

智能电能表有功电能动态测量的 SDPA 算法

陈景霞^{1,2)}, 王学伟¹⁾✉, 朱 孟¹⁾

1)北京化工大学信息科学与技术学院,北京 100029 2)北京联合大学应用科技学院,北京 100101

✉通信作者, E-mail: wangxw@mail.buct.edu.cn

摘要 风能、太阳能等间歇式能源的引入和工业生产中大功率动态负载的增加,使得智能电网电力负荷越来越多呈现出大范围随机频繁波动的特点。动态负荷的增加对智能电能表的有功电能测量带来新挑战。传统的测量算法是针对稳态负荷而提出,因此无法解决智能电能表动态计量性能的改善问题。本文在传统 MA (moving average) 算法的基础上提出一种 SDPA (segmented dot product accumulation) 动态有功电能测量算法,该算法可在一定程度上减小动态功率条件下的测量误差。首先,分别讨论了传统 MA 和 IIR (infinite impulse response) 滤波器算法的动态响应速度和动态电能误差特性,指出两种算法对动态输入信号测量的局限性,并理论分析了影响各自动态计量性能的因素。以此为基础,提出智能电能表有功电能动态测量的 SDPA 算法,通过将待测的动态功率信号按周期截短、分段执行点积运算、并累加求和的方式实现动态测量。另外,通过按周期抽取的算法实现方式可以大大减少存储空间、提高运行速度。理论和仿真结果表明,与传统 MA 和 IIR 滤波器相比,SDPA 算法在动态响应时间为一个基波周期的前提下,动态电能测量可达到较低误差水平。

关键词 智能电能表; 动态测量; 动态有功电能; 动态有功功率; 动态响应速度; 动态误差特性

分类号 TG142.71

SDPA algorithm for dynamic active energy metering of a smart electricity meter

CHEN Jing-xia^{1,2)}, WANG Xue-wei¹⁾✉, ZHU Meng¹⁾

1) College of Information Science & Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China

2) Applied Science and Technology College, Beijing Union University, Beijing 100101, China

✉ Corresponding author, E-mail: wangxw@mail.buct.edu.cn

ABSTRACT The power load of the smart grid fluctuates increasingly high and rapidly because of the introduction of intermittent energy, such as wind energy and solar energy. As a result, the increase of the randomly fluctuating load in the smart grid brings new challenges to the active power measurement of smart electricity meters. However, the installed power meter and the standard electricity meter are designed for a steady input signal. The traditional MA (moving average) and IIR (infinite impulse response) measurement algorithms are proposed for the steady situation and are thus not suitable to address the dynamic error testing and metering problems. Moreover, although some harmonic experiments have been performed that provide an overview of domestic and internal standards of electricity energy meter, there is a lack dynamic characteristics in them. Thus, it is of great theoretical significance and application value to study the dynamic measurement characteristics of the existing smart electricity meters and propose an effective dynamic measurement to improve the metering dynamic performance. To reduce the measurement error of a smart electricity meter under dynamic load power conditions, a SDPA algorithm for dynamic active energy measurement was proposed in this work. First, the dynamic response speed and dynamic error characteristics of active power of traditional MA and IIR low pass filter algorithm were deduced. Next, the limitations of the two algorithms for dynamic input signal were highlighted, and the influence factors were determined by theoretical analysis. Based on these results, a SDPA algorithm for dynamic measurement of smart electricity meter was proposed. The new algorithm was implemented by truncating periodically, executing piecewise point product operation and summing up the active power. In addition, the

implementation method by decimation can save storage space and improve the operation speed. The theoretical and simulation results show that the SDPA algorithm can reach a lower error level in one period of response time.

KEY WORDS smart electricity meter; dynamic measurement; dynamic active energy; dynamic active power; dynamic response speed; dynamic error characteristics

随着风能、太阳能等间歇式能源的大量引入,以及工业生产中大容量动态负载的增加,智能电网中电力负荷越来越多呈现出频繁、快速波动的特性^[1-2]. 智能电能表作为电量计费结算的重要设备,必须具有良好的动态性能,才能实现准确合理的电能计量、保证电能供需双方的经济利益. 然而,无论是安装式电能表还是标准电能表,其内部计量算法仅针对稳态输入信号设计. 同时,用于电能表鉴定的评价大纲以及国内外标准,虽然包括了一些谐波实验,但是缺少对动态特性的规定. 因此,研究现有智能电能表的动态计量特性,进而提出有效的动态测量算法,对减少电能表动态误差,提高电能表性能具有重要的理论意义和应用价值.

