

莱夫-文森特窗三谱线插值的电力谐波分析

黄冬梅, 龚仁喜, 焦凤昌, 臧慧, 唐志涛

(广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 为解决快速傅里叶变换(FFT)在电力谐波分析存在的问题, 在分析莱夫-文森特窗和三谱线插值算法特点的基础上, 提出了一种基于莱夫-文森特窗三谱线插值的谐波分析算法, 用曲线拟合方法获得了修正公式, 并基于这个修正公式对电力谐波进行了仿真。仿真结果表明, 相同条件下, 该算法在处理简单的谐波信号时的时间小于 0.225 ms, 幅值修正误差小于 $-1.4 \times 10^{-6} \%$, 处理复杂信号时的时间小于 0.997 ms, 幅值修正误差小于 $-9.68 \times 10^{-6} \%$ 。该方法不仅具有较高的检测精度, 而且具有较快的运算速度。

关键词: 快速傅里叶变换; 电力谐波分析; 莱夫-文森特窗; 三谱线插值; 谐波信号

Power harmonic analysis based on Rife-Vincent window and triple-spectral-line interpolation

HUANG Dong-mei, GONG Ren-xi, JIAO Feng-chang, ZANG Hui, TANG Zhi-tao

(School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: On the basis of the analysis of the Rife-Vincent window and the characteristics of triple-spectral-line interpolation algorithm, an approach for power harmonic analysis based on the Rife-Vincent window and the triple-spectral-line interpolation is proposed to solve the problems of fast Fourier transform in the power harmonic analysis, the modified formula is obtained by using polynomial fitting method and simulation of the power harmonics is made based on it. The simulation results show that under the same condition, it takes less than 0.225 ms and the amplitude correction error is less than $-1.4 \times 10^{-6} \%$ with the simple harmonic signals processed, while it takes less than 0.997 ms and the amplitude correction error is less than $-9.68 \times 10^{-6} \%$ with the complex signals dealt with. Therefore, the algorithm has not only higher detection precision, but also faster operation speed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 60962008).

Key words: fast Fourier transform (FFT); power harmonic analysis; Rife-Vincent window; triple-spectral-line interpolation; harmonic signal

中图分类号: TM935 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)02-0028-07

0 引言

电力系统中非线性负荷的大量增加, 特别是电力电子设备(如各类整流设备、变流器和逆变器等)的广泛应用, 给电网注入了大量的谐波, 对电力系统造成严重的谐波污染, 严重地影响电能质量并危及电力系统的安全、稳定、经济运行。为提高电能质量, 维护电网安全运行, 准确检测电力系统的谐波是极其必要的。

目前, 快速傅里叶变换(FFT)是应用最广泛的电力系统谐波分析方法。然而, 当电网信号频率发生改变导致非同步采样时, FFT将产生频谱泄漏

和栅栏效应, 导致信号的频率、幅值及相位的检测准确度差, 无法满足谐波检测的精度要求。为实现同步采样, 常采用加窗插值算法^[1-2]、小波变换法^[3-5]、瞬时无功功率法^[6-8]及神经网络法^[9]等。小波变换法虽克服了FFT在分析非稳态信号方面的局限性, 但它在稳态谐波检测方面不具理论优势, 且在谐波检测方面尚处于初始阶段。瞬时无功功率法虽能准确检测三相三线制对称电路的总谐波分量, 但只能用在三相三线平衡系统, 且该方法的电路耗费很大, 在实际中的应用研究并不深入。神经网络法计算量小, 检测精度高, 具有较好的实时性抗干扰能力, 但存在如需要大量的训练样本、没有规范的神经网络构造方法、其精度对样本的依赖性强以及如何确定样本数没有规范方法等问题, 因而在工程

基金项目: 国家自然科学基金项目(60962008)

上的应用尚有待深入研究。加窗可以减小频谱泄漏, 插值能消除栅栏效应引起的误差, 加窗插值算法能有效抑制谐波间的干扰及杂波干扰。因此, 在解决非同步采样带来的问题上, 加窗插值算法应用较为广泛。常用的窗函数有三角窗、汉宁窗、汉明窗、布莱克曼窗^[10]、Kaiser窗^[11]、Nuttall窗^[12]和其他窗^[13-14], 插值算法有单峰谱线插值算法^[15]、双峰谱线插值算法^[16-18]及三谱线插值算法^[19]等。

采用旁瓣峰值电平小且其旁瓣衰减速率快的窗函数对信号进行处理, 可降低频谱泄漏对谐波检测带来的误差, 提高谐波检测的精度。因此, 本文在分析 Rife-Vincent 窗^[20]的基础上, 结合三谱线插值算法^[19], 推导出了基于 4 项 Rife-Vincent (I) 窗的三谱线插值公式, 并将其应用在 7 次简单信号与 21 次复杂信号的仿真。仿真结果表明, 该插值算法极大提高了检测精度。

