

基于 AMIST 的复合电能质量扰动检测

程志友^{1,2}, 吴吉², 刘荡荡², 陈亮²

(1. 教育部电能质量工程研究中心, 安徽大学, 安徽合肥 230601;

2. 安徽大学电子信息工程学院, 安徽合肥 230601)

摘要: 针对 S 变换在分析电网中的非平稳复合电能质量扰动时存在检测精度不理想的问题, 提出一种自适应改进不完全 S 变换电能质量扰动检测方法。通过引入自适应窗口调节因子调整高斯窗函数的尺度, 满足不同电能质量扰动对时频分辨率的不同需求。首先利用多尺度极大值算法提取复合电能质量扰动事件的特征频率; 然后定义残差差分曲线放大电能质量扰动突变局部, 获取脉冲数并以此为依据结合特征频率自适应确定窗口调节因子; 最后对特征频率局部进行变换处理实现信号的自适应检测。仿真实验和实测信号分析表明, 提出的自适应改进不完全 S 变换方法抗噪性强、运算复杂度小、检测精度高, 适用于电能质量扰动信号的时频分析。

关键词: 电能质量扰动; AMIST; 时频分析; 多尺度极大值

DOI: 10.12067/ATEEE1904075

文章编号: 1003-3076(2020)05-0059-07

中图分类号: TM711

1 引言

由于在工业环境中大量使用非线性、冲击性、不对称性负载, 如可调速驱动器、电弧炉等^[1,2], 引起电网中出现大量电能质量扰动问题, 如电压暂升、电压暂降、电压中断、电压振荡、谐波等。这些扰动在电网中发生的随机性强且不易检测, 难以找到确切事故原因, 被形象地称为电力系统的“幽灵现象”, 不仅影响电力设备的正常运行, 还会在电网中传播造成更严重的损失, 对供电系统形成重大安全隐患^[3,4]。因此, 电能质量扰动问题引起了工业领域和学术界的广泛关注。

根据 IEEE 标准, 电能质量扰动分析主要包含信号的时频特征检测^[5]。S 变换是一种新型的时频分析方法, 可以同时从时域和频域观察一个信号的能量分布, 适合电能质量扰动信号的时频分析。作为小波变换和短时傅里叶变换的扩展, S 变换^[6]既保持了与傅里叶变换的直接关系, 又可在不同频率下有不同分辨率, 具有短时傅里叶变换不具备的非平稳信号分析能力^[7], 改善了小波变换抗噪能力弱的问题^[8]。然而 S 变换的运算复杂度高, 对高频信

号的时间分辨率依旧不足, 高斯窗函数不具有自适应性, 不能根据具体的应用需求而调整。实际电网中扰动类型复杂, 所以 S 变换在实际应用中受到限制^[9]。文献[10]提出广义 S 变换优化时频分辨率, 但其运算复杂度依旧较高; 文献[11]提出改进 S 变换, 通过获取信号特征频率点的方式减少计算量, 但在分析暂升谐波振荡复合等复合扰动时不能保证得到复合扰动准确特征频率点。

针对上述问题本文提出自适应改进不完全 S 变换 (Adaptive Modified Incomplete S-Transform, AMIST) 方法实现电能质量扰动信号的检测。首先通过多尺度极大值算法获取频谱特征频率, 其次提取信号残差差分曲线脉冲数, 然后根据特征频率及脉冲数自适应确定新的高斯窗口的尺度, 最后调用不同尺度高斯窗函数的 AMIST 实现对信号特征频率局部的检测。通过仿真实验和实测数据分析验证了方法的高效性、精确性和抗噪性。

2 自适应改进不完全 S 变换

2.1 S 变换

S 变换是一种可逆时频分析方法, 时变信号

收稿日期: 2019-04-29

基金项目: 国家自然科学基金项目(61672032)、安徽省科技重大专项(18030901018)

作者简介: 程志友(1972-), 男, 安徽籍, 教授, 博士, 主要研究方向为电能质量分析、检测和评估等;

吴吉(1995-), 男, 安徽籍, 硕士研究生, 主要研究方向为电能质量检测分析。

$h(t)$ 原始 S 变换定义^[12]为:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) w(t - \tau, f) e^{-j2\pi ft} dt \quad (1)$$

式中, τ 为控制高斯窗 $w(t - \tau, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{f^2(t-\tau)^2}{2}}$ 在时间 t 轴位置参数; f 为频率。利用卷积定理式(1)可以写成:

$$S(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(\alpha + f) W(\alpha, f) e^{j2\pi\alpha\tau} d\alpha \\ = F^{-1}[H(\alpha + f) W(\alpha, f)] \quad (2)$$

