

一种基于 S 变换的动态电能计量算法

邵方静¹, 宋晓林¹, 刘坚², 魏宇¹, 尉怡青², 赵伟²

(1. 国网陕西省电力公司营销服务中心(计量中心), 西安 710199; 2. 清华大学 电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

摘要:现代电力系统中的电压、电流已不再是较理想的稳态正弦波, 具有复杂的动态变化特征。动态条件下如何才能足够准确地计量电能, 已越来越受到关注。文中从 S 变换的数学原理出发, 提出了一种动态电能计量算法。具体将电能的直流、基波、谐波和间谐波分量分开测算, 利用行业协会团体标准中的六种动态测试信号作为该算法的输入, 对其在稳态和非稳态情况下的电能计量性能和误差进行了仿真测试和分析, 结果验证了相比于现有的两类典型算法, 所提出算法在动态条件下能够更准确地计量电能。

关键词:动态测试信号模型; 电能计量; S 变换; 加窗快速傅里叶变换; 小波变换

DOI:10.19753/j.issn1001-1390.2023.07.016

中图分类号: TM933

文献标识码: A

文章编号: 1001-1390(2023)07-0100-07

A dynamic electric energy metering algorithm based on S transform

Shao Fangjing¹, Song Xiaolin¹, Liu Jian², Wei Yu¹, Yu Yiqing², Zhao Wei²

(1. Marketing Service Centre (Measurement Centre), State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710199, China. 2. Department of Electric Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The voltage and current in modern power system are no longer ideal steady-state sine waves, and have complex dynamic characteristics. It has attracted some attention on how to accurately measure electric energy under dynamic conditions. Based on the mathematical principle of S transform, this paper proposes a dynamic electric energy metering algorithm, which divides electric energy into four components, including DC, fundamental wave, harmonic and inter-harmonic of electric energy. The six dynamic test signals in the association standard are used as the input of the algorithm, and the performance and errors of the electric energy metering under steady and non-steady states are simulated and analyzed. The obtained results verify that, compared with the two conventional algorithms, the proposed algorithm has a better accuracy on measuring electric energy under dynamic conditions.

Keywords: dynamic test signal model, electric energy metering, S transform, windowed FFT, wavelet transform

0 引 言

目前,以新能源为主体的新型电力系统建设持续推进。而可再生能源替代火电,交直流混联,电器设备更高比例电力电子化,以及智能控制型电力负荷越来越多地接入电网,使电力系统呈现出“双高”和“双随机”特点。“双高”、“双随机”电网中,电压、电流复杂多变成为常态。面对它们,若仍以原有的稳态电能计量方法对有功电能进行计量,无疑很可能漏计、误计电能,难以维系电能计量的合理、公平和公正。

近些年,国内外学者对动态电能计量方法和技术等已开展了不少研究,例如在计量方式上,文献[1]指出谐波干扰下对电网有功电能应采用谐波电能计量方式,即对基波和谐波电能应分别计量。文献[2]指出间

谐波的存在将使电能计量出现较大误差,故应采取合理、可行的技术经济手段对间谐波加以抑制,且也十分必要对其进行准确计量。

在算法上,现有智能电能表配置的电能计量算法,主要有基于加窗 FFT、小波变换、S 变换的三种算法,也常分别简称加窗 FFT、小波变换、S 变换算法。在加窗 FFT 算法基础上,文献[3]提出一种四项 Hanning 自乘窗函数,利用幅值、相位和频率修正公式,提取基波和谐波的相关电参量,能实现对基波和谐波电能较准确的计量。文献[4]将旋转因子不变法(Estimating Signal Parameters Via Rotational Invariance Techniques, ESPRIT)与加窗插值 FFT 算法相结合,其中,加窗插值 FFT 采用 10 周波窗长,ESPRIT 方法采用 2 周波窗长,从而兼顾对幅值缓变和快变信号的分析,能较好抑制动态条件下电能计量误差的增大。但加窗插值 FFT 算

基金项目:国家自然科学基金项目(52077112); 国网陕西省电力公司资助项目(5226YX200011)

法的窗长是固定的,无法自适应地调整时-频分辨率;若对相关电参量进行修正,将增加算法复杂度;而且 ESPRIT 方法的抗噪性能较弱。

在应用小波变换算法方面,文献[5]采用小波包变换,选取 Db45 小波函数,针对电网电压存在波动和闪变的情况,对动态信号进行分解和重构,能较准确地测算有功电能。文献[6]计及间谐波影响,基于小波包变换,结合采用谐波分组和上单边带调制等方法,可提高电网电压、电流信号的幅值和频率均存在瞬变情况下测算电能的准确性。小波(包)变换中的分频带做法,可对谐波、间谐波电能做分开测算,但若分辨出同一个频带内的谐波、间谐波电能分量,就必须增加小波包分解的层数,并减小频率子带宽度,而若如此,势必会增大计算量。此外,小波包变换无法计及直流电能分量。

S 变换可被看作是与频率相关的短时傅里叶变换(Short Time Fourier Transform, STFT),也相当于是对小波变换的相位校正。延续对短时傅里叶变换和小波变换的继承与发展,近年来,S 变换逐渐被应用于电能计量。文献[7]利用 S 变换算法,分别对基波和谐波电能进行测算,可以提高电能计量的准确性。文献[8]基于 S 变换,以高斯窗宽进行频域采样,且具体做法上,后一个高斯窗宽度是前一个的 2 倍,能实现二进制采样的快速 S 变换,既能减少运算时间,还可比较准确地测算电能。文献[9]针对 3 种典型非线性负荷,改进了窗函数的尺度因子,并以仿真计算验证了所改进的 S 变换方法的合理性。文献[7-9]采用常用的、典型的非线性信号模型,将 S 变换用于动态电能计量的仿真验证,但仅是将电能分成了基波和畸变两部分进行测算,其结果作为收缴电费依据的合理性值得商榷。