1 Rife-Vincent 窗及其特性

Rife-Vincent 窗(简称 RV 窗)是一种余弦组合窗, 在时域中可表示为

$$w(n) = \sum_{m=0}^{M-1} (-1)^m a_m \cos(2\pi mn / N) \quad (1)$$

其中: M 为窗函数的项数; $n = 1, 2, \dots, N-1$; a_m 满足条件: $\sum_{m=0}^{M-1} (-1)^m a_m = 0$ 。

常用的窗函数及具有代表性的 RV 窗函数时域表达式的系数由表 1 给出, 自上而下依次表示汉宁窗、汉明窗、布莱克曼窗、3 项 RV(I)窗及 4 项 RV(III)和 RV(I)窗, 对应的余弦组合窗函数的旁瓣特性如表 2 所示。由表 2 可知, 4 项 Rife-Vincent (III)窗的旁瓣峰值电平最小, 为 -73.9dB, 但其衰减速率仅为 12 dB/oct。因此, 综合考虑旁瓣峰值电平和衰减速率的影响, 本文选取 4 项 Rife-Vincent (I)窗对输入信号进行处理。

表 1 常用窗及 Rife-Vincent 窗的时域系数

Table 1 Time domain coefficients of common and the Rife-Vincent windows

时域系数	a_0	a_1	a_2	a_3
Hanning	0.5	0.5	—	—
Hamming	0.54	0.46	—	—
Blackman	0.42	0.5	0.08	—
RV(I)-3	1	1.333 33	0.333 33	—
RV(III)-4	1	1.435 96	0.497 54	0.061 58
RV(I)-4	1	1.5	0.6	0.1

表 2 余弦组合窗的旁瓣特性

Table 2 Sidelobe characteristics of combination of cosine

windows		
旁瓣特性	旁瓣峰值电平/dB	衰减速率/(dB/oct)
Hanning	-34.2	18
Hamming	-43.2	6
Blackman	-58.1	18
RV(I)-3	-46.8	18
RV(III)-4	-73.9	12
RV(I)-4	-61	18

2 三谱线插值算法

设输入信号的时域表达式为

$$x(t) = \sum_{m=1}^h A_m \cos(2\pi m f_0 t + \theta_m) \quad (2)$$

式中: m 表示谐波次数, A_m 、 θ_m 表示 m 次谐波的幅值和相位; f_0 表示基波频率。以采样频率 f_s 对输入信号式(2)进行 N 点采样, 得到对应离散信号为

$$x(n) = \sum_{m=1}^h A_m \cos(2\pi m n f_0 / f_s + \theta_m) \quad (3)$$

对离散信号进行加窗处理后, 即 $x_d(n) = x(n)w(n)$, 并实施离散傅里叶变换, 得

$$X(k) = \sum_{m=1}^h \frac{A_m}{2j} [e^{j\theta_m} W(k - \frac{f_m}{\Delta f}) - e^{-j\theta_m} W(k + \frac{f_m}{\Delta f})] \quad (4)$$

其中: $\Delta f = f_s / N$; $f_m = m f_0$; $k = 0, 1, \dots, N-1$ 。忽略负频点峰值的旁瓣影响得

$$X(k) = \sum_{m=1}^h \frac{A_m}{2j} [e^{j\theta_m} W(k - \frac{f_m}{\Delta f})] \quad (5)$$

式中, $W(k)$ 为窗函数的离散傅里叶变换, 当 $N \gg 1$ 时, 可表示为

$$W(k) = \frac{Nk \sin(k\pi)}{\pi} e^{-j\pi k} e^{j\frac{\pi}{N}k} \sum_{m=0}^{M-1} (-1)^m \frac{a_m}{k^2 - m^2} \quad (6)$$

以某第 m 次谐波进行分析, 根据式(5), 令

$$X_m(k) = \frac{A_m}{2j} [e^{j\theta_m} W(k - \frac{f_m}{\Delta f})] \quad (7)$$

由于对信号进行非同步采样, 峰值频点 $f_m = k\Delta f$ 很难恰好在离散谱线频点上。设峰值点 k 附近的幅值最大谱线为 k_1 , k_1 左右两边谱线分别为 k_0 和 k_2 , 显然有 $k_0 = k_1 - 1 < k_1 < k_2 = k_1 + 1$ 。令 $\delta = k - k_1$, 则 δ 的取值范围为 $(-0.5, 0.5)$ 。所选取

的三条谱线分别对应幅值为 $y_0 = |X_m(k_0)|$, $y_1 = |X_m(k_1)|$ 和 $y_2 = |X_m(k_2)|$, 令 $\alpha = \frac{y_2 - y_0}{y_1}$.

