

# 基于改进 S 变换的非稳态信号的电能计量方法研究

倪伟伦<sup>1</sup>, 顾丹珍<sup>1</sup>, 曹依烈<sup>1</sup>, 童涛<sup>2</sup>

(1. 上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网上海市电力公司电力科学研究院, 上海 200051)

**摘要:**随着智能电网的不断发展,非线性负荷大量接入电网,产生的非稳态信号对电能计量造成了影响。为了提高非稳态信号的时频分辨率,文中在 S 变换的基础上,针对电网非稳态信号的特征并根据窗函数设计原则改进了高斯窗尺度因子  $\sigma$ 。此外,为保证非稳态信号下计量的精确性和合理性,应实现基波电能和畸变电能的分开计量,为此本文提出基于改进 S 变换的电能计量方法,利用改进 S 变换优秀的时频分辨率实现基波电能和畸变电能的分解重构。通过对几个典型的非线性负荷信号的仿真验证了改进 S 变换算法在电能计量上的优越性和有效性。

**关键词:**非稳态信号; S 变换算法; 时频分析; 电能计量

**DOI:**10.19753/j.issn1001-1390.2024.05.024

中图分类号: TM933

文献标识码: B

文章编号: 1001-1390(2024)05-0175-07

## Research on electric energy measurement method based on improved S-transform for unsteady signal

NI Weilun<sup>1</sup>, GU Danzhen<sup>1</sup>, CAO Yilie<sup>1</sup>, TONG Tao<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China. 2. Electric Power Research Institute of State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200051, China)

**Abstract:** With the development of smart grid, nonlinear load is connected to the grid in large numbers, and the unsteady signal has an impact on the measurement of electric energy. In order to improve the time-frequency resolution of the unsteady signal, this paper improves the Gaussian window scale factor  $\sigma$  according to the characteristics of the unsteady signal and the design principle of the window function. In addition, in order to ensure the accuracy and rationality of the measurement under the unsteady signal, the fundamental energy and the distorted energy should be measured separately. Therefore, this paper proposes an electric energy measurement method based on the improved S-transform, which uses the excellent time-frequency resolution of the improved S-transform to realize the decomposition and reconstruction of the fundamental energy and the distorted energy. Through the simulation of several typical nonlinear load signals, the superiority and effectiveness of the improved S-transform algorithm in electric energy measurement are verified.

**Keywords:** unsteady signal, S-transform algorithm, time-frequency analysis, electric energy measurement

### 0 引言

电网是根据电能进行经济核算的,电能计量的精确度直接影响到电网和用户之间的经济效益。随着电力系统的高速发展,大量非线性负荷接入电网,非线性负荷产生的非稳态信号具有冲击性、波动性和随机性等特点<sup>[1]</sup>,导致电网中的电压电流信号发生严重畸变,进而对电能计量造成严重的影响。

国内外学者在动态误差计量算法领域的研究有:加窗 FFT、小波变换、S 变换和神经网络算法等。

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(51807114);国家电网有限公司总部科技项目(25094016000S);上海绿色能源并网工程技术研究中心赞助项目(13DZ900)

其中神经网络算法多用于建立动态负荷模型<sup>[2]</sup>,其余算法多用于电能表中的数字信号处理器(DSP)中。文献[3-4]在 FFT 的基础上加汉宁窗以减少频谱泄露,进一步提高了稳态谐波信号的电能计量精度。但是窗函数固定不利于非稳态信号的分析与计量,因此文献[5-6]利用小波变换窗口随频率变换的特点,提出了基于小波变换的电能计量方法,克服了 FFT 窗函数固定的缺陷,进一步提高了非稳态信号的电能计量精度。但小波变换存在的频率混叠现象使得计量误差增加,S 变换作为 FFT 和小波变换的继承与发展,克服了 FFT 和小波变换的缺陷,然而 S 变换无法在信号的低频和低频处获得很

好的时频分辨率<sup>[7]</sup>。为了提高传统 S 变换的时频分辨率,文献[8-9]提出广义 S 变换,提高了窗函数的灵活性,通过仿真验证了广义 S 变换具有更好的计量精度。

针对电力系统中出现的非稳态信号的特征,窗函数应该遵循原则是<sup>[10]</sup>:在低频时希望有较高的时间分辨率,以便定位与识别电压或电流的冲击成分;在高频时希望有较高的频率分辨率,以便更好地识别振荡。S 变换和现有的广义 S 变换无法满足该原则,原因就在于其高斯窗尺度因子  $\sigma$  随频率呈反比变化。因此如何构造出符合窗函数设计原则的改进 S 变换电能计量方法仍需进一步的研究。

据此,本文在 S 变换的基础上,改进窗函数尺

度因子  $\sigma$ ,使其满足非稳态信号下窗函数设计原则,验证了其在分析非稳态信号时具有更好的时频分辨率。同时通过非稳态信号的电能计量仿真实验,验证了改进 S 变换算法在电能计量上的优越性和合理性。

