

# 凯塞窗插值 FFT 的电力谐波分析与应用

高云鹏, 滕召胜, 温和, 曾博

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410082)

## Harmonic Analysis Based on Kaiser Window Interpolation FFT and Its Application

GAO Yun-peng, TENG Zhao-sheng, WEN He, ZENG Bo

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, Hunan Province, China)

**ABSTRACT:** The fundamental windows such as the rectangular window and triangular window and generalized cosine windows can be used to eliminate the errors caused by spectral leakage and picket fence effect under the non-integral period truncation conditions, but effect is restricted by the performance of the fixed side lobes of these windows. The free characteristics of the major lobe and side lobes of the Kaiser window are discussed in this paper, and an approach for the harmonic analysis based on Kaiser window interpolation fast Fourier transform (FFT) is proposed. The mathematic models of odd and even harmonic solutions and the rectification formulas of the interpolation were established. The arithmetic expressions of fundamental and harmonic frequencies, amplitudes and initial phases were deduced. The simulation and test results show that the approach based on Kaiser window interpolation FFT can be designed and realized easily and restrain spectral leakage effectively. The error of fundamental active power measurement on the three-phase multi-functional harmonic energy meter based on this approach is below or equal to 0.2% and the error of fundamental reactive power measurement below or equal to 1%. Data results of the harmonic analysis meet the accuracy requirement according to GB/T 14549—1993.

**KEY WORDS:** harmonic analysis; Kaiser window; interpolation fast Fourier transform (FFT); spectral leakage; energy measurement

**摘要:** 采用矩形窗、三角窗等基本窗函数和广义余弦窗函数对信号加权可减少非整数周期截断造成的频谱泄漏和栅栏效应的影响,但其效果受到窗函数固定旁瓣性能的制约。通过分析凯塞(Kaiser)窗函数的主瓣与旁瓣衰减可自由选择特性,提出基于Kaiser窗插值快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)的电力谐波分析方法,建立奇次、偶次谐波

求解的数学模型和实用的插值修正公式,推导信号基波与各次谐波频率、幅值、初相角的计算式。仿真和实测结果表明,Kaiser窗插值FFT方法设计实现灵活、抑制频谱泄漏效果好,据此研制的三相多功能谐波电能表的基波有功误差 $\leq 0.2\%$ ,基波无功误差 $\leq 1\%$ ,2~21次谐波分析满足GB/T 14549—1993的A类谐波测量仪器要求。

**关键词:** 谐波分析; Kaiser窗; 插值快速傅里叶变换; 频谱泄漏; 电能计量

## 0 引言

高精度谐波分析对电能计量、谐波潮流计算、电力系统谐波补偿与抑制等有重要意义<sup>[1-2]</sup>。采用快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)算法进行谐波分析,非整周期截断时产生频谱泄漏和栅栏效应,影响谐波分析精度<sup>[3-4]</sup>。针对FFT算法的不足,国内外学者提出了一系列加窗插值FFT算法。V. K. Jain等提出基于矩形窗的插值算法,可有效提高计算精度<sup>[5]</sup>。此后,Hanning窗<sup>[6]</sup>、Blackman-Harris窗<sup>[7]</sup>、Rife-Vincent(I)窗<sup>[8]</sup>、Nuttall窗<sup>[9-10]</sup>和矩形卷积窗<sup>[11]</sup>等被提出并被运用到FFT谐波分析中。基于余弦组合窗的插值FFT算法<sup>[12-14]</sup>、基于矩形窗的多谱线插值算法<sup>[15]</sup>和采用多项式拟合的双谱线插值方法<sup>[16]</sup>等高精度插值FFT算法相继被提出,提高了谐波分析精度。

采用矩形窗、三角窗等基本窗函数和广义余弦窗函数对信号加权,对于动态信号分析效果受到窗函数固定旁瓣性能的制约<sup>[7,9]</sup>。Kaiser窗可定义一组可调的窗函数,其主瓣能量和旁瓣能量的比例近乎最大,且可自由选择主瓣宽度和旁瓣高度之间的比重<sup>[17-18]</sup>。本文对信号在整周期截断和非整周期截断时的频谱进行分析,讨论Kaiser窗的频谱特性,提出基于Kaiser窗插值FFT的电力谐波分析算法,建立

基金项目: 国家自然科学基金项目(60872128)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (60872128).