智能电能表的计量特性与两个因素有关:(1) 被测对象所面临的客观条件等外部因素;(2) 反映电能表本身固有特性的测量算法或模型等内部因素. 因此,目前关于电能表计量特性的研究主要围绕着如何检测和改善电能表在不同外部条件下的电能计量误差这两个方面展开. 针对检测计量误差,国内外研究学者积累了丰富的经验和研究成果,如分析了谐波条件下电能计量误差^[3-5],研究了电流波动对电能计量的影响^[6],通过搭建专门的实验条件考察了不同电能表在包络工频信号条件下的动态误差特性^[7],构建了电能表动态误差测试信号模型和动态误差测试的方法,实现了动态功率条件下的标准电能量值的间接测量^[8-12]. 针对如何提高计量准确度,国内外专家学者也取得了诸多研究成果,如提出了消除或减小正弦和非正弦周期信号非同步误差的措施^[13-17],应用多种快速傅里叶变换改进算法和加窗插值算法改善谐波和间谐波条件下的计量精度^[18-23],应用线谱估计算法或泛函级数对基波频率变化的信号进行频域或时域分析等^[24-25]. 然而,目前公开发表的文献在提高电能表性能方面还存在以下不足:

(1) 针对智能电能表动态误差,缺少针对误差来源的分析,也未涉及相应的补偿措施或算法改进.

(2) 谐波等条件下的有功电能测量算法,实现了不同谐波或间谐波的幅值、频率、相位等的估计,从信号频域的角度分析了频率变化对电能计量的影响,并给出了相应的解决方案,缺少从时域角度分析

信号波动时电能表计量特性的变化,更缺少针对改善动态特性的测量算法.

本文针对上述问题,在分析传统电能测量算法产生动态电能误差因素的基础上,提出一种适合电能表输入功率动态变化的有功电能新算法,并给出了相应的实现方案.

1 传统有功电能测量算法动态性能分析

电能表常采用移动平均(moving average, MA)算法和无限长单位冲激响应(infinite impulse response, IIR)滤波器来测量有功功率,并通过有功功率在一定时间段的累加和获得有功电能^[26]. 稳态负荷条件下,这两种测量算法均可满足计量误差要求^[6-7],但在动态负荷条件下的计量性能有待进一步分析. 电能表的动态特性是指电能表在实现动态测量过程中所应具备的共同特点和性能,主要包含:动态响应特性和动态误差特性. 由于实际电网中,电力负荷计量端口交流电压幅值一般变化范围小,因此本文主要讨论电流变化时两种测量算法的动态特性.

1.1 MA 算法动态特性分析

1.1.1 有功功率动态响应特性

电能表动态响应特性反映电能表对特征值随时间变化的被测对象的适应能力,这里特征值指被测电压、电流的有效值(或幅值)、有功功率、无功功率、频率、相位和谐波的有效值(或幅值)等参量,本文主要讨论测量算法对应的有功功率动态响应速度. MA 测量算法的具体实现过程:首先选择初始采样得到的、固定宽度(一般用窗口内的采样点数表示)时域窗口内的瞬时功率值进行平均,得到有功功率初始值,当采集到新的一个数据时,窗口滑动包含新测的数据而去掉最早的一个数据,重新计算得到新的有功功率值. 由于这种算法的测量值更新速度等同于信号采样速率,因此对被测信号的跟踪能力比较强. 如图1给出瞬时功率信号幅值从1 W 跳跃到2 W 时,不同宽度窗口对应的有功功率响应曲线. 可见,窗口宽度越大,动态响应时间越长,有功功率动态响应特性越差.

1.1.2 有功电能动态误差特性

电能表动态误差特性是指电能表在动态测量条

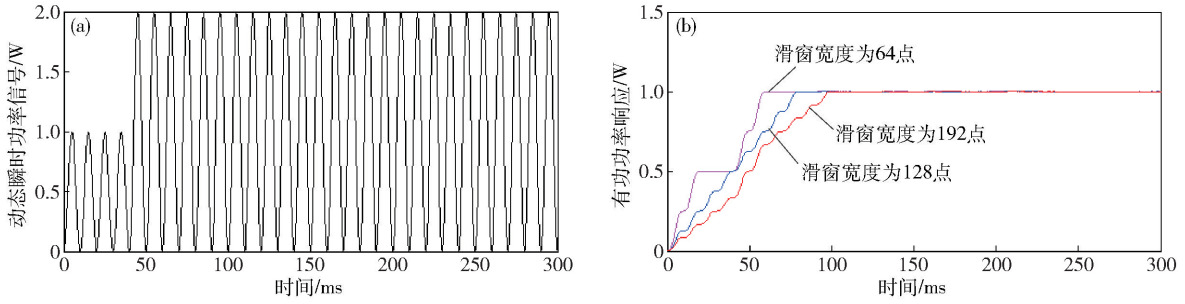


图1 MA 测量算法对动态功率信号的响应。(a) 动态瞬时功率信号; (b) 不同窗宽对应的有功功率响应曲线

Fig. 1 Dynamic power response of the MA measurement algorithm: (a) dynamic instantaneous power signal; (b) active power response of different window widths

