

DOI: 10.7667/PSPC160506

结合短时傅里叶变换和谱峭度的电力系统谐波检测方法

黄建明, 李晓明

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对电能质量分析中的谐波检测问题, 提出一种结合短时傅里叶变换和谱峭度的电力系统谐波检测方法。采用短时傅里叶变换作为时频分析工具对采样信号进行时频分解, 同时引入频谱标准差和基于短时傅里叶变换的谱峭度作为辅助分析。通过频谱标准差和谱峭度对谐波模态进行识别, 并根据识别结果从频谱矩阵中提取出相应的谐波分量, 然后采用基于奇异值分解的扰动定位方法对暂态谐波的起止时刻进行准确定位。仿真实验结果验证了算法的有效性, 在低信噪比的情况下仍具有较高的检测精度, 具有较好的抗噪性和鲁棒性。

关键词: 短时傅里叶变换; 谱峭度; 电力系统; 谐波检测; 奇异值分解

Detection of harmonic in power system based on short-time Fourier transform and spectral kurtosis

HUANG Jianming, LI Xiaoming

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Aiming at the problem of harmonic detection in power quality analysis, a new method for harmonic detection in power system based on short-time Fourier transform and spectral kurtosis is proposed. As the time-frequency analysis tool, short-time Fourier transform is used to decompose the sampled signal. Meanwhile, the spectrum of standard deviation and spectral kurtosis based on short-time Fourier transform are introduced as auxiliary analysis. The harmonic modal is identified through the spectrum of standard deviation and spectral kurtosis, and the corresponding harmonic components are extracted by the spectrum matrix according to the result of recognition. Furthermore, a method for disturbances location based on singular value decomposition is presented to locate the transient harmonic signals. Results of a simulation verify the efficiency of the proposed method, indicating that it still has high detection accuracy under the condition of low signal noise ratio (SNR), and has better noise immunity and robustness.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277134).

Key words: short-time Fourier transform; spectral kurtosis; power system; harmonic detection; singular value decomposition

0 引言

随着智能电网的发展, 风电、光伏电源等间歇性新能源以及电力电子器件的投入使用带来了一系列电能质量问题, 其中主要以谐波污染^[1]为主, 严重影响了工业的正常生产和居民的生活用电, 甚至对电力系统安全、经济、可靠运行造成威胁。谐波检测是治理谐波污染问题的基础, 对电力系统中谐波补偿、谐波潮流计算、谐波故障诊断和电能计量等方面有着重要的意义。

现阶段国内外学者在实时性、精确性与适用性这三方面权衡, 针对不同的应用层次提出了不同的

谐波检测方法。根据提取谐波的原理不同, 谐波检测技术可分为时域特征检测法、频域特征检测法和自适应检测等。基于时域特征的谐波检测方法主要是基于瞬时无功功率理论的 dq 变换法^[2]以及改进的 i_p-i_q 算法^[3], 该方法计算量小、实时性好、可靠性高, 但是要求信号对称无畸变、需要锁相环锁定电网同步角度, 主要应用于有源电力滤波器这类实时性要求高的设备中。基于频域特征的谐波检测方法有傅里叶变换^[4]、希尔伯特-黄变换^[5]、S变换^[6-7]和小波变换^[8]等, 这类方法主要兼顾了精确性与适用性, 在电能计量以及谐波故障诊断等方面有着广泛的应用。自适应谐波检测主要有自适应 LMS 算法^[9]、人工神经网络^[10]等, 这类方法算法本身构造较为复杂, 需要大量的训练样本, 目前对于这类方

法的研究还不是很成熟。文献[11]提出了基于改进 S 变换的电力系统谐波检测方法,该方法在高斯窗函数中加入调节因子对 S 变换进行了改进,并提取相应的谐波成分、幅值等特征信息,具有较好的检测精度和较强的抗噪性,不仅适用于稳态谐波检测,也适用于暂态谐波检测,但是对谐波次数和谐波模态的检测仍存在一定的缺陷。文献[12]结合经验模态分解理论和总体平均经验模态分解算法,将 EEMD 算法应用于电力系统谐波检测中,虽然避免了传统经验模态分解算法中虚假分量和模态混叠的问题,但是分解前无法确定分解模态的个数,并且分解模态的个数会随信号中谐波分量个数的增多而增多,从而导致算法的计算量增大。

传统傅里叶变换^[13-14]对信号的分析是全局性的,无法反应信号的局部信息。短时傅里叶变换(Short-time Fourier Transform, STFT)^[15-16]是一种时频局部化分析方法,在非平稳信号分析方面具有广泛的应用,其基本原理是对信号加滑动短窗处理后再进行傅里叶变换,获取各个频率分量在时域上的变化情况。

谱峭度(Spectral kurtosis, SK)是在谱分析和峭度上发展起来的一个时频域检测指标,其概念最初由 Dwyer^[17]提出,用于检测信号中的瞬态成分。Antoni 在文献[18]中对谱峭度进行了系统的定义,并提出基于短时傅里叶变换的谱峭度,论证了其具有表征信号中非平稳、非高斯成分特征的能力。谱峭度目前常被用于滚动轴承故障诊断^[19]和异步电机故障诊断^[20]当中。