奇次、偶次谐波求解的数学模型和实用的插值修正公式, 推导信号基波与各次谐波频率、幅值和初相角计算式, 采用包含 21 次谐波的动态信号仿真和三相谐波电能表应用实践进一步证明本文方法的有效性和准确性。

## 1 FFT 分析的频谱泄漏问题

含谐波分量的信号  $x(t)$  以采样频率  $f_s$  均匀采样得到的离散时间信号为

$$x(n) = \sum_{h=1}^H A_h \sin(2\pi \frac{r_h f_1}{f_s} n + \varphi_h) \quad (1)$$

式中:  $H$  为谐波的个数; 当  $h=1$  时,  $r_h=1$ ,  $f_1$ 、 $A_1$ 、 $\varphi_1$  分别为基波的频率(Hz)、幅值(V)和初相位( $^\circ$ ); 当  $h \neq 1$  时,  $r_h$ 、 $A_h$ 、 $\varphi_h$  分别为第  $h$  项谐波的次数、幅值(V)和初相位( $^\circ$ )。

对  $x(n)$  加矩形窗得到  $x_w(n) = x(n)w(n)$ ,  $x_w(n)$  的连续傅里叶变换为

$$X_w(f) = \sum_{-\infty}^{\infty} x(n)w(n)e^{-j2\pi n f} = \sum_{h=1}^H \frac{A_h}{2j} [e^{j\varphi_h} W_R(\frac{2\pi(f-r_h f_1)}{f_s}) - e^{-j\varphi_h} W_R(\frac{2\pi(f+r_h f_1)}{f_s})] \quad (2)$$

式中  $W_R(\cdot)$  为矩形窗频谱函数, 表达式为

$$W_R(f) = \frac{\sin(Nf/2)}{\sin(f/2)} e^{-j\frac{N-1}{2}f} \quad (3)$$

对式(2)进行离散抽样, 并忽略负频点  $-r_h f_1$  处频峰的旁瓣影响, 得到信号加矩形窗后的离散傅里叶变换表达式为

$$X(k\Delta f) = \sum_{h=1}^H \frac{A_h}{2j} e^{j\varphi_h} W_R(\frac{2\pi(k\Delta f - r_h f_1)}{f_s}) \quad (4)$$

式中离散抽样间隔为  $\Delta f = f_s/N$ ,  $N$  为数据截断长度。

为便于分析, 假设信号  $x(t)$  为双频率信号:

$$x(t) = x_1(t) + x_2(t) = \cos(2\pi f_1 t) + 0.5\cos(2\pi f_2 t) \quad (5)$$

式中  $f_2 = 2f_1$ 。对其进行整周期截断后的频谱如图 1 所示, 各离散点上的 FFT 频谱与信号的理想谱一致, 是一个单位冲击。非整数周期截断后的频谱如图 2 所示。

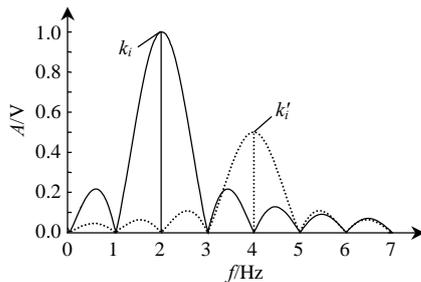


图 1 整周期截断后的频谱

Fig. 1 Spectrum by integral period truncation

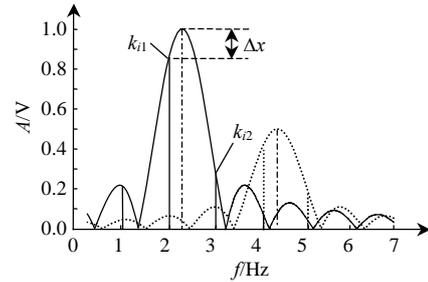


图 2 非整周期截断后的频谱

Fig. 2 Spectrum by non-integral period truncation

由图 2 可知, 信号峰值观测点出现偏差 ( $\Delta x$ ), 即短范围泄漏。同时, 信号时域截断时相邻频谱旁瓣间的相互干扰造成长范围泄漏。因此, 为降低频谱泄漏, 应选择旁瓣峰值电平小且旁瓣渐近衰减速率大的窗函数对信号进行处理。

