

基于二分插值的动态谐波参数估计方法

申杰¹, 李方硕¹, 陈伯朗², 屈鸣¹, 王韬¹, 李锐超¹, 李林欢¹

(1. 国网四川省电力公司营销服务中心, 四川 成都 610045; 2. 国网四川省电力公司
天府新区供电公司, 四川 成都 610213)

摘要:随着交直流配电网规模的不断扩大, 低压配电技术得到广泛重视和发展, 但谐波含量更高以及谐波幅值与频率呈现时变性等电能质量问题也越发凸显, 使得快速傅里叶变换加窗插值方法取较长的序列导致谐波测量响应慢, 无法适用于继电保护等快速响应类应用。针对此问题, 提出了基于二分插值的谐波参数估计方法。首先, 采用泰勒级数建立动态信号模型; 其次, 利用FFT对1个周波的数据进行扫频获得粗估频率, 采用二分法迭代插值的方法, 经系数修正得到估计频率; 然后, 基于估计频率和动态信号模型, 利用最小二乘拟合方法求解信号参数; 最后, 在不同工况下验证算法的性能。仿真结果表明, 所提方法仅用1个周波数据实现了动态信号参数的精准测量, 总矢量误差均低于0.1%, 为快速响应类应用数据分析提供有效方法。

关键词:谐波; 动态; 交直流配电网; 二分插值; 参数估计

中图分类号: TM 935 **文献标志码:** A **文章编号:** 1003-6954(2024)04-00059-06

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240409

Dynamic Harmonic Parameter Estimation Method Based on Binary Interpolation

SHEN Jie¹, LI Fangshuo¹, CHEN Bolang², QU Ming¹, WANG Tao¹, LI Ruichao¹, LI Linhuan¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Marketing Service Center, Chengdu 610045, Sichuan, China;
2. State Grid Tianfu New Area Electric Power Supply Company, Chengdu 610213, Sichuan, China)

Abstract: With the continuous expansion of AC/DC distribution network, low-voltage distribution technology has received widespread attention and development. However, harmonic components account for a higher percentage and harmonic amplitudes and frequencies exhibit time-varying characteristics, the problem of power quality has become increasingly prominent. So, the fast Fourier transform (FFT) windowed interpolation method with longer sequences is slow in responding to harmonic measurements, making it unsuitable for applications that require rapid response such as protective relaying. Aiming at this problem, a harmonic parameter estimation method based on binary interpolation is proposed. Firstly, a dynamic signal model is established using Taylor series. Secondly, FFT is used to sweep the frequency of a waveform to obtain a roughly estimated frequency. And then, a binary iteration interpolation method is employed, along with coefficient correction, to obtain the estimated frequency. Based on the estimated frequency and dynamic signal model, a least squares fitting method is used to solve the signal parameters. Finally, the algorithm's performance is verified under different operating conditions. Simulation results show that the proposed method achieves precise measurement of dynamic signal parameters using only one cycle of data, with total vector error (TVE) consistently below 0.1%, which provides an effective approach for data analysis in fast-response applications.

Key words: harmonic wave; dynamic; AC/DC distribution network; binary interpolation; parameter estimation

0 引言

随着中国新型电力系统建设的推进,电力电子技术的快速发展和分布式电源的开发利用,交直流配电网再一次引起了人们的广泛关注^[1],但直流配电网存在的电能质量问题同样不容忽视^[2]。其中,谐波由于形成原因多样、影响程度广泛,是直流配电网的主要电能质量分析问题之一。由于高比例的新能源和电力电子设备接入,导致电力信号电压、电流波动范围和随机性增大,且谐波分量增加、纹波幅值与频率波动范围及随机性也增大,同时涌现出新类型、新形态信号^[3]。因此如何准确快速地获取、分析新形态信号是治理谐波的重要前提。

目前,电力谐波测量方法主要有非参数化方法和参数化方法两类^[5]。参数化方法包括特征值算法、普罗尼算法^[6]、自回归模型谱估计法及其衍生算法等。非参数化方法包括傅里叶变换^[7]、自适应滤波器^[8]、时频分析^[9]、神经网络、小波变换方法等,其主要特点是与任何模型参数无关,算法简便,计算量较小。傅里叶分析最常见的为离散傅里叶变换(discrete Fourier transform, DFT)和快速傅里叶变换(fast Fourier transform, FFT)。FFT采用蝶形运算方式,能在较短的时间内实现谐波参数快速检测,但频率分辨率低且要求同步采样和整数周期截断,对于稳态下的谐波才能达到较高的精度^[10]。而在实际工程应用中信号参数呈现时变特征,往往会发生非整周期采样,频谱泄漏和栅栏效应会大幅增加参数测量的误差。因此如何在较短时间内实现时变谐波信号的准确测量,是直流配电网电能质量分析的关键。

