

一种新型计算机电源谐波检测分析系统设计

曲晓蕾, 应群民*

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:为实现计算机电源谐波精确检测和分析,引入基于重新定位采样序列同步化的谐波分析算法,设计了一种新型谐波检测与分析系统。开展了新型谐波检测与分析系统的应用领域、工作原理以及结构的分析。为提高数据处理效率,运用线性重新定位采样序列的同步化方法以减小泄漏误差,并采用了实数序列的快速傅里叶变换分析谐波频谱。搭建了一台新型谐波检测与分析系统以进行实验研究。实验结果表明,该系统能够精确地检测和分析计算机电源谐波,具有较高的数据处理效率,在实际应用中运行稳定、可靠,为计算机电源谐波补偿提供了数据参考。

关键词:计算机电源;谐波检测分析;傅里叶变换;重新定位采样序列同步化

中图分类号: TM935.21

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)09-1157-04

Design of a harmonic detecting and analyzing system for computer power

QU Xiao-lei, YING Qun-min

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to detect and analyze the harmonic of computer power accurately, a harmonic-analyzing method based on the synchronizing-method of re-locating the sampling-sequence was introduced, a new harmonic detecting and analyzing system was designed. The application field, principle and contracture of the system were investigated. For the sake of improving the efficiency of data-processing, the linear synchronizing method of re-locating the sampling sequence was applied to reduce leakage-error and the real-sequence fast fourier transform was applied to analyze the frequency spectrum of the harmonic. A new detecting and analyzing system was established for experimental study. The experimental results show that this system working stably and reliably and processes data efficiently in practical application, it can detect and analyze the harmonic of computer power exactly, which provides reference data for harmonic compensation of computer power effectively.

Key words: computer power; harmonic detection and analysis; Fourier transform; synchronizing method of re-locating the sampling-sequence

0 引言

计算机系统采用开关模式电源,其仅在交流正弦波电压的峰值处产生高振幅短脉冲电流,因而产生大量谐波。该谐波向后传播回到电力系统,造成电力系统的污染,特别是计算机大规模使用的场所谐波污染更为严重。某些计算机房和商业大楼的计算机群中性线中某些地方电流达到火线电流的 1.7 倍^[1]。因此,对该场所计算机电源的谐波补偿刻不容缓,而补偿的关键就在于谐波的检测与分析,可以从时域、频域进行谐波的检测分析。频域谐波检测分析主要是指采用陷

波滤波器^[2]或带通滤波器^[3],该检测方法的突出优点是系统品质因数较理想,但是其参数受环境影响较大,检测精度难以保证。时域谐波检测目前主要采用傅里叶变换法、小波分析法^[4-5]、信号空间矩阵分析法^[6]、谱估计法^[7]、基于瞬时无功率理论方法和机器学习方法^[8]等,在实际应用中一般将两种或两种以上方法结合已获得更准确的检测效果^[9-11]。其中,应用最为广泛的是傅里叶变换法,采用加窗算法降低该方法产生的频谱泄漏误差。但是傅里叶变换计算占用资源多、运算速度较慢,而且通常频谱分析要求窗函数主瓣窄、旁瓣低且跌落速度快,而对于同一个窗函数很难同

收稿日期:2011-01-10

作者简介:曲晓蕾(1985-),女,山东莱州人,主要从事谐波补偿方面的研究。E-mail: qxl-Queene@163.com

通信联系人:应群民,男,副教授,硕士生导师。E-mail: ying_qm@163.com

时满足要求。

本研究用上、下位机结合的方法,充分利用上位机编程简单、资源丰富和人机交互的特点,提高信号检测分析的精度、系统的可操作性及界面友好性。利用采样数据的实序列特点,降低傅里叶变换算法的计算量。该系统引入一种重新定位采样序列的二次同步化方法^[12]代替传统的窗函数,通过对采样序列的插值算法,使处理后的数据逼近理想化,最大限度地减小频谱泄漏误差。