针对已有加窗 FFT、小波变换以及基于 S 变换形成的电能计量算法在计量动态电能方面存在的局限性和不足,文中试选用现行标准中的 6 种动态测试信号模型^[10],继而基于 S 变换和功率理论,并依据现有的谐波、间谐波标准去提取特征频率点,旨在使对被测电压、电流信号形成的电能量中的直流、基波、谐波和间谐波分量的分开测算成为现实;之后,拟在输入上述动态测试信号下,校验所提出算法在稳态和非稳态条件下的准确度等性能,并与已有算法进行比较,以确认其理论意义和实用价值。

1 动态测试信号选取及电能计量

1.1 动态测试信号模型的选取

可再生发电并网,具有明显的随机性、间歇性和波动性。更多利用风力和光伏发电后,电网电压、电流的非稳态也称动态特征,会表现得更为显著。文献[11]归纳了宏观和微观时间尺度下电网中动态负荷电流和有功功率的典型特性,为动态测试信号建模提供

了相关参考依据。

在对形成电能的电压、电流测试信号的建模方面,文献[12-13]建立了正弦包络调幅、梯形包络调幅,以及恒幅调频的动态电流测试信号模型。文献[14-15]则在定义动态负荷电流和波动功率信号的暂态、短时和长时游程模式基础上,构建了三幅值键控(Ternary Amplitude Shift Keying, TASK)和通断键控(On-Off Keying, OOK)动态测试信号模型。基于上述研究工作,2020 年发布的中国仪器仪表行业协会团体标准 T/CIMA 0020-2020《交流电能表动态性能检验装置》^[10]中给出了 6 种动态测试信号的模型,具体又分连续动态测试信号和通断动态测试信号两大类,具体见表 1。鉴于文献[10]标准提供的动态测试信号模型已被较多采用,工作中,为验证拟提出的基于 S 变换动态电能计量算法的性能,就选取这些动态测试信号作为被验证算法的输入信号。

1.2 计量动态电能的数学模型

如上所述,动态条件下,电网电压、电流,尤其是电流信号,已不再是理想的正弦周期信号,一般含有较多的谐波和间谐波等分量。考虑到谐波和间谐波分量对电网的危害程度不同,为借助经济手段规范用户用电行为、减少谐波和间谐波分量注入电网,以及定量分析直流、谐波、间谐波分量等对电气设备正常运行的干扰和影响程度,文中将电压、电流信号表征为直流、基波、谐波和间谐波分量组合的形式,具体表示如下:

$$u(t) = U_0 + u_f(t) + u_h(t) + u_{ih}(t) \quad (1)$$

$$i(t) = I_0 + i_f(t) + i_h(t) + i_{ih}(t) \quad (2)$$

对电网电压、电流信号,利用模数转换器进行采样,对采样序列做 FFT 变换,在所得频谱中提取特征频率点,即电网信号中超出标准规定量值的谐波或间谐波分量所对应的频率点。再将经 S 变换所得的时-频矩阵中对应特征频率点处的时域电压、电流序列进行点积和计算,便可实现对直流、基波、谐波以及间谐波电能分量的分别测算。由于直流、基波、谐波和间谐波分量之间相互正交,经推导可得:

$$W = \left[\sum_{k=1}^N \frac{1}{N} u(t_k) i(t_k) \right] t = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \left[(U_0 + u_f(t_k) + u_h(t_k) + u_{ih}(t_k)) \cdot (I_0 + i_f(t_k) + i_h(t_k) + i_{ih}(t_k)) \right] t = \left[U_0 I_0 + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u_f(t_k) \cdot i_f(t_k) + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u_h(t_k) \cdot i_h(t_k) + \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N u_{ih}(t_k) \cdot i_{ih}(t_k) \right] t = W_0 + W_f + W_h + W_{ih} \quad (3)$$

式中 N 为总采样点数; t 代表采样时间; U_0 、 I_0 为电压、电流直流分量; $u_f(t_k)$ 、 $i_f(t_k)$ 为电压、电流采样的基波分量; $u_h(t_k)$ 、 $i_h(t_k)$ 表征电压、电流采样的谐波分量; $u_{ih}(t_k)$ 、 $i_{ih}(t_k)$ 为电压、电流采样的间谐波分

