

采用不完全 S 变换的电能质量扰动检测方法

易吉良^{1,2}, 彭建春¹, 谭会生²

(1. 湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082; 2. 湖南工业大学电气与信息工程学院, 株洲 412008)

摘 要: S 变换因其优良的时频特性而在电能质量扰动检测和定位方面获得了广泛的应用, 但由于 S 变换计算时采用等间隔采样频率点, 因而计算量较大。为解决此问题, 基于 S 变换的电能质量扰动检测方法一般通过提取模时频矩阵的特征量实现而不需要利用 S 变换模时频矩阵的所有向量, 分析了 S 变换的快速计算过程, 并据此提出了不完全 S 变换。首先根据其运算前提是计算信号的 FFT, 利用动态测度方法检测出功率谱包络的峰值, 以此确定信号的主要频率点; 然后对相应的频率点进行不完全 S 变换, 求模得到频率幅值特征向量; 最后由这些特征向量进行电能质量扰动的检测。仿真结果表明, 提出的算法能明显提高检测速度, 更适合实时应用。

关键词: 电能质量; 不完全 S 变换; 计算过程; 动态测度; 检测; 特征向量

中图分类号: TM 933.4

文献标志码: A

文章编号: 1003-6520(2009)10-2562-06

Detection Method of Power Quality Disturbances Using Incomplete S-transform

YI Ji-liang^{1,2}, PENG Jian-chun¹, TAN Hui-sheng²

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412008, China)

Abstract: The detection methods of power quality based on S-transform usually adopt the feature vectors of S-transform module time-frequency matrix instead of all of the vectors. Accordingly, the computational procedure was analyzed, and the incomplete S-transform was proposed. Firstly, the FFT was performed and dynamics was utilized to describe the envelope of power spectrum so as to detect the valid frequency samples of FFT. Then the incomplete transform was specifically performed for these samples and the modules were calculated so as to get the feature vectors. Finally, these feature vectors were used to detect the power quality disturbance. The simulation results illustrate that the proposed method quickens the detection and is more suited for real time application.

Key words: power quality; incomplete S-transform; computational procedure; dynamics; detection; feature vectors

0 引言

近年来, 电能质量问题已成为研究的热点^[1,2], 有效的电能质量治理, 首先必须进行准确的检测。

长期以来, 国内外学者在电能质量检测方面作了大量的工作。以小波为代表的时频分析方法成了研究的重点^[3-5]。而近期利用 S 变换作为检测工具, 提出来许多检测方法^[6]。文献[7-13]利用 S 变换对电能质量进行运算后得到模时频矩阵, 从中提取基频幅值向量、时间幅值包络、频率幅值包络以及中高频时间幅值等特征量, 并分别结合决策树、支持向量机和模糊识别等分类器对电能质量扰动进行分类, 取得了较好的效果。文献[14]利用幅值平方和均值向量作为特征分析电能质量扰动, 其在扰动起止时刻定位能力方面优势明显。

利用 S 变换分析电能质量扰动, 通常是采用 S 变换模时频矩阵的某些频率幅值向量的特征值进行检测, 实际上只利用了 S 变换的少部分结果。而 S 变换对所有频率点的 FFT 值进行运算, 因此当信号采样点数较大时, 会影响算法的实时性。本文通过分析 S 变换的计算过程, 提出不完全 S 变换, 利用功率谱包络的动态测度检测出主要频率点, 然后只针对主要频率点进行不完全 S 变换, 得到的不完全 S 变换模时频矩阵只含有特征频率幅值向量, 这样可以大大减少处理的数据量, 节省存储空间。实验仿真结果验证了不完全 S 变换能够准确检测出电能质量的特征值, 同时较之 S 变换大大缩短了运算时间。

1 不完全 S 变换

1.1 S 变换

设 $h(t) \in L^2(\mathbf{R})$, $L^2(\mathbf{R})$ 表示实数域上的平方可积空间, 则 $h(t)$ 的 S 变换定义为^[15]

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \left(\frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2}} \right) e^{-i2\pi f t} dt. \quad (1)$$

基金资助项目: 国家自然科学基金(50677015)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of

China(50677015)

©1994-2018 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式中, t 为时间; f 为频率; τ 是括号中高斯窗的中心。S 变换也可以写成 2 个函数的卷积