则由式(7)可得

$$\alpha = \frac{|W(k_2 - k) - |W(k_0 - k)|}{|W(k_1 - k)|} = \frac{|W(1 - \delta) - |W(-1 - \delta)|}{|W(-\delta)|} \quad (8)$$

记 $\alpha = h(\delta)$ 。通过多项式拟合逼近, 则 δ 可由其反函数求得, 即 $\delta = h^{-1}(\alpha)$, 其中 δ 由逼近多项式的奇数项构成。

由此可得, 信号频率修正公式为

$$f_m = (k_1 + \delta)\Delta f \quad (9)$$

幅值修正通过选取三条谱线的幅值进行加权平均得到。考虑到 y_1 为其最大谱线幅值, 给以 y_1 较大权重 2, 则由式(7)有

$$y_0 + 2y_1 + y_2 = 0.5A_m(|W(-1 - \delta)| + 2|W(-\delta)| + |W(-1 - \delta)|) \quad (10)$$

则

$$A_m = \frac{2(y_0 + 2y_1 + y_2)}{(|W(-1 - \delta)| + 2|W(-\delta)| + |W(-1 - \delta)|)} \quad (11)$$

令 $g(\delta) = \frac{2}{(|W(-1 - \delta)| + 2|W(-\delta)| + |W(-1 - \delta)|)}$, 通

过多项式逼近可求得 $g(\delta)$, 其中 $g(\delta)$ 由关于 δ 逼近多项式的偶次项构成。

由此可得幅值修正公式为

$$A_m = (y_0 + 2y_1 + y_2)g(\delta) / N \quad (12)$$

由(7)式, 可得相位修正公式为

$$\theta_m = \text{angle}[X(k_0)] + \delta\pi \quad (13)$$

由此, 频率修正、幅值修正及相位修正公式依次由式(9)、式(12)、式(13)给出, 关键在于 δ 的求取。

3 Rife-Vincent 窗插值算法公式的推导

选取式(1)描述的 4 项 Rife-Vincent(I)窗函数, 即

$$w(n) = 1 - 1.5 \cos(2\pi n / N) - 0.6 \cos(4\pi n / N) + 0.1 \cos(6\pi n / N) \quad (14)$$

式(13)窗函数对应的离散傅里叶变换为

$$W(k) = \frac{Nk \sin(k\pi)}{\pi} e^{-j\pi k} e^{j\frac{\pi}{N}k} \left[\frac{1}{k^2} - \frac{1.5}{k^2 - 1} + \frac{0.6}{k^2 - 4} - \frac{0.1}{k^2 - 9} \right] \quad (15)$$

将式(15)代入式(8), 则得 α 与 δ 之间的函数关系 $\alpha = h(\delta)$, 关键在于 δ 的求取。前面提到 δ 的取值范围在 $(-0.5, 0.5)$, 且 δ 由逼近多项式的奇数

项构成, 可知 α 与 δ 呈奇函数关系。故在选取 δ 时, 只需考虑 $(0, 0.5)$ 范围的取值。对于多项式逼近, 选取的点数越多, 所取点间的间距越小, 得到的多项式精度越高, 但提高精度的同时会增加计算量。因此, 在分析 7 个、9 个、13 个、17 个 δ 后, 综合考虑精度和计算量, 本文选取了一组 13 个 δ , 如 $[0.0106, 0.0508, 0.0911, 0.1098, 0.1609, 0.1988, 0.2409, 0.2976, 0.3248, 0.3877, 0.4017, 0.4628, 0.4802]$, 并由 $\alpha = h(\delta)$ 获得对应的 α 。对取得的一组 α 与 δ , 采用 $\text{polyfit}(\alpha, \delta, 7)$ 函数进行曲线拟合, 得到多项式逼近函数 $\delta = h^{-1}(\alpha)$, 为

$$\delta = 1.14285367\alpha - 0.09380539\alpha^3 + 0.01213232\alpha^5 - 0.00036966\alpha^7 \quad (16)$$

同理, 将式(15)代入 $g(\delta)$, 选取一组 δ , 再通过曲线拟合函数 $\text{polyfit}(\delta, g(\delta), 6)$, 可得到 $g(\delta)$ 与 δ 的函数关系:

$$g(\delta) = 0.57142857 + 0.12647068\delta^2 + 0.01504684\delta^4 + 0.00139857\delta^6 \quad (17)$$

由式(16)给出的 δ 及(17)给出的 $g(\delta)$, 再根据式(9)、式(12)、式(13)可依次得到 4 项 RV-(I) 对应的频率、幅值、相位修正公式。

