

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.10.037

一种优化窗函数及其在电网谐波检测中的应用分析

李振华^{1,2}, 胡廷和¹, 杜亚伟¹, 向鑫¹, 张涛¹, 李振兴¹

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 湖北省微电网工程技术研究中心(三峡大学), 湖北 宜昌 443002)

摘要: 基于离散傅里叶变换(DFT)的谐波检测方法中,现有窗函数在信号含有高次弱幅值谐波分量及电网频率波动等复杂情况下测量准确度较低,为此提出一种最小旁瓣优化窗函数并分析其在电网谐波检测中的应用。首先利用约束条件对余弦窗函数进行优化,提出了一种最小旁瓣优化窗,并分析该窗函数的频谱特性;然后利用该优化窗提出基于6项最小旁瓣优化窗插值的改进DFT谐波检测算法,运用数学拟合方法求出谐波参数计算公式;最后通过复杂实况下的仿真试验,验证所述六项最小旁瓣优化窗的优良性能。研究表明:与已有窗函数相比六项最小旁瓣优化窗具有最小的旁瓣峰值,能更有效抑制频谱泄漏的相互影响,提高DFT谐波检测方法的测量精度,满足在复杂实况下电网谐波测量需要。

关键词: 六项最小旁瓣优化窗; 谱线插值; 谐波检测; 离散傅里叶变换; 数学拟合方法

Optimal Window Function and Its Application in Harmonic Detection of Power Grid

LI Zhenhua^{1,2}, HU Tinghe¹, DU Yawei¹, XIANG Xin¹, ZHANG Tao¹, LI Zhenxing¹

(1. China Three Gorges University College of Electrical Engineering & New Energy, Hubei Yichang 443002, China; 2. Hubei Provincial Research Center on Microgrid Engineering Technology (China Three Gorges University), Hubei Yichang 443002, China)

Abstract: For the harmonic detection method based on discrete fourier transform (DFT), the existing window perform low accuracy in measuring the signal with high-order and weak amplitude harmonic component in the situation when the frequency of power grid fluctuate. Therefore, a minimum sidelobe optimization window is proposed and its application in harmonic detection of power grid is analyzed. Firstly, the cosine window function is optimized according to the constraint condition, a minimum sidelobe window is proposed and the spectrum characteristics of the proposed window is analyzed. Then, an improved DFT harmonic detection algorithm based on six-term minimum sidelobe optimization window interpolation is proposed. The calculation formula of harmonic parameters is obtained by applying mathematical fitting method. Furthermore, simulation experiments in complex conditions are carried out to validate the improved performance of the proposed six-term minimum sidelobe optimization window. The research reveal that the six-term minimum sidelobe optimization window have smallest peak sidebobe compared with existing window, which can effectively suppress the interaction of spectrum leakage, improve the measurement accuracy of DFT harmonic detection method, and can meet the acquirement of harmonic measurement in complex situations.

Key words: six-term minimum sidelobe optimization window; spectral interpolation; harmonic detection; discrete Fourier transform; mathematical fitting method

0 引言

能源互联革命背景下,新能源发电和电动汽车

储能技术得到广泛应用,新能源发电(太阳能发电等)通过电力电子技术接入电网中,使得电网中谐波含量增多,引起电流电压波形的畸变,造成电网谐

收稿日期:2020-03-01; 修回日期:2020-05-03

基金项目:国家自然科学基金项目(51507091);湖北省教育厅重点项目(D20181204)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51507091), Key Projects of Hubei Province Education Department(D20181204).

波的不稳定性和复杂性^[1-3]。这使得电网谐波检测的准确度下降,同时严重危及电网的安全稳定运行,造成电网停电事故^[4-6]。因此,电网谐波参数的精确测量为电网谐波抑制和安全稳定运行提供重要的前提条件和保障。

离散傅里叶变换(DFT)谐波分析方法因其易于嵌入电网谐波测量系统而得到广泛应用^[7-9]。但是,DFT方法在采样与处理过程中,对谐波信号进行截断,由于电网基波频率波动等因素的影响,使电网实际运行中基波频率不等于标准的50 Hz工频,因而DFT处理过程是属于非整周期截断和非同步采样,从而使用DFT方法进行谐波检测时在频域内产生频谱泄漏,造成谐波测量不准确^[10-12]。同时,DFT方法离散化后只得到离散频域点上的频谱,电网频率的波动使得离散频域点上的频谱值很难与谐波信号真实的频谱值重合,造成了频域点的观测误差,即栅栏效应,导致测量误差较大^[13-15]。

目前已有相关文献提出利用加窗方法,通过适当的窗函数,利用其旁瓣抑制性能削弱谐波信号的频谱泄漏,减少各次谐波之间的频谱干扰^[16-20]。已提出的窗函数有Hanning窗^[21],Blackman窗^[22]和Blackman-Harris窗^[23]等。利用谱线插值算法可以克服“栅栏效应”造成的测量误差,提出的双谱线插值方法,其原理是利用频域内峰值点附近的两条最高、次高谱线进行加权计算,求取频率偏差进而反演求幅值、相位和频率参量,提高谐波测量精度^[24-26]。然而,基于加窗插值的DFT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谐波参量检测准确度较低。

为使窗函数得到优化,文中根据窗函数目标条件,建立窗函数优化的约束条件,提出了最小旁瓣窗优化的规则,并在此基础上提出基于六项最小旁瓣优化窗(six-term minimize sidelobe optimization window, SMSOW)插值的改进DFT谐波检测算法。对谐波信号加SMSOW加窗处理,使谐波信号的频谱泄漏大幅度下降;同时采用四谱线插值算法,利用多项式拟合方法推导出谐波参量修正系数,提高谐波参数检测精度。最后,在含高次弱幅值谐波信号及频率波动干扰等复杂情况下,通过仿真验证了所述方法的有效性。

