

基于谐波分析理论的 FFT 电能计量模型的改进

林盾¹, 蓝磊², 柴旭峥²

(1. 海南省电力公司, 海南 海口 570203; 2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 在电网谐波污染日益严重的情况下, 提高电能计量的精度是大势所趋。分析了电网谐波影响下现有电能计量方法的准确性, 以及基于谐波分析理论的电能计量方法, 提出了 Hanning 加权插值 FFT 算法的电能计量模型, 并对该模型进行了数值仿真, 结果表明本文提出的改进模型有较高的精度, 而计算量无明显增加。在高性能硬件条件的基础上, 该算法模型将有较大的实际意义。

关键词: 电能计量; 谐波分析; 海宁加权插值; 快速傅里叶变换

中图分类号: TM933.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)10-0027-04

0 引言

近年来, 现代工业的高速发展使得越来越多的非线性负荷出现在电力系统中。这些非线性负荷产生大量的谐波电流, 造成电网中电压波形的严重畸变, 对电力系统中的发、变电设备、继电保护装置、自控装置、通讯设备和测量仪器造成了不同程度的危害。谐波污染问题已经在世界范围内得到广泛的重视^[1]。电能计量是发电企业、输配电企业、电力用户之间进行贸易结算的依据, 它的准确性与合理性直接影响三者之间的利益。本文分析了电网谐波影响下, 现有电能计量方法的准确性, 提出了一种改进的电能计量方法的数学模型, 即采用 Hanning 加权插值 FFT 高精度谐波分析算法进行谐波分析, 消除电网谐波对电能计量表计造成的误差, 对基波电量进行准确计量。并通过数值仿真计算验证了本文所提出算法的有效性和精度。伴随着 DSP 和高性能嵌入式 CPU 技术的发展, 这种数学模型是可行的。

1 电网谐波对电能计量表计的影响

国内电力系统中最常用的电能计量表计是感应式电能表和电子式电能表, 从其电能计量原理来看, 两种电能表在电网谐波条件下都无法做到准确的电能计量。

感应式电能表在谐波影响下的误差是由其自身的电磁物理特性决定的。国内外技术人员针对感应式电能表的误差模型、谐波条件下的误差完成了大量的理论和试验工作^[2,3]。电网谐波条件下的电能计量主要存在以下问题: 当对线性负荷供电的电源含有谐波功率时, 感应式电能表记录的是基波电能及部分谐波电能。当基波电源对非线性负荷

供电时, 非线性负荷将产生谐波功率及电能, 谐波功率将流入电网和其它用户, 而电磁式电能表记录的是基波电能减去一部分谐波电能的值。含谐波功率电源对非线性负荷供电时, 情况比较复杂, 电能计量的大小根据非线性负荷特征和电源谐波特性具体确定。按照电能计量只计基波电量的观点^[4], 感应式电能表多计量了线性负荷的电量, 少计量了非线性负荷的电量。

电子式电能表对电能的计量是根据电流和电压的 A/D 采样值进行计算的, 可以认为是电磁式电能表的数字化。因此无论是感应式电能表还是电子式电能表都同时计量了基波电能和谐波电能。即由于谐波的存在, 使电能计量存在明显误差。

2 基于谐波分析理论的电能计量方法的改进

为了提高电能计量的精度, 减小谐波对电能计量的影响, 国内外研究人员纷纷提出了许多不同的计量基波电能的计量方法^[5,6]。基于谐波分析理论的电能计量方法是其中的主要思想^[7]。然而一般采用的谐波分析方法 FFT 对系统频率波动时 (50 ± 0.2) Hz 信号相角的计算存在较大误差, 从而严重影响电能的计算准确度, 本文认为采用 Hanning 加权插值 FFT 高精度谐波分析算法在基本不增加运算量的基础上可以进行较高精度的电能计量。其基本原理如下:

一个具有各次谐波的周期信号可表示为:

$$x(t) = \sum_{i=0}^m A_i \sin(2\pi f_i t + \varphi_i) \quad (1)$$

式中: f_i 为第 i 次谐波频率, A_i 、 φ_i 分别为第 i 次谐波幅值及相角, m 为最高谐波次数。

在满足采样定理的条件下(即采样频率满足条件 $f_s > 2f_{\max}$) 对信号以采样频率 f_s 进行采样。当采样频率 f_s 不是信号基频 f_0 的整数倍时,基频信号表示为:

$$f_0 = \frac{k_0 + d_0}{N} f_s \quad (2)$$

式中: N 为采样点数, f_s/N 称为频率分辨率, k_0 为整数, d_0 为小数, d_0 的物理意义可表示为:

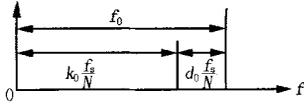


图1 d_0 的物理意义

Fig.1 Physical meaning of d_0

所以信号的采样值为:

$$x(nT_s) = \sum_{i=0}^m A_i \sin[2(k_i + d_i) \frac{f_s}{N} \cdot nT_s + i] \quad (3)$$

$T_s = 1/f_s$ 为采样时间间隔, n 为整数 ($n = 0, 1, \dots, N$)。对式(3) 做傅里叶变换得:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{i=0}^m A_i \sin[2(k_i + d_i) \frac{f_s}{N} \cdot nT_s + i] \cdot e^{-j \frac{2\pi}{N} nk} \quad (4)$$

海宁加权是余弦加权的一种,通常信号加权都是在时域进行的,而对于余弦加权,可以先对信号进行傅里叶变换,然后在频域进行处理。海宁加权的 N 点对称表达式为:

$$w(n) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos(\frac{2\pi n}{N}) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} (\frac{1}{2} e^{j \frac{2\pi n}{N}} + \frac{1}{2} e^{-j \frac{2\pi n}{N}}) \quad n = -\frac{N}{2}, \dots, -1, 0, 1, \dots, \frac{N}{2} \quad (5)$$

由于在离散傅里叶变换中使用海宁加权的加权序列是单边的,因此用于 FFT 加权的海宁加权函数应为^[8]:

$$w(n) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} (\frac{1}{2} e^{j \frac{2\pi n}{N}} + \frac{1}{2} e^{-j \frac{2\pi n}{N}}) \quad n = 0, 1, \dots, N \quad (6)$$

海宁加权的离散傅里叶变换为:

$$X_w(k) = \sum_{n=0}^{N-1} w(n) \cdot x(nT_s) \cdot e^{-j \frac{2\pi}{N} nk} = \sum_{n=0}^{N-1} [\frac{1}{2} - \frac{1}{4} e^{j \frac{2\pi n}{N}} - \frac{1}{4} e^{-j \frac{2\pi n}{N}}] \cdot x(nT_s) \cdot e^{-j \frac{2\pi}{N} nk} = \frac{1}{2} X(k) - \frac{1}{4} X(k-1) - \frac{1}{4} X(k+1) \quad (7)$$

根据 FFT 和余弦加权函数的相关公式,可以严格推导出海宁加权的插值公式来分别对频率、幅值和相角进行校正^[9]。在此仅给出校正公式如下:

$$d_0 = \begin{cases} \frac{2|X_w(k_0+1)| - |X_w(k_0)|}{|X_w(k_0+1)| + |X_w(k_0)|} & |X_w(k_0+1)| > |X_w(k_0-1)| \\ \frac{|X_w(k_0)| - 2|X_w(k_0-1)|}{|X_w(k_0)| + |X_w(k_0-1)|} & |X_w(k_0+1)| < |X_w(k_0-1)| \end{cases} \quad (8)$$

将式(8)代入式(2)即可得到准确的电力系统基波频率。幅值的校正公式为:

$$A_i = \frac{2 d_0 (1 - d_0^2) |X_w(k_0)|}{\sin(d_0)} \quad (9)$$

相角的校正公式为:

$$i = \text{phase}[X_w(k_0)] - d_0 + \frac{\pi}{2} \quad (10)$$

在准确求得电压和电流信号基波及各次谐波的幅值和相角之后,就可以求得某一较短时间段的电功率,进而求得这一时间段内的电能。

3 建模实验分析

为了验证 Hanning 加权插值 FFT 算法电能计量模型的有效性,并与 FFT 算法电能计量模型和电子式电能表计量模型比较优劣,本文完成了大量的数字信号实验。给出一则计算实例如下,电压为西安钢厂 35 kV 母线(钢阿线)一次侧的线电压 U_{bc} 的各次谐波参数^[10],相位自拟,且仅考察 1~6 次谐波的参数情况:

$$U_{bc}(t) = 37.66 \sin(\omega t) + 0.933 \sin(2\omega t + 10^\circ) + 1.813 \sin(3\omega t + 20^\circ) + 0.885 \sin(4\omega t + 30^\circ) + 1.943 \sin(5\omega t + 40^\circ) + 0.97 \sin(6\omega t + 45^\circ)$$

电流(A)的幅值与相位自拟:

$$I_{bc}(t) = 10 \sin(\omega t + 30^\circ) + 0.3 \sin(2\omega t + 45^\circ) + 0.5 \sin(3\omega t + 60^\circ) + 0.2 \sin(4\omega t + 70^\circ) + 0.45 \sin(5\omega t + 20^\circ) + 0.25 \sin(6\omega t + 90^\circ)$$

