

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190942

# 新能源并网系统次同步谐波相量检测方法

黄星宇<sup>1</sup>, 罗萍萍<sup>1</sup>, 龚锦霞<sup>1</sup>, 谢琳宇<sup>1</sup>, 杨春奇<sup>2</sup>

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 同济大学电子与信息工程学院, 上海 200000)

**摘要:** 新能源汇集地区产生的次同步谐波会影响电网安全稳定运行, 传统傅里叶算法的次同步谐波检测精度容易受到频谱泄漏和栅栏效应的影响。为了提高次同步谐波相量的检测精度, 提出了一种基于 Nuttall 窗和全相位傅里叶分析(apFFT)的新算法。通过将采样数据分成  $N$  段, 并加两次 4 项 5 阶 Nuttall 窗, 得到预处理后的  $N$  点数据分段再进行 FFT。进而, 基于 apFFT 和传统 FFT 幅值的平方关系以及 apFFT 自身的“相位不变性”, 校正幅值和频率的全相位谱分析结果。相比于特征根分析方法和插值校正傅里叶方法, 该方法在保持傅里叶方法快速性的同时提高了次同步谐波检测精度。仿真结果验证了该方法的有效性。

**关键词:** 新能源并网; 次同步振荡; 相量检测; 相位差校正; 全相位傅里叶

## Subsynchronous harmonic phasor detection in a renewable energy grid-connected system

HUANG Xingyu<sup>1</sup>, LUO Pingping<sup>1</sup>, GONG Jinxia<sup>1</sup>, XIE Linyu<sup>1</sup>, YANG Chunqi<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. College of Electronics and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 200000, China)

**Abstract:** The subsynchronous harmonics generated by a renewable energy collection area will affect the safety and stability of a power grid, and the harmonic detection accuracy of the traditional Fourier algorithm is easily affected by spectrum leakage and the fence effect. In order to improve the detection accuracy of subsynchronous harmonics, a new algorithm based on the Nuttall window and all-phase Fourier analysis (apFFT) is proposed. By dividing the sampled data into  $N$  segments and adding 4 terms 5 orders Nuttall windows twice, the pre-processed  $N$ -point data segments are obtained and FFT is performed. Further, based on the square relationship of amplitude between apFFT and traditional FFT and the “Phase invariance” of apFFT, the apFFT spectrum analysis results of amplitude and frequency are corrected. Compared with the eigenvalue analysis method and the interpolation correction FFT method, this method improves the accuracy of subsynchronous harmonic detection while maintaining the speed of FFT. The simulation results verify the effectiveness of the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51607112).

**Key words:** renewable energy grid-connected; subsynchronous oscillation; phasor detection; phase difference correction; all-phase FFT

## 0 引言

随着新能源机组的大量并网, 换流器控制部分在一定的整定参数下, 与交流电网之间会产生相互作用, 导致新能源机组等效阻抗在次同步领域表现为容性负阻尼<sup>[1-3]</sup>, 增加系统发生次同步振荡的风险, 进而产生稳定性问题或造成设备损坏。若次同步振荡频率与附近汽轮机轴系固有振荡频率互补, 还可能引发更为严重的汽轮机轴系扭振问题<sup>[4-5]</sup>。因

此, 准确检测出电网次同步谐波参数并用于后续的治理, 具有十分重要的意义<sup>[6-8]</sup>。

目前, 次同步振荡的检测方法主要分为特征根分析法<sup>[9-11]</sup>和谐波检测法<sup>[12-15]</sup>。特征根分析法包括 Prony 算法、TLS-ESPRITS 算法和矩阵束算法等。这类方法通过构建系统矩阵, 根据该矩阵在关注振荡模态下的特征值来判断系统的次同步振荡稳定性。然而, 这类方法实时性不佳, 受噪声干扰较大, 同时也容易出现“维数灾”问题。谐波检测法是目前在次同步振荡检测中常用的方法, 通常是在传统傅里叶分析方法(FFT)<sup>[16-17]</sup>的基础上加以改进, 可以

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51607112)