式中, F^{-1} 为傅里叶反变换; $H(\alpha)$ 为信号 $h(t)$ 的傅里叶变换; $W(\alpha, f) = e^{-2\pi^2\alpha^2/f^2}$ 为窗函数的傅里叶变换。因此 S 变换的离散形式可以通过快速傅里叶变换实现。

设 $h(n\Delta T)$ ($n = 0, 1, \dots, N-1$) 为信号 $h(t)$ 的离散采样序列, 令 $\tau \rightarrow m\Delta T, f \rightarrow k/(N\Delta T), \Delta T$ 为采样时间间隔, N 为信号长度, 则 S 变换的离散表达式为:

$$\begin{cases} S(m\Delta T, \frac{k}{N\Delta T}) = \sum_{l=0}^{N-1} H(\frac{k+l}{N\Delta T}) W(l, k) e^{\frac{j2\pi ml}{N}} & k \neq 0 \\ S(m\Delta T, 0) = \sum_{l=0}^{N-1} H(\frac{l}{N\Delta T}) & k = 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $H[k/(N\Delta T)]$ 为信号 $h(t)$ 的离散傅里叶变换; m, k, l 取值为 $0, 1, \dots, N-1$ 。

由式(3)可见, 对离散采样信号 $h(n\Delta T)$ 求 S 变换会得到 N^2 点的 S 变换值。由于采样信号为实信号, FFT 具有共轭对称性, 所以完成 S 变换需要 $N/2 + 1$ 次 N 点的 FFT。当 N 很大时 S 变换的运算复杂度很高, 会影响计算实时性。

S 变换的结果是一个二维复矩阵, 取模后 S 模矩阵的列对应时间采样点, 行对应频率采样点, 矩阵元素对应相应幅值, 通过 S 模矩阵可分析信号时频特性。图 1 为含有 3、5、7 次谐波信号通过 S 变换模矩阵获得的频率幅值包络线, 通过该曲线可以获得原始信号主要频率成分。由图 1 可知 S 变换对谐波分析的栅栏效应严重, 对复杂扰动分析存在缺陷。

2.2 多尺度极大值及残差差分

根据多尺度极值定义^[13], 可以获取扰动信号频谱的二级极大值点集集合。设 $H[k/(N\Delta T)]$ 的局部极大值点构成极大值点集 $H_{(1,1)}$:

$$H_{(1,1)} = \{H_{\max,r} \mid H_{\max,r} = H_r \cap H_r > H_{r+1} \cap H_r > H_{r-1}\} \quad (4)$$

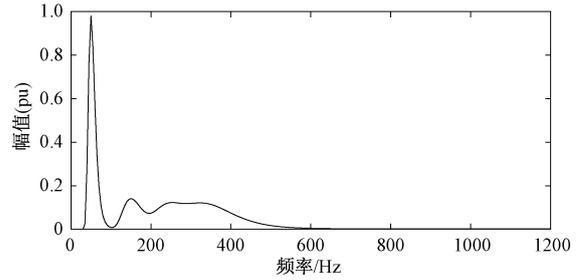


图 1 谐波信号的 S 变换频率幅值包络线

Fig.1 S-transform frequency-amplitude envelope of harmonic

从 $H_{(1,1)}$ 中寻找局部极大值点构成点集 $H_{(2,1)}$:

$$H_{(2,1)} = \{H_{\max \max, i} \mid H_{\max \max, i} = H_{\max, r} \cap H_{\max, r} > H_{\max, r-1} \cap H_{\max, r} > H_{\max, r+1} \cap H_{\max, r} > \varepsilon_1\} \quad (5)$$

式中, $H_{(2,1)}$ 为二级极大值点集; ε_1 为考虑噪声及复合扰动对频谱的影响而设置的阈值。对于特定扰动信号, 获取其频谱的二级极大值对应的频率即为特征频率, 取特征频率左右 2Hz 频率范围为有效频率可避免噪声对获取频率准确性的干扰。

对于扰动信号离散采样序列 $h(n\Delta T)$ 和标准正弦采样序列 $h_0(n\Delta T)$, 扰动信号残差 $r(n\Delta T)$ 定义为:

$$r(n\Delta T) = h(n\Delta T) - h_0(n\Delta T) \quad (6)$$

$r(n\Delta T)$ 的一次差分向量 $d_1(n\Delta T)$ 为:

$$d_1(n\Delta T) = \begin{cases} r[(n+1)\Delta T] - r(n\Delta T) & 0 \leq n < N-1 \\ r(n\Delta T) - r[(n-1)\Delta T] & n = N-1 \end{cases} \quad (7)$$