1 最小旁瓣优化窗

1.1 最小旁瓣优化窗参数优化

余弦窗函数是一类窗函数的总称,此类窗函数

具有良好的旁瓣性能,可以抑制频谱泄漏的影响,其时域表达式为

$$w_M(t) = \sum_{i=0}^{K-1} (-1)^i a_i \cos(2\pi it/N) \quad (1)$$

式(1)中: K 、 a_i 分别为项数和系数; N 为采样点数。对式(1)求 n 阶导数为

$$w_M^n(t) = (2\pi)^n \sum_{i=0}^{K-1} i^n a_i \cos(2\pi it/N + \pi n/2) \quad (2)$$

余弦窗性能受主瓣宽度和旁瓣峰值电平的影响,为使窗性能得到优化,推导由主瓣宽度和旁瓣峰值电平为目标的参数优化过程:

1)余弦窗函数的系数 a_i 必须满足系数之和为1,即

$$\sum_{i=0}^{K-1} a_i = 1 \quad (3)$$

2)为使得组合余弦窗在相同项数余弦窗中具有最小的旁瓣峰值电平,必须在窗函数频谱的第1~5个旁瓣添加零点,同时需要满足使 n 阶导数式(2)连续。即必须满足

$$\sum_{i=0}^{K-1} (-1)^i i^n a_i = 0 \quad (4)$$

由式(3)、(4)看出,由余弦窗项数 K 、窗系数 a_i 和可导次数 n 决定,当余弦窗项数 K 增大时,其旁瓣峰值电平下降,但主瓣宽度因此也变大,因此余弦窗项数 K 不能过大,一般取1~6。令 $K=1\sim6$,由约束条件(3)、(4),求使旁瓣峰值电平达到其相等项数的余弦窗中为最小值,因此可称为最小旁瓣优化窗(minimize sidelobe optimization window, MSOW),其窗系数见表1。其中, $a \times 10^{-b}$ 。

1.2 最小旁瓣优化窗性能分析

对式(1)进行离散傅里叶变换,求得余弦窗频域函数为

$$W_M(\omega) = \sum_{i=0}^{K-1} (-1)^i \frac{a_i}{2} \left[R(\omega - \frac{2\pi i}{N}) + R(\omega + \frac{2\pi i}{N}) \right] \quad (5)$$

式(5)中, $R(\omega) = \frac{\sin(\omega N/2)}{\sin(\omega/2)} e^{-j\frac{N-1}{2}\omega}$,为矩形窗的频域函数。因此,对数幅频特性^[27-28]可以表示为

$$W_{M(\text{dB})(\omega)} = 20 \lg \left| \frac{W_M(\omega)}{W_M(0)} \right| \quad (6)$$

分析MSOW的旁瓣特性,把表1系数代入式(5)、(6)中,求取MSOW的时域和频域特性,见图1(a)、(b)。根据各项最小旁瓣优化窗的表达式,推导求出其旁瓣峰值电平和主瓣宽度,其窗函数性能总结见表2。

表1 最小旁瓣优化窗系数

Table 1 Coefficient of the minimize sidelobe optimization window

窗函数系数	K 的取值					
	1	2	3	4	5	6
	一项 MSOW(矩形窗)	二项 MSOW	三项 MSOW	四项 MSOW	五项 MSOW	六项 MSOW
a_0	1	$5.383\ 553\ 9\times10^{-1}$	$4.243\ 800\ 9\times10^{-1}$	$3.635\ 819\ 3\times10^{-1}$	$3.232\ 153\ 8\times10^{-1}$	$2.935\ 579\ 0\times10^{-1}$
a_1	—	$4.616\ 446\ 1\times10^{-1}$	$4.973\ 406\ 4\times10^{-1}$	$4.891\ 774\ 4\times10^{-1}$	$4.714\ 921\ 4\times10^{-1}$	$4.519\ 357\ 7\times10^{-1}$
a_2	—	—	$7.827\ 927\ 1\times10^{-2}$	$1.365\ 995\ 1\times10^{-1}$	$1.755\ 341\ 3\times10^{-1}$	$2.014\ 164\ 7\times10^{-1}$
a_3	—	—	—	$1.064\ 112\ 2\times10^{-2}$	$2.849\ 699\ 0\times10^{-2}$	$4.792\ 610\ 9\times10^{-2}$
a_4	—	—	—	—	$1.261\ 357\ 1\times10^{-3}$	$5.026\ 196\ 4\times10^{-3}$
a_5	—	—	—	—	—	$1.375\ 555\ 7\times10^{-4}$

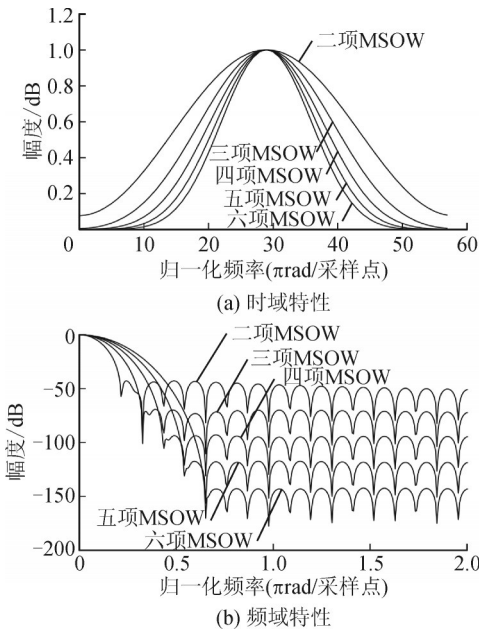


图1 最小旁瓣优化窗特性

Fig. 1 Characteristic of the minimize sidelobe optimization window

表2 最小旁瓣优化窗性能

Table 2 Performance of minimize sidelobe optimization window

窗项数	旁瓣峰值电平/dB	主瓣宽度
二项 MSOW	-43	$8\ \pi/N$
三项 MSOW	-72	$12\ \pi/N$
四项 MSOW	-98	$16\ \pi/N$
五项 MSOW	-125	$20\ \pi/N$
六项 MSOW	-153	$24\ \pi/N$