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} p(t, f) g(\tau - t, f) dt. \tag{2}$$

式中,

$$\begin{cases} p(\tau, f) = h(\tau) e^{-i2\pi f\tau}; \\ g(\tau, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{c^2 f^2}{2}}. \end{cases} \tag{3}$$

设 $B(\alpha, f)$ 是 $S(\tau, f)$ 的傅立叶变换(从 τ 到 α), 由卷积定理可知

$$B(\alpha, f) = P(\alpha, f) G(\alpha, f). \tag{4}$$

式中, $P(\alpha, f)$ 和 $G(\alpha, f)$ 分别是 $p(\tau, f)$ 和 $g(\tau, f)$ 的傅立叶变换。可得

$$B(\alpha, f) = H(\alpha + f) e^{\frac{2\pi c^2}{f^2}}. \tag{5}$$

式中, $H(\cdot)$ 是 $h(\cdot)$ 的傅立叶变换, 因此, S 变换可由上式的傅里叶反变换得到(由 α 到 τ)

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{\infty} H(\alpha + f) e^{\frac{2\pi c^2}{f^2}} e^{i2\pi\alpha\tau} d\alpha. \tag{6}$$

这样, S 变换就可以利用 FFT 实现快速计算。把上式写成离散表达式($f \rightarrow n, \tau \rightarrow j$), 即

$$\begin{cases} S[j, n] = \sum_{m=0}^{N-1} (H(m+n) e^{-\frac{2\pi c^2}{n^2}}) e^{\frac{i2\pi m j}{N}}, n \neq 0; \\ S[j, 0] = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} h(m), n = 0. \end{cases} \tag{7}$$

式中, N 是信号序列的总长度; j 和 n 分别是时间采样点和频率采样点; $H(m)$ 是信号序列 $h(k)$ 的离散傅立叶变换。计算上式得到的是一个二维时频矩阵 (STM, S-transform matrix), 列对应时间采样点, 行对应频率采样点。

1.2 S 变换计算过程

由(7)式可以看出, STM 的第 1 行($n=0$)代表信号的直流分量, 直接由信号的均值得到, 而其它频率分量($n \neq 0$)的计算可以采用以下步骤进行:

- 1) 首先利用 FFT 计算待分析信号的离散傅立叶变换 $H(m)$, 令 $n=1$;
- 2) 计算对应于频率采样点 n 的高斯窗 $G(n, m)$ (式(7)括号中的高斯窗函数);
- 3) 将 $H(m)$ 移位到 $H(m+n)$, 对 $H(m+n)$ 进行加窗处理, 即将 $H(m+n)$ 乘以 $G(n, m)$, 得到 $H(n, m)$ (式(5)的离散形式);
- 4) 求 $B(n, m)$ 反傅立叶变换, 得到 $S(j, n)$ 的第 $n+1$ 行(对应于频率采样点 n , 实际频率为 n/NT);
- 5) 令 $n=n+1$ 重复(2)~(4)步, 直到计算出 $S(j, n)$ 所有行。

N 点信号的 S 变换经上述计算步骤会得到 N^2 点(N 行 N 列)的 S 变换值, 考虑电能质量信号为实

信号, FFT 具有共轭对称性, 完成 S 变换需做 $N/2 + 1$ 次 N 点的 FFT, FFT 乘累加的运算量为 $N \lg N$, 因而 S 变换的运算量为 $(N/2 + 1)N \lg N$, 因此, 当 N 很大时明显会影响计算的实时性。

1.3 不完全 S 变换

对于 S 变换应用于电能质量扰动识别而言, 往往是从 S 变换模时频矩阵 (STMM, S-transform modular matrix) 中提取特征向量, 然后对特征向量求取特征值, 再利用这些特征值对扰动进行识别。所提取的特征向量一般是 STMM 中对应于信号主要频率的分量, 如基频幅值分量、检测到的谐波分量和振荡暂态分量等; 而对于检测谐波往往采用 STMM 的频率幅值包络 (STMM 各行中的最大值组成的向量), 实际上对于扰动信号中存在的主要频率分量的检测, $H(m)$ 具有最高的频率分辨率, 更能够检测出扰动信号中存在的主要频率分量。若能由 $H(m)$ 检测出主要频率成分, 然后只针对这些频率点做 S 变换, 得到所需要的特征向量, 显然可以大大减少运算量, 提高算法的实时性。

