

非正弦信号测量误差分析

马宏忠^{1 2} 胡虔生²

(1. 河海大学电气工程学院, 江苏 南京 210098; 2. 东南大学电气工程系, 江苏 南京 210096)

摘要 分析了非正弦信号有效值、有功功率测量中产生测量方法误差的原因及误差的大小, 建立了该误差的数学模型, 提出“最佳采样起始点”的概念, 给出了减小测量方法误差的有效措施(如选取适当的采样起始点, 合理选取采样频率等)。

关键词 非正弦信号; 测量; 误差

中图分类号: TM930.115

文献标识码: A

文章编号: 1000-198X(2001)01-0017-04

近年来, 由于电力电子技术与交流调速技术的迅速发展, 供电系统中出现了大量的非线性负载, 使电流电压波形发生了畸变。无论是对电力系统的监测还是对非线性负载本身的研究, 都需要对非正弦信号进行准确测量。传统的交流电工测量仪表大多是以正弦信号为基础的, 其测量读数不能准确地反映被测信号波形的变化, 对非正弦信号的测量将产生较大的误差(如测量矩形波信号有效值时, 仅方法误差就达 10%^[1])。数字采样测量技术的应用为电信号的测量开辟了一条新的途径。等间隔同步采样是用计算机进行周期电信号测量的常用方法, 但在实际同步采样中, 特别是在被测信号为非正弦波时, 严格的同步实际上是不存在的, 同步误差影响测量的准确性。

软件同步采样就是用软件的方法实现同步, 在工频电参量的测量中得到广泛的应用。软件同步采样测量往往也存在着同步误差。关于软件同步采样正弦信号测量的误差分析在文献[2]中已进行了讨论, 本文将对软件同步采样测量非正弦信号有效值、有功功率的方法误差进行研究。

1 测量方法误差分析

软件同步采样先测取被测信号的周期 T , 将该周期除以一个周期的采样点数 N , 得到采样间隔(采样周期) T_s 。按此间隔采样 N 点。然而在实际的测量系统中采样间隔 $T_s \neq T/N$, 从而引起同步误差(也称周期误差), 其大小为

$$\Delta T = N \times T_s - T \quad (1)$$

例如, 测试系统中常用的 MCS—51 系列单片机, 将 ALE 信号经“补丢”处理后 4 分频作微处理器的计数脉冲, 其同步误差(用弧度表示)为^[2]

$$\Delta T = \left[\left(\frac{24Nf_x}{f_{osc}} \right) \cdot \text{CINT} \left(\frac{f_{osc}}{24Nf_x} \right) - 1 \right] 2\pi \quad (2)$$

式中: CINT——四舍五入函数; f_x ——被测信号的频率; N ——采样点数, f_{osc} ——系统频率。

上述同步误差是基于非正弦信号中的基波定义的, 相对于 ν 次谐波, 同步误差定义为

$$\Delta T_\nu = \nu \cdot \Delta T \quad (3)$$

2 非正弦周期信号有效值的测量误差

2.1 误差模型

现以电流为例分析同步误差的存在对非正弦周期信号有效值的测量误差的影响。对理想化的同步采样, 设被测信号为

收稿日期: 2000-09-07

基金项目: 江苏省应用基础研究基金资助项目(BJ99009); 东南大学博士点基金资助项目。

作者简介: 马宏忠(1962—)男, 江苏如皋人, 副教授, 东南大学博士研究生, 主要从事电机电器、测量控制等方面的教学与研究工作。

$$i(t) = I_0 + \sum_{\nu=1}^{k_i} I_{\nu m} \sin(\nu \omega t) \tag{4}$$

如一周采样 N 点,并以 $T_s = 2\pi/N$ 等间隔同步采样,采样值为 $i(n)$.当采样点数符合采样定理时,可采用复化梯形积分算法求有效值(I),这样在理论上没有测量方法误差.