1 傅里叶变换检测原理

对于离散序列的傅里叶变换,通常采用一种快速的计算方法,即快速傅里叶变换(FFT)。FFT大大减少了离散傅里叶变换的运算量。

假设序列 $x(n)$ 的离散傅里叶变换为:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) W_N^{nk} \quad k = 0, 1, \dots, N - 1 \quad (1)$$

本研究将 $x(n)$ 按序分为奇数组和偶数组,则其对应的傅里叶变换可以写成:

$$X(k) = X_1(k) + W_N^k X_2(k) \quad k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1 \quad (2)$$

其中:

$$X_1(k) = \sum_{n=0}^{N/2-1} x_1(2n) W_{N/2}^{nk} ,$$
$$X_2(k) = W_N^k \sum_{n=0}^{N/2-1} x_2(2n + 1) W_{N/2}^{nk} .$$

权系数具有周期性和对称性,即:

$$W_{N/2}^{n(k+N/2)} = W_{N/2}^{nk} , W_N^{(k+N/2)} = - W_N^k$$

因此:

$$X(k + \frac{N}{2}) = X_1(k) - W_N^k X_2(k) \quad k = 0, 1, \dots, \frac{N}{2} - 1 \quad (3)$$

由此可见,一个 N 点的傅里叶变换可以分解为两个 $N/2$ 点的傅里叶变换。依此类推,当 N 为 2 整数次幂时,最后可化简为一系列 2 点的傅里叶变换运算。

2 二次同步化采样序列

理论上 FFT 是针对完全同步采样条件下的算法,但是对于电力信号的完全同步采样是不可能实现的。非同步化的采样相当于对信号乘以一个矩形窗截断,在时域参量测量中引起截断误差。而在时域相乘相当于在频域卷积,因此在频域中表现为频谱泄漏。频谱泄漏不但会产生虚假的频率分量,而且各频率之间的

泄漏影响信号幅度谱的研究精度。

为了降低频谱泄漏误差,提高 FFT 精度,克服窗函数自身缺点,本研究采用重新定位采样序列法对采样序列进行二次修正,以达到同步化的效果。

假设实际采样序列和理想采样序列分别为:

$$x_1(k), k = 0, 1, 2 \dots M - 1$$

$$x_2(i), i = 0, 1, 2 \dots N - 1$$

其中,实际采样序列应至少包含一个完整周期,理想采样序列恰好包含整数信号周期。本研究利用搜索法判断 $x_1(k)$ 两个相邻同趋势过零点 $x_1(k_1)$ 和 $x_1(k_2)$, 则理想信号周期为:

$$T = [k_2 - k_1 + \frac{x_1(k_1 + 1)}{x_1(k_1 + 1) - x_1(k_1)} - \frac{x_1(k_2 + 1)}{x_1(k_2 + 1) - x_1(k_2)}] T_s \quad (4)$$

式中: T_s —实际采样周期。

本研究根据系统分析要求确定二次采样点数,从而获得理想采样周期 T_{si} 。利用插值法确定理想采样序列的起始点 $x_2(0)$ 得到 $x_1(k_1)$ 与 $x_2(0)$ 之间的时间差 t_{p1} 。假设 $x_2(i)$ 介于 $x_1(k_i)$ 和 $x_1(k_i + 1)$ 之间,则:

$$k_i = \text{INT} \left[\frac{i T_{si} + t_{p1}}{T_s} \right] \quad i = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (5)$$

式中: INT[] —取整算子。

利用线性插值,得到线性同步化理想采样序列:

$$x_2(i) = (1 - \alpha_i) x_1(k_i) + \alpha_i x_1(k_i + 1) ,$$
$$i = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (6)$$

本研究利用二阶抛物插值,得到二阶同步化理想采样序列:

$$x_2(i) = \frac{1}{2}(\alpha_i - 2)(\alpha_i - 1)x(k_i) - \alpha_i(\alpha_i - 2)x(k_i + 1) + \frac{1}{2}\alpha_i(\alpha_i - 1)x(k_i + 2)$$
$$i = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (7)$$