根据上述思想, 将 S 变换的计算过程作如下改进, 并称之为不完全 S 变换:

- 1) 首先利用 FFT 计算待分析信号的离散傅立叶变换 $H(m)$;
- 2) 确定 $H(m)$ 的主要频率点;
- 3) 按照 S 变换计算过程步骤(2)~(4)分别计算出主要频率点对应的频率分量。

不完全 S 变换的运算量与检测出的主要频率点的数量有关, 主要频率点的检测也是不完全算法的关键所在。

2 基于不完全 S 变换的电能质量扰动检测

2.1 利用动态测度检测主要频率点

图 1(a) 是由 MATLAB 产生的 15 个周期的凹陷加谐波电能质量信号, 采样频率为 3.2 kHz, 即每周周期采样 64 点, 信号表达式见参考文献[16], 其中凹陷幅值为 0.4, 3、5、7 次谐波系数为 0.02。图 1(b) 是图 1(a) 中信号经 FFT 后得到的功率谱。从图 1(b) 局部图可以看出, 虽然加入的谐波很弱, 但仍然可以明显分辨出 3 个谐波所处的频率点, 同时可以发现, 由于电压凹陷的起止点存在幅值突变, 功率谱基频附件存在许多幅值大于谐波频率点幅值的频率点, 并且有剧烈振荡。

对于图 1 中电能质量信号, 采用基于 S 变换方法进行分析, 只要知道 STMM 的基频以及各次谐波频率点的频率分量即可得到凹陷幅值、凹陷起止点、各次谐波幅值和波形畸变率等特征值, 因此只需

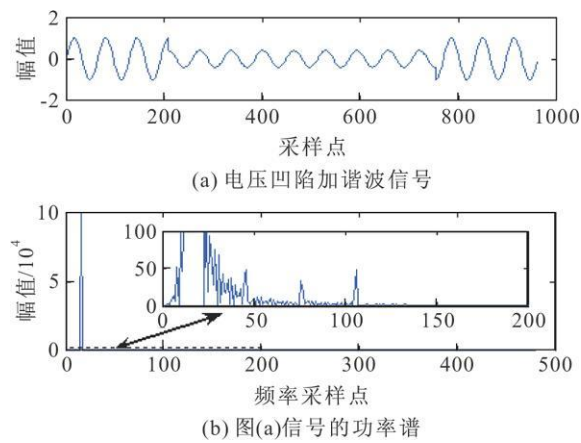


图1 电压凹陷加谐波信号及其功率谱
Fig.1 Voltage sag with harmonics and its power spectrum

检测出基频和 3、5、7 次谐波所在的频率点。但从该信号的功率谱特性可知，若直接采用某阈值对功率谱判决，在检测出各次谐波频率点的同时也会把基频附近的许多频率点检测为主要频率点，因此需要把这两类频率点区分开来。

通过观察图 1(b)可以发现，虽然基频附近功率谱存在振荡，但其极大点的趋势是随着频率的增加而逐渐减弱，因此本文考虑采用其极大点包络检测主要频率点。

设 $|H(m)|^2$ 共有 L 个极大点，所有极大值序列记为 $|H[l]|^2, l=0, 1, 2, \dots, L-1$ ，若 $|H(m)|^2$ 相邻的极大点之间分别有 $X_1, \dots, X_l, \dots, X_{L-1}$ 个频率点，则 $|H(m)|^2$ 的极大值包络为：

$$|\hat{H}(m)|^2 = |\tilde{H}(l-1)|^2 + x \frac{|\tilde{H}(l)|^2 - |\tilde{H}(l-1)|^2}{X_l} \quad (8)$$

式中， $x = 0, 1, \dots, X_{l-1}; l = 1, 2, \dots, L-1$;

$$m = x + \sum_{w=0}^{l-1} X_w.$$

由(8)式得到图 1(b)的包络如图 2 所示，图中包络线能明显刻画出谐波所处的频率点，同时可以看到，在基频附近仍然存在幅值较大的极大值点，这类极大值点虽然幅值较大，但凸起较小，为区分这类极大值与主要极大值点，本文采用动态测度方法。