对发电机转速或线路中电流信号采样, 经过傅里叶变换后得到信号中次同步谐波的参数。由于 FFT 具有简单快速的特点, 因此可以实现次同步谐波相量的在线检测。然而, 传统 FFT 方法存在频谱泄漏和栅栏效应问题<sup>[18-19]</sup>, 因此次同步谐波检测精度较低。文献[11]首先滤除基波分量的影响, 利用过零法获得次同步谐波频率后, 根据连续两次 FFT 的结果对次同步谐波参数进行校正。然而, 在实际系统中基波频率是时变的, 因此基波成分无法完全准确滤除, 且两次 FFT 的结果本身就存在误差, 在校正过程中容易将误差引入结果。文献[12]采用基于插值法校正的全相位傅里叶(apFFT)分析方法, 利用 apFFT 本身能够抑制噪声干扰的特点, 根据主瓣及附近的若干根旁瓣对结果进行校正。然而, 插值校正法容易受到频谱泄漏和噪声的干扰, 由于噪声分量会泄漏到每一根谱线中, 因此误差会随着参与插值校正的谱线数量增加而增加。

基于如上所述, 本文提出了基于 Nuttall 窗的双窗全相位傅里叶新算法, 通过对采样数据预处理后进行傅里叶变换, 并根据传统傅里叶分析结果引入相位差频谱校正, 进一步提高频率和幅值的参数检测精度。通过仿真结果证明, 相比于其他方法, 本文提出的新方法具有更高的次同步谐波参数检测精度, 因此能够应用于次同步振荡检测。

## 1 全相位傅里叶分析方法原理

全相位傅里叶频谱分析方法<sup>[20-23]</sup>是一种谐波参数估计方法, 通过对采样数据分段预处理, 然后将预处理后的数据进行  $N$  点傅里叶变换, 便得到全相位傅里叶谱分析结果。详细介绍如下。

1) 对于  $2N-1$  个采样点, 按时间顺序记为  $x(n)$ ,  $n=0, 1, 2, \dots, 2N-2$ 。将该采样序列递推分段成  $N$  个  $N$  维采样序列, 如式(1)所示。

$$\begin{cases} X_0 = [x(N), x(N+1), \dots, x(2N-1)]^T \\ X_1 = [x(N-1), x(N), \dots, x(2N-2)]^T \\ \vdots \\ X_{N-1} = [x(1), x(2), \dots, x(N)]^T \end{cases} \quad (1)$$

2) 对第  $i$  个采样序列  $x_i$  周期延拓  $i$  个数据, 使每段采样序列的第一个元素相同, 如式(2)所示。

$$\begin{cases} X_0 = [x(N), x(N+1), \dots, x(2N-2), x(2N-1)]^T \\ X_1 = [x(N), x(N+1), \dots, x(2N-2), x(N-1)]^T \\ \vdots \\ X_{N-1} = [x(N), x(1), \dots, x(N-2), x(N-1)]^T \end{cases} \quad (2)$$

3) 对于周期延拓后的每一采样序列, 从当前点开始, 依次对如式(2)所示的每一列在竖直方向上求和并取平均, 进而得到预处理后的新  $N$  点序列  $X^* = [X_0^*, X_1^*, \dots, X_{N-1}^*]$ 。

$$\begin{cases} X_0^* = N \times x(N) \\ X_1^* = (N-1) \times x(N+1) + x(1) \\ \vdots \\ X_{N-1}^* = x(2N-1) + (N-1) \times x(N-1) \end{cases} \quad (3)$$

4) 对新的  $N$  点序列  $X^*$  进行 FFT 即得到了全相位傅里叶谱分析结果。

在预处理过程中, 分别在 1) 和 4) 中对采样序列加 4 项 5 阶 Nuttall 窗后再进行 FFT, 便得到了基于 4 项 5 阶 Nuttall 窗的全相位傅里叶谱分析结果。其中, Nuttall 窗函数在时域表达为

$$w(n) = \sum_{m=0}^{M-1} (-1)^m b_m \cos\left(\frac{2\pi n m}{N-1}\right) \quad (4)$$

式中:  $n=0, 1, \dots, N-1$ ;  $b_m$  是窗函数系数, 满足

$$\sum_{m=0}^{M-1} b_m = 1, \quad \sum_{m=0}^{M-1} (-1)^m b_m = 0; \quad M \text{ 为 Nuttall 窗项数; } N$$