表 1 动态测试信号模型
Tab. 1 Dynamic test signal models

动态测试信号数学模型表达式	对表达式中变量的说明
<p>① 幅值调制动态信号(调制波形:正弦波)</p> $x(t) = \sqrt{2}(X_m + X_d \cos(2\pi f_a t + \varphi_a)) \cos(2\pi f t + \varphi_0)$	X_m :基本电流; X_d :幅值调制深度; f :基波频率; f_a :调制频率; φ_a :调制部分初始相角
<p>② 幅值调制动态信号(调制波形:限带方波)</p> $x(t) = \sqrt{2}X_m \cdot \cos(2\pi f t + \varphi_0) + \sqrt{2}X_d \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \sum_{i=0}^7 \frac{(-1)^i}{(2i+1)} \cdot \cos(2\pi f_a \cdot (2i+1) \cdot t) \cdot \cos(2\pi f t + \varphi_0)$	X_m :基本电流; X_d :幅值调制深度; f :基波频率; f_a :调制角频率
<p>③ 相角(频率)调制动态信号(调制波形:正弦波)</p> $x(t) = \sqrt{2}X_m \cos \left[2\pi f t + \frac{f_d}{f_p} \sin(2\pi f_p t + \varphi_p) + \varphi_0 \right]$	X_m :基本电流; f :基波频率; f_d :频率调制深度; f_p :调制频率; φ_p :调制部分初始相角
<p>④ 幅值相角调制动态信号(调制波形:正弦波)</p> $x(t) = \left[X_m + X_d \cos(2\pi f t) \right] \cdot \cos \left[2\pi f t + \varphi_a \cos(2\pi f_a t - \pi) + \varphi_0 \right]$	X_m :基本电流; X_d :幅值调制深度; φ_a :相角调制深度; f_a :调制频率
<p>⑤ 开关键控(OOK)动态信号</p> $i_d(t) = \sum_n I_m a_n \sin[\omega t - \varphi_n] \cdot g(t - nT) = \sum_n i_{dn}(t)$	$g(t - nT) = \begin{cases} 1 & nT \leq t \leq (n+1)T, n \in N \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$ $a_n = \begin{cases} 1, & nT \leq t \leq (n+1)T \text{ 时若电流信号通} \\ 0, & nT \leq t \leq (n+1)T \text{ 时若电流信号断} \end{cases}$ $m(k) = C_1 m(k-1) \oplus C_2 m(k-2) \oplus \dots \oplus C_n m(0) = \sum_{i=1}^n C_i m(k-i) \pmod{2}$
<p>⑥ m 序列调制的动态信号</p> $i_d(t) = m(t) i_s(t) = I_m \left[\sum_{k=1}^N m(k) g(t - kT) \right] \sin(\omega t - \varphi)$	$m(t) = \sum_{k=1}^N m(k) g(t - kT) \quad N = 2^n - 1, n \text{ 为 } m \text{ 序列级数}$ $g(t - kT) = \begin{cases} 1 & t \in [kT, (k+1)T] \\ 0 & t \in \text{其他}, t \notin [kT, (k+1)T] \end{cases}$

量; W_0 、 W_f 、 W_h 、 W_{ih} 则分别为电能的直流、基波、谐波和间谐波分量。

2 基于 S 变换的动态电能计量新算法

2.1 连续 S 变换及其逆变换

S 变换(Stockwell transform)是 1996 年由 Stockwell 提出的一种时-频分析方法^[16],被定义为:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}} e^{-j2\pi ft} dt \quad (4)$$

式中 τ 为时间,用以控制窗函数在时间轴上的位置; f 为频率; $h(t)$ 为被分析的信号; $S(\tau, f)$ 为经 S 变换得到的时-频谱矩阵。

由式(4)可知,S 变换将短时傅里叶变换中的矩形窗更换为高斯窗函数,并且将频率 f 与高斯窗函数的窗宽 σ 联系起来,即使频率的倒数等于窗宽。如此,低频条件下,时间窗较宽,频率分辨率较好,方便处理低频、慢变信号;高频下,时间窗较窄,时间分辨率较好,适于处理高频、快变信号。高斯窗的数学模型表示为:

$$w(\tau - t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\tau-t)^2 f^2}{2}} \quad (5)$$

结合式(4)和卷积定理,S 变换还可以写成:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t, f) w(\tau - t, f) dt = h(\tau, f) * w(\tau, f) \quad (6)$$

式中 $h(\tau, f) = x(\tau) e^{-j2\pi f \tau}$ 。

对式(6)进行傅里叶变换的具体过程如下:

$$\Psi(\alpha, f) = F \left\{ h(\tau, f) * w(\tau, f) \right\} = F \left\{ h(\tau, f) \right\} \times F \left\{ w(\tau, f) \right\} = X(\alpha + f) \times e^{-\frac{2\pi^2 \alpha^2}{f^2}} \quad (7)$$

通过对 $\Psi(\alpha, f)$ 进行傅里叶逆变换,即可求得 S 变换的时-频谱矩阵,即:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} \Psi(\alpha, f) e^{j2\pi \alpha \tau} d\alpha = \int_{-\infty}^{\infty} X(\alpha + f) \times e^{-\frac{2\pi^2 \alpha^2}{f^2}} e^{j2\pi \alpha \tau} d\alpha \quad (8)$$

至此,再利用傅里叶逆变换,便可实现 S 变换的逆变换,即,能够完成对被测时域信号的重构。

$$x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_{-\infty}^{\infty} S(\tau, f) d\tau \right] e^{j2\pi ft} df \quad (9)$$

可见,利用 S 变换及其逆变换,可将时域连续的电压、电流信号,转换成所有频率分量之和的形式,如式(1)、式(2)所示。

2.2 离散 S 变换及其逆变换

接下来给出离散 S 变换的推导过程:对被测时域连续电压、电流信号进行离散化处理,设 N 为总采样点数, T 为等间隔采样的时间间隔,得到离散被测信号 $x(nT)$ 。令 $\tau = mT, f = k/(NT), m, k, r, n = 0, 1, \dots, N-1$, 则被测信号的离散傅里叶变换为:

$$X\left(\frac{k}{NT}\right) = \sum_{n=0}^{N-1} x(nT) e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} \quad (10)$$