动态测度能解决噪声环境下的极值点提取问题，其定义和原理在文献[17]中已有详细论述，本文只给出极大值点的动态测度定义。

设 M 为 $|\hat{H}(m)|^2$ 的一个极大点，如果存在比其更高的极大点，则极大点 M 的动态测度等于由点 M 通向同高度所有路径中最小路径动态测度

$$D_{ym}(M) = (inf(D_{ym}(P(M, N))));$$

$$h_{alt}(M) = h_{alt}(N)). \quad (9)$$

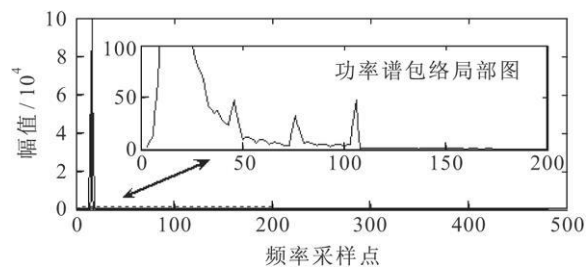


图2 图1 信号功率谱极大点包络
Fig.2 Maximum envelope of power spectrum in Fig.1

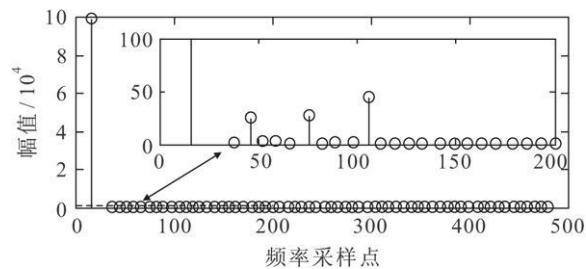


图3 图2 极大点包络的动态测度
Fig.3 Dynamics of maximum envelope in Fig.2

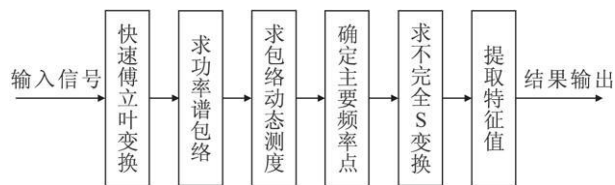


图4 电能质量扰动检测过程
Fig.4 Recognition process of power quality disturbances

式中， i_{inf} 表示下确界； h_{alt} 表示高度； $P(M, N)$ 表示同高度的路径，即曲线上两点 $M、N$ 之间的部分。

按上式求得图 2 中功率谱包络的极大点动态测度如图 3 所示。从图可以看出，3、5、7 次谐波频率点对应的动态测度明显大于其他非主要频率点的动态测度；而基频和 3 次谐波之间的极大点虽然幅值较大，但其动态测度同样很小，只要选择合适的阈值便可以将主要频率点和非主要频率点区分开来。

2.2 基于不完全 S 变换的电能质量扰动检测

本文提出的电能质量扰动检测过程见图 4。本文对短时电能质量扰动、周期性扰动、暂态扰动 3 类电能质量进行实验，以验证算法的有效性。

2.2.1 短时扰动

1)电压凹陷/中断 电压凹陷和中断的区别仅在于当凹陷幅值<0.1 时，便定义为电压中断，因此本文仅以电压凹陷为例进行分析。如图 5(a)所示为电压凹陷信号，信噪比为 28 dB，凹陷幅值为 0.4，扰动起止点分别为采样点 209 和 738；对其求 FFT 得到功率谱如图 5(b)所示，求得功率谱包络及其动

