i$	$\sum_{i=1}^6 I_i$	$\sum_{i=1}^7 I_i$	
45.0	1.60	1.40	1.40	1.00	1.10	1.10	0.60	
46.0	0.70	1.20	1.40	1.80	1.00	0.30	0.20	
47.0	1.20	0.92	1.76	0.45	0.45	0.51	0.64	
48.0	0.60	0.30	1.20	1.20	1.40	1.00	0.50	
49.0	0.93	0.53	0	0.39	1.16	1.20	0.38	
50.0	0.73	0.39	0.26	0.32	0	0.40	0.20	
51.0	0.70	0.30	0	0.10	0	0.10	1.00	
52.0	0.50	0.10	0	0	1.00	0	0	
53.0	0.67	0.39	0.30	1.30	0.45	0.45	0.64	
54.0	0	0	0	1.00	0	0.23	0	
55.0	0	0.70	1.60	0.40	0.60	0.80	0.50	

4 结论

理论分析和试验验证结果表明,文中提出的基于频率跟踪的测量算法应用于固定采样频率的保护测控一体化装置,在各种工况影响下,测量误差完全满足GB/T 13729-2002 远动终端设备中3.5.2节^[17]要求。该算法应用于实际数字式保护测控装置能够简化装置的硬件设计,降低装置对采样频率及测频的硬件要求,减少装置成本和系统设计的复杂度,在保证测量精度的同时减少由于测量算法对继电保护稳定性的影响,为一种实际可行的工程应用方法。

应用该算法的实际装置已经在苏州青莲变、陈塘变2个程序化变电站中投运成功,取得了良好的应用效果。

参考文献:

- [1] 谢小荣,韩英铎. 电力系统频率测量综述[J]. 电力系统自动化, 1999,23(3):54-58.
XIE Xiao-rong, HAN Ying-duo. An overview on power system frequency measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999,23(3):54-58.
- [2] 许正亚. 变压器及中低压网络数字式保护[M]. 北京:中国水利水电出版社,2004.
- [3] 张保会,尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京:中国电力出版社,2005.
- [4] 丁书文,张承学,龚庆武,等. 半波傅氏算法的改进——一种新的微机保护交流采样快速算法[J]. 电力系统自动化,1999,23(5):18-20.
DING Shu-wen, ZHANG Cheng-xue, GONG Qing-wu, et al. An improved half-wave Fourier algorithm—a new fast algorithm for microprocessor-based protection AC sampling[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999,23(5):18-20.
- [5] 陈德树. 计算机继电保护原理与技术[M]. 北京:中国电力出版社,1992.
- [6] 曹晖,袁世英,易珺,等. 准同步采样法在配电综合测控仪中的应用[J]. 继电器,2005,33(11):45-48,57.
CAO Hui, YUAN Shi-ying, YI Jun, et al. Application of the quasi-synchronous sampling method in the measuring control instrument for electricity[J]. Relay, 2005,33(11):45-48,57.
- [7] 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):39-42.
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):39-42.
- [8] 胡广书. 数字信号处理——理论、算法与实现[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
- [9] 范春菊,郁惟镛. 功率因数的实时精确测量方案探讨[J]. 继电器,2003,31(7):47-49.
FAN Chun-ju, YU Wei-yong. Discussion of accurate measurement scheme of power factor[J]. Relay, 2003,31(7):47-49.
- [10] 李振然. 利用傅里叶变换实现电力系统频率的测量[J]. 广西大学学报:自然科学版,1996,21(4):325-328.
LI Zhen-ran. Using Fourier transform and adaptive sampling to realize measurement of power system frequency[J]. Journal of Guangxi University: Natural Science Edition, 1996,21(4):325-328.
- [11] 高婧,郑建勇,潘震东. 电力系统微机保护中改进傅氏算法综合性能研究[J]. 继电器,2002,30(10):16-20.
GAO Jing, ZHENG Jian-yong, PAN Zhen-dong. Study of improved Fourier algorithm for microprocessor-based protection in power system[J]. Relay, 2002,30(10):16-20.
- [12] 杨丽徒,包毅,郝玉东,等. 电力系统微机保护算法的研究[J]. 郑州工业大学学报,1998,19(3):14-17.
YANG Li-xi, BAO Yi, HAO Yu-dong, et al. Calculation method of microcomputer protection in power system[J]. Journal of Zhengzhou University of Technology, 1998,19(3):14-17.
- [13] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 2版. 北京:中国电力出版社,1995.
- [14] 郑常宝,郑长勇,张力. 用求基波参数的方法测量谐波电流和无功电流[J]. 电测与仪表,2006,43(4):15-18.
ZHENG Chang-bao, ZHENG Chang-yong, ZHANG Li. Harmonics current and reactive current measurement by the calculating fundamental parameters[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2006,43(4):15-18.
- [15] 邱光源. 电路[M]. 4版. 北京:高等教育出版社,2003.
- [16] 曲涛,任元,杜德立,等. GB/T 14549-1993 电能质量公用电网谐波[S]. 北京:中国标准出版社,1993.
- [17] 赵祖康,刘佩娟,陈鼎坤,等. GB/T 13729-2002 远动终端设备[S]. 北京:中国标准出版社,2002.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

卜广金(1951-),男,江苏南京人,工程师,长期从事继电保护运行工作;

戴静(1978-),女,江苏南京人,助理工程师,从事RTDS仿真测试工作;

李明(1980-),男,江西赣州人,助理工程师,从事继电保护设计开发;

李玉平(1978-),男,湖南郴州人,助理工程师,从事继电保护设计开发。

Fixed frequency sampling measurement based on frequency tracing

BU Guang-jin¹, DAI Jing², LI Ming², LI Yu-ping²

(1. Jiangsu Provincial Electric Power Co., Nanjing 210024, China;

2. Guodian Nanjing Automation Co., Ltd., Nanjing 210003, China)

Abstract: To improve traditional measuring algorithms, a software frequency tracing measurement method is presented for the protection and measuring-control integrated device with fixed frequency. Under lower fixed sampling frequency, the real frequency of the measurement is calculated real-time according to the sampled values. Then the measured data is modified to accurate values by software according to the frequency deviation. Simulation results show that, the AC variables with harmonics can be measured accurately in a wide frequency range. Applied in digital protections and measuring-control integrated devices, it satisfies the measuring precision, without influencing protective actions.

Key words: frequency; asynchronous sampling; harmonic; measurement; device