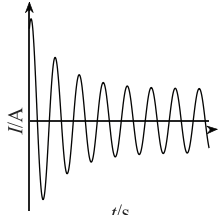
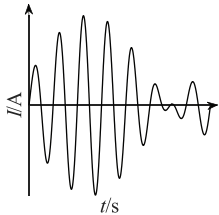
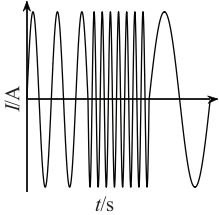
## 1 非稳态信号特征及电能计量

### 1.1 非稳态信号

正弦波的幅值、频率随时间可能发生变化且呈现出随机性、波动性和冲击性等特征的信号为非稳态信号。电力系统中的非稳态信号主要是由非线性负荷产生,如电力牵引站、电弧装置和半导体整流器等。电网中典型非线性负荷的信号特征及简化数学模型如表 1 所示。

表 1 典型非线性负荷信号类型及特点

Tab. 1 Types and characteristics of typical nonlinear load signals

负荷	典型波形	特点	简化数学模型
电力机车		启动时为典型冲击性负荷,电流信号在初始时刻出现冲击电流,其幅值可达额定负载电流的几倍,持续时间短,属于快变信号	$i(t) = [1 + M e^{-\frac{t}{\tau}}] I_m \sin(\omega_N t + \delta_n)$ 式中 $I_m$ 、 $\omega_N$ 和 $\delta_n$ 为基波电流的幅值、角速度和初相; M 和 $\tau$ 定义冲击信号的最大值和衰减速度
电弧炉		工业负荷电弧炉属于快速变化的波动性负荷,电流信号幅值波动相对电压更加剧烈,且其在投入运行过程中会产生大量的间谐波成分	$i(t) = I_m [1 + m \sin \omega_F t] \sin \omega_N t$ 式中 $I_m$ 和 $\omega_N$ 为工频载波信号的幅值和角速度;m 和 $\omega_F$ 为调幅波的幅值和角速度
变频装置		各种变频装置的大量使用,导致信号的频率成分因不同工况而发生变化,因此电压、电流信号往往是频变信号	$i(t) = \begin{cases} I_{m1} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) & t \in [t_1, t_2) \\ I_{m2} \sin(\omega_2 t + \varphi_2) & t \in [t_2, t_3) \\ I_{m3} \sin(\omega_3 t + \varphi_3) & t \in [t_3, t_4) \end{cases}$ 式中 $I_{m1}$ 、 $\omega_1$ 、 $\varphi_1$ 、 $I_{m2}$ 、 $\omega_2$ 、 $\varphi_2$ 、 $I_{m3}$ 、 $\omega_3$ 、 $\varphi_3$ 为不同时间段的信号幅值、角速度和初相

### 1.2 电能计量方式

由于非线性负荷的存在,电网中电压和电流信号不再是简单的周期信号,而是非稳态信号,可以将其分解为:

$$u(t) = u_0 + u_f(t) + u_d(t) \quad (1)$$

$$i(t) = i_0 + i_f(t) + i_d(t) \quad (2)$$

式中  $u_0$ 、 $i_0$  为电压电流直流分量;  $u_f(t)$ 、 $i_f(t)$  为电压电流基波分量,即以 50 Hz 为工频载波的信号;  $u_d(t)$ 、 $i_d(t)$  为电压电流畸变分量,即以非 50 Hz 为工频载波的信号。由于负荷需要消耗的实际是基波电能,将电网中的谐波、间谐波、电压波动和冲击信号等其他形式的非稳态信号进行如式(1)、式(2)的分解

有利于分开计量基波电能和畸变电能。

根据正弦信号相交理论可知,只有同频率的电压畸变分量和电流畸变分量才能产生有功功率,非同频率的电压分量与电流分量进行离散时域积分的结果为 0<sup>[11]</sup>。因此,通过功率点积法在交流系统中(不考虑直流分量)采样间隔  $\Delta t$  内消耗的电能

$$W_\Sigma = \left[ \sum_{k=1}^N u(t_k) \times i(t_k) \right] \Delta t = \left[ \sum_{k=1}^N (u_f(t_k) + u_d(t_k)) \times (i_f(t_k) + i_d(t_k)) \right] \Delta t = \sum_{k=1}^N \left[ u_f(t_k) \cdot i_f(t_k) \right] \Delta t + \sum_{k=1}^N \left[ u_d(t_k) \cdot i_d(t_k) \right] \Delta t = W_f + W_d \quad (3)$$