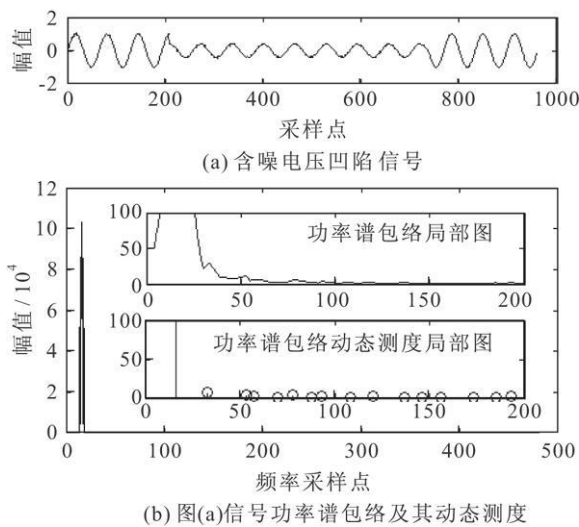


图 5 电压凹陷功率谱包络及其动态测度
Fig. 5 Power spectrum envelope and dynamics of voltage sag

态测度如图 5(b)中局部图。在功率谱动态测度局部图中,除基频点的动态测度为102 812 66外,其余频率点的动态测度均<7. 5,故主要频率点只有基频点。对其求不完全 S 变换并求模,得基频幅值向量曲线如图 6 所示。

电压凹陷扰动最重要的特征值是凹陷幅值和凹陷起止时刻。对于凹陷幅值,常采用基频幅值向量的凹陷程度来检测^[13]

$$A_{\text{seg}} = \frac{\min(A(k, f_1))}{A_{\text{normal}}}; k = 0, 1, 2, \dots, N - 1. \quad (10)$$

式中, $A(k, f_1)$ 是基频幅值向量, A_{normal} 表示标准基频幅值, 这里是 0. 5。由上式求得算例的凹陷幅值为 0. 3981, 说明能够正确检测凹陷幅值。

基于 S 变换的方法通常采用高频幅值向量的两个峰值来定位^[12], 但该方法容易受噪声影响, 并且当起止时刻没有幅值突变, 该峰值也不明显, 如图 7 为 S 变换的 10 倍基频幅值向量, 在扰动终止点由于没有幅值突变, 峰值并不明显, 因而很难准确定位。为此, 本文提出基频幅值差分向量检测扰动起止点的方法, 差分向量定义为

$$D_{\text{diff}}(k) = A(k, f_1) - A(k - 1, f_1);$$
$$k = 1, 2, \dots, N - 1. \quad (11)$$

由上式求得图 6(a)的差分向量如图 6(b)所示, 图中最小值和最大值分别对应扰动的开始点和终止点, 显然, 采用该方法克服了采用高频幅值向量定位的缺陷。

2)电压隆起 电压隆起信号如图 8(a)所示, 其检测过程和电压凹陷类似, 但需要注意两点: ①隆起幅值检测要将(10)中的 $\min(A(k, f_1))$ 改为 $\max(A$

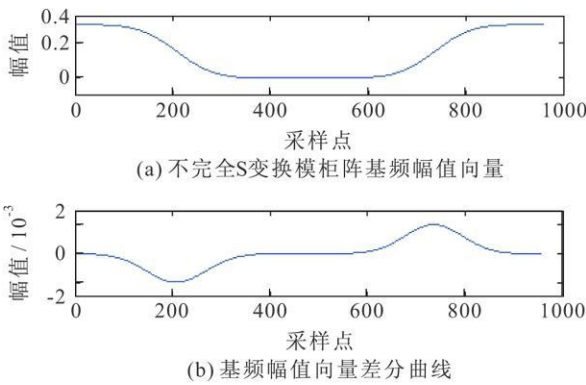


图 6 不完全 S 变换基频幅值向量及其差分曲线
Fig. 6 Fundamental frequency vector and its difference curve of incomplete S transform