同时将六项 MSOW 和普通六项组合余弦窗作对比,证明 MSOW 的旁瓣特性,对比见图 2(a)。此外,为证明六项 MSOW 的旁瓣性能,将六项 MSOW 与著名窗函数如 Hamming(Ham)窗、Blackman(BI)窗和 Nuttall(Nut)窗进行对比,频谱特性对比见图 2(b)。

由图 2(a)可知,以六项余弦窗为例,六项 MSOW

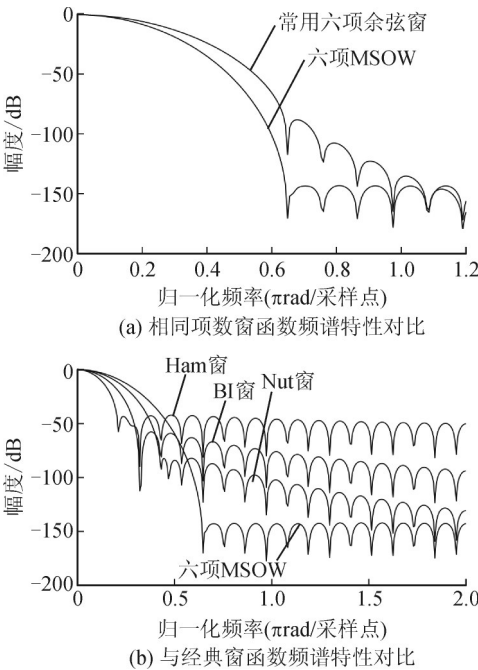


图2 窗函数频谱特性对比

Fig. 2 Comparison of the spectrum characteristic of windows

的旁瓣峰值为-153 dB,已有六项余弦窗为-88 dB,证明经过优化后其旁瓣峰值明显降低,这个旁瓣性能的改善提高了 MSOW 的频谱泄漏抑制能力。同时,这两种窗函数具有相同的主瓣宽度,因而其频率分辨率没有受到参数优化的影响。

图 1(b)表明,随着窗项数的增加,其旁瓣峰值电平同样显著降低,但是其主瓣宽度变大,影响了频率分辨率。因此窗项数 K 不能过大,六项 MSOW 其频率分辨率仍满足要求,因此文中选取六项 MSOW 作为母窗,用于对电网中高次弱幅值等复杂情况下的谐波分析。

由图 2(b)可知,六项 MSOW 的旁瓣幅值为-153 dB,相比于其他 Ham 窗、BI 窗、Nut 窗具有更小的旁瓣幅值电平,频谱泄漏更小,谐波频谱能量更好地集中在主瓣区域,更好地抑制谐波间频谱泄漏的相互干扰。

2 基于六项最小旁瓣优化窗插值的改进 DFT谐波检测算法

根据优化推导的 MSOW 窗,提出基于六项 MSOW 插值的改进 DFT 谐波检测算法。分析电网中一谐波信号,将其离散化为

$$x(n) = \sum_{m=1}^M A_m \sin(2\pi n f_m / f_s + \phi_m) \quad (7)$$

式(7)中: M 为最高次谐波; f_s 为采样频率; A_m 、 ϕ_m 、 f_m 依次为第 m 次谐波的幅值、相位和频率。

将信号 $x(n)$ 加六项 MSOW 处理,加窗后其时域函数为

$$x_M(n) = x(n)w_M(n) \quad (8)$$

对式(8)进行离散傅里叶变换,求得加窗后的频域函数为

$$X_M(\lambda) = \sum_{m=1}^M \frac{A_m}{2j} [e^{j\phi_m} W_M(\lambda - f_m / \Delta f) - e^{-j\phi_m} W_M(\lambda + f_m / \Delta f)] \quad \lambda = 0, 1, \dots, N-1 \quad (9)$$

式(9)中: Δf 表示频率分辨率, $\Delta f = f_s / N$ 。将式(9)简化为

$$X_M(\lambda) = \sum_{m=1}^M \frac{A_m}{2j} e^{j\phi_m} W_M(\lambda - f_m / \Delta f) \quad \lambda = 0, 1, \dots, N-1 \quad (10)$$

为方便推导基于六项 MSOW 四谱线插值修正公式,忽略其他次谐波的检测,只检测第 m 次谐波信号,简化后的离散频域函数为

$$\alpha = \frac{[|W_M(-\beta + 0.5)| + |W_M(-\beta + 1.5)|] - [|W_M(-\beta - 0.5)| + |W_M(-\beta - 1.5)|]}{[|W_M(-\beta + 0.5)| + |W_M(-\beta + 1.5)|] + [|W_M(-\beta - 0.5)| + |W_M(-\beta - 1.5)|]} \quad (15)$$

从式(15)可以看出, α 为 β 的函数,记为 $\alpha = g(\beta)$ 。四谱线插值方法重点是求解出偏移量 β , 因此设定反函数 $\beta = g^{-1}(\alpha) = G(\alpha)$ 。

为方便计算出偏移量 β ,利用曲线拟合法,设其拟合多项式(拟合7次)为

$$\beta = g_7 \alpha^7 + g_5 \alpha^5 + g_3 \alpha^3 + g_1 \alpha \quad (16)$$

$$A_m = \frac{2(y_{m1} + 3y_{m2} + 3y_{m3} + y_{m4})}{[|W_M(-\beta - 1.5)| + 3|W_M(-\beta - 0.5)| + 3|W_M(-\beta + 0.5)| + |W_M(-\beta + 1.5)|]} \quad (19)$$

为计算谐波幅值修正系数 A_m ,设 $A_m = (y_{m1} + 3y_{m2} + 3y_{m3} + y_{m4})H(\beta)/N$,则 $H(\beta)$ 为

$$H(\beta) = \frac{2N}{[|W_M(-\beta - 1.5)| + 3|W_M(-\beta - 0.5)| + 3|W_M(-\beta + 0.5)| + |W_M(-\beta + 1.5)|]} \quad (20)$$

为方便计算出幅值修正参数 $H(\beta)$,利用曲线拟合法求解,设其拟合多项式为

$$H(\beta) = g_6 \beta^6 + g_4 \beta^4 + g_2 \beta^2 + g_0 \quad (21)$$

$$X_M(\lambda) = \frac{A_m}{2j} e^{j\phi_m} W_M(\lambda - f_m / \Delta f) \quad \lambda = 0, 1, \dots, N-1 \quad (11)$$

