

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211265

# 基于 DFT 和群组谐波能量回收理论的谐波与 间谐波检测算法

商立群<sup>1</sup>, 许海洋<sup>1</sup>, 臧鹏<sup>1</sup>, 杨雷<sup>2</sup>

(1. 西安科技大学电气与控制工程学院, 陕西 西安 710054; 2. 国网陕西省电力公司  
渭南供电公司, 陕西 渭南 714000)

**摘要:** 采用离散傅里叶变换(DFT)检测含有频率相近的谐波与间谐波的电网信号时, 信号的非同步采样会引起频谱泄露和混叠现象, 严重影响了检测精度。针对以上问题, 提出一种基于 DFT 和群组谐波能量回收理论的谐波与间谐波检测算法。首先根据 DFT 对谐波/间谐波的频谱分析结果判别谐波/间谐波分量数。然后基于群组能量回收理论通过频率偏移量自动调整取样窗口的长度, 依次对主要谐波/间谐波周围的溃散能量进行迭代收集。最后通过主要谐波/间谐波周围溃散总能量值将其幅值与频率恢复为原貌, 即可得到各分量幅值和频率的精确值。Matlab 仿真算例表明, 该算法能有效减小因频谱泄露而引起的测量误差, 准确测量出邻近谐波与间谐波分量的幅值和频率。  
**关键词:** 谐波; 间谐波; 频谱干扰; 溃散能量; 群组谐波能量

## A harmonic and interharmonic detection algorithm based on DFT and group harmonic energy recovery theory

SHANG Liqun<sup>1</sup>, XU Haiyang<sup>1</sup>, ZANG Peng<sup>1</sup>, YANG Lei<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Control Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;  
2. Weinan Electric Power Supply Company, State Grid Shaanxi Electric Power Company, Weinan 714000, China)

**Abstract:** When a discrete Fourier transform (DFT) is used to detect a grid signal containing harmonics and interharmonics with similar frequency, the non-synchronous sampling of the signal causes spectrum leakage and aliasing, which seriously affect the detection accuracy. In order to improve this, a harmonic and interharmonic detection algorithm based on DFT and group harmonic energy recovery theory is proposed. First, from a spectrum analysis of the harmonic / interharmonic by DFT, the number of harmonic and interharmonic components is determined. Then based on group energy recovery theory, the length of the sampling window is automatically adjusted by the frequency offset, and the collapse energy around the main harmonic / interharmonic is collected iteratively. Finally, the amplitude and frequency are restored to their original state by total collapse energy value around the main harmonic / interharmonic, and the accurate values of the amplitude and frequency of each component can be obtained. Simulation in Matlab shows that the proposed algorithm can effectively reduce the measurement error caused by spectrum leaks, and accurately measure the amplitude and frequency of adjacent harmonic and interharmonic components.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Shaanxi Province (No. 2021JM-393).

**Key words:** harmonic; interharmonic; spectrum interference; collapse energy; group harmonic energy

## 0 引言

近年来, 随着非线性时变拓扑负载在电网中的应用越来越广泛, 其产生的谐波、间谐波已经对电

网造成了严重污染, 引起了电网电压电流波形的畸变, 造成了电网谐波的不稳定和复杂性, 电力电子设备的安全和稳定性也受到了极大的影响<sup>[1-4]</sup>。因此, 找到合适的谐波检测方法并实现快速准确的测量, 是治理谐波污染的前提<sup>[5-8]</sup>。

离散傅里叶变换(DFT)谐波分析方法因其易于

基金项目: 陕西省自然科学基金项目资助(2021JM-393)

嵌入电网谐波测量系统而得到广泛应用<sup>[9-12]</sup>，但实际上电网基波频率难以避免地存在波动，同步采样难以做到，易产生频谱泄露，给谐波检测带来了误差<sup>[13-15]</sup>。目前已有相关文献提出利用加窗函数和谱线校正的方法消除频谱泄露，减少各次谐波之间的频谱干扰。然而，基于加窗插值的 FFT 谐波分析方法中，现有窗函数中在被测信号含有高次弱幅值谐波分量以及电网频率波动等复杂工况下，检测准确度较低<sup>[16]</sup>。文献[17]提出一种由矩形窗和余弦窗经过卷积运算得到的混合卷积窗，该算法不受基频波动的影响，也有一定的抗噪性，但其主瓣随着阶数的升高而变宽，导致频谱间隔较短的组件的测量精度降低。文献[18]采用全相位频谱分析方法，虽然有效地减小了频谱泄露的影响，但降低了谐波分析的分辨率。

