

基于 Hanning 和 Nuttall 的混合卷积窗 谐波分析方法

李 媛, 王海云, 王维庆, 裴贝贝

(新疆大学电气工程学院, 乌鲁木齐 830047)

摘 要: 提出用 Hanning 窗和 Nuttall 窗进行卷积构造一种新型的窗函数——混合卷积窗, 分析该窗函数的幅频特性, 推导出基于混合卷积窗的三谱线插值法。将所提方法用于电力谐波分析, 并与加经典窗算法进行对比。仿真分析表明, 该混合卷积窗与 Hanning 窗和 Nuttall 窗相比具有更快的旁瓣衰减速率, 能更好抑制频谱泄露。在非同步采样情况下, 加混合卷积窗三谱线插值法分析谐波具有更高的计算精度。

关键词: FFT; 谐波分析; 频谱分析; 混合卷积窗; Hanning 窗; Nuttall 窗

中图分类号: TM935

文献标识码: A

0 引 言

随着电力系统的发展, 越来越多的非线性负载接入电网, 给电网带来谐波污染, 谐波影响电力系统稳定和经济运行^[1]给电网带来严重危害。对谐波参数的准确分析是评估电能质量和治理谐波的前提。

对于谐波分析, 文献[2,3]提出小波变换法, 小波变换的难点在于选择合适的基小波, 目前尚无规范的方法来选择。文献[4,5]提出神经网络法, 神经网络法计算量大, 需要大量样本。文献[6,7]提出希尔伯特-黄变换法(Hilbert-Huang transform), 虽然自适应能力好, 但易产生频域混叠。FFT 具有简单易实现和速度快的特点, 因此在谐波分析中得到广泛应用。但电网频率具有波动性, 一般很难做到同步采样。利用 FFT 分析谐波时易产生栅栏效应和频谱泄露, 会给谐波分析带来误差。针对这些现象, 许多文献提出用加窗插值法来减少频谱泄露和栅栏效应。常采用的窗函数有矩形窗^[8]、Hanning 窗^[9]、Nuttall 窗^[10]、Rife-vicent 窗^[11]和 Kasier 窗^[12]。采用的谱线插值有双谱线插值法和三谱线插值法^[13,14]。这些加经典窗的插值法虽然可提高谐波检测精度, 但窗函数不能满足主瓣窄而旁瓣

衰减速率又快的要求, 抑制频谱泄露效果不佳, 影响计算精度。为寻求性能更加优良的窗函数, 文献[15]提出构造 Hanning 自卷积窗。文献[16,17]提出构造 Nuttall 自卷积窗。虽然这些新型窗函数比经典的窗函数性能要优良, 但多次卷积计算不仅计算量大, 而且增加主瓣宽度。影响计算精确度。文献[18]提出用矩形窗与余弦窗函数先进行卷积计算, 再将结果进行自卷积构造 L 阶混合卷积窗。虽然提高谐波参数计算精度, 但对于弱次谐波参数计算精度不够理想。为得到性能优良的窗函数, 进一步提高各次谐波的参数分析精度, 本文选用旁瓣衰减速率快的 Nuttall 窗和主瓣较窄的 Hanning 窗进行卷积计算来构建一种频谱特性更优良的混合卷积窗, 并推导出基于该混合卷积的三谱线插值算法, 采用多项式拟合得到修正公式。将该方法用于分析电力系统谐波信号。通过仿真实验证明该算法的准确性和可行性。

1 Hanning 窗与 Nuttall 窗的混合卷积窗

1.1 Nuttall 窗函数

Nuttall 窗是一种余弦组合窗, 它的时域表达式如式(1)所示:

收稿日期: 2017-06-09

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题(2016D03021); 国家自然科学基金(51667020)

通信作者: 王海云(1973—), 女, 博士、教授、硕士生导师, 主要从事可再生能源发电与并网技术方面的研究。327028229@qq.com

$$\omega_N(n) = \sum_m^{M-1} (-1)^m a_m \cos(2\pi n \cdot m/N) \quad (1)$$

式中, M ——窗函数的项数; $n = 1, 2, 3, \dots, N-1$ 。

a_m ——系数且满足约束条件:

$$\sum_{m=0}^{M-1} (-1)^m a_m = 0, \quad \sum_{m=0}^{M-1} a_m = 1 \quad (2)$$

根据 a_m 的不同, Nuttall 窗函数具有不同的特性, 表 1 列出几种不同类型的 Nuttall 窗函数系数。Nuttall 窗函数频谱图如图 1 所示。由幅频特性图可知, 4 项 3 阶的综合主瓣和旁瓣特性最为理想, 本文选用 4 项 3 阶 Nuttall 窗函数。