对于非整周期截断和非同步采样引起的频谱泄露问题,目前多利用FFT加窗插值算法解决,国内外学者先后运用余弦窗^[11]、三角窗、卷积窗^[12]、乘法窗^[13]等窗函数对信号序列进行截断,抑制长范围泄露。在插值方面,文献[14]提出一种多谱线插值FFT方法,可实现对长、短范围泄露效应的修正,但只适用于稳态下的谐波测量问题。文献[15]利用一种基于多谱线插值法和复调制细化法的组合分析方法提高谐波分析的准确性。以上插值算法在很大程度上提高了谐波估计精度,但都没有考虑波形数据的时变特性。文献[15]虽然考虑了基频宽范围

频率波动情况,实现了动态基波测量,但仍未解决FFT对数据序列长度有所限制的问题。

鉴于此,下面提出了一种基于二分插值的谐波参数估计方法。首先,建立了一种动态谐波信号求解模型,并阐述其原理和校正过程;然后,结合仿真及试验分析验证了所提算法仅用1个周期的数据就实现了动态谐波信号参数的准确测量。

1 动态谐波信号模型

1.1 动态谐波信号建模

由于谐波信号通常包含基波和多个整次谐波信号成分,提出了一种动态谐波信号求解模型 $s(t)$,由 M 个分子量 $s_m(t)$ 组成,其数学表达式为

$$s(t) = \sum_{m=1}^M s_m(t) = \sum_{m=1}^M A_m \cos(2\pi f_m t + \varphi_m) = \sum_{m=1}^M A_m \cos[2\pi(f'_m + \Delta f_m)t + \varphi_m] \quad (1)$$

式中: $s_m(t)$ 为动态谐波信号中 m 次谐波子成分; A_m 、 f_m 、 φ_m 分别为 m 次谐波的幅值、频率和相角; f'_m 为 m 次谐波信号子成分的预估频率,由第2章介绍的二分插值法求得; Δf_m 为频率的预估偏差, $\Delta f_m = f_m - f'_m$ 。

进一步地,将式(1)进行三角变换,得到的信号模型为

$$s(t) = \sum_{m=1}^M A_m \cos[2\pi(f'_m + \Delta f_m)t + \varphi_m] = \sum_{m=1}^M [A_m \cos(2\pi f'_m t) \cdot \cos(2\pi \Delta f_m t + \varphi_m) - A_m \sin(2\pi f'_m t) \cdot \sin(2\pi \Delta f_m t + \varphi_m)] = \sum_{m=1}^M [E_m(t) \cos(2\pi f'_m t) + F_m(t) \sin(2\pi f'_m t)] \quad (2)$$

其中:

$$\begin{cases} E_m(t) = A_m \cos(2\pi \Delta f_m t + \varphi_m) \\ F_m(t) = -A_m \sin(2\pi \Delta f_m t + \varphi_m) \end{cases} \quad (3)$$

由式(2)可知,当估计频率 f'_m 足够准确时, Δf_m 很小,因此 $E_m(t)$ 和 $F_m(t)$ 都是以 Δf_m 为频率的缓变量,在短时间内可利用 K 阶泰勒级数近似表征信号的动态变化,即:

$$\begin{cases} E_m(t) = \sum_{k=0}^K \frac{1}{k!} E_m^{(k)} t^k + \Delta E_m \approx \sum_{k=0}^K \frac{1}{k!} E_m^{(k)} t^k \\ F_m(t) = \sum_{k=0}^K \frac{1}{k!} F_m^{(k)} t^k + \Delta F_m \approx \sum_{k=0}^K \frac{1}{k!} F_m^{(k)} t^k \end{cases} \quad (4)$$

式中: K 为泰勒级数的最高展开阶数; $E_m^{(k)}$ 、 $F_m^{(k)}$ 分别为 $E_m(t)$ 和 $F_m(t)$ 在 t 时刻的 k 阶导数值; ΔE_m 、 ΔF_m 为泰勒近似产生的误差,当 K 足够大时这部分近似误差可忽略不计。

以采样频率 f_s 对式中的信号进行采样,结合式(1)得到离散电力信号如式(5)所示。

$$s(n) = \sum_{m=1}^M \sum_{k=0}^K \frac{1}{k!} [e_m^{(k)} n^k \cos(\omega_m n) + f_{Fm}^{(k)} n^k \cdot \sin(\omega_m n)] = \sum_{m=1}^M [\mathbf{G}_m(n) \cdot \mathbf{E}_m + \mathbf{G}_m^*(n) \cdot \mathbf{F}_m] \quad (5)$$