## 2 基于 Kaiser 窗的电力谐波分析方法

### 2.1 Kaiser 窗

Kaiser 窗可自定义一组可调的窗函数, 它由 0 阶贝塞尔函数构成, 其主瓣能量与旁瓣能量之比近乎最大, 且可自由选择主瓣宽度和旁瓣高度间的比重, 其时域表示<sup>[17-18]</sup>为

$$w(n) = \frac{I_0(\beta \sqrt{1 - (\frac{n}{N/2})^2})}{I_0(\beta)}, \quad 0 \leq n \leq N/2 \quad (6)$$

式中:  $I_0(\beta)$  为第 1 类变形 0 阶贝塞尔函数;  $\beta$  为窗函数的形状参数;  $N$  为窗函数的长度。图 3 给出了  $\beta = [0, 4, 8, 11]$  时 Kaiser 窗的归一化对数频谱。  $\beta$  值越大, Kaiser 窗函数频谱的旁瓣峰值越小, 渐近衰减速率越大。

由图 3 可知, 当  $\beta=0$  时, Kaiser 窗退化为矩形

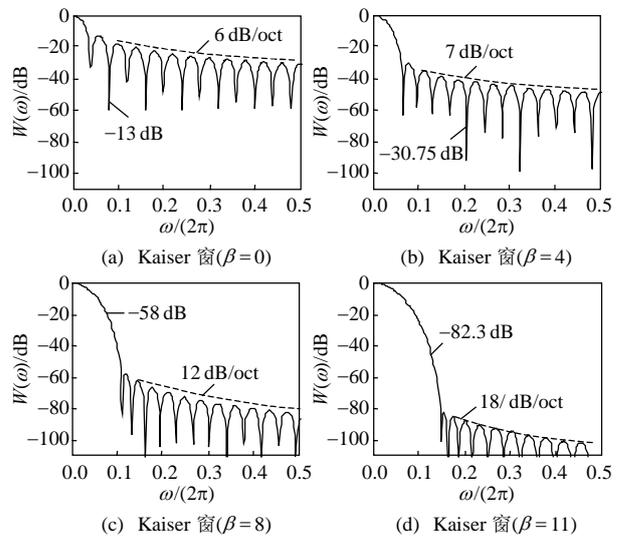


图 3 Kaiser 窗的归一化对数频谱

Fig. 3 Normalized logarithm spectrum of Kaiser windows

窗函数；当 $\beta=11$ 时，Kaiser窗旁瓣渐进衰减速率为18 dB/oct，旁瓣峰值电平达到了-82.3 dB，继续增加 $\beta$ 值，旁瓣峰值电平将继续下降，渐进衰减速率继续增加。因此，本文采用 $\beta=11$ 时的Kaiser窗对输入信号进行处理，足够满足谐波分析的精度要求。

### 2.2 基于 Kaiser 窗插值的 FFT 算法

用窗函数  $w(n)$ 对式(1)形式的信号  $x(n)$ 进行处理，得到加窗后信号的离散傅里叶变换表达式：

$$X_w(k\Delta f) = \sum_{h=1}^H \frac{A_h}{2j} e^{j\varphi_h} W[2\pi(k\Delta f - r_h f_1) / f_s] = \sum_{h=1}^H \frac{A_h}{2j} e^{j\varphi_h} W[2\pi(k - k_h) / N] \quad (7)$$

式中： $r_h f_1 = k_h \Delta f$ 为第 $h$ 项谐波的频率； $W(\cdot)$ 是Kaiser窗的连续频谱函数，其频域表示<sup>[17-18]</sup>为

$$W(w) = \frac{N}{I_0(\beta)} \frac{\sinh[\sqrt{\beta^2 - (Nw/2)^2}]}{\sqrt{\beta^2 - (Nw/2)^2}} \quad (8)$$

不失一般性，设需要测量的为第 $i(i \leq H)$ 项谐波，为简单起见，忽略其余各次谐波对第 $i$ 项谐波的泄漏影响，此时，式(7)变为

$$X'_w(k\Delta f) = \frac{A_i}{2j} e^{j\varphi_i} W[2\pi(k - k_i) / N] \quad (9)$$

