

引用格式:朱孟,王学伟.有功功率测量 P-Sa 滤波器算法的研究[J].北京化工大学学报(自然科学版),2019,46(4):92-99.

ZHU Meng, WANG XueWei. P-Sa filter algorithms for active power measurements[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2019,46(4):92-99.

有功功率测量 P-Sa 滤波器算法的研究

朱 孟 王学伟*

(北京化工大学 信息科学与技术学院,北京 100029)

摘 要:针对电能表采样过程中非整周期采样造成的有功功率测量和电能计量误差,在传统滤波器功率测量算法基础上,首先提出了一种多项 Sa 函数自卷积窗函数(P-Sa 窗),分析了该窗的时频特性;然后基于该窗构造了 P-Sa 滤波器,仿真分析了非整周期采样下 P-Sa 滤波器的滤波效果;最后,基于工频正弦波形和 IEC62052 中的 5 种畸变波形测试信号,仿真分析了稳态和动态测试信号下不同有功功率测量算法对累计电能的误差。仿真结果表明,提出的 P-Sa 滤波器可以有效抑制纹波波动,提高了有功电能累计的准确性。

关键词:窗函数; P-Sa 滤波器; 有功功率测量; 非整周期采样; 电能累计

中图分类号: TM932 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2019.04.014

引 言

电能的准确计量关系到供电、配电企业及用户等多方的经济利益,人们对电能计量准确度的要求越来越高^[1],其中有功功率测量准确度直接关系到电能计量的准确度。随着电力技术和信息技术的发展,一方面,分布式发电设备如风能、太阳能和非线性用电设备如汽车充电桩、电力机车等并入电网,导致电压电流信号产生畸变,电流大小呈现动态变化^[2-3],使得输入的瞬时功率信号产生动态的波动;另一方面,受硬件条件的限制,非整周期采样不可避免的存在于电能表电压电流信号的采样中^[4]。信号源的畸变以及动态波动和非整周期采样的限制影响了电能表有功功率的测量甚至电能计量的准确性,因此,对于电能表有功功率测量算法的研究一直是国内外学者研究的重点。

目前的功率测量算法主要是通过构造滤波器来实现的^[5]。频域分析方面,文献[6-8]采用加窗,如矩形窗、Hamming 窗、Blackman 窗以及改进的窗函数进行快速傅立叶变换(FFT)分析,提高了频谱分析精度,所以更适用于频谱分析,但该方法会造成

频谱泄露和衰减,同时针对畸变信号和动态信号,这些窗难以同时满足主瓣能量集中和旁瓣衰减快的要求,不适用于有功功率的测量。时域分析方面,准同步算法及其改进算法提高了测量的准确度,但缺点是硬件开销加大,不适用于电能表集成情况^[9-10]。时域分析上点集合算法计算量小,易龙强等^[11]对点集合算法进行了改进,提高了测量的准确度,但依然受到整周期采样的限制;俞集辉等^[12]通过分析非整周期采样下的谐波功率时域和频域计算方法,仿真了非整周期采样造成的畸变波形有功功率测量误差。

以上文献主要通过 FFT 算法分析研究了畸变信号时频特性、整周期采样下的功率、固定参量的电能测量算法及非整周期采样下的谐波功率测量误差,但对如何在非整周期采样下提高有功功率滤波效果和电能累计准确度,研究较为缺乏。

本文基于窗函数和电能表有功功率测量结构化模型构造了一种新的有功功率滤波器,仿真分析了非整周期采样下该滤波器的滤波效果,针对稳态和动态测试信号仿真计算了不同有功功率测量算法下电能累计的误差,以期对电能表的改进提供参考。

1 多项 Sa 函数自卷积窗构建

1.1 多项 Sa 函数

多项 Sa 函数的一般形式是 K 个相继间隔为 T 的 Sa 函数之和,其时域表达式为

收稿日期:2018-11-06

第一作者:男,1993年生,硕士生

*通信联系人

E-mail: wangxw@mail.buct.edu.cn

$$w_{\text{Sa}}(t) = \sum_k^K \alpha_k \frac{\sin \frac{\pi}{T}(t - kT)}{\frac{\pi}{T}(t - kT)} \quad (1)$$

频谱函数可表示为

$$W_{\text{Sa}}(\omega) = \begin{cases} T \sum_k^K \alpha_k e^{-j\omega kT} & |\omega| \leq \frac{\pi}{T} \\ 0 & |\omega| > \frac{\pi}{T} \end{cases} \quad (2)$$

式中, α_k 为每项 Sa 函数的加权系数。从频谱函数可以看出, 多项 Sa 函数的频率响应全部集中在 $[-\pi/T, \pi/T]$ 区间内, 当多项 Sa 函数的加权系数 $\alpha_0 = 1$ 、其他加权系数为零时, 则为单项 Sa 函数。