传统的间谐波测量方法都是仅对单个频率分量进行频谱校正，只适用于单频率或间隔较远的多频率成分信号的检测，当间谐波与谐波成分相近时，间谐波的频谱会泄露到谐波谱线上，和谐波频谱产生主瓣干涉，使检测结果产生较大的误差<sup>[19]</sup>。文献[20]利用五项 MSD 窗六谱线插值 FFT 算法来抑制频谱泄露，该算法比其他插值 FFT 算法具有更高的谐波与间谐波检测精度，但其并未考虑邻近谐波、间谐波以及基频波动情况的影响。此外，国内外学者还提出了其他间谐波检测方法，但都存在一定局限性，例如 Prony 算法可以识别出信号中的频率、幅值、初相位和衰减因子等重要信号，但其具有模型阶数选取难、抗噪声干扰性差和计算量大等缺点<sup>[21-23]</sup>；原子分解算法在搜索最佳匹配原子时需要多次内积运算，计算量非常大，导致计算时间过长，实时性无法保证<sup>[24-26]</sup>；文献[27]提出一种参数法对谐波和间谐波进行分析，频率分辨率较高，但间谐波检测模型的阶数计算复杂；文献[28]提出基于总体最小二乘法—旋转不变法的谐波检测算法，可区分密集谱间谐波的频率分量，且具有一定的抗噪性，但算法计算量较大，密集谱谐波与间谐波的参量不易获得。

为解决在非同步采样的情况下，传统算法存在频谱泄露、邻近谐波与间谐波之间相互干扰等问题，本文提出一种基于 DFT 和群组谐波能量回收理论的谐波与间谐波检测算法。首先根据 DFT 对信号的频谱分析结果，判别谐波、间谐波的个数；然后，依据群组谐波能量回收理论提出群组谐波能量迭代回收法，将因频谱泄露而溃散至谐波、间谐波周围的“群组能量”重新收集并恢复为原貌，得到谐波、

间谐波幅值与频率参数的精确测量值。

## 1 DFT 谐波检测原理

根据傅里叶定理，任何周期性失真的波形信号  $i_s(t)$  可以展开成各种不同频谱的傅里叶级数。

$$i_s(t) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} I_s(k\omega_0) e^{jk\omega_0 t} \quad (1)$$

$$I_s(k\omega_0) = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} x(t) e^{-jk\omega_0 t} dt \quad (2)$$

式中： $\omega_0$  ( $\omega_0 = 2\pi/T = 2\pi f$ ) 为基本角频率； $I_s(k\omega_0)$  为第  $k$  个系数。

假设信号  $i_s(t)$  的取样频率为  $f_s$ ，取样  $N$  点，利用数字信号处理技术，连续的信号  $i_s(t)$  可以转换成离散信号  $i_s[n]$ ，然后进行离散傅里叶变换，如式(3)所示。

$$I_s[k] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} i_s[n] W_N^{kn} \quad (3)$$

式中： $I_s[k]$  为  $i_s[n]$  在频率  $f_k$  ( $f_k = k/T$ ) 处的离散傅里叶的转换值； $W_N^{kn} = \exp(j2\pi/N)$ 。

DFT 的逆变换可以从其频谱中恢复其原来的信号，如式(4)。

$$i_s[n] = \sum_{k=0}^{N/2-1} I_s[k] W_N^{-kn} \quad (4)$$

假设  $i_s[n]$  是周期性波形且周期为  $T$ ，其角频率分辨率  $\Delta\omega$  可表示为

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (5)$$

如果取样长度选定为  $P$  个周期 ( $P > 1$  且为正整数)，则  $\Delta\omega$  可表示为

$$\Delta\omega = \frac{2\pi}{pT} = \frac{\omega_0}{p} \quad (6)$$

根据式(6)， $\Delta f$  可表示为

$$\Delta f = \frac{1}{pT} = \frac{1}{pN_s T_s} = \frac{1}{NT_s} = \frac{f_s}{N} \quad (7)$$

式中： $N_s = N/p$ ； $T_s = 1/f_s$ 。

## 2 基于 DFT 和群组谐波能量回收理论的谐波与间谐波检测算法

### 2.1 群组谐波能量回收理论

根据 IEC 6100-4-7 标准中对“群组”的定义，建立“群组谐波”的概念。由 Parseval 关系式的离散形态可将波形的能量  $P$  表示为

$$P = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N/2-1} i_s[n]^2 = \sum_{k=0}^{N/2-1} i_s[k]^2 \quad (8)$$

正负频谱值可视为由取样信号的频域转换成周期性的时频信号, 因此, 实际的信号频谱是对称的且为共轭复数。然而, 因为频谱有对称的特性, 实际上频谱分析结果仅会显示其正频谱的部分。

因此, 在频率  $f_k$  处的能量可表示为

$$P[f_k] = I_s[k]^2 + I_s[N-k]^2 = 2I_s[k]^2 \quad (9)$$

式中,  $k=0,1,2,L,N/2-1$ 。

实际上, 仅主要的谐波和间谐波才会对电力系统造成较大的影响。因此, 根据傅里叶级数, 系统电流  $i_s(t)$  可简单表示成有限个序列正弦谐波的组成, 如式(10)所示。

$$i_s(t) = \sum_{m=1}^M A_m \cos(\omega_m t + \varphi_m) \quad (10)$$

式中:  $\omega_m = 2\pi f_m$ ;  $\varphi_m = \tan^{-1}(-b_m/a_m)$ ;  $A_m = (a_m^2 + b_m^2)^{\frac{1}{2}}$ 。