本文提出一种结合短时傅里叶变换和谱峭度的电力系统谐波检测方法,首先选取合适的窗函数对采样信号进行短时傅里叶变换,利用基于短时傅里叶变换的谱峭度对稳态谐波分量进行识别,同时通过频谱标准差检测信号中的暂态谐波分量,避免了同一频谱曲线上各谐波分量的特征之间相互干扰而导致失效的问题,然后通过对采样信号构造 Hankel 矩阵进行快速奇异值分解,并提取分量信号中的模极大值点确定暂态谐波的起止时刻。该方法具有较高的检测准确率,既适用于稳态谐波和间谐波的检测,也适用于暂态谐波的检测。

1 短时傅里叶变换基本原理

STFT 解决了传统傅里叶变换无法反应信号局部特征的问题,其基本思想是用滑动窗函数截断待分析信号,将截断的窗内信号看作是平稳的信号,然后对这一系列平稳信号进行标准傅里叶变换,从而得到不同频率分量在时域上的变化情况。对于随

机信号 $x(t) \in L^2(R)$, 其连续短时傅里叶变换定义为

$$F(t, f) = \int_R x(\tau) g^*(\tau - t) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (1)$$

式中: $g(t)$ 为沿时间轴滑动的时间宽度很短的窗函数;正是由于窗函数的存在, $F(t, f)$ 既是时间的函数也是频率的函数,取不同时刻值 t , 可获得该时刻对应的频谱。短时傅里叶变换的频谱是局部频谱,同时具有时域和频域的信息。

实际应用中需对 $F(t, f)$ 进行离散化处理,设采样频率为 f_s , 令 $x(k)$ 为信号 $x(t)$ 的离散形式, $g(k)$ 为窗函数 $g(t)$ 的离散形式,时间窗的宽度为 N_w , 则信号 $x(t)$ 的离散短时傅里叶变换为

$$F_g(m\Delta t, f) = \sum_{k=-\infty}^{k=\infty} x(k) g^*(k - m\Delta t) e^{-j2\pi k f} \quad (2)$$

式中: $\Delta t = 1/f_s$ 为采样时间间隔; m 表示时间步骤数。离散短时傅里叶变换结果 $F_g(m\Delta t, f)$ 为一个二维的复矩阵,其行对应采样时间点,列对应频率值。通过对 $F_g(m\Delta t, f)$ 求模可得频谱幅值矩阵,如式(3)所示。

$$S_g(m\Delta t, f) = |F_g(m\Delta t, f)| \quad (3)$$

2 谱峭度基本理论

2.1 谱峭度的定义

考虑随机信号 $x(t)$ 的 Wold-Cramer 分解的频域表示式为^[18]

$$Y(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(t, f) e^{j2\pi f t} dX(f) \quad (4)$$

式中, $H(t, f)$ 为系统的时变传递函数,是信号 $Y(t)$ 在频率 f 处的复包络。

定义 $S_{2nY}(t, f)$ 为 $2n$ 阶瞬时谱矩,是复包络 $H(t, f)$ 能量的度量,如式(5)所示。

$$S_{2nY}(t, f) = E\{|H(t, f) dX(f)|^{2n}\} / df = E\{|H(t, f)|^{2n}\} \cdot S_{2nX} \quad (5)$$

式中:符号 $E\{\cdot\}$ 和 $|\cdot|$ 分别表示取数学期望(平均值)和取模值;当 n 分别为 1 和 2 时, $S_{2nY}(t, f)$ 分别为二阶瞬时谱矩和四阶瞬时谱矩,则过程 $Y(t)$ 的四阶谱累积量可以表示为

$$C_{4Y}(f) = S_{4Y}(f) - 2S_{2Y}^2(f) \quad (f \neq 0) \quad (6)$$

因此,谱峭度可定义为

$$K_Y(f) = \frac{C_{4Y}(f)}{S_{2Y}^2(f)} = \frac{S_{4Y}(f)}{S_{2Y}^2(f)} - 2 \quad (f \neq 0) \quad (7)$$

文献[18]给出了根据此方法定义的谱峭度的许多重要性质,例如非平稳随机信号的谱峭度是基于频率和频率分辨率的函数,平稳随机信号的谱峭度是频率的常数函数等。本文需要用到的其中一个重要性质是:

对于一个调制信号 $Y(t)$, 如式(8)所示。

$$Y(t) = A(t)e^{j2\pi f_0 t} \quad (8)$$

其中, $A(t)$ 为一个平稳的复包络, 则其在载波频率 f_0 处的谱峭度为

$$K_Y(f_0) = E\{A(t)^4\} / E\{A(t)^2\}^2 - 2 \quad (f = f_0) \quad (9)$$

当 $A(t)$ 是一个确定的常量时, 则 $Y(t)$ 的谱峭度 $K_Y(f_0)$ 的值为-1。

2.2 基于短时傅里叶变换的谱峭度

考虑非平稳随机信号 $x(t)$ 的离散短时傅里叶变换, 如式(2)所示。则对应离散短时傅里叶变换结果 $F_g(m\Delta t, f)$ 的 $2n$ 阶瞬时谱矩为 $S_{2nF}(f)$, 如式(10)所示。

$$S_{2nF}(f) = \langle |F_g(m\Delta t, f)|^{2n} \rangle_k \quad (10)$$

式中, $\langle \cdot \rangle_k$ 表示 k 阶累积量的时平均值。其中 $n=1$ 时, $S_{2F}(f)$ 即是功率谱密度函数。根据式(7)的定义, 基于短时傅里叶变换的谱峭度表示为

$$K_F(f) = \frac{S_{4F}(f)}{S_{2F}(f)^2} - 2, \quad |f - \text{mod}(1/2)| > N_w^{-1} \quad (11)$$

基于短时傅里叶变换的谱峭度 $K_F(f)$ 可用来表示复包络 $F_g(m\Delta t, f)$ 的归一化能量分布程度, 对 $F_g(m\Delta t, f)$ 的每一个频率点求取其谱峭度值, 形成频率谱峭度曲线, 即可得出谱峭度在频域的分布特点。根据式(8)和式(9)可知, 对于平稳的正弦信号, 其短时傅里叶变换的复包络是确定的常量, 在其主频率点处的谱峭度值为-1, 本文正是利用此性质来检测信号中稳态谐波分量的次数和频率。

3 基于奇异值分解的扰动定位

本文采用基于奇异值分解^[21](Single Value Decomposition, SVD)方法对暂态扰动的起止时刻进行定位, 其具体过程是: 对待分析信号 $x(t)$ 构造 Hankel 矩阵 A , 如式(12)所示。

$$A = \begin{pmatrix} x(1) & x(2) & \cdots & x(n) \\ x(2) & x(3) & \cdots & x(n+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x(N-n+1) & x(N-n+2) & \cdots & x(N) \end{pmatrix} \quad (12)$$

式中, $1 < n < N$, N 为总采样点数。对该矩阵进行奇异值分解, 如式(13)所示。

$$A = USV^T = \sigma_1 u_1 v_1^T + \sigma_2 u_2 v_2^T + \cdots + \sigma_p u_p v_p^T \quad (13)$$

式中: $U=(u_1, u_2, \dots, u_p)$ 和 $V=(v_1, v_2, \dots, v_p)$ 为正交矩阵; $S=(\text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_p), \mathbf{O})^T$ 为一对角矩阵, \mathbf{O} 为零矩阵, $p=\min(N-n, n)$, 其中 σ_i 称为矩阵 A 的奇异值, 且 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \cdots \geq \sigma_p > 0$, $i=1, 2, \dots, p$ 。为实现信号分离, 令 $A_i = \sigma_i u_i v_i^T$, 则有

$$A_i = \begin{pmatrix} x_i(1) & x_i(2) & \cdots & x_i(n) \\ x_i(2) & x_i(3) & \cdots & x_i(n+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_i(N-n+1) & x_i(N-n+2) & \cdots & x_i(N) \end{pmatrix} \quad (14)$$

A_i 为第 i 层分量信号矩阵, 令 $\mathbf{s}=[x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(n)]$, $\mathbf{h}=[x_i(n+1), x_i(n+2), \dots, x_i(N)]^T$, 则第 i 层 SVD 分量信号 $P_i=[\mathbf{s}, \mathbf{h}^T]$, 这样就实现对信号 $x(t)$ 的线性分解。研究表明^[16], 随着 n 的增大, 虽然分量信号的个数增多, 但是信号的大部分信息集中在前三层, 而第三层分量信号能够反应暂态扰动分量的突变信息。因此, 检测第三层分量信号 P_3 的突变点可准确定位出暂态扰动的起止时刻。在求取分量信号 P_i 时, 只需计算 A_i 的第一行和最后一列, 大大减少了算法的计算量。

4 结合 STFT 和谱峭度的谐波检测

4.1 基于短时傅里叶变换和谱峭度的谐波分析

短时傅里叶变换解决了傅里叶变换没有时间分辨率的问题, 也避免了小波变换在频域上的模糊性问题, 其中短窗函数 $g(t)$ 的选择是短时傅里叶变换的关键。窗函数可减少由频谱泄漏问题带来的检测误差, 不同类型窗函数的频率特性不同, 窗函数的选择需要同时兼顾频率分辨率和时间分辨率。图 1 中给出了常用于短时傅里叶变换的 Hamming 窗、Hanning 窗、Gaussian 窗和 Blackman-Harris 窗的时域和频域特性。由图 1 可知, Hamming 窗的主瓣最窄, 旁瓣衰减最小, 其频率分辨率最高, 时间分辨率最低。Blackman-Harris 窗的主瓣最宽, 旁瓣衰减最大, 其时间分辨率最高, 但是频率分辨率最低。Hanning 窗的主瓣较窄, 旁瓣衰减适中, 同时具有较好的频率分辨率和时间分辨率。因此, 本文选取 Hanning 窗作为短时傅里叶变换的窗函数。

