

# 基于四谱线插值FFT的电网谐波检测方法

郝柱, 顾伟, 褚建新, 麻朝

(上海海事大学航运技术与控制工程交通部重点实验室, 上海 201306)

**摘要:** 在采用快速傅里叶变换法分析电网中各次谐波时, 因信号的非整周期截断和非同步采样而造成的频谱泄露会对检测结果的准确性造成影响。为了提高谐波检测的准确度, 提出了一种基于四谱线插值的快速傅里叶变换算法。该算法通过对加窗信号的离散频点处幅值信息的分析, 利用谐波频点附近的四根谱线进行加权运算, 进一步提高了谐波幅值和相位检测的准确度。通过数据拟合, 得到常用的窗函数所对应的谐波分析实用修正公式。由数值仿真分析可以看出, 该算法具有更高的检测精确度。仿真及实测的结果充分验证了该算法的准确性和有效性。

**关键词:** 四谱线插值; 快速傅里叶变换; 谐波检测; 窗函数; 数据拟合

## A power network harmonic detection method based on the four-spectrum-line interpolation FFT

HAO Zhu, GU Wei, CHU Jian-xin, MA Zhao

(Marine Technology and Control Engineering Key Laboratory of Transportation Ministry, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** When the Fast Fourier Transform (FFT) method is used to analyze the harmonics in a power network, the sampled signal's non-integral period truncation and non-synchronous sampling can cause the spectrum leakage, which will affect the accuracy of the detective results. In order to improve the accuracy of the harmonic detection, this paper puts forward a Fast Fourier Transform algorithm based on four-spectrum-line interpolation algorithm. Through analyzing the adding window signal amplitude information at the discrete frequency points, the algorithm further enhances the accuracy of the amplitude and phase detection by using weighted arithmetic of four pillars spectral line near the harmonic frequency point. By data fitting, practical correction formulas corresponding to commonly used window functions are obtained. Through numerical simulation analysis, it can be seen that the algorithm has higher detection accuracy. The accuracy and effectiveness of the algorithm is verified by the results of the simulation.

**Key words:** four-spectrum-line interpolation; FFT; harmonic detection; window function; data fitting

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)19-0107-07

## 0 引言

在电力系统中, 由于大量电子器件和非线性负载的使用, 电网受到的谐波污染越来越严重。为了能够有效地减少谐波污染, 对电网中的谐波成分进行准确检测已经成为减少谐波污染、防止谐波危害、维护电网的安全运行的前提和关键。

目前电网谐波研究的方法有多种, 包括快速傅里叶变换算法<sup>[1-5]</sup>, 瞬时无功功率检测方法<sup>[6-9]</sup>以及神经网络算法<sup>[10-12]</sup>等等, 然而在实际工程应用中仍然以快速傅里叶变换(FFT)为主要研究方法。在应用FFT算法的同时, 会存在频谱泄露问题, 频谱泄

漏包括长范围泄漏和短范围泄漏两部分, 它们可以通过对信号加窗和频域信号插值运算来减小。加窗算法有很多种, 常用的窗函数种类包括三角窗、Hamming窗、Hanning窗、Blackman窗等等, 选择窗函数时可根据具体分析情况采用合适的窗函数。插值算法中有单谱线插值算法<sup>[13]</sup>, 双谱线插值算法<sup>[14-17]</sup>, 三次样条插值算法<sup>[18-19]</sup>, 三谱线插值算法<sup>[20]</sup>等。本文采用四谱线插值算法, 与双谱线插值以及三谱线插值算法相比, 该算法可以有效地提高谐波幅值与相位的检测精度。