式(11)中, $W_M(\lambda)$ 为六项 MSOW 离散频域函数

$$W_M(\lambda) = \frac{N}{\pi} \sin(\pi \lambda) e^{j\frac{\pi}{N}\lambda} e^{-j\pi \lambda} \sum_{i=0}^{i=5} (-1)^i \frac{a_i \lambda}{\lambda^2 - i^2} \quad (12)$$

对式(11)取绝对值,加窗信号谱线幅值为

$$|X_M(\lambda)| = \frac{A_m}{2} |W_M(\lambda - f_m / \Delta f)| \quad (13)$$

在非同步采样条件下,第 m 次谐波的实际频点 $\lambda_m = f_m / \Delta f$ 不是整数,即 $\lambda - f_m / \Delta f \neq 0$ 。文中采用四谱线插值方法,将峰值点附近4条谱线包含的频谱信息进行加权计算,求得更精确的谐波参数值。下面给出六项 MSOW 四谱线插值方法推导修正公式的过程。

加六项 MSOW 处理得到第 m 次谐波峰值点为 λ_m ,其相邻的4条谱线分别为 λ_{m1} 、 λ_{m2} 、 λ_{m3} 、 λ_{m4} ,这4条谱线的对应的幅值为 $y_{m1} = |X_M(\lambda_{m1})|$ 、 $y_{m2} = |X_M(\lambda_{m2})|$ 、 $y_{m3} = |X_M(\lambda_{m3})|$ 和 $y_{m4} = |X_M(\lambda_{m4})|$ 。其中, λ_{m1} 和 λ_{m2} 在 λ_m 左侧, λ_{m3} 和 λ_{m4} 在 λ_m 右侧,4条谱线位置关系为 $\lambda_{m1} < \lambda_{m2} < \lambda_m < \lambda_{m3} < \lambda_{m4}$,大小关系为 $\lambda_{m2} = \lambda_{m1} + 1$ 、 $\lambda_{m3} = \lambda_{m2} + 1$ 、 $\lambda_{m4} = \lambda_{m3} + 1$ 。

设定偏移量为 $\beta = \lambda_m - \lambda_{m2} - 0.5$,则 β 的范围为 $[-0.5, 0.5]$ 。设定四谱线的关系为

$$\alpha = \frac{(y_{m3} + y_{m4}) - (y_{m1} + y_{m2})}{y_{m1} + y_{m2} + y_{m3} + y_{m4}} \quad (14)$$

从而建立了偏移量 β 和四谱线的关系。

将式(13)代入式(14)中,求得

因此,第 m 次谐波频率、相位参数为:

$$f_m = (\lambda_{m2} + \beta + 0.5) f_s / N \quad (17)$$

$$\phi_m = \arg[X_M(\lambda_{m2})] - \pi \beta \quad (18)$$

通过式(13),并进行四谱线加权计算,求幅值参

数 A_m 为

将 β 取 $[-0.5, 0.5]$ 中的一组数据,按 0.001 的步长,从 -0.5 到 0.5 之间取 1 000 个数,代入式(15)中,求得相应的 1 000 个 α 值。利用 MATLAB 中的 $p\text{loyfit}(\alpha, \beta)$ 公式,利用曲线拟合方法求得六项 MSOW 四谱线插值方法的偏移量为

$$\beta = 0.227\ 708\alpha^7 + 0.318\ 904\alpha^5 + 0.598\ 017\alpha^3 + 2.161\ 989\alpha \quad (23)$$

将 β 取 $[-0.5, 0.5]$ 中的 1 000 个数,代入式(20),求得相应的 1 000 个 H 值。利用 MATLAB 中的 $p\text{loyfit}(\beta, H)$ 公式,拟合求出六项 MSOW 对应的幅值修正系数为

$$H(\beta) = 0.001\ 247\beta^6 + 0.018\ 075\beta^4 + 0.187\ 218\beta^2 + 1.012\ 911 \quad (24)$$

因此,第 m 次谐波的幅值为

$$A_m = (y_{m1} + 3y_{m2} + 3y_{m3} + y_{m4})H(\beta)/N \quad (25)$$

3 算例分析

3.1 算例 1: 含高次、弱幅值谐波分量的电网谐波参数估计

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。为验证文中提出的改进算法在提取基波和高次谐波的准确性,实例采用含有 21 次谐波的信号模型。其表达式为

$$x(n) = \sum_{m=1}^{21} A_m \sin(2\pi m n f_0 / f_s + \phi_m) \quad (26)$$

设定基波频率 $f_0 = 50.1\text{ Hz}$,采样频率为 $f_s = 5\ 120\text{ Hz}$,采样长度为 $N = 1\ 024$,出信号的具体参数见表 3。

表 3 仿真信号参数

Table 3 Parameters of the simulated signal

m	A_m/V	$\Psi_m/(^{\circ})$	m	A_m/V	$\Psi_m/(^{\circ})$	m	A_m/V	$\Psi_m/(^{\circ})$
1	220.0	0.05	8	1.90	56.00	15	1.000	25.0
2	4.4	39.00	9	2.30	43.10	16	0.060	53.1
3	10.0	60.50	10	0.80	-19.00	17	0.400	-132.0
4	3.0	123.00	11	1.10	4.10	18	0.040	85.0
5	6.0	-52.70	12	0.70	40.00	19	0.300	0.8
6	2.1	146.00	13	0.85	10.50	20	0.005	53.0
7	3.2	97.00	14	0.10	115.00	21	0.010	-72.0

由表 3 信号参数可知,基波幅值为 220 V,对于第 16、18、20、21 次谐波,基波幅值为这些高次谐波幅值的 3 666、5 500、44 000、22 000 倍,高次谐波特

