

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180790

一种高精度六谱线插值 FFT 谐波与间谐波分析方法

华敏, 陈剑云

(华东交通大学电气与自动化工程学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 加窗插值快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)算法因其便于在嵌入式系统实现而被广泛应用于电力系统谐波检测, 可改善因非同步采样和非整周期截断造成的频谱泄漏与栅栏效应, 提高 FFT 分析的精确度。针对目前常用的加窗插值算法存在的不足, 在分析五项最大旁瓣衰减(Maximum-Sidelobe-Decay, MSD)窗频谱特性的基础上, 提出一种基于五项 MSD 窗六谱线插值 FFT 的谐波与间谐波分析算法。该算法利用紧邻峰值谱线频点的六条谱线进行加权运算, 充分考虑峰值频点左右对称谱线所蕴含的信息以提高分析精度。通过数据拟合求出窗函数对应的插值修正公式, 简化了运算过程。仿真结果表明, 五项 MSD 窗六谱线插值 FFT 算法设计实现灵活, 抑制频谱泄漏效果极好。相比于其他常见的四谱线插值 FFT 算法, 该算法具有更高的谐波、间谐波检测精度。

关键词: 谐波分析; 频谱泄漏; 五项 MSD 窗; 六谱线插值; 快速傅里叶变换

A high precision approach for harmonic and interharmonic analysis based on six-spectrum-line interpolation FFT

HUA Min, CHEN Jianyun

(School of Electrical Engineering and Automation, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The windowed interpolation FFT algorithm can be implemented easily by embedded systems, so it is widely used in power system harmonic detection, which can restrain the spectrum leakage and fence effect caused by non-synchronous sampling and non-integer cycle truncation in order to improve the analysis accuracy of FFT. Aiming at the shortcomings of common windowed interpolation algorithms, the spectral characteristics of 5-term MSD window are analyzed and a harmonic and interharmonic analysis algorithm based on 5-term MSD window and six-spectrum-line interpolation FFT is proposed. The algorithm uses six spectrum lines close to the peak spectrum line frequency point to perform weighted operations, the information contained in symmetric spectrum lines is considered. Through data fitting, the practical interpolation correction formula corresponding to the window function is obtained, which simplifies the operation process. Simulation results show that the algorithm can be designed and realized easily, it can also restrain the spectrum leakage effectively. Compared with other common four-spectrum-line interpolation FFT algorithms, the algorithm has higher accuracy in harmonic and interharmonic detection.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51467004).

Key words: harmonic analysis; spectrum leakage; 5-term MSD window; six-spectrum-line interpolation; FFT

0 引言

电力系统谐波分析研究^[1-2]已有多年历史。随着非线性负载的大量投入、新能源技术的快速发展, 电压、电流波形普遍出现畸变现象, 谐波、间谐波等电能质量问题日益严重, 直接影响电力系统的安全稳定运行。

准确并快速地掌握电力系统谐波含量是研究谐波问题的出发点, 也是谐波治理^[3-4]的主要依据。为了提高电能质量, 维护电力系统安全稳定运行, 应对谐波与间谐波成分进行高精度的检测和分析。

目前, 电力系统谐波研究的方法有很多种, 包括快速傅里叶变换算法、小波分析算法^[5-6]、自适应谐波检测法^[7]以及神经网络算法^[8]等。在这些算法中, 快速傅里叶变换(FFT)因其便于在嵌入式数字信号处理系统中实现而成为目前谐波分析最常用的方

法。但是在应用 FFT 进行谐波分析时，由于电网频率存在偏移，很难做到同步采样和整周期截断，极易造成频谱泄漏和栅栏效应，严重影响到谐波检测的准确度。特别是间谐波(非整数次谐波)十分容易被泄漏的频谱所淹没。为了抑制频谱泄漏、消除栅栏效应，需要对 FFT 进行改进。对于频谱泄漏，通常做法是通过时域加窗进行抑制。而消除栅栏效应的方法一般是对离散频谱进行插值校正。加窗算法中常用的窗函数有 Hanning 窗、Blackman 窗、Blackman-Harris 窗、Rife-Vincent 窗和 Nuttall 窗等，它们均在一定程度上抑制了频谱泄漏的影响。插值算法中有单峰谱线插值算法、双峰谱线插值^[9]算法、三谱线插值^[10-11]算法和四谱线插值^[12-14]算法。单峰谱线插值虽然算法比较简单，但校正的精度较低。双峰谱线插值算法利用了峰值谱线频点附近的两条谱线，但没有充分利用峰值频点附近泄漏谱线的信息。三谱线插值算法虽然提高了对泄漏谱线的利用量，但未充分考虑峰值频点左右对称谱线所蕴含的信息量。利用泄漏谱线的增多必然导致计算量的增加，但随着硬件处理器的不断发展，计算量的大小开始慢慢被淡化，检测的精确度才是重中之重。