式中  $W_f$  为基波电能值;  $W_d$  为畸变电能值;  $W_s$  为全电能计量值。

## 2 用于电能计量的改进 S 变换

### 2.1 改进 S 变换原理

传统 S 变换是将短时傅里叶变换中的窗函数替换成高斯窗函数,高斯窗函数的窗宽与频率的倒数成正比<sup>[12]</sup>,免去了窗函数的选择和克服了窗宽固定的缺陷,其时域表达式为:

$$\begin{cases} S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)h(t, \sigma, \tau) e^{-j2\pi ft} dt \\ h(t, \sigma, \tau) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\tau)^2}{2\sigma^2}} \\ \sigma = \frac{1}{|f|} \end{cases} \quad (4)$$

式中  $h(t, \sigma, \tau)$  为高斯窗函数;  $x(t)$  为待分析信号;  $\tau$  为时间平移因子;  $\sigma$  为窗函数宽度的尺度因子;  $\sigma$  将窗宽与频率联系起来,使窗宽不再固定。目前学者研究的广义 S 变换均是采取  $\sigma = \frac{1}{a|f|^b}$  型的窗宽尺度因子<sup>[12-18]</sup>。总结起来有以下三种典型类型:

$$\begin{cases} a = 0.1, b = 1 \\ a = 1, b = 0.8 \\ a = 1.1, b = 0.75 \end{cases} \quad (5)$$

前面提到:窗函数应在低频段有较高的时间分辨率而高频段有较高的频率分辨率。根据此原则提出新的窗函数时间宽度尺度因子  $\sigma$  为:

$$\sigma(f) = s |f|^r \quad (6)$$

由式(6)可知改进 S 变换窗宽和频率呈正比关系,式中  $s$  为高斯窗振幅因子;  $r$  为频率指数调节因子,用来调节和抑制窗函数变化速度。

#### 2.1.1 调节因子的选取

图 1 和图 2 展示了改进 S 变换在参数  $s$  和  $r$  取值不同的条件下,时窗随频率是如何变化的。由图 1 中可以看出,在  $s$  值固定的情况下,当  $r > 0.1$  时,改进 S 变换时窗宽度随频率呈正比变化的速度加快,但过快的变化速度会导致时间分辨率的快速下降,当  $r < 0.1$  时,则减慢;由图 2 中可以看出,在  $r$  值固定的情况下,当  $s > 0.1$  时,改进 S 变换的时窗宽度过大,在低频时无法保证良好的时间分辨率。因此合适的取值范围为  $s, r \in (0, 0.1]$ 。

#### 2.1.2 改进 S 变换推导

将式(6)替换式(4)中的  $\sigma$  即可得到改进 S 变换的连续表达式:

$$IST(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \frac{1}{s |f|^r \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\tau)^2}{2s^2|f|^{2r}}} e^{-j2\pi ft} dt \quad (7)$$

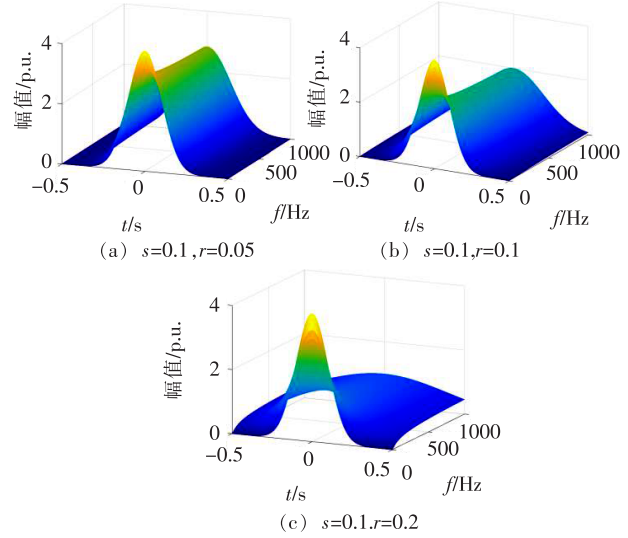


图 1  $s=0.1$ , 高斯窗随  $r$  的变化

Fig. 1 Gaussian window changes with  $r$  when  $s=0.1$

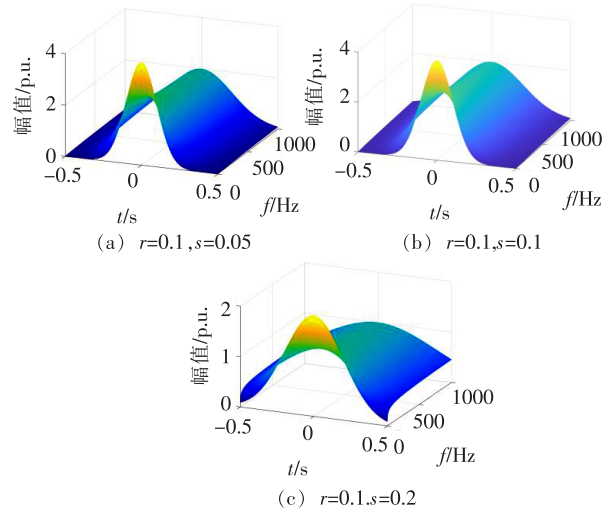


图 2  $r=0.1$ , 高斯窗随  $s$  的变化

Fig. 2 Gauss window changes with  $s$  when  $r=0.1$

利用傅里叶逆变换 (IFFT) 能够无损地实现改进 S 变换的逆变换,如式(8)所示:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \int_{-\infty}^{\infty} IST(\tau, f) \right\} e^{j2\pi ft} df \quad (8)$$