表 1 Nuttall 窗系数

Table 1 Coefficients of Nuttall window

系数	4项3阶 Nuttall窗	4项1阶 Nuttall窗	3项最小旁瓣 Nuttall窗	4项最小旁瓣 Nuttall窗
a_0	0.338946	0.355768	0.4243801	0.3635819
a_1	0.481973	0.487396	0.4973406	0.4891773
a_2	0.161054	0.144232	0.0782793	0.1365995
a_3	0.018027	0.012604	—	0.0106411

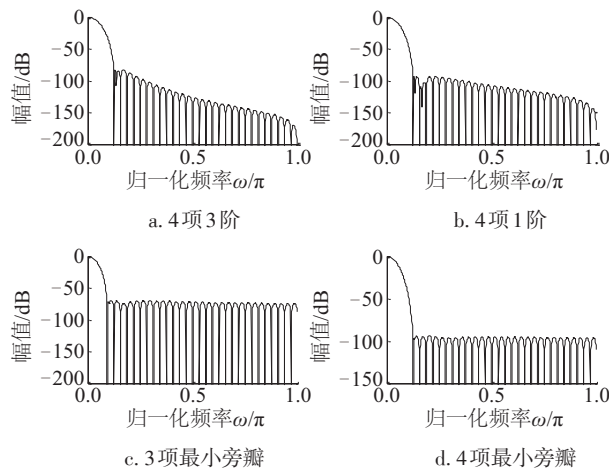


图 1 Nuttall 窗的幅频响应对比图

Fig. 1 Comparison of Nuttall window amplitude-frequency response

1.2 Hanning 窗函数

Hanning 窗是升余弦窗, 是应用较广的一种函数窗。Hanning 窗函数时域表达式如式(2)所示:

$$\omega_H(n) = 0.5 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi \cdot n}{N}\right) \quad (2)$$

式中, $n = 1, 2, 3, \dots, N-1$ 。Hanning 窗函数的幅频响应如图 2 所示。

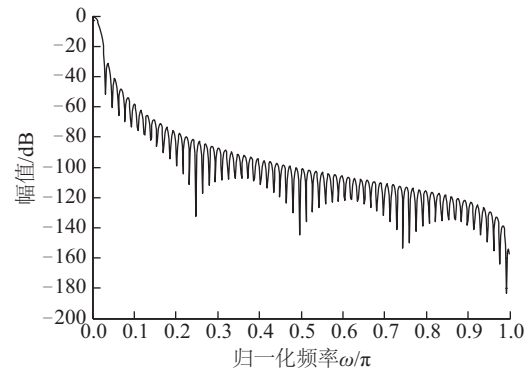


图 2 Hanning 窗的幅频响应图

Fig. 2 Amplitude-frequency response of Hanning window

1.3 混合卷积窗

混合卷积窗的定义为将 Hanning 窗与 Nuttall 窗函数进行卷积。混合卷积窗的表达式如式(3)所示:

$$\omega_{NH}(n) = \omega_N(n) \times \omega_H(n) \quad (3)$$

根据式(1)~式(3)可仿真出各个窗函数的幅频响应图。Hanning 窗、Nuttall 窗和混合卷积窗的幅频响应对比图如图 3 所示。Nuttall 和 Hanning 混合卷积窗与和文献[18]所提出的矩形与余弦函数窗构造的混合窗的幅频响应对比如图 4 所示。其中余弦窗选择 Hanning 窗。

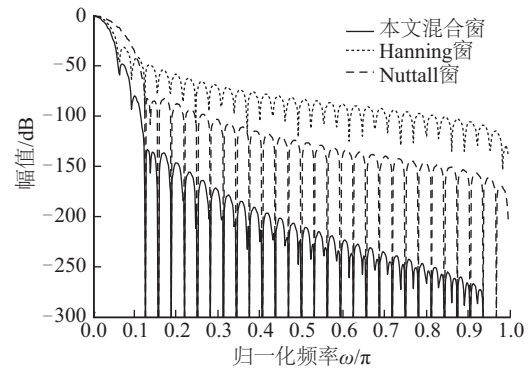


图 3 3 种窗的幅频响应对比图

Fig. 3 Comparison of amplitude-frequency response of three windows

从图 3 中可看出, 混合卷积窗的主瓣宽度比 Hanning 窗和 Nuttall 窗都小, 混合卷积窗的旁瓣衰减速率比 Hanning 窗和 Nuttall 窗更快。由图 4 中看出, 该混合卷积窗与矩形窗和 Hanning 窗构建的混合卷积窗相比。旁瓣峰值低, 且具有更快的旁瓣衰减速率, 对频谱泄露具有更强的抑制能力。

