

电力设备中类正弦波信号测量方法研究

黄天戌, 张 魁, 任清珍

(武汉大学 电子信息学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对电力网络存在的问题, 对类正弦信号频率偏移以及高次谐波干扰的情况下实现精确测量, 提出选择采样角度进行快速傅里叶变换, 以达到精度最大化的方法。通过 Matlab 实现仿真实验, 少量采样点的数学证明以及实际利用 MAX 197 为模拟数字转换器的数据采集系统的检验, 证明该方法可以在不提高采样速率的情况下, 大幅度提高测量的精度。

关键词: 频率偏移; 快速傅里叶变换; 采样角度

中图分类号: TM 930.12

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)08-0056-03

随着社会经济的快速发展, 电力资源已经成为不可或缺的生产资料, 在日常的生活、生产中扮演重要的角色。对电能的需求, 尤其是高质量电能的需求, 显得尤为突出。而在目前电力网络上, 为了提高电能质量或者增加网络的容量, 需要在准确测量网络参数的前提下, 安全地投切电容治理电力网络上的高次谐波或者将大型发电机并网。因此, 在频率偏移以及谐波干扰的环境下, 准确地测量电力网络上的电力参数是问题的关键。

1 常用的测量方法

一般针对频率相对稳定的信号的测量方法有以下 4 种: 真有效值法、锁相法、过采样法以及采样法。以上方法在此不一一展开说明, 而且, 以上方法针对频率偏移和谐波干扰的环境下, 不能有效地进行精确的测量。

2 控制采样角的测量原理

针对以上几种常用测量方法的比较发现, 要实现基波与高次谐波的有效分离, 利用傅里叶变换是比较切实可行的办法^[1]。但是在满足较高测量精度的要求下, 利用过采样对硬件的要求过高; 那么利用一些有效的改进方法, 对原有的采样法进行改善是完全可以使原有的采样法满足要求的。控制采样的起始角度就是一种切实有效的方法。以下是关于采样角度与采样误差的数学证明: 设有正弦波信号 $f(k, \theta, t) = \sin(2\pi kft + \theta)$, 其中 k 为频率偏移系数, θ 为起始采样相位, f 为频率, t 为时间。

将正弦波信号 $f(k, \theta, t) = \sin(2\pi kft + \theta)$ 离散化, 并进行快速傅里叶变换。为了方便计算, 离散化时在每周期取 4 点, 设计算结果为信号幅度 $A (i = 0, 1, 2, 3)$ ^[1]:

$$A = \sqrt{\left[\sum \sin(2\pi ki/4 + \theta) * \sin(2\pi i/4) \right]^2 + \left[\sum \sin(2\pi ki/4 + \theta) * \cos(2\pi i/4) \right]^2} / 2$$

上式即为测量信号幅度的表达式, 分别将取平方内部的部分利用积化和差的三角公式转化为和的形式, 则 $A = \sqrt{4\sin^2(2k\pi/4) [\cos^2(\theta + 4k\pi/4) + \cos^2(\theta + 2k\pi/4)]} / 2$ 。此时, 信号的误差表达式即为 $\delta = \sqrt{g} / 2 - 1$ 。

根据最值 $d\delta/d\theta = dg/(4\sqrt{g}d\theta)$, 在 $dg/d\theta = 0$ 时有最值存在, 那么通过和差化积的三角公式, 取 $dg/d\theta = -2\sin(k\pi/2)\sin(k\pi/2)\sin[(2\theta + 3/(2k\pi))]$, 则 $\sin[2\theta + 3/(2k\pi)] = 0$, 从而得表达式 $\theta = (2n\pi - 3k\pi)/4$, n 为整数。

由以上证明可知: 频率偏移系数 k 为 0.95 和 1.05 时, 采样起始相位满足误差最小的取值分别为 $1.15\pi/4$ 和 $0.85\pi/4$, 接近 $\pi/4$; 当频率偏移量绝对值越小时, 最小误差的相位越从两侧趋近于 $\pi/4$ 。所以, 在存在频率偏移并且以某一频率上下摆动时, 取采样起始相位为 $\pi/4$ 是最佳的选择。

