

基于 HHT 的电能质量扰动定位与分类

田振果, 傅成华, 吴浩, 李莺

(四川理工学院自动化与电子信息学院, 四川 自贡 643000)

摘要: 针对电能质量扰动定位和识别分类的需求, 提出了一种基于 HHT 的电能质量扰动定位与分类的新方法。采用 HHT 算法对电能质量扰动信号进行变换, 获得瞬时幅值、Hilbert 谱和边际谱, 并利用 Hilbert 谱对扰动信号进行定位。从瞬时幅值、Hilbert 谱和边际谱中提取特征量, 为决策分类树提供判断依据以便进行分类识别。仿真实验结果表明, 采用 HHT 算法与决策分类树相结合的电能质量扰动定位与分类不需训练, 提取的特征量少而有效, 分类识别的效果较好, 具有良好的抗噪性能。

关键词: HHT; 电能质量扰动; 定位; 分类

Power quality disturbance for location and classification based on HHT

TIAN Zhenguo, FU Chenghua, WU Hao, LI Ying

(College of Automation and Electronic Information, Sichuan University of Science and Engineering, Zigong 643000, China)

Abstract: According to the demands of using power quality disturbance for localization, recognition and classification, this paper proposes a new method of using power quality disturbance for localization and classification based on HHT. Firstly, power quality disturbance signals are transformed by using the HHT algorithm to get instantaneous amplitudes, Hilbert spectra and marginal spectra. Secondly, disturbance signals can be located by using instantaneous frequency to record the beginning time and the ending time of disturbance. Thirdly, characteristic parameters can be extracted from instantaneous amplitude, Hilbert spectrum and marginal spectrum, serving as evidence for using the decision-making tree for recognition and classification. The simulation results show that the margin of error can be reduced by using Hilbert spectrum for localization. By combining the HHT algorithm and the decision-making tree, no extra training is needed in using power quality disturbance for recognition and classification. Other advantages include extracting effective but fewer characteristic parameters, more desirable effects of recognition and classification, as well as its favorable noise-proof capability.

Key words: HHT; power quality disturbance; location; classification

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)16-0036-07

0 引言

随着社会经济的发展, 非线性负荷成分在电网中的比例增大, 将会引起电压和电流波形发生畸变, 造成电网电能质量污染日趋严重。电力部门和用户对电能质量扰动问题极为关注, 因此对电能质量扰动的有效检测定位与识别具有重要意义。

基金项目: 四川省科技厅支撑项目(2013GZ0030); 人工智能四川省重点实验室项目(2012RYY06, 2013RYY01); 四川省教育厅项目(11ZB100); 四川理工学院培育项目(2012PY18); 自贡市科技局项目(2012D08)

电压骤升、电压骤降、电压中断、瞬时脉冲、含有谐波的电压骤升、含有谐波的电压骤降、含有谐波的电压中断等信号扰动是电能质量扰动中的主要扰动。这些电能质量扰动属于非线性、非平稳信号, 本身具有较大的不规则性, 怎样提取有效的特征量是对电能质量扰动准确检测识别的重要任务。目前小波变换、傅里叶变换和 S 变换等方法多用来提取信号特征量, 支持向量机、小波神经网络和决策分类树等方法主要进行识别分类。而 HHT 能够对非线性、非平稳信号进行处理, 不像小波变换和傅里叶变换那样受局限, 同时决策分类树结构简单, 可以生成容易理解的规则, 计算量相对来说不是很

大, 况且不需要训练, 分辨率较高^[1-5]。

结合 HHT 与决策分类树的优势, 本文提出一种基于 HHT 的电能质量扰动识别分类方法, 对 HHT 变换得到的瞬时幅值、Hilbert 谱和边际谱进行分析和特征量提取, 然后将提取的特征向量作为决策分类树的判断依据进行识别分类。通过大量实验证明, 基于 HHT 的电能质量扰动定位与分类方法误差小, 分类准确度高, 噪声影响较小, 在多扰动信号并存时仍能取得好的分类识别效果。