别容易受到其他次谐波干扰的影响,从而影响谐波测量精度。

将著名窗函数,如 Blackman(BI)窗、Blackman-Harris(BI-H)窗、四项三阶 Nuttall(Nut)窗作为对比组,仿真验证本文提出的六项 MSOW 和这几种常用窗函数在高次谐波分析中的测量准确度。这几种加窗算法都采用四谱线插值进行修正,下面是推导出的其他 3 个加窗算法的修正公式。仿真结果见表 4、5。其中, $ae-b$ 表示 $a \times 10^{-b}$ 。

BI窗、BI-H窗、Nut窗的四谱线插值修正公式分别为:

$$\begin{aligned} \beta_{\text{BI}} &= 0.134\ 895\alpha^7 + 0.134\ 895\alpha^5 + 0.317\ 562\alpha^3 + 1.208\ 942\alpha \\ H_{\text{BI}}(\beta) &= 0.003\ 909\beta^6 + 0.034\ 459\beta^4 + 0.227\ 781\beta^2 + 0.810\ 404 \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \beta_{\text{BI-H}} &= 0.166\ 682\alpha^7 + 0.218\ 168\alpha^5 + 0.418\ 306\alpha^3 + 1.549\ 075\alpha \\ H_{\text{BI-H}}(\beta) &= 0.002\ 452\beta^6 + 0.026\ 545\beta^4 + 0.210\ 659\beta^2 + 0.887\ 492 \end{aligned} \quad (28)$$

$$\begin{aligned} \beta_{\text{Nut}} &= 0.165\ 897\alpha^7 + 0.227\ 507\alpha^5 + 0.444\ 577\alpha^3 + 1.705\ 991\alpha \\ H_{\text{Nut}}(\beta) &= 0.002\ 068\beta^6 + 0.023\ 970\beta^4 + 0.203\ 461\beta^2 + 0.917\ 860 \end{aligned} \quad (29)$$

由表 4 幅值相对误差数据分析可知,对于含有 21 次谐波幅值参数的检测,相比于已有的 BI窗、BI-H窗和 Nut窗,采用六项 MSOW 测量精度更高,幅值测量相对误差数量级比其他三种窗函数算法提高 2~6 个数量级。特别对高次弱幅值谐波,如第 20 次谐波幅值参数的测量,BI窗的测量误差较大,为 0.001%,而加六项 MSOW 方法的测量误差为 $5.34 \times 10^{-8}\%$,谐波测量精度更高。

由表 5 相位相对误差数据可以看出,对于谐波相位参数的检测,采用六项 MSOW 同样能够得到相对更高的测量精度,其相位测量相对误差数量级为 $10^{-5}\% \sim 10^{-8}\%$,相比于其他三种窗函数插值方法,测量精度得到了显著提高。

综上所述,文中提出的基于六项 MSOW 插值的改进 DFT 谐波检测算法具有更高的测量精度,适用于电网中含高次、弱幅值谐波分量的参数估计。

3.2 算例 2: 基波频率波动情况下的电网谐波分析

实际电网基波频率总是在一定范围内波动,频率的波动引起谐波的不稳定,导致各次谐波之间相互干扰。特别是对于高次弱幅值谐波,容易受大幅值谐波的影响而造成严重的频谱泄漏情况。为验证文中提出的改进算法在实际电网情况波动时也

表4 含高次、弱幅值谐波分量情况下电网谐波幅值检测

Table 4 Detection of harmonic amplitude in smart grid with high-order and weak amplitude component

项目	幅值相对误差/%										
	1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次	8次	9次	10次	11次
BI窗	3.52×10^{-8}	2.02×10^{-6}	2.80×10^{-7}	5.11×10^{-6}	7.64×10^{-7}	4.05×10^{-6}	1.07×10^{-6}	2.32×10^{-6}	1.39×10^{-7}	1.66×10^{-6}	5.13×10^{-7}
BI-H窗	2.17×10^{-9}	3.07×10^{-7}	2.23×10^{-8}	2.41×10^{-7}	5.99×10^{-8}	1.66×10^{-7}	8.01×10^{-8}	1.89×10^{-7}	2.38×10^{-8}	1.82×10^{-7}	7.14×10^{-8}
Nut窗	1.11×10^{-9}	3.97×10^{-7}	1.43×10^{-9}	4.22×10^{-7}	2.54×10^{-8}	4.47×10^{-7}	4.66×10^{-8}	6.05×10^{-8}	7.84×10^{-8}	3.08×10^{-8}	3.72×10^{-8}
六项MSW	1.50×10^{-11}	2.96×10^{-10}	1.92×10^{-9}	1.87×10^{-9}	2.30×10^{-10}	6.78×10^{-10}	1.99×10^{-9}	3.47×10^{-9}	2.11×10^{-9}	3.66×10^{-9}	1.64×10^{-9}

项目	幅值相对误差/%										
	12次	13次	14次	15次	16次	17次	18次	19次	20次	21次	—
BI窗	8.26×10^{-7}	9.26×10^{-7}	5.22×10^{-6}	2.85×10^{-8}	2.75×10^{-5}	2.28×10^{-7}	1.59×10^{-5}	1.16×10^{-9}	6.60×10^{-6}	3.34×10^{-7}	—
BI-H窗	1.46×10^{-7}	1.10×10^{-8}	1.76×10^{-7}	4.26×10^{-9}	1.080×10^{-6}	7.01×10^{-9}	4.72×10^{-7}	5.68×10^{-9}	1.560×10^{-6}	3.42×10^{-7}	—
Nut窗	8.27×10^{-8}	1.47×10^{-7}	5.77×10^{-7}	3.12×10^{-9}	3.250×10^{-6}	3.11×10^{-8}	1.62×10^{-6}	5.28×10^{-9}	7.250×10^{-6}	4.13×10^{-8}	—
六项MSW	2.63×10^{-9}	6.40×10^{-11}	3.15×10^{-9}	1.21×10^{-9}	4.350×10^{-9}	1.67×10^{-9}	1.01×10^{-8}	5.75×10^{-10}	5.340×10^{-8}	6.19×10^{-11}	—

表5 含高次、弱幅值谐波分量情况下电网谐波相位检测

Table 5 Detection of harmonic phase in smart grid with high-order and weak amplitude component