$$I = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i^2(n)} \tag{5}$$

实际测试系统中,设第一个采样点在基频的 a_1 点,第 N 个采样点在 $2\pi + a_2$ 点.如 $a_1 \neq a_2$,同步误差为 $\Delta T = a_2 - a_1$,则实际采样间隔为

$$T'_s = \frac{2\pi + (a_2 - a_1)}{N} = \frac{2\pi + \Delta T}{N} \tag{6}$$

采样值 $i'(n)$ 按式(5)的形式计算,其结果 I' 代替被测信号的有效值 I ,测量方法误差的相对值(简称测量方法误差)为

$$r = \frac{I' - I}{I} \times 100\% = \left(\frac{I'}{I} - 1 \right) \times 100\% = \left\{ \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left[I_0 + \sum_{\nu=1}^{k_i} I_{\nu m} \sin(\nu T'_s n + \nu \alpha_1) \right]^2} - 1 \right\} \times 100\% \tag{7}$$

2.2 分析

2.2.1 采样起始点的影响

从图 1 仿真曲线可知,当同步误差不为零时,采样起始点位置对非正弦信号有效值的测量具有很大的影响.一般信号均具有自己的“最佳采样起始点”,实际采样起始点越接近“最佳采样起始点”,测量误差越小.被测信号的波形对有效值测量方法的误差也有较大的影响,波形不同,“最佳采样起始点”也不尽相同.正弦波信号的“最佳采样起始点”在 45° 左右,三角波的“最佳采样起始点”在 52° 左右.

2.2.2 采样点数对测量精度的影响

采样点数对非正弦信号测量精度的影响包括两个方面 (a)由式(2)可见,采样点数的变化会影响同步误差的大小.一般情况下,采样点数增加,同步误差呈振荡状态,且有增大的趋势,而测量方法误差与同步误差成比例变化(与传统观点不尽相同,应引起重视).当采样点数大到一定程度,因采样间隔减小,可以使实际同步误差不大于采样间隔 T_s ,这样采样点数进一步增加,同步误差又趋于减小(最大同步误差在图 2 中 $T_s \sim -T_s$ 曲线之内).(b)一周采样点数增加,使系统对高次谐波的测量误差有所减小,有助于提高非正弦信号的测量精度.对一般被测信号而言,上述两方面的影响中,前者占主要方面.

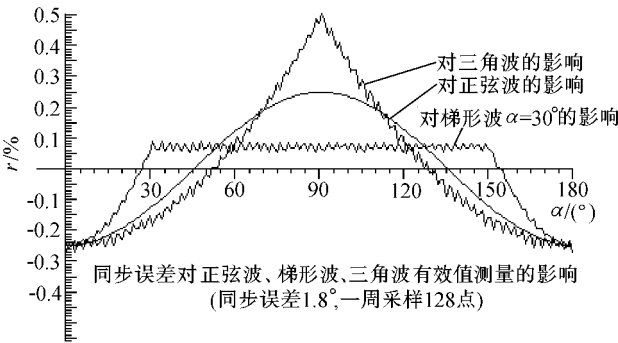


图 1 采样起始点对不同波形的有效值测量误差的影响

Fig.1 Relation between testing errors of RMS and the first sampling point

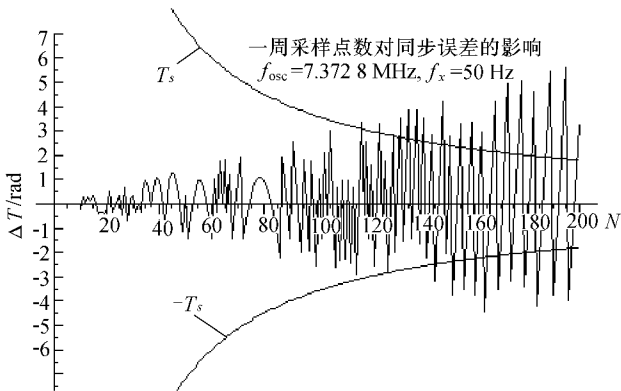


图 2 一周采样点数对同步误差的影响

Fig.2 Relation between synchronous errors and the number of sampling points

2.2.3 被测信号频率波动的影响

被测信号的频率往往有一定波动(如工频信号一般在 $49.5 \sim 50.5$ Hz 范围内变化).解决波动影响的方法之一是使采样频率跟踪变化,这往往不能满足测量要求,必须考虑其影响.图 3 分别为正弦波与三角波信号

频率在49 ~ 51 Hz 内波动时的测量误差(其它波形结合图 1 可类似分析). 可见 , 频率波动 , 非正弦信号有效值的测量误差相差较大 , 但“ 最佳采样起始点 ”基本不变 , 在“ 最佳采样起始点 ”附近 , 误差均很小 . 所以 , 如果在“ 最佳采样起始点 ”附近采样 , 可不必不断地调整采样频率 .