本研究利用三次拉格朗日插值,得到三阶同步化理想采样序列:

$$x_2(i) = -\frac{1}{6}(\alpha_i - 1)(\alpha_i - 2)(\alpha_i - 3)x_1(k_i) + \frac{1}{2}\alpha_i(\alpha_i - 2)(\alpha_i - 3)x_1(k_i + 1) - \frac{1}{2}\alpha_i(\alpha_i - 1)(\alpha_i - 3)x_1(k_i + 2) + \frac{1}{6}\alpha_i(\alpha_i - 1)(\alpha_i - 2)x_1(k_i + 3)$$
$$i = 0, 1, 2, \dots, N - 1 \quad (8)$$

式(6~8)中:

$$\alpha_i = \frac{i T_{si} + t_{p1}}{T_s} - k_i$$

值得注意的是,本研究采用二阶抛物线插值和三次拉格朗日插值算法公式的时候,实际的非同步采样数据的长度必须超出一个信号周期,一般再加上3个或4个采样点以上才能满足相应的公式要求。

3 系统设计及结果分析

利用傅里叶变换分析谐波,需要进行整周期采样。并且所采用的重新定位采样序列同步化谐波分析算法计算量比较大,对处理器的要求相对较高,本研究针对以上特点设计的谐波检测分析系统如图1所示。

该谐波检测分析系统主要有两部分构成:一部分是以下位机为核心的电压、电流取样系统;一部分是上位机实现的数据处理系统。

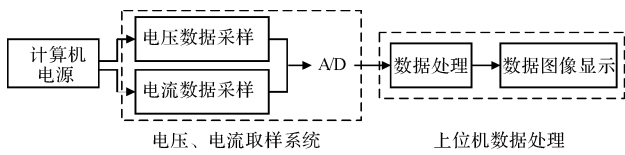


图1 谐波检测系统框图

3.1 系统硬件设计

电压、电流数据采集系统分为数据采集以及上位机通信两部分。本研究运用电阻分压法获得电压模拟量,利用CSM025NPT的霍尔传感器获得电流模拟量。电压、电流模拟量信号经过由3个OPA2277P构成的信号预处理系统,该预处理系统既有信号缓冲作用又有隔离功能。MAX125CEAX高速多通道A/D转换器将模拟量转化为14位数字量后存入512KB的RAM中。该系统的MCU采用ATMega128,系统结构框图如图2所示,由MAX232为核心构成UART接口电路,实现上位机与下位机之间的非即时通信。

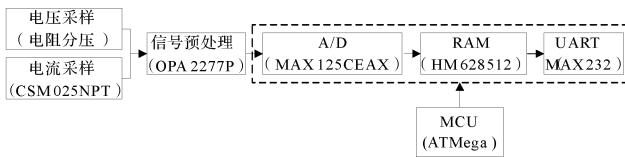


图2 电压、电流采集系统结构框图

3.2 软件设计

上位机软件部分主要分为控制采样及数据处理和图像显示两个部分。该系统通过菜单和对话框获得用户需要的采样频率、采样帧数,波特率等参数,向单片机发送控制指令并且接受单片机传送过来的数据,对数据进行傅里叶分析。虽然采样系统在采样过程中可以提供足够高的采样频率,但是采样频率与待测信号基波频率之间的整数倍关系很难满足,并且由于采样

本身带来的截断误差,使得该非同步化采样带来的频谱泄漏成为必然。因此,采用重新定位法二次同步化处理使得处理后的数据序列接近理想同步采样序列。理想采样序列为实序列,所以其FFT变换 $X(n)$ 是实部偶对称虚部奇对称的复数。利用复序列FFT算法的前 $(N/4)+1$ 个复数蝶形,可以节省大约一半的运算量和存储量。

该系统可以根据用户需求显示实际采样电压、电流曲线或列表,也可以显示采样电压电流的幅值特性和频率特性。

3.3 检测结果及分析:

3.3.1 线性、2阶、3阶同步化谐波分析比较

采样序列在进行二次同步化处理过程中,分别采用线性插值、2阶抛物线插值和3次拉格朗日插值进行计算,即分别得到线性、2阶、3阶同步化谐波分析结果,其13次谐波以下电流幅值如表1所示。

表1 13次以下电流谐波幅值(单位:A)

	线性同步化 谐波分析	2阶同步化 谐波分析	3阶同步化 谐波分析
直流	0.119 781 712	0.119 757	0.119 741
基波	0.412 431 644	0.412 35	0.412 347
2次谐波	0.036 156 952	0.036 172	0.036 152
3次谐波	0.203 838 05	0.203 865	0.203 896
4次谐波	0.011 820 172	0.011 833	0.011 87
5次谐波	0.080 817 352	0.080 781	0.080 734
6次谐波	0.005 751 879	0.005 759	0.005 751
7次谐波	0.011 107 446	0.011 109	0.011 097
8次谐波	0.001 614 545	0.001 59	0.001 622
9次谐波	0.024 133 774	0.024 25	0.024 306
10次谐波	0.002 440 148	0.002 442	0.002 433
11次谐波	0.011 592 078	0.011 609	0.011 579
12次谐波	0.001 674 552	0.001 675	0.001 662
13次谐波	0.009 591 333	0.009 535	0.009 465

根据式(6~8)可知,3次拉格朗日插值算法的精度高于2阶抛物线插值和线性插值算法,利用三次拉格朗日插值算法同步化后分析获得的谐波幅值特性更接近于真实值。以3阶同步化谐波分析结果为标准,计算线性和2阶同步化谐波分析结果相对误差如表2所示。

可见,线性和2阶同步化谐波分析的相对误差绝大部分都在1%之下,精度满足用户需求。比较式(6~8),3次拉格朗日插值的计算量和资源需求量远远大于线性插值和2阶抛物线插值。综合考虑,该系统采用线性重新定位采样序列同步化谐波分析算法,在保证检测分析精度的基础上,大大降低了计算量和对系统大资源的需求,提高了数据处理效率。

表 2 相对误差(单位:%)

	线性同步化谐波分析	2 阶同步化谐波分析
直流	0.034	0.013 362
基波	0.020 527	0.000 728
2 次谐波	0.013 698	0.055 322
3 次谐波	-0.028 42	-0.015 2
4 次谐波	-0.419 78	-0.311 71
5 次谐波	0.103 243	0.058 216
6 次谐波	0.015 284	0.139 106
7 次谐波	0.094 134	0.108 137
8 次谐波	-0.459 62	-1.972 87
9 次谐波	-0.708 57	-0.230 4
10 次谐波	0.293 794	0.369 914
11 次谐波	0.112 946	0.259 09
12 次谐波	0.755 235	0.782 19
13 次谐波	1.334 739	0.739 567