项目	相位相对误差/%										
	1次	2次	3次	4次	5次	6次	7次	8次	9次	10次	11次
BI窗	7.04×10^{-5}	3.78×10^{-4}	2.77×10^{-5}	7.72×10^{-5}	1.54×10^{-8}	6.34×10^{-5}	4.00×10^{-5}	1.43×10^{-4}	6.17×10^{-5}	6.49×10^{-4}	3.16×10^{-4}
BI-H窗	1.90×10^{-5}	3.26×10^{-5}	2.85×10^{-7}	2.22×10^{-6}	2.38×10^{-6}	6.11×10^{-6}	6.68×10^{-6}	2.05×10^{-5}	1.36×10^{-5}	4.99×10^{-5}	5.41×10^{-6}
Nut窗	1.14×10^{-5}	1.93×10^{-5}	4.21×10^{-7}	5.55×10^{-6}	8.83×10^{-7}	4.97×10^{-6}	2.48×10^{-6}	9.13×10^{-6}	1.69×10^{-6}	3.59×10^{-5}	4.76×10^{-6}
六项MSW	1.73×10^{-6}	1.44×10^{-7}	3.89×10^{-8}	4.30×10^{-8}	6.27×10^{-8}	3.16×10^{-8}	7.79×10^{-8}	2.37×10^{-7}	2.01×10^{-7}	3.38×10^{-8}	1.62×10^{-6}

项目	相位相对误差/%										
	12次	13次	14次	15次	16次	17次	18次	19次	20次	21次	—
BI窗	9.58×10^{-7}	2.90×10^{-5}	3.17×10^{-5}	1.60×10^{-5}	0.002	1.00×10^{-5}	0.001	2.380×10^{-4}	0.008	4.79×10^{-4}	—
BI-H窗	2.18×10^{-5}	4.86×10^{-5}	6.10×10^{-5}	2.28×10^{-5}	7.890×10^{-5}	1.26×10^{-5}	3.230×10^{-4}	0.001	0.001	5.67×10^{-4}	—
Nut窗	4.11×10^{-6}	7.02×10^{-6}	6.87×10^{-6}	1.55×10^{-6}	1.650×10^{-4}	1.92×10^{-7}	7.730×10^{-5}	4.530×10^{-5}	5.360×10^{-4}	7.33×10^{-5}	—
六项MSW	5.76×10^{-7}	8.80×10^{-7}	1.23×10^{-6}	4.80×10^{-7}	5.080×10^{-6}	2.94×10^{-7}	4.600×10^{-6}	2.760×10^{-5}	5.590×10^{-5}	1.30×10^{-5}	—

具有较高的测量精度,设置仿真实例的频率波动情况为49.5~50.5 Hz,仿真模型仍沿用式(26)的信号,验证本文所提算法的抗频率干扰能力。由于篇幅

有限,文中仅将 Nuttall 窗作为对比组。加 Nuttall 窗的仿真结果见图3,加六项 MSOW 窗仿真结果见图4。

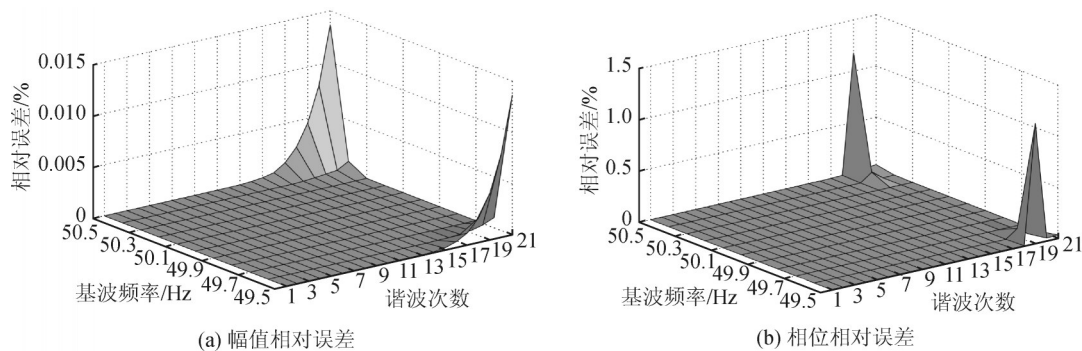


图3 Nuttall窗测量误差

Fig. 3 Measurement error of nuttall window

由图3可以看出,当基波频率波动时,采用加 Nuttall窗幅值和相位误差上升了几个数量级。特别是对于高次弱幅值谐波,幅值相对误差为 $10^{-2}\%$ 数量级,相位相对误差为1.2%,此时相位测量结果已经不能满足电网谐波标准的要求。

由图4可以看出,当频率偏离电网工频50 Hz较大时,如45.5、45.6 Hz或为50.4、50.5 Hz,对于高次谐波的幅值、相位测量误差有所变大。而对于低次谐波的测量以及频率偏离较小时,谐波参数的测量精度仍然较高,在图中显示为接近数值为零的水平

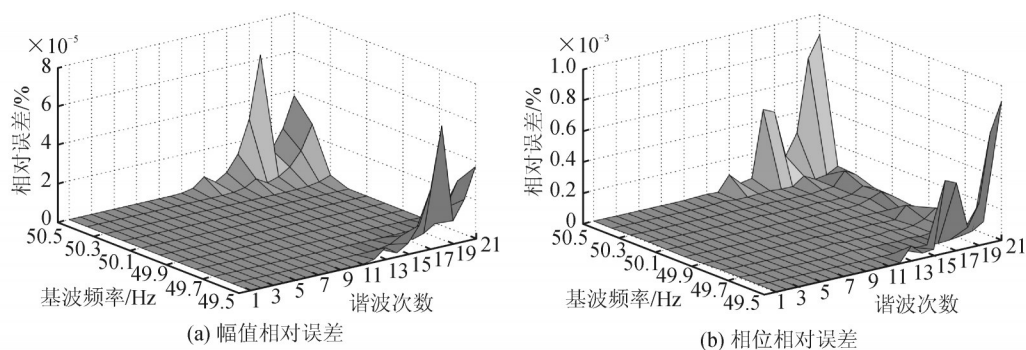


图4 六项MSOW测量误差

Fig. 4 Measurement error of six-term MSOW

面。总体上,文中提出的六项MSOW谱线插值的改进DFT谐波检测算法在基波频率波动较大情况下,幅值、相位测量误差数量级分别为 $10^{-5}\%$ 、 $10^{-3}\%$,满足实际电网情况对于谐波测量的要求。