## 1 四谱线插值算法

### 1.1 插值算法频点附近谱线分析

目前双谱线插值算法的使用比较广泛, 该方法利用谐波频点处邻近两条谱线幅值大小求取谐波的

**基金项目:** 省部级项目“船舶电力推进系统故障诊断与安全控制技术及应用”(11170501700)

实际幅值和相位大小。尽管该方法与单谱线算法相比，在谐波检测准确度上有了提高，但是，该方法并没有充分利用谐波频点附近谱线中蕴含的信息。三谱线插值法利用频点位置附近的三条谱线进行幅相运算，与双谱线插值法比较，进一步提高了谐波测量的准确度，但是该算法并没有考虑到频点左右对称谱线所蕴含的信息量。图 1 为正弦信号加窗后在不同采样频率时其频点附近各谱线幅值信息。图 1 各图中的虚线为波形在频域图中不同采样频率时实际频点的位置，该采样信号幅值为 100，频率为 50 Hz。

从图 1 可以看出，距离频点最近的左右两条谱线所蕴含的幅值信息量最大，其次是外侧的两条谱线。三谱线插值算法采用频点左右的谱线加上这两条谱线外围两条谱线中的其中一条来求取信号幅值的大小，而并未利用外围的两条谱线的对称性。由图 1 (b)、图 1(d)可以看出，这两条谱线的幅值信息含量是基本上相同的。文中采用四谱线插值算法，充分利用了频点左右四条谱线的对称性，利用这四条谱线幅值来求取实际幅值和相位的大小。

1.2 算法原理

设一个幅值为  $A_0$ ，频率为  $f_0$ ，相位为  $\theta_0$  的单一频率信号为  $x(t)$ ，通过采样频率为  $f_s$  的采样信号进行采样后，得到的离散表达式为

$$x(n) = A_0 \sin(2\pi \frac{f_0}{f_s} n + \theta_0) \quad (1)$$

设该信号通过的窗函数时域为  $w(n)$ ，连续频谱为  $W(2\pi f)$ ，则加窗后该信号的连续傅里叶变换可以表示为

$$X(f) = \frac{A_0}{2j} \left[ e^{j\theta_0} W\left(\frac{2\pi(f-f_0)}{f_s}\right) - e^{-j\theta_0} W\left(\frac{2\pi(f+f_0)}{f_s}\right) \right] \quad (2)$$

如果忽略  $-f_0$  频点处频峰的旁瓣影响，在正频点  $f_0$  处的连续谱线函数可以表示为

$$X^+(f) = \frac{A_0}{2j} \left( e^{j\theta_0} W\left(\frac{2\pi(f-f_0)}{f_s}\right) \right) \quad (3)$$

对式(3)进行离散化，得到离散傅里叶变换的表达式为

$$X^+(n\Delta f) = \frac{A_0}{2j} \left( e^{j\theta_0} W\left(\frac{2\pi(n\Delta f-f_0)}{f_s}\right) \right) \quad (4)$$