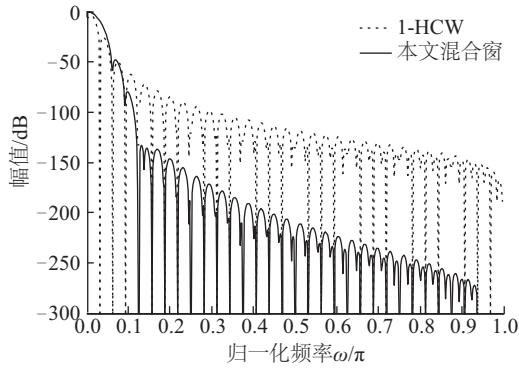


图4 混合窗幅频响应对比图

Fig. 4 Comparison of amplitude-frequency response of hybrid windows

2 基于混合卷积窗的插值算法

2.1 三谱线插值算法

以单个信号为例 $x(t)$ 以采样频率 f_s 均匀采样得到离散时间信号如式(4)所示:

$$x(n) = A_0 + A_1 \sin(2\pi \frac{f_1}{f_s} n + \varphi_1) \quad (4)$$

所加余弦窗函数的表达式为:

$$w_N(n) = \sum_{m=0}^{M-1} (-1)^m a_m \cos(\frac{2\pi m}{N} n) \quad (5)$$

式中, M ——项数, $n=0, 1, 2, \dots, N-1$; a_m 需满足

$$\sum_{m=0}^{M-1} a_m = 1, \sum_{m=0}^{M-1} (-1)^m a_m = 0.$$

对信号加窗后的表达式为:

$$x_w(n) = x(n) \cdot w(n) \quad (6)$$

进行离散傅里叶变换为:

$$X(k) = A_0 W(k) + \frac{A_1}{2j} \left[e^{-j\varphi_1} W\left(k - \frac{f_1}{\Delta f}\right) - e^{-j\varphi_1} W\left(k + \frac{f_1}{\Delta f}\right) \right] \quad (7)$$

式中, $\Delta f = f_s/N$ 。

$$X(k) = A_0 W(k) + \frac{A_1}{2j} e^{j\varphi_1} W\left(k - \frac{f_1}{\Delta f}\right) \quad (8)$$

$W(k)$ 为窗函数 DFT 表达式:

$$W(k) = \frac{Nk \sin(k\pi)}{\pi} e^{-jk\pi} e^{j\frac{\pi}{N}k} \sum_{m=0}^{M-1} (-1)^m \frac{a_m}{k^2 - m^2} \quad (9)$$

所以 $x(n)$ 的 DFT 表达式为:

$$X(k) = \frac{A_1}{2j} e^{j\varphi_1} W\left(k - \frac{f_1}{\Delta f}\right) \quad (10)$$

如果是同步采样, $k = f_1/\Delta f$ 为整数, 因为电网的

波动性, k 往往不是一个整数, 为提高准确度, 本文采用文献[13]所提出的三谱线插值法来修正。该插值法利用谐波频点附近的三根离散谱线幅值来确定谐波谱线的准确位置, 充分利用了频谱信息。较单谱线插值法和双谱线插值法能得到更准确的谐波谱线位置, 提高谐波分析精度。具体过程为: 选用峰值频点附近 3 根信息量大的谱线 y_1 、 y_2 、 y_3 用于修正, δ 表示偏差。其中 $y_1 = |X(k_{\alpha-1})|$, $y_2 = |X(k_{\alpha})|$, $y_3 = |X(k_{\alpha+1})|$ 。

记:

$$\alpha = \frac{y_3 - y_2}{y_1} \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{|W(1-\delta)| - |W(-1-\delta)|}{|W(-\delta)|} \quad (12)$$