1.2 离散多项 Sa 函数窗

将连续的多项 Sa 函数离散化, 并用矩形窗截短, 得到有限长的多项 Sa 函数 (polynomial Sa, P-Sa) 窗, 形式如下

$$w(n) = \sum_k^K \alpha_k \frac{\sin \frac{\pi}{T}(n - kT)}{\frac{\pi}{T}(n - kT)} \quad (3)$$

$$w_{\text{P-Sa}}(n) = w(n) R_N(n) = \begin{cases} w(n), & n = 0, 1, 2, \dots, N-1 \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

式中, $w(n)$ 为离散的多项 Sa 函数, $w_{\text{P-Sa}}(n)$ 为截短得到的窗函数, N 是窗函数的长度, $R_N(n)$ 是长度为 N 的矩形窗。由频域复卷积公式可以得到 P-Sa 窗函数的频域表达式

$$W_{\text{P-Sa}}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} W_{\text{Sa}}(\theta) W_{\text{R}}(\omega - \theta) d\theta = W_{\text{Sa}}(\omega) * W_{\text{R}}(\omega) \quad (5)$$

式中, $W_{\text{Sa}}(\omega)$ 为多项 Sa 函数的频域特性; $W_{\text{R}}(\omega)$ 为矩形窗的频域特性, 且满足 $W_{\text{R}}(\omega) = \sin\left(\frac{\omega N}{2}\right) / \frac{\omega}{2}$ 。

1.3 P-Sa 自卷积窗

根据卷积运算理论, 由离散化的长度为 N' 的两项 P-Sa 窗卷积可以得到新窗的长度为 $2N' - 1$ 。在自卷积窗末尾补零可以得到长度为 $2N'$ 的 P-Sa 自卷积窗为

$$w_{\text{P-Sa}}^2(n) = w_{\text{P-Sa}}(n) * w_{\text{P-Sa}}(n) \quad (6)$$

由卷积定理可得, $w_{\text{P-Sa}}^2(n)$ 窗的频域表达式为

$$W_{\text{P-Sa}}^2(\omega) = \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} W_{\text{Sa}}(\theta) W_{\text{R}}(\omega - \theta) d\theta \right] \left[\frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} W_{\text{Sa}}(\theta) W_{\text{R}}(\omega - \theta) d\theta \right]^2$$

$$\left[\int_{-\pi}^{\pi} W_{\text{Sa}}(\theta) W_{\text{R}}(\omega - \theta) d\theta \right] = [W_{\text{Sa}}(\omega) * W_{\text{R}}(\omega)]^2 \quad (7)$$

式(7)表明自卷积窗的窗函数在主瓣越窄的情况下, 旁瓣衰减越快, 卷积后的旁瓣衰减更优。

2 P-Sa 自卷积窗频域特性分析

经验表明, 3 项 Sa 函数窗在加权系数比为 1:2:1 时具有较好的旁瓣衰减特性, $w_{\text{P-Sa}}(n)$ 的表达式为

$$w_{\text{P-Sa}}(n) = \sum_{k=-1}^1 \alpha_k \frac{\sin \frac{\pi}{T}(n - kT)}{\frac{\pi}{T}(n - kT)}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, N' - 1, [\alpha_{-1} \quad \alpha_0 \quad \alpha_1] = [0.25 \quad 0.5 \quad 0.25] \quad (8)$$

式中, $[\alpha_{-1} \quad \alpha_0 \quad \alpha_1]$ 为三项 Sa 函数窗的加权系数, N' 为窗长度, 且满足 $N' = 2^i$; i 为正整数; Sa 函数的相继间隔时长 $T = N'/4$ 。由 $N' = 64$ 的三项 Sa 函数窗构造 P-Sa 自卷积窗, 构造后的窗长度 $N = 128$ 。对比 P-Sa 自卷积窗与矩形窗、Hamming 以及 Blackman 窗的时域波形和频域响应如图 1 所示。

