

DOI: 10.7667/PSPC160524

基于五项 MSD 窗三谱线插值的高精度谐波分析算法

史丽萍, 谢强, 马晓伟

(中国矿业大学信息与电气工程学院, 江苏 徐州 221116)

摘要: 为了解决快速傅里叶变换中存在的频率泄露和栅栏效应的问题, 提出一种高精度的五项最大旁瓣(Maximum-sidelobe-decay, MSD)窗插值算法。从时域和频域分别分析了该窗函数和其他常用窗函数, 体现出该窗函数的优秀旁瓣特性。用 Matlab 中的 cftool 工具拟合出该算法的修正公式, 并用该方法对一般信号和频率变动的信号进行仿真分析。对比其他常用的几种窗函数插值算法的结果, 表明五项 MSD 窗三谱线插值算法具有相对更高的精度, 幅值相对误差达到 $10^{-9}\%$, 而且在工频波动的情况下仍具有较高精度。

关键词: 谐波分析; 插值; 快速傅里叶变换; 电力系统; 高精度

High accuracy analysis of harmonic algorithm based on 5-term maximum-sidelobe-decay window and triple-spectrum-line interpolation

SHI Liping, XIE Qiang, MA Xiaowei

(School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In order to solve the problems of fence effect and spectral leakage in Fast Fourier Transform analysis, an approach of high accuracy harmonic analysis is proposed, which bases on 5-term Maximum-Sidelobe-Decay window and triple-spectrum-line interpolation. It analyzes the window function and other commonly used window function in terms of time and frequency domain, reflecting the excellent characteristics of the sidelobe in the window function. It uses the cftool tool in Matlab to fit the modified formula of the algorithm. Then, it analyzes the general signal and signal of frequency change with the method, comparing with other several commonly used window function and interpolation algorithm results, this method shows a higher accuracy performance. In high accuracy analysis of harmonic algorithm based on 5-term MSD window and interpolation, the relative error of the amplitude has reached $10^{-9}\%$, and it also has a good performance when frequency fluctuation happens.

Key words: harmonic analysis; interpolation; fast Fourier transform; power system; high accuracy

0 引言

国家前不久出台的《中国制造 2025》中提出了关于高档数控机床、机器人等精密制造装备的研发目标, 这些目标的实现离不开高质量的电力保障。

随着电力系统中的大量电力电子设备投入, 谐波的大量出现影响了电能质量, 威胁了电力系统的安全经济运行。精确测量谐波是有效治理的前提。常用的谐波分析算法有离散傅里叶变换(DFT)算法^[1]、小波变换算法^[2]、瞬时无功功率算法^[3]及神经网络算法^[4]等。其中 DFT 算法由于简单可靠并且有快速傅里叶变换算法(FFT)提高其运算速度^[5], 加之其易于在硬件上实现, 因此在实际应用中, DFT 的优化

算法——FFT 算法运用最为普遍。

然而, 由于电网频率偏移等原因, 实现严格的同步采样是不现实的也是不可能的^[6], 非同步采样会使 FFT 算法产生频谱泄露和栅栏效应问题^[7], 从而直接导致使用 FFT 算法测量精度的大幅下降。解决非同步采样的一种有效的方法是加窗插值算法, 常用的窗函数有 Hanning 窗^[8]、Nuttall 窗^[9]、Rife-Vincent 窗^[10]等, 常用的插值算法有单谱线插值法^[11]、双谱线插值法^[12]、三谱线插值法^[13]等方法。窗函数的选择直接决定了检测精度的高低, 随着硬件技术的不断发展和电能质量要求的提高, 算法的计算量将会逐渐被淡化, 而算法的精度将会越来越被重视。本文五项 MSD 算法具有旁瓣衰减速度快, 旁瓣峰值电平低的特点, 结合三谱线插值的算法,