依据 2.1 节利用 FFT 变换实现 S 变换的推演过程,可得到信号 $x(t)$ 的离散 S 变换公式如下:

$$\begin{cases} S(mT, 0) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(nT), & k = 0 \\ S(mT, \frac{k}{NT}) = \frac{1}{N} \sum_{r=0}^{N-1} X\left(\frac{r+k}{NT}\right) e^{-\frac{2\pi^2 r^2}{k^2}} e^{\frac{j2\pi mr}{N}}, & k \neq 0 \end{cases} \quad (11)$$

与连续 S 变换及其逆变换相对应,离散 S 变换的逆变换,也可通过傅里叶逆变换来实现,具体为:

$$x(nT) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} \left[\sum_{m=0}^{N-1} S\left(mT, \frac{k}{NT}\right) \right] e^{\frac{j2\pi nk}{N}} \quad (12)$$

2.3 基于 S 变换的动态电能计量新算法

S 变换是一种时-频分析方法,其结果是以一个复数的二维时-频矩阵表征的;矩阵中的元素代表对应时间点和对应频率点下被测信号的幅值和相位信息;矩阵的行对应采样时间点,某固定行表示该时间点下被测信号各频率点的幅值和相位变化;而该矩阵的列,则对应采样频率点,某固定列表示该频率下被测信号随时间变化的幅值和相位的信息。一般地,S 变换的计算步骤如下:

- (1) 计算信号 $x(nT)$ 的平均值 x_{mean} ;
- (2) 计算信号 $x(nT)$ 的傅里叶变换 $X\left(\frac{k}{NT}\right)$;
- (3) 将经过步骤(2)所得的 $X\left(\frac{k}{NT}\right)$ 做周期延拓,形成矩阵 $\mathbf{X}(r, k)$:

$$\mathbf{X}(r, k) = \begin{bmatrix} X(0) & X(1) & X(2) & \cdots & X(N-2) & X(N-1) \\ X(1) & X(2) & X(3) & \cdots & X(N-1) & X(0) \\ X(2) & X(3) & X(4) & \cdots & X(0) & X(1) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ X(N-2) & X(N-1) & X(0) & \cdots & X(N-4) & X(N-3) \\ X(N-1) & X(0) & X(1) & \cdots & X(N-3) & X(N-2) \end{bmatrix} \quad (13)$$

- (4) 计算频率点 k 处高斯窗函数的傅里叶变换矩阵 $\mathbf{W}(r, k)$;

$$(5) \text{ 计算相位因子矩阵 } \mathbf{J}(m, r) = e^{\frac{j2\pi mr}{N}};$$

- (6) 将矩阵 $\mathbf{X}(r, k)$ 与 $\mathbf{W}(r, k)$ 相乘,再与矩阵 $\mathbf{J}(m, r)$ 相乘,得到时-频矩阵 $\mathbf{S}(m, k)$;

- (7) 最后,将矩阵 $\mathbf{S}(m, k)$ 的第一列元素替换为(1)中所求的计算信号的平均值 x_{mean} 。

之后,对所得到的时-频矩阵 $\mathbf{S}(m, k)$,可借助傅里叶逆变换完成对被测信号的重构,其过程是:将时-频矩阵 $\mathbf{S}(m, k)$ 按列求和,得到频谱向量 $\mathbf{X}\left(\frac{k}{NT}\right)$;对 $\mathbf{X}\left(\frac{k}{NT}\right)$ 进行傅里叶逆变换,得到时域信号 $x(nT)$ 。

将 S 变换应用于电能计量时,上述推导中涉及到的被测时域信号,就对应形成电能的电压、电流信号,即,需要分别求取电压、电流信号的 S 变换矩阵。

为利用电压、电流的 S 矩阵实现各分量电能计量,有两种方案:一种是不进行傅里叶逆变换,直接从时-频矩阵入手,提取相关电参量,并依据 IEEE Std. 1459-2010 功率理论测算功率,进而求得采样时间段内的有功电能^[17]。另一种是先进行电压、电流信号的重构,即经过 S 变换及其逆变换,先将被测电压、电流信号转换成所有频率分量之和的形式,再经过点积和运算取出各频率分量之和形式的有功电能。考虑到要计量电能的间谐波分量,为规避 IEEE Std. 1459-2010 标准中未给出间谐波功率定义这一缺陷,文中工作中采用的是第二种方案。目前,有学者尝试过用第二种方案进行电能计量,但仅粗略地将电能分为了基波和总畸变成分,而未能计及间谐波分量。

文中工作中提出的基于 S 变换及其逆变换的动态电能计量算法的具体流程,见图 1。其中,所依据的相关标准是 GB/T 14549-1993《电能质量 公用电网谐波》^[18]和 GB/T 24337-2009《电能质量 公用电网间谐波》^[19]。按照该算法流程,对频率点的提取,是先确定直流分量和基波分量的频率点,然后,根据频率点序号之间的整除关系,再去区分谐波分量与间谐波分量的频率点。

由图 1 可知,对直流和基波频率点,只需将它们对应的电压、电流离散序列分别进行点积和运算,即可得到直流和基波电能分量。对谐波各频率点,根据“同频出功率”原理,应先将电压、电流的特征频率点做交集运算,即要先求得电压、电流的公共特征频率点,再对这些公共特征频率点的电压、电流离散序列进行点积和运算,便可求得相应的谐波电能分量。而对间谐波各频率点,根据文献[2]给出的“不同次间谐波分量作用会产生电能”的结论,应先将电压、电流的特征频率点做并集运算,即求得电压、电流的所有特征频率点,之后,再对所有特征频率点的电压、电流离散序列进行点积和运算,便可求出含有的间谐波电能分量。