其中:

$$n = f_s \cdot t; \omega_m = 2\pi \frac{f_m}{f_s}; e_m^{(k)} = \frac{E_m^{(k)}}{f_s^k}; f_{Fm}^{(k)} = \frac{F_m^{(k)}}{f_s^k} \quad (6)$$

式中: \mathbf{E}_m 和 \mathbf{F}_m 为 $K+1$ 阶泰勒导数组成的向量; $\mathbf{G}_m(n)$ 和 $\mathbf{G}_m^*(n)$ 为系数矩阵,表达式见式(7)。

$$\begin{cases} \mathbf{E}_m = [e_m^{(0)}, e_m^{(1)}, \dots, e_m^{(K-1)}, e_m^{(K)}] \\ \mathbf{F}_m = [f_{Fm}^{(0)}, f_{Fm}^{(1)}, \dots, f_{Fm}^{(K-1)}, f_{Fm}^{(K)}] \\ \mathbf{G}_m(n) = [\cos(\omega_m n), n\cos(\omega_m n), \dots, \frac{1}{K!} n^K \cos(\omega_m n)] \\ \mathbf{G}_m^*(n) = [\sin(\omega_m n), n\sin(\omega_m n), \dots, \frac{1}{K!} n^K \sin(\omega_m n)] \end{cases} \quad (7)$$

1.2 模型参数求解

为准确获取各次谐波信号波形数据,采用最小二乘法求解动态谐波信号模型的各阶泰勒导数。可将第1.1节中的式(5)改写为式(8)的矩阵形式。

$$\tilde{\mathbf{X}} = \sum_{m=0}^M [\mathbf{G}_m \cdot \tilde{\mathbf{E}}_m + \mathbf{G}_m^* \cdot \tilde{\mathbf{F}}_m] \quad (8)$$

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{X}} = \mathbf{H} [x(-L), \dots, x(-1), x(0), x(1) \dots x(L)]^T \\ \tilde{\mathbf{G}}_m = \mathbf{H} [\tilde{G}_m(-L), \dots, \tilde{G}_m(-1), \tilde{G}_m(0), \tilde{G}_m(1), \dots, \tilde{G}_m(L)]^T \\ \tilde{\mathbf{G}}_m^* = \mathbf{H} [\tilde{G}_m^* x(-L), \dots, \tilde{G}_m^* (-1), \tilde{G}_m^* (0), \tilde{G}_m^* x(1), \dots, \tilde{G}_m^* (L)]^T \end{cases} \quad (9)$$

式中: \mathbf{H} 为由窗函数系数构成的对角矩阵,即加权最小二乘中的窗函数系数; L 为窗函数的长度; $\tilde{\mathbf{X}}$ 为信号的相量; $\tilde{\mathbf{G}}_m$ 、 $\tilde{\mathbf{G}}_m^*$ 为系数矩阵; $x(L)$ 为信号偏移 L 时的信号测量值; $\tilde{G}_m(L)$ 、 $\tilde{G}_m^*(L)$ 均为信号偏移 L 时的测量值; $\tilde{\mathbf{E}}_m$ 、 $\tilde{\mathbf{F}}_m$ 分别为缓变量 $E_m(t)$ 、 $F_m(t)$ 的相量值。

由式(8)可以得知,向量 $\tilde{\mathbf{E}}_m$ 和 $\tilde{\mathbf{F}}_m$ 各自包含

了 $M(K+1)$ 个待求的泰勒导数,因此至少须建立 $M(K+1)$ 个方程才可求解。则进一步地,可以改写合并成线性方程组:

$$\tilde{\mathbf{X}} = \mathbf{G} \cdot \Phi \quad (10)$$

$$\begin{cases} \mathbf{G} = [\tilde{\mathbf{G}}_1, \tilde{\mathbf{G}}_1^*, \tilde{\mathbf{G}}_2, \tilde{\mathbf{G}}_2^*, \dots, \tilde{\mathbf{G}}_M, \tilde{\mathbf{G}}_M^*, \dots, \tilde{\mathbf{G}}_M, \tilde{\mathbf{G}}_M^*] \\ \Phi = [\mathbf{E}_1, \mathbf{F}_1, \mathbf{E}_2, \mathbf{F}_2, \dots, \mathbf{E}_m, \mathbf{F}_m, \dots, \mathbf{E}_M, \mathbf{F}_M]^T \end{cases} \quad (11)$$