根据以上分析, 结合正弦波信号特点, 以 50 Hz 的信号为例, 进行软件仿真以后, 有如下规律: 当频率偏移大于 50 Hz 时, 采样相位以 $\pi/4$ 为基准, 在基准小于 $\pi/4$ 的某相位误差最小, 当频率偏移越大时, 误差最小点的相位越向小于 $\pi/4$ 的方向偏移; 当频率偏移小于 50 Hz 时, 采样相位以 $\pi/4$ 为基准, 在基准大于 $\pi/4$ 的某相位误差最小, 当频率偏移越大时, 误差最小点的相位越向大于 $\pi/4$ 的方向偏移; 当频率偏移量的绝对值越大时, 以 $\pi/4$ 为基准, 最小误差对应的相位偏移越大, 平均误差越大; 当频率偏移量的绝对值越小时, 以 $\pi/4$ 为基准, 最小误差对应的相位偏移越小, 向基准靠近, 平均误差越小 (这里的平均误差是指各个取样相位的误差的数字平均); 但是在 $\pi/4$ 相位或接近该相位进行采样时, 综合误差在该频率偏移范围内保持最小 (这里的综合误差是指在频率偏移量绝对值一定的情况下, 各个相位的误差的数字平均)。

3 硬件电路设计

根据上述推导的结论, 在实际的应用中采用如图

1 所示的硬件电路结构,对频率偏移的信号进行测量。在进行测量时,前级输入电路首先进入过零比较单元,使用滞后的过零比较电路^[2];采样单元使用 6.4 kHz 的频率进行采样,即每个周期采 128 个点,如果

满足过零条件,由单片机计 16 个脉冲以后,输入信号的相位近似达到 45°,此时开始启动模数转换器,对信号进行采样并计算,具体采样电路如图^[3,4]。

信号幅度 A 的计算公式^[1]为

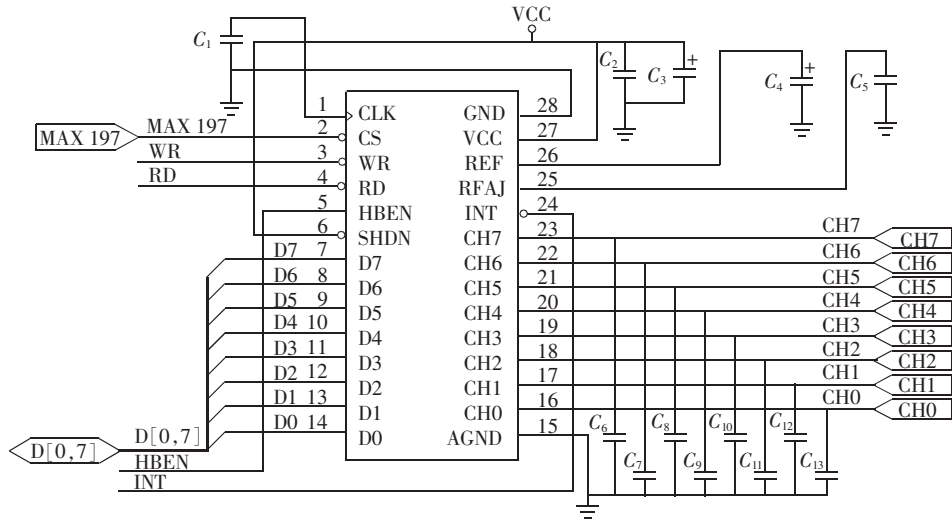


图 1 采样电路
Fig.1 Sampling circuit

$$A=\sqrt{\left[\sum K_i\sin(2\pi i/n)\right]^2+\left[\sum K_i\cos(2\pi i/n)\right]^2}/2}$$

式中 i 表示采样序列的第 i 个点; K_i 表示第 i 个点的采样值; n 表示采样总点数,可设 $n=128$ 。

4 实验数据

以幅值为 1,频率为 50 Hz 的基波信号作为试验对象,在不存在高次谐波的情况下,测量幅值取得如表 1,2 所示的试验数据(表中 Δf 为频率偏移量)。

表 1 频率偏移量、相位与实际测量值的关系
Tab.1 The relationship of frequency departure, phase and practical outcome

相位	各种 Δf 下的实际测量值					
	-5%	-3%	-1%	+1%	+3%	+5%
0	1.020 026	1.013 392	1.004 841	0.994 864	0.983 962	0.972 628
$\pi/16$	1.021 393	1.013 484	1.004 628	0.995 317	0.986 015	0.977 140
$2\pi/16$	1.018 972	1.011 331	1.003 690	0.996 461	0.989 992	0.984 542
$3\pi/16$	1.013 106	1.007 247	1.002 165	0.998 119	0.995 267	0.993 657
$4\pi/16$	1.004 638	1.001 835	1.000 285	1.000 037	1.001 024	1.003 072
$5\pi/16$	0.994 810	0.995 904	0.998 335	1.001 922	1.006 386	1.011 365
$6\pi/16$	0.985 102	0.990 357	0.996 612	1.003 490	1.010 549	1.017 312
$7\pi/16$	0.977 014	0.986 050	0.995 381	1.004 503	1.012 897	1.020 057
$8\pi/16$	0.971 832	0.983 660	0.994 830	1.004 807	1.013 085	1.019 206