由于栅栏效应，第 $i$ 项谐波的频率 $k_i \Delta f$ 很难正好位于抽样频点上，即 $k_i$ 一般不是整数。

设在峰值频点附近抽样得到的幅值最大和次最大谱线分别为 $k_{i1}$ 和 $k_{i2}$ ， $k_{i1} \leq k_i \leq k_{i2}(=k_{i1}+1)$ ，这两条谱线的幅值分别为 $y_1 = |X'_w(k_{i1} \Delta f)|$ 和 $y_2 = |X'_w(k_{i2} \Delta f)|$ 。由于 $0 \leq k_i - k_{i1} \leq 1$ ，引入参数 $\lambda_i = k_i - k_{i1}$  ( $\lambda_i \in [0,1]$ )，有

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{|W(2\pi(k_{i1} - k_i) / N)|}{|W(2\pi(k_{i2} - k_i) / N)|} = \frac{|W(-2\pi\lambda_i / N)|}{|W(2\pi(1 - \lambda_i) / N)|} \quad (10)$$

设 $\beta = \pi\alpha$ ，同时将式(8)中频域信号平移 $(N-1)/2$ ，使其满足 $[0, N-1]$ 范围，有

$$W(w) = \frac{N-1}{I_0(\pi\alpha)} \frac{\sinh\{\sqrt{(\pi\alpha)^2 - [(N-1)w/2]^2}\}}{\sqrt{(\pi\alpha)^2 - [(N-1)w/2]^2}} e^{-j\frac{N-1}{2}w} \quad (11)$$

设 $w = 2\pi k/N$ ，由式(10)、(11)，可得

$$\frac{y_1}{y_2} = \frac{|\sinh(\pi\sqrt{\alpha^2 - \lambda_i^2})| \|\pi\sqrt{\alpha^2 - (1 - \lambda_i)^2}\|}{|\pi\sqrt{\alpha^2 - \lambda_i^2}\| \|\sinh[\pi\sqrt{\alpha^2 - (1 - \lambda_i)^2}]\|} \quad (12)$$

式(12)为 $\lambda_i$ 的一元超越方程，求出此方程在区间 $[0,1]$ 内的正解，代入式(7)即可求得各次谐波的频率、幅值和初相角。

### 2.3 Kaiser 窗插值修正公式

由式(12)可知，如何准确求出 $\lambda_i$ 值，是整个插

值算法的核心问题<sup>[14]</sup>。由于电力系统中，偶次谐波比重不大，为提高谐波分析精度，借助Matlab平台中的solve(·)函数求解一元超越方程<sup>[19]</sup>，并针对奇次谐波和偶次谐波分别求取插值修正公式。

对于第 $j$ 次奇次谐波，由 $\lambda_j = \text{solve}('y(\lambda_j) = 0')$ 求得参数 $\lambda_j$ ，可得第 $j$ 次谐波的频率为

$$f_j = (k_{j1} + \lambda_j) f_s / N \quad (13)$$

幅值为

$$A_j = \frac{2y_{j1} I_0(\beta) \sqrt{\beta^2 - (\pi\lambda_j)^2}}{N |\sinh(\sqrt{\beta^2 - (\pi\lambda_j)^2})|} \quad (14)$$

相位为

$$\varphi_j = \arg[X'_w(k_{j1} \Delta f)] + \pi/2 - (N-1)\lambda_j \pi / N \quad (15)$$

对于第 $l$ 次偶次谐波，由 $\lambda_l = \text{solve}('y(1/\lambda_l) = 0')$ 求得参数 $\lambda_l$ ，可得第 $l$ 次谐波的频率为

$$f_l = [k_{l2} + (1 - \lambda_l)] f_s / N \quad (16)$$

幅值为

$$A_l = \frac{2y_{l2} I_0(\beta) \sqrt{\beta^2 - (\pi\lambda_l)^2}}{N |\sinh(\sqrt{\beta^2 - (\pi\lambda_l)^2})|} \quad (17)$$

相位为

$$\varphi_l = \arg[X'_w(k_{l2} \Delta f)] + \pi/2 - (N-1)(1 - \lambda_l) \lambda_l \pi / N \quad (18)$$