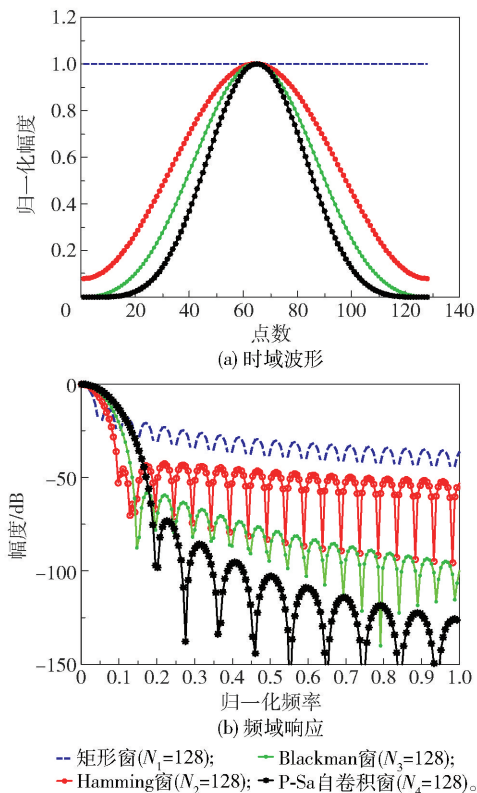


图1 不同窗函数的时域波形和频域响应

Fig. 1 Function waveforms and frequency responses of different window functions

从图 1(b) 中可以看出, 矩形窗旁瓣衰减幅度最

小,Hamming 窗旁瓣衰减速度较慢,Blackman 窗旁瓣衰减幅度较大,P-Sa 自卷积窗的旁瓣衰减幅度和速度均为最大。

3 P-Sa 滤波器有功功率测量算法

3.1 电能表有功功率测量结构化模型

智能电能表的有功功率测量结构化模型如图 2 所示。有功功率测量过程为:利用电压分压器和电流互感器(分流器)采集负载电压信号 $u(t)$ 和电流信号 $i(t)$,将模/数(ADC)转化后采集到的离散电压通道和电流通道信号经数字乘法器相乘得到瞬时功率信号,再由低通滤波器(LPF)对瞬时功率信号滤波得到有功功率信号。有功功率信号作为电能表有功功率测量部分的输出,同时也是电能累计单元的输入,电能累计单元将有功功率信号进行数频转换后得到电能脉冲,再通过累计输出电能脉冲实现电能计量。

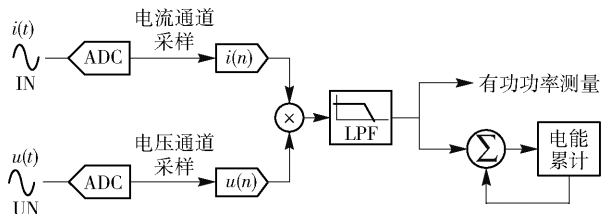


图 2 智能电能表有功功率测量结构化模型

Fig. 2 Structural model of active power measurements with a smart meter

采集到的负载电压 $u(t)$ 和负载电流 $i(t)$ 信号的数学表达式为

$$u(t) = \sum_{m=1}^{\infty} U_m \sin(2\pi m f_0 t + \varphi_m) \quad (9)$$

$$i(t) = v(t) \sum_{m'=1}^{\infty} I_{m'} \sin(2\pi m' f_0 t + f_{m'}) \quad (10)$$

式(9)、(10)中的电压、电流信号均包含基波和多次谐波; $m, m' = 1$ 时表示基波信号参数, $m, m' \neq 1$ 时表示各次谐波信号参数; U_m 为基波电压和各次谐波电压的幅值; $I_{m'}$ 为基波电流和各次谐波电流的幅值; f_0 为基波频率,取值 50 Hz; φ_m 为电压基波信号和各次谐波信号的初相位; $v(t)$ 为包络信号, $v(t) = 1$ 时 $i(t)$ 为稳态电流信号, $v(t)$ 为正弦包络、梯形包络^[13-14]及 OOK 包络信号^[3]时, $i(t)$ 为动态电流信号。其中正弦包络信号 $v_1(t)$ 表达式为

$$v_1(t) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} m_A \sin(2\pi f_1 t) \quad (11)$$

式中, f_1 为正弦调幅信号的频率; m_A 为调幅系数,由

于 $v(t) \geq 0$,故 $|m_A| \leq 1$ 。

符号函数 $\text{sgn}(t)$ 可通过阶跃信号表示为

$$\text{sgn}(t) = \begin{cases} 1, & t > 0 \\ -1, & t \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

梯形包络信号 $v_2(t)$ 的表达式为

$$v_2(t) = \sum_{i=0}^7 [\alpha_i + \beta_i(t - t_i)] \left[\frac{1 + \text{sgn}(t - t_i)}{2} \right] \left[\frac{1 - \text{sgn}(t - t_{i+1})}{2} \right] \quad (13)$$

式(13)中, $\text{sgn}(t)$ 为符号函数; α_i, β_i 为不同时间段内线性函数的参数,满足 $0 \leq \alpha_i \leq 1$; t_i 为包络幅度阶梯变化时间点。通过符号函数来截取不同时段内的线性函数 $\alpha_i + \beta_i(t - t_i)$,分段的线性函数组成了梯形包络函数 $v_2(t)$ 。文中后续仿真的梯形包络参数取值如表 1 所示。