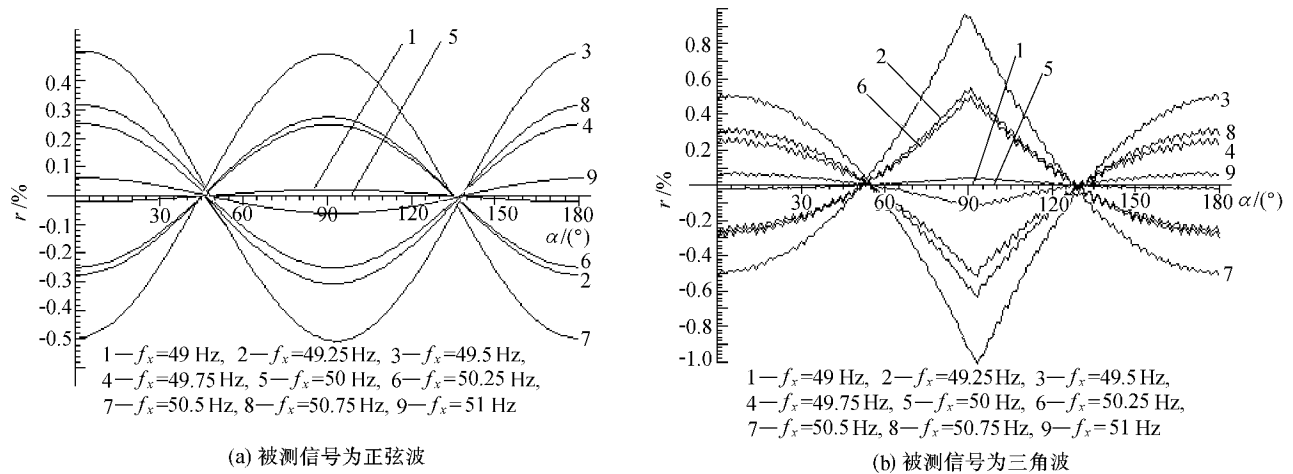


图 3 被测信号频率波动对有效值测量误差的影响

Fig.3 Relation between testing errors of RMS and the frequency of tested signal

3 非正弦系统有功功率测量误差

3.1 误差模型

在实际的电力系统中 , 电压波形畸变一般较小 , 所以设被测电压和电流信号分别为

电压
$$u(t) = U_{1m} \sin \omega t \tag{8}$$

电流
$$i(t) = \sum_{\nu=1}^k I_{\nu m} \sin(\nu \omega t - \beta_\nu) \tag{9}$$

类似地 , 若一周采样 N 点 , 实际采样间隔 $T'_s = (2\pi + \Delta T)/N$, 其采样值为 $u'(n)$ 和 $i'(n)$. 同理 ΔT 一般很小 , 按照复化梯形积分的形式计算 :

$$P' = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} u'(n) \cdot i'(n) = \frac{1}{N} \left[U_{1m} \sin(T'_s n + \alpha_1) \cdot \sum_{\nu=1}^{k_i} I_{\nu m} \sin(\nu T'_s n + \nu \alpha_1 - \beta_\nu) \right] \tag{10}$$

用 P' 值代替有功功率 P , 其测量方法误差的相对值(简称相对误差) 为

$$r_P = \frac{(P' - P)}{P} \times 100\% = \left(\frac{P'}{P} - 1 \right) \times 100\% = \left\{ \frac{\sum_{n=0}^{N-1} \left[U_{1m} \sin(T'_s n + \alpha_1) \cdot \sum_{\nu=1}^{k_i} I_{\nu m} \sin(\nu T'_s n + \nu \alpha_1 - \beta_\nu) \right]}{\sum_{n=0}^{N-1} \left[U_{1m} \sin(T_s n + \alpha_1) \cdot \sum_{\nu=1}^{k_i} I_{\nu m} \sin(\nu T_s n + \nu \alpha_1 - \beta_\nu) \right]} - 1 \right\} \times 100\% \tag{11}$$