参考文献[16], 建立随机谐波信号的模型, 如式(15)所示。

$$x(t) = \sin(\omega_0 t) + a_3 \sin(3\omega_0 t) + a_5 \sin(5\omega_0 t) + a_7 \sin(7\omega_0 t) \cdot a_{8.4} \sin(8.4\omega_0 t) + a_{11} \sin(11\omega_0 t)[u(t-t_1) - u(t-t_2)] \quad (15)$$

式中: $\omega_0=2\pi f_0$, f_0 为基波频率; $a_3, a_5, a_7, a_{8.4}, a_{11}$ 分别为 3 次、5 次、7 次、8.4 次和 11 次谐波的归一化幅值; 其中, 3、5、7 次谐波为稳态谐波, 8.4 次谐波为间谐波, 11 次谐波为暂态谐波, t_1 和 t_2 分别为暂态谐波的起止时刻, 且 $t_1 < t_2$; $u(t)$ 为单位阶跃函数。

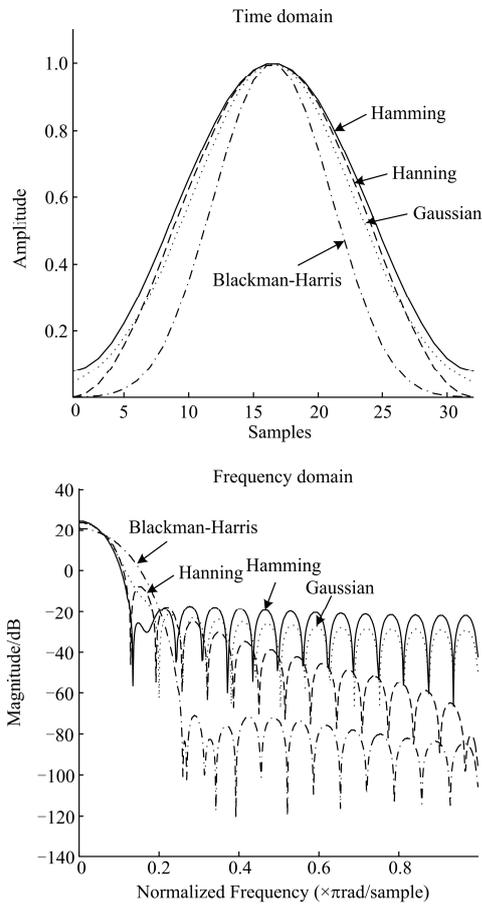


图 1 常用窗函数的时频特性

Fig. 1 Time-frequency characteristic of different window functions

在 Matlab 仿真平台上, 对该随机谐波信号进行仿真分析, 采样频率 f_s 设为 12.8 kHz, 基波频率 f_0 为 50 Hz, 采样时间为 20 个工频周期, a_3 、 a_5 、 a_7 、 $a_{8.4}$ 、 a_{11} 的值分别为 0.25、0.20、0.15、0.10 和 0.05, 暂态谐波起止时刻分别为 0.10 s 和 0.30 s。对该仿真信号进行 4 个工频周期宽度的加 Hanning 窗——短时傅里叶变换, 得出频谱幅值矩阵, 分别对每个频率点计算其最大幅值、标准差和谱峭度, 形成频率最大幅值曲线、频率标准差曲线和频率谱峭度曲线, 仿真结果如图 2 所示。图 2(a)表示原谐波信号, 图 2 (b)表示频率最大幅值曲线, 图 2 (c)表示频率标准差曲线, 图 2 (d)表示频率谱峭度曲线。

分析图 2(b)可知, 在各谐波分量主频率点处存在频率最大幅值曲线的局部极大值, 通过观察最大幅值曲线上局部极大值点所对应的频率和幅值即可初步确定信号所含谐波分量的频率和幅值^[11], 但是在信号含有多个谐波分量、各次谐波幅值相近的情况下, 同一频谱曲线上各谐波分量的特征会相互干扰, 使局部极大值点识别失败从而导致谐波误判或