表 1 梯形包络函数参数

Table 1 Trapezoidal envelope function parameters

i	t_i/s	α_i	β_i
0	0	0	25/3
1	0.06	0.5	0
2	0.12	0.5	25/3
3	0.18	1	0
4	0.24	1	-25/3
5	0.30	0.5	0
6	0.36	0.5	-25/3
7	0.42	0	0
8	0.48	—	—

OOK 包络信号 $v_3(t)$ 的表达式为

$$v_3(t) = \begin{cases} 1, & 0 \leq t < T_{\text{on}} \text{ (电流信号通)} \\ 0, & T_{\text{on}} \leq t < T_{\text{on}} + T_{\text{off}} \text{ (电流信号断)} \end{cases} \quad (14)$$

式中 T_{on} 为电流通的时长, T_{off} 为电流断的时长。

负载信号经过 AD 转化采样后得到离散的电压和电流信号,表达式为

$$u(n) = \sum_{m=1}^M U_m \sin(2\pi m f_0 n / f_s + \varphi_m) \quad (15)$$

$$i(n) = v(n) \sum_{m'=1}^M I_{m'}(n) \sin(2\pi m' f_0 n / f_s + \phi_{m'}) = v(n) i'(n) \quad (16)$$

式中, f_s 为采样频率, n 为离散采样点数, M 为采样得到的最高次谐波, $\phi_{m'}$ 为电流基波信号和各次谐波信号的初相位。

3.2 瞬时功率测试信号建模

瞬时功率测试信号 $p_i(n)$ 的表达式为

$$p_i(n) = u(n)i'(n)v(n) \quad (17)$$

式中, $v(n)$ 为包络信号, $v(n) = 1$ 时 $p_i(n)$ 为稳态功率测试信号, $v(n)$ 为正弦包络、梯形包络及 OOK 包络信号时, $p_i(n)$ 为动态功率测试信号; $u(n)$ 、 $i'(n)$ 分别为稳态电压、稳态电流信号。本文仿真的稳态测试信号波形为 IEC62052 标准中规定的 5 种畸变波形和 50 Hz 工频正弦波形, 5 种畸变波形分别为平顶波、尖顶波、脉冲波、多个电流过零点波和多个电压过零点波。

3.3 P-Sa 滤波器设计

有功功率滤波器结构化模型如图 3 所示, 瞬时功率信号 $p_i(n)$ 经过低通滤波器输出 $p_o(n)$, $p_o(n)$ 即为有功功率。

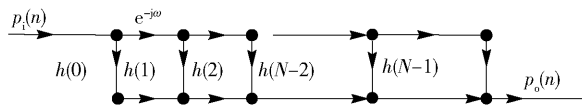


图3 有功功率滤波结构化模型

Fig. 3 Structural model of the active power filter

$$e_o = \sum_{n=1}^{n'+N-1} p_o(n) T_s = \left[\sum_{n=1}^{n'} \left(\sum_{k=0}^{N-1} p_i(n-k) h(N-1-k) \right) + \sum_{n=n'+1}^{n'+N-1} p_o(n) \right] T_s = [p_i(1)h(N-1) + p_i(2)h(N-1) + p_i(1)h(N-2) + \cdots + p_i(N)h(N-1) + p_i(N-1)h(N-2) + \cdots + p_i(1)h(0) + \sum_{n=N+1}^{n'} \left(\sum_{k=0}^{N-1} p_i(n-k) h(N-1-k) \right) + p_i(n')h(N-2) + p_i(n'-1)h(N-3) + \cdots + p_i(n'-N)h(0) + \cdots + p_i(n')h(0)] T_s \quad (20)$$

由于滤波后对有功功率累计得到的电能与输入瞬时功率信号的理论有功电能相等, 即 $e_i = e_o$, 故可得

$$\sum_{n=1}^{n'} p_i(n) T_s = \sum_{n=1}^{n'} \left(\sum_{k=0}^{N-1} p_i(n-k) h(N-1-k) \right) T_s + \sum_{n=n'+1}^{n'+N-1} p_o(n) T_s = \left[h(N-1) \sum_{n=1}^{n'} p_i(n) + h(N-2) \sum_{n=1}^{n'} p_i(n) + \cdots + h(0) \sum_{n=1}^{n'} p_i(n) \right] T_s = \sum_{k=0}^{N-1} h(k) \left[\sum_{n=1}^{n'} p_i(n) T_s \right] \quad (21)$$