为需要加窗的数据长度。对采样数据序列加窗能够抑制频率泄漏问题<sup>[24-25]</sup>。由于双窗全相位傅里叶分析方法经过两次加窗过程, 结合了旁瓣峰值低且衰减快的 Nuttall 窗函数, 因此相比于传统傅里叶算法可以有效抑制频谱泄漏带来的干扰, 而使得其参数估计精度有一定程度的提升。然而, FFT 类方法天生的频率分辨率不足导致的栅栏效应不可避免, 使得基于 Nuttall 窗的双窗 apFFT 估计的谐波幅值和频率与实际值仍存在偏差, 因此需要对其进行进一步的校正才能更接近于真实值。

## 2 FFT/apFFT 相位差法频谱校正

对于单频复指数信号  $e^{j(\omega_0 n + \varphi_0)}$ , 可以令  $\omega_0 = k^* \Delta\omega = 2k^* \pi / N$ , 其中,  $\omega_0$  为信号角频率真实值,  $\varphi_0$  为信号初相位真实值,  $\Delta\omega = 2\pi / N$  为角频率分辨率,  $k^*$  为某一待定实数, 满足  $k^* = \beta + \delta$ ,  $\beta \in \mathbb{Z}^+$ ,  $-0.5 < \delta < 0.5$ 。则传统傅里叶算法加窗后的谱线可以表示为

$$X_{\text{FFT}}(k) = A F_g(\omega_k - \omega_0) e^{j[\varphi_0 - \tau(\omega_k - \omega_0)]} \quad (5)$$

式中:  $X_{\text{FFT}}(k)$  代表传统傅里叶变换谱分析结果中第  $k$  根谱线,  $k=0, \dots, N-1$ ;  $A$  为信号幅值;  $F_g$  为窗函数频谱表达式;  $\omega_k = k \Delta\omega$  为第  $k$  根谱线角频率;  $\tau$  为群延时系数,  $\tau = (N-1)/2f_s$ ;  $f_s$  为信号采样频率。相应地, 全相位傅里叶算法加窗后的谱线可以

表示为

$$Y_{\text{apFFT}}(k) = AF_g^2(w_k - w_0)e^{j\varphi_0} \quad (6)$$

式中,  $Y_{\text{apFFT}}(k)$  代表全相位傅里叶变换谱分析结果中第  $k$  根谱线。由式(5)和式(6)可知, apFFT 谱幅值为传统 FFT 谱幅值的平方关系, 且相位偏差与频偏值满足:

$$\Delta\varphi = \varphi_X(k^*) - \varphi_Y(k^*) = -\tau(k^*\Delta w - w_0) \quad (7)$$

由式(7)可知, 谐波频率估计结果可以被校正为

$$f = \left[ k^* + \frac{\Delta\varphi N}{\pi(N-1)} \right] \frac{f_s}{N} \quad (8)$$

将式(5)取平方后除以式(6), 则谐波幅值估计结果可以被校正为

$$A = \frac{|X_{\text{FFT}}(k^*)|^2}{|Y_{\text{apFFT}}(k^*)|} \quad (9)$$

由于全相位傅里叶算法具有相位不变性的特点, 因此谐波相位估计结果不需要校正。校正后, 谐波相量的频率及幅值分别由式(8)、式(9)给出, 相位估计结果即是谐波相量的相位。综上, 应用本文算法进行谐波、间谐波参数估计流程如图 1 所示。

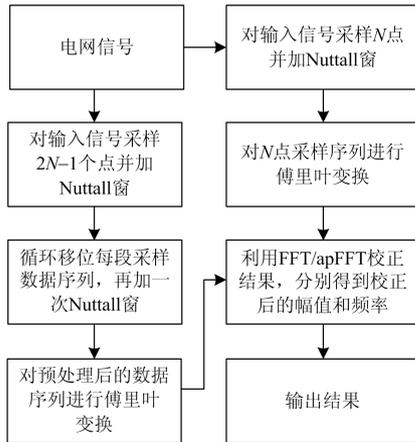


图 1 算法流程图

Fig. 1 Algorithm flowchart

### 3 算例分析

为了验证本文提出的基于 4 项 5 阶 Nuttall 双窗 apFFT 分析方法的谐波参数检测有效性, 在 Matlab 上进行仿真。

首先, 检验本文方法在宽频测量时对次(超)同步谐波参数检测的有效性及可行性, 采用的输入信号模型表示为:  $x_t = \sum_{i=1}^5 A_i \cos(2\pi f_i t + \varphi_i)$ , 信号参数如表 1 所示。分别比较汉宁双窗 apFFT 并基于插值法校正(称之为方法 1)、汉宁双窗 apFFT 并基于相