4 结论

文中根据组合余弦窗进行参数优化,建立使窗函数的旁瓣峰值电平达到最小值的约束条件,推导出一种最小旁瓣优化窗(MSOW),并提出基于六项MSOW谱线插值的改进DFT谐波检测算法。理论分析和算例仿真得出结论:

1)MSOW在相同项数余弦窗中具有最小的旁瓣峰值;同时与已有常用窗函数相比,六项MSOW具有最小的旁瓣峰值,能更有效抑制频谱泄漏的相互影响,提高DFT谐波检测方法的测量精度。

2)复杂谐波情况下的仿真实例证明,文中提出的基于六项MSOW插值电网谐波分析方法具有更高的测量精度,可以抵抗电网频率波动干扰的影响,满足复杂实况下电网谐波测量需要。

参考文献:

- [1] 查志鹏,康文斌,张波,等.电力电容器噪声谐波影响特性试验研究[J]. 高压电器,2016,52(7):172-178.
ZHA Zhipeng, KANG Wenbin, ZHANG Bo, et al. Experimental study on the impact of noise harmonics on power capacitor[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(7): 172-178.
- [2] 孙阳光,樊艳芳.基于谐波谐振指数的配电网谐振严重程度评估[J]. 电力电容器与无功补偿,2019,40(4):101-105.
SUN Yangguang, FAN Yanfang. Assessment on resonance severity of distribution network based on harmonic resonance index[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2019, 40(4):101-105.
- [3] 聂程,王跃,雷万钧,等.新能源并网输电电缆谐波谐振分析及抑制方法[J]. 电力系统自动化,2017,41(17):

128-133.

- NIE Cheng, WANG Yue, LEI Wanjun, et al. Harmonic response analysis and suppression method for transmission cables between renewable energy sources and power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17): 128-133.
- [4] 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.
- [5] 张晓,刘振中,孟凡婷,等.一种用于谐波检测的改进虚拟磁链定向方法[J]. 电力电容器与无功补偿,2020,41(1):135-141.
ZHANG Xiao, LIU Zhenzhong, MENG Fanting, et al. An improved virtual flux linkage orientation method for harmonic detection[J]. Power Capacitors & Reactive Power Compensation, 2020, 41(1):135-141.
- [6] 李振华,李春燕,张竹.基于Q-ARMA的电子式电压互感器误差状态预测[J]. 中国科学:技术科学,2018,48(12):1401-1412.
LI Zhenghua, LI Chunyan, ZHANG Zhu. State prediction of electronic voltage transformer based on Q - ARMA[J]. Scientia Sinica Technologica, 2018, 48(12):1401-1412.
- [7] SU T, YANG M, JIN T, 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, 12(8): 953-961.
- [8] 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):91-102.
NIE Yixiong, PENG Xiangang, DAI Qiaoxu, et al. Improved FFT interpolation algorithm for harmonic measurement[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(9):91-102.
- [9] 李宁,左培丽,王新刚,等.基于改进DFT和时域准同步的间谐波检测算法[J]. 电力自动化设备,2017,37(4):170-178.
LI Ning, ZUO Peili, WANG Xingang, et al. Inter-harmonic detection based on improved DFT and time-domain quasi-synchronization[J]. Electric Power Automation Equipment,