为满足谐波与间谐波检测^[15-16]的高精度要求，本文在分析五项最大旁瓣衰减(MSD)窗频谱特性的基础上，充分考虑了峰值频点左右对称谱线所包含的信息，提出一种基于五项 MSD 窗六谱线插值 FFT 的谐波与间谐波分析算法，并采用包含 1~50 次谐波和 0.5~49.5 次间谐波的复杂信号对本文提出的算法进行验证。仿真结果表明，该插值算法极大地提高了信号分析的准确度，适合于高精度的谐波与间谐波检测。

1 混频误差、栅栏效应与截断误差

用 FFT 计算连续时间信号的傅里叶变换可能存在三种误差，即混频误差、栅栏效应与截断误差。

1.1 混频误差

信号 $x(t)$ 经 FFT 计算出的频谱 $X(k)$ 是连续频谱 $X(j\omega)$ 在有限离散频点上的采样值，如果连续信号 $x(t)$ 不是带限信号，或者采样频率不满足采样定理，在连续信号离散化时，就会出现频率混叠现象。

工程实际中的连续信号一般都不是带限信号，测量现场也可能存在许多高频干扰。唯一可靠的方法就是在连续信号进行 A/D 转换之前用模拟低通滤波器(即抗混叠滤波器)进行滤波，截止频率内的信号无衰减通过，高于截止频率的信号不能通过。

1.2 栅栏效应与截断误差

由于频谱 $X(k)$ 是离散序列，因而无法反映采样

点之间的细节，就如同隔着栅栏观赏风景一样，只留下 k 条离散谱线，即“栅栏效应”。栅栏效应是利用 FFT 进行频谱分析过程中不可避免的现象，如果信号中的频率成分位于谱线之间而不正好落在谱线上，频谱分析结果就会出现偏差。而截断误差是指对连续信号的采样序列进行 FFT 运算时，由于时间长度取有限值，即将信号截断，使信号的带宽被扩展了，出现能量泄漏。下面用简单算例进行说明。

一个余弦信号为 $x(t) = \cos(2\pi \times 50t)$ ，采样频率 $f_s = 256$ Hz，样本点数分别取 $N=256$ 和 $N=130$ ，在 FFT 后做频谱图比较分析，如图 1 所示。

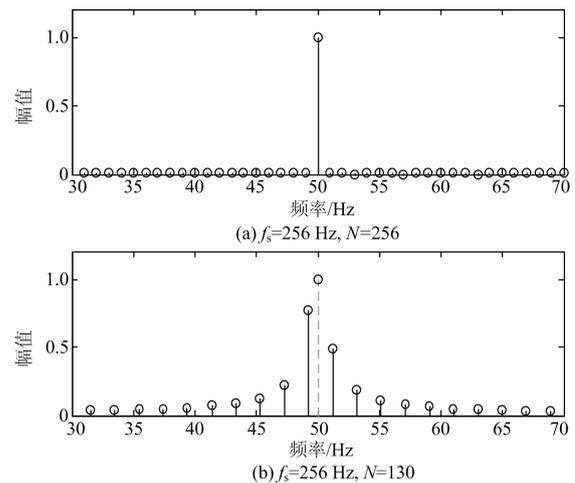


图 1 无泄漏与有泄漏的频谱图对比

Fig. 1 Comparison of spectrum of no leakage and leakage

由图 1 可以看出：在 $N = 256$ 的谱图上只在 50 Hz 处有一条谱线，其他频点的幅值都为 0；而在 $N = 130$ 的谱图上有明显的泄漏现象，最大两根谱线在 50 Hz 两侧，图中用虚线和黑圆表示了 50 Hz 的频率点。

此余弦信号加矩形窗截断之后，它的频谱图已不是一个单一的 δ 函数，而是存在泄漏现象。当取信号为同步采样时，信号的频率 $f_0 = (k - 1)\Delta f$ ， f_0 将与某一条谱线相重合，即第 k 条谱线频率为 f_0 。同步采样后得到的幅值谱图如图 1(a)和图 2 所示。

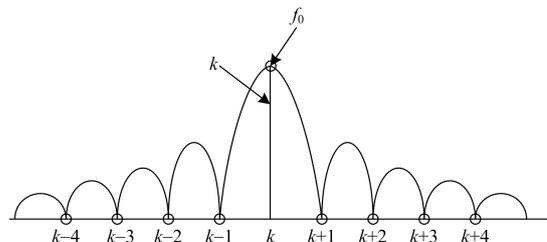


图 2 同步采样时的幅值谱图

Fig. 2 Amplitude spectrum of synchronous sampling

同步采样一样存在着泄漏的可能性, 但由于信号频率 f_0 与第 k 条谱线重合, $k \pm l$ (l 为整数) 的任意谱线正好落在 $X(\omega)$ 函数的零点上, 所以在幅值谱图中没有出现泄漏现象。