位差法校正(称之为方法 2)、4 项 1 阶 Nuttall 双窗 apFFT 并基于相位差法校正(称之为方法 3)以及 4 项 5 阶 Nuttall 双窗 apFFT 并基于相位差法校正(称之为方法 4)四种方法下的谐波参数检测精度。仿真结果分别如表 2—表 4 所示。

表 1 信号参数

Table 1 Signal parameter

谐波	1	2	3	4	5
幅值/V	0.07	0.65	1	0.4	0.05
频率/Hz	27	36	50	74	95
相位/(°)	20	10	15	60	70

表 2 宽频测量幅值估计结果

Table 2 Amplitude estimation result of broadband measurement

谐波	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4
1	$9.65 \times 10^{-4}$	$1.01 \times 10^{-5}$	$4.54 \times 10^{-7}$	$5.10 \times 10^{-8}$
2	$5.34 \times 10^{-4}$	$6.31 \times 10^{-6}$	$3.42 \times 10^{-7}$	$1.05 \times 10^{-8}$
3	$1.43 \times 10^{-4}$	$4.08 \times 10^{-6}$	$2.34 \times 10^{-7}$	$3.34 \times 10^{-9}$
4	$2.26 \times 10^{-4}$	$1.73 \times 10^{-6}$	$1.10 \times 10^{-7}$	$1.65 \times 10^{-10}$
5	$7.87 \times 10^{-4}$	$1.32 \times 10^{-6}$	$8.37 \times 10^{-8}$	$1.71 \times 10^{-10}$

表 3 宽频测量频率估计结果

Table 3 Frequency estimation result of broadband measurement

谐波	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4
1	$6.57 \times 10^{-3}$	$4.09 \times 10^{-6}$	$1.79 \times 10^{-7}$	$2.21 \times 10^{-8}$
2	$7.19 \times 10^{-3}$	$1.45 \times 10^{-7}$	$7.64 \times 10^{-9}$	$3.37 \times 10^{-10}$
3	$3.25 \times 10^{-3}$	$3.05 \times 10^{-8}$	$2.15 \times 10^{-9}$	$2.57 \times 10^{-11}$
4	$4.86 \times 10^{-4}$	$6.39 \times 10^{-7}$	$4.09 \times 10^{-8}$	$5.23 \times 10^{-11}$
5	$6.55 \times 10^{-3}$	$2.41 \times 10^{-6}$	$1.58 \times 10^{-7}$	$8.88 \times 10^{-11}$

表 4 宽频测量相位估计结果

Table 4 Phase estimation result of broadband measurement

谐波	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4
1	$3.51 \times 10^{-9}$	$3.51 \times 10^{-9}$	$5.80 \times 10^{-12}$	$2.98 \times 10^{-13}$
2	$9.11 \times 10^{-11}$	$9.11 \times 10^{-11}$	$2.51 \times 10^{-13}$	$5.86 \times 10^{-14}$
3	$8.42 \times 10^{-12}$	$8.42 \times 10^{-12}$	$6.22 \times 10^{-14}$	$7.10 \times 10^{-15}$
4	$8.03 \times 10^{-11}$	$8.03 \times 10^{-11}$	$2.27 \times 10^{-13}$	$1.14 \times 10^{-13}$
5	$1.68 \times 10^{-10}$	$1.68 \times 10^{-10}$	$5.97 \times 10^{-13}$	$1.85 \times 10^{-13}$

由表 2—表 4 可以看出, 与其他方法相比, 本文算法(即方法 4)的参数检测精度都要显著优于其他三种算法, 幅值、频率的相对误差比其他算法低 1~4 个数量级; 插值校正法(即方法 1)的估计结果误差相对相位差校正法(即方法 1、2、3)明显较大, 这是因为各谐波分量成分会不可避免地泄漏到每根谱线中, 且随着参与插值校正的谱线数量增加, 频谱泄漏对检测结果的干扰也就更大, 因此插值校正法不适用于存在噪声或密集谱的谐波分析。而本文方法利用了 apFFT 幅值与 FFT 幅值的平方关系, 对幅

值的校正受频谱泄漏的影响较小; 具有“相位不变性”特点的 apFFT 分析方法结合旁瓣峰值较低且衰减快的 4 项 5 阶 Nuttall 窗, 利用相位估计结果对频率估计结果进行校正, 因此频率和相位的检测精度也相对较高。