能够实现对信号进行高精度的检测, 得出非常准确的幅值、频率和相位信息, 精度远高于文献[13-15]中的算法。

1 五项 MSD 窗及其特性

1.1 时域特性

五项 MSD 窗属于余弦组合窗, 其一般形式为

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

式中: M 为窗函数的项数; $m=0, 1, 2, \dots, M$; $n=0, 1, 2, \dots, N-1$; N 为采样点数; a_m 为窗函数第 m 项的系数, 且满足式(2)、式(3)两个约束条件。

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

$$\sum_{m=0}^{M-1} a_m = 1 \quad (3)$$

在五项 MSD 窗中, 五项系数分别为: $a_0=0.273\ 437\ 5$, $a_1=0.437\ 5$, $a_2=0.218\ 75$, $a_3=0.062\ 5$, $a_4=0.007\ 812\ 5$ 。

1.2 频域特性

根据其时域的信息, 将其归一化对数频谱与常用的几个窗函数的归一化对数频谱画在同一个图中^[16], 对比图如图 1 所示。

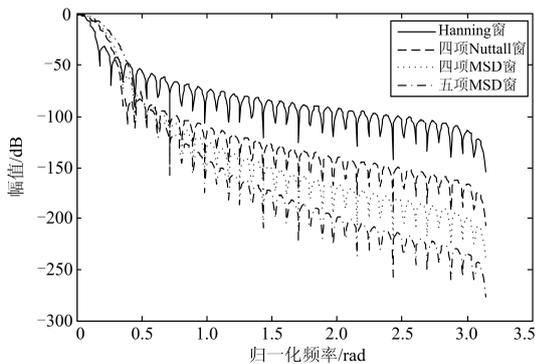


图 1 窗函数频谱特性

Fig. 1 Spectral characteristic of window function

根据对数归一化频谱图可知, 五项 MSD 窗在旁瓣的衰减速率上有明显的优势。图 1 中的 4 种窗函数的具体最大旁瓣和旁瓣的衰减速率的值如表 1 所示。

表 1 各窗函数的旁瓣特性

Table 1 Sidelobe characteristic of several windows function

窗函数	旁瓣峰值/dB	旁瓣衰减速率/(dB/oct)
Hanning 窗	-34.2	18
四项 Nuttall 窗	-82.6	30
四项 MSD 窗	-60.95	42
五项 MSD 窗	-75	54

2 三谱线插值算法

设含单一谐波信号经采样频率为 f_s 的 N 点采样离散后为

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

式中: A_1 为该次谐波的幅值; f_1 为该次谐波的频率; f_s 为采样频率; φ_1 为该次谐波的相位。

对该含谐波信号进行加窗处理, 得到新的表达式为

$$w_d(n) = x(n)w(n) \quad (5)$$

对上式进行傅里叶变换后得到

$$X(k) = \frac{A_1}{2j} \left[e^{j\varphi_1} W\left(k - \frac{f_1}{\Delta f}\right) - e^{-j\varphi_1} W\left(k + \frac{f_1}{\Delta f}\right) \right] \quad (6)$$

式中: $W(k)$ 为窗函数的离散傅里叶变换; $\Delta f = f_s/N$; $k=0, 1, 2, \dots, N$; $f_1 = k_1 \Delta f$ 。

忽略负频点频谱峰值的旁瓣影响^[17], 式(6)可以精简为

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

一般情况下, $N \gg 1$, 因此, 窗函数的离散傅里叶变换可以表示为

$$W(k) = \frac{Nk \sin(k\pi)}{\pi} e^{-j\pi k} e^{-j\frac{\pi}{N}k} \sum_{m=0}^M (-1)^m \frac{a_m}{k^2 - m^2} \quad (8)$$