以  $\Delta t$  间隔时间取样电力系统电压或电流信号, 式(8)可以离散方式呈现, 如式(11)所示。

$$i_s[n] = \sum_{m=1}^M A_m \cos(\omega_m n \Delta t + \varphi_m) \quad (11)$$

式中:  $n$  为离散取样系数;  $t = n \Delta t$  为时间变量。

由式(11)可知, 第  $m$  个主要谐波的振幅位于离散频率  $f_k$  的位置, 表示如式(12)所示。

$$A_m[f_k] = \sqrt{P[f_k]} = \sqrt{2}I_s[k] \quad (12)$$

式中,  $m=1,2,3,L,M$ 。

$f_k$  谐波的能量可能会由于频谱泄露而溃散至  $f_k$  谐波的周围, 因此, 谐波能量在  $f_k$  谐波的附近可以恢复成“群组能量”。每一群组的能量可收集到  $f_{k-\Delta k}$  与  $f_{k+\Delta k}$  之间的能量, 如式(13)所示。

$$P_m^*[f_k] = \sum_{\Delta k=-\tau}^{+\tau} (A_m[f_{k+\Delta k}])^2 \quad (13)$$

式中,  $\tau$  是正整数, 表示群组的频宽。

每一个谐波振幅可表示为

$$A_m^*[f_k] = \sqrt{P_m^*[f_k]} \quad (14)$$

实际上, 在利用 DFT 对电网信号进行频谱分析时, 大部分的频谱泄露都可以回收为一个群组, 且位于一个主要频率上, 依此结论可作为测量间谐波的理论基础, 如图 1 所示。

## 2.2 群组谐波溃散能量迭代回收法

若电网信号的波形  $s(t)$  (电压或电流) 以取样频率  $f_s = 1/T_s$  进行取样, 且其基本频率为  $f_d$ , 则

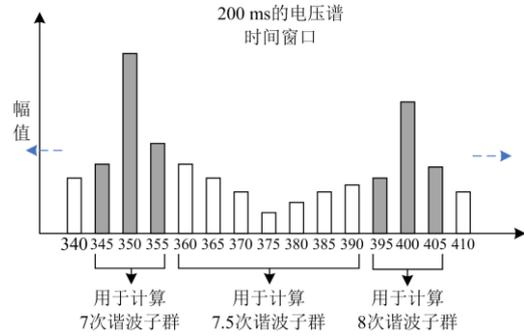


图 1 谐波子组

Fig. 1 Harmonic subgroup

$$s(n) = s(t) \Big|_{t=nT_s} \quad (15)$$

式中,  $n=0,1,2,L,N-1$ ,  $N$  为傅里叶基本周期  $T_s$  取样数。

失真的波形信号一般可以由 3 个部分组成, 如式(16)所示。

$$s(n) = s_d(n) + s_h(n) + s_i(n) \quad (16)$$

式中:  $s_d(n)$  是基波分量;  $s_h(n)$  是谐波分量;  $s_i(n)$  是间谐波分量。

考虑电网频率波动的因素, 取  $\Delta f' = \frac{f_s}{N}$ , 以便获得更加准确的基波  $f_d'$  与幅值  $A_d'$ , 即可得到基波信号  $s_d'(n)$  与谐波信号  $s_h'(n)$ , 如式(17)所示。

$$s'(n) = s(t) \Big|_{t=\frac{n}{f_s}} = s_d'(n) + s_h'(n) + s_i'(n) \quad (17)$$

式中,  $n=0,1,2,L,N'-1$ 。

同理, 在测量间谐波时, 假设  $s(n)$  的间谐波为系统主要谐波成份而暂时忽略  $s_d(n) + s_h(n)$  (如式(16))。因此, 主要的间谐波频率以及相应的振幅用上述方法即可得到, 如式(18)所示。

$$s''(n) = s(n) - [s_d(n) + s_h(n)] = s_i(n) = \sum_{i=1}^m s_i \quad (18)$$

式中,  $m$  表示主要间谐波的个数。

利用 DFT 对信号进行频谱分析的结果如图 2 所示。在传统 DFT 分析中, 取样窗口的长度大小是影响频谱分析是否正确的关键因素。谐波在小频率偏移时(偏移量小于 0.5 Hz)为取样长度过长的情况, 则其第二个较强的振幅位于主要频率振幅的右边, 即  $A_m[f_{k+1}] > A_m[f_{k-1}]$ ; 对于大频率偏移时(偏移量大于 0.5 Hz)为取样长度不足的情况, 其第二个较强的振幅是位于主要频率振幅的左边, 即  $A_m[f_{k+1}] < A_m[f_{k-1}]$ 。因此, 本文提出的群组谐波溃散能量迭代回收法可以自动调整取样长度, 得到谐波与间谐波精确的测量结果。

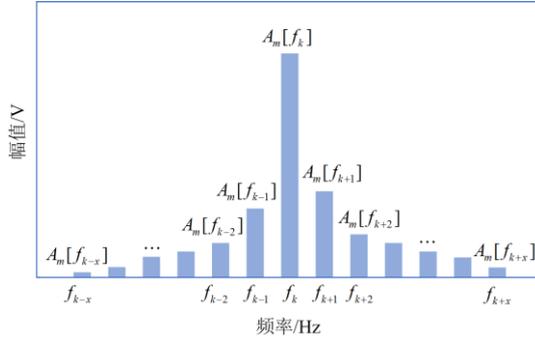


图2 主要频谱周围振幅能量分布图

Fig. 2 Amplitude energy distribution around the main frequency spectrum

依据图2所示,取 $\tau=1$ 为初始值,利用本文算法自动调整取样长度,迭代回收主要频谱周围的溃散能量。主要频谱周围溃散的总能量定义为 $P_m^{**}[f_k]$ ,如式(19)所示。

$$P_m^{**}[f_k] = \sum_{\Delta k=-\tau}^{+\tau} (A_m[f_{k+\Delta k}])^2 - (A_m[f_k])^2 \quad (19)$$