件下测量产生的误差随时间变化的规律。动态电能误差反映电能表被测量的有功电能和电能表测量的有功电能之间的差值。设电能表输入通道离散电压信号为 $u(n)$ (n 为自然数并代表时间的离散时刻), 离散电流信号为 $i(n)$, 则瞬时功率 $p(n) = u(n) \cdot i(n)$ 。设滑窗宽度为 N_p (N_p 为正整数) 时, 根据 MA 算法原理, 瞬时有功功率 $p_o(n)$ 由瞬时功率 $p(n)$ 在时域窗口 $[n - (N_p - 1), n]$ 内求平均获得:

$$p_o(n) = \frac{1}{N_p} \sum_{j=0}^{N_p-1} p(n-j) \quad (1)$$

因此, $[0 \sim n]$ 期间电能表被测量的有功电能为 $e(n) = \sum_{k=0}^n p(k) T_s$, 电能表测量的有功电能为 $e_o(n) = \sum_{k=0}^n p_o(k) T_s$, T_s 表示 ADC 采样间隔。根据动态电能误差定义和(1)式可得

$$\Delta e(n) = e_o(n) - e(n) = \sum_{k=0}^n \frac{1}{N_p} \sum_{j=0}^{N_p-1} p(k-j) T_s - e(n) \quad (2)$$

定义 $\mathbf{H} = \left[\frac{1}{N_p}, \frac{1}{N_p}, \dots, \frac{1}{N_p} \right]$, $\mathbf{P}_k = [p(k), p(k-1), \dots, p(k-N_p+1)]^T$, 由于 $p(k)$ 为因果序列, 当 $k < 0$ 时, $p(k) = 0$ 。则 $\Delta e(n)$ 进一步化为

$$\Delta e(n) = (\mathbf{H}\mathbf{P}_0 + \mathbf{H}\mathbf{P}_1 + \dots + \mathbf{H}\mathbf{P}_n) T_s - e(n) = \mathbf{H} [e(n), e(n-1), \dots, e(n-N_p+1)]^T - e(n) = \mathbf{H} \begin{bmatrix} e(n) \\ e(n) - p(n) T_s \\ e(n) - p(n) T_s - p(n-1) T_s \\ \vdots \\ e(n) - p(n) T_s - p(n-1) T_s - \dots - p(n-N_p+2) T_s \end{bmatrix} - e(n)$$

$$e(n) = -\frac{1}{N_p} [(N_p - 1)p(n) + (N_p - 2)p(n-1) + \dots + p(n - N_p + 2)] T_s \quad (3)$$

由此可见, 应用 MA 算法测量有功功率时, 产生

的动态电能误差 $\Delta e(n)$ 由滑窗宽度 N_p 和瞬时功率 $p(n)$ 值共同决定, 当 $p(n)$ 确定时, N_p 越小动态电能误差越小; 当 N_p 固定时, $p(n)$ 越小越好。同时, 越靠近 n 时刻的瞬时功率对动态电能误差影响越大。

1.2 IIR 滤波器动态特性分析

1.2.1 有功功率动态响应特性

瞬时功率 $p(n)$ 可写成直流分量和交流分量叠加的形式 $p(n) = P + \hat{p}(n)$, 由于交流分量在一个工频周期内的积分为 0, 因此一个工频周期内的有功功率可通过将 $p(n)$ 输入 IIR 滤波器来获取直流成分。

应用 Matlab 工具设计了电能计量芯片中常采用的一阶和二阶 Butterworth 低通滤波器, 仿真获得两种阶次滤波器的有功功率响应, 如图 2 所示。仿真中采用的瞬时功率输入信号与图 1(a) 相同, 滤波器截至频率为 5 Hz, 采样频率为 3.2 kHz。分析响应曲线可知, 一阶滤波器响应快, 但测量所得瞬时有功功率波动大, 二阶滤波器测得的功率值曲线比较平稳, 但误差大, 因此实际应用中需要综合考虑选择合适的滤波器阶次。

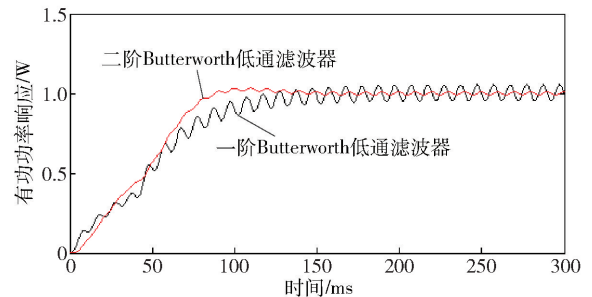


图2 不同阶次 IIR 滤波器的有功功率响应

Fig. 2 Active power response of IIR filters with different orders

1.2.2 有功电能动态误差特性

以二阶 Butterworth 低通滤波器为例, 滤波器的输出-瞬时有功功率按如下公式递推计算

$$p_o(n) = a_1 p_o(n-1) + a_2 p_o(n-2) + b_1 p(n) \quad (4)$$

由此可得,0 ~ n 时刻瞬时有功功率分别为

$$\begin{aligned} p_o(0) &= b_1 p(0) \\ p_o(1) &= a_1 p_o(0) + b_1 p(1) \\ p_o(2) &= a_1 p_o(1) + a_2 p_o(0) + b_1 p(2) \\ &\vdots \\ p_o(n) &= a_1 p_o(n-1) + a_2 p_o(n-2) + b_1 p(n) \end{aligned} \quad (5)$$