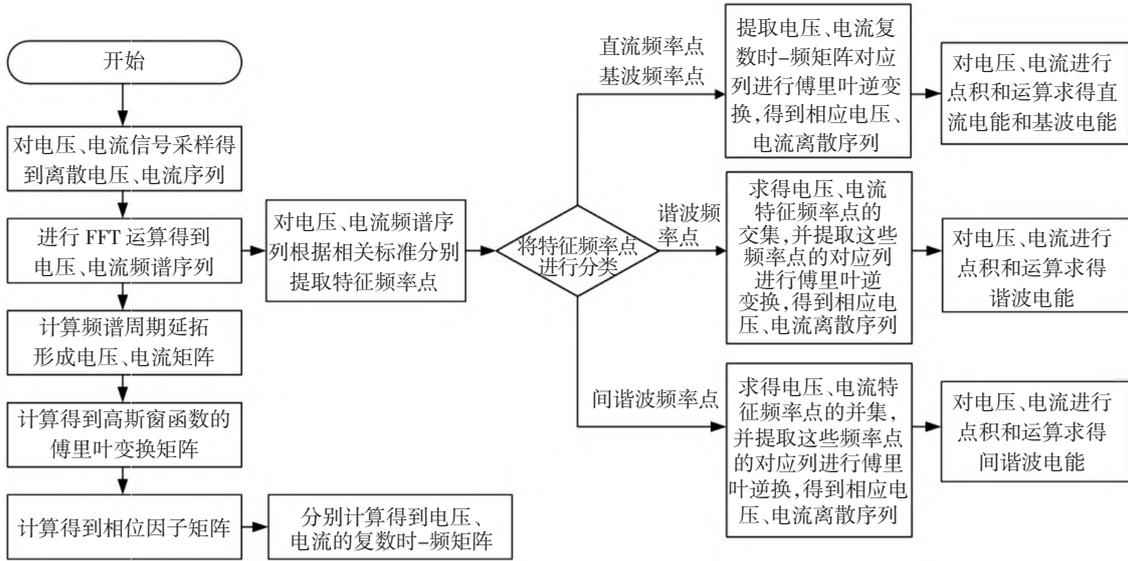


图 1 基于 S 变换的动态电能计量算法流程

Fig. 1 Flow of dynamic electric energy metering algorithm based on S transform

3 对所提出算法的误差校验及仿真测试

3.1 算法性能的基础性测试

现有国际和国家标准中,均未涉及智能电能表动态性能的测试。但在 2020 年发布的中国仪器仪表行业协会团体标准 T/CIMA 0020-2020《交流电能表动态性能检验装置》^[10]中,给出了形成功率和电能的 6 种动态电压、电流测试信号模型——基波频率均为 50 Hz,6 种电压信号都相同,仅为正弦稳态电压 $u_s(t) = 220\sqrt{2}\sin(314t) \text{ V}$;6 种动态电流测试信号各不相同,具体见表 2。表 2 中序号①-⑥与表 1 中的各测试信号模型相对应。

表 2 动态电流信号相关参数的取值

Tab. 2 Values of the relevant parameter of dynamic current signals

动态电流测试信号模型	相关参数预设值
①	$X_m = 0.5, X_d = 1, f_a = 5 \text{ Hz}, \varphi_a = \varphi_0 = 0$
②	$X_m = 0.5, X_d = 1, f_a = 5 \text{ Hz}, \varphi_0 = 0$
③	$X_m = 0.5, f_d = 0.5 \text{ Hz}, f_p = 5 \text{ Hz}, \varphi_p = \varphi_0 = 0$
④	$X_m = 0.5, X_d = 1, f_a = 5 \text{ Hz}, \varphi_a = 0.1, \varphi_0 = 0$
⑤	/ (无需设置相关参数)
⑥	$m(k) = [1001]$

这里,就先从施加文献[10]给出的单一正弦稳态电压、6 种不同动态电流测试信号入手,对文中提出的基于 S 变换动态电能计量算法的性能进行基础性测试,检验其电能计量误差,所得测算结果见表 3。表 3

中的理论值以点积和的计算结果作为参照。

表 3 基于 S 变换的动态电能计量算法误差校验

Tab. 3 Error verification of dynamic electric energy metering algorithm based on S transform

模型	理论值(总电能)	S 变换	误差(数量级)
①	21.99999999999950	22.00000000000170	10^{-13}
②	22.00000000000014	21.99999999999854	10^{-13}
③	21.945034365452869	21.945034365452866	10^{-15}
④	21.945034365452916	21.945034365453004	10^{-14}
⑤	22	21.99999999999847	10^{-13}
⑥	13.200000000000003	13.19999999999690	10^{-13}

由表 3 可知,将 S 变换应用于工频正弦稳态电压与 6 种不同动态电流测试信号形成动态电能的测算误差均很小,最大为 10^{-13} 量级,将该算法用于智能电能表,不会对其计量准确度构成负面影响。

但实施上述基础性测试中,电压测试信号中仅包含基波分量,即是正弦稳态的。如此的仿真检验,并未将 S 变换能够把直流、基波、谐波和间谐波电能分开计量的优势体现出来。

3.2 复杂测试信号下算法性能的仿真测试

这里,改将电压测试信号也设置为含有多种频率分量的稳态或动态信号,进而再测试所提出的动态电能计量算法的性能。为鲜明体现该算法可将直流、基波、谐波和间谐波电能分开计量的优越性,还增加了对 FFT 算法和小波(包)变换算法性能的比较性仿真测算验证。测试过程中,这三种算法的相关参数设置如下:

FFT、小波(包)变换和 S 变换算法的采样频率均设

置为 6.4 kHz; 采样时间, 依据 IEC 61000-4-7 标准, 都确定为 10 个工频周期(0.2 s)。对小波(包)变换, 具体采用的是基函数具有快速衰减特性和良好光滑性(正则性)的 DMeyer 小波。考虑到偶次谐波含量通常较低、可不计及, 故做小波包分解时, 将各频带宽度设定为 100 Hz 较为合理——每个频带内正好只有一个基波分量或奇数次谐波分量(不考虑直流分量时); 采样频率 6.4 kHz 下, Nyquist 采样频率为 3.2 kHz, 则 DMeyer 小波经过 5 层分解后, 可形成 32 个频带, 每个频带宽度正好 100 Hz。

3.2.1 直流加稳态谐波下的算法性能仿真测试

对电压、电流测试信号中基波和奇次谐波分量的设置, 具体参照 GB/T 17215.302-2013《交流电测量设备特殊要求 第 2 部分: 静止式谐波有功电能表》中的建议^[20], 并再增加相应的直流、偶次谐波和间谐波分量, 测试信号中各分量的频率及幅值, 具体见表 4(初相角均设为 0)。

表 4 电压、电流测试信号的各分量信息
Tab. 4 Each component information of voltage and current test signals

谐波频率/Hz	U/V	I/A
0	0	0.5
50	$100\sqrt{2}$	$1.5\sqrt{2}$
75	0	0.35
100	0.5	0.02
150	$3.8\sqrt{2}$	$0.45\sqrt{2}$
225	$2.8\sqrt{2}$	$0.35\sqrt{2}$
250	$2.4\sqrt{2}$	$0.27\sqrt{2}$
350	$1.7\sqrt{2}$	$0.21\sqrt{2}$

上述电压、电流测试信号的直流、基波、谐波和间谐波电能的理论值, 以及经 FFT、小波(包)变换和 S 变换算法测算得到的结果, 具体见表 5。

表 5 稳态下三种算法的电能测算结果
Tab. 5 Electric energy measurement results of three algorithms under steady state

信号分量	理论值	FFT	小波变换	S 变换
直流	0	0	0 ~ 100Hz: 29.978 5	0
基波	30	30	100 ~ 200Hz: 0.404 4	30
谐波	0.544	0.544	200 ~ 300Hz: 0.303 9	0.544
间谐波	0.196	\	300 ~ 400Hz: 0.070 6	0.196
总电能	30.74	30.544	30.757 4	30.74

表 5 中的“\”表示以 FFT 算法计量间谐波电能缺少理论依据。若采用常用的小波变换算法, 当一个频带里含有多个不同分量时, 无法准确测算电能的不同分量; 而若增加小波的分解层数以区分各不同分量, 势必会增大算法复杂度、增加运算量。而相比于 FFT 和小波变换算法, 提出的基于 S 变换的动态电能计量算法, 则可更准确地测算出间谐波电能, 并且具有理论根据; 同时, 在相同采样频率条件下, 该算法还能对频率点进行精确地定位并加以区分, 可实现将不同电能分量分开进行计量的目标。测算结果还反映出, 所提出的基于 S 变换的动态电能计量算法, 也能够足够准确地测算周期非正弦稳态电能。

3.2.2 非稳态下算法性能的仿真测试

有关非稳态的形成电能的电压、电流测试信号, 选取一种较为典型的电力电子变频装置的输出信号模型, 其显著特征是, 在不同的时间区间, 电压、电流信号会出现突然增加某个新的频率分量。这种仿真测试用动态即非稳态测试信号可表征为:

$$u(t) = \begin{cases} 10 + 100\sqrt{2}\sin(2\pi ft) & 0 < t \leq t_1 \\ 10 + 100\sqrt{2}\sin(2\pi ft) + 12\sqrt{2}\sin(2\pi 3ft) & t_1 < t \leq t_2 \\ 10 + 100\sqrt{2}\sin(2\pi ft) + 12\sqrt{2}\sin(2\pi 3ft) + 10\sqrt{2}\sin(2\pi 4.5ft) & t_2 < t \leq t_3 \\ 10 + 100\sqrt{2}\sin(2\pi ft) + 12\sqrt{2}\sin(2\pi 3ft) + 10\sqrt{2}\sin(2\pi 4.5ft) + 8\sqrt{2}\sin(2\pi 7ft) & t_3 < t \leq t_4 \end{cases} \quad (14)$$

$$i(t) = \begin{cases} 1 + 10\sqrt{2}\sin(2\pi ft) & 0 < t \leq t_1 \\ 1 + 10\sqrt{2}\sin(2\pi ft) + 1.2\sqrt{2}\sin(2\pi 3ft) & t_1 < t \leq t_2 \\ 1 + 10\sqrt{2}\sin(2\pi ft) + 1.2\sqrt{2}\sin(2\pi 3ft) + \sqrt{2}\sin(2\pi 4.5ft) & t_2 < t \leq t_3 \\ 1 + 10\sqrt{2}\sin(2\pi ft) + 1.2\sqrt{2}\sin(2\pi 3ft) + \sqrt{2}\sin(2\pi 4.5ft) + 0.8\sqrt{2}\sin(2\pi 7ft) & t_3 < t \leq t_4 \end{cases} \quad (15)$$