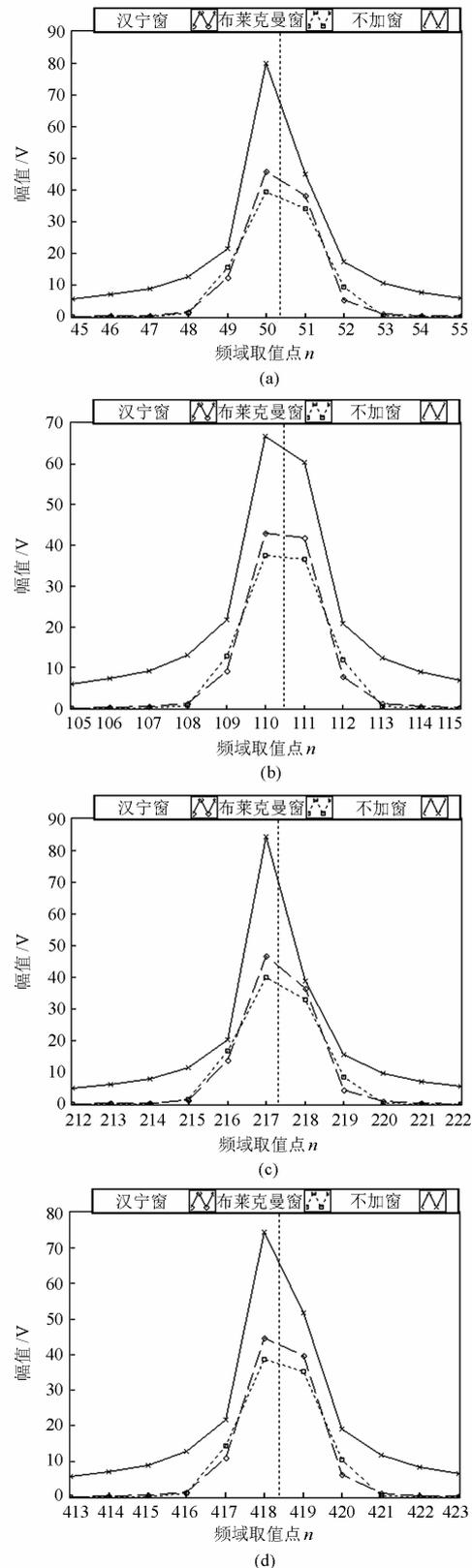


图 1 正弦信号频点附近谱线值

Fig. 1 Spectral values near the sinusoidal frequency discrete point

其中:  $\Delta f = \frac{f_s}{N}$ ;  $N$  为数据截断长度;  $n$  为非负整数。

因信号的非整周期截断和非同步采样, 由图 1 可看出, 通常峰值频率  $f_0 = k_0 \Delta f$  的谱线很难落到离散谱线的整数频点上, 设峰值频率左右四条谱线的频率分别为  $k_1 \Delta f$ 、 $k_2 \Delta f$ 、 $k_3 \Delta f$ 、 $k_4 \Delta f$ , 其中  $k_2 \Delta f$ 、 $k_3 \Delta f$  为距离峰值频点处最近的两条谱线,  $k_1 \Delta f$ 、 $k_4 \Delta f$  为距离峰值频点处次近的两条谱线, 则有  $k_1 < k_2 \leq k_0 \leq k_3 < k_4$ , 其中各值之间的关系为  $k_2 = k_1 + 1$ ,  $k_3 = k_2 + 1$ ,  $k_4 = k_3 + 1$ 。令四条谱线对应的幅值分别为  $y_1$ 、 $y_2$ 、 $y_3$ 、 $y_4$ , 令  $k_0$  处的幅值为  $y_0$ ,  $y_0 = X'(k_0 \Delta f)$ ,  $y_1 = X'(k_1 \Delta f)$ ,  $y_2 = X'(k_2 \Delta f)$ ,  $y_3 = X'(k_3 \Delta f)$ ,  $y_4 = X'(k_4 \Delta f)$ 。引入参数  $\alpha$ , 令  $\alpha = y_4 - y_0 - 1.5$ , 则  $-1.5 \leq \alpha \leq 1.5$ , 显然  $\alpha$  的取值范围关于原点对称, 求取  $\alpha$  的值即可求出幅相的信息。令  $r = 2y_2 + y_1$ ,  $s = 2y_3 + y_4$ , 则根据公式(4)并将  $\alpha$  带入, 得到

$$\bar{r} = 2 \cdot |W(2\pi(-\alpha - 0.5)/N)| + |W(2\pi(-\alpha - 1.5)/N)| \quad (5)$$

$$\bar{s} = 2 \cdot |W(2\pi(-\alpha + 0.5)/N)| + |W(2\pi(-\alpha + 1.5)/N)| \quad (6)$$

假设

$$\beta = \frac{(2 \cdot y_3 + y_4) - (2 \cdot y_2 + y_1)}{y_1 + 2 \cdot y_2 + 2 \cdot y_3 + y_4} \quad (7)$$

则有

$$\beta = \frac{\bar{s} - \bar{r}}{\bar{s} + \bar{r}} \quad (8)$$

当  $N$  较大时, 式(5)可以简写为  $\beta = t(a)$ , 其反函数可写作  $\alpha = t^{-1}(\beta)$ , 当窗函数为实系数时, 其幅频响应  $W(2\pi f)$  是偶对称的, 因而函数  $t(a)$  和  $t^{-1}(\beta)$  都是奇对称的。计算  $\alpha = t^{-1}(\beta)$  时, 可以采用多项式逼近法来计算。