1 HHT 变换

HHT 是 1998 年由 Huang 提出的一种分析非平稳信号的新方法, 具有自适应性和精确识别能力。HHT 由 EMD 和 Hilbert 变换两部分组成, 先将非线性、非平稳信号分解成若干固有模态分量(IMF)之和, 再对每个 IMF 进行 Hilbert 变换获得相应的瞬时特征量。

1.1 EMD 算法

确定扰动信号 $s(t)$, 它的 EMD 求解步骤如下。

- 1) 求出扰动信号 $s(t)$ 的极大与极小值。
- 2) $s(t)$ 的上、下包络线通过样条函数算出, 并求出平均值 $u(t)$ 。
- 3) 做差 $f(t) = s(t) - u(t)$ 。
- 4) $f(t)$ 是否满足终止条件, 如不满足将 $f(t)$ 作为新的输入信号转至第 1) 步, 否则转为第 5) 步。
- 5) 令 $a = f(t)$, a 即为一个 IMF 的分量, 继续做差 $z(t) = s(t) - a$ 。
- 6) 判断 $z(t)$ 是否符合结束的要求, 如果 $z(t)$ 不符合要求, 那么需要重新将 $z(t)$ 作为扰动信号执行第 1) 个步骤; 如果符合要求, 那么 EMD 求解完毕, 剩余的 $z(t)$ 为残余分量。

n 阶的扰动信号 EMD 分解为

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + z(t) \quad (1)$$

式中, $z(t)$ 为单调的残余函数。

1.2 Hilbert 变换

定义信号 $x(t)$ 的 Hilbert 变换 $y(t)$ 为

$$y(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau = x(t) \cdot \frac{1}{\pi t} \quad (2)$$

然后可定义信号 $x(t)$ 的复解析信号 $z(t)$ 为

$$z(t) = x(t) + jy(t) = a(t)e^{j\theta(t)} \quad (3)$$

解析信号 $z(t)$ 对应的瞬时幅度和瞬时相位是

$$a(t) = \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \quad (4)$$

$$\theta(t) = \arctan \frac{y(t)}{x(t)} \quad (5)$$

信号 $x(t)$ 的瞬时频率定义为

$$\omega(t) = \frac{d\theta(t)}{dt} \quad (6)$$

1.3 Hilbert 谱与边际谱

在获得 IMF 分量后, 对每个分量就可以做 Hilbert 变换得到

$$s(t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j\varphi_i(t)} = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j \int \omega_i(t) dt} \quad (7)$$

这里省略了残余函数 r ; Re 代表取实部。展开式(7)称为 Hilbert 谱, 记作

$$H(\omega, t) = \text{Re} \sum_{i=1}^n a_i(t) e^{j \int \omega_i(t) dt} \quad (8)$$

对式(8)做时间积分可得

$$h(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(\omega, t) dt \quad (9)$$

在这里定义式(9)为 Hilbert 边际谱, 它提供了每一个频率值上总的振幅或能量, 它以概率的形式表示在整个数序列上的累计振幅或能量^[6-8]。

2 电能质量扰动定位与识别的步骤

电能质量扰动定位与识别的步骤如下:

- 1) 对电能质量各项扰动信号进行 EMD 求解和 Hilbert 变换(HHT)并得到瞬时幅值、Hilbert 谱和边际谱。
- 2) 通过 Hilbert 谱的时频特征显示对电能质量扰动准确定位。
- 3) 从瞬时幅值、Hilbert 谱和边际谱中提取有效的特征量。
- 4) 将特征量给予决策分类树作判断依据进行分类识别。

电能质量扰动信号识别分类系统图如图 1 所示。

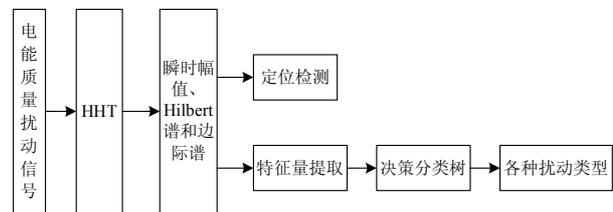


图 1 扰动信号识别系统

Fig. 1 Disturbance signal recognition system

3 基于 HHT 变换的电能质量扰动定位

3.1 电能质量扰动检测

针对常见的电能质量扰动, 利用理想的信号模型, 采用 Matlab 仿真软件生成七种电能质量扰动信号, 正常电压幅值为 220 V, 采样频率为 1 000 Hz, 采样点为 1 000。图 2~图 8 为正常电压、电压骤升、电压骤降、电压中断、瞬时脉冲、电压骤降加谐波和电压中断加谐波等扰动信号时频特征的图形^[9-12]。