在非同步采样的情况下, 幅值最大的谱线并不是真实的谱峰, 如图 2 所示。假设谱线 k_1 为实际采样中所对应的峰值, 而谱线 k 是理论上真实对应的峰值, 由于栅栏效应的存在, 频率 f_1 处所对应的谱线不是真实谱峰, 即 $k_1 \neq k$ 。设 k_1 左右的两条谱线分别为 k_0 和 k_2 , 则有 $k_0+1=k_1=k_2-1$, 令 $\delta=k-k_1$, 则 δ 显然满足 $-0.5 < \delta < 0.5$, 那么频率的修正公式为

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

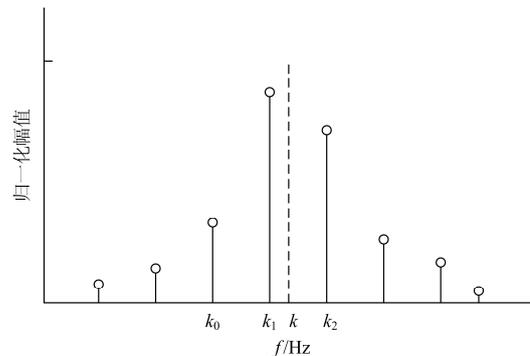


图 2 非同步采样频谱

Fig. 2 Spectrum in asynchronous sampling

设谱线 k_0 、 k_1 、 k_2 所对应的幅值分别为 y_0 、 y_1 、 y_2 ，则有

$$y_0 = |X_m(k_0)| \quad (10)$$

$$y_1 = |X_m(k_1)| \quad (11)$$

$$y_2 = |X_m(k_2)| \quad (12)$$

令参数

$$\alpha = \frac{y_2 - y_0}{y_1} \quad (13)$$

把式(10)~式(12)代入式(13)可得

$$\alpha = \frac{|W(k_2 - k)| - |W(k_0 - k)|}{|W(k_1 - k)|} = \frac{|W(1 - \delta)| - |W(-1 - \delta)|}{|W(-\delta)|} \quad (14)$$

谐波信号的幅值修正采用的是三谱线插值的方法，由于 y_1 是幅值最大值，所以在加权的时候给最大的权重^[18]，那么幅值的修正公式可以表示为

$$A_1 = \frac{2(y_0 + 2y_1 + y_2)}{|W(-1 - \delta)| + 2|W(-\delta)| + |W(1 - \delta)|} \quad (15)$$

当 $N \gg 1$ 时，上式可以改写为

$$A_1 = N^{-1}(y_0 + 2y_1 + y_2)v(\delta) \quad (16)$$

式中， $v(\delta)$ 为多项式逼近函数。

根据式(6)、式(7)，该谐波信号的相位近似为

$$\varphi_1 = \text{angle}[X(k_0)] + \delta\pi \quad (17)$$

至此，该谐波信号的频率、幅值、相位的修正公式都已经在式(9)、式(16)、式(17)中给出。

3 五项 MSD 窗函数的修正公式

根据式(8)，五项 MSD 窗函数的离散傅里叶变化如下：

$$W(k) = \frac{Nk \sin(k\pi)}{\pi} e^{-j\pi k} e^{-j\frac{\pi}{N}k} \left[\frac{0.2734375}{k^2} - \frac{0.4375}{k^2 - 1} + \frac{0.21875}{k^2 - 4} - \frac{0.0625}{k^2 - 9} + \frac{0.0078125}{k^2 - 16} \right] \quad (18)$$

结合式(14)可以建立 δ 和 α 的关系^[19]。在 δ 的取值范围内取一组数据，根据 δ 的值得出相同长度的 α ，用 Matlab 中的 cftool 工具对两个变量进行逼近，得出逼近函数为

$$\delta = 1.38888889\alpha - 0.10716315\alpha^3 + 0.01675146\alpha^5 - 0.00240499\alpha^7 \quad (19)$$

由式(15)、式(16)可以得知

$$v(\delta) = \frac{2N^{-1}}{|W(-1 - \delta)| + 2|W(-\delta)| + |W(1 - \delta)|} \quad (20)$$