当取信号为非同步采样时, 信号的频率 f_0 不与 FFT 后某一条谱线重合, 而是处于两条谱线之间, 比如在第 k 和 $k+1$ 条谱线之间, 其中第 k 条谱线是局部极大值, 如图 1(b) 和图 3 所示。

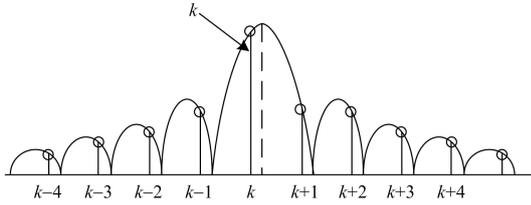


图 3 非同步采样时的幅值谱图

Fig. 3 Amplitude spectrum of non-synchronous sampling

非同步采样时同样存在泄漏的可能性, 由于信号频率 f_0 在两条谱线之间, 第 k 条谱线虽是局部最大值, 但不与 f_0 相重合, 则 $k \pm l$ (l 为整数) 的任意谱线都是 $X(\omega)$ 函数上的非零值, 所以在幅值谱图中出现泄漏现象。

2 五项 MSD 窗及其特性

上述截断的讨论中加了矩形窗函数, 但矩形窗函数的泄漏是最大的。本文所采用的五项 MSD 窗^[17]是一种余弦组合窗, 其时域的一般形式如式(1)所示。

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

式中: N 为采样点数; M 为窗函数的项数; $m=0,1,2,\dots,M-1$; $n=0,1,2,\dots,N-1$; 系数 a_m 满足约束条件 $\sum_{m=0}^{M-1} (-1)^m a_m = 0$ 和 $\sum_{m=0}^{M-1} a_m = 1$ 。

五项 MSD 窗的系数分别为: $a_0=0.2734375$, $a_1=0.4375$, $a_2=0.21875$, $a_3=0.0625$, $a_4=0.0078125$ 。根据其时域信息, 可以得出五项 MSD 窗的频域表达式为

$$W(\omega) = a_0 W_R(\omega) - \frac{1}{2} a_1 \left[W_R\left(\omega - \frac{2\pi}{N}\right) + W_R\left(\omega + \frac{2\pi}{N}\right) \right] + \frac{1}{2} a_2 \cdot \left[W_R\left(\omega - \frac{4\pi}{N}\right) + W_R\left(\omega + \frac{4\pi}{N}\right) \right] - \frac{1}{2} a_3 \left[W_R\left(\omega - \frac{6\pi}{N}\right) + W_R\left(\omega + \frac{6\pi}{N}\right) \right] + \frac{1}{2} a_4 \left[W_R\left(\omega - \frac{8\pi}{N}\right) + W_R\left(\omega + \frac{8\pi}{N}\right) \right] \quad (2)$$

式中, $W_R(\omega)$ 为矩形窗的傅里叶变换。

在窗函数归一化对数频谱图中, 有一些重要的

指标, 包括第一旁瓣衰减、主瓣宽度和旁瓣峰值渐近衰减率等, 这些指标参数的定义如图 4 所示。 A 是第一旁瓣与主峰相比的衰减量(单位为 dB), B 是窗函数在频域中幅值归一化后主峰下降 3 dB 的带宽, D 是旁瓣峰值渐近衰减率(单位为 dB/oct)。

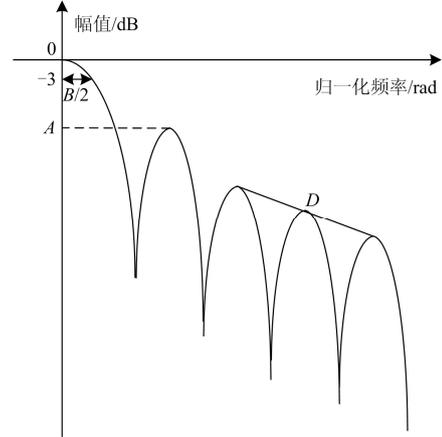


图 4 窗函数归一化对数频谱中若干指标的定义

Fig. 4 Definition of several parameters of the normalized logarithmic spectrum of window function

选择第一旁瓣衰减大且旁瓣峰值渐近衰减快的窗函数, 有利于缓解截断过程产生的频谱泄漏问题, 提高谐波分析的精确度。表 1 给出了五项 MSD 窗及其他常用余弦窗的旁瓣特性数值。

表 1 几种余弦窗的旁瓣特性

Table 1 Sidelobe characteristics of several cosine windows

窗函数名称	第一旁瓣衰减 A/dB	旁瓣峰值渐近衰减率 $D/(\text{dB/oct})$
Hanning	-32	18
Blackman	-58	18
Blackman-Harris	-92	6
四项三阶 Nuttall 窗	-83	30
五项 MSD 窗	-75	54