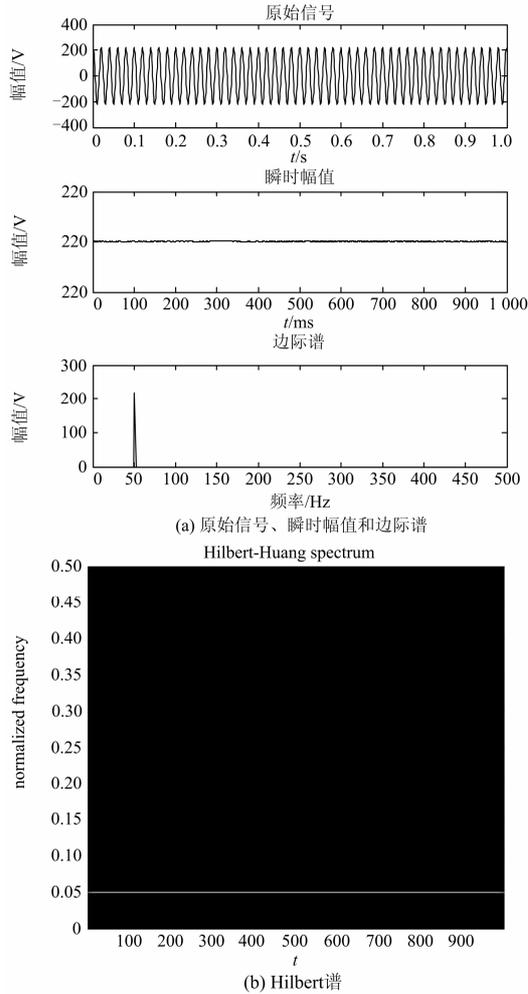


图 2 正常电压

Fig. 2 Normal voltage

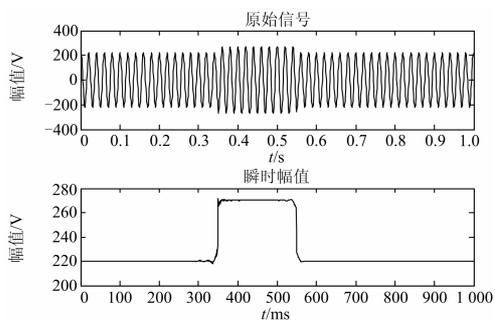


图 3 电压骤升

Fig. 3 Voltage swell

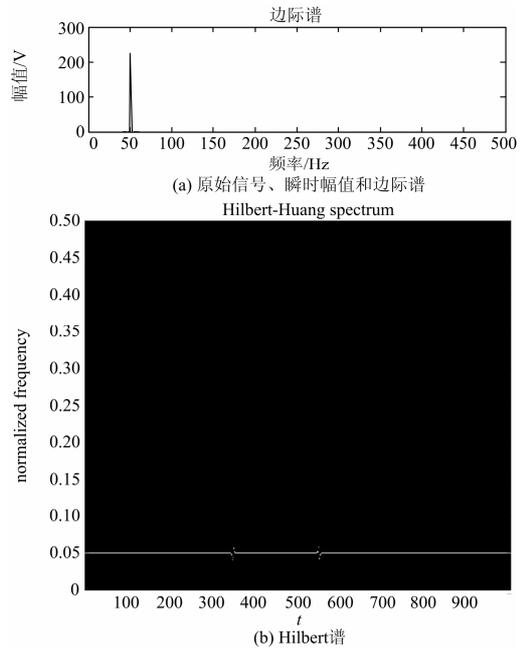
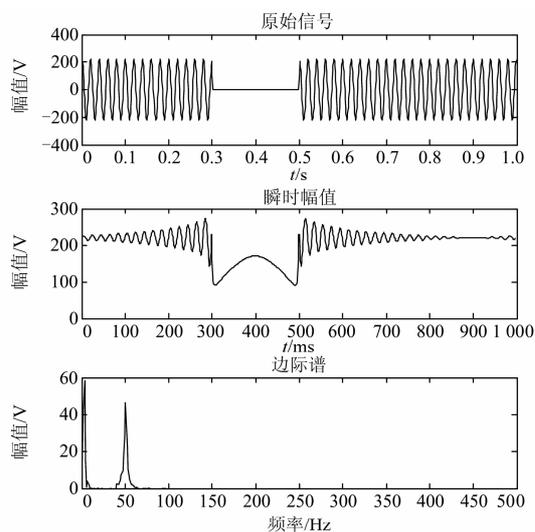
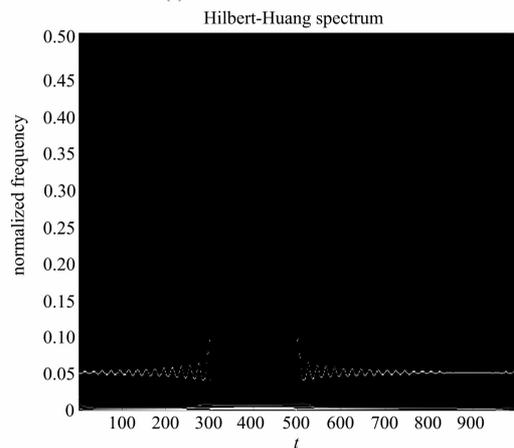