求 $r(n\Delta T)$ 的三次差分向量 $d_3(n\Delta T)$ 的模 $|d_3(n\Delta T)|$ 以放大扰动信号突变局部, 获取 $|d_3(n\Delta T)|$ 的脉冲数作为特征并结合特征频率点范围确定高斯窗函数尺度。

2.3 AMIST

S 变换的高斯窗宽度虽然随频率变化, 但与其与频率呈反比的特性使其仍然是“相对固定”的, 导致时频分辨率不佳, 且其运算复杂度高。因此提出 AMIST 算法提高变换的时频分辨率同时减少计算量。AMIST 使用可调参数优化高斯窗口, 引入两个可调参数可以更好地控制窗口的形状, 通过引入参数 γ 来更好地控制分辨率^[14]。这种修改提供了对窗口宽度更好的渐进式控制, 新的参数 γ 随频率线性变化, 称为尺度参数, 其表达式为:

$$\gamma(f) = qf + p \quad (8)$$

式中, q 为斜率; p 为频率线性变化的截距。因此,

新的窗口表达式为:

$$w(t - \tau, f, \gamma) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}(qf + p)} e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2(qf+p)^2}} \quad (9)$$

新窗口满足标准 S 变换窗口的归一化条件,保证了修改后的 S 变换的可逆性:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}(qf + p)} e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2(qf+p)^2}} dt = 1 \quad (10)$$

因此 AMIST 可以写成:

$$S^{q,p}(\tau, f) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(t) \frac{|f| e^{-\frac{(t-\tau)^2 f^2}{2(qf+p)^2}} e^{-j2\pi ft}}{\sqrt{2\pi}(qf + p)} dt \quad (11)$$

针对不同类型扰动信号的 $|d_3(n\Delta T)|$ 脉冲数与信号特征频率不同,根据特征频率和 $|d_3(n\Delta T)|$ 脉冲数自适应选择参数 q, p , 可以更好地控制窗口的宽度进而获得更好的时频分辨率。AMIST 的运算量与特征频率有关,只针对这些频率做 AMIST 得到所需模矩阵及特征向量,可以大大减少运算量,提高算法实时性。

3 AMIST 的参数确定及实现步骤

3.1 AMIST 参数选择

基于 AMIST 的时频模矩阵 $|AMIST(m, k)|$, 其列表示某时刻下幅值随频率变化的频率幅值曲线,每一行表示某一频率 f_k 下幅值 U_m 随时间 t_m 变化的时间幅值曲线 $TE_{f_k}(m, U_m)$, 各行最大值曲线为频率幅值包络线 $\max_{0 \leq m \leq N-1} (|AMIST(m, k)|)$ 。其中 $TE_{f_k}(m, U_m)$ 可以反映扰动幅值变化、起止时刻等时域特征量, $\max_{0 \leq m \leq N-1} (|AMIST(m, k)|)$ 可以反映谐波成分、振荡频率等频域特征量。根据海森堡测不准原理,时域分辨率和频域分辨率不能同时达到最佳,所以需要针对不同类型扰动优化参数 q, p 的值来获得最佳 AMIST 进行变换实现扰动的检测。通过控制变量法对 q, p 进行选择,找到适合各类扰动的不同 q, p 参数值。参数 q, p 的选取在大量实验基础上确定,对于短时扰动 $q = 0, p = 0.4$; 周期性谐波 $q = 0, p = 4$; 暂态振荡 $q = 0.001, p = 0.35$ 。上述取值可以得到满意的 AMIST 变换结果,针对复合扰动只需在不同频段取上述 q, p 参数值即可。

3.2 AMIST 实现步骤

本文通过以下过程实现 AMIST:

(1) 利用原始离散采样信号 $h(n\Delta T)$ 对标准正弦采样信号 $h_0(n\Delta T)$ 进行残差运算得到 $r(n\Delta T)$ 。

(2) 对 $r(n\Delta T)$ 进行 3 次差分运算获得

$d_3(n\Delta T)$, 对 $d_3(n\Delta T)$ 求模为 $|d_3(n\Delta T)|$ 。

(3) 计算 $h(n\Delta T)$ 的离散傅里叶变换 $H[k/(N\Delta T)]$ 。

(4) 多尺度极大值法计算特征频率 f_k , 获取特征频率范围。

(5) 获取 $|d_3(n\Delta T)|$ 的脉冲数,通过脉冲数及特征频率自适应确定 AMIST 参数 q, p 。

(6) 计算频率范围中各频率点 f_{k_i} 对应的高斯优化窗的傅里叶变换 $W[l/(N\Delta T), k_i/(N\Delta T)]$ 。

(7) 将 $H[k_i/(N\Delta T)]$ 移位得 $H[(k_i + l)/(N\Delta T)]$, 并与 $W[l/(N\Delta T), k_i/(N\Delta T)]$ 相乘求其结果的傅里叶反变换获得 f_{k_i} 的 AMIST 结果 $AMIST(m, k_i)$ 。