将式(18)代入式(20)，建立 $v(\delta)$ 和 δ 的关系，同样取一组 δ ，得到一组 $v(\delta)$ ，用 cftool 工具对两个变量进行逼近，得出逼近函数：

$$v(\delta) = 2.03174603 + 0.36840401\delta^2 + 0.03549374\delta^4 + 0.00265514\delta^6 \quad (21)$$

由式(20)、式(21)即可修正检测出的幅值、频率和相位，以得到较为精准的值。

其他几个窗函数的修正公式在文献[13-14]中都已经给出，如下所述。

Hanning 窗的修正公式为

$$\delta = 0.66666938\alpha - 0.07362864\alpha^3 + 0.02170741\alpha^5 + 0.00032281\alpha^7 \quad (22)$$

$$v(\delta) = 1.33333336 + 0.52662090\delta^2 + 0.11929568\delta^4 + 0.02526885\delta^6 \quad (23)$$

四项 Nuttall 窗的修正公式为

$$\delta = 1.01467808\alpha - 0.08514234\alpha^3 + 0.01570281\alpha^5 - 0.00168382\alpha^7 \quad (24)$$

$$v(\delta) = 1.72433861 + 0.43078735\delta^2 + 0.05788869\delta^4 + 0.00630613\delta^6 \quad (25)$$

四项 MSD 窗的修正公式为

$$\delta = 1.14285717\alpha - 0.09328112\alpha^3 + 0.01568972\alpha^5 - 0.00195831\alpha^7 \quad (26)$$

$$v(\delta) = 1.82857143 + 0.40470879\delta^2 + 0.04824898\delta^4 + 0.00462593\delta^6 \quad (27)$$

4 仿真分析

4.1 与其他算法对比

给定一个模拟电力系统谐波信号：

$$x(t) = \sum_{m=1}^{12} A_m \cos(2\pi f_m t + \varphi_m) \quad (28)$$

式中， A_m 、 f_m 、 φ_m 分别为各次谐波的幅值、频率和初始相位，该信号的基波频率为电网的工频 50 Hz。

分别用 Hanning 窗插值法、四项 Nuttall 窗插值法、四项 MSD 窗插值法以及本文的方法对该谐波信号进行检测分析。其中采样频率为 3000 Hz，采样点为 1024 个。