式中, $P_m^{**}[f_k]$ 已经忽略了频谱本身的能量。

基于以上群组谐波能量回收理论,一旦溃散的能量回收至主要频率后,频谱的振幅 $A_m^*[f_k]$ 即可恢复成原貌,如式(20)所示。

$$A_m^*[f_k] = \sqrt{P_m^{**}[f_k] + (A_m[f_k])^2} \quad (20)$$

本文提出的基于DFT改进的谐波与间谐波检测方法的分析计算流程如下。

- (1) 设定参数 $f_s$ 、 $N$ ,且 $\tau=1$ , $P_{\min}=0.0001$ 。
- (2) 取样信号 $i_s(t)$ 。
- (3) 执行DFT。
- (4) 得到主要谐波/间谐波的个数 $M$ ;设 $m=1$ 。

执行DFT。

(5) 若 $A_m[f_{k+1}] > A_m[f_{k-1}]$ ,则 $N=N-1$ ;若否,则执行下一步骤。

(6) 若 $A_m[f_{k+1}] < A_m[f_{k-1}]$ ,则 $N=N+1$ ;若否,则执行下一步骤。

(7) 检查是否 $P_m^{**}[f_k] \leq P_{\min}$ 。若是,循环停止并确定此时的 $N$ ,即 $N'$ ,主要的谐波/间谐波(含基波)的频率 $f'_m$ 与振幅 $A'_m$ 便可找到;若否,重回至步骤(5),直至 $P_m^{**}[f_k] \leq P_{\min}$ 。

(8) 令 $m=m+1$ ;  $M=M+1$ 。

(9) 检查是否 $M=0$ 。若是,循环停止;若否,重回至步骤(5)。循环会持续动作直到所有的主要谐波/间谐波(含基波)的频率 $f'_m$ 与振幅 $A'_m$ 找到为止。

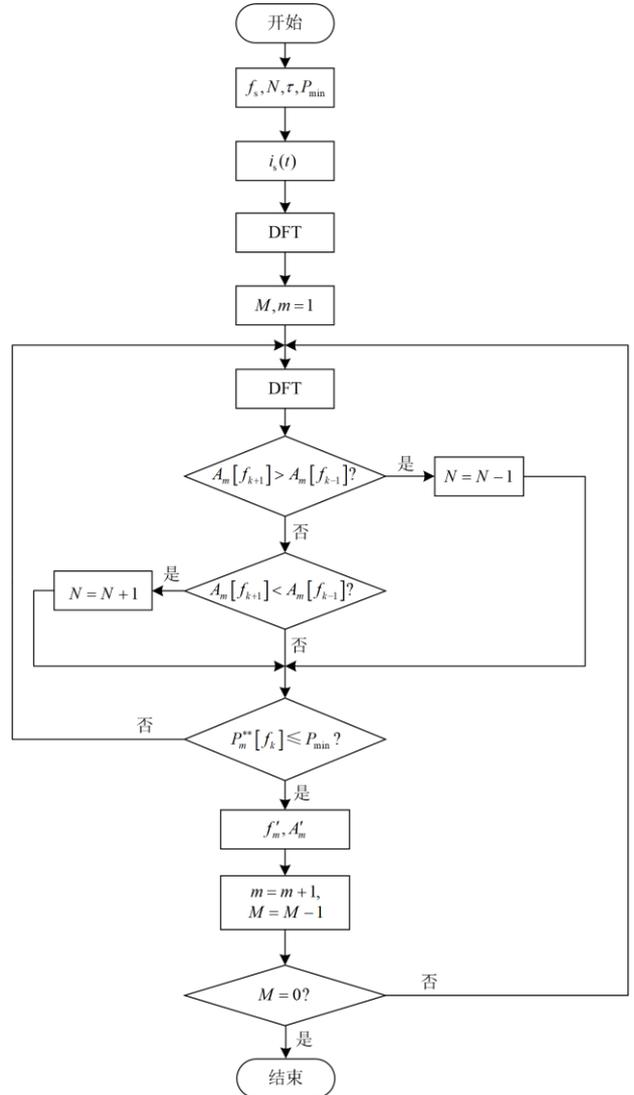


图3 群组谐波溃散能量迭代回收法流程图

Fig. 3 Flow chart of the iterative recovery method of group harmonic collapse energy