(8) 重复步骤(6)和步骤(7),得到所有特征频段的 AMIST 结果 $AMIST(m, k)$ 。

4 仿真实验

电能质量扰动可分为短时扰动、周期性扰动及暂态扰动。根据 IEEE 标准^[4]关于电能质量扰动的定义分析电压暂升、电压暂降、电压中断和电压振荡信号。同时考虑电网中的复杂扰动分析谐波及暂升谐波、暂降谐波、暂升振荡、暂降振荡、暂升谐波振荡、暂降谐波振荡等各类复合扰动。本文主要针对电网中复杂复合扰动分析。电能质量扰动数学模型可统一化为^[15]:

$$h(t) = A \left\{ \sum_{h=1}^H k_h \sin(h2\pi ft) \left\{ (1 + a[\varepsilon(t - t_1) - \varepsilon(t - t_2)]) \right\} + be^{-(t-t_3)/\tau} \sin(2\pi f_n t) \cdot [\varepsilon(t - t_3) - \varepsilon(t - t_4)] \right\} \quad (12)$$

式中, A 为幅值,当 $h = 1$ 时为基波信号; H 为最大谐波次数最大值,可设置为 11; k_h 为对应幅值; a, b 为扰动幅值; τ 为振荡衰减因子; f_n 为振荡频率,在 600 ~ 1200Hz 之间; t_1, t_2, t_3, t_4 为扰动时刻; $\varepsilon(t)$ 为单位阶跃函数。

利用本文提出的算法对电能质量扰动信号进行分析。电压暂升为短时扰动,其特征主要体现在时域特征;谐波分析主要为谐波频率、谐波幅值和总谐波畸变率;振荡分析为振荡最大值、振荡频率和振荡起止时刻。此处以暂升谐波振荡复合扰动为例分析 AMIST 对复杂扰动信号的处理能力。各分析参数为:电压暂升幅值 U_c 、暂升起止时刻 t_s, t_e ; 各次谐波频率 f_k 、各谐波成分幅值 U_k 和总谐波畸变率

THD; 振荡最大值 U_b 、振荡频率 f_n 和振荡起止时刻 t_{s1} 、 t_{e1} 。

通过式(12)扰动模型设置相应参数得暂升谐波振荡复合扰动模型。幅值 A 设置为 1pu, 暂升幅值 a 设为 0.4pu, t_1 、 t_2 分别设置为 0.0455s、0.1055s; h 取 1、3、5、7, k_h 的取值分别为 0.95pu、0.14pu、0.11pu、0.09pu, 总谐波畸变率为 0.21; 振荡最大值 b 设为 0.45pu, τ 设置为 0.015, t_3 、 t_4 设为 0.1240s 和 0.1320s, f_n 设为 1000Hz, 同时加入信噪比为 40dB 的高斯白噪声。扰动参数估计公式为:

$$U_c = \text{mean} \left\{ TE_{f_0}(m, U_m) > [0.9(U_{\max} - U_{\text{nor}}) + U_{\text{nor}}] \right\} \quad (13)$$

$$\mathbf{d}_c(m) = TE_{f_0}(m+1, U_{m+1}) - TE_{f_0}(m, U_m) \quad (14)$$

式中, $TE_{f_0}(m, U_m)$ 为基频 f_0 处的时间幅值曲线; U_{\max} 为 $TE_{f_0}(m, U_m)$ 的最大值; U_{nor} 为 $TE_{f_0}(m, U_m)$ 正常时刻段的平均值; $\mathbf{d}_c(m)$ 为 $TE_{f_0}(m, U_m)$ 的差分向量。 $\max\{\mathbf{d}_c(m)\}$ 对应的时刻即为 t_s , $\min\{\mathbf{d}_c(m)\}$ 对应的时刻即为 t_e 。 $\text{mean}\{\cdot\}$ 、 $\max\{\cdot\}$ 、 $\min\{\cdot\}$ 分别表示对向量求平均值、最大值、最小值。