在算法仿真中,可以利用 FFT 来实现改进 S 变换。推导如下:

$$\begin{cases} ST(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t, f) y(\tau - t, f) dt = \\ x(\tau, f) * y(\tau, f) \\ x(\tau, f) = x(\tau) e^{-j2\pi f\tau} \\ y(\tau, f) = \frac{1}{s |f|^r \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{\tau^2}{2s^2|f|^{2r}}} \end{cases} \quad (9)$$

定义  $\tau \rightarrow f_a$  的傅里叶变换,令:

$$X(f_a) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau) e^{-j2\pi f_a \tau} d\tau \quad (10)$$

$$X(f_a + f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\tau, f) e^{-i2\pi f_a \tau} d\tau \quad (11)$$

则频域上的改进 S 变换公式为:

$$IST(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(f + f_a) e^{-2\pi^2 f_a^2 s^2 2r} e^{i2\pi f_a \tau} df_a \quad (12)$$

对式(11)进行离散化操作,设  $\tau = jT, f = \frac{n}{NT}$ ,

$f_a = \frac{m}{NT}$ , 则一维离散改进 S 变换的计算公式为:

$$\begin{cases} IST(jT, \frac{n}{NT}) = \sum_{m=0}^{N-1} X[\frac{n+m}{NT}] \\ \exp(-2\pi^2 m^2 s^2 n^2 r) \exp(i \frac{2\pi}{N} mj) \\ (j, m, n = 0, 1, \dots, N-1) \\ X[\frac{n}{NT}] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x[KT] \exp(-i \frac{2\pi}{N} nk) \end{cases} \quad (13)$$

同理可得一维离散改进 S 变换的逆变换的离散形式为,

$$x[KT] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ \sum_{j=0}^{N-1} IST[jT, \frac{n}{NT}] \right\} e^{i \frac{2\pi}{N} nk} \quad (14)$$

通过式(14)得到离散信号  $x[KT]$ , 其中  $T$  为时间采样间隔;  $N$  为时间采样点数;  $m$  为频移因子离散序号;  $n$  为频率值的离散序号;  $j$  为  $\tau$  的离散序号。

## 2.2 窗函数比较

设置采样时间为  $(-0.1, 0.1)$  s, 采样时间间隔为  $5 \times 10^{-3}$  s, 通过 Matlab 中的 Wvtool 工具对上述几种窗函数进行分析比较, 结果见图 3。

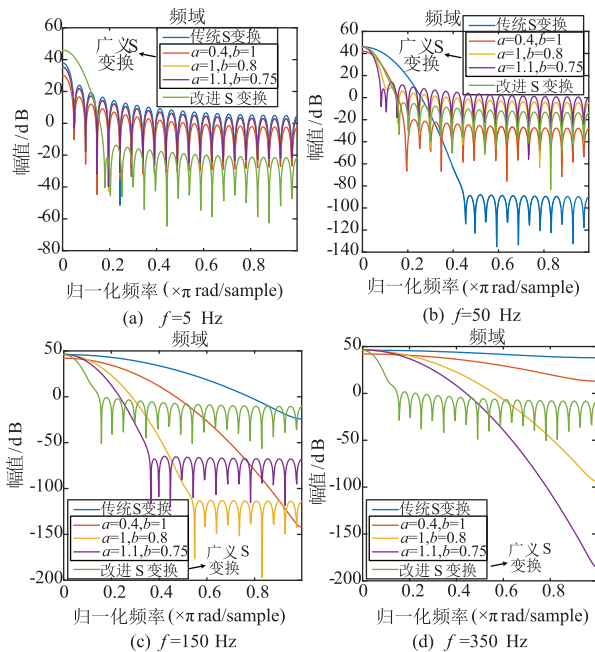


图 3 不同频率下的窗函数幅频特性

Fig. 3 Amplitude frequency characteristics of window function at different frequencies

从图 3 中可知: 在低频段, 改进 S 变换窗函数的主瓣宽度较宽, 此时时间分辨率较高; 在高频段, 改进 S 变换的主瓣宽度较窄, 频率分辨率较高。即改进 S 变换从原理上可以实现低频段有较高的时间分辨率而高频段有较高的频率分辨率。三种广义 S 变换相对比传统 S 变换在高频处的频率分辨率均得到了有效提高。其中第三种广义 S 变换相比其他两种广义 S 变换在高频段具有更好的频率分辨率。

## 2.3 改进 S 变换及逆变换的实现过程

改进 S 变换的结果是一个二维复数矩阵  $IST(jT, \frac{n}{NT})$ , 行代表频率而列代表时间, 矩阵元素代表对应时刻和频率下信号的幅值和相位信息。具体实现步骤如下:

- (1) 时间序列  $x[k]$  通过快速傅里叶变换求得的频谱  $X[n]$ ;
- (2) 计算频率为  $n$  的高斯窗函数的 FFT, 即为:  $W[n, m] = e^{-2\pi^2 m^2 s^2 n^2 r}$  (15)
- (3) 将  $X[n]$  平移, 得到平移后的频谱  $X[n + m]$ ;
- (4) 将  $X[n + m]$  乘以  $W[n, m]$  并作 IFFT, 得到改进 S 变换谱  $IST(jT, \frac{n}{NT})$ ;

(5) 重复步骤(3)、步骤(4)计算所有频率点, 即可得到完整的改进 S 变换矩阵; 而改进 S 变换的逆变换实现过程如下:

- (1) 将改进 S 变换矩阵  $IST(jT, \frac{n}{NT})$  按行求和;
- (2) 循环直到计算所有频率点, 得到频谱  $X[n]$ ;
- (3) 对频谱  $X[n]$  进行逆傅里叶变换 (IFFT), 得到离散时域信号  $x(k)$ 。

## 2.4 基于改进 S 变换的电能量测量方法

基于改进 S 变换的电能量测量流程图如图 4 所示。

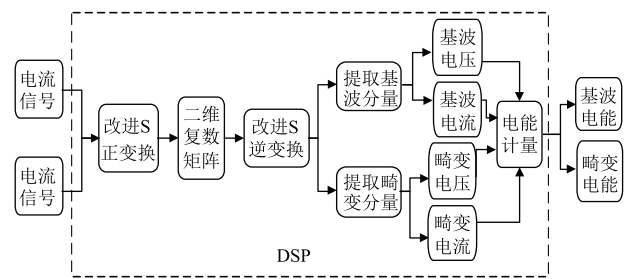


图 4 基于改进 S 变换的电能量测量步骤  
Fig. 4 Steps of electric energy measurement based on improved S-transform

### 2.4.1 电压电流基波分量和畸变分量的提取

对于电压电流信号的基波分量, 对应的 S 变换

只在频率为基波  $f_1$  时有值,其余频率均为零。对于电压电流信号的畸变信号,对应的 S 变换在基波  $f_1$  处为零,则信号的基波分量和畸变分量的改进 S 变换矩阵为:

$$IST_f(j, n) = \begin{cases} IST(j, f_1), & n = f_1 \\ 0, & n \neq f_1 \end{cases} \quad (16)$$

$$IST_d(j, n) = \begin{cases} 0, & n = f_1 \\ IST(j, f_{n \neq 1}), & n \neq f_1 \end{cases} \quad (17)$$

根据式(14)对上述基波和畸变分量进行逆变换,重构出信号的基波离散信号和畸变离散信号,如下式所示:

$$x_f(kT) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ \sum_{j=0}^{N-1} IST_f \right\} e^{\frac{j2\pi nk}{N}} \quad (18)$$

$$x_d(KT) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ \sum_{j=0}^{N-1} IST_d \right\} e^{\frac{j2\pi nk}{N}} \quad (19)$$

### 2.4.2 基波电能和畸变电能的计算

根据式(3),对重构电压电流时域离散信号  $x_f(kT)$  和  $x_d(KT)$  进行对应点相乘求和,再将累加结果乘以采样时间间隔  $T_s$ ,即可得到计算周期内的电能消耗值,

$$W_f = \sum_{k=0}^{N-1} u_f(kT) i_f(kT) \times T_s \quad (20)$$

$$W_d = \sum_{k=0}^{N-1} u_d(kT) i_d(kT) \times T_s \quad (21)$$

## 3 算例分析

### 3.1 算法比较

以文献[7]中的暂态脉冲信号为算例,设置基频  $f_1 = 50$  Hz,采样时长为 1 s,采样频率为 6.4 kHz。表 2 为几种算法对该暂态脉冲信号的电能计量结果,表 3 为几种算法的运算时间比较,可知改进 S 变换尤其在计量畸变电能时精度最高且运算速度相对最快。

表 2 暂态脉冲信号的电能计量

Tab. 2 Electric energy measurement of transient pulse signal

	$W_f / (W \cdot s)$	$W_d / (W \cdot s)$	$W_f$ 误差/%	$W_d$ 误差/%
理论值	11000	-66	-	-
汉宁窗 FFT	10 953.778	-65.892 4	-0.420 2	-0.163 0
小波变换	10 956.9125	-65.912 8	-0.391 7	-0.132 1
S 变换	10 999.871	-65.986 1	-0.001 2	-0.021 1
改进 S 变换	10 999.873	-65.994 3	-0.001 2	-0.008 7