利用加权最小二乘求解得到

$$\Phi = (\mathbf{G}^T \mathbf{G})^{-1} \mathbf{G}^T \tilde{\mathbf{X}} \quad (12)$$

最终通过式(12)得谐波信号各成分的各阶泰勒系数,可用式(13)计算谐波信号各成分的幅值、相角、频率输出值。

$$\begin{cases} A_{r-m} = \sqrt{[e_m^{(0)}]^2 + [f_{Fm}^{(0)}]^2} \\ \varphi_{r-m} = \arctan \left[\frac{f_{Fm}^{(0)}}{e_m^{(0)}} \right] \\ f_{r-m} = f_m - \frac{f_s e_m^{(1)}}{2\pi f_{Fm}^{(0)}} \end{cases} \quad (13)$$

式中, A_{r-m} 、 φ_{r-m} 和 f_{r-m} 分别为电力谐波信号中第 m 次谐波的幅值、相角和频率估计值。

2 基于二分插值的频率估计

2.1 频率的粗估

考虑到传统的FFT加窗插值算法需要较长的数据窗才能实现准确测量,因此为保证响应速度,利用1个周期的数据窗进行FFT扫频以获取频率估计,进而提出了二分法迭代插值的参数估计方法,使迭代修正后的频率更加接近实际值。在二分法查找之前,采用FFT算法对波形数据进行扫频获取频谱响应图,确定信号中各分量的最大幅值谱线及其对应频率 f_0 ,具体步骤如下:

1) 基于定采样技术,采用数模转换器以 f_s 为采样频率对电网中的电压/电流信号进行离散采样,得到离散序列,表达式为

$$s(n) = \sum_{m=1}^M A_m \cos(2\pi n f_m / f_s + \varphi_m) \quad (14)$$

2) 对信号进行傅里叶变换,分析后的频谱可表示为

$$S_R(k) = \frac{A_0}{2} [e^{j\varphi_0} W_R(k - k_0) + e^{-j\varphi_0} W_R(k + k_0)]$$

其中: $k = \frac{Nf_m}{f_s}$; $k_0 = \frac{Nf_0}{f_s}$ (15)

式中: N 为采样次数; $W_R(\cdot)$ 为频谱函数。

常用的窗函数通用的时域表达式可写为

$$w(q) = \sum_{h=0}^{H-1} (-1)^h b_h \cos(2\pi hq/Q) \quad (16)$$

式中: H 为窗函数的项数; b_h 为窗函数 h 项的系数; q 为信号的离散点数, $q=0, 1, 2, \dots, Q-1$; Q 为最大离散点。

当 $H=1$ 时, 式(16)即为矩形窗的时域表达式, 对其进行傅里叶变换, 则频谱函数可表示为

$$W_R(k) = \frac{e^{-j(N-1)\pi k/N} \sin(\pi k)}{N \sin(\pi k/N)} \quad (17)$$

随后对信号 $s(n)$ 加窗处理, 即为 $s(w)_n = s(n) \cdot w(n)$ 。由于此过程只是进行频率的粗略定位估计, 则此处选用经典余弦窗, 仅仅对无限长序列起到信号截断的效果。

对加窗序列 $s(w)_n$ 进行离散傅里叶变换, 最终可以得到:

$$S(k) = \frac{A_0}{2} \left[e^{j\varphi_0} W(k - \frac{f_0}{f_s} N) - e^{-j\varphi_0} W(k + \frac{f_0}{f_s} N) \right] \quad (18)$$

式中, $W(\cdot)$ 为窗函数的频谱函数。

由于非同步采样且选取的数据长度短, 离散频谱只能依据峰值粗略估计对应的频点。为此, 引入了二分法插值的思想进行频率点精确查找和定位, 为双谱线提供频率修正值, 使得对应的幅值、相位估计更为准确。

通过对信号序列作 FFT 扫频得到各次谐波粗略的频率 f , 并且以频率分辨率作为频率间隔 Δf 进行插值, 即 $\Delta f = f_s/N$, 得到另外两条谱线对应频率为 $f+\Delta f$ 和 $f-\Delta f$, 并利用式(19)计算 $f+\Delta f$ 以及 $f-\Delta f$ 所对应的幅值。

$$X(f) = \sum_{n=-(N-1)/2}^{(N-1)/2} s(n) \cdot w(n) e^{-j2\pi n f} \quad (19)$$

分别比较三者的幅值, 选择最大幅值谱线对应的频率, 首次迭代得到的频率相比迭代初值更接近频率的真实值, 但此时频率测量精度仍较低, 于是将其作为下一次迭代用的频率粗估值。继续进行双谱线插值, 此时更新后的频率间隔 $\Delta f_{c+1} = \frac{1}{2} \Delta f_c$ (c 为当前的迭代次数), 反复迭代直到迭代次数达到设定值, 输出最终较为准确的频率 f_r 和频率间隔 Δf_r 。