由多项式拟合得到 α 与 δ 的关系式, 由 $\delta = \alpha^{-1}(\delta)$ 求得 δ , 由此可得到幅值、频率和相位的修正公式:

$$f = k\Delta f = (k_{\alpha} + \delta)\Delta f \quad (13)$$

$$A = \frac{2(y_1 + 2y_2 + y_3)}{|W(-1-\delta)| + 2|W(-\delta)| + |W(1-\delta)|} \quad (14)$$

$$\varphi = \arg[X(k_{\alpha})] + \pi/2 - \delta\pi \quad (15)$$

式(14)可写成 $A = N^{-1}(y_1 + 2y_2 + y_3)\nu(\delta)$ 的形式。

2.2 基于混合窗三谱线插值算法

对于 Hanning 窗, 根据式(9)写出它的离散傅里叶表达式为:

$$W_{H(k)} = \frac{Nk \sin(k\pi)}{\pi} e^{-jk\pi} e^{j\frac{\pi}{N}k} \left(\frac{0.5}{k^2} - \frac{0.5}{k^2-1} \right) \quad (16)$$

同样, 对于 Nuttall 窗函数, 它的离散傅里叶表达式为:

$$W_N(k) = \frac{Nk \sin(k\pi)}{\pi} e^{-jk\pi} e^{j\frac{\pi}{N}k} \left(\frac{0.338946}{k^2} - \frac{0.481973}{k^2-1} + \frac{0.16054}{k^2-4} - \frac{0.018027}{k^2-9} \right) \quad (17)$$

于是得到混合卷积的 DFT 表达式:

$$\begin{aligned} W_{NH}(k) &= W_N(k) \cdot W_H(k) \\ &= \frac{N^2 k^2 \sin^2(k\pi)}{\pi} e^{-2jk\pi} e^{j\frac{\pi}{N}k} \left(\frac{0.5}{k^2} - \frac{0.5}{k^2-1} \right) \cdot \\ &\quad \left(\frac{0.338946}{k^2} - \frac{0.481973}{k^2-1} + \frac{0.16054}{k^2-4} - \frac{0.018027}{k^2-9} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

对于混合卷积,由式(12)可得:

$$\alpha = \frac{|W_{NH}(1-\delta)| - |W_{NH}(-1-\delta)|}{|W_{NH}(-\delta)|} \quad (19)$$

由多项式拟合得到 δ 表达式:

$$\delta = 5.6516\alpha - 1.4085\alpha^3 + 1.943\alpha^5 - 1.4863\alpha^7 \quad (20)$$

$$\nu(\delta) = 0.0121 + 0.0755\delta^2 + 0.0184\delta^4 + 0.022\delta^6 \quad (21)$$

得到 δ 和 $n(d)$ 后,再根据式(13)~式(15)可得修正后的幅值、频率和相位。基于混合卷积窗的三谱线插值法修正公式推导过程:

- 1)得到混合卷积窗的离散傅里叶表达式;
- 2)在 $\delta \in [-0.5, 0.5]$ 范围内取值;
- 3)把 δ 代入式(18)得到 $W_{NH}(\delta)$;
- 4)将 $W_{NH}(\delta)$ 代入式(19)得到 α ,通过多项式拟合得到 α 的各项系数;
- 5)由 $\delta = \alpha^{-1}(\delta)$ 得到 δ 修正公式。

表2 不同加窗插值FFT算法结果误差对比

Table 2 Comparison of result errors between different window interpolation FFT algorithm

参数	Nuttall窗	Hanning窗	本文算法	文献[18]	
				1-HCW	2-HCW
N	1024	1024	256	256	512
A_0	3.6×10^{-9}	3.0×10^{-4}	2.3×10^{-12}	-3.0×10^{-7}	1.0×10^{-12}
A_1	1.2×10^{-10}	2.0×10^{-3}	6.3×10^{-12}	-1.1×10^{-6}	7.5×10^{-12}
A_3	-6.8×10^{-9}	2.2×10^{-3}	-1.3×10^{-11}	-2.7×10^{-6}	-5.3×10^{-10}
j_1	4.2×10^{-8}	5.0×10^{-4}	-1.0×10^{-12}	1.5×10^{-6}	-3.0×10^{-11}
j_3	8.2×10^{-8}	4.6×10^{-3}	-2.6×10^{-10}	6.7×10^{-6}	4.8×10^{-9}
f_1	2.8×10^{-9}	5.6×10^{-4}	5.6×10^{-12}	-4.8×10^{-7}	9.7×10^{-12}
f_3	6.5×10^{-8}	2.0×10^{-3}	2.3×10^{-11}	-2.1×10^{-6}	-1.5×10^{-9}

由表2可以知,本文所提算法与加经典窗插值法相比,分析谐波时具有更高的精度。与加1阶混合卷积窗插值算法相比,本文算法精度提高了5~7个数量级。与加2阶混合窗相比,本文算法分析相位的精度提高1~2个数量级,在分析幅值和频率时的精度与其接近,且本文算法数据长度小。