由图 1 可知, 距离峰值频率最近的两条谱线所含信号幅值信息量最大, 故在计算时给与这两条谱线更大的加权值, 四条谱线的加权值分别为 1、2、2、1。则

$$A = \frac{y_1 + 2y_2 + 2y_3 + y_4}{s + r} \quad (9)$$

当  $N$  较大时, 式(7)可简化为

$$A = (y_1 + 2y_2 + 2y_3 + y_4) \cdot g(\alpha) \quad (10)$$

其中,  $g(\alpha)$  为偶函数。信号的相位可由式(3)得出

$$\theta_0 = \arg[X'(k_i \cdot \Delta f)] + \frac{\pi}{2} + \arg[W(2\pi \cdot (k_i - k_0)/N)] \quad (11)$$

其中,  $i$  可取数值 1、2、3、4, 分别对应第  $i$  条谱线。为方便计算, 在此文中选取  $i$  的值为 3, 则由式(9)可以推导出相位求解的简化形式为

$$\theta_0 = \arg[X'(k_3 \cdot \Delta f)] - \pi \alpha \quad (12)$$

通过求取参数  $\alpha$  值, 就可以求解出实际信号中的幅值和相位。

## 2 常用窗函数修正公式

为了使  $\alpha$  的值在数据拟合中保持小数点后八位精度, 文中采用对  $\alpha$  数值拟合时修正公式幂次数选为 9 次; 幅值的数据拟合采用修正项幂次数选为 6 次。通过软件拟合可以求出基于四谱线插值算法对应的常用窗函数修正公式, 常用窗函数修正公式如下所示。

### (1) 三角窗函数

$$w(n) = 1 - \left| \frac{2n - N}{N} \right| \quad n = (0, 1, 2, \dots, N-1)$$

$$\alpha = 0.08695078\beta^9 + 0.05413081\beta^7 + 0.09848901\beta^5 + 0.19393271\beta^3 + 0.95351622\beta$$

$$A_0 = (y_1 + 2y_2 + 2y_3 + y_4) \cdot (0.00314050\alpha^6 + 0.02490327\alpha^4 + 0.14371491\alpha^2 + 0.58438446)$$

### (2) Hanning 窗函数

$$w(n) = 0.5 - 0.5 \cos(2\pi n / N)$$

$$\alpha = 0.03135837\beta^9 + 0.03623969\beta^7 + 0.07297218\beta^5 + 0.18406363\beta^3 + 1.13013702\beta$$

$$A_0 = (y_1 + 2y_2 + 2y_3 + y_4) \cdot (0.00290262\alpha^6 + 0.02230426\alpha^4 + 0.13796175\alpha^2 + 0.53549874)$$

### (3) Hamming 窗函数

$$w(n) = 0.54 - 0.46 \cos(2\pi n / N)$$

$$\alpha = 0.05473977\beta^9 + 0.04743237\beta^7 + 0.08900271\beta^5 + 0.19398617\beta^3 + 0.99096971\beta$$

$$A_0 = (y_1 + 2y_2 + 2y_3 + y_4) \cdot (0.00321846\alpha^6 + 0.02379782\alpha^4 + 0.13485638\alpha^2 + 0.52971998)$$

### (4) Blackman 窗函数

$$w(n) = 0.42 - 0.5 \cos(2\pi n / N) + 0.08 \cos(4\pi n / N)$$

$$\alpha = 0.07479286\beta^9 + 0.08368569\beta^7 + 0.13923149\beta^5 + 0.29325314\beta^3 + 1.44648908\beta$$

$$A_0 = (y_1 + 2y_2 + 2y_3 + y_4) \cdot (0.00195521\alpha^6 + 0.01840317\alpha^4 + 0.13408202\alpha^2 + 0.57879566)$$

### 3 数值仿真及结果分析

#### 3.1 不同插值算法比较

##### 3.1.1 与双谱线插值算法比较

为验证该算法的有效性,本文采用信号仿真生成器生成仿真信号,通过数据采集卡对仿真信号进行数据采集,对添加 Hanning 窗、Hamming 窗、Blackman 窗三种窗函数进行仿真对比。根据电网中电量信号的谐波次数为奇数这一特点设置仿真参数,信号生成各次谐波的频率、幅值以及相位如表 1 所示。采样频率为 5 120 Hz,采样点数为 30 000。