2.2 频率的修正

在实际应用中为得到更为精确的数值, 则需要对二分插值得到的频率 f_r 进行修正。设非同步采样时信号在峰值对应的真实频点为 k , 经过 FFT 扫频后得到的粗估频率对应的谱线为 k_0 , 基于第 2.1 节的迭代确定两条幅值最大和次大的谱线 k_1, k_2 , 且存在 $k_2 = k_1 + 1$, 如图 1 所示。

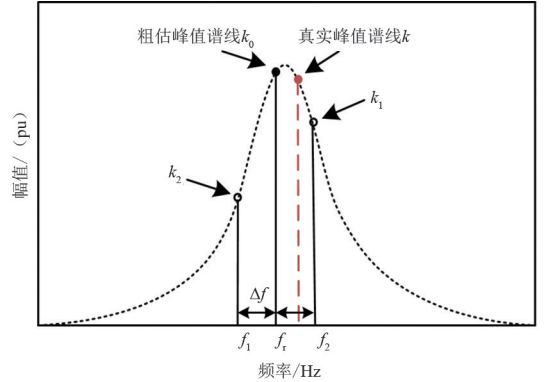


图 1 二分插值算法原理

相对应地, 可分别通过离散傅里叶变换得到谱线 k_1, k_2 的幅值, 即 $A_1 = |S(k_1)|, A_2 = |S(k_2)|$ 。由于 $0 \leq k - k_1 \leq 1$, 则引入变量 η , 取值范围为 $-0.5 < \eta < 0.5$, 使得存在关系式 $\eta = k - k_a - 0.5$, 并根据适当的权值分配, 可以得到参数 λ 的等式为

$$\lambda = \frac{A_2 - A_1}{A_2 + A_1} \quad (20)$$

对式(20)进行换算, 可以得到

$$\lambda = \frac{|W(P)|^2 - |W(Q)|^2}{|W(P)|^2 + |W(Q)|^2} \quad (21)$$

其中:

$$P = \frac{2\pi(-\eta + 0.5)}{N}; Q = \frac{2\pi(-\eta - 0.5)}{N}$$

参数 η, λ 可采用多项式拟合求得。具体地, 在区间 $[-0.5, 0.5]$ 内取一组 η 值, 代入到式(20)中即可得到相应的一组 λ 值, 调用函数 $\text{polyfit}(\lambda, \eta, p)$ 进行拟合, p 为拟合逼近多项式的阶数, 取 $p=7$ 则可以得出 $\eta = f^{-1}(\lambda)$ 的相关式, 即

$$\eta = 0.751\ 508\ 09\lambda + 0.188\ 233\ 39\lambda^3 + 0.087\ 438\ 08\lambda^5 + 0.090\ 056\ 32\lambda^7 \quad (22)$$

从而得到相应频率的修正公式为

$$f_{m_re} = k_1 \cdot \Delta f_r + \Delta \delta \quad (23)$$

式中: Δf_r 为经过二分插值迭代后两条谱线之间的间隔; $\Delta \delta$ 为偏移的估计误差, $\Delta \delta = (\eta + 0.5) \cdot \Delta f_r$ 。

3 算法实现流程及步骤

所提出的基于 FFT 二分插值的动态谐波参数估计方法(FFT binary interpolation, FFT-BI)的实现流程和步骤如图 2 所示,主要包括以下两方面:

一方面,首先从电力系统中获得一段电力信号 $s(t)$,对其进行离散采样,并利用 $L=96$ 的数据窗截断进行 FFT 扫频,获取信号频谱图,确定粗估频率 f ;其次,采用二分法插值不断迭代,使得频率 f 更加接近实际值;最后,利用插值的原理修正频率粗估值,获得最为接近的估计频率 f'_m 。

另一方面,基于泰勒级数建立 $s(t)$ 的动态电力信号表征模型。利用修正的频率 $f_{m,rc}$ 依次构建矩阵 E_m 、 F_m ,通过最小二乘拟合方法求解矩阵 Φ ,进而实现对整个模型矩阵的调用,依次求得电力信号的幅值、相角以及频率测量值。