3.2 电力谐波信号仿真分析

采用电力系统谐波信号^[17]进行分析,谐波模型如式(23)所示:

$$x(n) = \sum_{i=1}^{21} A_i \cos(2\pi i \frac{f_i}{f_s} n + \varphi_i) \quad (23)$$

式中,基波频率 $f_1 = 50.1$ Hz; 采样频率 $f_s = 5120$ Hz;

3 Matlab仿真分析

3.1 经典信号分析对比

采用的经典信号^[16-18]来验证本文算法的有效性。信号模型为:

$$x(n) = A_0 + A_1 \sin(\frac{2\pi f_1 n}{N} + \varphi_1) + A_3 \sin(\frac{2\pi f_3 n}{N} + \varphi_3) \quad (22)$$

式中, $A_0 = 0.2$, $A_1 = 6$, $A_3 = 1$ 。 $j_1 = 0.1$, $j_3 = 0$ 。
 $f_1 = 20.2$, $f_3 = 60.6$ 。

分别用加Hanning窗插值法、加Nuttall窗插值法、加矩形窗与Hanning窗构建的1阶、2阶混合窗^[18]插值法以及本文所提算法分析信号。其中1阶混合卷积窗用1-HCW表示,2阶混合卷积窗用2-HCW表示。窗的长度分别为256和512。这几种方法分析结果误差对比如表2所示。

A_i 、 j_i ——各次幅值和初相位。谐波模型参数如表3所示。

分别用加Hanning窗三谱线插值法,加Nuttall窗三谱线插值法和本文所提加混合卷积窗三谱线插值法去分析该谐波信号。通过Matlab仿真分析,得到3种方法计算谐波参数的结果并比较。

3.2.1 幅值相对误差对比

图5为幅值结果相对误差对比图。由图5可知加混合卷积窗的三谱线插值法计算幅值结果的相对误差比加Hanning窗和Nuttall窗三谱线插值法小。与加Hanning窗插值法相比,幅值结果精确度提高了4~5个数量级。与加Nuttall窗插值法相

表3 电力谐波信号参数

Table 3 Parameters of power system harmonic signal					
谐波次数	A/V	j/(°)	谐波次数	A/V	j/(°)
1	220	5.05	12	0.70	40.0
2	4.40	39.0	13	0.85	10.5
3	10.0	60.5	14	0.10	115
4	3.00	123	15	1.00	25.0
5	6.00	-52.7	16	0.06	53.1
6	2.10	146	17	0.40	-132
7	3.20	97.0	18	0.04	85.0
8	1.90	56.0	19	0.03	0.80
9	2.30	43.1	20	0.05	53.0
10	0.80	-19.0	21	0.01	72.0
11	1.10	4.10	—	—	—

比,幅值结果精确度提高了1~3个数量级。基波幅值的相对误差达到 $3.3\times10^{-10}\%$ 。比Hanning窗插值法的精度提高6个数量级,比加Nuttall窗插值法提高了2个数量级。对于幅值分量弱的18~21次谐波幅值相对误差都小于 $1.4\times10^{-8}\%$ 。本文所提算法能进一步减少频谱间的干扰,提高幅值计算精度。

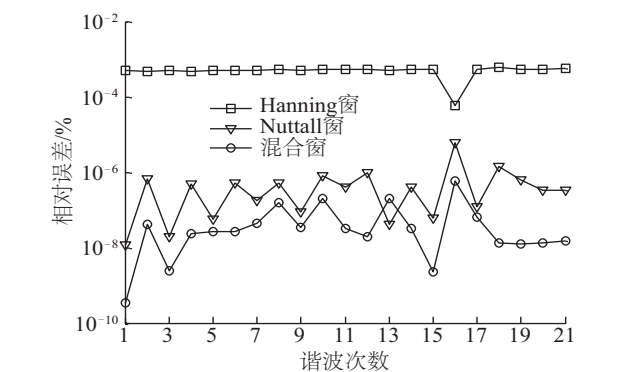


图5 幅值结果误差对比图
Fig. 5 Comparison of amplitude relative error

3.2.2 相位结果分析对比

相位结果相对误差对比如图6所示。由图6可知,对相位进行分析时,本文所提算法的准确度与加Hanning窗三谱线插值法相比提高了3~5个数量级。与加Nuttall窗三谱线插值法相比提高了1~2个数量级。得到基波相位相对误差为 $-1.9\times10^{-8}\%$ 。