表 3 运算时间比较

Tab. 3 Comparison of operation time

	汉宁窗 FFT	小波变换	S 变换	改进 S 变换
Matlab 运算时间/s	0.281	0.229	0.193	0.170

### 3.2 非线性负荷信号电能计量

设置仿真信号的基频为  $f_1 = 50$  Hz,采样频率  $f_s = 6.4$  kHz,进行 5 个基波周期的采样。由于待分析信号均为非稳态信号,故均取  $s = 0.03$  和  $r = 0.1$ 。因文献[7-9]已验证广义 S 变换相对于 S 变换在电能计量上的优越性,故本节对常用的 FFT 算法、广义 S 变换 ( $a = 1.1, b = 0.75$ ) 和改进 S 变换进行仿真分析。

#### 3.2.1 冲击性负荷的电能计量

电力机车冷启动时会产生冲击性电流,在运行过程中同时也会产生以 3、5、7 次谐波为主的高次谐波。构造以表 1 中的电力机车信号数学模型为基础的电压、电流信号。对电压和电流波形进行改进 S 变换提取出基波和畸变成分,结果(前 2 个基波周期)如图 5 所示。

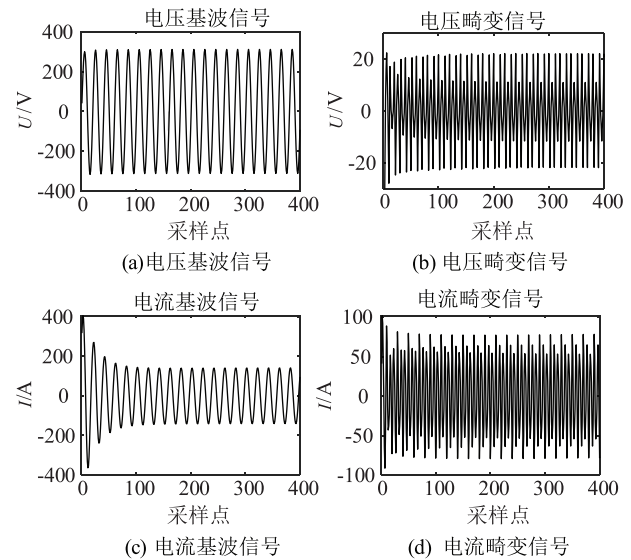


图 5 冲击性信号的分解结果

Fig. 5 Decomposition result of impact signal

根据式(1)~式(3)可求得构造信号的各部分电能计量理论值。改进 S 变换的电能计量结果和理论值、FFT、广义 S 变换的比较如表 4 所示。

表 4 电力机车负荷的电能计量

Tab. 4 Electric energy measurement of electric locomotive load

电能 / (W · s)	理论值 / (W · s)	FFT / (W · s)	广义 S 变换 / (W · s)	改进 S 变换 / (W · s)
$W_f$	11 710	11 680	11 737	11 725
$W_d$	-386	-383.53	-414.5	-402.3
$W_\Sigma$	11 324	11 296.47	11 322.5	11 322.7
电能 / (W · s)	FFT 误差 / %	广义 S 变换 误差 / %	改进 S 变换 误差 / %	
$W_f$	-0.256	0.23	0.13	
$W_d$	-0.64	7.38	4.2	
$W_\Sigma$	-0.243	-0.013	-0.011	

### 3.2.2 波动性负荷的电能计量

以电弧炉为代表的工业负荷在投入电网运行过程中既会产生频谱丰富的间谐波成分,又伴随着电压波动和闪变,其中电压幅值波动较小,电流幅值波动剧烈。以表 1 中的电弧炉信号数学模型为基础构造电压、电流信号。对电压和电流波形进行改进 S 变换提取基波和畸变成分,结果(前 3 个基波周期)如图 6 所示。