同理可得 3 项 RV-(I)的 δ 及 $g(\delta)$:

$$\delta = 0.89999521\alpha - 0.08118079\alpha^3 + 0.01387268\alpha^5 - 0.00253583\alpha^7 \quad (18)$$

$$g(\delta) = 0.60000064 + 0.17042968\delta^2 + 0.03093891\delta^4 + 0.00965541\delta^6 \quad (19)$$

4 项 RV-(III) 3 项 RV-(I)的 δ 及 $g(\delta)$:

$$\delta = 1.03553201\alpha - 0.08321182\alpha^3 + 0.02694491\alpha^5 - 0.01282539\alpha^7 \quad (20)$$

$$g(\delta) = 0.58207975 + 0.14271026\delta^2 + 0.02552264\delta^4 + 0.00811270\delta^6 \quad (21)$$

4 信号的仿真实验分析

为了验证本文推导的算法正确性, 分别对 7 次谐波的简单信号和 21 次谐波的复杂信号进行仿真。

4.1 简单信号的仿真

设仿真的信号为

$$x(n) = \sum_{m=1}^7 A_m \cos(2\pi m n f_0 / f_s + \theta_m)$$

式中: 基波频率 50.1 Hz, 采样频率为 1 600 Hz, 采样 256 点; m 表示谐波次数, A_m 、 θ_m 表示基波及各次谐波的幅值和相位, 如表 3 所示。

表 3 仿真信号的基波及谐波成分

Table 3 Fundamental wave and harmonic components of the simulation signals

谐波次数	1	2	3	4	5	6	7
幅值/V	110	8	1	2	3	1	0.5
相位/rad	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5	0.3	0.2

仿真实验的流程为：(1)输入信号加窗并进行FFT；(2)找出 40~60 Hz 频域内的 y_1 、 y_2 、 y_3 ；(3)计算 α ， δ 及 $g(\delta)$ ，得出基波参数；(4)在 $(mf_0 - 5) \sim (mf_0 + 5)$ Hz 内找出 y_1 、 y_2 、 y_3 ；(5)计算 α ， δ 及 $g(\delta)$ ，得出各次谐波的参数。

对本文选取的窗函数进行了仿真，并与输入信号加汉宁窗、汉明窗、布莱克曼窗、3 项 Rife-Vincent(I)的结果进行了比较，结果如表 4~表 6 及图 1、图 2 所示。其中表 4 给出了各谐波分量幅值和基波频率的相对误差；表 5 给出了相位相对误差；表 6 给出了加不同窗的运算时间；图 1 表示汉宁窗、汉明窗、布莱克曼窗、3 项及 4 项 Rife-Vincent(I) 窗的幅值绝对误差；图 2 表示相应汉宁窗、汉明窗、布莱克曼窗、3 项及 4 项 Rife-Vincent(I)窗的相位绝对误差。由表 4~表 6 及图 1、图 2 可以看出，4 项 Rife-Vincent (I)窗其幅值相对误差 $\leq -1.4 \times 10^{-6} \%$ 、相位相对误差 $\leq -1.7 \times 10^{-4} \%$ ，基波频率的相对误差为 $1.0 \times 10^{-8} \%$ ，检测精度最高；所选窗函数运算时间为 0.225 ms，运算量较小，运算速度较快。

表 4 各次谐波幅值的相对误差

Table 4 The relative errors of each harmonic amplitude

m	1	2	3	4	5	6	7
A	3.2E-7	2.3E-5	5.2E-6	2.0E-5	3.1E-6	4.9E-6	1.2E-5
B	1.7E-7	1.4E-5	3.2E-4	3.3E-5	1.4E-5	1.6E-4	5.3E-4
C	1.9E-7	7.0E-6	1.4E-6	5.8E-6	1.7E-7	1.8E-6	4.8E-6
D	7.3E-8	4.3E-6	2.0E-6	1.6E-6	1.6E-6	4.5E-6	6.5E-6
E	1.4E-8	1.4E-6	6.2E-7	8.1E-7	6.6E-9	8.2E-7	9.9E-7

表 5 各次谐波相位相对误差

Table 5 Relative errors of each harmonic phase

m	1	2	3	4	5	6	7
A	-5.4E-6	-8.5E-4	-2.0E-3	-8.4E-4	-4.5E-4	-2.6E-3	-2.5E-3
B	-2.1E-4	-1.5E-3	-1.7E-2	-9.3E-3	-7.6E-3	-3.6E-2	-9.9E-2
C	-2.2E-6	-3.6E-4	-9.0E-4	-3.6E-4	-1.9E-4	-1.1E-3	-1.1E-3
D	1.4E-6	1.5E-4	3.1E-4	1.3E-4	7.9E-5	5.1E-4	5.2E-4
E	-2.8E-7	-5.1E-5	-9.8E-5	-3.9E-5	-2.4E-5	-1.7E-4	-1.7E-4