图 4 电压骤降

Fig. 4 Voltage sags

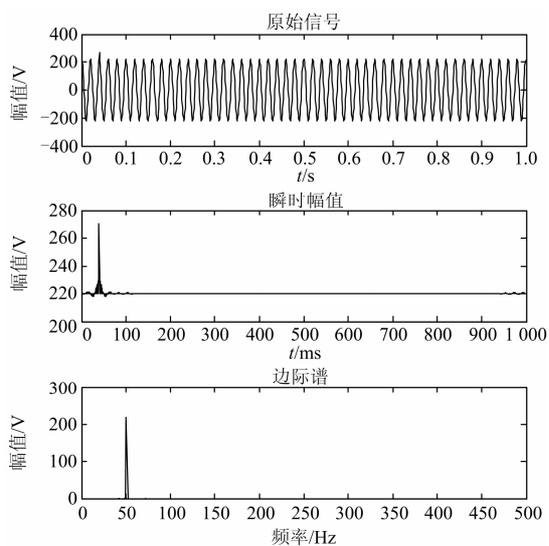


(a) 原始信号、瞬时幅值和边际谱

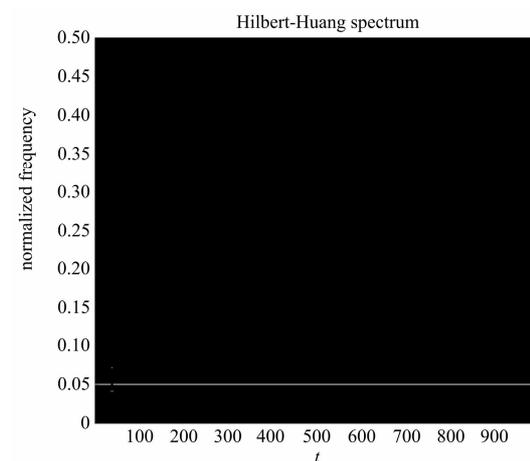


(b) Hilbert谱

图 5 电压中断
Fig. 5 Voltage interruption



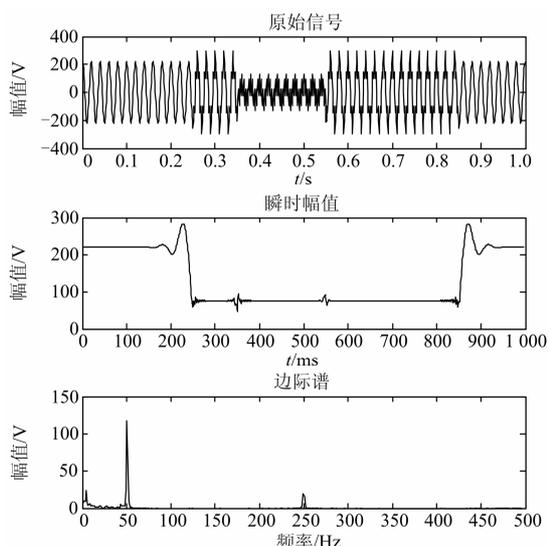
(a) 原始信号、瞬时幅值和边际谱



(b) Hilbert谱

图 6 瞬时脉冲

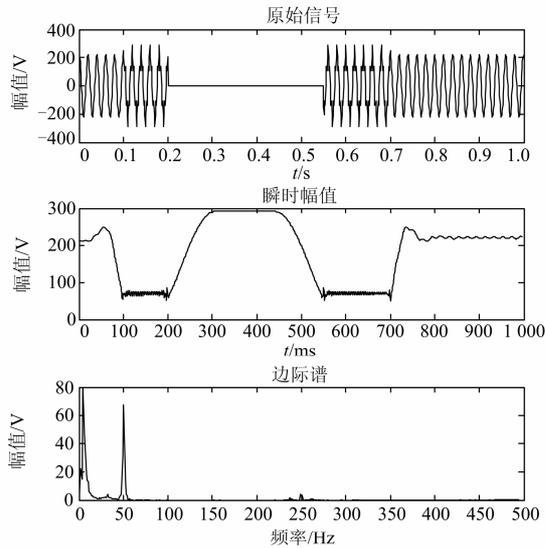
Fig. 6 Transient pulse



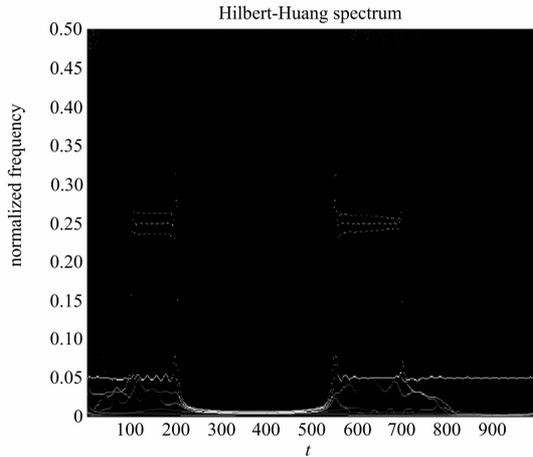
(a) 原始信号、瞬时幅值和边际谱

(b) Hilbert谱

图 7 电压骤降加谐波
Fig. 7 Voltage sag and harmonic



(a) 原始信号、瞬时幅值和边际谱



(b) Hilbert谱

图 8 电压中断加谐波

Fig. 8 Voltage interruption and harmonic

由以上曲线图可见，HHT 算法得出的瞬时幅值、Hilbert 谱和边际谱清楚表达了电能质量各项扰动的时频特征。瞬时幅值清晰地显示出扰动电压幅值上升或下降的幅度，Hilbert 谱可以清晰地看出扰动开始时刻、结束时刻以及持续扰动时间，同时通过边际谱可以看出扰动信号中的频率成分。

3.2 定位仿真结果分析

Hilbert 谱是时间、频率和幅值完整的时频分布，通过 Hilbert 谱上的时频特征能够显示扰动信号频率的突变时刻信息，因此可采用 Hilbert 谱对扰动信号进行定位。下面通过仿真实验来验证 Hilbert 谱定位的准确性，扰动信号定位结果如表 1 所示。