相比加Hanning窗插值法精度提高了5个数量级,比加Nuttall窗的插值法精度提高了1个数量级。

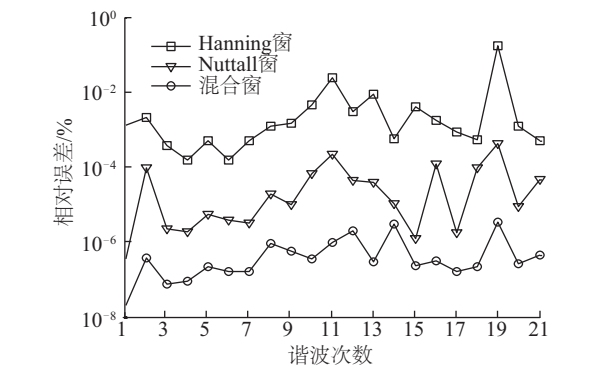


图6 相位相对误差对比图
Fig. 6 Comparison of phase relative error

3.3.3 频率结果分析对比

频率结果误差对比如由图7所示,由图7可知,对频率进行分析时,加混合卷积窗插值法所得结果与加Hanning窗插值法相比,频率准确度提高2~4个数量级。与加Nuttall窗插值法相比,准确度提高了1~4个数量级。基波频率相对误差为 $4.9\times10^{-10}\%$ 。与加Hanning窗分析得到的结果相比,提高了4个数量级,与加Nuttall窗分析得到的结果相比,提高了2个数量级。

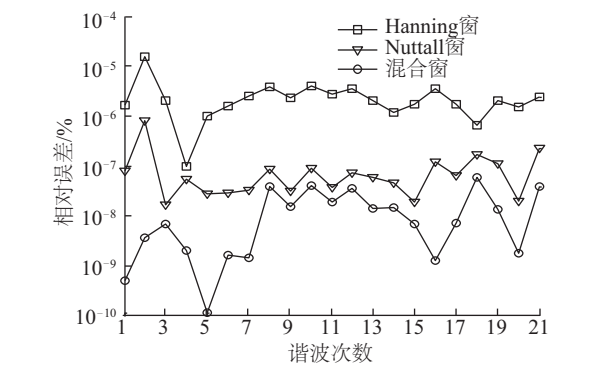


图7 频率相对误差对比图
Fig. 7 Comparison of frequency relative error

综合以上分析可知,本文所提算法在分析幅值、频率、相位等参数时,精确度明显比加Hanning窗和Nuttall窗要高。各次幅值相对误差均小于 $2.8\times10^{-7}\%$,各次相位相对误差均小于 $6.6\times10^{-7}\%$,频率相对误差都小于 $1.3\times10^{-8}\%$ 。结果证明,本文所构造的混合卷积窗能更好抑制频谱泄露,有效抑制各次谐波间的干扰,本文所提算法能有效提高计算各次谐波参数的精确度。

3.3 混合卷积窗分析结果对比

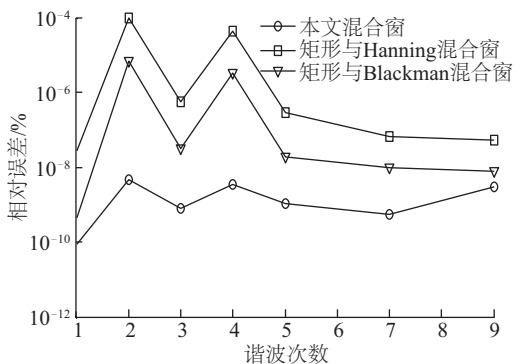
采用谐波信号^[18]进行仿真分析,信号模型如式(24)所示:

$$x(n)=\sum A_i\sin(\frac{2\pi if_in}{f_s}+\varphi_i)\quad(24)$$

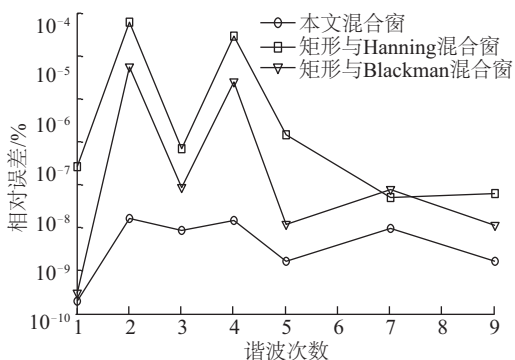
参数如表 4 所示。窗函数选用本文所提 Nuttall 与 Hanning 构建的混合卷积窗和矩形窗与余弦窗构建的 2 阶混合窗^[18],其中余弦窗选用 Hanning 窗与 Blackman 窗,单个窗长均为 128。补零后,本文所提混合窗长为 256,矩形与余弦窗 2 阶混合窗窗长为 512,均采用三谱线插值法。用基于这 3 种混合窗的三谱线插值算法分析谐波信号的各次参数。并将分析结果的相对误差进行对比,得到结果如图 8 所示。

