

电能计量误差分析软件设计与实现

谢 鹏¹, 周青山², 汪 毅¹, 向铁元¹

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072;

2. 湖北省电力勘测设计院, 湖北 武汉 430024)

摘要: 分析了畸变波形下感应式电能表和全电子式电能表的计量误差, 引入 BP 神经网络建立电能表计量误差数学模型。用 VC++.net 开发了谐波电能计量误差分析软件, 并应用多线程技术, 把神经网络模块和计算模块等放在主线程中实现, 而把数据采集模块放在后台工作线程中。采用加汉宁窗和插值改进的傅里叶变换, 分析各次谐波电流和电压的幅值、相位。该软件可实现手工输入数据计算, 也可配合数据采集系统实时计算出各次谐波对电能计量装置的计量误差和总计量误差。该软件已投入实际运行且情况良好。

关键词: BP 神经网络; 谐波; 电能计量误差; 改进 FFT

中图分类号: TM 930.115

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2006)01-0076-03

0 引言

近年来, 随着直流输电和柔性技术的应用, 电气化铁路的快速发展, 化工、冶金、煤炭等工业部门大量应用电力电子等设备, 电网谐波含量大大增加, 电网波形畸变越来越严重。

电能计量是发电企业、输配电企业和电力用户之间进行经济结算的依据, 它的准确性与合理性直接影响三者的利益。目前, 供电部门采用的电能计量装置是感应式电能表和全电子式电能表。感应式电能表只在工频附近很窄的频率范围内且电压、电流为正弦波的条件才有很好的工作性能, 可以认为计量的就是实际电能, 而当计量点存在谐波时, 感应式电能表既不能准确计量总的畸变电能, 亦不能准确反映其中的基波电能。按照电能计量只计量基波的观点, 感应式电能表会多计量线性负荷的电量, 少计量非线性负荷的电量。全电子式电能表在畸变波形下亦存在较大的计量误差。因此, 若仍然将电能表指示值作为用户的基波电量, 在理论上是不合理的。

1 谐波对电能表计量影响的数学模型

1.1 畸变波形下感应式电能表的计量误差

通过对畸变波形下感应式电能表计量误差的理论分析, 得到以下误差的主要规律^[1-5]。

a. 影响电能表计量的主要因素是各次谐波电压、电流的含量及谐波功角和基波功角。

b. 不同次谐波的相互影响很小, 可忽略不计, 总误差可近似为各次谐波产生误差的线性叠加。畸变波形下感应式电能表的计量误差 $e\%$ 可近似为

$$e\% = \sum_{h>1} e_h\% = \frac{\sum_{h>1} U_h I_h f_h(\varphi_h)}{U_1 I_1 \cos \varphi_1} \times 100\% \quad (1)$$

式中 U_1 和 I_1 分别为基波电压和基波电流的有效值; U_h 和 I_h 分别为 h 次谐波电压和电流的有效值; φ_1 和 φ_h 分别为基波和 h 次谐波的功角; $f_h(\varphi_h)$ 是受很多因素影响的关于 φ_h 的强非线性函数; $e_h\%$ 表示当基波仅叠加 h 次谐波时电能表的误差。

1.2 畸变波形下全电子式电能表的计量误差

根据理论分析, 在时间 t 内, 畸变波形下全电子式电能表反映的电能量可表示为^[1,4-6]

$$E_h = [U_1 I_1 \cos \varphi_1 + \sum_{h>1} U_h I_h \cos(\varphi_h + \lambda_h)] t \quad (2)$$

λ_h 为全电子式电能表谐波功角偏移, 其产生原因是全电子式电能表的输入器件使不同频率信号成分产生的相移不同, 从而致使在 50Hz 引入的相位补偿, 不能补偿其他频率的相位移。

在时间 t 内, 基波条件下全电子式电能表反映的电能量 E_1 可表示为

$$E_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 t \quad (3)$$

由式(2)(3)可得畸变波形下全电子式电能表的误差 $e\%$ 为

$$e\% = \frac{E_h - E_1}{E_1} \times 100\% = \frac{\sum_{h>1} U_h I_h \cos(\varphi_h + \lambda_h)}{U_1 I_1 \cos \varphi_1} \times 100\% \quad (4)$$

考虑实际中的 λ_h 很难通过测量或计算得到, 故畸变波形下全电子式电能表的计量误差也可用式(1)表示。这时, 式(1)中 $f_h(\varphi_h)$ 受全电子式电能表谐波功角偏移等因素影响, 是关于 φ_h 的强非线性函数。