- 2017,37(4):170-178.
- [10] 殷庆平,牛晓平.电力系统谐波测量中频谱泄漏问题的研究[J]. 工矿自动化,2007(4):28-30.
YIN Qingping, NIU Xiaoping. Research of the problem of spectrum leakage in harmonics measurement of power system[J]. Industry and Mine Automation, 2007(4):28-30.
- [11] 李振华,田 斌,胡蔚中,等.基于变步长原理的改进型高精度数字积分算法[J]. 电力系统自动化,2018,42(2):136-142.
LI Zhenhua, TIAN Bin, HU Weizhong, et al. Improved high-precision digital integral algorithm based on variable step principle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018,42(2): 136-142.
- [10] 孙 鹏,杨永越.五点加权FFT介质损耗角测量算法的研究[J]. 高压电器,2015,51(3):88-92.
SUN Peng, YANG Yongyue. Five-point weighted FFT for measurement of dielectric loss angle[J]. High Voltage Apparatus, 2015,51(3):88-92.
- [13] 曾 博,滕召胜.纳托尔窗改进FFT动态谐波参数估计方法[J]. 中国电机工程学报,2010,30(1):65-71.
ZENG Bo, TENG Zhaosheng. Improved FFT approach for the dynamic state estimation of harmonic parameters based on the Nuttall window[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 65-71.
- [14] 杨洪耕,惠 锦,侯 鹏.电力系统谐波和间谐波检测方法综述[J]. 电力系统及其自动化学报,2010,22(2):65-69.
YANG Honggeng, HUI Jin, HOU Peng. Detection methods of harmonics and inter-harmonics in power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2010, 22(2): 65-69.
- [15] 杨金涛,陈毅阳,段小华,等.基于改进DFT的电力系统同步相量测量算法研究[J]. 电工技术学报,2017,32(17):1-10.
YANG Jintao, CHEN Yiyang, DUAN Xiaohua, et al. Research on synchronous phasor measurement algorithm of power system based on improved DFT[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017,32(17):1-10.
- [16] 潘 文,钱俞寿,周 鸷.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(1):50-54.
PAN Wen, QIAN Yushou, ZHOU E. Power harmonics measurement based on windows and interpolated FFT (I) [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1994 (1): 50-54.
- [17] 陈国志,陈隆道,蔡忠法.基于Nuttall窗插值FFT的谐波分析方法[J]. 电力自动化设备,2011,31(4):27-31.
CHEN Guozhi, CHEN Longdao, CAI Zhongfa. Harmonic analysis based on Nuttall window interpolation FFT[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(4): 27-31.
- [18] 史丽萍,谢 强,马晓伟.基于五项MSD窗三谱线插值的高精度谐波分析算法[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(7):108-113.
SHI Liping, XIE Qiang, MA Xiaowei. High accuracy analysis of harmonic algorithm based on 5-term maximum-side-lobe-decay window and triple-spectrum-line interpolation [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 108-113.
- [19] 李剑飞,王 纲,陈隆道.一种基于迭代抑制谱泄漏的改进相位差算法[J]. 电测与仪表,2019,56(1):1-7.
LI Jianfei, WANG Gang, CHEN Longdao. An improved phase difference algorithm based on iteration of suppressing spectrum leakage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019,56(1):1-7.
- [20] 马也驰,陈隆道.应用于频率波动电网的改进相位差校正法[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(9):136-145.
MA Yechi, CHEN Longdao. An improved phase correction difference method applied to the power systems with frequency fluctuation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018,46(9):136-145.
- [21] 丁文浩,袁志民. Hanning窗在插值FFT算法中应用的研究[J]. 电测与仪表,2008,45(12):15-19.
DING Wenhao, YUAN Zhimin. Study on hanning window employed in interpolated FFT algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2008, 45(12): 15-19.
- [22] 周 俊,王小海,祁才君.基于Blackman窗函数的插值FFT在电网谐波信号分析中的应用[J]. 浙江大学学报(理学版),2006(6):650-653.
ZHOU Jun, WANG Xiaohai, QI Caijun. Estimation of electrical harmonic parameters by using the Interpolated FFT algorithm based on blackman window[J]. Journal of Zhejiang University(Science Edition), 2006(6): 650-653.
- [23] 周西峰,赵 蓉,郭前岗. Blackman-Harris窗的插值FFT谐波分析与应用[J]. 电测与仪表,2014,51(11):81-85.
ZHOU Xifeng, ZHAO Rong, GUO Qiangang. Blackman-Harris window based interpolation FFT harmonic analysis and its application[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2014, 51(11): 81-85.
- [24] 卿柏元,滕召胜,高云鹏,等.基于Nuttall窗双谱线插值FFT的电力谐波分析方法[J]. 中国电机工程学报,2008,28(25):153-158.
QING Baiyuan, TENG Zhaosheng, GAO Yunpeng, et al. An approach for electrical harmonic analysis based on Nuttall window double-spectrum-line interpolation FFT[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(25): 153-158.
- [25] 张鸿博,蔡晓峰,鲁改凤.基于双窗全相位FFT双谱线校正的电力谐波分析[J]. 仪器仪表学报,2015,36(12):2835-2841.
ZHANG Hongbo, CAI Xiaofeng, LU Gaifeng. Double-spectrum-line correction method based on double-window all-phase FFT for power harmonic analysis[J]. Chinese Journal

- withstand test schemes for 500 kV cables of Shibo station [J]. East China Electric Power, 2009, 37(11): 1902-1905.
- [16] 严鹏志, 蒋琛, 黄煊城, 等. 双电源励磁谐振在电缆耐压试验中的应用研究[J]. 电工电气, 2016(1): 4-7.
- YAN Pengzhi, JIANG Chen, HUANG Xuancheng, et al. Application research of double power excitation resonance in cable withstand voltage test[J]. Electrotechnics Electric, 2016(1): 4-7.
- [17] 朱占巍, 关首峰, 夏荣, 等. 长距离500 kV电缆线路交接试验研究及应用[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(3): 78-91.
- ZHU Zhanwei, GUAN Shoufeng, XIA Rong, et al. Study on the hand-over test and application of 500 kV power cable lines with long distance[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(3): 78-91.
- [18] 曹京荣, 陈杰, 周志成, 等. 长距离电力电缆多谐振系统耐压试验方法的优化[J]. 高电压技术, 2018, 44(5): 1692-1698.
- CAO Jingying, CHEN Jie, ZHOU Zhicheng, et al. Optimization of multiple resonance systems withstand voltage test method for long distance power cable[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1692-1698.
- [19] 熊俊, 张强, 马国明, 等. 大容量长距离交流XLPE电缆交接试验方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3727-3735.
- XIONG Jun, ZHANG Qiang, MA Guoming, et al. Commissioning test methods for large capacity and long-distance AC XLPE power cable[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3727-3735.
- [20] 电力电缆线路试验规程: Q/GDW 11316—2014[S]. 2014.
- Test code for power cables: Q/GDW 11316—2014[S]. 2014.
- [21] 额定电压500 kV($U_m=500$ kV)交联聚乙烯电力电缆及其附件, 第1部分: 试验方法和要求: Q/GDW 11655.1—2017[S]. 2017.
- Long AC submarine cables with cross-linked polyethylene insulation and their accessories for rated voltage of 500 kV ($U_m=500$ kV), Part 1: Test methods and requirements: Q/GDW 11655.1—2017[S]. 2017.
- 李乃一(1988—), 男, 博士, 工程师, 主要从事电力电缆状态检测工作(E-mail: li_naiyi@zj.sgcc.com.cn)。

(上接第246页)

- of Scientific Instrument, 2015, 36(12): 2835-2841.
- [26] 李媛, 王海云. 基于Nuttall窗三谱线插值的介损角测量方法[J]. 电测与仪表, 2018, 55(17): 15-20.
- LI Yuan, WANG Haiyun. A method of dielectric loss angle measurement based on Nuttall window with three spectral lines interpolation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(17): 15-20.
- [27] 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.
- 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.
- [28] 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]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 45(22): 9-15.
- 李振华(1986—), 男, 博士, 从事电力设备状态监测、电力系统谐波分析(E-mail: lizhenhua1993@163.com)。
- 胡廷和(1994—), 男, 硕士研究生, 从事变电站状态监测及电力系统谐波检测(E-mail: hutinghesxdx@163.com)。