其次, 检验本文方法在多次谐波输入时次同步谐波相量检测的有效性。由于电网中次同步谐波幅值相对较小, 且远低于基波分量和高次谐波分量幅值, 因此次同步谐波检测算法还需要能够克服被高次谐波成分“淹没”的情况。仿真实验采用的输入信号表达式为

$$x(n) = \sum_{i=1}^9 A_i (2\pi f_i + \varphi_i) \quad (10)$$

各次谐波参数如表 5 所示, 基波频率从 49.5 至 50.5 以 0.01 步进, 利用本文算法对各次谐波参数进行检测。由图 2、图 3 可知, 当信号频率发生变化时, 本文提出的方法仍具有较高的参数检测精度, 尤其对于基波分量和高次谐波分量, 幅值、相位检测精度分别达到  $10^{-11}$ 、 $10^{-13}$ ; 对于次同步谐波分量, 由于其幅值相对较小, 虽然参数检测精度相比于基

表 5 各次谐波参数

Table 5 Harmonic parameter of each order

谐波/间谐波次数	幅值/V	相位/(°)
0.2	1.4	39.3
0.4	6.3	44.5
0.6	1	122.3
0.8	5.5	60.0
1	220	30.0
2	16	75.5
3	32	20.0
4	12	143.2
5	40	88.3

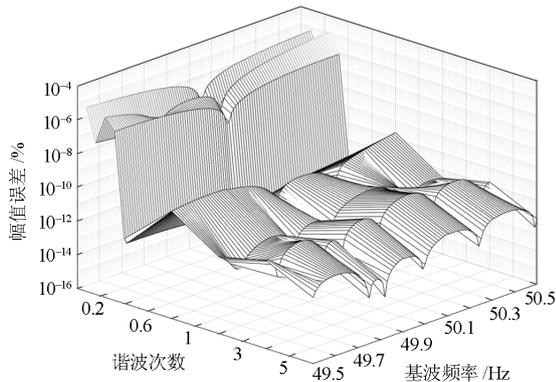


图 2 频率波动时幅值误差分布图

Fig. 2 Amplitude error distribution when frequency fluctuates

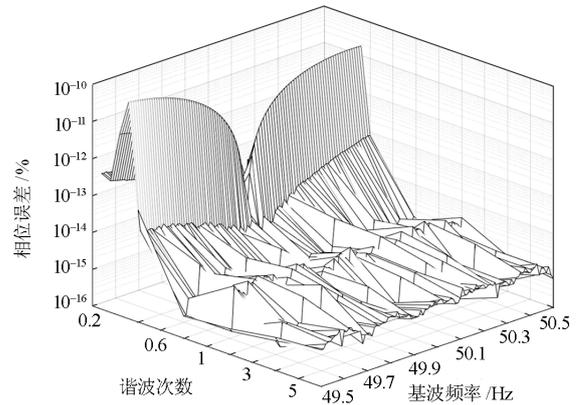


图 3 频率波动时相位误差分布图

Fig. 3 Phase error distribution when frequency fluctuates

波分量和高次谐波分量较低, 但幅值、相位检测精度依然分别达到  $10^{-6}$ 、 $10^{-12}$ 。因此, 本文算法能够有效克服信号频率波动及低幅值问题对次同步谐波分量检测精度的影响。

最后, 验证本文方法在噪声下的次同步谐波分量检测精度。实际电力系统中信号不可避免地受到噪声的干扰, 这会对检测结果的精度造成很大的影响。因此, 在式(10)的基础上加入高斯白噪声, 输入信号模型表达式为

$$x(n) = \sum_{i=1}^9 A_i (2\pi f_i + \varphi_i) + \delta(n) \quad (11)$$

式中,  $\delta(n)$  是均值为 0、方差为 0.01 的高斯白噪声。分别选择汉宁窗并基于相位差校正(方法一)、4 项 1 阶 Nuttall 窗并基于相位差校正(方法二)和本文方法(方法三), 仿真比较噪声干扰下三种方法对各次谐波的检测精度, 仿真结果如图 4—图 6 所示; 同样在信号模型(11)的基础上, 添加不同信噪比的高斯白噪声, 仿真对比三种方法的性能, 频率为 20 Hz(即 0.4 次间谐波)的次同步谐波的幅值、频率和相位仿真结果如图 7—图 9 所示。