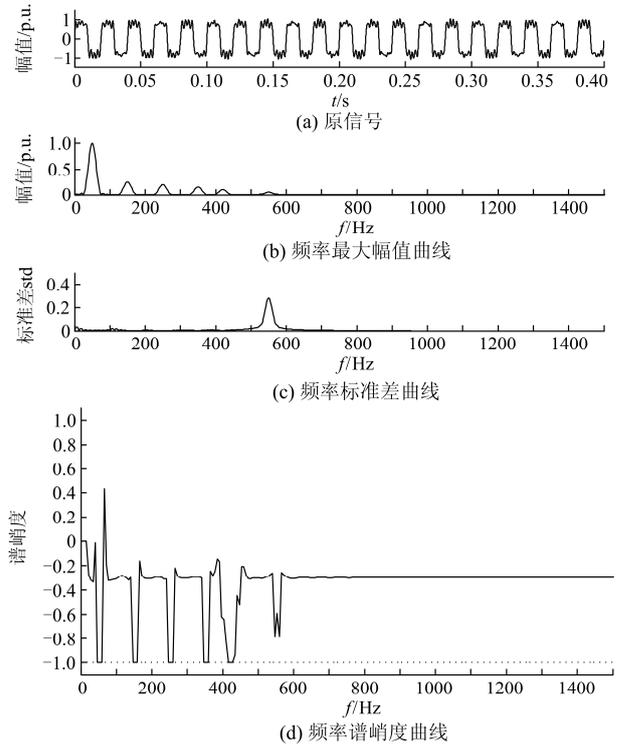


图 2 谐波信号仿真结果

Fig. 2 Simulation results of harmonic signal

漏判、检测精度下降等问题。由图 2(c)可知, 暂态谐波在其主频率点处存在明显的标准差极大值, 通过检测频率标准差曲线是否存在局部极大值可以判断出信号中是否含有暂态谐波分量。图 2(d)的仿真结果表明, 频率谱峭度曲线中在基波以及各稳态谐波分量主频率点处的谱峭度值为-1, 在暂态谐波分量主频率点处存在局部极小值, 说明了稳态谐波分量的短时傅里叶变换为平稳的复包络, 而暂态谐波分量的复包络是非平稳的。图 3 给出了各谐波分量的幅值曲线, 其中 11 次谐波的幅值曲线有较大幅度的波动, 说明 11 次谐波为暂态谐波分量, 但是其扰动起止时刻的突变特征不明显, 无法对其扰动起止时刻进行准确定位。

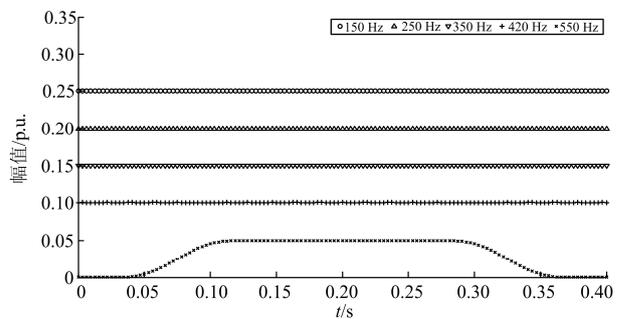


图 3 各次谐波幅值曲线

Fig. 3 Amplitude curves of harmonic components

对该谐波信号进行奇异值分解, 取第 3 层分量信号 P_3 , 为消除信号噪声的影响, 设置阈值 $G=0.35\max(P_3)$, 舍弃绝对值小于该阈值的部分, 第 3 层分量信号如图 4 所示。从图中可知, 在 0.0992 s 处和 0.2995 s 处存在模极大值, 与暂态谐波的起止时刻基本吻合。

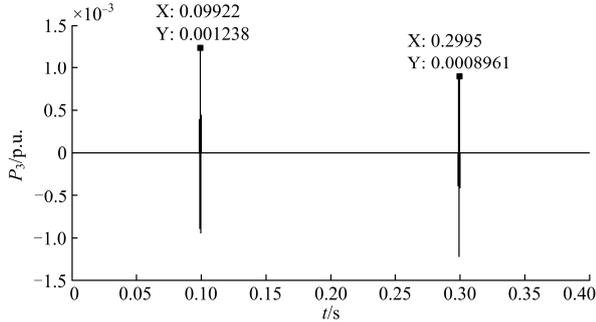


图 4 SVD 的第 3 层分量信号

Fig. 4 Third component signal based on SVD

4.2 电力系统谐波检测方案

电力系统中的电力电子整流换流装置、含有铁芯设备的电磁装置以及炼钢电弧炉、电气化铁道等



图 5 电力系统谐波检测

Fig. 5 Harmonic detection of power system

3) 谐波幅值检测

信号的短时傅里叶变换结果是各个频率分量随时间变化的复包络, 对于稳态谐波, 取各稳态谐波幅值曲线 $S_g(m\Delta t, f_i)$ 的平均值作为该稳态谐波分量的幅值, 对于暂态谐波, 取暂态谐波幅值曲线 $S_g(m\Delta t, f_i)$ 的最大值作为该暂态谐波分量的幅值。

4) 暂态谐波起止时间检测

短时傅里叶变换受限于时间分辨率和频率分辨率不能同时兼顾的问题, 仅通过暂态谐波分量的幅值曲线无法对暂态谐波的起止时刻进行准确定位, 因此, 本文采用基于奇异值分解的扰动定位方法, 通过检测第 3 层分量信号 P_3 的模极大值即可准确检测出暂态谐波的起止时刻, 为避免噪声的干扰, 设置阈值 $G=0.35\max(P_3)$, 舍弃 P_3 中幅值绝对值小于 G 的部分。

5 仿真分析

为验证本文算法的有效性, 参考式(15)构造一复杂谐波仿真信号, 采用 Matlab 仿真软件对该复杂谐波信号进行仿真分析。具体谐波分量参数如表 1

非线性、冲击性负荷是谐波问题的主要来源。这些谐波源主要产生幅值比基波小, 频率为基波频率整数倍的谐波, 并且可能包含晶闸管脉冲电流产生的暂态谐波等。因此, 电力系统的谐波检测需要考虑谐波次数、谐波幅值、暂态谐波的起止时间和幅值等因素。本文提出一种结合短时傅里叶变换和谱峭度的电力系统谐波检测方法, 该方法的流程图如图 5 所示。