将式(5)中的所有等式左右两边分别相加可得

$$\begin{aligned} \sum_{k=0}^n p_o(n) &= e_o(n) = \\ a_1 e_o(n-1) + a_2 e_o(n-2) + b_1 e(n) &= \\ a_1 [e_o(n) - p_o(n) T_s] + a_2 [e_o(n) - p_o(n) T_s - \\ p_o(n-1) T_s] + b_1 e(n) & \quad (6) \end{aligned}$$

根据前文动态电能误差的定义,则有

$$\begin{aligned} \Delta e(n) = e_o(n) - e(n) &= \frac{-(a_1 + a_2)}{1 - (a_1 + a_2)} p_o(n) T_s - \\ \frac{a_2}{1 - (a_1 + a_2)} p_o(n-1) T_s + \left[\frac{b_1}{1 - (a_1 + a_2)} - 1 \right] e(n) & \quad (7) \end{aligned}$$

由此可见,当滤波器参数确定时,IIR 滤波器产生的动态电能误差不仅与相邻的瞬时功率值有关,而且与之前所有时刻累计求得的被测电能 $e(n)$ 有关。

1.3 传统测量算法动态特性分析

分析两种传统测量算法的动态特性可得如下结论:

(1) MA 测量算法的动态响应时间与窗口宽度成正比,窗口越窄响应时间越短;IIR 滤波器的动态响应时间与滤波器的阶数和递推的系数有关,阶次越大响应时间也越长。

(2) 窗口宽度调节合适的前提下,应用 MA 算法可获得到较高精度的有功功率;受滤波器频率特性的限制,根据 IIR 滤波器测算得到的有功功率数值波动较大。

(3) 两种算法都存在电能计量误差,MA 算法引起的电能误差与滑窗宽度 N_p 和瞬时功率同时相关。 N_p 固定时,可通过延迟运算或者降低更新速度来降低动态电能误差,即要求当输入瞬时功率 $p(n)$ 为 0,输出有功功率 $p_o(n)$ 不为 0 时持续运算直至 $p_o(n) = 0$;影响 IIR 滤波器电能误差的因素比较复杂,通过延迟运算可减小误差,但不能完全消除。

2 SDPA 电能测量算法及实现

2.1 SDPA 算法描述

根据上述动态特性分析,介绍一种新的有功电能测量算法——分段点积累加和(segmented dot

product accumulation, SDPA)算法,通过降低 MA 算法中功率的更新速度以获得高精度动态电能计量。由于实际电网运行过程中,通常电力用户端口交流电流幅值波动大,且具备每个工频周期内幅值、相位变化不大的特点,而交流电压幅度长时间比较平稳,因此为了反映负荷动态变化,首先对时域电压、电流信号在每个整数周期上进行截短,

$$u_k(n) = U \sin(n\omega T_s) g(nT_s - kT) \quad (8)$$

$$i_k(n) = I_k \sin(n\omega T_s - \varphi_k) g(nT_s - kT) \quad (9)$$

式中, $u_k(n)$ 和 $i_k(n)$ 表示第 $k(k \in N)$ 个周期内的离散电压和电流信号, U 表示恒定的电压幅值, I_k 表示第 k 个周期的电流幅值, T_s 表示 ADC 采样间隔, T 为基波周期, $g(nT_s - kT) = \begin{cases} 1 & kT \leq t \leq (k+1)T \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$ 为窗函数。则第 k 个周期内的瞬时功率为,

$$\begin{aligned} p_k(n) &= u_k(n) i_k(n) = \\ \frac{U I_k}{2} [\cos \varphi_k - \cos(2n\omega T_s - \varphi_k)] & \quad (10) \end{aligned}$$

因此,有功功率信号在周期 $[kT, (k+1)T]$ 内累计的电能为,

$$E_k = \sum_{n=0}^{N_z-1} p_k(n) T_s = \frac{U I_k}{2} \cos \varphi_k N_z T_s = \frac{U I_k}{2} \cos \varphi_k T \quad (11)$$

式中, N_z 为电压和电流信号一个基波周期的采样点数。则电能表在 $0 \sim mT(m \in N)$ 时间内被测量的有功电能为,

$$e(n) = \sum_{k=0}^m E_k = \sum_{k=0}^m \frac{U I_k}{2} \cos \varphi_k T \quad (12)$$