各次谐波频率可通过 $|AMIST(m, k)|$ 矩阵的频率幅值包络线 $\max_{0 \leq m \leq N-1} \{|AMIST(m, k)|\}$ 求得, 其极大值对应频率即为各谐波频率 f_{k_i} , 即

$$U_{k_i} = \frac{1}{N} \sum_{m=1}^N TE_{f_{k_i}}(m, U_m) \quad (15)$$

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^H U_{k_h}^2}}{\frac{1}{N} \sum_{m=1}^N TE_{f_0}(m, U_m)} \quad (16)$$

式中, $TE_{f_{k_i}}(m, U_m)$ 为 $|AMIST(m, k)|$ 矩阵中频率为 f_{k_i} 的谐波成分对应的行向量; U_{k_i} 为频率为 f_{k_i} 的谐波成分的幅值。

振荡频率为 $\max_{0 \leq m \leq N-1} \{|AMIST(m, k)|\}$ 的极大值对应频率在 600Hz 以上的频率点值 f_n , 即

$$U_b = \max_{0 \leq m \leq N-1} \{TE_{f_n}(m, U_m)\} \quad (17)$$

$$\mathbf{d}_b(m) = TE_{f_n}(m+1, U_{m+1}) - TE_{f_n}(m, U_m) \quad (18)$$

式中, $TE_{f_n}(m, U_m)$ 为 $|AMIST(m, k)|$ 矩阵结果中振荡频率 f_n 对应的行向量; $\mathbf{d}_b(m)$ 为 $TE_{f_n}(m, U_m)$

的差分向量。 $\max\{\mathbf{d}_b(m)\}$ 、 $\min\{\mathbf{d}_b(m)\}$ 对应时刻即为 t_{s1} 、 t_{e1} 。暂升谐波振荡扰动的 AMIST 结果如图 2 所示。

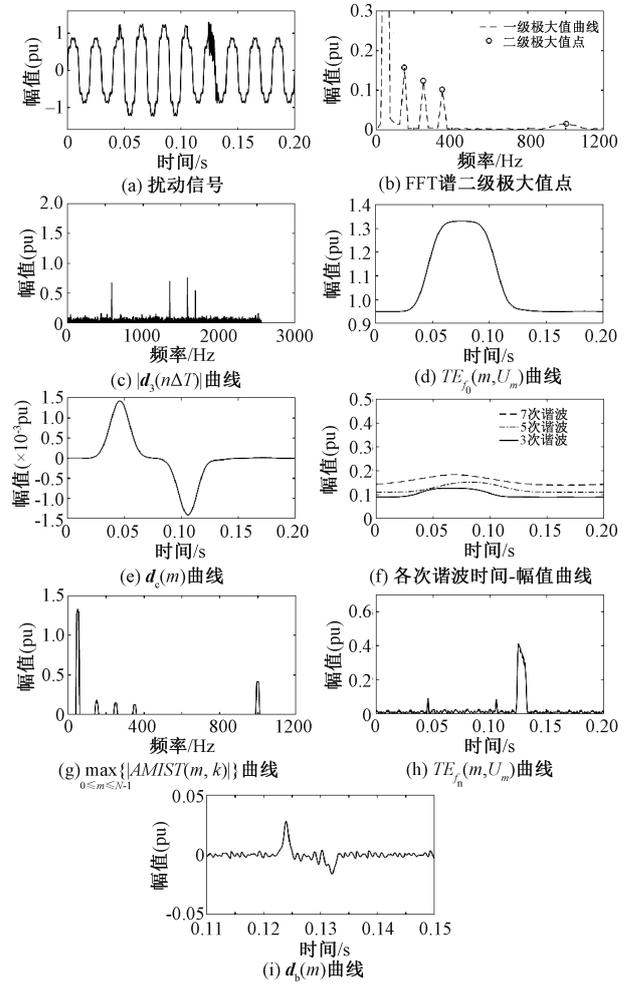


图2 暂升谐波振荡扰动 AMIST 各曲线图 (SNR=40dB)

Fig.2 AMIST curves of swell add harmonic add oscillation transient disturbance (SNR=40dB)

应用 AMIST 和 S 变换分别对上述复合扰动信号进行检测, 检测结果如表 1 所示。由表 1 结果对比可知, 对于电压暂升扰动, AMIST 扰动时刻定位更精确, 持续时间相对误差为 0.0%, 比 S 变换的 3.2% 更小, 且幅值检测误差为 0.026%, 明显小于 S 变换结果 4.17%, 表明 AMIST 对电压暂升扰动具有更优的时间分辨率, 更能凸显暂升的特征; 对于谐波扰动, S 变化已经不能准确识别谐波成分, 而 AMIST 可有效检测各次谐波及幅值, 表明 AMIST 对谐波扰动具有良好的时频分辨率; 对于暂态振荡, AMIST 检测振荡最大值相对误差为 2.91%, 而 S 变换检测振荡最大值相对误差为 5.48%, 表明 AMIST 在高频下具有比 S 变化更优的检测结果。