由于将真实信号幅值设为 1,已经完成归一化的处理,读出的误差值就是测量结果与真实值的相对误差。结果显示,对于 50 Hz 信号,频率偏移在 5% 以内时,如果不规定采样角度,其计算结果与实际值的相对误差最大可以接近 3%;但是规定采样角度为 45°以后,误差竟小于 5‰。需要强调的是,以上数据是由 50 Hz 单独频率成份时的计算结果。在实际

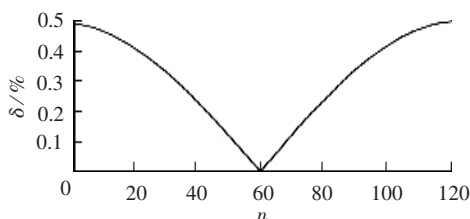
表 2 频率偏移量、相位与测量误差的关系
Tab.2 The relationship of frequency departure, phase and measuring error

相位	各种 Δf 下的测量误差					
	-5%	-3%	-1%	+1%	+3%	+5%
0	0.020 026	0.013 392	0.004 841	0.005 136	0.016 038	0.027 372
$\pi/16$	0.021 393	0.013 484	0.004 628	0.004 683	0.013 985	0.022 860
$2\pi/16$	0.018 972	0.011 331	0.003 690	0.003 539	0.010 008	0.025 458
$3\pi/16$	0.013 106	0.007 247	0.002 165	0.001 881	0.004 733	0.006 343
$4\pi/16$	0.004 638	0.001 835	0.000 285	0.000 037	0.001 024	0.003 072
$5\pi/16$	0.005 190	0.004 096	0.001 665	0.001 922	0.006 386	0.011 365
$6\pi/16$	0.014 898	0.009 643	0.003 388	0.003 490	0.010 549	0.017 312
$7\pi/16$	0.022 986	0.013 950	0.004 619	0.004 503	0.012 897	0.020 057
$8\pi/16$	0.028 168	0.016 340	0.005 170	0.004 807	0.013 085	0.019 206

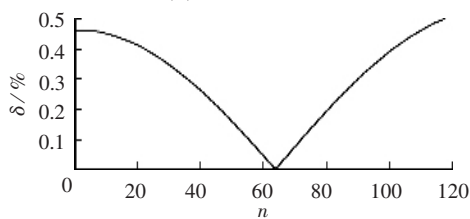
的测量中,如果不存在频率偏移的现象,以 50 Hz 频率为基波的高次谐波信号可以由快速傅里叶变换轻易的以数字滤波的方式排除其对基波幅度的干扰,而基波的高次谐波幅度一般不会超过基波幅度的 5%,此时以任意角度采样都可以取得基波的幅度及相位信息。但是,高次谐波的频率是实时在线基波频率的整数倍,一般以奇次谐波的形式出现,而其中以三次谐波的幅度最大,可以达到基波幅度的 5%,这样就出现了比较恶劣的情况:当基波频率产生偏移后,高次谐波的频率也产生偏移。在被测信号的频率产生偏移后,利用原有的 50 Hz 的等时间间隔采样本身就在计算时会引入误差;当混有高次谐波以后,由于高次谐波的频率偏移干扰,会使测量的相对误差进一步增加,但是由于高次谐波的幅度有限,而且在结果处理时利用提取基波的算法,其不良影响会被抑制,此时总体误差与采样角的关系仍然有效。

5 软件仿真的输出结果

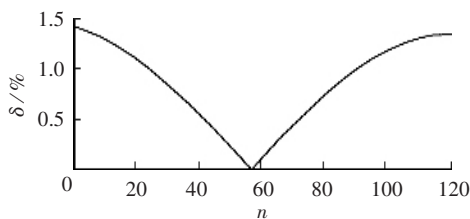
通过 Matlab 中关于数字信号处理的仿真功能,模拟了电力网络上电压的实际情况,在近似的电压信号中添加了 3 次、5 次高频谐波,进行 256 个点的周期采样,根据不同频率偏移情况,不同采样起始角度的采样误差结果,如图 2 所示(图中 δ 为相对误差百分比, n 为采样点数),效果很理想。