## 3 仿真实验研究

### 3.1 与经典窗插值 FFT 谐波分析算法的比较

采用文献[5,20]等给出的信号模型进行仿真实验，设无噪声信号的表达式为

$$x(n) = A_0 + A_1 \sin(2\pi h f_1 n / N + \varphi_1) + A_3 \sin(2\pi h f_3 n / N + \varphi_3) \quad (19)$$

式中： $A_0 = 0.2 \text{ V}$ ； $A_1 = 6 \text{ V}$ ； $A_3 = 1 \text{ V}$ ； $f_1 = 20.2 \text{ Hz}$ ； $f_3 = 60.6 \text{ Hz}$ ； $\varphi_1 = 0.1^\circ$ ； $\varphi_3 = 0^\circ$ 。式(19)已被众多文献用来验证算法的有效性。本文分别选取矩形窗、Hanning窗和Kaiser窗进行仿真，结果如表1所示。

表1 不同加窗插值 FFT 算法仿真结果对比

Tab. 1 Comparison of simulation results from different windowed interpolation FFT algorithms

窗函数	$N$	$A_0/\text{V}$	$A_1/\text{V}$	$f_i/\text{Hz}$
矩形窗 <sup>[5]</sup>	2048	$-4.0 \times 10^{-2}$	$-1.0 \times 10^{-3}$	$2.0 \times 10^{-4}$
Hanning <sup>[6]</sup>	2048	$-1.7 \times 10^{-7}$	$1.2 \times 10^{-8}$	$1.6 \times 10^{-7}$
Kaiser	2048	$-6.0 \times 10^{-3}$	$-2.3 \times 10^{-3}$	$-1.5 \times 10^{-4}$
窗函数	$\varphi_1/(\circ)$	$A_3/\text{V}$	$f_3/\text{Hz}$	$\varphi_3/(\circ)$
矩形窗 <sup>[5]</sup>	$7.0 \times 10^{-3}$	$-2.0 \times 10^{-3}$	$-6.0 \times 10^{-4}$	$3.0 \times 10^{-3}$
Hanning <sup>[6]</sup>	$-1.0 \times 10^{-4}$	$-5.5 \times 10^{-6}$	$-9.0 \times 10^{-6}$	$7.0 \times 10^{-4}$
Kaiser	$1.1 \times 10^{-4}$	$-4.1 \times 10^{-4}$	$-1.7 \times 10^{-3}$	$1.1 \times 10^{-3}$

从表1中数据可知，Kaiser窗( $\beta=11$ )具有良好的频谱泄漏抑制作用，与矩形窗、Hanning窗加窗处理比较，部分分析结果得到提高，且整体分析精

度满足电力谐波分析的嵌入式系统实现要求。

### 3.2 复杂信号的谐波分析

结合文中的三相谐波电能表设计,进行21次谐波仿真分析。仿真采用的信号模型为

$$x(n) = \sum_{i=1}^{21} A_i \sin(2\pi i \frac{f_1}{f_s} n + \varphi_i) \quad (20)$$

式中:基波频率 $f_1$ 为50.5 Hz;采样频率 $f_s$ 为2520.6 Hz;截断信号的数据长度 $N$ 为1024点; $A_i$ 、 $\varphi_i$ 分别为基波和各次谐波的幅值和初相位,如表2所示。仿真实验程序流程如图4所示。

表2 仿真信号的基波及谐波成分

Tab. 2 Components of the simulated harmonic signal

$h$	$A_h/V$	$\varphi_h/(\circ)$	$h$	$A_h/V$	$\varphi_h/(\circ)$	$h$	$A_h/V$	$\varphi_h/(\circ)$
1	220.0	2.05	8	1.90	56.0	15	1.000	-65.0
2	4.4	39.00	9	2.30	103.1	16	0.060	53.1
3	10.0	60.50	10	0.80	-59.0	17	0.400	-132.0
4	3.0	29.00	11	1.10	56.1	18	0.040	85.0
5	6.0	-52.70	12	0.70	40.0	19	0.300	65.8
6	2.1	146.00	13	0.85	60.5	20	0.005	53.0
7	3.2	97.00	14	0.10	75.0	21	0.010	112.0