### 3 实验仿真与分析

#### 3.1 含高次、弱幅值且频率相近的谐波与间谐波仿真信号分析

实际电网中的信号既含有幅值较大的基波信号,同时含有幅值较小的高次谐波分量,高次弱幅值谐波容易受到其他次谐波的影响,造成现有窗函数在频谱泄漏抑制效果上仍不理想,导致复杂谐波情况下测量精度较低。为验证本文所提出的基于DFT和群组谐波回收理论的谐波与间谐波检测算法的精确性和稳定性,设置一组含有高次、弱幅值及频率相接近的谐波与间谐波测试信号,其表达式如式(21)所示。

$$x(t) = \sum_{m=1}^7 A_m \cos(2\pi f_m t + \phi_m) \quad (21)$$

式中：基波及谐波、间谐波的频率、相位、幅值参数如表 1 所示。设置系统采样频率  $f_s = 3 \text{ kHz}$ ，采样点数  $N = 1024$ 。

表 1 信号仿真参数

类别	$m$	幅值/V	频率/Hz	初相角/(°)
基波	1	380	50	30
谐波	2	38.9	150	30.9
	3	23	350	105
	4	37.6	500	33.8
间谐波	5	7	52	100
	6	6.7	220	70
	7	4.5	355	165.1

待分析信号的幅频图如图 4 所示，各次谐波与间谐波的能量溃散情况十分严重，52.9 Hz 间谐波幅

值已经被与其相近的基波频谱所泄露的能量淹没，350 Hz 谐波和 355 Hz 间谐波之间也发生了信号频谱能量泄露、谱线相互交叠的现象。分别利用加窗插值 FFT 算法、Prony 算法和本文算法对该仿真信号的分量进行分析，结果如表 2 和表 3 所示。

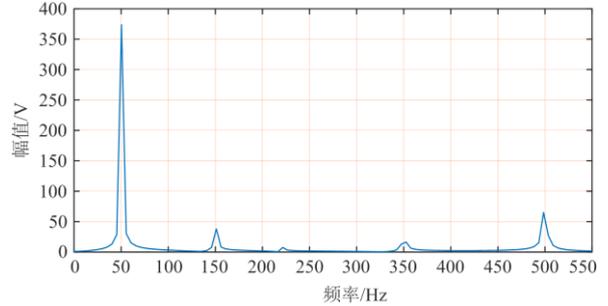


图 4 信号的频谱分析图

Fig. 4 Spectrum analysis diagram of the signal

表 2 各分量幅值参数的估计结果

类别	幅值/V	无噪声估计偏差/%			SNR=70 dB 估计偏差/%		
		方法 1	方法 2	方法 3	方法 1	方法 2	方法 3
基波	380	1.11	2.36	<b><math>3.33 \times 10^{-1}</math></b>	12.36	6.45	<b><math>4.63 \times 10^{-1}</math></b>
	38.9	$1.36 \times 10^{-3}$	$3.32 \times 10^{-1}$	$-1.42 \times 10^{-3}$	$2.54 \times 10^{-2}$	$8.87 \times 10^{-1}$	<b><math>-1.55 \times 10^{-3}</math></b>
谐波	23	4.04	3.36	<b><math>2.41 \times 10^{-1}</math></b>	45.6	6.58	<b><math>3.36 \times 10^{-1}</math></b>
	37.6	$-2.3 \times 10^{-4}$	$-2.53 \times 10^{-1}$	$2.62 \times 10^{-4}$	$-3.42 \times 10^{-2}$	$-5.83 \times 10^{-1}$	<b><math>-2.83 \times 10^{-3}</math></b>
	7	—	—	<b><math>4.63 \times 10^{-1}</math></b>	—	—	<b><math>-4.88 \times 10^{-1}</math></b>
间谐波	6.7	$7.4 \times 10^{-3}$	$-2.90 \times 10^{-1}$	<b><math>2.41 \times 10^{-3}</math></b>	$6.33 \times 10^{-1}$	$-3.14 \times 10^{-1}$	<b><math>-2.57 \times 10^{-3}</math></b>
	4.5	87.99	$1.41 \times 10^{-1}$	$-2.54 \times 10^{-1}$	389.64	$6.57 \times 10^{-1}$	<b><math>4.53 \times 10^{-1}</math></b>

表 3 各分量频率参数的估计结果

类别	频率/Hz	无噪声估计偏差/%			SNR=70 dB 估计偏差/%		
		方法 1	方法 2	方法 3	方法 1	方法 2	方法 3
基波	50	$7.40 \times 10^{-2}$	$5.40 \times 10^{-1}$	<b><math>2.40 \times 10^{-3}</math></b>	$5.6 \times 10^{-1}$	$9.10 \times 10^{-1}$	<b><math>4.32 \times 10^{-3}</math></b>
	150	$-1 \times 10^{-4}$	$-1.61 \times 10^{-2}$	$1 \times 10^{-4}$	$-2.9 \times 10^{-4}$	$-7.32 \times 10^{-2}$	$3 \times 10^{-4}$
谐波	350	$5.54 \times 10^{-2}$	$3.54 \times 10^{-2}$	<b><math>3.48 \times 10^{-2}</math></b>	$-3.65 \times 10^{-1}$	$9.0 \times 10^{-2}$	<b><math>4.11 \times 10^{-2}</math></b>
	500	$-1 \times 10^{-4}$	$2.64 \times 10^{-3}$	<b>0</b>	$4 \times 10^{-4}$	$-9.94 \times 10^{-3}$	<b><math>1 \times 10^{-4}</math></b>
	52	—	—	<b><math>-5.85 \times 10^{-2}</math></b>	—	—	<b><math>5.91 \times 10^{-2}</math></b>
间谐波	220	$-1 \times 10^{-4}$	$-1.66 \times 10^{-3}$	$4.10 \times 10^{-3}$	$3 \times 10^{-4}$	$6.63 \times 10^{-3}$	$5.32 \times 10^{-3}$
	355	$-4.09 \times 10^{-1}$	$-4.09 \times 10^{-2}$	<b><math>3.75 \times 10^{-2}</math></b>	5.86	$8.63 \times 10^{-2}$	<b><math>3.88 \times 10^{-2}</math></b>