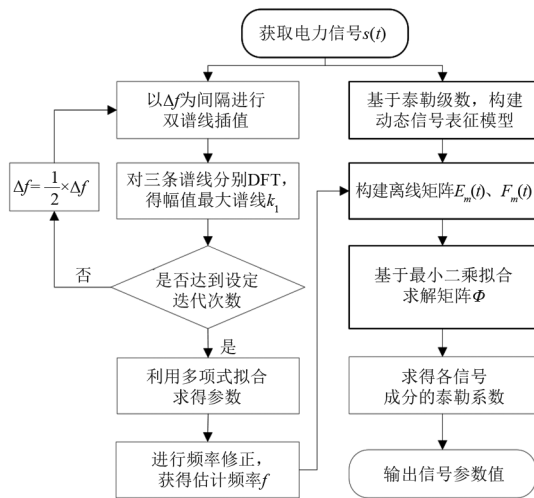


图2 算法流程

4 仿真结果及分析

在实际电网中的信号往往呈现出时变性。为了进一步验证和对比所提方法的性能,进行了动态仿真实验,以综合矢量误差(total vector error, TVE)为评价指标评价上述方法的性能:窗长 $L=96$ (1个周期); $f_s=4800$ Hz; $K=2$ 。仿真参数设置见表 1。

1) 基波频率恒定偏移测试

当发电机出力与负荷消耗不平衡、电力系统受扰动影响时,系统频率可能偏离标称频率(50 Hz)。此时,电力电子设备会为电网注入大量的谐波与间

表1 信号参数设置表谐波次数

谐波次数 m	$A_m/(\mu)$	$\theta_m/(\circ)$
1	220.0	0.05
2	4.4	39.00
3	10.0	60.50
4	3.0	123.00
5	6.0	-52.70
6	2.1	146.00
7	3.2	97.00

谐波,设置测试信号为

$$s(t) = \cos[2\pi(f_0 + f_\Delta)] + \sum_{m=0}^{M-1} A_m \cos(2\pi f_m t) \quad (24)$$

式中, f_Δ 为频率的偏移量,这里取 ± 1 Hz。

将所提 FFT-BI 算法与文献[17]的 FFT 加窗插值算法进行基波频率恒定偏移对比测试,结果如图 3 和图 4 所示,图中分量 1~7 分别代表基波与谐波信号。可以看到,在本项测试中,两种算法测量结果均在理想范围内。在基频恒定偏移且谐波/间谐波皆为静态的条件下,FFT-BI 算法基本消除了频率偏移产生的频谱泄露,TVE 在 $10^{-3}\%$ 量级以下,频率测量误差(frequency error, FE) 在 10^{-10} Hz 量级以下。此时所提算法估计精度高于传统的 FFT 加窗插值算法 3~5 个数量级,远低于 IEEE 标准给定的 TVE 小于 1%、FE 小于 0.01 Hz 的误差限值。

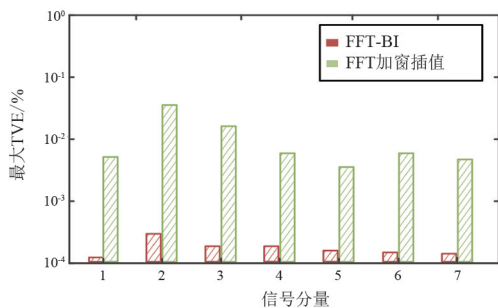


图3 基频恒定偏移时的 TVE 最大值

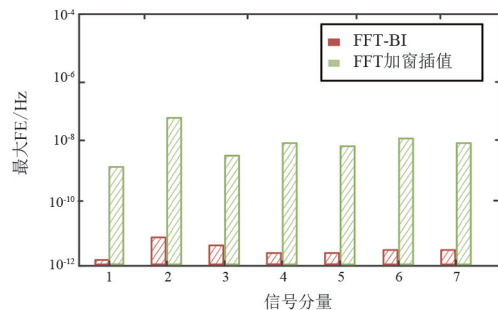


图4 基频恒定偏移时的 FE 最大值

2) 基波动态调制测试

当发生幅值振荡和相角振荡时,测试信号可以表示为

$$s(t) = \sum_{m=0}^M A_m \cos(2\pi f_m t) + [1 + k_x \cos(2\pi f_e t)] \cos[2\pi f_0 t + k_a \cos(2\pi f_e t)] \quad (25)$$