通过以上几种方法检测分析所得的结果如表 2 所示，各项仿真数据均以百分比误差的形式列出。

从表中可以看出，本文方法相比于其他文献的算法，在幅值、频率和相位上的检测精度都高出几个数量级。

表 2 仿真数据
Table 2 Simulation data

与各次谐波理论幅值的相对误差(%)										
算法	1 (基波)	0.02 (2 次)	0.1 (3 次)	0.05 (5 次)	0.03 (6 次)	0.02 (7 次)	0.01 (8 次)	0.2 (9 次)	0.03 (11 次)	0.05 (12 次)
Hanning	5.8E-06	8.9E-04	6.4E-05	5.1E-04	1.1E-04	7.3E-04	3.4E-03	4.6E-06	5.4E-04	2.6E-04
四项 Nuttall	7.6E-07	6.2E-06	4.2E-07	5.3E-06	4.7E-06	1.7E-06	1.9E-06	5.9E-07	5.1E-06	2.0E-06
四项 MSD	2.8E-07	1.0E-06	2.2E-07	1.6E-07	3.8E-07	3.7E-07	7.7E-07	1.5E-07	2.7E-07	3.8E-07
本文方法	6.7E-09	4.7E-08	1.8E-07	1.6E-07	2.0E-08	1.5E-07	2.7E-07	2.5E-08	5.6E-09	1.7E-07
与各次谐波理论频率的相对误差(%)										
算法	50 Hz (基波)	100 Hz (2 次)	150 Hz (3 次)	250 Hz (5 次)	300 Hz (6 次)	350 Hz (7 次)	400 Hz (8 次)	450 Hz (9 次)	550 Hz (11 次)	600 Hz (12 次)
Hanning	4.6E-06	4.1E-05	6.9E-06	2.1E-05	4.1E-07	1.8E-05	5.1E-05	1.8E-07	1.4E-05	6.8E-06
四项 Nuttall	2.6E-08	3.5E-06	7.7E-08	2.6E-07	2.9E-07	1.1E-07	2.8E-07	9.0E-10	2.1E-07	7.0E-08
四项 MSD	1.4E-08	5.2E-07	4.5E-09	2.3E-08	4.0E-08	1.2E-08	7.2E-08	2.5E-09	2.3E-08	6.1E-09
本文方法	2.0E-09	5.3E-08	1.0E-09	2.7E-09	5.2E-09	1.8E-09	9.1E-09	2.3E-10	2.4E-09	6.6E-10
与各次谐波理论相位的相对误差(%)										
算法	-23.1 (基波)	115.6 (2 次)	59.3 (3 次)	48.3 (5 次)	34.3 (6 次)	-31.8 (7 次)	52.3 (8 次)	-63.7 (9 次)	-23.6 (11 次)	-35.8 (12 次)
Hanning	2.8E-04	6.9E-03	2.2E-03	6.7E-03	7.8E-03	3.0E-03	1.2E-01	5.5E-04	2.3E-02	7.9E-03
四项 Nuttall	4.2E-06	1.2E-04	1.2E-05	8.4E-05	1.2E-04	5.5E-06	1.1E-03	4.3E-06	2.6E-04	7.3E-05
四项 MSD	1.8E-06	2.3E-05	5.8E-07	7.3E-06	1.9E-05	2.7E-06	1.0E-04	7.8E-07	3.0E-05	6.2E-06
本文方法	2.6E-07	2.5E-06	1.5E-07	8.6E-07	2.6E-06	8.9E-07	8.5E-06	1.2E-07	3.2E-06	6.8E-07

几种算法的精度对比图分别如图 3、图 4、图 5 所示, 根据这 3 个图可以得出很直观的结论, 本文的算法精度明显高于其他算法。

4.2 工频波动情况下的检测分析

在电力系统的运行中, 负荷的变动和发电机状态的变化都会造成频率的波动^[20-21]。在国家标准中, 电网频率的允许波动的范围是 ± 0.2 Hz, 因此, 在工频波动的情况下, 算法依然能够保持较高的分析精度尤为重要。

用加窗插值的方法检测一个含单次谐波的信号, 变动基波频率从 49.8 Hz 到 50.2 Hz(步长为 0.1 Hz)。其中采样频率为 3000 Hz, 采样点为 1024 个。