1) 稳态谐波频率检测

对待检测信号进行加 Hanning 窗短时傅里叶变换后, 计算每个频率点的谱峭度值, 为避免噪声的影响, 设定阈值 K 为 -0.98, 逐个比较各个频率点的谱峭度值, 求出比 K 小的各个频率区间段 $[f_i, f_j] (i < j)$, 各个频率区间段的谱峭度最小值点所对应的频率即为该稳态谐波分量的频率。

2) 暂态谐波频率检测

计算短时傅里叶变换结果 $F_g(m\Delta t, f)$ 每个频率点的标准差, 形成频率标准差曲线, 对频率标准差曲线进行动态测度^[7], 其中的局部极大值点所对应的频率即为暂态谐波分量的频率。

所示, 采样频率设为 12.8 kHz, 基波频率为 50 Hz, 采样时间为 20 个工频周期, 电压幅值为归一化幅值。

表 1 谐波仿真信号参数

Table 1 Feature parameters of simulated harmonic signal

信号类型	谐波次数	频率/Hz	幅值/p.u.	起始时刻/s	结束时刻/s
基波	0	50	1.0		
	3	150	0.188		
	5	250	0.139		
	7	350	0.092		
	8.4	420	0.065		
	9.6	480	0.051		
	11	550	0.044		
暂态谐波	15	750	0.087	0.12	0.34

对该仿真信号分别叠加信噪比(SNR)为 30 dB、40 dB 和 50 dB 的高斯白噪声, 采用本文的方法, 在不同强度噪声的环境下进行仿真验证。图 6 给出了信噪比为 40 dB 时谐波检测的仿真结果, 其中图 6 (a)为原谐波信号曲线, 图 6 (b)为频率标准差曲线, 图 6 (c)为频率谱峭度曲线, 图 6 (d)为各次谐波幅值

曲线,图 6(e)为 SVD 的第三层分量信号曲线。

从图 6(b)可知,在 750 Hz 频率点处存在频率标准差曲线的局部极大值,说明信号中含有频率为 750 Hz 的暂态谐波分量,并且由图 6(e)可知,暂态谐波的起止时刻分别为 0.1194 s 和 0.3391 s。图 6(c)的仿真结果表明,由于信号噪声的干扰,频率谱峭度曲线存在一定程度的波动,但是各稳态谐波分量主频率点处的谱峭度值仍为-1,进一步验证了平稳正弦函数在其主频率点处谱峭度值为-1 的性质,并且该性质不受噪声的影响,具有较强的鲁棒性。另外在暂态谐波主频率点处有谱峭度的极小值,但是随着信号噪声的增大,该特征有可能被噪声淹没,失去有效性。表 2 和表 3 分别给出了稳态谐波分量