在无噪声和信噪比为 70 dB 的条件下，分别利用方法 1(插值 FFT 算法)、方法 2(Prony 算法)和方法 3(本文算法)对仿真信号谐波与间谐波各分量进行检测。由表 2 和表 3 可以看出：在无噪声的情况下，加窗插值 FFT 算法检测谐波、间谐波时，若无

频率相近成分，各分量参数精度较高；而当间谐波的频率接近谐波时，参数估计偏差极大，甚至出现无法检测的情况。传统 Prony 算法在理想情况下，除了 52 Hz 间谐波外，其余分量都能够较准确测得，但受到噪声干扰时，会使拟合信号与实际信号出现

偏差，其测量误差会随之增大。利用本文算法不仅能够对频率相邻近，存在主瓣干扰问题而导致频谱严重泄露的各次谐波、间谐波(50 Hz 和 50.29 Hz、350 Hz 和 355 Hz)分量的幅值和频率准确估计，而且在频谱分辨率固定的情况下，当谐波与间谐波(50 Hz 和 52 Hz)之间的频率差小于频率分辨率时，依然能够有效准确估计幅值和频率参数，但对个别谐波和间谐波(150 Hz 和 220 Hz)的检测精度要稍逊于其他两种算法。此外，在噪声干扰情况下，本文方法的测量精度会有所下降，但整体计算精度要优于插值 FFT 算法和传统 Prony 算法，幅值估计精度均在 0.5% 以内，频率估计精度均在 0.06% 以内。

### 3.2 基波频率波动情况下的仿真信号分析

通常，负荷的突然变动会引起电网频率波动，而电网频率波动将导致系统中谐波的不确定性，从而影响谐波分析结果<sup>[29]</sup>。

假设式(21)给出了波形仿真信号的表达式，基波频率在 49.5~50.5 Hz 波动。设置  $f_s = 2.5 \text{ kHz}$ ， $N = 1024$ ，其余参数如表 1 所示。利用本文算法对基频波动时各次谐波和间谐波信号进行检测，频率和幅值的相对误差分别如图 5 和图 6 所示。

由图 5 和图 6 可知：当基波频率波动  $\pm 0.5 \text{ Hz}$  时，本文算法能够克服频率波动带来的影响，且保持良好的检测精度。当基波频率偏离量较大(49.5 Hz、49.6 Hz 或 50.4 Hz、50.5 Hz)时，对于频率相近的谐波、间谐波的测量参数相对误差有较小影响，但对无频率成分相近的谐波、间谐波的测量精度几乎没有影响；当基波频率偏离量较小(49.9 Hz 或 50.1 Hz)时，各次谐波、间谐波的测量参数相对误差均基本维持在稳定值。总体上，文中提出的基于 DFT 和群组谐波能量回收理论的谐波与间谐波检测算法在基波频率波动的情况下，频率、幅值的测量相对误差分别保持在 0.08% 和 0.7% 以内，满足实际电网运行对于谐波和间谐波测量的要求。

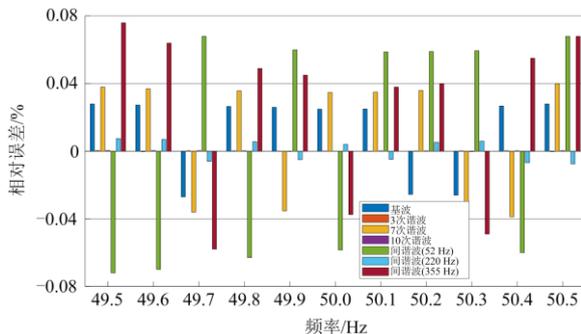


图 5 基频波动时各次谐波和间谐波检测频率相对误差  
Fig. 5 Each harmonic and interharmonic detection frequency relative error at foundation frequency fluctuation

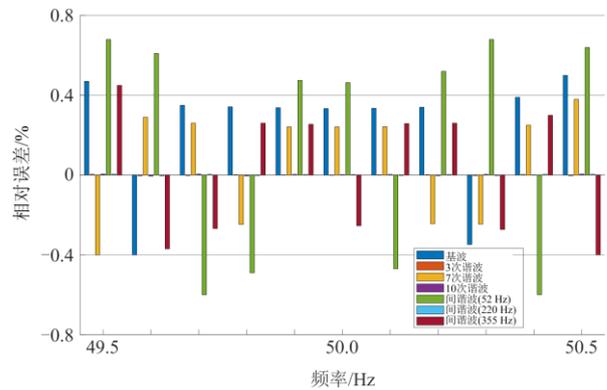


图 6 基频波动时各次谐波和间谐波检测幅值相对误差  
Fig. 6 Each harmonic and interharmonic detection amplitude relative error at foundation frequency fluctuation