结合图 4 和表 1 可以看出, Blackman-Harris 窗的第一旁瓣衰减最大, 但其旁瓣峰值渐近衰减率仅为 6 dB/oct。在谐波分析中, 不能只选择第一旁瓣衰减大的窗函数, 还必须要考虑其旁瓣峰值渐近衰减率的大小。综合比较五种余弦窗的旁瓣特性, 本文选取具有第一旁瓣衰减大且旁瓣峰值渐近衰减快的五项 MSD 窗对含谐波与间谐波的信号进行加权处理。

3 六谱线插值算法

以单一频率信号为例进行分析, 设 $x(t)$ 以采样率 f_s 均匀采样的离散时间信号为

$$x(n) = A_0 \sin(2\pi \frac{f_0}{f_s} n + \varphi_0) \quad (3)$$

式中: A_0 为信号的幅值; f_0 为信号的频率; φ_0 为信号的初相角; f_s 为采样频率; $n=0,1,2,\dots,N-1$, 其中 N 为采样点数。

用余弦型窗函数 $w(n)$ 对式(3)形式的信号 $x(n)$ 进行加窗处理, 可得到加窗后信号的离散傅里叶变换表达式(只取正频率部分进行处理)为

$$\bar{X}((k-1)\Delta f) = \frac{A_0}{2j} e^{j\varphi_0} \cdot W \left[\frac{2\pi((k-1)\Delta f - f_0)}{f_s} \right] \quad (4)$$

式中: $\Delta f = \frac{f_s}{N}$ 为频率分辨率; $W(f)$ 为 $w(n)$ 的连续频谱。

非同步采样时, 峰值频率 $f_0 = (k_0 - 1)\Delta f$, k_0 一般不是整数, 所以不会正好处于离散谱线频点上。设在峰值频点 k_0 附近抽样得到的幅值最大和次最大谱线索引分别为 k_1 和 k_2 , 这两条谱线的幅值含量最大, 其外围四条谱线的索引记为 k_3 、 k_4 、 k_5 和 k_6 , $k_5 < k_3 < k_1 \leq k_0 \leq k_2 < k_4 < k_6$ ($k_2 = k_1 + 1$), 这六条谱线的幅值分别为 y_1 、 y_2 、 y_3 、 y_4 、 y_5 和 y_6 , 其中 $y_1 = |\bar{X}((k_1 - 1)\Delta f)|$, $y_2 = |\bar{X}((k_2 - 1)\Delta f)|$, 其他以此类推。由于 $0 \leq k_0 - k_1 \leq 1$, 此时引入辅助参数 $\alpha = k_0 - k_1 - 0.5$, 显然 α 的取值为 $[-0.5, 0.5]$, 又定义 β 如式(5)。

$$\beta = \frac{(6y_2 + 2y_4 + y_6) - (6y_1 + 2y_3 + y_5)}{6y_2 + 2y_4 + y_6 + 6y_1 + 2y_3 + y_5} \quad (5)$$

假设

$$\lambda = 6 \left| W \left[\frac{2\pi(0.5 - \alpha)}{N} \right] \right| + 2 \left| W \left[\frac{2\pi(1.5 - \alpha)}{N} \right] \right| + \left| W \left[\frac{2\pi(2.5 - \alpha)}{N} \right] \right| \quad (6)$$

$$\eta = 6 \left| W \left[\frac{2\pi(-0.5 - \alpha)}{N} \right] \right| + 2 \left| W \left[\frac{2\pi(-1.5 - \alpha)}{N} \right] \right| + \left| W \left[\frac{2\pi(-2.5 - \alpha)}{N} \right] \right| \quad (7)$$

则由式(4)可得

$$\beta = \frac{\lambda - \eta}{\lambda + \eta} \quad (8)$$

当 N 较大时, 式(8)一般简化为 $\beta = g(\alpha)$, 其反函数记为 $\alpha = g^{-1}(\beta)$ 。对于给定的窗函数, 求出辅助参数 α , 频率修正公式为

$$f_0 = (k_0 - 1)\Delta f = (\alpha + k_1 + 0.5 - 1)\Delta f \quad (9)$$

由于峰值频点附近的 k_1 、 k_2 两条谱线所含的幅值信息量最大, 计算时给这两条谱线更大的加权值, 六条谱线的加权值分别为 1、2、6、6、2、1。按照式(4)修正幅值为

$$A_0 = \frac{2(6y_2 + 2y_4 + y_6 + 6y_1 + 2y_3 + y_5)}{\lambda + \eta} \quad (10)$$

当 N 较大时, 式(10)可进一步简化为

$$A_0 = N^{-1}(6y_2 + 2y_4 + y_6 + 6y_1 + 2y_3 + y_5)v(\alpha) \quad (11)$$

其中 $v(\alpha)$ 定义为

$$v(\alpha) = \frac{2N}{\lambda + \eta} \quad (12)$$

对初相角的计算公式可表示为

$$\varphi_0 = \arg \left[\bar{X}((k_1 - 1)\Delta f) \right] + \frac{\pi}{2} - \pi[\alpha + 0.5] \quad (13)$$