表 6 基波频率相对误差和运算时间

Table 6 Relative errors of fundamental wave and operation time

窗函数	汉宁窗	布莱克曼窗	所选窗
基波频率相对误差	3.6E-7	1.5E-7	1.0E-8
运算时间	0.40 ms	0.286 ms	0.225 ms

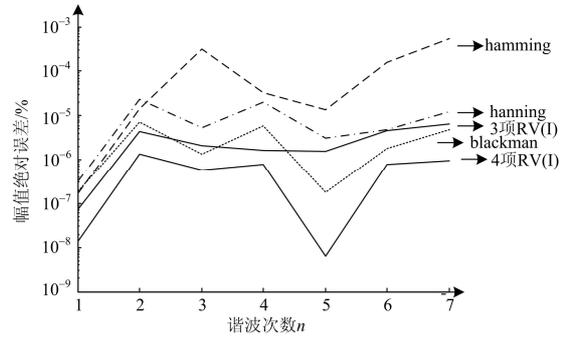


图 1 幅值绝对误差

Fig. 1 Amplitude absolute errors

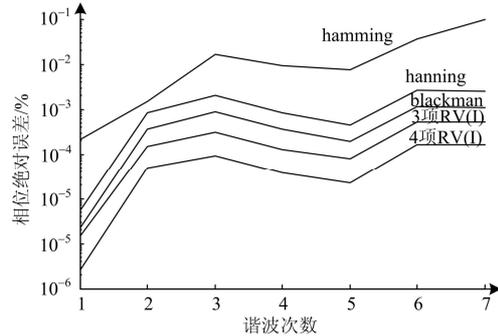


图 2 相位绝对误差

Fig. 2 Phase absolute errors

4.2 复杂信号的仿真

设仿真输入的复杂信号为

$$x(n) = \sum_{m=1}^{21} A_m \cos(2\pi m n f_0 / f_s + \theta_m) \quad (22)$$

其中：输入信号的成分由表7给出；基波频率为50.1 Hz；采样频率为2 520 Hz；采样点数为512；谐波次数 N 为21。

表 7 复杂信号的成分

Table 7 Composition of the complex signals

谐波次数	1	2	3	4	5	6	7
幅值/V	220	4.4	10	3	6	2.1	3.2
相位/(°)	0.05	39	60.5	123	-52	146	97
谐波次数	8	9	10	11	12	13	14
幅值/V	1.9	2.3	0.8	1.1	0.7	0.85	0.1
相位/(°)	56	43.1	-19	4.1	40	10.5	115
谐波次数	15	16	17	18	19	20	21
幅值/V	1	0.06	0.4	0.04	0.3	0.05	0.01
相位/(°)	25	53.1	-132	85	0.8	53	-72

采用与处理简单信号相同的流程与算法，依次对输入信号加汉宁窗、汉明窗、布莱克曼窗、3项 Rife-Vincent(I)及4项Rife-Vincent(I)窗函数进行了仿真。所获得的幅值与相位相对误差数据如表8、图3及表4所示。其中图3表示汉明窗、汉宁窗、布莱克

曼窗及4项Rife-Vincent(I)窗的幅值修正绝对误差；图4表示相应汉明窗、汉宁窗、布莱克曼窗及4项Rife-Vincent(I)窗的相位修正绝对误差；图5对应其频率修正绝对误差。

可以看出，4项Rife-Vincent(I)窗，21次谐波的幅值修正的相对误差小于 $-9.68 \times 10^{-6} \%$ ，相位修正精度小于0.01%。而文献[11]对21次谐波幅值修正幅值

误差小于0.001%，初相位误差修正小于0.029%；文献[8]对21次谐波幅值计算误差小于0.0009%，初相位计算误差小于0.04%。此外，仿真中加汉宁窗的运算时间为1.041 ms，加布莱克曼窗的运算时间为1.020 ms，本文所选窗的运算时间为0.997 ms。因此，本文采用算法的分析精度更高、运算速度更快。