这样, 用式(1)可分析谐波对电能计量装置(包括感应式和全电子式电能表)计量误差的影响。

由前面的分析可见, 畸变波形下电能计量装置计量误差关系式中 $f_h(\varphi_h)$ 是关于 φ_h 的强非线性函数,

因而 $f_h(\varphi_h)$ 的求取成为关键问题。由于 BP 神经网络能够逼近任意复杂的非线性函数,可引入 BP 神经网络理论对畸变波形下电能表计量误差建模。

2 软件的实现

2.1 软件总体结构

软件用 VC++.net 编写,采用 MS ACCESS 2000 数据库。软件部分由 1 个主模块和 8 个子模块组成。主模块完成软件执行的选择控制功能;子模块由主模块调用,每个子模块完成 1 个特定功能。8 个子模块分别为:数据采集模块、神经网络模块、计算模块、数据库模块、报表模块、曲线生成模块、用户管理模块、帮助模块。软件主程序流程图如图 1 所示。

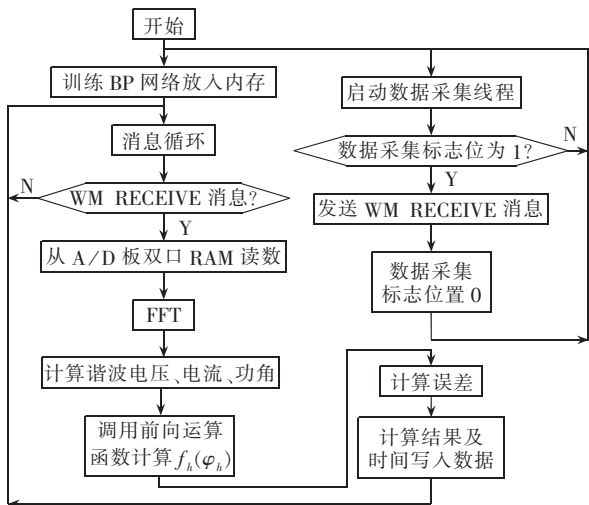


图 1 主程序流程图

Fig.1 Flowchart of main program

2.2 多线程技术应用

为实现谐波电能计量误差分析软件各模块功能,本文把神经网络模块和计算模块等放在主线程中实现,而把数据采集模块放在后台工作线程中,因为数据采集工作是长年累月进行着,如果放在主线程中,必然导致程序无暇响应用户的操作信号。本文在程序中创建了数据采集工作线程,该线程在用户启动系统时创建,并循环往复地工作,直到退出程序。

Windows 下的程序是消息驱动的,程序的各种功能实际上是对不同消息的响应,Windows 允许用户使用自定义消息,通过对自定义消息的处理实现一些特殊操作。

程序开始工作以后,启动数据采集工作线程,主线程进入消息循环,并通过消息和事件 2 种方式和工作线程通信。当数据采集卡完成 1 个周期采样时,采集到的数据被送到采集卡双口 RAM 中,同时双口 RAM 中数据采集标志位置 1,数据采集工作线程采用循环查询方式,当查询到数据采集标志位为 1 时,向主线程发送 WM_RECEIVE 消息。主线程在接收到 WM_RECEIVE 消息后,从数据采集卡双口 RAM 读数据,然后进行相应的计算处理。

2.3 基于 BP 神经网络的应用

BP 神经网络是一种单向传播的多层前向网络,可以实现从输入到输出的任意的非线性映射。在选定 BP 神经网络结构之后,可利用输入、输出样本对网络的权值和偏置值进行学习和调整,以使网络实现给定的输入、输出映射关系^[7]。通常,3 层 BP 神经网络可以实现对任意复杂函数的逼近,本文选用 3 层 BP 神经网络建立谐波电能计量误差数学模型。

为了获取样本数据,进行了如下试验:在基波上单独叠加 h 次谐波,给定 $U_1, I_1, U_h, I_h, \cos \varphi_1$, 改变 φ_h , 测得 $e_h \%$, 谐波次数从 2~25 次。再将样本数据归一化处理,这样可以取较小的数作为网络的连接权,避免计算溢出。然后,对神经网络学习训练,确定网络参数。这样就可由给定的输入向量经过前向运算,得到网络的输出向量。