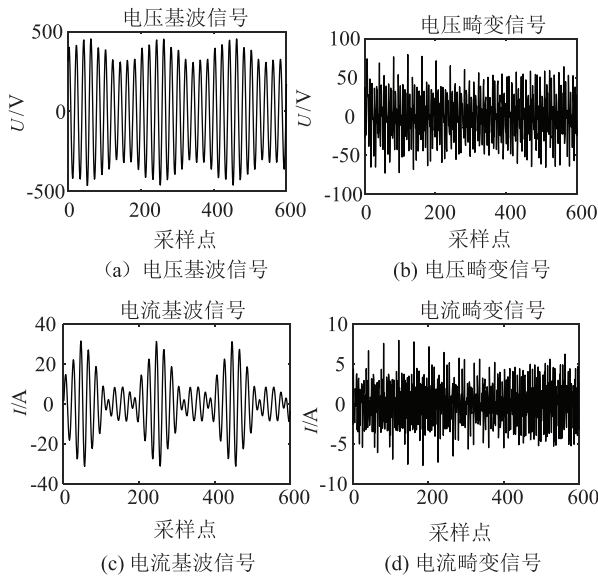


图 6 波动信号的分解结果

Fig. 6 Decomposition result of fluctuation signal

根据式(1)~式(3)可求得构造信号的各部分电能计量理论值。改进 S 变换的电能计量结果和理论值、FFT、广义 S 变换的比较如表 5 所示。

表 5 电弧炉负荷的电能计量

Tab. 5 Electric energy measurement of electric arc furnace load

电能 $/(W \cdot s)$	理论值 $/(W \cdot s)$	FFT $/(W \cdot s)$	广义 S 变换 $/(W \cdot s)$	改进 S 变换 $/(W \cdot s)$
$W_f$	1 599	1 343.8	1 612	1 599.2
$W_d$	76	29.91	61.97	74.74
$W_\Sigma$	1 675	1 373.71	1 673.97	1 673.94
电能 $/(W \cdot s)$	FFT 误差 /%	广义 S 变换 误差/%	改进 S 变换 误差/%	
$W_f$	-15.96	0.81	0.012 5	
$W_d$	-60.64	-18	-1.66	
$W_\Sigma$	-17.99	-0.061	-0.063	

### 3.2.3 变频负荷的电能计量

变频装置在运行过程中,在不同工况的影响下,会出现负荷频率随着时间的变化而变化的情况。构造以表 1 中的变频装置信号数学模型为基础构造电压、电流信号。对电压和电流波形进行改进

S 变换提取基波和畸变成分,结果如图 7 所示。

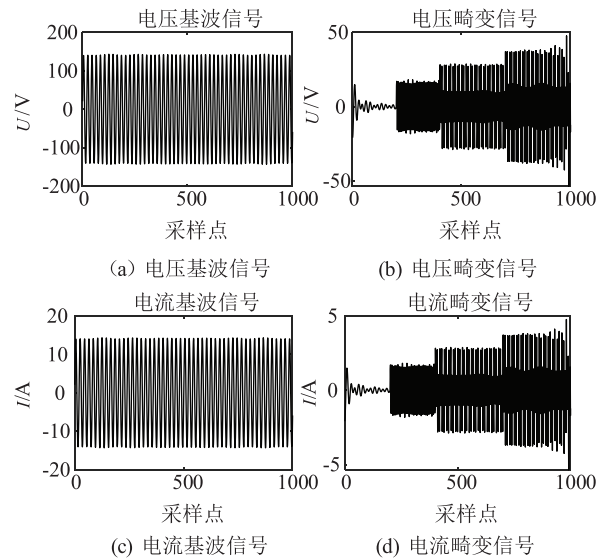


图 7 频变信号的分解结果

Fig. 7 Decomposition results of frequency-varying signals

根据式(1)~式(3)可求得构造信号的各部分电能计量理论值。改进 S 变换的电能计量结果和理论值、FFT、广义 S 变换的结果比较如表 6 所示。

表 6 变频装置的电能计量

Tab. 6 Electric energy measurement of frequency converter

电能 $/(W \cdot s)$	理论值 $/(W \cdot s)$	FFT $/(W \cdot s)$	广义 S 变换 $/(W \cdot s)$	改进 S 变换 $/(W \cdot s)$
$W_f$	1 000	1 000	998.944 6	999.435 3
$W_d$	20	13.37	20.495 4	20.004 7
$W_\Sigma$	1 020	1 013.37	1 019.44	1 019.44
电能 $/(W \cdot s)$	FFT 误 差/%	广义 S 变换 误差/%	改进 S 变换 误差/%	
$W_f$	0	-0.11	-0.056	
$W_d$	-33.15	2.5	0.0235	
$W_\Sigma$	-0.65	-0.055	-0.055	

FFT 变换、广义 S 变换 (GST) 和改进 S 变换 (IST) 的电能计量误差如图 8 所示。

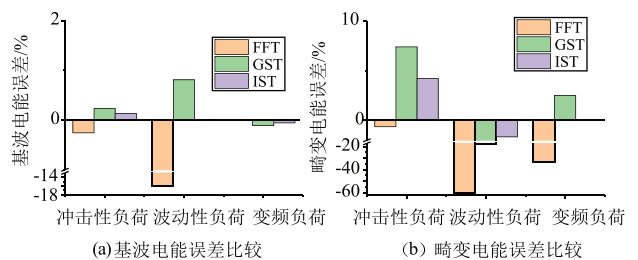


图 8 电能计量误差比较

Fig. 8 Comparison of electric energy measurement error

如图 8(a) 所示为基波电能的计量误差, 由于波动性负荷的基频分量波动剧烈, FFT 算法无法很好的辨识, 因此造成计量的误差较大; 而变频负荷的基频分量是稳态谐波分量, 用 FFT 算法计量具有很好的计量精度。

如图 8(b) 所示为畸变电能的计量误差, 由于冲击性负荷的电压电流畸变信号为稳态谐波信号, 因此 FFT 算法有很好的计量精度; 而波动性负荷的畸变信号含有大量间谐波成分, 变频负荷的畸变信号是时变信号, 导致 FFT 算法的计量误差较大, 此时改进 S 变换在计量畸变电能时计量精度更好。