4 五项 MSD 窗六谱线的修正公式

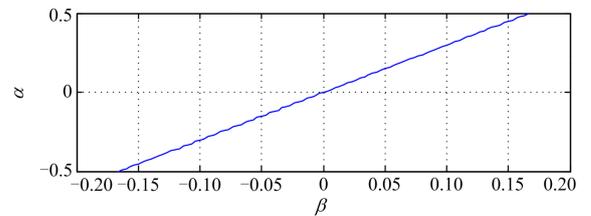
本文采用多项式逼近的方法计算 $\alpha = g^{-1}(\beta)$ 。

由于 α 的取值为 $[-0.5, 0.5]$, 故可在该范围内以 0.01 为步长取一组 α 值代入式(8)中, 得到一组 β 值, 然后利用 Matlab 提供的多项式拟合函数 `polyfit` 求出 $\alpha = g^{-1}(\beta)$ 的系数, 其中多项式的最高阶次不超过 7。同理, 可求出 $v(\alpha)$ 的近似计算公式。基于五项 MSD 窗的六谱线插值修正公式为

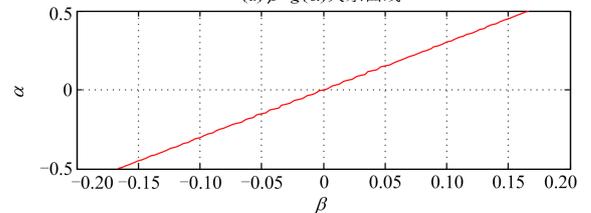
$$\begin{aligned} \alpha = g^{-1}(\beta) = & 2.988368842568\beta + \\ & 0.412292642737\beta^3 + 0.231323686491\beta^5 \\ v(\alpha) = & 0.514218899049 + 0.075075251224\alpha^2 + \\ & 0.005462439243\alpha^4 + 0.000269980304\alpha^6 \end{aligned}$$

$\alpha = g^{-1}(\beta)$ 和 $v(\alpha)$ 的拟合曲线如图 5 所示。

图 5(a)是 $\beta = g(\alpha)$ 的关系曲线, 用蓝线表示。图 5(b)把 β 作为自变量拟合出 $\alpha = g^{-1}(\beta)$, 用红线画出这条曲线, 可以看出两者重合度相当高。图 5(c)是



(a) $\beta = g(\alpha)$ 关系曲线



(b) $\alpha = g^{-1}(\beta)$ 拟合曲线

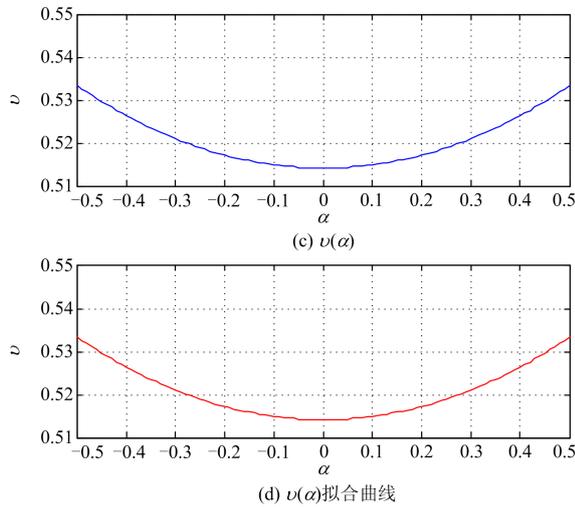


图 5 曲线拟合图

Fig. 5 Graph of curve fitting

按式(12)计算, 画出的相应曲线, 用蓝线表示。图 5(d)是用 $v(\alpha)$ 的 α 多项式拟合曲线, 拟合出的曲线用红线表示, 可以看出两者重合度也相当高。