表8 仿真的数据

Table 8 Simulation data

幅值相对误差											
窗函数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
汉宁窗	3.1E-06	1.8E-04	5.0E-04	-2.3E-05	-5.1E-06	1.8E-05	4.4E-05	4.1E-04	2.4E-04	1.1E-04	6.1E-06
汉明窗	2.0E-06	1.5E-02	3.6E-03	5.2E-03	-2.0E-04	2.1E-03	1.4E-03	9.4E-03	-2.9E-03	-3.6E-03	3.0E-03
Blackman	-5.7E-06	-3.7E-05	-1.9E-04	-4.5E-05	-3.5E-06	5.9E-06	-6.2E-06	-1.1E-04	-6.1E-05	2.9E-05	1.8E-06
RV(I)-3	1.5E-05	1.6E-04	4.6E-04	7.1E-05	4.0E-06	2.6E-07	4.5E-05	3.4E-04	2.2E-04	1.9E-05	-1.9E-07
RV(I)-4	-1.4E-07	-1.5E-06	-9.6E-06	-1.1E-06	-1.2E-07	1.8E-07	-3.6E-07	-6.2E-06	-3.7E-06	5.9E-07	7.7E-08
窗函数	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
汉宁窗	3.2E-05	5.2E-05	9.0E-05	5.3E-05	2.1E-04	-1.3E-06	1.9E-04	2.1E-04	1.2E-03	1.3E-04	
汉明窗	8.8E-03	7.8E-03	2.8E-01	-4.1E-03	7.4E-01	1.9E-02	9.3E-01	3.1E-02	1.2E+01	5.5E+00	
Blackman	7.7E-06	-4.5E-05	-4.9E-04	-3.4E-05	6.9E-05	-9.3E-07	5.4E-05	-9.9E-05	1.6E-04	2.9E-05	
RV(I)-3	6.5E-06	1.2E-04	6.2E-04	1.0E-04	-6.9E-06	6.2E-07	1.9E-05	2.6E-04	2.8E-04	3.8E-05	
RV(I)-4	2.7E-07	-1.9E-06	-1.5E-05	-1.5E-06	2.0E-06	-2.0E-08	1.3E-06	-4.9E-06	-3.1E-06	-4.4E-07	
相位相对误差											
窗函数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
汉宁窗	-2.3E-02	-1.6E-02	4.0E-03	7.6E-05	7.1E-05	-3.5E-04	-3.2E-04	-3.5E-03	2.8E-03	-3.5E-03	2.9E-03
汉明窗	-1.2E+00	1.1E-01	-1.2E-02	1.8E-02	1.3E-02	1.7E-02	1.4E-03	-5.5E-02	-7.5E-02	1.9E-01	-7.3E-01
Blackman	2.5E-02	-6.2E-03	-6.4E-04	-8.4E-05	3.3E-05	-1.6E-04	-7.1E-05	2.2E-04	-7.7E-05	-1.4E-03	1.3E-03
RV(I)-3	7.3E-03	1.2E-03	-1.6E-04	-1.2E-05	-1.1E-05	2.6E-05	2.7E-05	2.1E-04	-1.6E-04	2.8E-04	-1.1E-04
RV(I)-4	1.0E-02	-4.9E-05	-2.0E-04	-1.8E-05	4.5E-06	-4.1E-06	1.2E-05	1.5E-04	-1.4E-04	-1.2E-06	1.1E-05
窗函数	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
汉宁窗	-5.9E-04	-3.0E-03	-3.4E-06	1.2E-03	8.2E-03	3.2E-05	-1.3E-04	-1.2E-01	2.7E-02	-9.5E-04	
汉明窗	-1.3E-01	-5.0E-01	-7.4E-01	-1.3E-01	-1.0E+00	-5.8E-02	-1.8E+00	-7.2E+00	-1.5E+00	-9.0E-01	
Blackman	-2.4E-04	9.0E-04	-1.7E-03	-2.4E-04	3.5E-03	1.3E-05	-6.4E-05	3.2E-02	9.7E-03	-3.7E-04	
RV(I)-3	5.9E-05	2.9E-04	-8.3E-06	-9.2E-05	-4.8E-04	-6.3E-07	6.2E-05	6.6E-03	-1.0E-03	2.3E-05	
RV(I)-4	-1.3E-06	3.1E-04	-1.4E-04	-1.2E-04	6.5E-05	-1.4E-07	-1.2E-07	8.9E-03	-6.8E-05	1.7E-05	