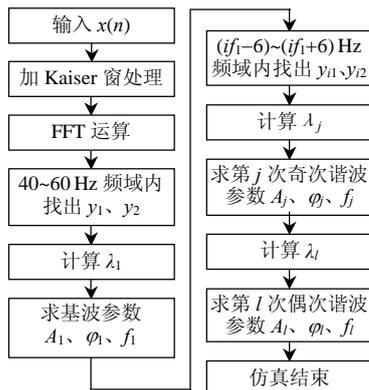


图4 仿真实验程序流程图

Fig. 4 Program flow diagram for the simulation experiment

采用本文算法进行仿真,选取Kaiser窗长度为 $N=1024$ , $\beta=11$ ,频率计算误差为 $-1.02 \times 10^{-4}\%$ ,其余仿真结果如表3所示。

表3 幅值、相位的相对误差

Tab. 3 Comparison of relative errors in calculating amplitude and phase

谐波次数	幅值误差/%	相角误差/%	谐波次数	幅值误差/%	相角误差/%
1	$-7.5 \times 10^{-2}$	$1.8 \times 10^{-1}$	12	$8.4 \times 10^{-2}$	$-6.1 \times 10^{-1}$
2	$-9.8 \times 10^{-2}$	$-4.0 \times 10^{-1}$	13	$8.2 \times 10^{-2}$	$-6.9 \times 10^{-1}$
3	$-7.8 \times 10^{-2}$	$-6.1 \times 10^{-1}$	14	$8.7 \times 10^{-2}$	$-2.6 \times 10^{-1}$
4	$9.1 \times 10^{-2}$	$-6.6 \times 10^{-1}$	15	$8.0 \times 10^{-2}$	$6.6 \times 10^{-1}$
5	$7.7 \times 10^{-2}$	$7.0 \times 10^{-1}$	16	$7.9 \times 10^{-2}$	$-4.3 \times 10^{-1}$
6	$-9.1 \times 10^{-2}$	$-1.4 \times 10^{-1}$	17	$8.6 \times 10^{-2}$	$-3.5 \times 10^{-1}$
7	$8.2 \times 10^{-2}$	$-4.2 \times 10^{-1}$	18	$8.9 \times 10^{-2}$	$-2.1 \times 10^{-1}$
8	$8.6 \times 10^{-2}$	$-3.9 \times 10^{-1}$	19	$8.3 \times 10^{-2}$	$-6.7 \times 10^{-1}$
9	$8.3 \times 10^{-2}$	$-4.0 \times 10^{-1}$	20	$8.0 \times 10^{-2}$	$-6.0 \times 10^{-1}$
10	$8.3 \times 10^{-2}$	$4.3 \times 10^{-1}$	21	$4.8 \times 10^{-2}$	$-1.1 \times 10^{-1}$
11	$7.7 \times 10^{-2}$	$-7.0 \times 10^{-1}$	—	—	—

为减少计算量,分析中 $\beta$ 仅取11,如果增大 $\beta$ 值,分析结果准确度将更高。仿真结果表明,Kaiser窗具有很好的抑制频谱泄漏能力,插值FFT算法能有效消除栅栏效应的影响,因此,本文算法能有效消除各次谐波间的相互干扰,实现电力谐波的高精度分析。

## 4 实际应用

基于本文提出的基于Kaiser窗插值FFT的电力谐波分析方法设计的三相多功能谐波电能表研制成功后,在湖南省电力公司计量中心进行了大量的试验与测试检验。

实验选择基波功率叠加15次谐波功率为例。其中,基波电压为220 V,基波电流为1.5 A。基波电压叠加谐波电压: $U_3=10\%$ , $U_5=9\%$ , $U_7=7\%$ , $U_9=5\%$ , $U_{11}=3\%$ , $U_{13}=2\%$ , $U_{15}=1\%$ 。基波电流叠加谐波电流: $I_3=20\%$ , $I_5=15\%$ , $I_7=12\%$ , $I_9=10\%$ , $I_{11}=8\%$ , $I_{13}=7\%$ , $I_{15}=5\%$ ,各次谐波相位差均为 $20^\circ$ 。标准源采用为JCD4060三相精密谐波源。