为考虑不同次谐波对电能计量装置的影响,对每次谐波采用不同的神经网络(感应式和全电子式电能表各 24 个)分别训练建模。

2.4 改进 FFT 的应用

本软件有手工和数据采集 2 种工作模式。在手工模式下,要手工输入基波和各次谐波的电流、电压和功角值。在数据采集模式下,则从现场采集信号,经过信号调理、A/D 转换后,用快速傅里叶变换(FFT)分析数据得到各次谐波的电压、电流和功角,然后进行计算。

由于被测信号中还含有非整数次谐波,难以实现严格的同步采样,使用传统的 FFT 在频谱分析时产生泄漏误差,难以获得高精度的谐波测量结果。采用加汉宁窗减小信号负频分量引入的长范围泄漏,用插值的方法减小窗形损失引入的短范围泄漏^[8-10]。

汉宁窗函数为

$$\omega(n) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{2n}{N-1} \pi\right) \quad n=0, 1, \dots, N-1$$

加汉宁窗后的 FFT 为

$$X_\omega(k) = \frac{1}{2} X(k) - \frac{1}{4} X(k-1) - \frac{1}{4} X(k+1)$$

当 $|X_\omega(k_0+1)| \geq |X_\omega(k_0-1)|$ 时,

$$d_0 = \frac{2|X_\omega(k_0+1)| - |X_\omega(k_0)|}{|X_\omega(k_0+1)| + |X_\omega(k_0)|}$$

当 $|X_\omega(k_0+1)| < |X_\omega(k_0-1)|$ 时,

$$d_0 = \frac{|X_\omega(k_0)| - 2|X_\omega(k_0-1)|}{|X_\omega(k_0)| + |X_\omega(k_0-1)|}$$

式中 $k_0 = [f_0 / \Delta f]$, f_0 为第 i 次谐波的频率, Δf 为频率分辨率。

第 i 次谐波幅值为

$$A_i = \frac{2\pi d_0 (1 - d_0^2) |X_\omega(k_0)|}{\sin(d_0 \pi)}$$

第 i 次谐波相角为

$$\Phi_i = \text{phase}[X_\omega(k_0)] - d_0 \pi + \pi / 2$$

3 算例

从某牵引站馈送电气化铁路线路电压互感器(TV)和电流互感器(TA)二次侧采样信号,经 FFT 得到各次谐波实测数据如表 1 所示,且电能表的基本误差为 0.5 %。

表 1 某牵引站实测数据
Tab.1 The measured data of a traction substation

<i>h</i>	<i>U_h/V</i>	<i>I_h/A</i>	<i>φ_h/(°)</i>	<i>h</i>	<i>U_h/V</i>	<i>I_h/A</i>	<i>φ_h/(°)</i>
1	100.000	5.000	120	5	0.635	0.484	123
2	0.063	0.040	118	6	0.037	0.008	125
3	0.832	0.910	119	7	0.544	0.180	117
4	0.023	0.009	121	8	0.020	0.007	125

将表中数据输入软件进行计算,可得该线路感应式电能表的计量总误差为 -0.745 7 %。若该厂的月用电量为 3 000×10⁴ kW·h,电费为 0.5 元/kW·h 计算,则每月损失电费为 3 000×0.745 7×0.5/100=11.185 5×10⁴(元)。即该厂每月就使电力部门的经济损失达 11.185 5×10⁴ 元。

从某纺织厂(用到大量电动机,可视为线性用户)线路 TV 和 TA 二次侧采样信号,经 FFT 得到各次谐波实测数据如表 2 所示,电能表的基本误差为 0.5 %。

可得全电子式电能表计量总误差为 0.524 6 %。如果以该厂的月用电量为 1 000×10⁴ kW·h,电费为 0.5 元/kW·h 计算,则该厂每月多支出的电费即为 1 000×0.524 6×0.5/100=2.623×10⁴(元)。

表 2 某纺织厂测量数据
Tab.2 The measured data of a textile mill

<i>h</i>	<i>U_h/V</i>	<i>I_h/A</i>	<i>φ_h/(°)</i>	<i>h</i>	<i>U_h/V</i>	<i>I_h/A</i>	<i>φ_h/(°)</i>
1	100.00	5.00	35	5	0.38	0.332	33
2	0.04	0.02	37	6	0.05	0.006	33
3	0.31	0.10	36	7	0.27	0.150	36
4	0.04	0.01	35	8	0.02	0.004	39

4 结语

国内外有大量文章讨论了通过硬件和软件的方法实现电能准确计量。而本文另辟蹊径,基于目前普遍使用的电能表计算出其电能计量误差,达到矫正的目的,因而具有很好的经济效益和实用性。该软件的创新性已获得国家电力公司武汉科技查新中心认可(报告编号:2004JD-010)。