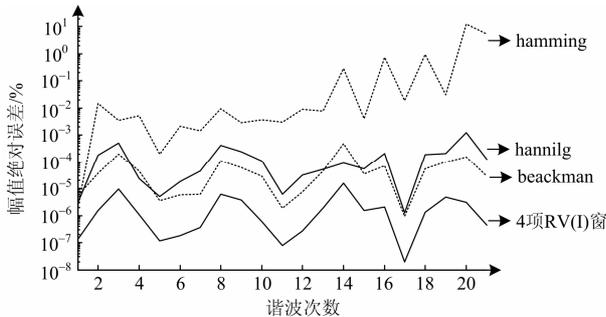


图3 不同窗函数修正的幅值绝对误差

Fig. 3 Amplitude absolute errors of different window function amendment

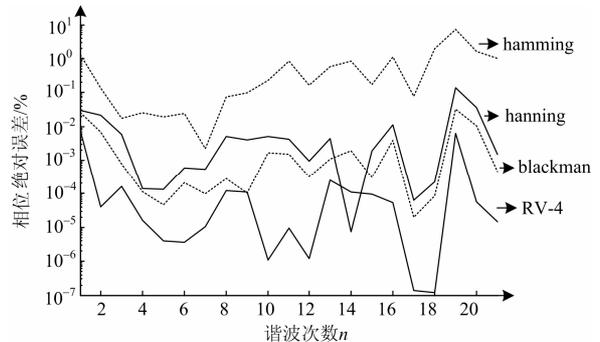


图4 不同窗函数修正的相位绝对误差

Fig. 4 Phase absolute errors of different window function amendment

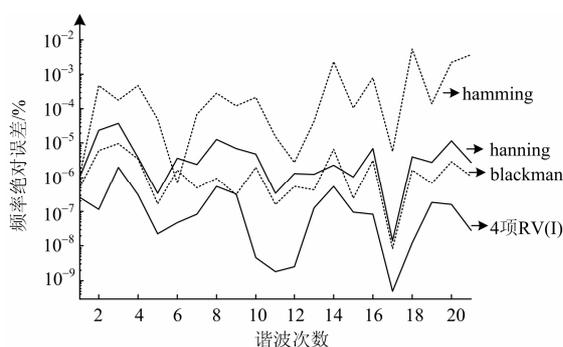


图 5 不同窗函数修正的频率绝对误差

Fig. 5 Frequency absolute errors of different window function amendment

5 实现方法

在基于 DSP (或 FPGA) 的电力谐波检测仪上可实现本文算法。电力谐波检测仪包含信息采集模块、信息处理模块、控制模块 (DSP 或 FPGA) 及显示模块。信息采集模块包含电压电流传感器, 信息处理部分包含信号调理、抗混叠滤波及 AD 采样模块, 控制模块 (DSP 或 FPGA) 负责 AD 数据的读取及完成本文算法的软件实现。完成一系列的软硬件设计后, 即可在实际中验证本文算法。

6 小结

本文根据 Rife-Vincent(I)窗函数的旁瓣特性, 结合 FFT 对电力谐波进行了分析, 导出 4 项 Rife-Vincent(I)窗函数三谱线插值算法的修正公式。仿真实验表明, 在对简单信号分析时, 本文算法检测精度较高, 运算量较小; 处理复杂信号时, 较于常用的窗函数插值, 本具有较高的计算精度和较高的运算速度。

参考文献

[1] 张伏生, 耿中行, 葛耀中, 等. 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, et al. FFT algorithm with high accuracy for harmonic analysis in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3): 63-66.

[2] 黄纯, 江亚群. 谐波分析的加窗插值改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(15): 26-32.
HUANG Chun, JIANG Ya-qun. Improved window and interpolation algorithm for analysis of power system harmonics[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(15): 26-32.

[3] 蒋剑波, 刘贤兴, 王德明. FFT 和小波变换在电力系统谐波测量中的应用[J]. 高电压技术, 2005, 31(11): 85-87.
JIANG Jian-bo, LIU Xian-xing, WANG De-ming. Application of FFT and wavelet transform to measurement of harmonics in power system[J]. High Voltage Technology, 2005, 31(11): 85-87.

[4] 曾瑞江, 杨震斌, 柳慧超. 基于小波变换的电力系统谐波检修方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 35-39.
ZENG Rui-jiang, YANG Zhen-bin, LIU Hui-chao. A method of power system harmonic detection based on wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 35-39.

[5] 李春兰, 杜松怀, 苏娟, 等. 一种新的基于小波变换和混沌理论的触电信号检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(10): 47-52.
LI Chun-lan, DU Song-huai, SU Juan, et al. A novel detecting method of electric shock signal based on wavelet transform and chaotic theory[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(10): 47-52.

[6] 李涛, 常鲜戎, 唐坦坦. 基于 ip-iq 谐波检测法 D_STATCOM 的研究[J]. 电力科学与工程, 2011, 27(10): 12-16.
LI Tao, CHANG Xian-rong, TANG Tan-tan. Research on D-STATCOM based on ip-iq harmonic method[J]. Electric Power Science and Engineering, 2011, 27(10): 12-16.

[7] 刘传林, 刘安培. 基于新型变步长算法的自适应三相电路谐波检测[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(7): 123-128.
LIN Chuan-lin, LIU An-pei. Adaptive harmonic detection of 3-phase circuits based on a novel variable step-size algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(7): 123-128.