表4给出比差角差校正后的基波功率误差数据。图5、6分别给出比差角差校正后ABC三相各次谐波电压与谐波电流的误差数据、基波功率因数 $\cos\varphi$ 分别为1.0与0.5 L时各次谐波相位的误差数据。

表4 基波功率误差

Tab. 4 Errors of the fundamental power

$\cos\varphi$	有功误差/%					
	5% $I_b$	10% $I_b$	20% $I_b$	50% $I_b$	$I_b$	$I_{max}$
1.0	0.08	0.07	—	-0.02	-0.06	-0.05
0.5L	—	-0.13	-0.12	-0.10	0.08	-0.11
0.8C	—	0.12	0.13	0.15	-0.11	-0.13
$\cos\varphi$	无功误差/%					
	5% $I_b$	10% $I_b$	20% $I_b$	50% $I_b$	$I_b$	$I_{max}$
1.0	0.59	0.52	—	0.50	0.25	0.78
0.5L	—	0.82	0.72	0.62	0.35	0.62
0.8C	—	0.71	0.75	0.65	0.41	0.61

注: L表示电压相角超前电流; C表示电压相角滞后电流。

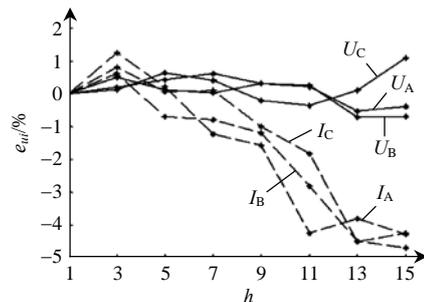


图5 各次谐波电压与谐波电流误差曲线图

Fig. 5 Errors curve of the harmonic voltage and current

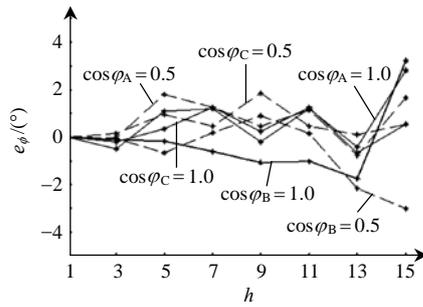


图6 各次谐波相位误差曲线图

Fig. 6 Errors curve of the harmonic phase

由表4和图5、6可知,测量准确度达到基波有功的相对误差 $\leq 0.2\%$ ,基波无功的相对误差 $\leq 1\%$ ,各次谐波电压的相对误差 $\leq 2\%$ ,各次谐波电流的相对误差 $\leq 5\%$ ,谐波相位测量的绝对误差 $\leq 5^\circ$ ,满足A类谐波测量仪器标准GB/T 14549—1993<sup>[21]</sup>。

## 5 结论

采用矩形、三角窗等基本窗函数和广义余弦窗函数对信号加权可减少非整数周期截断造成的频谱泄漏和栅栏效应影响,但其效果受到窗函数固定旁瓣性能的制约。Kaiser窗可定义一组可调的窗函数,自由选择主瓣与旁瓣衰减之间的比重,因此能全面反映主瓣与旁瓣衰减之间的交换关系。本文根据Kaiser窗良好的频谱泄漏抑制特性,结合FFT进行电力谐波分析,提出了基于Kaiser窗插值FFT算法,对包含21次谐波的动态信号仿真和三相多功能谐波电能表实际应用表明,采用本文提出的基于Kaiser窗插值FFT电力谐波分析方法,具有较高的计算精度,且设计灵活、实用价值高,据此实现的三相多功能谐波电能表准确度达0.2S级,2~21次谐波分析满足GB/T 14549—1993的A类谐波测量仪器要求。

## 参考文献

[1] Ortmeyer T H, Chakravarthi K R, Mahmoud A A. The effects of power system harmonics on power system equipment and loads[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(9): 2555-2563.

[2] Zhang Fusheng, Geng Zhongxing, Yuan Wei. The algorithm of interpolating windowed FFT for harmonic analysis of electric power system[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2001, 16(2): 160-164.

[3] Gregorio A, Mario S, Amerigo T. Windows and interpolation algorithms to improve electrical measurement accuracy[J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 1989, 38(4): 856-863.