## 4 结论

本文针对 DFT 算法在对频率邻近的谐波/间谐波做频谱分析时，容易因采样不同步而导致频谱泄露和混叠的问题，采用群组谐波能量回收理论，提出了一种基于 DFT 和群组谐波能量回收理论的谐波与间谐波检测算法，分别使用含高次低幅的邻近谐波信号、含噪声的谐波信号和含基频波动的谐波信号作为仿真模型，比较了本文算法与 Prony 算法、插值 FFT 算法对各谐波和间谐波分量的幅值与频率测量精度。具体结论如下：

(1) 本文算法不仅能有效抑制位于基波和谐波附近的间谐波分量对参数估计带来的偏差，并且不受基频波动的影响，同时也解决了以往在检测邻近基波、谐波的间谐波分量时需要长采样数据这一难题。

(2) 本文算法利用群组谐波能量迭代回收的方法来测量谐波与间谐波信号，较其他两种算法可以极大地减小计算量和复杂度。传统 Prony 算法和插值 FFT 算法在谐波检测研究中，都是依靠滤波、迭代和谱线插值的方法来提高算法的辨识精度，导致算法的计算量和复杂度提升，在一些实际设备上运行较慢，最终无法同时兼顾时间和精度。

通过仿真实验和结果分析表明：本文算法的整体计算精度及抗噪性能要优于传统插值 FFT 算法和 Prony 算法，且速度快、实时性好，但如何减小噪声，进一步提高检测精度，仍然有待深入研究。

## 参考文献

[1] 李振华, 胡廷和, 杜亚伟, 等. 基于窗函数和谱线插值理论的谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 78-88.

- LI Zhenhua, HU Tinghe, DU Yawei, et al. Harmonic detection method based on the theory of windows and spectrum line interpolation[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(22): 78-88.
- [2] 聂一雄, 彭显刚, 戴乔旭, 等. 谐波测量的改进 FFT 插值算法研究[J]. *高压电器*, 2016, 52(9): 91-97, 102.
- NIE Yixiong, PENG Xiangang, DAI Qiaoxu, et al. Improved FFT interpolation algorithm for harmonic measurement[J]. *High Voltage Apparatus*, 2016, 52(9): 91-97, 102.
- [3] 林海雪. 电能质量指标的完善化及其展望[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(29): 5073-5079.
- LIN Haixue. Perfecting power quality indices and prospect[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(29): 5073-5079.
- [4] 卜令岩, 贾清泉, 田书娅, 等. 电压检测型 APF 构成的分布式谐波治理系统稳定性分析[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(21): 99-106.
- BU Lingyan, JIA Qingquan, TIAN Shuya, et al. Stability analysis for distributed harmonic mitigation system composed of voltage detection based active power filters[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(21): 99-106.
- [5] 张强, 王海云, 王维庆. 一种新型组合优化谐波分析方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(10): 156-163.
- ZHANG Qiang, WANG Haiyun, WANG Weiqing. A new combined optimization harmonic analysis method[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(10): 156-163.
- [6] KRISHNAMURTHY S, BANINGOBERA B E. IEC61850 standard-based harmonic blocking scheme for power transformers[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2019, 4(2): 121-135.
- [7] 牛庆, 邵蕾, 蔡华洵, 等. 基于微网有源滤波装置谐波检测与抑制的研究[J]. *智慧电力*, 2020, 48(12): 46-50, 64.
- NIU Qing, SHAO Lei, CAI Huaxun, et al. Harmonic detection and suppression of active filter device based on microgrid[J]. *Smart Power*, 2020, 48(12): 46-50, 64.
- [8] 黄鹏, 戴威, 张莹, 等. 兼具有源电力滤波器功能的多功能并网逆变器控制[J]. *电力工程技术*, 2021, 40(1): 107-114.
- HUANG Peng, DAI Wei, ZHANG Ying, et al. Multi-function grid-connected inverter control with APF function[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2021, 40(1): 107-114.
- [9] CHEN Hao, LIU Huawu, XING Yan, et al. Enhanced DFT based controller for selective harmonic compensation in active power filters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(8): 8017-8030.
- [10] 李恺, 向鑫, 卜文彬, 等. 基于频谱分辨率自适应的双插值 DFT 谐波分析方法[J]. *电测与仪表*, 2021, 58(5): 92-97.
- LI Kai, XIANG Xin, BU Wenbin, et al. Two-weighted interpolation DFT harmonic analysis algorithm based on spectrally-resolution adaptive[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2021, 58(5): 92-97.
- [11] 谢业强, 王钢, 曾德辉. 基于一阶自卷积 Kaiser 窗的分频段谐波检测 DFT 算法[J]. *广东电力*, 2021, 34(6): 79-88.
- XIE Yeqiang, WANG Gang, ZENG Dehui. Segmented dft algorithm for harmonic detection based on 1st-order self-convolution kaiser window[J]. *Guangdong Electric Power*, 2021, 34(6): 79-88.
- [12] 阳登辉, 朱明星, 徐斌. 孤网失稳状态下频率和暂态谐波分析方法[J]. *中国电力*, 2021, 54(8): 27-34.
- YANG Denghui, ZHU Mingxing, XU Bin. An analysis method for frequency and transient harmonics of isolated network under instable condition[J]. *Electric Power*, 2021, 54(8): 27-34.
- [13] LIU Huawu, HU Haibing, CHEN Hao, et al. Fast and flexible selective harmonic extraction methods based on the generalized discrete Fourier transform[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(4): 3484-3496.
- [14] 兰金晨, 朱革兰, 李松奕. 基于广义 S 变换突变识别的暂稳态谐波检测方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(23): 40-46.
- LAN Jinchen, ZHU Quanlan, LI Songyi. Detection method of transient and steady state harmonics based on generalized S-transform mutation recognition[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(23): 40-46.
- [15] MA C X, CHEN H, CHAI Y L. Analysis of voltage stability uncertainty using stochastic response surface method related to wind farm correlation[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(3): 211-219.
- [16] 李振华, 胡廷和, 杜亚伟, 等. 一种优化窗函数及其在电网谐波检测中的应用分析[J]. *高压电器*, 2020, 56(10): 239-246, 252.
- LI Zhenhua, HU Tinghe, DU Yawei, et al. Optimal window function and its application in harmonic detection of power grid[J]. *High Voltage Apparatus*, 2020, 56(10): 239-246, 252.
- [17] 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.
- SUN Zhongmin, HE Zhengyou, ZANG Tianlei. Estimating fundamental parameters by using sliding-window spectrum