3.3.2 系统分析结果分析

本研究利用以上讨论的计算机谐波检测分析系统测量一台电脑运行时的计算机电源,设置采样频率为 10 kHz,采样 100 帧,其电压、电流曲线如图 3 所示。

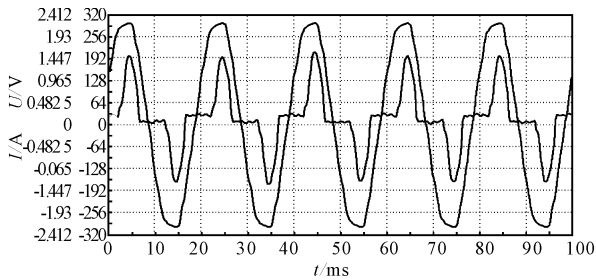


图 3 负载电压电流曲线

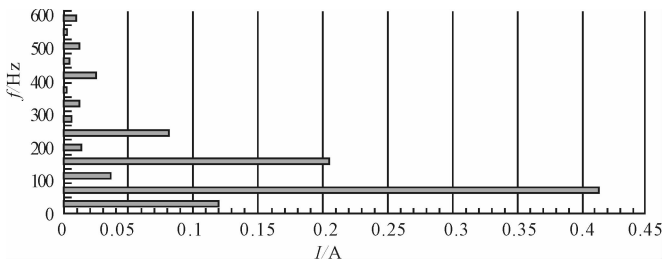


图 4 同步化负载傅里叶变换结果图

从图 3 中发现,电脑运行时计算机电源电流存在严重失真,由此可见对计算机电源谐波的检测和分析是十分必要的。对以上计算机电源电流进行谐波分析可获得 3 000 Hz 以下任意频率频谱特性,现截取前 13 次以下谐波频谱,如图 4 所示。

由图 4 可清晰看到,计算机电源电流畸变严重,电流中主要含有 3 次、5 次、9 次等奇数次谐波。计算机电源是一种开关电源主要产生奇数次谐波,该原理分析结果与本系统描绘的谐波结果非常吻合,说明本研究指出的计算机谐波检测与分析系统方案能够精确地

检测和分析计算机电源谐波,

4 结束语

该计算机谐波检测分析系统利用上、下位机结合的方法准确地实现了对电流、电压时域和频域的检测和分析,系统结构简单、界面友好,使用更为灵活。信号检测过程中,上位机首先运用重新定位法对采样数据进行同步化处理大大减小了频谱泄漏误差,然后利用采样数据的实数列特点降低 FFT 过程计算量。在满足分析精度的前提下采用线性同步化算法,既减小了计算量又节省了系统资源提高了数据处理效率。经过反复测试,该系统可以可靠工作,可以为计算机电源谐波补偿提供可靠数据,从而降低由此带来的电力系统谐波污染。

参考文献 (References):

- [1] 房庆山. 浅析谐波对计算机、家用电器和低压电器的影响 [J]. 机电信息, 2010(12): 208.
- [2] JOHANSSON T A, WHITE P R. Instantaneous frequency estimation at low signal-to-noise ratios using time-varying notch filters [J]. *Signal Processing*, 2008, 88(5): 1271-1288.
- [3] 王 艳,张艳霞,唐俊刺,等. 电力系统广域测量中多采样率转换的研究[J]. 电力系统, 2010, 43(1): 34-38.
- [4] 刘平英,刘国海. 基于小波包变换的电力系统谐波分析 [J]. 微计算信息, 2008, 24(4): 276-278.
- [5] CHEN Yu. Harmonic Detection in Electric Power System Based on Wavelet Multi-resolution Analysis [C] // Proceedings of 2008 International Conference on Computer Science and Software Engineering. Portugal: [s. n.], 2004: 1207.
- [6] 程 肖,周剑雄,付 强,等. 基于数据矩阵奇异值分解的免配对二位谐波信号参数估计[J]. 信号处理, 2010, 26(6): 904-910.
- [7] 韩松柏. 基于功率谱的电力系统谐波与间谐波的检测研究[D]. 重庆:重庆大学电气工程学院, 2007.
- [8] CHANG G W, CHEN C, TENG Yu-feng. Radial-basis-function-based neural network for harmonic detection [J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, 57(6): 2171-2179.
- [9] 姚 颖,陈 锐,孙连跃. 基于 TLS-ESPRIT 和 PRONY 算法的间谐波分析[J]. 电工技术, 2010(5): 5-7.
- [10] 初宪武. 基于 TLS-ESPRIT 算法和自适应神经网络的间谐波分析[J]. 电工电能新技术, 2010, 29(2): 17-20.
- [11] 刘 芳,陈君诚,韩 璐,等. 基于小波变换和快速傅里叶变换的电网谐波分析[J]. 通信电源技术, 2009, 26(4): 17-19.
- [12] 陈隆道,钱照明,张圣训. 周期域分析中非同步采样数据的同步化[J]. 电子学报, 2001, 29(2): 1-7.

[编辑:李 辉]