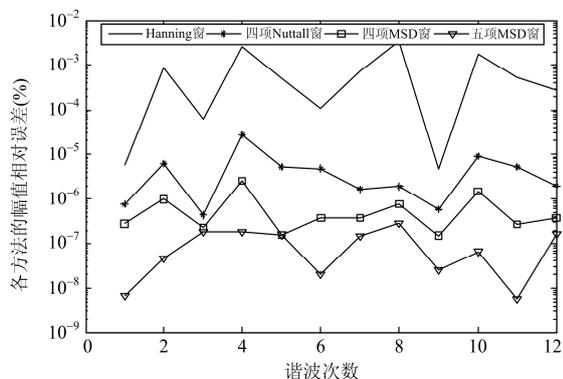


图 3 幅值相对误差对比

Fig. 3 Comparison of relative amplitude errors

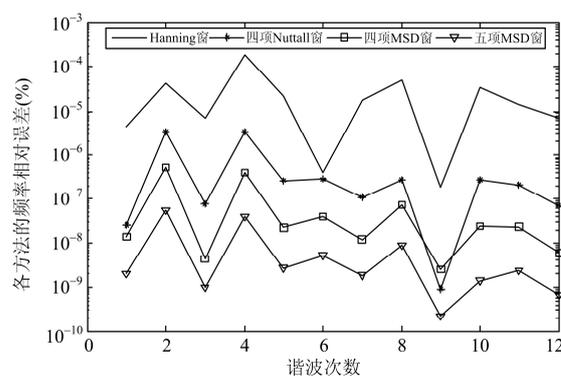


图 4 频率相对误差对比

Fig. 4 Comparison of relative frequency errors

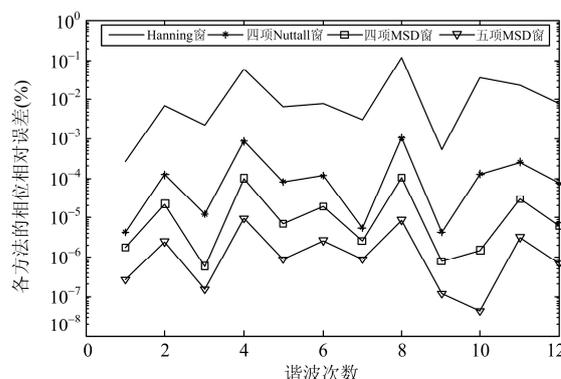


图 5 相位相对误差对比

Fig. 5 Comparison of relative phase errors

因为频率的计算结果精度直接影响到加窗插值FFT方法检测谐波的幅值和相位的精度,因此,本文只给出了工频波动时,所检测频率的相对误差,为了简单起见,所检测的频率为基波频率。检测基波频率的相对误差结果如图6所示。

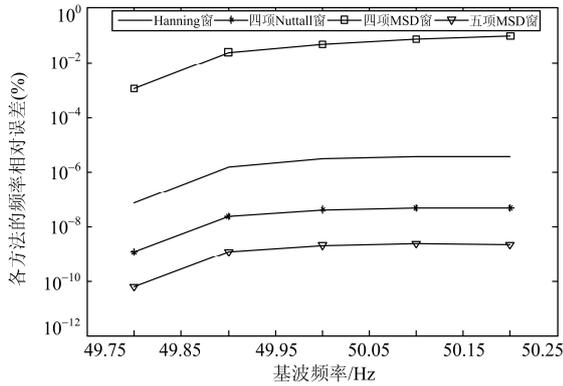


图6 基波频率相对误差

Fig. 6 Relative errors of fundamental frequency

从图6可以看出,在电网工频波动的时候,本文的方法仍然具有很高的精度。

5 结论

本文结合旁瓣特性较好的五项最大旁瓣衰减窗和三谱线插值的方法,计算出各项参数修正公式,实现了对信号中各次谐波的幅值、频率和相位的高精度检测。本文方法精度高于目前主流的加窗插值算法的精度,而且在电网工频波动时仍具有较高的分析精度。因此该算法能够应用于对谐波分析精度要求极高的场合。