[8] 周福林, 李群湛, 解绍峰, 等. 无锁相环单相无功谐波电流实时检测方法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(1): 178-182.
ZHOU Fu-lin, LI Qun-zhan, XIE Shao-feng, et al. Method for single-phase reactive and harmonics currents detection without PLL[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 178-182.

[9] 刘田翠, 王红然, 汪小平, 等. 基于自适应神经元的谐波检测方法研究[J]. 电子科技, 2009, 22(2): 60-63.
LIU Tian-cui, WANG Hong-ran, WANG Xiao-ping, et al. Research method for harmonic current measurement based on the adaptive linear element[J]. Electronics

- Technology, 2009, 22(2): 60-63.
- [10] 赵文春, 马伟明, 胡安. 电机测试中谐波分析的高精度 FFT 算法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 83-87.
ZHAO Wen-chun, MA Wei-ming, HU An. FFT algorithm with high accuracy for harmonic analysis in the electric machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 83-87.
- [11] 高云鹏, 滕召胜, 卿柏元. 基于 Kaiser 窗双谱线插值 FFT 的谐波分析方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(2): 287-292.
GAO Yun-peng, TENG Zhao-sheng, QING Bai-yuan. Harmonic analysis based on Kaiser window double spectrum line interpolation FFT[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(2): 287-292.
- [12] 卿柏元, 滕召胜, 高云鹏, 等. 基于 Nuttall 窗双谱线插值 FFT 的电力谐波分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(25): 153-158.
QING Bai-yuan, TENG Zhao-sheng, GAO Yun-peng, et al. An approach for electrical harmonic analysis based on Nuttall window double-spectrum-line interpolation FFT[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 153-158.
- [13] 严晓丹, 王军, 方春恩, 等. 一种改进的 Flat-top 窗电力系统谐波分析算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(8): 49-56.
YAN Xiao-dan, WANG Jun, FANG Chun-en, et al. An improved algorithm for harmonic analysis of power system based on the Flat-top window[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(8): 49-56.
- [14] 温和, 滕召胜, 王一, 等. 基于三角自卷积窗的介损角高精度测量算法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 203-208.
WEN He, TENG Zhao-sheng, WANG Yi, et al. High accuracy dielectric loss angle measurement algorithm based on triangular self-convolution window[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(3): 203-208.
- [15] 肖先勇, 王楠, 刘亚梅, 等. 基于多项式逼近的单峰谱线插值算法在间谐波分析中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32(18): 57-61.
XIAO Xian-yong, WANG Nan, LIU Ya-mei, et al. Application of polynomial approximation based single peak spectral lines interpolation algorithm in interharmonic analysis[J]. Power System Technology, 2008, 32(18): 57-61.
- [16] 庞浩, 李东霞, 俎云霄, 等. 应用 FFT 进行电力谐波分析的改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 50-54.
PANG Hao, LI Dong-xia, ZU Yun-xiao, et al. An improved algorithm for harmonic analysis of power system using FFT technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 50-54.
- [17] 曾博, 滕召胜, 温和, 等. 莱夫-文森特窗插值 FFT 谐波分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(10): 115-120.
ZENG Bo, TENG Zhao-sheng, WEN He, et al. An approach for harmonic analysis based on Rife-Vincent window interpolation FFT[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(10): 115-120.
- [18] 曾博, 滕召胜, 高云鹏, 等. 基于 Rife-Vincent 窗的高准确度电力谐波相量计算方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 154-158.
ZENG Bo, TENG Zhao-sheng, GAO Yun-peng, et al. An accurate approach for power harmonic phasor calculation based on Rife-Vincent window[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 154-158.
- [19] 牛胜锁, 梁志瑞, 张建华, 等. 基于三谱线插值 FFT 的电力谐波分析算法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 130-136.
NIU Sheng-suo, LIANG Zhi-rui, ZHANG Jian-hua, et al. An algorithm for electrical harmonic analysis based on triple-spectrum-line interpolation FFT[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 130-136.
- [20] Rife D C, Vincent G A. Use of the discrete Fourier transform in the measurement of frequencies and levels of tones[J]. The Bell System Technical Journal, 1970, 49(2): 197-228.

收稿日期: 2013-04-30; 修回日期: 2013-06-01

作者简介:

黄冬梅(1988-), 女, 硕士研究生, 从事电力谐波及无功补偿技术的研究; E-mail: feng_1219@sina.cn

龚仁喜(1962-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力电子技术及其应用的研究;

焦凤昌(1983-), 男, 硕士研究生, 从事物联网与智能化检测技术技术的研究与实际开发。