- separation algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(16): 207-214.
- [18] SU Taixin, YANG Mingfa, JIN Tao, et al. Power harmonic and interharmonic detection method in renewable power based on Nuttall double-window all-phase FFT algorithm[J]. IET Renewable Power Generation, 2018(8): 953-961.
- [19] 段晨, 杨洪耕. 邻近基波/谐波的间谐波检测算法[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1818-1825.  
DUAN Chen, YANG Honggeng. An algorithm for detecting interharmonics adjacent to fundamental/harmonic components[J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1818-1825.
- [20] 华敏, 陈剑云. 一种高精度六谱线插值 FFT 谐波与间谐波分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 9-15.  
HUA Min, CHEN Jianyun. A high precision approach for harmonic and interharmonic analysis based on six-spectral-line interpolation FFT[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 9-15.
- [21] 郭成, 尹轲, 张艳萍, 等. 一种基于综合 DFT 和 Prony 算法的谐波与间谐波分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(17): 1-9.  
GUO Cheng, YIN Ke, ZHANG Yanping, et al. A harmonic and interharmonic analysis method based on integrated DFT and Prony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(17): 1-9.
- [22] 张煜林, 陈红卫. 基于 CEEMD-WPT 和 Prony 算法的谐波间谐波参数辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(12): 115-121.  
ZHANG Yulin, CHEN Hongwei. Parameter identification of harmonics and inter-harmonics based on CEEMD-WPT and Prony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(12): 115-121.
- [23] 刘政, 陈俊, 李浩澜, 等. 基于 Prony 算法和小波变换的联合电力谐波分析策略[J]. 重庆理工大学学报(自然科学), 2018, 32(11): 174-178.  
LIU Zheng, CHEN Jun, LI Haolan, et al. Combined analysis strategy for power harmonics based on Prony algorithm and wavelet transform[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2018, 32(11): 174-178.
- [24] 贾清泉, 姚蕊, 王宁, 等. 一种应用原子分解和加窗频移算法分析频率相近谐波/间谐波的方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(27): 4605-4612.  
JIA Qingquan, YAO Rui, WANG Ning, et al. An approach to detect harmonics/inter-harmonics with closing frequencies using atomic decomposition and windowed frequency shifting algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(27): 4605-4612.
- [25] 曲正伟, 郝婉茹, 王宁. 原子分解快速算法在电能质量扰动分析中的应用[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 145-150.  
QU Zhengwei, HAO Wanru, WANG Ning. Application of atom decomposition rapid algorithm in power quality disturbance analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 145-150.
- [26] 蒋建东, 杨鲲鹏, 耿莉莉. 基于加窗插值 FFT 和原子分解的间谐波检测算法[J]. 郑州大学学报(理学版), 2018, 50(3): 105-110.  
JIANG Jiandong, YANG Kunpeng, GENG Lili. Inter-harmonics detection algorithm based on windowed interpolation FFT and atomic decomposition[J]. Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition), 2018, 50(3): 105-110.
- [27] HERZONG A, HABETS E A P. Eigenbeam-ESPRIT for DOA-Vector estimation[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2019, 26(3): 572-576.
- [28] CHEN J, JIN T, MOHAMED M A, et al. An adaptive TLS-ESPRIT algorithm based on an S-G filter for analysis of low frequency oscillation in wide area measurement systems[J]. IEEE Access, 2019, 7: 47644-47654.
- [29] 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. Analysis of the three-largest side petal attenuation window interpolation electric power harmonic[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 83-89, 103.

收稿日期: 2021-09-13; 修回日期: 2021-11-22

作者简介:

商立群(1968—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: shanglq@xust.edu.cn

许海洋(1996—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: 591186001@qq.com

臧鹏(1996—), 男, 硕士, 研究方向为电力系统保护与控制。E-mail: 604854564@qq.com

(编辑 周金梅)