由于动态负荷在第 k 个工频周期内的有功功率为

$$\begin{aligned} P_k &= \frac{1}{N_z} \sum_{n=0}^{N_z-1} p_k(n) = \\ \frac{1}{N_z} \sum_{n=0}^{N_z-1} \frac{U I_k}{2} [\cos \varphi_k - \cos(2n\omega T_s - \varphi_k)] &= \\ \frac{U I_k}{2} \cos \varphi_k & \quad (13) \end{aligned}$$

则被测量的有功电能 $e(n)$ 可通过如下将瞬时功率按周期分组的方式获得,

$$\begin{aligned} e(n) &= \underbrace{[p(0) + p(1) + \dots + p(N_z - 1)]}_{N_z P_o} + \\ &\quad \underbrace{p(N_z) + \dots + p(2N_z - 1)}_{N_z P_1} + \dots \\ &\quad \underbrace{p((m-1)N_z) + \dots + p(mN_z - 1)}_{N_z P_m} T_s \quad (14) \end{aligned}$$

式中,每个周期内的有功功率表示成向量点积的形式,

$$P_k = \mathbf{H} [p(kN_z - 1), p(kN_z - 2), \dots, p(k-1)N_z]^T \quad (15)$$

其中 $\mathbf{H} = \left[\frac{1}{N_z}, \frac{1}{N_z}, \dots, \frac{1}{N_z} \right]$. 根据 MA 算法中的瞬时有功功率公式(1), 取滑窗宽度为 N_z 时, 并将测量的有功电能也按照周期分组并累计求和的形式表示如下

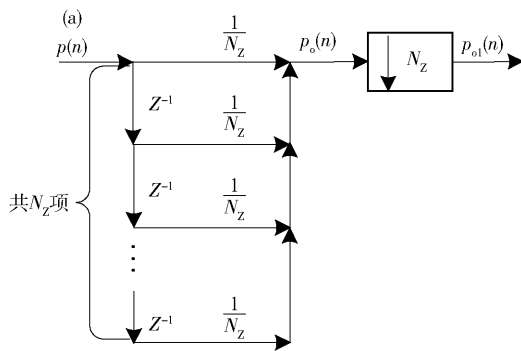
$$e_o(n) = \underbrace{\mathbf{H} \begin{bmatrix} p(0) \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} + \dots + \mathbf{H} \begin{bmatrix} p(N_z - 1) \\ p(N_z - 2) \\ p(N_z - 3) \\ \vdots \\ p(0) \end{bmatrix}}_{\text{第1组}} + \underbrace{\mathbf{H} \begin{bmatrix} p(N_z) \\ p(N_z - 1) \\ p(N_z - 2) \\ \vdots \\ p(1) \end{bmatrix} + \dots + \mathbf{H} \begin{bmatrix} p(2N_z - 1) \\ p(2N_z - 2) \\ p(2N_z - 3) \\ \vdots \\ p(N_z) \end{bmatrix}}_{\text{第2组}} + \dots + \underbrace{\mathbf{H} \begin{bmatrix} p((m-1)N_z) \\ p((m-1)N_z - 1) \\ p((m-1)N_z - 2) \\ \vdots \\ p((m-2)N_z + 1) \end{bmatrix} + \dots + \mathbf{H} \begin{bmatrix} p(mN_z - 1) \\ p(mN_z - 2) \\ p(mN_z - 3) \\ \vdots \\ p((m-1)N_z) \end{bmatrix}}_{\text{第m组}} \Bigg\} T_s \quad (16)$$

对照式(14)和(16)可得被测电能与测量电能相等的条件是:

- (1) 求平均功率所用的滑窗宽度取一个基波周期.
- (2) 平均功率值取值为采用 MA 算法求得瞬时有功功率 $p_o(n)$ 的 N_z 抽取, 此时有功功率更新速度降为一个基波周期.

由此可见, 理想情况下, 满足有功电能动态误差为 0 时的动态有功功率和有功电能算法分别为,

$$p_{o1}(n) = p_o(N_z n) = \mathbf{H} \mathbf{P}_n \quad (17)$$



$$e_{o1}(n) = e_o(N_z n) = \sum_{k=0}^m p_o(N_z k) T = \sum_{k=0}^m \mathbf{H} \mathbf{P}_k T \quad (18)$$

式中, $\mathbf{P}_k = [p(kN_z), p(kN_z - 1), \dots, p((k-1)N_z + 1)]$, $k \in [1, 2, \dots]$.

新的有功电能测量值 $e_{o1}(n)$ 通过将瞬时有功功率 $p_o(n)$ 按照周期分段、周期内点积, 并累加求和的方式获得, 因此称之为分段点积累加和 (SDPA) 算法. 应用 SDPA 算法实际测量时, 由于对瞬时有功功率 $p_o(n)$ 的抽取点难以保证正好落在正弦信号初始值, 即抽取出现时域偏差, 因此存在一定误差.