表 4 谐波信号参数

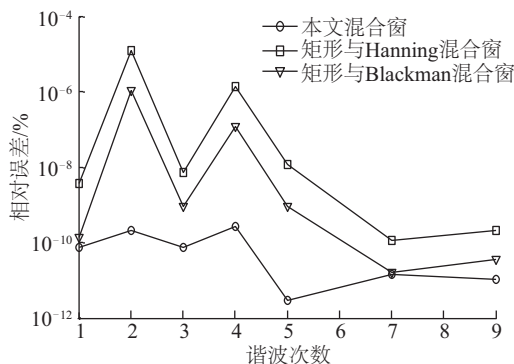
Table 4 Parameters of power system harmonic signal					
谐波次数	$A/\mu\text{u}$	$j/(\text{ }^\circ)$	谐波次数	$A/\mu\text{u}$	$j/(\text{ }^\circ)$
1	1.00	-23.1	6	0.00	—
2	0.02	115.6	7	0.02	97.0
3	0.01	59.3	8	0.00	—
4	0.01	52.4	9	0.01	-63.7
5	0.05	123.8	—	—	—



a. 幅值结果误差对比图



b. 相位相对误差对比图



c. 频率相对误差对比图

图 8 谐波信号参数分析相对误差对比

Fig. 8 Comparison of parameters of power system harmonic signal relative error

由图 8 中可知,对于幅值、相位和频率 3 个参数的分析,基于本文所提混合窗算法分析的结果,与基于矩形窗与 Hanning、Blackman 构成的混合窗的算法的分析结果相比,精确度都有数量级的提高。尤其对于 2 次、4 次幅值分量小的弱次谐波,参数分析结果精度提高了 3~5 个数量级。基于本文所提混合窗算法与基于其他 2 种混合窗算法相比,能更进一步抑制谐波泄露,减少谐波间的干扰,提高弱次谐波的分析精确度。且本文构建的混合窗长较其他 2 种混合窗小,所用数据长度小,计算量少。

4 结 论

本文构造基于 Nutall 窗和 Hanning 窗的混合卷积窗函数,推导出基于该混合卷积窗的三谱线插值算法,利用多项式拟合求出插值修正公式,用于分析电力系统谐波信号。

仿真分析结果表明,本文构造的混合窗函数克服了经典窗函数的不足,在具有旁瓣衰减速率快的同时主瓣不过宽,能更好抑制频谱泄露,提高谐波分析精确度。与基于 Hanning 窗、Nuttall 窗以及矩形窗与余弦窗的混合窗三谱线插值法相比,本文所提算法分析各次电力谐波的幅值、相位和频率参数时具有更高的计算精度,且能进一步提高弱次谐波分析精度。

[参考文献]