式中: k_x 、 k_a 分别为幅值调制系数和相角调制系数, $k_x=0.1$ 、 $k_a=0.1$; f_e 为调制频率。

调制过程中信号的幅值、频率、相角呈现时变性,测量结果具有更大的波动,如图 5、图 6 所示。通过图 5 和图 6 可知,所提 FFT-BI 算法的测量结果明显小于对比算法,测得的各信号分量的 TVE 均保持在 0.1% 以内,FE 均保持在 0.03 Hz 以内,满足 IEEE C37.118.1TM-2011 的测量标准中 TVE 低于 3% 的技术指标。

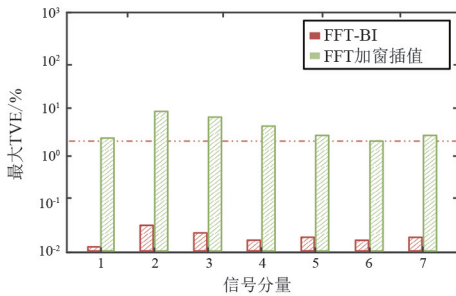
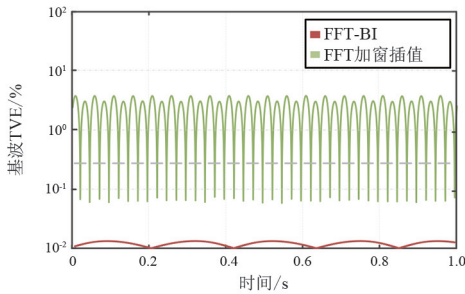


图 5 调制测试各个分量 TVE 值

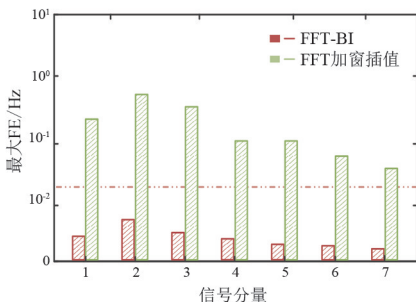
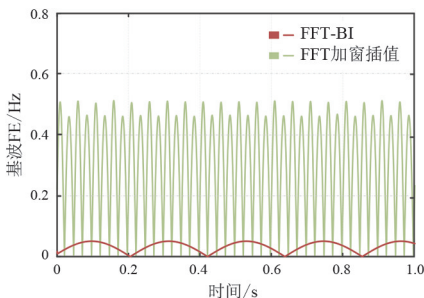


图 6 调制测试各个分量 FE 值

5 结 论

上面提出了一种基于 FFT 二分插值的电力信号快速测量方法,实现了在时间窗短、分辨率低的条件下稳态或动态的电力信号快速测量。仿真结果表明,在基频偏移且含有谐波信号下,所提算法具有很高的电力谐波信号分析精度,其中 TVE 为 10^{-3} % 量级;在动态情况下,所提算法也具有较好的动态量测性能,各谐波信号 TVE 均低于 0.1%,FE 均保持在 0.03 Hz 以内,实现了对谐波信号的准确测量,为直流配电网中快速响应类应用提供了有效的测量方法。

参考文献

- [1] BARROS J, DE APRÁIZ M, DIEGO R I. Definition and measurement of power quality indices in low voltage DC networks[C]//2018 IEEE 9th International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS), September 26–28, 2018, Bologna, Italy. IEEE, 2018: 1–5.
- [2] EBRAHIM A F, YOUSSEF T A, MOHAMMED O A. Power quality improvements for integration of hybrid AC/DC nanogrids to power systems[C]//2017 Ninth Annual IEEE Green Technologies Conference (GreenTech), March 29–31, 2017, Denver, CO, USA. IEEE, 2017: 171–176.
- [3] 汪清, 游奕弘, 赵誉洲, 等. 暂态电能质量扰动引发电压变动对闪变检测的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(6): 91–99.
- [4] LI H C, LI B, LUO Z G, et al. Power supply reliability enhancement for low-voltage distribution area with power quality improvement function[J]. IEEE Access, 2022, 10: 130619–130631.
- [5] 朱堂宇. 基于改进 VMD 与 ATEO 谐波测量的算法研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2022.
- [6] YALCIN N A, VATANSEVER F. A new hybrid method for signal estimation based on Haar transform and Prony analysis[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 70: 6501409.
- [7] WANG K, LIU S, WANG L L, et al. Novel interpolation method of multi-DFT bins for frequency estimation of signal with parameter step change[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 71: 6500914.

(下转第 97 页)

望[J].电工技术,2023(13):115-119.