式中 $t_1 = 0.04$ s, $t_2 = 0.08$ s, $t_3 = 0.14$ s, $t_4 = 0.2$ s。

经测算, 由上述非稳态电压、电流测试信号形成的直流、基波、谐波和间谐波电能分量的理论值, 以及经 FFT、小波变换和所提出算法的相应电能计量结果, 具

体见表 6。

由表 6 可以看出, FFT 算法和所提出算法在直流及基波电能分量测算上无误差, 这是由于直流和基波电能分量在整个采样时段内都一直存在; 而小波变换

算法,则因为在第 1 个频带(0 Hz ~ 100 Hz)内同时包含直流和基波电能分量,但其对它们无法加以区分,且直流电能和基波电能之和的测算值与相应的理论值并不相等。为进一步说明提出的基于 S 变换的动态电能计量算法在非稳态条件下可按各分量分开测算电能的优越性,表 7 给出了上述三种算法测算谐波、间谐波及总电能的误差。

表 6 非稳态下三种算法的电能测算结果
Tab. 6 Electric energy metering results of three algorithms under non-steady state

信号分量	理论值	FFT	小波变换	S 变换
直流	2	2		2
基波	200	200	201.7468	200
谐波	2.688	1.509 2	2.307 7	2.672
间谐波	1.2	0.432 2	0.652 1	1.1932
总电能	205.888	203.941 4	204.706 6	205.865 2

表 7 非稳态下三种算法的电能测算误差
Tab. 7 Electric energy metering errors of three algorithms under non-steady state

信号分量	误差/%		
	FFT	小波变换	S 变换
谐波	43.85	14.15	0.60
间谐波	63.98	45.66	0.57
总电能	0.95	0.57	0.01

从表 7 中提供的测算误差可见,非稳态下电压、电流条件下,提出的基于 S 变换的动态电能计量算法在谐波电能、间谐波电能以及总电能测算上,其误差均远小于其他两种算法的测算误差。

4 结束语

所提出的基于 S 变换的动态电能计量算法,其由动态电压、电流测试信号形成电能的测算误差很小,完全满足电能计量的相关准确度等级要求,且对稳态和非稳态情况具有兼容性;与 FFT 算法和小波变换算法相比,提出的这种动态电能计量算法能克服 FFT 算法在非稳态条件下电能计量准确度不高的缺陷,并且可规避小波变换算法引入频带概念后,无法对多个不同频率分量并存的频带进行分电能计量的不足,可对动态电能的更准确计费提供合理可信的理论依据。

应该指出,电网实际电压、电流信号的动态变化复杂多样,对其做典型化分类与建模,可以归纳出若干种类。而文中研究中,仅验证了所提出算法在电网电压、电流信号存在频率分量新增情况的电能测算准确性,而对电网电压、电流存在频率偏移等其他动态情况下如何

更准确地测算电能,则还有待进行更多、更深入地研究。

参 考 文 献

[1] 李斌勤,陈伟根,李刚. 谐波对电网中有功计量装置的影响[J]. 电网技术, 2010, 34(6): 154-159.
Li Binqin, Chen Weigen, Li Gang. Analysis on affects of harmonics on active energy metering devices[J]. Power System Technology, 2010, 34(6): 154-159.

[2] 徐文佳,赵伟,黄洪涛,等. 计及间谐波的电能计量方法[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 656-662.
Xu Wenjia, Zhao Wei, Huang Hongtao, et al. A method for electrical energy measurement in consideration of inter-harmonics[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 656-662.

[3] 刘涛,庄双勇,陈晓伟,等. 基于四阶 Hanning 自乘窗 FFT 三峰插值的电能计量新算法[J]. 电测与仪表, 2017, 54(21): 1-6, 41.
Liu Tao, Zhuang Shuangyong, Chen Xiaowei, et al. A new algorithm for electric energy measurement based on four-order Hanning self-multiplication window triple-spectrum-line interpolation FFT[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(21): 1-6, 41.

[4] 陈文礼,何蓓,郑可,等. 加窗插值 FFT 与 ESPRIT 结合方法的动态负荷电能计量[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(2): 14-18, 31.
Chen Wenli, He Bei, Zheng Ke, et al. Combined Method of Windowed Interpolation FFT and ESPRIT for Dynamic Load Power Metering[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(2): 14-18, 31.

[5] 赵恒一,高云鹏,申丽曼,等. 电压闪变影响下的功率计算模型与电能计量方法研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(1): 121-130.
Zhao Hengyi, Gao Yunpeng, Shen Liman, et al. Research on power calculation model and energy metering method under the influence of voltage flicker[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(1): 121-130.

[6] 尉怡青,赵伟,陈垒,等. 计及间谐波的重分组小波包变换功率电能测算新方法[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(22): 7480-7490.
Yu Yiqing, Zhao Wei, Chen Lei, et al. New power and electric energy measurement algorithm in consideration of interharmonics based on re-grouped wavelet packet transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(22): 7480-7490.

[7] 丁忠安,雷万钧,郑可,等. 基于 S 变换解构算法的电能计量方法研究[C]//第三届全国电能质量学术会议暨电能质量行业发展论坛论文集. 2013: 9.

[8] 郑可,欧习洋,袁露,等. 基于二进制采样快速 S 变换算法的电能计量方法研究[J]. 电测与仪表, 2016, 53(2): 27-33.
Zheng Ke, Ou Xiyang, Yuan Lu, et al. Research electric energy measurement algorithm with fast S transform based on binary sampling[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(2): 27-33.

[9] 倪伟伦,顾丹珍,曹依烈,等. 基于改进 S 变换的非稳态信号的电能计量方法研究[J/OL]. 电测与仪表: 1-9 [2021-08-25]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210420.1345.004.html>.