谐波电能计量误差分析软件可以计算出谐波引起的电能计量装置的计量误差,帮助电力部门分析因谐波所造成的电能计量损失,为治理谐波污染提供参考依据。该软件现已在湖北省十堰市供电局使用,运行情况良好。该软件适合在电力系统谐波较严重地区推广应用。

参考文献:

[1] 张鹏,向铁元,周青山,等. 基于 BP 神经网络的谐波计量误差分析软件[J]. 高电压技术,2004,30(10):62-63.
ZHANG Peng,XIANG Tie-yuan,ZHOU Qing-shan,et al. Software for analyzing harmonic metering error based on BP neural network[J]. **High Voltage Engineering**,2004, 30(10):62-63.

[2] 邓志,徐柏榆,梅桂华,等. 谐波功率对感应式有功电度表计量的影响[J]. 中国电机工程学报,2002,22(4):138-143.
DENG Zhi,XU Bai-yu,MEI Gui-hua,et al. Influence of harmonic powers on metering error of induction watt-hour meters[J]. **Proceedings of the CSEE**,2002,22(4):138-143.

[3] 徐柏榆,邓志,梅桂华,等. 谐波电流对感应式有功电度表计量的影响[J]. 电网技术,2002,26(9):37-50.
XU Bai-yu,DENG Zhi,MEI Gui-hua,et al. Influence of harmonic current on metering error of induction phase watt-hour meters[J]. **Power System Technology**,2002, 26(9):37-50.

[4] SMITH S C,MICHAEL J. Fourier based three phase power metering system[C]// **Instrumentation and Measurement Technology Conference,2000**. [S.l.]: [s.n.],2000: 30-35.

[5] DOMIJAN A,EMBRIZ-SANTANDER E. Watthour meter accuracy under controlled unbalanced harmonic voltage and current conditions[J]. **IEEE Transaction on Power Delivery**,1996,11(1):64-72.

[6] 赵伟. 电子式电能表及其在现代用电管理中的应用[M]. 北京:中国电力出版社,1999.

[7] 陈允平. 人工神经网络原理及其应用[M]. 北京:中国电力出版社,2002.

[8] 孙宏伟,李梅,袁健华,等. 用于电力系统谐波分析的加窗插值 FFT 算法研究[J]. 高电压技术,2004,30(8):52-55.
SUN Hong-wei,LI Mei,YUAN Jian-hua,et al. Study on windows and interpolated FFT algorithm for harmonic analysis in power system[J]. **High Voltage Engineering**,2004,30(8):52-55.

[9] 张伏生,耿中行,葛耀中. 电力系统谐波分析的高精度 FFT 算法[J]. 中国电机工程学报,1999,19(3):63-66.
ZHANG Fu-sheng,GENG Zhong-xing,GE Yao-zhong. FFT algorithm with high accuracy for harmonic analysis in power system[J]. **Proceedings of the CSEE**,1999,19(3):63-66.

[10] 付丽琴,桂志国,王黎明. 数字信号处理原理及实现[M]. 北京:国防工业出版社,2004.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

谢 鹏(1980-),男,湖北咸宁人,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制;
周青山(1975-),男,湖南祁阳人,硕士,助理工程师,主要从事变电二次设计;
汪 毅(1980-),男,湖北武汉人,硕士研究生,研究方向为电网谐波监测(E-mail:wangyi1980426702@sohu.com);
向铁元(1953-),男,湖北仙桃人,教授,从事电力系统运行与控制方面的研究。

Design and realization of analytic software of energy metering error

XIE Peng¹,ZHOU Qing-shan²,WANG Yi¹,XIANG Tie-yuan¹

(1. School of Electric Engineering,Wuhan University,Wuhan 430072,China;

2. Hubei Electric Power Design Institute of Exploration and Surveying,Wuhan 430024,China)

Abstract: The energy metering errors of induction meters and electronic meters distorted waveforms are analyzed. A mathematical model of energy metering error is built up with BP neural network and an analytic software package for harmonic metering error is developed with VC++.Net. Multi-thread technology is adopted,which puts the neural network module and calculation module into the main thread,and the data acquisition module into background thread. The improved FFT algorithm with windows and interpolation is used to calculate the amplitudes and phases of harmonic currents and voltages. Manual data entry is permitted,and cooperated with data acquisition system the metering error of any order harmonic,and the total metering error as well, can be calculated. The designed software is applied in practice and runs well.

Key words: BP neural network; harmonic; energy metering error; improved FFT