5 仿真实验研究

加窗插值 FFT 算法的流程图如图 6 所示。

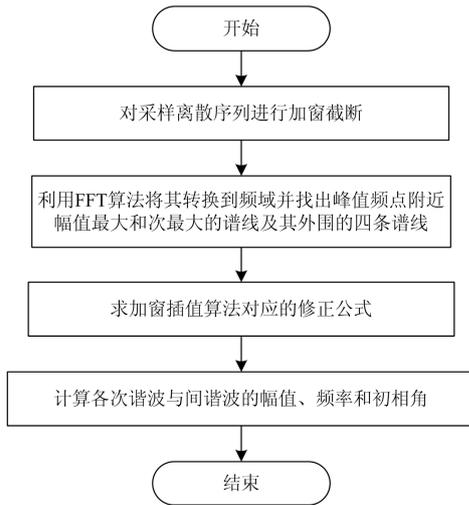


图 6 加窗插值 FFT 算法流程图

Fig. 6 Flow chart of window and interpolation FFT algorithm

为了验证本文所提出算法的计算准确度, 对包含 1~50 次谐波和 0.5~49.5 次间谐波的复杂信号进行仿真分析。该复杂信号的模型为

$$x(t) = \sum_{m=1}^{100} A_m \cos(2\pi f_m t + \varphi_m) \quad (14)$$

设定信号基波频率为 50.5 Hz(基频偏移), 采样频率 $f_s=10\ 240$ Hz, 400 ms 采样点数 $N=4\ 096$, 频

谱分辨率为 2.5 Hz, 不满足同步采样的定义条件, 属于非同步采样。

为了方便起见, 在仿真所采用的信号参数中没有将 1~50 次谐波和 0.5~49.5 次间谐波的幅值、频率和初相角全部列出, 只列出部分谐波阶次和间谐波阶次的幅值、频率和初相角, 如表 2 所示。

表 2 信号参数

Table 2 Signal parameters

谐波类型	频率/Hz	幅值/V	初相角/(°)
次谐波	25.25	2.2	35
基波	50.5	220	10
1.5 次(间谐波)	75.75	1.9	45
2 次谐波	101	20	20
2.5 次(间谐波)	126.25	1.7	55
3 次谐波	151.5	45	30
3.5 次(间谐波)	176.75	1.5	65
4 次谐波	202	18	40
4.5 次(间谐波)	227.25	1.3	75
5 次谐波	252.5	33	50
5.5 次(间谐波)	277.75	1.1	85
6 次谐波	303	7	60
6.5 次(间谐波)	328.25	0.6	95
7 次谐波	353.5	19	70

采用文献[13]中的 Blackman 窗四谱线插值算法、文献[18]中的 4 项 3 阶 Nuttall 窗四谱线插值算法、文献[19]中的 Blackman-Harris (B-H)窗四谱线插值算法与本文提出的五项 MSD 窗六谱线插值算法进行对比, 在相同的仿真条件下对该复杂谐波与间谐波信号进行检测分析。通过 Matlab 平台编写以上四种加窗插值 FFT 算法的程序。四种加窗插值 FFT 算法计算结果与真实值的百分比相对误差如表 3 所示(其中 E-7 表示 10^{-7})。

表 3 几种加窗插值算法计算结果比较

Table 3 Comparison of different windowed interpolation algorithms

算法	与各次谐波、间谐波幅值真实值的百分比相对误差/%				
	次谐波	基波	1.5 次	2 次	2.5 次
布莱克曼	1.74E-1	3.15E-5	2.27E-2	3.24E-4	3.31E-2
B-H	1.57E-2	6.08E-6	1.61E-3	5.97E-5	2.30E-3
Nuttall	9.64E-3	2.63E-7	2.95E-3	1.43E-5	2.48E-3
本文方法	1.07E-3	2.40E-7	1.09E-3	2.82E-6	7.02E-4

算法	与各次谐波、间谐波幅值真实值的百分比相对误差/%				
	3 次	3.5 次	4 次	4.5 次	5 次
布莱克曼	1.01E-4	3.23E-2	5.25E-4	1.35E-2	1.66E-4
B-H	1.18E-6	3.06E-3	6.15E-5	2.88E-3	8.40E-5
Nuttall	5.49E-6	2.33E-3	1.36E-5	8.10E-4	2.19E-6
本文方法	1.16E-6	5.20E-4	1.74E-6	8.96E-5	1.89E-7

续表 3

算法	与各次谐波、间谐波幅值真实值的百分比相对误差/%			
	5.5 次	6 次	6.5 次	7 次
布莱克曼	1.15E-2	4.69E-4	5.83E-2	2.61E-5
B-H	2.75E-3	2.26E-4	5.65E-3	1.68E-5
Nuttall	6.20E-4	1.14E-5	3.70E-3	2.82E-6
本文方法	6.79E-5	1.95E-6	7.34E-4	7.42E-7

算法	与各次谐波、间谐波频率真实值的百分比相对误差/%				
	次谐波	基波	1.5 次	2 次	2.5 次
布莱克曼	5.28E-2	6.70E-6	8.00E-3	9.46E-5	2.96E-3
B-H	6.69E-3	1.98E-6	8.08E-4	8.58E-6	4.03E-4
Nuttall	2.27E-3	3.19E-7	3.38E-4	1.08E-6	1.27E-4
本文方法	1.07E-3	1.01E-8	5.74E-5	7.61E-9	3.56E-5

算法	与各次谐波、间谐波频率真实值的百分比相对误差/%				
	3 次	3.5 次	4 次	4.5 次	5 次
布莱克曼	5.08E-6	1.22E-3	2.86E-5	4.53E-4	6.09E-6
B-H	2.07E-6	2.17E-4	4.31E-6	1.64E-4	3.85E-6
Nuttall	2.81E-7	5.52E-5	4.80E-7	2.13E-5	7.25E-8
本文方法	5.78E-8	2.49E-5	1.12E-7	9.94E-6	4.49E-9