从表 1 中的数据可知，对扰动信号起始时刻和终止时刻检测产生的误差较小。另外 HHT 算法仿真不仅能够比较准确地检测出扰动信号突变的起始

表 1 Hilbert 谱定位结果

Table 1 Positioning results of Hilbert spectrum

扰动类型	扰动起始时刻/s			扰动终止时刻/s		
	实际	检测	误差	实际	检测	误差
电压骤升	0.35	0.347	0.003	0.55	0.548	0.002
电压骤降	0.32	0.318	0.002	0.51	0.508	0.002
电压中断	0.30	0.299	0.001	0.50	0.497	0.003
瞬时脉冲	0.04	0.037	0.003			
骤降+谐波(骤降)	0.35	0.347	0.003	0.55	0.547	0.003
骤降+谐波(谐波)	0.25	0.254	0.004	0.85	0.848	0.002
中断+谐波(中断)	0.20	0.196	0.004	0.55	0.548	0.002
中断+谐波(谐波)	0.10	0.103	0.003	0.70	0.696	0.004

和终止时刻，还能检测出扰动信号持续时间信息。在检测中，端点效应、模态混叠以及谐波等都会对 HHT 算法造成影响，总体来讲，HHT 算法对电能质量扰动的检测平均误差很小，能够满足现实应用，应用 HHT 算法对电能质量扰动检测还是正确可行的。

4 基于 HHT 变换的电能质量扰动识别

4.1 提取特征量

根据 HHT 算法得到扰动信号的瞬时幅值、Hilbert 谱和边际谱，从中提取四个特征量应用于电能质量扰动信号的自动识别并分类^[12]。

(1) A : 扰动信号的频率成分，此特征量用于区别扰动信号是否含有谐波分量。若从边际谱图中得到的所有波峰值对应频率小于等于 50 Hz，则正常电压、电压骤升、电压骤降、电压中断和瞬时脉冲的 $A=0$ ；若高于 50 Hz，证明有谐波存在，则电压骤降加谐波和电压中断加谐波的 $A=1$ ， A 值分布如表 2 所示。

表 2 A 值分布

Table 2 Distribution of A value

类型	边际谱波峰值对应的频率	A
正常电压	50 Hz	0
电压骤升	50 Hz	0
电压骤降	50 Hz	0
电压中断	0、50 Hz	0
瞬时脉冲	50 Hz	0
电压骤降加谐波	0、50 Hz、50 Hz 的整数倍	1
电压中断加谐波	0、50 Hz、50 Hz 的整数倍	1

(2) B : 扰动信号的持续时间，此特征量用于区别扰动信号是瞬时还是具有持续时间段。从 Hilbert

谱可知扰动的开始时刻 t_1 和扰动结束时刻 t_2 , 令 $B=t_2-t_1$, 则正常电压的 B 值为 0; 瞬时脉冲的 B 值小于等于 0.001; 其余扰动信号的 B 值大于 0.001。

(3) C : 电压扰动幅值, 此特征量用于区别扰动信号的幅值变化是凸起还是凹陷。从瞬时幅值上计算扰动开始时刻 t_1 与扰动结束时刻 t_2 之间有效值 C , 电压骤升的 C 值大于 $1.1U$; 电压骤降的 C 值大于 $0.1U$ 小于 $0.9U$; 电压中断的 C 值小于 $0.1U$ 。

利用 HHT 算法进行电能质量扰动检测识别分类, 在瞬时幅值不能准确判断电压骤降和电压中断扰动信号时, 需要对原始信号再进行一次 Hilbert 谱分析, 以判别信号究竟是电压骤降还是电压中断。

(4) D : Hilbert 谱特征, 此特征量用于区别电压骤降或者电压中断扰动信号。在 Hilbert 谱中, 扰动开始时刻 t_1 与扰动结束时刻 t_2 之间, 电压骤降的 D 值大于 0.03; 电压中断的 D 值大于 0 小于 0.01。

基于决策树的分类思想, 利用上述四种特征量取值的不同, 可将七种电能质量扰动类型识别分类出来, 其中 Q1 代表正常电压、Q2 代表电压骤升、Q3 代表电压骤降、Q4 代表电压中断、Q5 代表瞬时脉冲、Q6 代表电压骤升加谐波、Q7 代表电压骤降加谐波、Q8 代表电压中断加谐波, 决策分类树如图 9 所示。