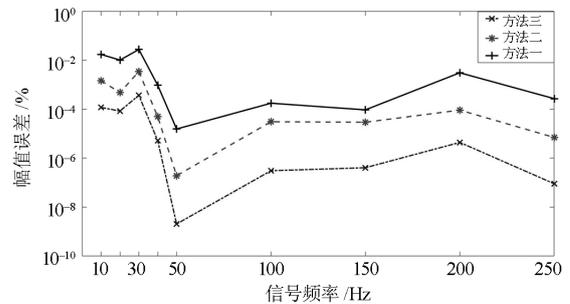


图 4 噪声下幅值估计结果

Fig. 4 Amplitude estimation result with noise

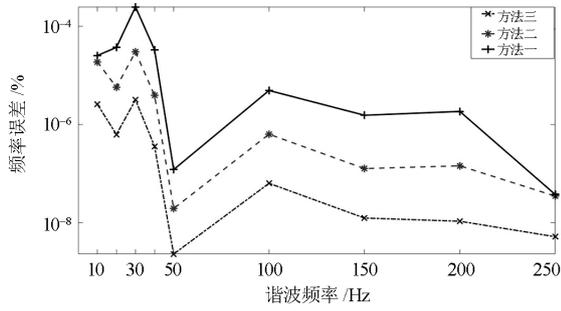


图 5 噪声下频率估计结果  
Fig. 5 Frequency estimation result with noise

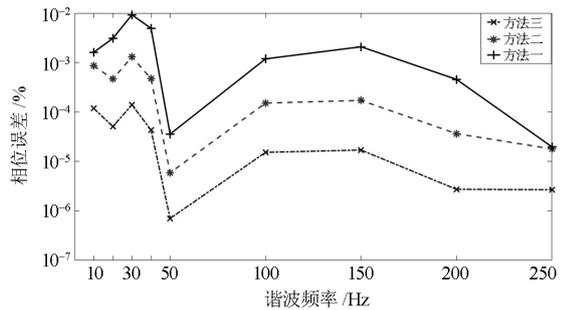


图 6 噪声下相位估计结果  
Fig. 6 Phase estimation result with noise

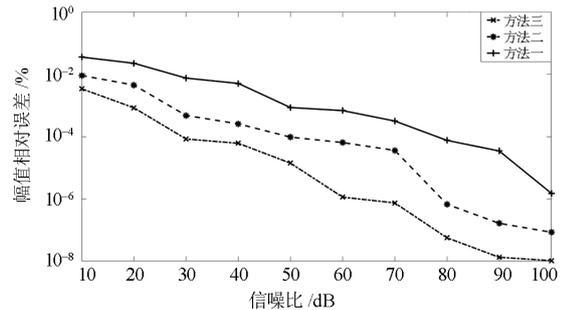


图 7 不同信噪比下 0.4 次间谐波幅值估计结果  
Fig. 7 Amplitude estimation result of the 0.4 interharmonic under different SNR

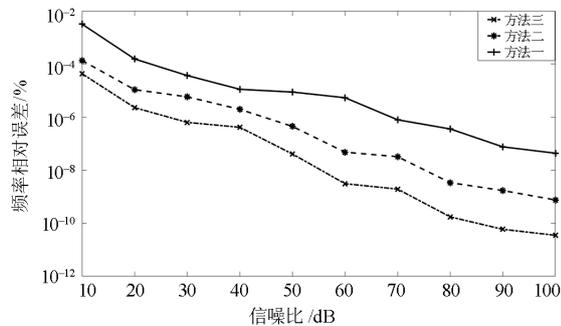


图 8 不同信噪比下 0.4 次间谐波频率估计结果  
Fig. 8 Frequency estimation result of the 0.4 interharmonic under different SNR

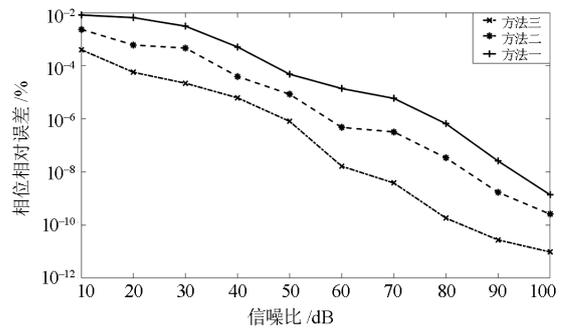


图 9 不同信噪比下 0.4 次间谐波相位估计结果  
Fig. 9 Phase estimation result of the 0.4 interharmonic under different SNR