[1] 马晓春,刘旭东.一种电力谐波分析新算法[J].中国

- 电机工程学报, 2013, 33(S1): 184—189.
- [1] Ma Xiaochun, Liu Xudong. A novel algorithm for electric power system harmonic analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(Sup1): 184—189.
- [2] 薛 惠, 杨仁刚, 罗 红. 基于提升小波变换的电力系统谐波分析[J]. 电网技术, 2004, 28(5): 5—10.
- [2] Xue Hui, Yang Rengang, Luo Hong. Power system harmonic analysis using wavelet packet transform [J]. Power system technology, 2004, 28(5): 5—10.
- [3] 曾瑞江, 杨震斌, 柳慧超. 基于小波变换的电力系统谐波检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 35—39.
- [3] Zeng Ruijiang, Yang Zhenbin, Liu Huichao. A method of power system harmonic detection based on wavelet transform [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 35—39.
- [4] 程培源, 张 猛, 樊 波, 等. BP网络的谐波检测方法分析[J]. 重庆大学学报, 2010, 33(8): 42—68.
- [4] Chen Peiyuan, Zhang Meng, Fan Bo, et al. Harmonic detection method analysis based on BP network [J]. Journal of Chongqing University, 2010, 33(8): 42—68.
- [5] 徐志钮, 律方成. 基于RPROP神经网络的电力系统谐波分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(15): 13—16.
- [5] Xu Zhiniu, Lyu Fangcheng. Power system harmonic analysis based on RPROP ANNs [J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(15): 13—16.
- [6] 李天云, 赵 妍, 韩永强, 等. Hilbert-Huang变换方法在谐波和电压闪变中的应用[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 73—77.
- [6] Li Tianyun, Zhao Yan, Han Yongqiang, et al. Application of Hilbert-Huang transform method in detection of harmonic and voltage flicker [J]. Power system technology, 2005, 29(2): 73—77.
- [7] 李天云, 程思勇, 杨 梅. 基于希尔伯特-黄变换的电力系统谐波分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(4): 109—113.
- [7] Li Tianyun, Chen Siyong, Yang Mei. Power system harmonic analysis based on Hilbert-Huang transform [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(4): 109—113.
- [8] 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—60.
- [8] Wu Jing, Zhao Wei. An algorithm of MICA for analyzing harmonics in power system [J]. Power System Technology, 2006, 29(2): 73—77.
- [9] 赵黎丽. 基于相关Hanning窗插值的间谐波分析算法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(11): 153—158.
- [9] Zhao Lili. Inter-harmonic analysis based on correlation hannning window and interpolation algorithm [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2008, 23(11): 153—158.
- [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.
- [10] Qing Boyuan, 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.
- [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.
- [11] Gao Yunpeng, Teng Zhaosheng, Qing Boyuan. Harmonic analysis based on kaiser window double spectrum line interpolation FFT [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(2): 287—292.
- [12] 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.
- [12] Zeng Bo, Teng Zhaosheng, Wen He, et al. An approach for harmonic analysis based on Rife-Vincent window interpolation FFT [J]. 2009, 29(10): 115—120.
- [13] 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.
- [13] Niu Shengsuo, Liang Zhirui, Zhang Jianhua, 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.
- [14] 蔡晓峰, 张鸿博, 鲁改凤. 应用三谱线插值FFT分析电力谐波的改进算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 33—39.
- [14] Cai Xiaofeng, Zhang Hong, Lu Gaifeng. Improvement algorithm for harmonic analysis of power system using triple-spectrum-line interpolation algorithm based on window FFT [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 33—39.
- [15] 温 和, 滕召胜, 卿柏元. Hanning自卷积窗及其在谐

- 波分析中的应用[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 164—169.
- [15] Wen He, Teng Zhaosheng, Qing Boyuan. Hanning self-convolution windows and its application[J]. Transaction of China Electro-technical Society, 2009, 24(2): 164—169.
- [16] 曾 博, 滕召胜. 纳托尔自卷积窗加权电力谐波分析方法[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 134—139.
- [16] Zeng Bo, Teng Zhaosheng. A nuttall self-convolution window-based approach to weighted analysis on power system harmonic [J]. Power system technology, 2011, 35(8): 134—139
- [17] 曾 博, 唐 求, 卿柏元, 等. 基于 Nuttall 自卷积窗的改进 FFT 谱分析方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(7): 59—65.
- [17] Zeng Bo, Tang Qiu, Qing Byuan, et al. Spectral analysis method based on improved FFT by nuttall self-convolution window [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2014, 29(7): 59—65.
- [18] 孙仲民, 何正友, 臧天磊. 一种混合卷积窗及其在谐波分析中的应用[J]. 电工技术学报, 2016, 31(16): 207—214.
- [18] Sun Zhongmin, He Zhengyou, Zang Tianlei. A kind of hybrid convolution window and its application in harmonic analysis [J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2016, 31(16): 207—214.

HARMONIC ANALYSIS METHOD OF HYBRID CONVOLUTION WINDOW BASED ON HANNING AND NUTTALL

Li Yuan, Wang Haiyun, Wang Weiqing, Pei Beibei

(College of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: A kind of new window function constructed by convolution- mix convolution window with Hanning window and Nuttall window is proposed. The amplitude and frequency characteristics of the window function are analyzed, and the triple spectral lines interpolation algorithm is derived based on mix convolution window. The proposed method is applied to power harmonic analysis and compared with the classical window algorithm. The simulation analysis shows that the mix convolution window has faster sidelobe attenuation rate and can better suppress spectrum leakage compared with Hanning window or Nuttall window. In non-synchronous sampling case, the triple spectral lines interpolation algorithm with mix convolution window for harmonic wave analysis has higher calculation accuracy.

Keywords: FFT; harmonic analysis; spectrum analysis; hybrid convolution window; Nuttall window; Hanning window