表 1 暂升谐波振荡扰动 AMIST 与 S 变换检测结果对比 (SNR=40dB)

Tab.1 Comparison between AMIST and S-transform of swell add harmonic add oscillation transient (SNR=40dB)

| 检测参数 | 参考值 | AMIST 测量值 | AMIST 相对误差 (%) | ST 测量值 | ST 相对误差 (%) |
|--------------|--------|-----------|----------------|--------|-------------|
| 电压暂升幅值 (pu) | 1.33 | 1.3265 | 0.26 | 1.2745 | 4.17 |
| 开始时刻/s | 0.0455 | 0.0460 | - | 0.0448 | - |
| 结束时刻/s | 0.1055 | 0.1060 | - | 0.1067 | - |
| 暂升持续时间/s | 0.06 | 0.06 | 0.0 | 0.0619 | 3.2 |
| 3 次谐波幅值 (pu) | 0.14 | 0.1475 | 5.35 | 0.2086 | 49.0 |
| 5 次谐波幅值 (pu) | 0.11 | 0.1097 | 0.27 | 0.1762 | 60.18 |
| 7 次谐波幅值 (pu) | 0.09 | 0.0897 | 0.33 | 0.1701 | 89.0 |
| THD | 0.21 | 0.2087 | 0.62 | 0.2128 | 1.33 |
| 振荡最大值 (pu) | 0.45 | 0.4369 | 2.91 | 0.4253 | 5.48 |
| 振荡频率/Hz | 1000 | 1000 | 0.0 | 995 | 0.50 |
| 振荡开始时刻/s | 0.1240 | 0.1239 | - | 0.1237 | - |
| 振荡结束时刻/s | 0.1320 | 0.1320 | - | 0.1319 | - |
| 振荡持续时间/s | 0.008 | 0.0081 | 1.25 | 0.0082 | 2.5 |

不同信噪比下的实验结果对比如表 2 所示。由表 2 数据可知, AMIST 在信噪比为 20dB 时对暂升幅值检测相对误差为 0.52%, 对振荡最大值检测相对误差为 4.65%; 而 S 变换在信噪比为 20dB 时的暂升幅值检测误差为 6.56%, 对振荡最大值检测相对误差为 8.33%。数据对比表明 AMIST 抗噪性强, 在强噪声下依然对扰动信号有良好的检测结果。

表 2 不同信噪比下相对误差对比

Tab.2 Comparison of relative errors under different SNR

| 检测参数 | AMIST 相对误差 (%) | | | ST 相对误差 (%) | | |
|-------|----------------|------|------|-------------|------|------|
| | 40dB | 30dB | 20dB | 40dB | 30dB | 20dB |
| 暂升幅值 | 0.26 | 0.27 | 0.52 | 4.17 | 4.74 | 6.56 |
| 振荡最大值 | 2.91 | 3.87 | 4.65 | 5.48 | 6.3 | 8.33 |

其他电能质量扰动信号如暂降、中断, 其检测分析流程和电压暂升类似, 区别在于检测起止时刻与暂升相反。振荡、谐波及其复合扰动检测方法与所述相同。综上所述, 本文提出的方法相比于 S 变换拥有更加灵活的时频分辨率, 检测准确率更高。

5 实际电网的电能质量扰动检测

基于本文提出的 AMIST 算法, 分析某钢铁企业的实测扰动数据。数据背景为在提高 10kV/0.4kV 电力系统功率因数时, 在 0.4kV 母线投切电容器组引起的电压振荡, 同时还引起 A、B 相出现电压暂降, C 相出现电压暂升。采用本文算法对该复杂扰动信号进行分析。图 3 为三相电压扰动局部图, 图 4 为三相信号归一化后经 AMIST 处理后各曲线图。