2.2 SDPA 算法实现

根据 SDPA 算法描述, 对瞬时有功功率 $p_o(n)$ 按照基波周期抽取, 可实现误差较小的动态有功电能测量, 如图 3(a) 所示, 图中 Z^{-1} 为单位延迟器. 但这种实现方式是费时的, 而且许多点在参与运算之后又被舍弃了, 即做了大量不必要的运算, 因此为了节省空间, 提高运算效率本文建议采用图 3(b) 的方式实现.

按照图 3(a) 的实现方式, $p_{o1}(n) = p_o(N_z n) = \frac{1}{N_z} \sum_{k=0}^{N_z-1} p(N_z n - k)$; 按照图 3(b) 的实现方式, $p_{o2}(n) = \frac{1}{N_z} \sum_{k=0}^{N_z-1} p_o(n - k) = \frac{1}{N_z} \sum_{k=0}^{N_z-1} p(N_z n - k)$, 由此可见两种实现方式等价. 但图 3(b) 的实现方式中, 在求平均之前先从瞬时功率信号中抽取出了参与运算的一组数据, 求平均值后再抽取下一组需用的数据, 整个过程无冗余计算, 提高运算速度的同时也减少了有功功率数据的存储量.

3 三种算法电能动态误差比较

为了分析和比较三种算法对动态功率信号的适应能力, 以文献[9]提出的 OOK 信号作为测试电流信号, 以标准正弦电压信号作为测试电压信号, 在

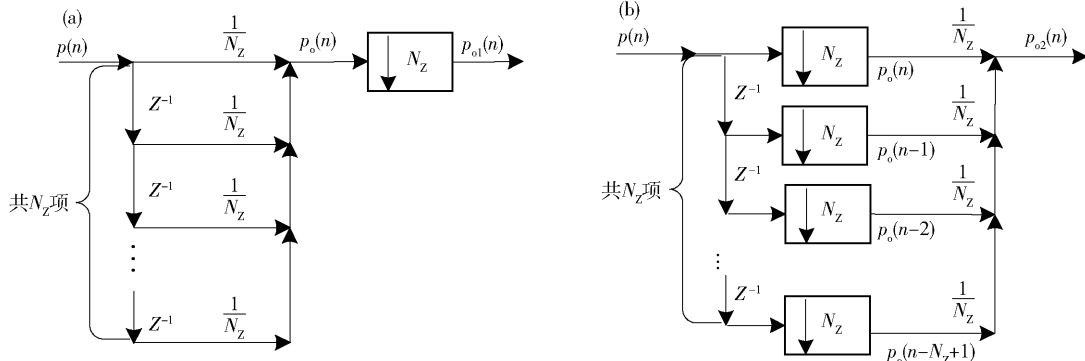


图 3 SDPA 算法实现结构. (a) 先平均后抽取; (b) 先抽取后平均

Fig. 3 Algorithm structure of the SDPA: (a) decimating after averaging; (b) averaging after decimating

MATLAB 中分别构建了 MA、IIR、SDPA 三种算法的

电能测量模型,动态误差测试结果如图 4 所示。

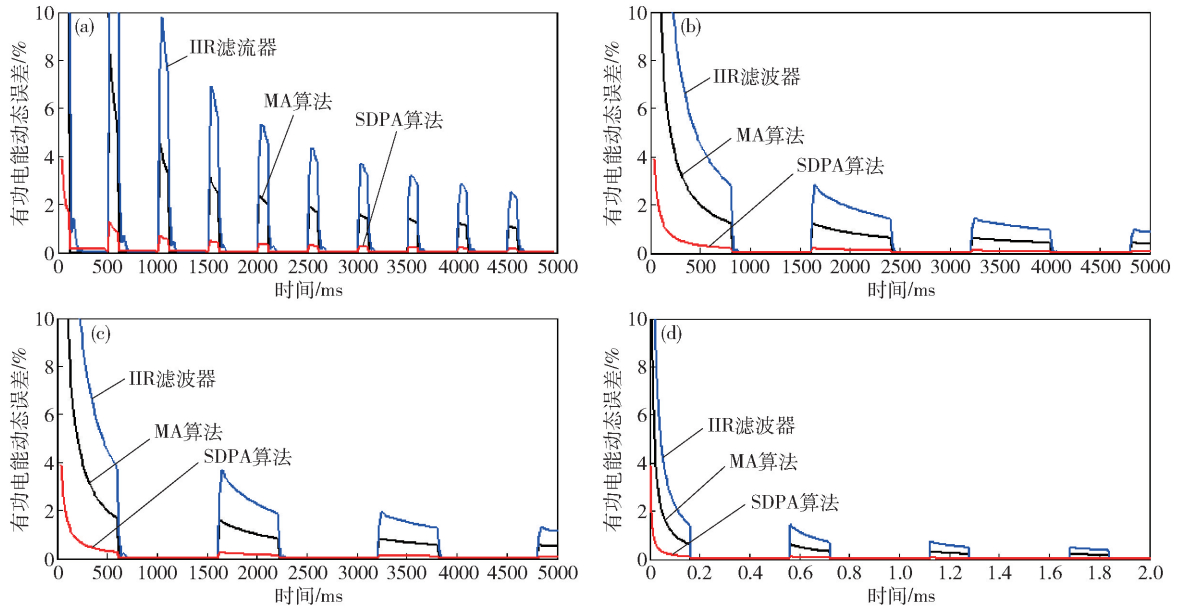


图 4 3 种算法动态电能误差比较。(a) 通断比为 5:20;(b) 通断比为 40:40;(c) 通断比为 30:50;(d) 通断比为 80:200

Fig. 4 Comparisons of the dynamic errors of the three algorithms: (a) on/off ratio of 5:20; (b) on/off ratio of 40:40; (c) on/off ratio of 30:50; (d) on/off ratio of 80:200