表 1 基波与各次谐波的取样频率、幅值、相位

Table 1 Fundamental wave and every harmonic sampling frequency, amplitude and phase

谐波次数 $n$	频率/Hz	幅值/V	相位/(°)
基波	50.1	220	10
3	150.3	35	20
5	250.5	27	40
7	350.7	24	60
9	450.9	20	90
11	551.1	17	130
13	651.3	15	170
15	751.5	12	230
17	851.7	10	280

##### 3.1.2 与三谱线插值算法比较

为了与三谱线算法比较,本文采用参考文献[20]中的仿真信号进行比较,文献[20]采用的仿真信号的频率、幅值以及相位如表 2 所示。其中基波频率为 50.1 Hz,采样频率为 5 120 Hz,采样点数为 1 024。

表 2 仿真信号构成

Table 2 Components of simulated signal

谐波次数 $n$	幅值/V	相位/(°)
1	59.92	-43.1
2	1.198	113.6
3	5.982	-19.7
4	0.599	17.4
5	3.996	111.4
7	1.195	-16.8
9	0.798	-68.7

### 3.2 结果分析

#### 3.2.1 与双谱线插值算法比较分析

双谱线插值算法与四谱线插值算法在加汉宁窗、海明窗与布莱克曼窗三种窗函数的情况下,检测出来的幅值与相位的测量值如表 3、表 4 所示。幅值与相位的测量误差结果如表 5、表 6 所示。本文图表中采用的算数符号  $a \cdot E - b$  表示为  $a \times 10^{-b}$ ,其中  $a$  与  $b$  为常数。

表 3 不同加窗插值算法对应的幅值测量结果

Table 3 Amplitude of measured results corresponded to different window interpolation algorithms

谐波次数 $n$	V					
	Hanning 窗函数		Hamming 窗函数		Blackman 窗函数	
	双谱线	四谱线	双谱线	四谱线	双谱线	四谱线
1	219.999 972 50	219.999 997 91	219.998 732 61	219.999 772 36	219.999 991 61	220.000 000 29
3	35.000 006 03	35.000 000 34	35.000 002 27	34.999 999 79	35.000 001 87	35.000 000 38
5	27.000 000 48	26.999 999 87	27.000 128 66	27.000 023 18	27.000 000 15	27.000 000 09
7	23.999 996 57	23.999 999 79	24.000 038 07	24.000 007 67	23.999 998 93	24.000 000 03
9	19.999 999 47	19.999 999 55	19.999 995 58	19.999 998 86	19.999 999 83	19.999 999 90
11	16.999 998 54	16.999 999 96	17.000 004 42	17.000 001 22	16.999 999 55	17.000 000 07
13	14.999 999 42	14.999 999 87	14.999 967 95	14.999 994 33	14.999 999 82	15.000 000 02
15	12.000 002 27	12.000 000 12	12.000 020 94	12.000 003 45	12.000 000 70	12.000 000 03
17	9.999 999 16	9.999 999 93	9.999 996 19	9.999 999 54	9.999 999 75	10.000 000 03

表 4 不同加窗插值算法对应的相位测量结果

Table 4 Phase of measured results corresponded to different window interpolation algorithms

谐波次数 $n$	(°)					
	Hanning 窗函数		Hamming 窗函数		Blackman 窗函数	
	双谱线	四谱线	双谱线	四谱线	双谱线	四谱线
1	9.999 999 69	9.999 999 72	10.013 407 16	10.002 744 47	9.999 999 93	9.999 999 91
3	20.000 000 01	20.000 000 23	19.997 891 01	19.997 787 96	20.000 000 07	19.999 999 99
5	40.000 000 00	39.999 999 94	39.996 501 84	39.998 270 47	40.000 000 09	39.999 999 87
7	60.000 000 00	60.000 000 32	59.999 416 99	59.999 886 20	60.000 000 24	59.999 999 91
9	90.000 000 00	90.000 000 36	90.000 063 13	90.000 028 47	90.000 000 18	89.999 999 87
11	130.000 000 00	129.999 999 57	129.999 924 92	129.999 829 05	129.999 999 76	130.000 000 08
13	170.000 000 00	170.000 000 15	169.998 672 85	169.999 409 00	169.999 999 97	170.000 000 15
15	-130.000 000 0	-130.000 000 29	-129.998 787 32	-129.999 639 23	-130.000 000 04	-129.999 999 99
17	-80.000 000 00	-79.999 999 78	-80.001 290 10	-80.000 894 86	-80.000 000 13	-79.999 999 94