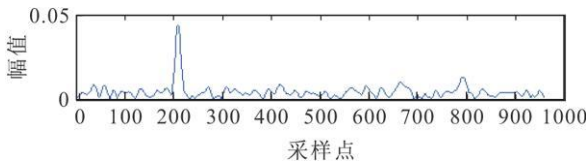


图 7 S 变换 10 倍基频幅值向量
Fig. 7 Tenfold fundamental frequency vector of S transform

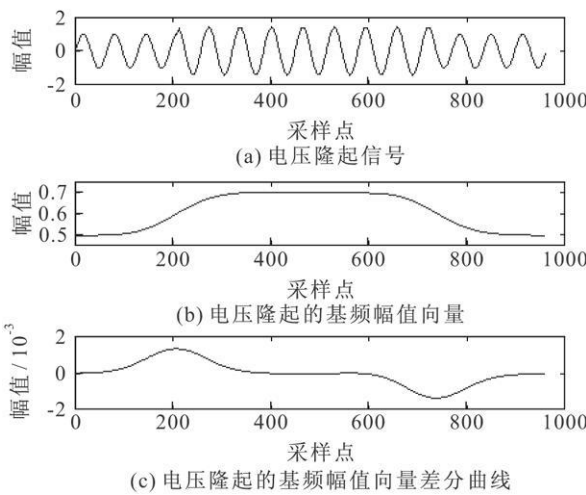


图 8 电压隆起扰动检测
Fig. 8 Detection of voltage swell

(k, f_1)); ②基频幅值差分曲线的最大值对应扰动开始点而最小值对应扰动的终止点, 如图 8(c)所示。原始信号的隆起幅值为 1. 4, 检测的隆起幅值为 1. 3994, 起止点定位也与扰动的起止点完全吻合。

2. 2. 2 周期性扰动

图 9(a)所示为谐波信号, 其中含有 3、5、7 次谐波含有率分别为 0. 03、0. 06、0. 09, 求该信号功率谱包络及其动态测度如图 9(b)所示, 基频点和谐波频率点中 3 次谐波的动态测度最小, 其值为 207. 36,

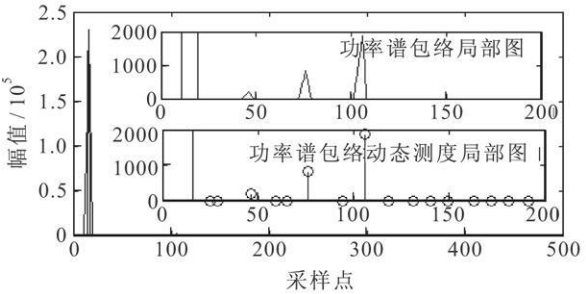
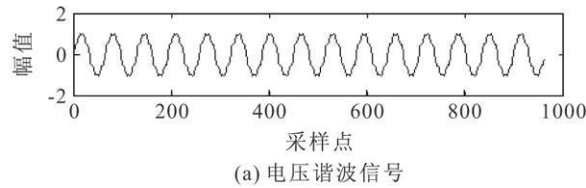


图 9 谐波信号功率谱包络及其动态测度

Fig. 9 Power spectrum envelope and dynamics of harmonics

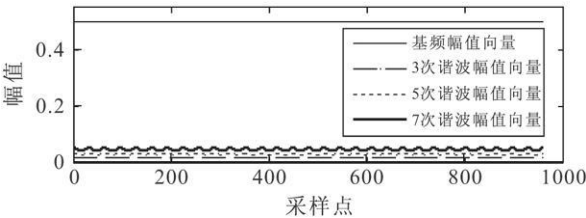


图 10 谐波信号各次频率幅值向量

Fig. 10 Vectors of 3 rd, 5 th and 7th harmonics

而其余频率点的动态测度均接近于零, 所以检测到的主要频率点有 4 个, 对所有主要频率点求不完全 S 变换并求模, 得到 4 个频率幅值向量见图 10。

对于谐波信号而言, 最重要的特征值是谐波含有率, 利用各次谐波的幅值向量均值可以很容易获取该值^[7]

$$\begin{cases} M_{f_i} = 2 \times \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} A(k, f_i); \\ HR(f_i) = \frac{M_{f_i}}{M_{f_1}}. \end{cases} \quad (12)$$

式中, $A(k, f_i)$ 是 i 次谐波幅值向量。根据(12)计算得到的 3、5、7 次谐波含有率分别为 0.03、0.06 和 0.0904, 说明由不完全 S 变换模向量求得的谐波含有率是准确的。

2.2.3 暂态扰动

图 11(a) 所示为振荡暂态信号, 在采样点 209 处开始有振荡, 逐渐衰减至 232 采样点处结束。

图 11(b) 为该信号的功率谱包络及其动态测度, 从动态测度图可以看出, 除基频点动态测度外, 只有 230 频率点(对应高频振动的频率)处的动态测度(28.76)明显大于其余频率点, 因而该信号的主要