仿真中采用的 OOK 信号是由通断键(On-Off-Key)控制稳态测试信号产生的电能表动态误差测试信号,通过设置 OOK 通断比 $A:B$,产生暂态、短时、长时 3 种模式的动态负荷功率,模拟实际电网动态负荷暂态、短时和长时变化的情况,其中 $A:B$ 指连通 A 个周期,断开 B 个周期。

动态误差测试结果表明:MA 和 IIR 滤波器在暂态(5:20)、短时模式(40:40,30:50)和长时模式(80:200)下,时域上呈现逐渐减小的趋势,但动态误差波动较大;SDPA 算法在 3 种模式下,动态响应时间为一个基波周期,其动态电能误差远低于前两种算法,且波动非常小。仿真中的有功电能动态误差指相对误差,根据 $\delta = \left| \frac{e_c - e_s}{e_s} \times 100\% \right|$ 求得,其中 e_c 为测量所得的电能值, e_s 为电能理论值。

4 结论

在理论分析传统 MA 算法和 IIR 滤波器动态特性的基础上,提出了一种适合电能表动态测量的 SDPA 算法。首先,分别讨论了两种传统算法的动态响应速度,并推导出各自的动态误差求取公式。在分析影响传统算法动态计量性能因素的基础上,提出 SDPA 有功电能新算法。该算法动态响应时间为一个基波周期,有功电能误差远低于前两种算法,且波动非常小,因此适合动态负荷快速波动条件下的智能电能表有功电能测量。同时,为了减少存储空

间、提高运算速率,文中给出了 SDPA 算法改进的实现结构。研究结果对减少智能电能表动态误差,提高电能表动态性能具有重要的理论意义和应用价值。

参 考 文 献

- [1] Chang G W, Shih M F, Chen Y Y, et al. A hybrid wavelet transform and neural-network-based approach for modelling dynamic voltage-current characteristics of electric arc furnace. *IEEE Trans Power Delivery*, 2014, 29(2): 815
- [2] Lao K W, Wong M C, Dai N Y, et al. A systematic approach to hybrid railway power conditioner design with harmonic compensation for high-speed railway. *IEEE Trans Ind Electron*, 2015, 62(2): 930
- [3] Barros J, Diego R I, de Apráz M. A discussion of new requirements for measurement of harmonic distortion in modern power supply systems. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2013, 62(8): 2129
- [4] Zhou L, Liu K P. Error analyzing for electric metering and discussion about pricing of electric energy. *Trans China Electrotech Soc*, 2005, 20(2): 63
(周莉,刘开培.电能计量误差分析与电能计费问题的讨论.电工技术学报,2005,20(2):63)
- [5] Yang J T, Le J, Wang N, et al. Analysis of measurement error for electric energy metering system under harmonic conditions. *Autom Electr Power Syst*, 2015, 39(13): 144
(杨金涛,乐健,汪妮,等.谐波背景下电能计量系统的计量误差分析.电力系统自动化,2015,39(13):144)
- [6] Lu Z L, Wang L, Li M. Discussion for evaluation of dynamic measurement function of electrical energy meter. *Electr Meas Instrum*, 2010, 47(4): 1