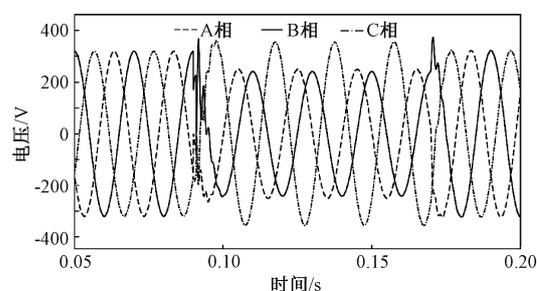


图 3 0.4kV 母线三相电压扰动波形

Fig.3 Three-phase voltage waveform of 0.4kV bus

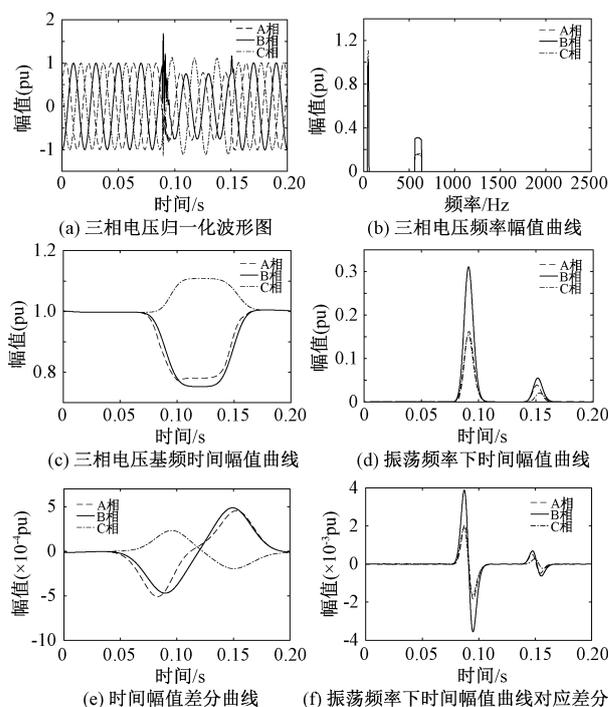


图 4 三相电压扰动 AMIST 处理结果

Fig.4 AMIST result diagrams of three-phase voltage

检测结果还原值如表3所示,其中幅值变化负号表示暂降。由表3数据分析可知,A相在0.0843~0.1469s之间发生暂降,暂降深度为70.016V,同时在暂降开始和结束时刻引起振荡,振荡频率610Hz,第一、二次振荡最大值分别为51.808V和12.096V。B相在0.0892~0.1491s之间发生暂降,暂降深度为79.072V,在开始和结束时刻产生振荡频率为595Hz的振荡。C相在0.0934~0.1513s之间发生34.56V的暂升,同时在起止端发生580Hz振荡。实验结果显示本文提出的算法可以有效检测电网中的实际复杂扰动,验证了AMIST算法的实用性。

表3 三相电压扰动AMIST检测数据结果

Tab.3 AMIST data results of three-phase voltage

| 检测参数 | A相 | B相 | C相 |
|------------|---------|---------|--------|
| 基波变化幅值/V | -70.016 | -79.072 | 34.56 |
| 开始时刻/s | 0.0843 | 0.0892 | 0.0934 |
| 结束时刻/s | 0.1469 | 0.1491 | 0.1513 |
| 第一次振荡最大值/V | 51.808 | 99.392 | 46.592 |
| 第二次振荡最大值/V | 12.096 | 45.504 | 8.48 |
| 振荡频率/Hz | 610 | 595 | 580 |

6 结论

本文提出的AMIST算法引入高斯窗函数调节因子来改善时频分辨率。通过残差差分脉冲数及特征频率范围,针对不同电能质量扰动信号,自适应调用不同尺度高斯窗获得最佳变换结果,有利于实现电能质量扰动信号的准确检测。只对特征频率范围内频率点进行变换可以有效降低算法运算复杂度,实时性更好。通过大量对比实验及实测信号分析,验证了AMIST算法时频分辨率适应性更好、抗噪性更强、检测精度更高。

参考文献 (References):