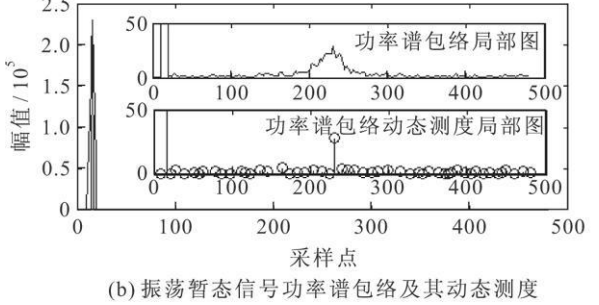
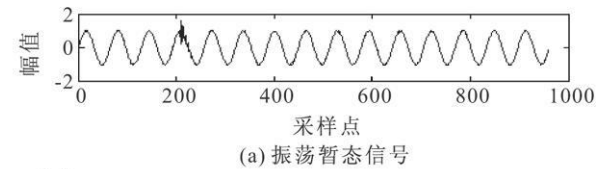


图 11 振荡暂态信号功率谱包络及其动态测度

Fig. 11 Power spectrum envelope and dynamics of transient

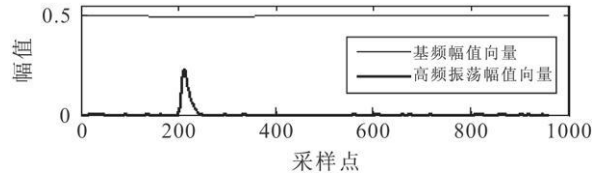


图 12 振荡暂态信号不完全 S 变换频率幅值向量

Fig. 12 Vectors of incomplete ST of transient

表 1 不完全 S 变换和 S 变换算法时间比较

Tab. 1 Operation time of incomplete ST and ST

扰动类型	主要频率点数	S 变换算法 时间/ ms	不完全 S 变换 算法时间/ ms
凹陷/ 中断	1	328	15
隆起	1	328	15
谐波	4	313	16
振荡暂态	2	312	16

频率点只有两个。对相应主要频率点做不完全 S 变换并求模, 得到 2 个频率幅值向量如图 12 所示, 图中高频幅值向量的凸起部分反映了震荡暂态的强度和持续时间。

2.3 不完全 S 变换与 S 变换的算法时间比较

为了比较不完全 S 变换和 S 变换的运算效率, 在配置为 Celeron 1.6 GHz、512 MB 内存的计算机上利用 Matlab7 分别对 S 变换和不完全 S 变换算法进行测试, 表 1 列出了二者的运算时间, 可以看出, 不完全 S 变换大大缩短了运算时间。

3 结语

S 变换具有优良的时频特性, 但其运算时间随

信号序列的总长度的增加而增长,当信号长度较长时,会影响算法的实时性。对于只需要提取 S 变换模时频矩阵频率幅值特征向量的应用场合,不需要进行完整的 S 变换,基于此提出了不完全 S 变换。提出的功率谱包络的动态测度检测方法,能够准确的检测出主要频率点;对主要频率点做不完全 S 变换,求模得到的频率幅值向量能准确检测各电能质量扰动的特征值。本文提出的基频幅值差分向量在检测电压凹陷、中断和隆起的起止时刻更具有稳健性。通过仿真实验验证了本文提出的不完全 S 变换大大缩短了算法时间。