[4] 李庚银, 陈志业, 宁宇. 快速傅里叶变换的两种改进算法[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(12): 37-40.

Li Gengyin, Chen Zhiye, Ning Yu. Two improved methods of fast Fourier transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(12): 37-40(in Chinese).

[5] Jain V K, Collins W L, Davis D C. High-accuracy analog measurements via interpolated FFT[J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 1979, 28(2): 113-122.

[6] Grandke T. Interpolation algorithms for discrete Fourier transform of weighted signals[J]. IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement, 1983, 32(2): 350-355.

[7] Harris F J. On the use of windows for harmonic analysis with the discrete Fourier transform[J]. Proceedings of the IEEE, 1978, 66(1): 51-83.

[8] 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.

[9] Nuttall A H. Some windows with a very good sidelobe behavior[J]. IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing, 1981, 29(1): 84-91.

[10] 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 Baiyuan, Teng Zhaosheng, Gao Yunpeng, 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(in Chinese).

[11] 张介秋, 梁昌洪, 陈砚圃. 基于卷积窗的电力系统谐波理论分析与算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 48-52. Zhang Jieqiu, Liang Changhong, Chen Yanpu. Power system harmonic theory analysis and algorithm based on convolution windows[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 48-52(in Chinese).

[12] 潘文, 钱俞寿, 周鄂. 基于加窗插值FFT的电力谐波测量理论(I)窗函数研究[J]. 电工技术学报, 1994(1): 50-54. Pan Wen, Qian Yushou, Zhou E. Power harmonics measurement based on windows and interpolated FFT (I) study of windows[J]. Transactions of China Electro Technical Society, 1994(1): 50-54(in Chinese).

[13] 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 Fusheng, Geng Zhongxing, Ge Yaozhong. FFT algorithm with high accuracy for harmonic analysis in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3): 63-66(in Chinese).

[14] 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 Wenchun, Ma Weiming, Hu An. FFT algorithm with high accuracy for harmonic analysis in the electric machine[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 83-87(in Chinese).

[15] 吴静, 赵伟. 一种用于分析电网谐波的多谱线插值算法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 55-59. Wu Jing, Zhao Wei. An algorithm of MICA for analyzing harmonics in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 55-59(in Chinese).

[16] 庞浩, 李东霞, 昝云霄, 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): 50-54.

- Pang Hao, Li Dongxia, Zu Yunxiao, et al. An improved algorithm for harmonic analysis of power system using FFT Technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 50-54(in Chinese).
- [17] Kaiser J F. Nonrecursive digital filter design using Io-sinh window function[C]. Proceedings of the IEEE International Symposium on Circuits and Systems, San Fransirco, California, 1974.
- [18] Thomas G, Flores B C, Jae S S. SAR sidelobe apodization using the Kaiser window[C]. Proceedings of the IEEE International Conference on Image Processing, Vancouver, BC, 2000.
- [19] 薛定宇,陈阳泉. 基于 Matlab/Simulink 的系统仿真技术与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 167-168.  
Xue Dingyu, Chen Yangquan. System simulation technology and applications based on Matlab/Simulink[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002: 167-168(in Chinese).
- [20] 潘文, 钱俞寿, 周鸷. 基于加窗插值 FFT 的电力谐波测量理论(II) 双插值 FFT 理论[J]. 电工技术学报, 1994(2): 53-56.  
Pan Wen, Qian Yushou, Zhou E. Power harmonics measurement based on windows and interpolated FFT(II) dual interpolated FFT algorithms[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1994 (2): 53-56(in Chinese).
- [21] 国家技术监督局. GB/T 14549—1993 电能质量: 公用电网谐波[S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.  
State Bureau of Technical Supervision. GB/T 14549—1993 Quality of electric energy supply: harmonics in public supply network[S]. Beijing: Standards Press of China, 1994(in Chinese).



高云鹏

收稿日期: 2009-06-12。

作者简介:

高云鹏(1978—), 男, 博士研究生, 主要从事智能仪器及信息处理方面研究工作, gfront@126.com;

滕召胜(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事智能仪器、智能控制及信息处理方面研究工作;  
温和(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事智能控制及信息处理方面研究工作;

曾博(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事智能仪器及信息处理方面研究工作。

(责任编辑 谷子)