表 5 不同加窗插值算法对应的幅值误差

Table 5 Amplitude errors of different window interpolation algorithms

谐波 次数 $n$	V					
	Hanning 窗函数		Hamming 窗函数		Blackman 窗函数	
	双谱线	四谱线	双谱线	四谱线	双谱线	四谱线
1	-2.7E-5	-2.1E-6	-1.27E-3	2.3E-4	-8.4E-6	2.9E-7
3	6.03E-6	3.4E-7	2.27E-6	-2.1E-7	1.87E-6	3.8E-7
5	4.8E-7	-1.3E-7	1.29E-4	2.32E-5	1.5E-7	9E-8
7	-3.4E-6	-2.1E-7	3.81E-5	7.67E-6	-1.1E-6	3E-8
9	-5.3E-7	-4.5E-7	-4.4E-6	-1.1E-6	-1.7E-7	-1E-7
11	1.5E-6	-4E-8	4.42E-6	1.22E-6	-4.5E-7	7E-8
13	-5.8E-7	-1.3E-7	-3.2E-5	-5.7E-6	-1.8E-7	2E-8
15	2.27E-6	1.2E-7	2.09E-5	3.45E-6	7E-7	3E-8
17	-8.4E-7	-7E-8	-3.8E-6	-4.6E-7	-2.5E-7	3E-8

表 6 不同加窗插值算法对应的相位误差

Table 6 Phase errors of different window interpolation algorithms

谐波 次数 $n$	(°)					
	Hanning 窗函数		Hamming 窗函数		Blackman 窗函数	
	双谱线	四谱线	双谱线	四谱线	双谱线	四谱线
1	-3.1E-7	-2.8E-7	1.34E-2	2.74E-3	-7E-8	-9E-8
3	1E-8	2.3E-7	-2.11E-3	-2.21E-3	7E-8	-1E-8
5	0	-6E-8	-3.5E-3	-1.73E-3	9E-8	-1.3E-7
7	0	3.2E-7	-5.8E-4	-1.1E-4	2.4E-7	-9E-8
9	0	3.6E-7	6.31E-5	2.85E-5	1.8E-7	-1.3E-7
11	0	-4.3E-7	-7.5E-5	-1.7E-4	-2.4E-7	8E-8
13	0	1.5E-7	-1.33E-3	-5.9E-4	-3E-8	1.5E-7
15	0	-2.9E-7	1.21E-3	3.61E-4	-4E-8	1E-8
17	0	2.2E-7	-1.29E-3	-8.9E-4	-1.3E-7	6E-8

通过表 5 可以看出, 在不同的窗函数条件下, 四谱线差值算法的检测精度要比双谱线插值算法的检测精度高。从表 6 可以看出, 在加海明窗与布莱克曼窗函数条件下, 对相位的检测精度也有了一定的提高。在相位修正公式中  $\alpha$  与  $\beta$  的拟合程度越高, 相位检测的结果精度越高, 而双谱线插值中汉宁窗因  $\alpha$  与  $\beta$  的一阶线性关系, 其相位检测精度虽