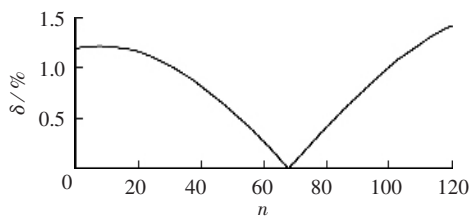
(a)正向频率偏移 1 %



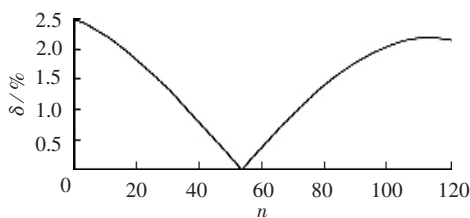
(b)负向频率偏移 1 %



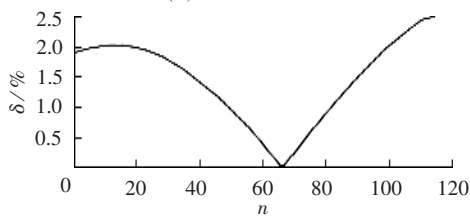
(c)正向频率偏移 3 %



(d)负向频率偏移 3 %



(e)正向频率偏移 5 %



(f)负向频率偏移 5 %

图 2 采样角与误差的关系

Fig.2 The relationship between sampling angle and error

Matlab 的 M 文件如下^[5]:

```
clear;close all
fs = 12800;T = 1/fs;N = 256;
for i = 0 : 128
    R = 0;I = 0;
    for m = 1 : 256
        xn = 100*sin(2*pi*50*m*T*P+pi*i/256)+3*sin(2*
            pi*150*m*T*P)+sin(2*pi*250*m*T*P);
        R = R+xn*cos(2*pi*m/N);
        I = I+xn*sin(2*pi*m/N);end
        R = R*R;I = I*I;
        out = abs(sqrt(R+I)/128-100);
        if (i==64)
            stem(i,out,'r'),else stem(i,out,'.'),end;hold on
    end
```

其中变量 P 表示实际频率偏移的百分比。

6 结论

实践证明,控制采样角度可以在原有的硬件基础上降低测量的相对误差,提高测量精度;而且在对类正弦波进行交流采样时,测量实际效果要优于利用模数转换器的最大分辨率推导的理论最佳值,这是由于正弦波的周期性决定可以抵消部分量化误差。如果对于该结果再进行多次滑动数学平均,可以平滑误差,达到相当高的精度要求。

参考文献:

- [1] 奥本海姆·A·V. 离散时间信号处理[M]. 刘树棠,黄建国译. 第 2 版. 西安:西安交通大学出版社,2001.
- [2] 李永敏. 检测仪器电子电路[M]. 西安:西北工业大学出版社,1996.
- [3] 涂水林,张景海. 多通道多输入范围 12 位 ADC MAX 197 及其应用[J]. 电测与仪表,2001,(3):37-39.
- TU Shui-lin,ZHANG Jing-hai. Multi-range and channels 12-bit ADC MAX 197 and its application[J]. **Electrical Measurement & Instrumentation**,2001,(3):37-39.
- [4] 方俊利,朱红育. MAX 197 在多通道数据采集中的应用[J]. 电子设计应用,2004,(1):101-102.
- FANG Jun-li,ZHU Hong-yu. Application of MAX 197 in multi-channel data acquisition system[J]. **Electronic Design & Application World**,2004,(1):101-102.
- [5] 陈怀琛,吴大正. Matlab 及在电子信息课程中的应用[M]. 第 2 版. 北京:电子工业出版社,2003.

(责任编辑:李 玲)

作者简介:

黄天成(1946-),男,江苏常州人,教授,博士研究生导师,IEEE 会员,从事测控技术与系统集成的研究(E-mail: tshuang@whu.edu.cn);

张 魁(1980-),男,湖北武汉人,硕士研究生,从事智能仪器和测控技术方面研究(E-mail: zk19800419@163.com)。

Study of sine-like signal measuring in electric power equipment

HUANG Tian-shu,ZHANG Kui,REN Qing-zhen

(School of Electronics and Information,Wuhan University,Wuhan 430072,China)

Abstract: For power network parameter measuring,when the frequency departure of sine-like signal or high-order harmonic disturbance occur,fast Fourier transform is used to control the initial sampling angle for maximum precision.The proposed method improves the system precision without increasing sampling speed,which has been verified by simulation with Matlab,mathematical proving and test in a data acquisition system with MAX 197 as its A/D converter.

Key words: frequency departure; fast Fourier transform; sampling angle