- (陆祖良, 王磊, 李敏. 对电能表动态测量功能评价的讨论. 电测与仪表, 2010, 47(4): 1)
- [7] Zheng J Z, Lu Z L, Li M. Experimental research for dynamic characteristic of electrical energy meter. *Electr Meas Instrum*, 2011, 48(3): 1
(郑荐中, 陆祖良, 李敏. 电能表动态特性实验研究. 电测与仪表, 2011, 48(3): 1)
- [8] Wang X W, Lü P, Wang L, et al. TASK power model based dynamic error testing for electricity meter. *Proc CSEE*, 2016, 36(18): 4847
(王学伟, 吕磅, 王琳, 等. 基于 TASK 功率模型的电能表动态误差测试方法. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4847)
- [9] Wang X W, Chen J X, Yuan R M, et al. OOK power model based dynamic error testing for smart electricity meter. *Meas Sci Technol*, 2017, 28(2): 025015-1
- [10] Wang J X, Gao W H, Bie Z H. Influence of shock loads on power system reliability. *Proc CSEE*, 2011, 31(10): 59
(王建学, 高卫恒, 别朝红. 冲击负荷对电力系统可靠性影响的分析. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 59)
- [11] Li S S, Zhao W. A method for dynamic measurement capabilities evaluation of smart meter based on DDS signal generator. *Electr Meas Instrum*, 2010, 47(10): 1
(李世松, 赵伟. 基于 DDS 信号发生器的智能电表动态测量功能评估方法初探. 电测与仪表, 2010, 47(10): 1)
- [12] Zhao W, Meng J L, Chen R M, et al. Accurate measurement and traceability method of electrical energy for charging and discharging devices of electric vehicles. *Autom Electr Power Syst*, 2013, 37(11): 113
(赵伟, 孟金岭, 陈锐民, 等. 电动汽车充换电设施电能计量及溯源方法. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 113)
- [13] Wolffenbuttel R F. Digitally programmable accurate current sources for logarithmic control of the amplification or attenuation in a gain cell. *IEEE J Solid-State Circuits*, 1988, 23(3): 767
- [14] Dai X Z. The quasi-synchronous sampling and its application in the measurement of non-sinusoidal power. *Chin J Sci Instrum*, 1984, 5(4): 390
(戴先中. 准同步采样及其在非正弦功率测量中的应用. 仪器仪表学报, 1984, 5(4): 390)
- [15] Ma H Z, Hu Q S. Analysis on error synchronous sampling by software. *Trans China Electrotech Society*, 1996, 11(1): 43
(马宏忠, 胡虔生. 软件实现同步采样的误差分析. 电工技术学报, 1996, 11(1): 43)
- [16] Meng Z, Wen H. Quasi-synchronous sampling algorithm for frequency measurement based on multiple segment trapezoidal rule. *Proc CSEE*, 2015, 35(10): 2445
(孟卓, 温和. 基于复化梯形的准同步采样频率测量算法. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2445)
- [17] Chen L, Zhao W, Xiao Y, et al. New active electric energy measurement algorithm under non-integer-period sampling. *Chin J Sci Instrum*, 2017, 38(4): 861
(陈垒, 赵伟, 肖勇, 等. 非整周期采样条件下有功电能计量的新算法. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 861)
- [18] Yao W X, Teng Z S, Tang Q, et al. Measurement of power system harmonic based on adaptive Kaiser self-convolution window. *IET Gener Transm Distrib*, 2016, 10(2): 390
- [19] Zhu N H, Bai X M, Dong W J. Harmonic detection method based on EEMD. *Proc CSEE*, 2013, 33(7): 92
(朱宁辉, 白晓民, 董伟杰. 基于 EEMD 的谐波检测方法. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 92)
- [20] Zhai X J, Zhou B. An improved interpolated FFT algorithm for harmonic analysis. *Proc CSEE*, 2016, 36(11): 2952
(翟晓军, 周波. 一种改进的插值 FFT 谐波分析算法. 中国电机工程学报, 2016, 36(11): 2952)
- [21] Gao Y P, Teng Z S, Wen H, et al. Harmonic analysis based on Kaiser window interpolation FFT and its application. *Proc CSEE*, 2010, 30(4): 43
(高云鹏, 滕召胜, 温和, 等. 凯塞窗插值 FFT 的电力谐波分析与应用. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 43)
- [22] Lavopa E, Zanchetta P, Sumner M, et al. Real-time estimation of fundamental frequency and harmonics for active shunt power filters in aircraft electrical systems. *IEEE Trans Ind Electron*, 2009, 56(8): 2875
- [23] Xiao Y, Luo R X, Zhao W, et al. Fast quasi-synchronous harmonic algorithm for IEC61850 based on digital energy meter devices. *Power Syst Technol*, 2017, 42(2): 621
(肖勇, 罗睿希, 赵伟, 等. 基于 IEC61850 的数字化电能表用快速准同步谐波测量算法. 电网技术, 2017, 42(2): 621)
- [24] Guo C, Li Q Z, He J M, et al. Segmentation prony algorithm on harmonics and inter-harmonics detection of power networks. *Power Syst Technol*, 2010, 34(3): 21
(郭成, 李群湛, 贺建闽, 等. 电网谐波与间谐波检测的分段 Prony 算法. 电网技术, 2010, 34(3): 21)
- [25] Zhang X B, Li Y H, Fang G Z. Modeling for power grid signals under the condition of non-stationary distortion signals. *Proc CSEE*, 2014, 34(16): 2721
(张晓冰, 李云辉, 房国志. 非平稳畸变信号条件下电网信号建模. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2721)
- [26] Bai Y, Yang J Q, Zeng Z. Design method of high performance digital low-pass filter in harmonic detection algorithm. *J Zhejiang Univ Eng Sci*, 2013, 47(1): 169
(白杨, 杨家强, 曾争. 谐波检测算法中高性能数字低通滤波器的设计. 浙江大学学报(工学版), 2013, 47(1): 169)