- [9] 张隆恩,韩鸿凌,朱帅,等.一起高压大容量柔性直流输电换流器子模块故障分析[J].湖北电力,2022,46(4):75-81.
- [10] 胡雨龙,周竞宇,任成林,等.±800 kV 柔性换流阀子模块旁路保护方案[J].电力电子技术,2022,56(11):30-32.
- [11] 彭雨田,宋宇,陈海健,等.柔性直流背靠背换流站子模块炸裂故障分析[J].湖北电力,2022,46(3):66-72.
- [12] 谢保鸡,张宇.鲁西背靠背柔性直流广西侧功率模块过压跳闸分析研究[J].电工技术,2019(24):96-98.
- [13] 王振,肖凯,谢文杰,等.过压击穿晶闸管的柔直“黑模块”解决方案[J].电力电子技术,2023,57(2):133-136.
- [14] 徐攀腾,朱博,喻文翔,等.特高压柔性直流 MMC 故障子模块的高可靠旁路方法[J].电工技术,2022(8):119-124.
- [15] 敬华兵,年晓红,龚芬.MMC 子模块元件短路故障机理及其新型保护策略[J].电工技术学报,2015,30(3):21-27.
- [16] 段军,谢晔源,朱铭炼,等.模块化多电平换流阀子模块旁路方案设计[J].电力工程技术,2020,39(4):207-213.

- [17] SHAO S, WHEELER P W, CLARE J C, et al. Fault detection for modular multilevel converters based on sliding mode observer[J].IEEE Transactions on Power Electronics,2013,28(11):4867-4872.
- [18] 姜斌,龚雁峰,李岩.模块化多电平换流器子模块短路故障分析、检测与定位方法[J].南方电网技术,2019,13(3):73-78.
- [19] 陈小平,王何飞,罗远峰,等.柔性直流输电换流阀子模块现场测试装置设计[J].电力电子技术,2022,56(3):27-29.
- [20] 刘泽洪,郭贤珊.高压大容量柔性直流换流阀可靠性提升关键技术与工程应用[J].电网技术,2020,44(9):3604-3613.

作者简介:

张国华(1979),男,博士,高级工程师,从事直流输电技术研究;

刘卓琨(1992),男,硕士,工程师,从事柔性直流输电技术研究;

李军(1987),男,高级工程师,从事特高压直流输电技术研究;

郑维高(1987),男,硕士,工程师,从事特高压直流输电技术研究。(收稿日期:2023-10-27)

(上接第64页)

- [8] CASTELLO P, LAURANO C, MUSCAS C, et al. Harmonic synchrophasors measurement algorithms with embedded compensation of voltage transformer frequency response[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 70:9001310.
- [9] 雷可君,李明皓,汪旭明,等.基于 Rife-Vincent 自乘-卷积窗三谱线插值的电力谐波参数估计[J].江苏大学学报(自然科学版),2022,43(5):547-553.
- [10] 谭保华,张文字,黄程旭,等.基于全相位 FFT 三谱线校正的电网谐波与间谐波检测算法[J].华中师范大学学报(自然科学版),2021,55(6):1044-1050.
- [11] 赵晓东.基于加窗插值 apFFT 的电力谐波和间谐波检测算法研究[D].镇江:江苏大学,2020.
- [12] JIN T, ZHANG W F. A novel interpolated DFT synchrophasor estimation algorithm with an optimized combined cosine self-convolution window [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 70:9000610.
- [13] CHEN Q M, YANG X, WANG X M, et al. Complex harmonic detection based on MSLD self-multiplication-convolution window [C]//2023 8th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE), April 14-16, 2023, Tianjin, China. IEEE, 2023:1453-1457.
- [14] 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.

- [15] 赵帅旗,肖辉,李文俊,等.基于多谱线插值法和复调制细化法的电力系统谐波分析[J].电测与仪表,2019,56(18):10-15.
- [16] 林申力.频率动态过程中基于 FFT 的电力谐波测量研究[D].杭州:浙江大学,2017.
- [17] 陈至豪,王立德,王冲,等.基于组合余弦优化窗四谱线插值 FFT 的电力谐波分析方法[J].电网技术,2020,44(3):1105-1113.

作者简介:

申杰(1982),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力通信与电力计量;

李方硕(1986),男,硕士,高级工程师,研究方向为电力通信与电力计量;

陈伯朗(1975),男,高级工程师,从事电力通信与电力计量研究;

屈鸣(1979),男,硕士,高级工程师,从事电力通信与电力计量研究;

王韬(1982),男,高级工程师,从事采集技术、智能计量设备检测技术研究;

李锐超(1990),男,硕士,工程师,从事电气仪表和电能计量及其检测技术研究;

李林欢(1991),女,硕士,工程师,从事电力通信技术应用方面的研究。(收稿日期:2023-10-23)