- [1] Patel N, Gandhi K, Mahida D, et al. A review on power quality issues and standards [J]. International Research Journal of Engineering and Technology, 2017, 4 (2): 247-250.
- [2] 薛凌云, 黄伟, 陈超 (Xue Lingyun, Huang Wei, Chen Chao). 基于空间谱估计技术的间谐波小波检测算法 (Inter harmonic detection algorithm based on spatial spectrum estimation and wavelet transform) [J]. 电子测量技术 (Electronic Measurement Technology), 2014, 37 (10): 46-49.
- [3] 魏学良, 程婷 (Wei Xueliang, Cheng Ting). 谐波治理设备在供电系统中的应用 (Application of harmonic-eliminating device in power supply system) [J]. 国外电子测量技术 (Foreign Electronic Measurement Technology), 2015, 34 (3): 73-76.
- [4] 王知芳, 杨秀, 潘爱强, 等 (Wang Zhifang, Yang Xiu, Pan Aiqiang, et al.). 基于改进集成聚类和BP神经网络的电压偏差预测 (Voltage deviation forecasting based on improved ensemble clustering and BP neural network) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (5): 73-80.
- [5] IEEE P1159 Working Group. Recommended practice for monitoring electric power quality-Technical report: Draft 5 [R]. 1994.
- [6] 张淑清, 李盼, 师荣艳, 等 (Zhang Shuqing, Li Pan, Shi Rongyan, et al.). 基于改进S变换的电能质量扰动分类新方法 (New method for power quality disturbance classification based on modified S transform) [J]. 仪器仪表学报 (Chinese Journal of Scientific Instrument), 2015, 36 (4): 927-934.
- [7] 黄建明, 瞿合祚, 李晓明 (Huang Jianming, Qu Hezuo, Li Xiaoming). 基于短时傅里叶变换及其谱峭度的电能质量混合扰动分类 (Classification for hybrid power quality disturbance based on STFT and its spectral kurtosis) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2016, 40 (10): 3184-3191.
- [8] 董伟, 张俊民, 桂美景, 等 (Dong Wei, Zhang Junmin, Gui Meijing, et al.). 基于小波包分解的航空故障电弧的识别 (Identification of aviation arc fault based on wavelet packet decomposition) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (11): 76-81.
- [9] Reddy M V, Sodhi R. A modified S-transform and random forests-based power quality assessment framework [J]. IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement, 2018, 67 (1): 78-89.
- [10] 张淑清, 李盼, 张立国, 等 (Zhang Shuqing, Li Pan, Zhang Liguang, et al.). 广义S变换的参数优化及在电能质量分析中的应用 (Parameter optimized method for generalized S-transform algorithm and its application in the analysis of power quality disturbances) [J]. 中国科学: 技术科学 (Scientia Sinica: Technologica), 2016, 46 (6): 593-601.
- [11] 吴禹, 唐求, 滕召胜, 等 (Wu Yu, Tang Qiu, Teng Zhaosheng, et al.). 基于改进S变换的电能质量扰动信号特征提取方法 (Feature extraction method of power

- quality disturbance signals based on modified S-transform) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2016, 36 (10): 2682-2689.
- [12] Stockwell R G, Mansinhal L, Lowe R P. Localization of the complex spectrum; The S transform [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1996, 44 (4): 998-1001.
- [13] 杨达, 王孝通, 徐冠雷 (Yang Da, Wang Xiaotong, Xu Guanlei). 基于多尺度极值的一维信号趋势项快速提取方法研究 (Research on 1D signal fast trend extracting via multi-scale extrema) [J]. 电子与信息学报 (Journal of Electronics & Information Technology), 2013, 35 (5): 1208-1214.
- [14] Moukadem A, Bouguila Z. A new optimized Stockwell transform applied on synthetic and real non-stationary signals [J]. Digital Signal Processing, 2015, 46: 226-238.
- [15] 杨晓梅, 罗月婉, 肖先勇, 等 (Yang Xiaomei, Luo Yuewan, Xiao Xianyong, et al.). 基于自适应阈值和奇异值分解的电能质量扰动检测新方法 (A new detection approach of power quality disturbances based on adaptive threshold and singular value decomposition) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2018, 42 (7): 2286-2294.

Detection of multiple power quality disturbance based on adaptive modified incomplete S-transform

CHENG Zhi-you^{1,2}, WU Ji², LIU Dang-dang², CHEN Liang²

- (1. Power Quality Engineering Research Center, Ministry of Education, Anhui University, Hefei 230601, China;
2. School of Electronics and Information Engineering, Anhui University, Hefei 230601, China)

Abstract: According to the problem that the S-transform is not ideal when analyzing the non-stationary composite power quality disturbance in distribution network, a new method to detect the disturbance is proposed based on adaptive modified incomplete S-transform. By introducing adaptive window adjustment factor to adjust the scale of Gauss window, the time-frequency resolution of different power quality disturbance can be satisfied. Firstly, the multi-scale maximum algorithm is used to extract the feature frequencies of the multiple power quality disturbance events. Then by defining the residual difference curve to amplify the power quality disturbance mutation local part, the number of pulses can be obtained and this is used as a basis to combine the feature frequencies so as to adaptively determine the window adjustment factor. Finally, the feature frequencies are transformed locally to realize the adaptive detection of the signal. The simulation experiment and measured signal analysis show that the proposed method has strong anti-noise, low computational complexity and high detection accuracy, and is suitable for time-frequency analysis of power quality disturbance signals.

Key words: power quality disturbance; AMIST; time-frequency analysis; multi-scale maximum