由图 4—图 9 可以看出，加入高斯白噪声时，本文方法的参数检测精度显著优于另外两种方法。在较大噪声强度时，三种方法都受到噪声的较大影响，但本文方法仍比方法一、二的检测精度高；在较小噪声强度时，本文方法具有较高的检测精度，随着信噪比的增大检测精度不断提高，与方法一、二相比，高出 2~3 个数量级。仿真结果表明：本文提出的组合算法能有效抑制高斯白噪声对谐波参数检测精度的影响，且相对误差明显低于其他方法。由于本文提出的方法(即方法三)利用了 apFFT 幅值检测结果与传统 FFT 幅值检测结果的平方关系，受到频谱泄漏和噪声的干扰相对较小，因此可以有效抑制谐波之间的干扰及高斯白噪声的影响；对频率的校正是利用了 apFFT 相位估计结果，其在信号包含噪声成分时依然保持较高的精度，又因为采用了抑制频谱泄漏和噪声干扰性能更佳的 4 项 5 阶 Nuttall 窗，因此本文方法对次同步谐波分量、基波分量以及高次谐波分量也能表现出很高的参数检测精度。

#### 4 结论

针对电网次同步谐波相量检测问题，本文提出了一种可以高精度检测基波分量和次同步谐波相量的分析方法。该方法在对采样数据分段预处理后进行加窗傅里叶变换；进而，根据传统傅里叶的结果引入相位差频谱校正，以进一步提高频率及幅值的检测精度。相比于其他方法，本文提出的新方法在保持快速性的同时具有较高的参数检测精度。本文方法在信号频率波动或存在噪声时也能保持较高的参数检测精度，因此本文提出的新方法可以应用于次同步振荡检测。

#### 参考文献

[1] 赵书强, 李忍, 高本锋, 等. 光伏并入弱交流电网次同

- 步振荡机理与特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(24): 7215-7225.
- ZHAO Shuqiang, LI Ren, GAO Benfeng, et al. Analysis of mechanism and characteristics in sub synchronous oscillation between PV and weak AC networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(24): 7215-7225.
- [2] 毕天姝, 孔永乐, 肖仕武, 等. 大规模风电外送中的次同步振荡问题[J]. 电力科学与技术学报, 2012, 27(1): 10-15.
- BI Tianshu, KONG Yongle, XIAO Shiwu, et al. Subsynchronous oscillation problems in large-scale wind power transmission[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2012, 27(1): 10-15.
- [3] TANG Haiyan, LU Guofei, YU Xiao, et al. Investigating SSO risks of large-scale photovoltaic generation with the series compensated transmission lines[J]. The Journal of Engineering, 2017, 17(13): 2048-2052.
- [4] 李宽, 王军, 赵斌超, 等. 风火捆绑经 HVDC 送电引起轴系扭振研究[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 115-122.
- LI Kuan, WANG Jun, ZHAO Binchao, et al. Shafting vibration research of wind power and thermal power bundle supply through HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 115-122.
- [5] 张帆, 洪潮, 黄磊, 等. 一种典型交直流电力系统中的次同步谐振/振荡问题分析与抑制[J]. 南方电网技术, 2018, 12(8): 1-7.
- ZHANG Fan, HONG Chao, HUANG Lei, et al. Analysis and suppression of sub-synchronous resonance/oscillation in a typical AD/DC power system[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(8): 1-7.
- [6] 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-spectrum-line interpolation FFT[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 9-15.
- [7] 王茂海, 高洵, 王蓓, 等. 基于广域测量系统的次同步振荡在线监测预警方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(6): 98-102.
- WANG Maohai, GAO Xun, WANG Bei, et al. Online early warning of subsynchronous oscillations based on wide area measurement system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(6): 98-102.
- [8] 刘革新, 白杨, 任祖怡, 等. 次同步振荡监测控制系统的研究与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 131-136.
- LIU Geming, BAI Yang, REN Zuyi, et al. Research and implementation on monitoring and controlling system of sub synchronous oscillation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 131-136.
- [9] 彭莉萍, 魏辉, 刘桂平, 等. 通过改进 Prony 算法辨识交流串补引起的次同步谐振模态参数[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(1): 63-67.
- PENG Liping, WEI Hui, LIU Guiping, et al. Detection of subcynchronous resonance caused by series capacitive compensation based on improved Prony[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2015, 27(1): 63-67.
- [10] 赵兰明, 李宽, 张友泉, 等. 基于 FastICA-MP 算法的次同步振荡模态参数辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 37-42.
- ZHAO Lanming, LI Kuan, ZHANG Youquan, et al. Parameter identification of subsynchronous oscillation based on FastICA-MP algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 37-42.
- [11] 李宽, 李兴源, 赵睿. 基于改进矩阵束的高压直流次同步振荡检测[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 128-132.
- LI Kuan, LI Xingyuan, ZHAO Rui. Detection of subsynchronous oscillation in HVDC transmission system based on improved matrix pencil method[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 128-132.
- [12] 张超, 王维庆, 邱衍江, 等. 大规模风电并网地区次同步谐波检测方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(7): 2194-2202.
- ZHANG Chao, WANG Weiqing, QIU Yanjiang, et al. Subsynchronous harmonic detection method in regions with large scale wind power paralleled in grid[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2194-2202.
- [13] 谢小荣, 王银, 刘华坤, 等. 电力系统次同步和超同步谐波相量的检测方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21): 189-194.
- XIE Xiaorong, WANG Yin, LIU Huakun, et al. Detection method for sub-synchronous and super-synchronous harmonic phasors in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21): 189-194.
- [14] WANG Yifei, LI Yunwei. A grid fundamental and harmonic component detection method for single-phase systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2204-2213.
- [15] 王茂海, 齐霞. 电力系统次同步振荡分量的快速在线检测算法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(18): 149-154.
- WANG Maohai, QI Xia. Fast online detection method for power system sub-synchronous oscillation components[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(18): 149-154.
- [16] 徐岩, 张晓明, 王瑜, 等. 基于离散傅里叶变换的频谱