由式(21)可知, 滤波器系数需要满足 $\sum_{k=0}^{N-1} h(k) = 1$ 。基于此结论, 通过 P-Sa 自卷积窗构造滤波器, 得到 P-Sa 滤波器的表达式为

$$h_{P-Sa}(n) = \frac{1}{\sum_{n''=0}^{N-1} w_{P-Sa}^2(n'')} \sum_k^K \alpha_k \frac{\sin \frac{\pi}{T}(n-kT)}{\frac{\pi}{T}(n-kT)} *$$

若滤波器输入信号 $p_i(n)$ 的长度为 n' , 则经过低通滤波器后输出的有功功率信号 $p_o(n)$ 为

$$p_o(n) = p_i(n)h(N-1) + p_i(n-1)h(N-2) + \cdots + p_i(n-N+1)h(0) = \sum_{k=0}^{N-1} p_i(n-k)h(N-1-k) \\ p_o(n'+1) = p_i(n')h(N-2) + p_i(n'-1)h(N-3) + \cdots + p_i(n'-N+2)h(0) \\ p_o(n'+2) = p_i(n')h(N-3) + p_i(n'-1)h(N-4) + \cdots + p_i(n'-N+3)h(0) \\ \vdots \\ p_o(n'+N-1) = p_i(n')h(0) \quad (18)$$

当输入信号 $p_i(n)$ 长度为 n' 时, 输入信号的理论有功电能为

$$e_i = \int_0^{T'} p(t) dt \approx \sum_{n=1}^{n'} p_i(n) T_s \quad (19)$$

式中, T_s 为采样间隔时长, T' 为输入瞬时功率信号的时长。经有功功率滤波器滤波之后, 累加有功功率信号 $p_o(n)$ 得到有功电能

$$\sum_k^K \alpha_k \frac{\sin \frac{\pi}{T}(n-kT)}{\frac{\pi}{T}(n-kT)} \quad (22)$$

式(22)中, $\sum_{n''=0}^{N-1} w_{P-Sa}^2(n'')$ 表示对长度为 N 的 P-Sa 自卷积窗求和。

4 仿真分析

4.1 测试信号仿真参数

3.2 节中的稳态基波和 5 种畸变波形瞬时功率信号的归一化波形如图 4 所示。仿真参数如表 2 所示。

以平顶波为例, 通过仿真得到动态瞬时功率测试信号归一化波形如图 5 所示。

图 4 中的瞬时功率波形为稳态测试信号, 图 5 中的动态测试信号由正弦包络、梯形包络和 OOK 包络对稳态测试信号调制得到, 稳态和动态测试信号作为后续误差仿真的输入信号。

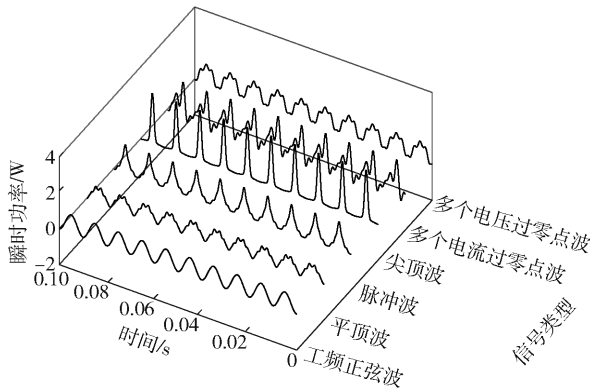


图4 基波及畸变波瞬时功率波形

Fig. 4 Instantaneous power waveforms of fundamental and distortion waves

表2 测试信号仿真条件
Table 2 Simulation conditions of test signals

测试条件	参数值
正弦包络频率/Hz	5
正弦包络调幅系数 m_A	1
OOK 包络通断比	2:2
基波电压	归一化为 1
基波电流	归一化为 1
基波信号频率/Hz	50
采样频率/Hz	3 300
功率因数	1