算法	与各次谐波、间谐波频率真实值的百分比相对误差/%			
	5.5 次	6 次	6.5 次	7 次
布莱克曼	3.09E-4	1.46E-5	1.63E-3	3.07E-6
B-H	1.35E-4	1.40E-5	2.90E-4	2.42E-6
Nuttall	1.34E-5	1.62E-7	7.27E-5	2.89E-9
本文方法	6.17E-6	2.36E-8	2.79E-5	3.51E-9

算法	与各次谐波、间谐波初相角真实值的百分比相对误差/%				
	次谐波	基波	1.5 次	2 次	2.5 次
布莱克曼	2.56	2.90E-3	1.26E-2	2.26E-4	6.55E-1
B-H	3.38E-1	9.65E-4	5.18E-3	4.28E-3	6.61E-2
Nuttall	1.12E-1	9.69E-5	2.15E-3	2.35E-5	2.66E-2
本文方法	5.51E-2	3.10E-6	4.82E-3	1.86E-7	6.20E-3

算法	与各次谐波、间谐波初相角真实值的百分比相对误差/%				
	3 次	3.5 次	4 次	4.5 次	5 次
布莱克曼	1.85E-3	1.69E-1	2.88E-3	4.61E-2	1.34E-3
B-H	5.85E-5	1.87E-2	2.92E-3	3.16E-2	1.88E-3
Nuttall	6.80E-5	6.70E-3	1.08E-4	8.92E-4	2.38E-5
本文方法	2.08E-5	3.85E-3	4.10E-5	1.83E-3	1.88E-6

算法	与各次谐波、间谐波初相角真实值的百分比相对误差/%			
	5.5 次	6 次	6.5 次	7 次
布莱克曼	6.87E-2	8.34E-3	4.29E-1	7.40E-4
B-H	3.00E-2	5.29E-3	6.41E-2	5.36E-4
Nuttall	3.01E-3	1.10E-4	1.91E-2	4.62E-6
本文方法	1.45E-3	9.48E-6	7.01E-3	1.19E-6

从表 3 中的具体数值可以看出, 本文提出的算法在谐波与间谐波幅值、频率和初相角的检测精度上具有明显的优势, 在对弱信号的检测能力上具有明显的提升。相比于其他文献提出的各种算法, 本文所提出算法的检测精度要高出 1~3 个数量级。

其中对谐波幅值检测的相对误差最低能够达到 10^{-7} %数量级, 对谐波频率检测的相对误差最低能够达到 10^{-9} %数量级, 对谐波初相角检测的相对误差最低能够达到 10^{-7} %数量级, 对间谐波幅值检测的相对误差最低能够达到 10^{-5} %数量级, 对间谐波频率检测的相对误差最低能够达到 10^{-6} %数量级, 对间谐波初相角检测的相对误差最低能够达到 10^{-3} %数量级。

由此可见, 本文提出的算法在谐波与间谐波分析方面有着更高的精度。

6 结论

本文针对目前常用的加窗插值算法存在的不足, 在分析五项 MSD 窗优秀的频谱泄漏抑制特性, 并充分考虑峰值频点左右对称谱线所蕴含泄漏信息的基础上, 提出了一种基于五项 MSD 窗六谱线插值 FFT 的谐波与间谐波分析算法。该算法利用紧挨峰值谱线频点的六条谱线进行加权运算, 通过数据拟合推导出实用的插值修正公式, 简化了运算过程。仿真结果表明, 本文提出的算法抑制频谱泄漏的效果相当好, 相比于其他文献提出的四谱线插值 FFT 算法, 在相同的仿真条件下, 采用本文提出的算法具有更高的谐波与间谐波参数计算精度, 实用价值高。

参考文献

- [1] 李倩, 雷诚诚, 刘霞. 电力系统谐波检测方法研究现状分析[J]. 通信电源技术, 2017, 34(5): 85-86.
LI Qian, LEI Chengcheng, LIU Xia. Analysis of harmonic detection methods in power system research status[J]. Telecom Power Technology, 2017, 34(5): 85-86.
- [2] DAS J. Power system harmonics and passive filter designs[M]. Wiley-IEEE Press, 2015.
- [3] 翁利国, 朱铁铭, 寿挺, 等. 单相分布式发电接入台区电网的谐波补偿控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(19): 1-11.
WENG Ligu, ZHU Tieming, SHOU Ting, et al. A harmonic compensation control method for single-phase distributed generations integrated into low voltage power network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(19): 1-11.
- [4] 姚锦卫, 张国兴, 张颖. 采用 APF 进行谐波治理和无功补偿的工程应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(6): 140-144.
YAO Jinwei, ZHANG Guoxing, ZHANG Ying. Engineering application of harmonic control and reactive power compensation using APF[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2018, 30(6): 140-144.
- [5] 孙曙光, 庞毅, 王景芹, 等. 一种基于新型小波阈值去噪预处理的 EEMD 谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 42-48.