参 考 文 献

- [1] 程浩忠,艾 芊,张志刚,等. 电能质量[M]. 北京:清华大学出版社,2006.
CHENG Hao-zhong, AI Qian, ZHANG Zhi-gang, et al. Power quality[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.
- [2] 吕广强,赵剑锋,程 明,等. 配电网动态电能质量问题及其解决方[J]. 高电压技术,2007,33(1):53-56.
L Ü Guang-qiang, ZHAO Jian-feng, CHENG Ming, et al. Dynamic quality of power supply and its solution for distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 53-56.
- [3] 陈祥训. 采用小波技术的几种电能质量扰动的测量与分类方法[J]. 中国电机工程学报,2002,22(10):1-6.
CHEN Xiang-xun. Wavelet-based measurements and classification of short duration power quality disturbances[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10): 1-6.
- [4] 李 玲,金国彬,黄绍平. 基于时频平面脊信息提取的电能质量扰动检测[J]. 高电压技术,2008,34(4):772-776.
LI Ling, JIN Guo-bin, HUANG Shao-ping. Power quality disturbances detection based on ridges time-frequency plain[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4): 772-776.
- [5] 崔 雪,刘会金,张全明,等. 基于形态-复小波暂态电能质量扰动检测及定[J]. 高电压技术,2008,34(5):989-994.
CUI Xue, LIU Hui-jin, ZHANG Quan-ming, et al. Detection and location of transient power quality disturbances based on morphology-complex wavelet[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5): 989-994.
- [6] 唐 轶,刘 昊,方永丽. 基于时域特征分析的电能质量分类[J]. 电力系统自动化,2008,32(17):50-54.
TANG Yi, LIU Hao, FANG Yong-li. A power quality disturbance classification method based on the analysis in time domain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(17): 50-54.
- [7] Zhao Fengzhan, Yang Rengang. Power quality disturbance recognition using S-transform[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(2): 944-950.
- [8] 占 勇,程浩忠,丁屹峰,等. 基于 S 变换的电能质量扰动支持向量机分类识别[J]. 中国电机工程学报,2005,25(4):51-56.
ZHAN Yong, CHENG Hao-zhong, DING Yifeng, et al. S-transform based classification of power quality disturbance signals by support vector machines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 51-56.
- [9] 肖先勇,李 逢,邓武军. 雷击与短路故障的 S 变换特征量识别方[J]. 高电压技术,2009,35(4):817-822.
XIAO Xian-yong, LI Feng, DENG Wu-jun. Identification method of lightning stroke and short-circuit faults using S-transformed characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4):817-822.
- [10] Chilukuri M V, Dash P K. Multiresolution S-transform-based fuzzy recognition system for power quality events[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 323-330.
- [11] 刘 鑫,杨洪耕,赵 俊. 基于 S 变换模时频矩阵局部相似度的短时电能质量扰动分类[J]. 电力系统自动化,2009,33(8):62-66.
LIU Xin, YANG Hong-geng, ZHAO Jun. Classification for short duration power quality disturbance based on S-transform with module time-frequency matrix partial similarity [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 62-66.
- [12] 杨洪耕,刘守亮,肖先勇. 利用 S 变换时频等值线图与幅值包络向量实现电压凹陷的分类[J]. 电工技术学报,2006,21(8):75-80.
YANG Hong-geng, LIU Shou-liang, XIAO Xian-yong. Classification of voltage dips using time-frequency contour and amplitude envelope vectors by S-transform [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(8): 75-80.
- [13] Dash P K, Panigrahi B K, Panda G. Power quality analysis using S-transform[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(2):406-411.
- [14] 全惠敏,戴瑜兴. 基于 S 变换模矩阵的电能质量扰动信号检测与定位[J]. 电工技术学报,2007,22(8):119-125.
QUAN Hui-min, DAI Yu-xing. Detection and localization of power quality disturbances based on S-transform module matrixes[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(8): 119-125.
- [15] Stockwell R G, Mansinha L, Lowe R P. Localization of the complex spectrum; the S-transform[J]. IEEE Transactions on Signal Process, 1996, 44(4): 998-1001.
- [16] 易吉良,彭建春. 基于广义 S 变换的电能质量扰动信号分类[J]. 电网技术,2009,33(5):22-27.
YI Ji-liang, PENG Jian-chun. Classification of short-time power quality disturbance signals based on generalized S-transform [J]. Power System Technology, 2009, 33(5): 22-27.
- [17] 刘应梅,白晓民,张红斌,等. 基于动态测度的电能质量扰动检测[J]. 中国电机工程学报,2003,23(10):57-62.
LIU Ying-mei, BAI Xiao-min, ZHANG Hong-bin, et al. The detection of power quality disturbance based on dynamics[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 57-62.



YI Ji-liang
Ph. D. candidate

易吉良

1972—,男,博士生,讲师

研究方向为电能质量分析和信号处理

E-mail: jiliang_yi@sina.com

彭建春

1964—,男,博士,教授,博导

主要从事电力系统及其自动化专业的教学和研究工作

谭会生

1966—,男,硕士,副教授

主要从事电子信息和计算机应用专业的教学和研究工作

收稿日期 2009-07-01 修回日期 2009-09-27 编辑 蒋英圣