参考文献

- [1] 任建锋,丁亚伟,付磊,等. 基于相位角原理的特高压电网失步解列改进方案[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(10): 104-107.
REN Jianfeng, DING Yawei, FU Lei, et al. An improved strategy for out-of-step separation based on phase angle principle for 1 000 kV ultra-high voltage AC power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(10): 104-107.
- [2] 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, 41(11): 85-87.
JIANG Jianbo, LIU Xianxing, WANG Deming. Application of FFT and wavelet transform to measurement of harmonics in power system[J]. High Voltage Technology, 2005, 41(11): 85-87.
- [3] 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 Fulin, LI Qunzhan, XIE Shaofeng, et al. Method for single-phase reactive and harmonics currents detection without PLL[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(1): 178-182.
- [4] 张文嘉,卢惠辉,苏成悦,等. 基于神经网络的电力谐波检测方法[J]. 陕西电力, 2015, 43(6): 67-70.
ZHANG Wenjia, LU Huihui, SU Chengyue, et al. Power harmonic detection approach based on network[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(6): 67-70.
- [5] 宋树平,马宏忠,徐刚,等. 五项最大旁瓣衰减窗插值电力谐波分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 83-89, 103.
SONG Shuping, MA Hongzhong, XU Gang, et al. Power harmonic analysis based on 5-term maximum-sidelobe-decay window interpolation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 83-89, 103.
- [6] 熊杰锋,李群,袁晓冬,等. 电力系统谐波和间谐波检测方法综述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 125-133.
XIONG Jiefeng, LI Qun, YUAN Xiaodong, et al. Detection methods of harmonics and inter-harmonics in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 125-133.
- [7] ZENG Bo, TENG Zhaosheng. Parameter estimation of power system signals based on cosine self-convolution window with desirable side-lobe behaviors[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(3): 1025-1041.
- [8] TOMAS G. Interpolation algorithms for discrete Fourier transform of weighted signals[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1983, 32(2): 350-355.
- [9] NUTTALL A H. Some windows with a very good sidelobe behavior[J]. Transactions on Acoustics Speech and Signal Processing, 1981, 29(1): 84-91.
- [10] FIFE D C, VIVENT 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.
- [11] 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): 64-67.
ZHANG Fusheng, GENG Zhongxing, GE Yaozhong. FFT algorithm with high accuracy for harmonic analyses in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(3): 64-67.
- [12] 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): 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.
- [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.
- 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] 牛胜锁, 梁志瑞, 张建华, 等. 基于四项余弦窗三谱线插值 FFT 的谐波检测方法[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(9): 2002-2008.
- NIU Shengsuo, LIANG Zhirui, ZHANG Jianhua, et al. Harmonic detection approach based on 4-term cosine window triple-spectrum-line interpolation FFT[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(9): 2002-2008.
- [15] 翟瑞森, 英超, 任国臣, 等. 基于 Nuttall 窗的三峰插值谐波算法分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 38-43.
- ZHAI Ruimiao, YING Chao, REN Guochen, et al. An approach for harmonic analysis based on Nuttall window and triple-spectrum-line interpolation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 38-43.
- [16] 李得民, 何怡刚. 基于 Nuttall 窗四谱线插值 FFT 的电力谐波分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 64-71.
- LI Demin, HE Yigang. Harmonic analysis of power system based on Nuttall window four-spectrum-line interpolation FFT[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 64-71.
- [17] 黄银龙, 乐健, 毛涛, 等. 一种新型的高压直流输电系统直流侧谐波电压测量方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 144-152.
- HUANG Yinlon, LE Jian, MAO Tao, et al. A novel measurement method of the harmonic voltage on the DC-side of HVDC transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 144-152.
- [18] 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, 42(2): 33-39.
- CAI Xiaofeng, ZHANG Hongbo, 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, 42(2): 33-39.
- [19] 许琨, 刘玮. 加 8 项余弦窗插值 FFT 算法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 27-32.
- XU Min, LIU Wei. An interpolation FFT algorithm based on 8-term cosine window[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 27-32.
- [20] 师洪涛, 卓放, 杨祯, 等. 基于改进正弦调制电流注入的三相交流电源系统谐波阻抗测量研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 257-264.
- SHI Hongtao, ZHUO Fang, YANG Zhen, et al. Study of harmonic impedance measurement for three-phase AC power system based on an improved modulated current injection method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 257-264.
- [21] 周念成, 楼晓轩, 王强钢, 等. 电网电压不平衡下三相光伏发电系统的谐波电流抑制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 246-254.
- ZHOU Niancheng, LOU Xiaoxuan, WANG Qianggang, et al. Harmonic currents suppression for three-phase photovoltaic power generation system under unbalanced grid voltage conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 246-254.

收稿日期: 2016-04-12; 修回日期: 2016-06-03

作者简介:

谢强(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力谐波的检测与治理; E-mail: xieqiangcumt@163.com

史丽萍(1964-), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统及其自动化;

马晓伟(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电机故障的检测。

(编辑 姜新丽)