3.2 分析

被测信号波形、采样起始点位置、采样频率等对非正弦信号有功功率测量方法误差均有影响 , 其讨论方法与其对有效值的影响类似 , 这里主要讨论功率因数对功率测量方法误差的影响 . 图 4 表示被测信号的功率因数对有功功率测量误差的影响 , 其横坐标为等效功率因数角^[3] . 被测系统功率因数越低 , 功率测量的相对误差越大 . 特别是当功率因数角大于 60° 后 , 功率测量误差随功率因数角的增大而急剧增加 . 此外 , 从图 4 还可以看到功率因数对“ 最佳采样起始点 ”的影响 , 可以通过计算得到功率因数角 φ 不为零时 , “ 最佳采样起始点 ”将后移(增加) $\varphi/2$ 角 . 所以根据被测系统的功率因数选择合适的采样起始点 , 对减小有功功率的测量误差是有益的 .

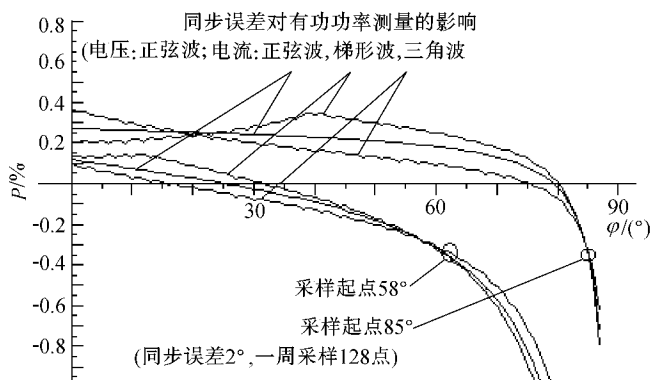


图4 被测信号功率因数对有功功率测量精度的影响

Fig.4 Relation between testing errors of active power and power factors

4 结 论

关于非正弦信号有效值的测量:被测信号的波形、同步误差的大小、采样起始点位置、一周采样点数、频率的波动等都影响非正弦信号有效值测量的准确性.选择合适的采样点数和合适的采样起始点位置是减小非正弦信号有效值测量方法误差的有效措施.当频率波动时,如在“最佳采样起始点”附近采样,可不必不断地调整采样频率.

非正弦周期信号有功功率的测量误差除与信号的波形、采样起始点位置、采样点数等有关外,功率因数对测量方法误差也有相当大的影响,被测系统功率因数越低,测量误差越大.通过调整采样起始点位置,可以减小其对功率测量方法误差的影响.

参考文献:

- [1] 王凤翔. 交流电机的非正弦供电[M]. 北京:机械工业出版社, 1997. 421 ~ 438.
- [2] 马宏忠, 胡虔生. 软件同步采样误差分析[J]. 电工技术学报, 1996, 11(2): 43 ~ 47.
- [3] 陆廷信. 供电系统中的谐波分量测量与抑制[M]. 北京:机械工业出版社, 1990. 1 ~ 45.
- [4] Ferrero A. Definitions of electrical quantities commonly used in non-sinusoidal condition[J]. ETEP, 1998, 8(4): 235 ~ 240.

Analysis on Error in the Measurement of Non-sinusoidal Signals

MA Hong-zhong^{1,2}, HU Qian-sheng²

(1. College of Electrical Engineering, Hohai Univ., Nanjing 210098, China;
2. Department of Electrical Engineering, Southeast Univ., Nanjing 210096, China)

Abstract: This paper analyses the cause of error in the measurement of RMS and active power in non-sinusoidal periodic signals and the magnitude of the error, and establishes mathematical models. The concept of “optimal first sampling point” is proposed, and some methods for reducing the error are introduced in this paper, such as proper selection of the first sample point.

Key words: non-sinusoidal signals; measurement; error