- 分析新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 38-43.
- XU Yan, ZHANG Xiaoming, WANG Yu, et al. A new method of spectrum analysis based on DFT[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 38-43.
- [17] 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.
- [18] 马仁政, 陈明凯. 减少频谱泄漏的一种自适应采样算法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(7): 55-58.
- MA Renzheng, CHEN Mingkai. An adaptive sampling algorithm for reducing spectrum leakage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(7): 55-58.
- [19] 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.
- WEN He, TENG Zhaosheng, QING Baiyuan. Hanning self-convolution windows and its application to harmonic analysis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 164-169.
- [20] 侯正信, 王兆华, 杨喜. 全相位 DFT 数字滤波器的设计与实现[J]. 电子学报, 2003, 31(4): 1-4.
- HOU Zhengxin, WANG Zhaohua, YANG Xi. Design and implementation of all phase DFT digital filter[J]. Acta Electronica Sinica, 2003, 31(4): 1-4.
- [21] TUNTISAK S, PREMRUDEEPREECHACHARN S. Harmonic detection in distribution systems using wavelet transform and support vector machine[C] // 2007 IEEE Lausanne Power Tech, July 1-5, 2007, Lausanne Switzerland.
- [22] 黄翔东, 王兆华. 全相位时移相位差频谱校正法[J]. 天津大学学报, 2008, 41(7): 815-820.
- HUANG Xiangdong, WANG Zhaohua. All-phase time shift phase difference correcting spectral method[J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(7): 815-820.
- [23] 黄翔东, 王兆华. 全相位 DFT 抑制谱泄漏原理及其在频谱校正中的应用[J]. 天津大学学报, 2007, 40(7): 574-578.
- HUANG Xiangdong, WANG Zhaohua. Principle of all-phase DFT's restraining spectral leakage and the application in correcting spectrum[J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(7): 574-578.
- [24] 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, 9(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 Electrotechnical Society, 1994, 9(1): 50-54.
- [25] 潘文, 钱俞寿, 周鄂. 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, 9(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, 9(2): 53-56.

收稿日期: 2019-08-02; 修回日期: 2019-09-20

作者简介:

黄星宇(1995—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为次同步振荡抑制与稳定性分析、电力系统谐波检测; E-mail: 592860862@qq.com

罗萍萍(1969—), 女, 副教授, 研究方向为电力系统自动化; E-mail: 147824260@qq.com

龚锦霞(1984—), 女, 讲师, 研究方向为电力系统 FACTS 研究和电力系统仿真. E-mail: jxgong2015@163.com

(编辑 魏小丽)