[10] T/CIMA 0020-2020, 交流电能表动态性能检验装置[S].

[11] 王婧. 伪随机动态测试信号建模与智能电表动态误差测试方法[D]. 北京:北京化工大学, 2020.

[12] 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[J]. 电测与仪表, 2010, 47(10): 1-5, 20.

(下转第 115 页)

(5): 1068-1086.

[9] Vasques T L, Moura P, de Almeida A. A review on energy efficiency and demand response with focus on small and medium data centers[J]. Energy Efficiency, 2019, 12: 1399-1428.

[10] Peng X, Bhattacharya T, Cao T, et al. Exploiting renewable energy and UPS systems to reduce power consumption in data centers[J]. Big Data Research, 2022, 27: 100306-10313.

[11] Li H, Hou J, Hong T, et al. Energy, economic, and environmental analysis of integration of thermal energy storage into district heating systems using waste heat from data centres [J]. Energy, 2021, 219: 119582-119590.

[12] Dabbagh M, Hamdaoui B, Rayes A. Peak power shaving for reduced electricity costs in cloud data centers: Opportunities and challenges[J]. IEEE Network, 2020, 34(3): 148-153.

[13] Chapaloglou S, Nesiadis A, Iliadis P, et al. Smart energy management algorithm for load smoothing and peak shaving based on load forecasting of an island's power system [J]. Applied energy, 2019, 238: 627-642.

[14] Torre E, Durillo J J, De Maio V, et al. A dynamic evolutionary multi-objective virtual machine placement heuristic for cloud data centers[J]. Information and Software Technology, 2020, 128: 10639-10646.

[15] Gao J, Wang H, Shen H. Smartly handling renewable energy instability in supporting a cloud datacenter[C]//2020 IEEE international parallel and distributed processing symposium (IPDPS), 2020: 769-778.

[16] Shirvani M H, Rahmani A M, Sahafi A. A survey study on virtual machine migration and server consolidation techniques in DVFS-enabled cloud datacenter: taxonomy and challenges[J]. Journal of King Saud U-

niversity-Computer and Information Sciences, 2020, 32(3): 267-286.

[17] Thein T, Myo M M, Parvin S, et al. Reinforcement learning based methodology for energy-efficient resource allocation in cloud data centers [J]. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 2020, 32(10): 1127-1139.

[18] Silva V R G, Furtunato A F A, Georgiou K, et al. Energy-optimal configurations for single-node HPC applications [C]//2019 International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS), 2019: 448-454.

[19] Ghobaei-Arani M, Khorsand R, Ramezanpour M. An autonomous resource provisioning framework for massively multiplayer online games in cloud environment[J]. Journal of Network and Computer Applications, 2019, 142: 76-97.

[20] Yuan H, Liu H, Bi J, et al. Revenue and energy cost-optimized bi-objective task scheduling for green cloud data centers[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, 2020, 18(2): 817-830.

作者简介:



周小光(1988—),男,工程师,硕士,研究方向为调度自动化、数字电网。
Email: littlelightxg@163.com

收稿日期:2023-02-15;修回日期:2023-04-18
(王克祥 编发)

(上接第 106 页)

[13] Z. Lu, M. Li, Z. Zhu, J. Zheng, L. Wang and E. So. Evaluation of the dynamic performance characteristic of electrical energy meters//2012 Conference on Precision electromagnetic Measurements, 2012, pp. 120-121, doi: 10.1109/CPEM.2012.6250690.

[14] 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[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(18): 4847-4853, 5108. Wang Xuwei, Lv Pang, Wang Lin, et al. TASK Power Model Based Dynamic Error Testing for Electricity Meter [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(18): 4847-4853, 5108.

[15] Wang, Xuwei, Di Wu, Ruiming Yuan, Zhenyu Jiang and Jing Yang. Dynamic test signal modelling and a compressed sensing based test for electric energy meter errors. Measurement 164 (2020): 107915.

[16] R. G. Stockwell, L. Mansinha and R. P. Lowe, "Localization of the complex spectrum; the S transform," in IEEE Transactions on Signal Processing, vol.44, no. 4, pp. 998-1001, April 1996, doi: 10.1109/78. 492555.

[17] R. d. A. Coelho and N. S. D. Brito, "Power Measurement Using Stockwell Transform," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 36, no. 5, pp. 3091-3100, Oct. 2021, doi: 10.1109/TPWRD.2020.3033403.

[18] GB/T 14549-1993, 电能质量 公用电网谐波[S].

[19] GB/T 24337-2009, 电能质量 公用电网间谐波[S].

[20] GB/T 17215. 302-2013, 交流电测量设备特殊要求 第2部分:静止式谐波有功电能表[S].

作者简介:



邵方静(1988—),女,工程师,硕士,研究方向为电测量。Email:871082749@qq.com

宋晓林(1973—),男,教授级高级工程师,硕士,研究方向为电测量。Email:sxlgoodluck@163.com

刘坚(1997—),男,硕士研究生,研究方向为现代电磁测量技术和方法。Email:liujian20@mails.tsinghua.edu.cn

魏宇(1986—),男,工程师,本科,研究方向为电能计量。Email:xyweicheng@163.com

尉怡青(1995—),女,博士研究生,研究方向为电能计量、功率理论研究。Email:wuyiq16@mails.tsinghua.edu.cn

赵伟(1956—),男,教授,博士,研究方向为现代电磁测量理论及方法。Email:zhaowei@tsinghua.edu.cn

收稿日期:2021-11-05;修回日期:2022-01-19
(田春雨 编发)