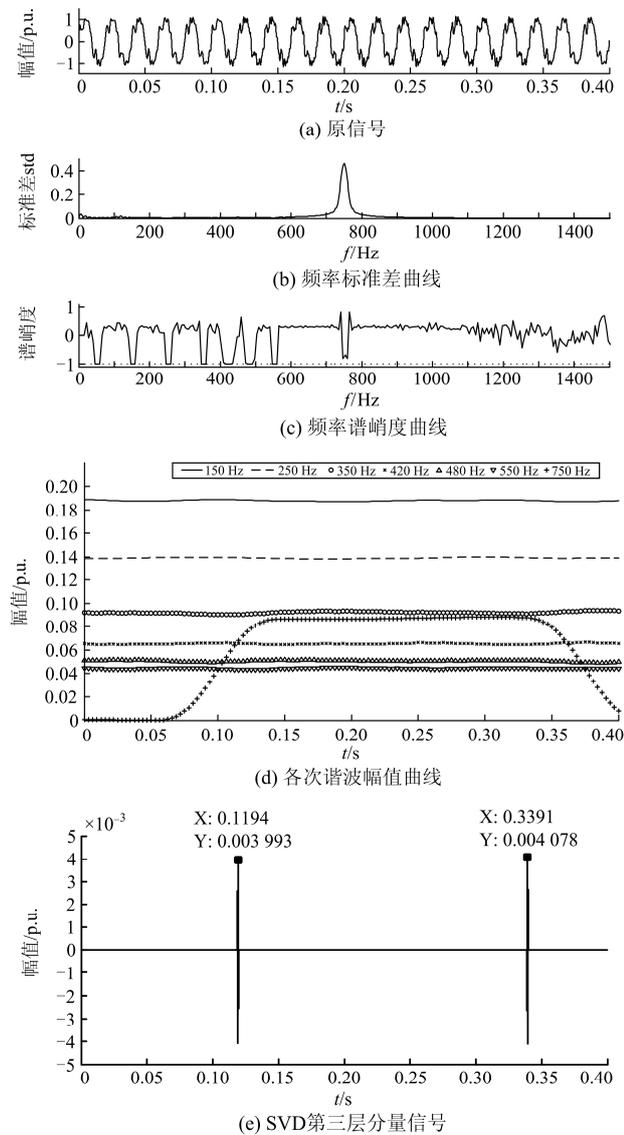


图 6 40 dB 信噪比下谐波检测结果

Fig. 6 Result of harmonic detection with 40 dB SNR

和暂态谐波分量的具体参数检测结果,表中误差的计算公式为:误差=|检测值-理论值|/理论值×100%。

由表 2 和表 3 的结果可知,本文的检测方法具有较高的检测精度,随着噪声强度的增大(信噪比减少),检测误差稍有增加,检测精度略有下降,但是在 30 dB 信噪比下稳态谐波幅值的总体检测误差只有 0.598%,符合电力系统谐波检测的要求。本文的方法不仅适用于间谐波和频率为基频倍数谐波的检测,而且对暂态谐波也具有良好的检测效果。

表 2 稳态谐波检测结果

Table 2 Detection results of stationary harmonic signals

频率/Hz	理论值	幅值/p.u.					
		SNR=30 dB		SNR=40 dB		SNR=50 dB	
		检测值	误差 (%)	检测值	误差 (%)	检测值	误差 (%)
150	0.188	0.187 60	0.213	0.18782	0.095	0.187 98	0.011
250	0.139	0.138 83	0.122	0.13872	0.201	0.138 99	0.007
350	0.092	0.092 53	0.576	0.09192	0.087	0.091 97	0.032
420	0.065	0.065 66	1.015	0.06528	0.431	0.064 96	0.062
480	0.051	0.051 43	0.843	0.05071	0.568	0.050 76	0.471
550	0.044	0.044 36	0.818	0.04380	0.454	0.044 08	0.182

注: 30 dB 下总体误差为 0.598%; 40 dB 下总体误差为 0.306%; 50 dB 下总体误差为 0.128%

表 3 暂态谐波检测结果

Table 3 Detection result of transient harmonic signals

指标	频率 f=750 Hz				
	幅值/p.u.	起始时刻/s	结束时刻/s	持续时间/s	
理论值	0.087	0.12	0.34	0.22	
30 dB	检测值	0.090 38	0.1185	0.3389	0.2204
	误差 (%)	3.885	1.25	0.324	0.182
40 dB	检测值	0.087 94	0.1194	0.3391	0.2197
	误差 (%)	1.080	0.5	0.265	0.136
50 dB	检测值	0.087 26	0.1196	0.3393	0.2197
	误差 (%)	0.299	0.333	0.206	0.136

6 结论

本文提出了一种结合短时傅里叶变换和谱峭度的电力系统谐波检测方法,该方法利用了短时傅里叶变换的时频分析优势和谱峭度对平稳正弦信号的稳定表征能力,采用了基于奇异值分解扰动定位的方法对暂态谐波起止时刻进行准确定位,准确地对信号中各类谐波分量进行识别和提取。通过理论分析和实例验证,得出如下结论:

1) 选取合适的窗函数进行短时傅里叶变换能较好地获得各频率分量的频谱。

2) 引入频谱标准差和基于短时傅里叶变换的谱峭度,对谐波模态进行识别和检测,避免了同一频谱曲线上各谐波分量的特征之间相互干扰而导致

失效的问题。

3) 采用奇异值分解的方法对原信号进行快速线性分解, 利用分量信号的突变点对暂态谐波的起止时刻进行了准确定位。

4) 具有较高的检测精度, 不仅适用于间谐波、频率为基频倍数谐波的检测, 也适用于暂态谐波的检测, 有较好的抗噪能力, 在电力系统中谐波故障诊断、谐波潮流计算和电能计量等方面具有一定的应用前景。