然最高, 但是其幅值检测的精度相对其他窗函数来说是最底的。在对幅值检测要求高的电网谐波检测中, 通过表 5、表 6 可以看出四谱线插值算法具有更高的检测准确性。

### 3.2.2 与三谱线插值算法比较分析

文中选用与文献[20]中相同的采样频率以及采样数, 测量结果中幅值与相位误差如表 7、表 8 所示。

表 7 不同窗函数的幅值绝对误差

Table 7 Comparison of absolute error of amplitude in different window functions

谐波 次数 $n$	%					
	Hanning 窗		Hamming 窗		Blackman 窗	
	三谱线	四谱线	三谱线	四谱线	三谱线	四谱线
1	-7.83E-6	5.94E-6	-3.66E-6	-1.79E-6	-2.79E-6	1.50E-7
2	1.83E-3	-2.5E-6	4.63E-3	1.39E-3	5.76E-4	-2.6E-6
3	2.63E-5	5.18E-6	3.93E-4	-2.13E-4	8.94E-6	1.34E-6
4	1.44E-3	1.67E-6	5.66E-2	1.34E-3	-4.84E-4	0
5	-5.53E-6	-5.01E-7	1.82E-4	2.35E-4	-2.69E-6	-1.25E-6
7	4.77E-5	-8.37E-7	4.74E-3	-1.68E-3	1.73E-5	1.67E-6
9	-7E-6	-1.25E-6	1.1E-2	4.14E-4	-4.3E-7	-1.25E-7

表 8 不同窗函数对应的相位绝对误差

Table 8 Comparison of absolute error of amplitude in different window functions

谐波 次数 $n$	Hanning 窗		Hamming 窗		Blackman 窗	
	三谱线	四谱线	三谱线	四谱线	三谱线	四谱线
1	1.4E-4	1.3E-4	-6.44E-3	1.17E-3	5.39E-5	8.64E-6
2	7.16E-2	-4.4E-6	1.65E-1	2.24E-3	3.31E-2	-3.7E-6
3	-1.27E-3	3.64E-5	1.52E-2	-2.1E-2	-5.91E-4	1.76E-5
4	-8.41E-2	1.2E-7	1.16	-7E-3	-3.56E-2	7.1E-7
5	-5.64E-4	2.8E-6	9.46E-2	-1.86E-3	-2.00E-4	1.3E-6
7	2.24E-3	4.62E-6	-1.98E-1	2.14E-2	9.54E-4	2.49E-6
9	1.27E-3	2.81E-6	-4.01E-1	-8.98E-3	4.97E-4	1.35E-6

通过表 7、表 8 可以看出,在选择与文献[20]相同仿真条件的情况下,四谱线插值算法在幅值检测与相位检测上误差更小,检测精度更高。由此可知,四谱线差值算法在幅值检测与相位检测方面都要优于三谱线插值算法。

#### 4 结论

使用快速傅里叶变换算法在求解各次谐波幅值与相位时,因频谱泄露产生的误差可以采用加窗函数和插值算法来减小。本文提出的四谱线插值算法,在对电网中谐波的幅值与相位检测上与已知的双谱线插值算法与三谱线插值算法相比,具有更高的检测精度。基于四谱线插值算法,文中给出了常用窗函数对应的修正公式。通过仿真分析,显示了该算法在高精度分析谐波成分时具有较好的实用价值。

#### 参考文献

- [1] JAIN V K, COLLINS W L. High-accuracy analog measurements via interpolated FFT[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 1979, 28(2): 113-122.
- [2] MARANO S, MATTA V, WILLETT P. Sequential detection of almost-harmonic signals[J]. IEEE Trans on Signal Processing, 2003, 51(2): 395-405.
- [3] HIDALGO R M, FERNANDEZ J G, RIVERA R R, et al. A simple adjustable window algorithm to improve FFT measurements[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 2002, 51(1): 31-36.
- [4] 王刘旺, 黄建才, 孙建新, 等. 基于加汉宁窗的 FFT 高精度谐波检测改进算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(24): 28-33.  
WANG Liu-wang, HUANG Jian-cai, SUN Jian-xin, et al. An improved precise algorithm for harmonic analysis