- SUN Shuguang, PANG Yi, WANG Jingqin, et al. EEMD harmonic detection method based on the new wavelet threshold denoising pretreatment[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 42-48.
- [6] 任子晖, 刘昊岳, 徐进霞. 基于小波变换和改进 Prony 方法的电能质量扰动分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(9): 122-128.
- REN Zihui, LIU Haoyue, XU Jinxia. Power quality disturbance analysis based on wavelet transform and improved Prony method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(9): 122-128.
- [7] 王洪诚, 王蕾, 沈霞, 等. 基于改进增益型自适应 LMS 算法的谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 42-46.
- WANG Hongcheng, WANG Lei, SHEN Xia, et al. New harmonic detection method based on LMS algorithm of improved adaptive gain[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 42-46.
- [8] 郝淑娟, 何巍巍, 刘永皓, 等. 基于神经网络的二次谐波检测研究[J]. 现代电子技术, 2018, 41(18): 170-173.
- HAO Shujuan, HE Weiwei, LIU Yonghao, et al. Research on second harmonic detection based on neural network[J]. Modern Electronics Technique, 2018, 41(18): 170-173.
- [9] 彭曦, 刘开培, 李登云. Kaiser 窗的组合余弦窗拟合及其在频谱分析中的应用[J]. 电测与仪表, 2018, 55(19): 93-96.
- PENG Xi, LIU Kaipei, LI Dengyun. A fitting combined cosine window based on Kaiser window and its application in spectral analysis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(19): 93-96.
- [10] 刘涛, 庄双勇, 陈晓伟, 等. 基于 Hanning 自乘-卷积窗 FFT 三峰插值修正的电能计量新算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(22): 9-15.
- LIU Tao, ZHUANG Shuangyong, CHEN Xiaowei, et al. A new algorithm for electric energy measurement based on Hanning self multiplication-convolution window triple-spectrum-line interpolation FFT[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 9-15.
- [11] 张俊敏, 刘开培, 汪立, 等. 基于乘法窗函数的插值 FFT 的谐波分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 1-5.
- ZHANG Junmin, LIU Kaipei, WANG Li, et al. An algorithm for harmonic analysis based on multiplication window function[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 1-5.
- [12] 张俊敏, 刘开培, 汪立, 等. 基于主瓣宽度多谱线插值的高精度快速谐波分析算法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(增刊 1): 121-128.
- ZHANG Junmin, LIU Kaipei, WANG Li, et al. A precise and rapid algorithm for harmonic analysis based on multi-spectrum-line in main lobe width interpolation FFT[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(S1): 121-128.
- [13] 郝柱, 顾伟, 褚建新, 等. 基于四谱线插值 FFT 的电网谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 107-113.
- HAO Zhu, GU Wei, CHU Jianxin, et al. A power network harmonic detection method based on the four-spectrum-line interpolation FFT[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 107-113.
- [14] 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.
- [15] 荆雪君, 智泽英. 基于 FFT 的间谐波优化检测算法研究[J]. 电气自动化, 2018, 40(5): 51-54.
- JING Xuejun, ZHI Zeying. Interharmonics optimization detection algorithm based on FFT[J]. Electrical Automation, 2018, 40(5): 51-54.
- [16] 徐文佳, 赵伟, 黄洪涛, 等. 计及间谐波的电能计量方法[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 656-662.
- XU Wenjia, ZHAO Wei, HUANG Hongtao, et al. A method for electrical energy measurement in consideration of inter-harmonics[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 656-662.
- [17] 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.
- [18] 李晓辉, 唐瑞, 曹英丽, 等. 基于四项余弦窗四谱线插值 FFT 的电力谐波算法分析[J]. 沈阳农业大学学报, 2016, 47(6): 745-751.
- LI Xiaohui, TANG Rui, CAO Yingli, et al. An approach for electrical harmonic analysis based on four cosine window and quadplex-spectrum-line interpolation FFT[J]. Journal of Shenyang Agricultural University, 2016, 47(6): 745-751.
- [19] 张俊敏, 刘开培, 汪立, 等. 基于四谱线插值 FFT 的谐波分析快速算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 139-145.
- ZHANG Junmin, LIU Kaipei, WANG Li, et al. A rapid algorithm for harmonic analysis based on four-spectrum-line interpolation FFT[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 139-145.

收稿日期: 2018-06-30; 修回日期: 2018-11-30

作者简介:

华敏(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量在线监测系统; E-mail: 772629093@qq.com

陈剑云(1962—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统监控与自动化。E-mail: tiger984@163.com

(编辑 许威)