参考文献

- [1] BARROS J, DIEGO R I, DE APRA'IZ M. A discussion of new requirements for measurement of harmonic distortion in modern power supply systems[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2013, 62(8): 2129-2139.
- [2] 唐蕾, 陈维荣. 瞬时无功功率理论坐标变换的推导及谐波电流检测原理分析[J]. 电网技术, 2008, 32(5): 66-69.
TANG Lei, CHEN Weirong. Deduction of coordinate transform for instantaneous reactive power theory and analysis on the principle of harmonic current detection method[J]. Power System Technology, 2008, 32(5): 66-69.
- [3] 周柯, 罗安, 夏向阳, 等. 一种改进的 i_p-i_q 谐波检测算法及数字低通滤波器的优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(34): 96-101.
ZHOU Ke, LUO An, XIA Xiangyang, et al. An improved i_p-i_q harmonic current detecting method and digital low-pass filter's optimized design[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(34): 96-101.
- [4] 李得民, 何怡刚. 基于 Nuttall 窗四谱线插值 FFT 的电力谐波分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 64-71.
LI Demin, HE Yigang. Harmonic analysis of power system based on Nuttall window four-spectrum-line interpolation FFT[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 64-71.
- [5] 李正明, 徐敏, 潘天红, 等. 基于小波变换和 HHT 的分布式并网系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 34-39.
LI Zhengming, XU Min, PAN Tianhong, et al. A harmonic detection method for distributed connected grid system by using wavelet transform and HHT[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 34-39.
- [6] 王宇, 赵庆生, 郭贺宏, 等. 离散正交 S 变换在电能质量扰动检测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(17): 93-97.
WANG Yu, ZHAO Qingsheng, GUO Hehong, et al. Application of discrete orthonormal S-transform in detection of power quality disturbances[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(17): 93-97.
- [7] 易吉良, 彭建春, 谭会生. 采用不完全 S 变换的电能质量扰动检测方法[J]. 高电压技术, 2009, 33(10): 2562-2567.
YI Jiliang, PENG Jianchun, TAN Huisheng. Detection method of power quality disturbances using incomplete S-transform[J]. High Voltage Engineering, 2009, 33(10): 2562-2567.
- [8] 陈欢, 何怡刚, 肖建平, 等. 基于 CWT 和 DWT 相结合的谐波检测[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 71-75.
CHEN Huan, HE Yigang, XIAO Jianping, et al. Harmonics detection based on a combination of continuous wavelet transform and discrete wavelet transform[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 71-75.
- [9] 王洪诚, 王蕾, 沈霞, 等. 基于改进增益型自适应 LMS 算法的谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(5): 42-46.
WANG Hongcheng, WANG Lei, SHEN Xia, et al. New harmonic detection method based on LMS algorithm of improved adaptive gain[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(5): 42-46.
- [10] 王凯亮, 曾江, 王克英. 一种基于 BP 神经网络的谐波检测方案[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 44-48.
WANG Kailiang, ZENG Jiang, WANG Keying. A harmonic detecting scheme based on BP neural network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 44-48.
- [11] 肖助力, 龚仁喜, 陈双, 等. 基于改进 S 变换的电力系统谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 84-90.
XIAO Zhuli, GONG Renxi, CHEN Shuang, et al. Detection of harmonics in power system based on modified S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 84-90.
- [12] 朱宁辉, 白晓民, 董伟杰. 基于 EEMD 的谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 92-98.
ZHU Ninghui, BAI Xiaomin, DONG Weijie. Harmonic detection method based on EEMD[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 92-98.
- [13] 金涛, 陈毅阳, 游胜强. 基于 Nuttall 窗-五点变换的改进 FFT 介质损耗角测量算法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 2): 7-15.
JIN Tao, CHEN Yiyang, YOU Shengqiang. An improved

- FFT algorithm for dielectric loss angle based on nuttall window and five-point polynomial transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S2): 7-15.
- [14] 王尧, 李奎, 任伯飞, 等. 基于全相位傅里叶变换的调制交直流漏电电流检测方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 254-260.
WANG Yao, LI Kui, REN Bofei, et al. Study of fluxgate current detecting method for AC-DC earth leakage current based on apFFT[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 254-260.
- [15] 赵凤展, 杨仁刚. 基于短时傅里叶变换的电压暂降扰动检测[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(10): 28-34.
ZHAO Fengzhan, YANG Rengang. Voltage sag disturbance detection based on short time Fourier transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(10): 28-34.
- [16] 徐永海, 赵燕. 基于短时傅里叶变换的电能质量扰动识别与采用奇异值分解的扰动时间定位[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 174-180.
XU Yonghai, ZHAO Yan. Identification of power quality disturbance based on short-term Fourier transform and disturbance time orientation by singular value decomposition[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 174-180.
- [17] DWYER R F. Detection of non-Gaussian signals by frequency domain kurtosis estimation[C] // IEEE International Conference on ICASSP'83. Acoustics, Speech and Signal Processing. Boston, USA: [s.n.], 1983: 607-610.
- [18] ANTONI J. The spectral kurtosis: a useful tool for characterizing non-stationary signals[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2006(20): 282-308.
- [19] 周智, 朱永生, 张优云, 等. 基于 MMSE 和谱峭度的滚动轴承故障诊断方法[J]. 振动与冲击, 2013, 32(6): 73-77.
ZHOU Zhi, ZHU Yongsheng, ZHANG Youyun, et al. Fault diagnosis method for rolling bearings based on MMSE and spectral kurtosis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2013, 32(6): 73-77.
- [20] 赵妍, 李志民, 李天云. 一种基于谱峭度的异步电机故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(5): 189-196.
ZHAO Yan, LI Zhimin, LI Tianyun. A method for fault diagnosis of induction motors based on spectral kurtosis[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(5): 189-196.
- [21] 阮羚, 李成华, 宿磊, 等. 基于奇异值分解的局部放电模式识别方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 223-228.
RUAN Ling, LI Chenghua, SU Lei, et al. Pattern recognition for partial discharging using singular value decomposition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 223-228.

收稿日期: 2016-04-11; 修回日期: 2016-07-01

作者简介:

黄建明(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电能质量、电力系统运行与控制; E-mail: onlyuknows@163.com

李晓明(1955-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能电网、电能质量、电力系统运行与控制等。E-mail: xml@whu.edu.com

(编辑 葛艳娜)