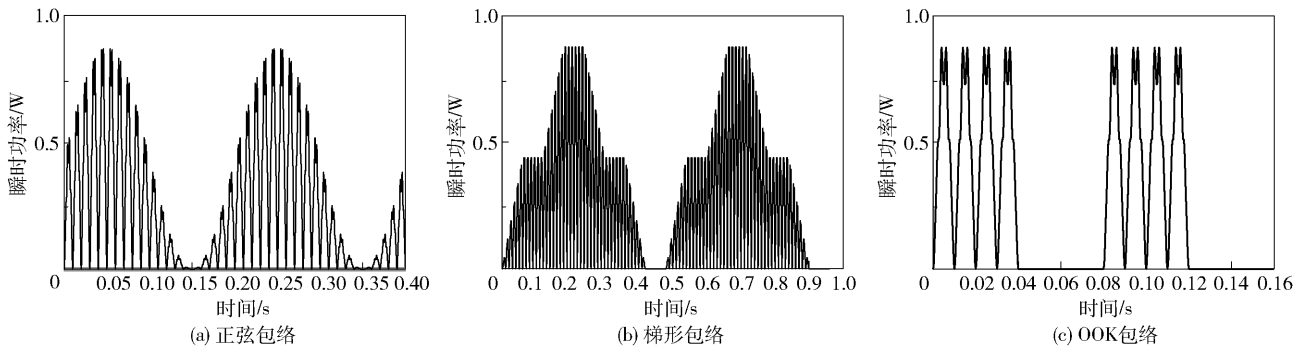


图5 平顶波动态瞬时功率测试信号波形

Fig. 5 Quadriform wave dynamic instantaneous power test signal waveform

4.2 有功功率滤波效果

工频正弦波形及 5 种畸变波形的有功功率理论值表达式为

$$P = \sum_{m=1}^M U_m I_m \cos \theta_m \tag{23}$$

式中, $\theta_m = \varphi_m - \phi_m$, 非整周期采样时, 瞬时功率经有功功率滤波器滤波后会产生纹波波动。P-Sa 滤波器由长度为 64 的三项 Sa 函数窗自卷积后再乘以加权系数构造, 构造的 P-Sa 滤波器长度 $N = 128$, 响应时长为 N/f_s 。对于时长大于 $2N/f_s$ 的瞬时功率信号, 其有功功率 $P_o(n)$ 在 $N \sim 2N$ 点内的纹波波动 ε_p 大小可表示为

$$\varepsilon_p = \{ \max [P_o(N), P_o(N+1), \dots, P_o(N+N-1)] - \min [P_o(N), P_o(N+1), \dots, P_o(N+N-1)] \} / P \times 100\% \tag{24}$$

以平顶波为例, 设不同滤波器仿真采样频率均为 3 300 Hz, 滤波器长度均为 128, 通过仿真得到其瞬时功率和经不同滤波器滤波后的有功功率波形如图 6 所示。从图中可以发现, 在非整周期采样下, 矩

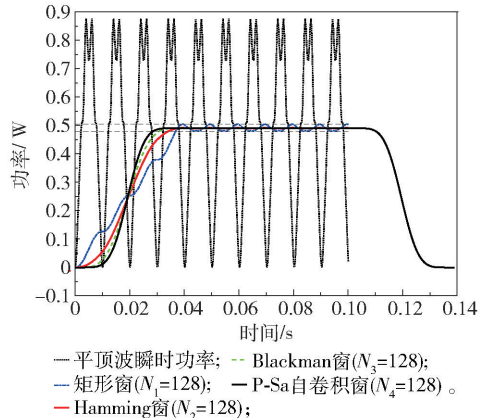


图6 平顶波瞬时功率及有功功率滤波形

Fig. 6 Quadriform wave instantaneous power and active power waveform

形窗算法有功功率测量纹波波动最大, 达到 5.07%; Hamming 窗和 Blackman 窗滤波后的纹波波动分别为 0.42% 和 0.09%; 而 P-Sa 自卷积滤波器滤波后波动最小, 为 0.02%, 比矩形窗滤波效果提升 252 倍, 比 Hamming 窗提升 21 倍, 比 Blackman 窗

提升 4.5 倍。

4.3 测试信号有功功率累计电能误差

电能表通过累计有功功率来计量电能,电能累计误差表达式为

$$\varepsilon_e = \frac{e_o - e_i}{e_i} \times 100\%$$

(25)

式中, e_i 为滤波前输入信号的理论有功电能, e_o 为采用不同的测试信号通过不同的有功功率算法滤波后的电能。累计误差如表 3~6 所示。表 3 为稳态测试信号,稳态仿真时长 10.00 s;表 4 为正弦包络动态测试信号,仿真时长 2.10 s;表 5 为梯形包络动态

表 3 稳态波形不同功率算法的电能计量误差

Table 3 Energy measurement errors for steady-state waveforms with different power algorithms

波形	电能误差			
	矩形窗	Hamming 窗	Blackman 窗	P-Sa 自卷 积窗
50 Hz 基波	-1.90 ×	-1.90 ×	-1.90 ×	-5.89 ×
	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻¹²
平顶波	-1.90 ×	-1.90 ×	-1.90 ×	-4.18 ×
	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻¹²
尖顶波	-1.90 ×	-1.90 ×	-1.90 ×	1.08 ×
	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻¹¹
脉冲波	-1.90 ×	-1.90 ×	-1.90 ×	5.15 ×
	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻¹¹
多个电流过	-2.00 ×	-2.00 ×	-2.00 ×	2.11 ×
零点波	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻⁸
多个电压过	-1.90 ×	-1.90 ×	-1.90 ×	7.03 ×
零点波	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻⁹

表 4 正弦包络不同功率算法的电能计量误差

Table 4 Energy measurement errors for sinusoidal envelopes with different power algorithms

波形	电能误差			
	矩形窗	Hamming 窗	Blackman 窗	P-Sa 自卷 积窗
50 Hz 基波	-1.24 ×	-1.20 ×	-1.19 ×	5.09 ×
	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻¹⁴
平顶波	-1.24 ×	-1.20 ×	-1.19 ×	4.03 ×
	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻¹³
尖顶波	-1.24 ×	-1.20 ×	-1.19 ×	1.19 ×
	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻¹⁰
脉冲波	-1.24 ×	-1.20 ×	-1.19 ×	5.61 ×
	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻¹¹
多个电流过	-1.25 ×	-1.21 ×	-1.20 ×	9.39 ×
零点波	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻⁸
多个电压过	-1.24 ×	-1.20 ×	-1.19 ×	3.19 ×
零点波	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻⁸

表 5 梯形包络不同功率算法的电能计量误差

Table 5 Energy measurement errors for trapezoidal envelopes with different power algorithms

波形	电能误差			
	矩形窗	Hamming 窗	Blackman 窗	P-Sa 自卷 积窗
50 Hz 基波	-7.60 ×	-7.60 ×	-7.60 ×	-1.62 ×
	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻¹²
平顶波	-7.60 ×	-7.60 ×	-7.60 ×	3.13 ×
	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻¹²
尖顶波	-7.60 ×	-7.60 ×	-7.60 ×	1.04 ×
	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻¹⁰
脉冲波	-7.60 ×	-7.60 ×	-7.60 ×	4.65 ×
	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻¹¹
多个电流过	-7.70 ×	-7.70 ×	-7.70 ×	8.27 ×
零点波	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻⁸
多个电压过	-7.60 ×	-7.60 ×	-7.60 ×	2.77 ×
零点波	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻³	10 ⁻⁸

表 6 OOK 包络不同功率算法的电能计量误差

Table 6 Energy measurement errors for OOK envelopes with different power algorithms

波形	电能误差			
	矩形窗	Hamming 窗	Blackman 窗	P-Sa 自卷 积窗
50 Hz 基波	-1.61 ×	-1.62 ×	-1.62 ×	8.15 ×
	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻¹³
平顶波	-1.61 ×	-1.62 ×	-1.62 ×	-9.02 ×
	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻¹³
尖顶波	-1.61 ×	-1.62 ×	-1.62 ×	2.17 ×
	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻¹⁰
脉冲波	-1.61 ×	-1.62 ×	-1.62 ×	1.04 ×
	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻¹⁰
多个电流过	-1.64 ×	-1.64 ×	-1.64 ×	1.76 ×
零点波	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻⁷
多个电压过	-1.62 ×	-1.62 ×	-1.62 ×	5.88 ×
零点波	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻²	10 ⁻⁸

测试信号,仿真时长 5.04 s;表 6 为通断比 20:20 时的 OOK 动态测试信号,仿真时长 2.00 s。

从表 3~6 可以发现,基于矩形窗、Hamming 窗和 Blackman 窗 3 种算法测量的累计电能都小于实际电能,最大仿真误差达到 -1.64×10^{-2} ,而本文算法的最大仿真误差不超过 1.76×10^{-7} ,显著提高了有功电能计量的准确性。

4.2 节和 4.3 节的仿真结果表明,P-Sa 自卷积窗具有较好旁瓣衰减效果,有效抑制了非整周期采样下有功功率的纹波波动;同时该算法能有效测量

稳态测试信号和动态测试信号的有功功率,电能测量更加准确。

5 结论

提出一种 P-Sa 自卷积窗函数,并根据该窗构造了 P-Sa 滤波器,仿真结果表明:P-Sa 自卷积窗具有很好的旁瓣衰减特性;P-Sa 滤波器能有效抑制非整周期采样下有功功率的纹波波动;利用 P-Sa 滤波器测量有功功率能显著提高有功电能计量的准确性。本文研究结果为电能表非整周期采样下有功功率的测量以及电能的准确计量提供了改进的方向。

参考文献:

- [1] CZARNECKI L S. Comments on active power flow and energy accounts in electrical systems with nonsinusoidal voltage and asymmetry[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3): 1244-1250.
- [2] 陆祖良,王磊,李敏. 对电能表动态测量功能评价的讨论[J]. 电测与仪表, 2010, 47(4): 1-4.
LU Z L, WANG L, LI M. Discussion for evaluation of dynamic measurement function of electric energy meter[J]. Electric Measuring & Instrumentation, 2010, 47(4): 1-4. (in Chinese)
- [3] WANG X W, CHEN J X, YUAN R M, et al. OOK power model based dynamic error testing for smart electricity meter[J]. Measurement Science & Technology, 2017, 28(2): 025015.
- [4] 吴静,赵伟. 非整周期采样下电功率测量的误差分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(7): 1197-1199.
WU J, ZHAO W. Error analysis for electric power measurement with non-integer-period sampling[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology), 2006, 46(7): 1197-1199. (in Chinese)
- [5] 肖勇,赵伟,罗睿希,等. 数字化电能计量算法综述[J]. 电测与仪表, 2018, 55(7): 1-7.
XIAO Y, ZHAO W, LUO R X, et al. Survey of digital energy measurement algorithms[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(7): 1-7 (in Chinese)
- [6] WEN H, ZHANG J H, MENG Z, et al. Harmonic estimation using symmetrical interpolation FFT based on triangular self-convolution window[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 11(1): 16-26.
- [7] 邱伟,唐求,唐璐,等. 基于准同步序列重构的非稳态电力谐波分析[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 456-464, 676.
- [8] 高云鹏,滕召胜,卿柏元. 基于 Kaiser 窗双谱线插值 FFT 的谐波分析方法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(2): 287-292.
GAO Y P, TENG Z S, QING B Y. Harmonic analysis based on Kaiser window double spectrum line interpolation FFT[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2010, 31(2): 287-292. (in Chinese)
- [9] 戴先中. 准同步采样及其在非正弦功率测量中的应用[J]. 仪器仪表学报, 1984(4): 55-61.
DAI X Z. The quasisynchronous sampling and its application in the measurement of nonsinusoidal power[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 1984(4): 55-61. (in Chinese)
- [10] 王康,滕召胜,陈继斌,等. 基于时域准同步的介损角快速测量算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 873-881.
WANG K, TENG Z S, CHEN J B, et al. A fast dielectric loss angle measurement algorithm based on the time-domain quasi-synchronous sampling technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 873-881. (in Chinese)
- [11] 易龙强,宋慧娜,陈金玲. 复化 Newton-Cotes 积分算法在电能计量中的应用[J]. 电测与仪表, 2010, 47(10): 15-20.
YI L Q, SONG H N, CHEN J L. The application of compound Newton-Cotes integral algorithm to energy measurement[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2010, 47(10): 15-20. (in Chinese)
- [12] 俞集辉,刘金强,郑可,等. 非整周期采样谐波有功功率计量的时频域分析[J]. 计算机仿真, 2011, 28(1): 307-310.
YU J H, LIU J Q, ZHENG K, et al. Analysis for harmonic active power measurement with non-integer period sampling in time-frequency domain[J]. Computer Simulation, 2011, 28(1): 307-310. (in Chinese)
- [13] 王学伟,温丽丽,袁瑞铭,等. 智能电能表动态误差确定型测试激励信号的讨论[J]. 电测与仪表, 2014, 51(4): 1-7.
WANG X W, WEN L L, YUAN R M, et al. Discussion of definitive test excitation signals for dynamic error of intelligent electric meter[J]. Electrical Measurement &

- Instrumentation, 2014, 51(4): 1–7. (in Chinese)
- [14] 张永旺, 朱孟, 王学伟, 等. 畸变波形动态测试信号模型及电能表动态误差分析[J]. 电测与仪表, 2018, 55(12): 92–99.

ZHANG Y W, ZHU M, WANG X W, et al. Distortion waveform dynamic test signal model and dynamic error analysis of smart meter[J]. Electrical Measurement & Instrument, 2018, 55(12): 92–99. (in Chinese)

P-Sa filter algorithms for active power measurements

ZHU Meng WANG XueWei *

(College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: As a consequence of the use of distributed generation equipment and non-linear electrical equipment, the load signal in a smart grid exhibits distortion and dynamic characteristics. Simultaneously, non-integer-period sampling is inevitable in the process of sampling of smart meters, which results in errors in active power measurements and energy accumulation. Based on the traditional filter power measurement algorithm, a polynomial Sa function self-convolution window (P-Sa window) is proposed, and the time-frequency characteristics of the window are analyzed. Subsequently, based on the window, a P-Sa filter is constructed, and the filtering effect of the P-Sa filter is simulated and analyzed under non-integer-period sampling. Finally, the active power accumulation with different active power measurement algorithms is simulated and analyzed for steady and dynamic test signals based on power frequency sinusoidal waveforms and five kinds of distortion waveform test signals in IEC62052. The results show that the proposed P-Sa filter can effectively suppress ripple fluctuations and improve the accuracy of active energy accumulation.

Key words: window function; P-Sa filter; active power measurement; non-integral sampling; energy accumulation

(责任编辑:汪 琴)