#### 4 结束语

本文在 S 变换的基础上对高斯窗函数进行改进, 提出基于改进 S 变换的基波电能和畸变电能分开计量的电能计量方法, 通过对电网中典型非线性负荷的非稳态信号进行了仿真分析。仿真结果表明:

(1) 对比目前的加窗 FFT、小波变换、S 变换计量算法, 综合分析可知改进 S 变换算法的计量精度更高, 能够满足各种不同非稳态信号下的电能计量精度要求;

(2) FFT 算法在计量周期性稳态信号时仍具有较高的计量精度, 但是随着电网中用电环境的日益复杂化, 当信号逐渐向非稳态信号过渡的过程中, 基于 FFT 的计量方法存在较大的计量误差;

(3) 采用全电能计量时, 当非线性负荷向电网注入谐波分量时会导致非线性负荷的电能少计量, 利用改进 S 变换可以分开计量基波电能和畸变电能, 为日后电网对非线性负荷进行惩罚提供了理论依据。

#### 参 考 文 献

[1] 赵伟, 彭宏亮, 孙卫明, 等. 谐波条件下基于计量误差量化分析的电能计量方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(12): 121-125, 151.  
ZHAO Wei, PENG Hongliang, SUN Weiming, et al. An electricity metering scheme based on quantitative metering error analysis with harmonics in the background [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(12): 121-125, 151.

[2] 朱孟. 动态负荷电能准确计量方法及影响因素研究[D]. 北京: 北京化工大学, 2019.  
ZHU Meng. Research on accurate measurement method and influencing factors of dynamic load energy [D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2019.

[3] 刘涛, 庄双勇, 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, et al. A new algorithm for electric energy measurement based on hanning self multiplication-convolution window triple-spectrum-line interpolation FFT [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(22): 9-15.

[4] 王闰羿, 李玉平, 张玮, 等. 考虑复杂谐波的电网功率计算方法研究与实现[J]. 浙江电力, 2022, 41(2): 40-46.  
WANG Runyi, LI Yuping, ZHANG Wei, et al. Research and implementation of power measurement method of networks considering complicated harmonic [J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(2): 40-46.

[5] 蔡华龙, 肖坤. 小波包改进重构算法在非线形负荷电能计量中的应用[J]. 系统仿真学报, 2015, 27(11): 2822-2828.  
CAI Hualong, XIAO Kun. Application of wavelet packet improved reconstruction algorithm to energy measurement of non-linear loads [J]. Journal of System Simulation, 2015, 27(11): 2822-2828.

[6] 韩霄汉, 沈曙明, 肖涛, 等. 基于形态小波的畸变信号电能计量[J]. 电测与仪表, 2016, 53(10): 44-51.  
HAN Xiaohan, SHEN Shuming, XIAO Tao, et al. Distortion signal energy metering based on morphological wavelet [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(10): 44-51.

[7] 臧宝志, 郭亮, 张志, 等. 基于雾计算的电能计量箱物联网电子控制锁设计[J]. 自动化技术与应用, 2022, 41(2): 187-191, 194.  
ZANG Baozhi, GUO Liang, ZHANG Zhi, et al. Design of internet of thing selectronic control lock for electric energy metering box based on fog calculation [J]. Techniques of Automation and Application, 2022, 41(2): 187-191, 194.

[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] 向世强. 电气化铁路牵引负荷电能计量方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2018.  
XIANG Shiqiang. Research on traction load energy metering method of electrified railway [D]. Changsha: Hunan University, 2018.

[10] 吴禹, 唐求, 滕召胜, 等. 基于改进 S 变换的电能质量扰动信号特征提取方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(10): 2682-2689.  
WU Yu, TANG Qiu, TENG Zhaosheng, et al. Feature extraction method of power quality disturbance signals based on modified s-transform [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(10): 2682-2689.

[11] 陈全, 赵伟, 肖勇, 等. 非整周期采样条件下有功电能计量的新算法[J]. 仪器仪表学报, 2017, 38(4): 861-869.  
CHEN Lei, ZHAO Wei, XIAO Yong, et al. New active electric energy measurement algorithm under non-integer-period sampling [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2017, 38(4): 861-869.

[12] 尹柏强, 何怡刚, 朱彦卿. 一种广义 S 变换及模糊 SOM 网络的电能质量多扰动检测和识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 866-872.  
YIN Baiqiang, HE Yigang, ZHU Yanqing, et al. Detection and classification of power quality multi-disturbances based on generalized s-transform and fuzzy SOM neural network [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 866-872.

[13] 宋春宁, 盛勇, 宁正高. 基于深度学习的运动想象 EEG 信号识别方法[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(4): 125-128, 133.  
SONG Chunning, SHENG Yong, NING Zhenggao. Deep learning-based method for recognition of motion imagery EEG signal [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2022, 41(4): 125-128, 133.

(下转第 224 页)