对以上信号以采样频率 12.8 kHz 采样,一次采样 4 个工频周期(0.08 s),共采样 1024 个点,考察系统频率为 50.2 Hz 情况下三种模型的理论计量结果。

1) 电子式电能表计量模型:同时考虑基波和谐波作用下的电能表计量值,计算 0.08 s 内的平均功率,按此平均功率求得某一时间段消耗的电能。

2) FFT 算法电能计量模型:认为系统频率为 50 Hz 不变,按谐波分析后的基波及各次谐波情况,分

别计算出基波和谐波电能。

3) Hanning 加权插值 FFT 算法电能计量模型: 利用 Hanning 加权插值求出系统实际频率,在此基础上修正谐波分析的结果,再分别计算出基波和谐波电能。

表 1 给出了 FFT 算法电能计量模型与 Hanning 加权插值 FFT 算法电能计量模型计算结果比较。三种计量模型计量结果理论值与真实值的比较见表 2,真实值是按照只计量基波电能的原则计算出的电压、电流和功率因数的乘积。

表 1 FFT 算法电能计量模型与 Hanning 加权插值 FFT 算法电能计量模型计算结果比较

Tab. 1 Comparison of calculation results of FFT and Hanningweighted interpolating FFT

模型类型	计算项目	计算结果					
		1 次谐波	2 次谐波	3 次谐波	4 次谐波	5 次谐波	6 次谐波
真实值	电压 幅值/kV	37.66	0.933	1.813	0.855	1.943	0.97
	电压 相角/(°)	0	10	20	30	40	45
	电流 幅值/A	10	0.3	0.5	0.2	0.45	0.25
	电流 相角/(°)	30	45	60	70	20	90
	平均电功率/kW	326.145	0.229 28	0.694 42	0.130 99	0.821 62	0.171 47
FFT 电能计量模型	电压 幅值/kV	37.584	0.771 7	1.730 7	0.840 2	1.880 7	0.878 7
	电压 相角/(°)	2.935 6	21.582	31.228	46.943	56.552	66.551
	电流 幅值/A	9.988 2	0.256 9	0.511 4	0.200 3	0.429 2	0.248 6
	电流 相角/(°)	32.976	55.841	66.417	84.292	34.339	102.42
	平均电功率/kW	324.970	0.163 85	0.723 34	0.133 78	0.747 29	0.177 02
Hanning 加权插值 FFT 电能计量模型	电压 幅值/kV	37.661	0.941 4	1.813 6	0.854 9	1.943 2	0.972 5
	电压 相角/(°)	0.00 25	11.362	19.815	28.567	39.659	45.680
	电流 幅值/A	10.000	0.302 7	0.499 8	0.199 5	0.450 2	0.249 8
	电流 相角/(°)	29.993	47.682	60.128	68.559	20.308	89.958
	平均电功率/kW	326.176	0.229 60	0.691 18	0.130 67	0.825 41	0.173 92

表 2 三种计量模型计量结果理论值与真实值的比较

Tab. 1 Comparison of estimated results of the three models and real values

项目	真实值	电子式 电能表模型	FFT 电能计量模型	Hanning 加权插值 FFT 电能计量模型
平均电功率/kW	326.145	327.177	324.970	326.176
1 h 消耗电能/kW·h	326.145	327.177	324.970	326.176

由以上结果可以看出,电子式电能表计量模型和 FFT 算法电能计量模型在算法的理论本身就存在明显的误差因素,而 Hanning 加权插值 FFT 算法电能计量模型在理论上可以准确地计量电能。伴随着 DSP 和高性能嵌入式 CPU 技术的发展,基于谐波分析理论的电能计量方法将是电力系统电能准确计量的发展方向,Hanning 加权插值 FFT 算法电能计量模型在相应的硬件基础上,有着较好的实用前景。

4 结论

在电网谐波污染日益严重的背景下,探索准确的电能计量方法具有积极的现实意义。采用基于谐波分析理论的电能计量方法已是未来的趋势。Hanning 加权插值 FFT 算法电能计量模型在理论上可以准确地计量电能,在高性能硬件条件的基础上,该算法模型将有较大的实际意义。

参考文献:

- [1] 吴竟昌 (WU Jing-chang). 供电系统谐波 (Harmonics in Power Supply System) [M]. 北京:中国电力出版社 (Beijing: China Electric Power Press), 1998.
- [2] Baghzouz Y, Owen T T. Harmonic Analysis of Induction Watt-hour Meter [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and System, 1985, PAS - 104(2): 399-406.
- [3] 丁艺,赵伟,侯国平 (DING Yi, ZHAO Wei, HOU Guoping). 谐波条件下感应系电能表计量误差分析 (Analysis of the Induction Watt-hour Meter Accuracy in the Presence of Harmonics) [J]. 电测与仪表 (Electrical Measurement & Instrumentation), 2002, 39(442): 8-12.
- [4] Johan D, Thierry V C, Daniel V D. The Registration of Harmonic Power by Analog and Digital Power Meters [J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 1998, 47(1): 195-198.
- [5] Davis EJ, Emanuel A E, Pileggi D J. Evaluation of Single-point Measurement Method for Harmonic Pollution Cost Allo-

- ation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(1):14-18.
- [6] Philip J T, Neville R W. Marginal Pricing of Harmonic Injections[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(1): 50-56.
- [7] Scott C S, Michael J D. Fourier Based Three Phase Power Metering System [A]. Proceedings of the 17th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference [C]. 2000. 30-35.
- [8] 孙仲康(SUN Zhong-kang). 快速傅立叶变换及其应用(FFT and Its Application) [M]. 北京:人民邮电出版社(Beijing:People's Posts & Telecommunications Press), 1982.
- [9] 谢明, 丁康(XIE Ming, DING Kang). 频谱分析的校正方法(A Calibration Method of Frequency Spectrum Analysis) [J]. 振动工程学报(Journal of Vibration Engineering),

1994, 7(2): 172-179.

- [10] 赵旺初(ZHAO Wang-chu). 电力网的谐波源及降低谐波的措施(Harmonic Wave Source in Power Networks and Measures to Reduce Harmonic Wave) [J]. 电力建设(Electric Power Construction), 1999, 9:22-24.

收稿日期: 2003-09-01; 修回日期: 2004-02-12

作者简介:

林盾(1967-),男,工程师,从事电力系统供电技术管理工作;

蓝磊(1969-),女,博士研究生,讲师,从事高电压技术方面的教学与科研工作;

柴旭峥(1978-),男,博士研究生,研究方向为高电压技术。

Modified model of power metering based on FFT of harmonic analysis

LIN dun¹, LAN Lei², CHAI Xu-zheng²

(1. Hainan Power Corporation, Haikou 570203, China;

2. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: With the state of serious harmonic pollution in the electric network, improving the precision of power metering becomes more and more important. This paper analyses the accuracy of present power metering methods, and based on the harmonic analysis of power metering, it provides the power metering model of Hanning-weighted interpolating FFT with its numerical simulation, and the calculation results show that the modified model reveals high accuracy without much extra computation. By the aid of high performance DSP and other hardware, the power metering model of Hanning-weighted interpolating FFT is quite useful in engineering applications.

Key words: power metering; harmonic analysis; Hanning-weighted interpolating; FFT

(上接第 26 页 continued from page 26)

参考文献:

- [1] 杨奇逊(YANG Qi-xun). 微机继电保护基础(Basis of Microcomputer Relay Protection) [J]. 华北电力学院(Journal of North China Electric Power College), 1988.
- [2] 邱关源(QIU Guan-yuan). 电路(第三版)(Circuit, Third Edition) [M]. 北京:高等教育出版社(Beijing: Higher Education Press), 1989.
- [3] 胡广书(HU Guang-shu). 数字信号处理——理论与算法与实现(Digital Signal Processing——Theory, Algorithm and Implementation) [M]. 北京:清华大学出版社(Beijing: Tsinghua University Press), 1997.

inghua University Press), 1997.

- [4] 程佩清(CHENG Pei-qing). 数字信号处理教程(第二版)(Digital Signal Processing Tutorial, Second Edition) [M]. 北京:清华大学出版社(Beijing: Tsinghua University Press), 2001.

收稿日期: 2003-09-01; 修回日期: 2003-11-13

作者简介:

刘建刚(1975-),男,硕士研究生,研究方向为基于 DSPs 的馈线自动化终端单元的研制;

孙同景(1948-),男,教授、博士生导师,研究方向为基于 DSPs 的馈线自动化终端单元的研制。

Application of Fourier algorithm based on FFT in microcomputer-based relay protection

LIU Jian-gang, SUN Tong-jing

(School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: Based on FFT, this paper puts forward a kind of power protection algorithm, with which the coefficients of fundamental and harmonics can be acquired directly from input sequence, so that the harmonic analysis is simplified greatly. Compared with traditional Fourier algorithm, the proposed one is more accurate, simpler and easier to achieve on DSP. So it can take place of the traditional Fourier algorithm to calculate the coefficients of harmonics. Also, a method of deciding the sampling frequency of sine wave is introduced.

Key words: Fourier; FFT; microcomputer relay protection; harmonic analysis