- based on Hanning-windowed FFT[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(24): 28-33.
- [5] 庞浩, 李东霞, 俎云霄, 等. 应用 FFT 进行电力系统谐波分析的改进算法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 49-54.  
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): 49-54.
- [6] AKAGI H. New trends in active filters for power conditioning[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1996, 32(6): 1312-1322.
- [7] 耿涛, 赵金. 改进低通滤波器的瞬时无功功率谐波电流检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(6): 53-56.  
GENG Tao, ZHAO Jin. Instantaneous reactive power theory harmonic detection method based on improved lowpass filter[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(6): 53-56.
- [8] 陆秀令, 周腊吾. 基于瞬时无功功率的谐波电压检测方法[J]. 高电压技术, 2006, 32(1): 88-90.  
LU Xiu-ling, ZHOU La-wu. Detecting method of harmonic voltage based on instantaneous reactive power theory[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(1): 88-90.
- [9] 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. Real time detecting method for single-phase reactive and harmonics currents detection without PLL[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 178-182.

- [10] CHANG G W, CHEN C I, TENG Y F. Radial-basis-function-based neural network for harmonic detection[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2010, 57(6): 2171-2179.
- [11] 侯世英, 汪瑶, 祝石厚. 遗传算法改进神经网络的电力系统谐波检测法[J]. 重庆大学学报, 2008, 31(5): 491-494.  
HOU Shi-ying, WANG Yao, ZHU Shi-hou. A harmonic measuring approach based on genetic algorithm improved back-propagation neural network[J]. Journal of Chongqing University, 2008, 31(5): 491-494.
- [12] 王凯亮, 曾江, 王克英. 一种基于 BP 神经网络的谐波检测方案[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 44-48.  
WANG Kai-liang, ZENG Jiang, WANG Ke-ying. A harmonic detecting scheme based on BP neural network[J]. Power System protection and Control, 2013, 41(17): 44-48.
- [13] 兰华, 李龙飞, 王韵然, 等. 改进单峰谱线插值算法在谐波检测中的应用[J]. 东北电力大学学报, 2009, 29(4): 26-29.  
LAN Hua, LI Long-fei, WANG Yun-ran, et al. An application in harmonic detection using an improved single-spectral-line interpolation algorithm[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2009, 29(4): 26-29.
- [14] 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.
- [15] 李绍铭, 纪萍, 彭玉龙. 基于加窗插值 FFT 和动态频率的谐波检测算法[J]. 自动化与仪器仪表, 2009(3): 93-95.  
LI Shao-ming, JI Ping, PENG Yu-long. Harmonic detection method based on interpolation FFT window and dynamic frequency[J]. Automation & Instrumentation, 2009(3): 93-95.
- [16] 曾博, 滕邵胜, 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): 154-159.  
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): 154-159.
- [17] 龚仁喜, 周希松, 宁存岱, 等. 基于 LabVIEW 的 FFT 加窗插值算法在谐波检测中的应用[J]. 重庆理工大学学报: 自然科学, 2010, 24(5): 64-70.  
GONG Ren-xi, ZHOU Xi-song, NING Cun-dai, et al. Windowed interpolation algorithm in FFT for harmonics detection based on LabVIEW[J]. Journal of Chongqing University of Technology: Natural Science, 2010, 24(5): 64-70.
- [18] 王继东, 杜旭浩, 杨帆. 基于三次样条插值信号重构的微网谐波及间谐波分析算法[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 7-11.  
WANG Ji-dong, DU Xu-hao, YANG Fan. A cubic spine interpolation signal reconstruction-based harmonic and inter-harmonic analysis algorithm for microgrid[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 7-11.
- [19] 杨晓萍, 刘普森, 钟彦儒. 基于经验模式分解的有源滤波器谐波检测[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 197-202.  
YANG Xiao-ping, LIU Pu-sen, ZHONG Yan-ru. Harmonic detection of active power filter based on empirical mode decomposition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(5): 197-202.
- [20] 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.

收稿日期: 2013-12-09; 修回日期: 2014-02-25

作者简介:

郝柱(1987-), 男, 硕士研究生, 从事船舶、港口及自动化技术研究; E-mail: hz06022094@126.com

顾伟(1957-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为港口、船舶自动控制技术;

褚建新(1955-), 男, 教授, 博导, 主要研究方向为电气传动及自动化技术。