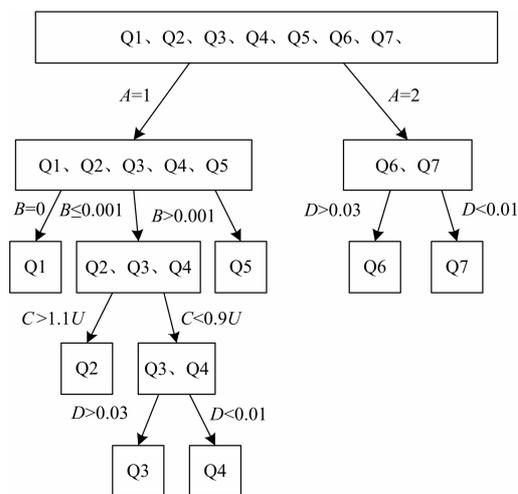


图 9 决策分类树

Fig. 9 Classification decision tree

4.2 扰动识别仿真分析

针对正常电压、电压骤升、电压骤降、电压中断、瞬时脉冲、电压骤升加谐波和电压中断加谐波等七种扰动信号各随机产生 200 个测试样本, 分别选择在 0 dB、20 dB 和 40 dB 信噪比的情况下测试, 仿真结果如表 3。

表 3 决策分类树分类结果

扰动类型	噪声类型		
	0 dB	20 dB	40 dB
正常电压	100	100	100
电压骤升	98.53	89.67	94.32
电压骤降	98.26	92.26	96.44
电压中断	97.34	93.33	95.21
瞬时脉冲	99.10	96.82	98.67
电压骤降加谐波	96.17	88.57	91.26
电压中断加谐波	97.52	89.69	94.34
识别率平均值/%	98.13	92.91	95.75

从表 3 中可知, 在无噪声环境下平均分辨率为 98.13%, 在 20 dB 噪声下平均分辨率为 92.91%, 在 40 dB 噪声下平均分辨率为 95.75%。针对不同类型的电能质量扰动可以获得较好的分类效果, 可以将 HHT 算法得到的瞬时幅值、Hilbert 谱和边际谱特征作为对电能质量扰动进行分类的特征。

5 结论

本文提出并建立了一种基于 HHT 的电能质量扰动定位与分类方法, 利用 Hilbert 谱对扰动信号进行定位, 并从瞬时幅值、Hilbert 谱和边际谱中提取特征量, 为决策分类树提供判断依据进行扰动信号的分类识别, 经过大量仿真实验验证了算法的准确性。实验结果证明采用 HHT 算法和决策分类树对电能质量扰动进行分析, 定位和分类准确性比较高, 提取特征量少而有效, 具有良好的抗噪性能。

参考文献

- [1] 唐求, 王耀南, 郭斯羽, 等. 基于 S 变换与 PNN 的电能质量多扰动检测[J]. 仪器仪表学报, 2009, 30(8): 1668-1673.
TANG Qiu, WANG Yaonan, GUO Siyu, et al. Power quality disturbance detection based on S-transform and PNN[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2009, 30(8): 1668-1673.
- [2] 黄南天, 徐殿国, 刘晓胜. 基于 S 变换与 SVM 的电能质量复合扰动识别[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 23-30.
HUANG Nantian, XU Dianguo, LIU Xiaosheng. Identification of power quality complex disturbances based on S-transform and SVM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(10): 23-30.
- [3] 李华, 贺鹏举, 景丽婷, 等. 基于 RAGA-PPM 的电能质量综合评估方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(增刊 2): 349-353.
LI Hua, HE Pengju, JING Liting, et al. The method of

- power quality comprehensive evaluation based on projection pursuit[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(S2): 349-353.
- [4] 岳明道. 基于 S 变换和分类树的电网暂态电能质量扰动分类辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 32-37.
YUE Mingdao. Transient power quality disturbance classification and identification in grid based on S transform and classification trees[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(9): 32-37.
- [5] 刘伟伟, 蒋晓宇, 蔡华, 等. 基于 Hilbert 变换和分类树的电能质量扰动分类辨识[J]. 电测与仪表, 2010, 47(11): 22-26, 35.
LIU Weiwei, JIANG Xiaoyu, CAI Hua, et al. Power quality disturbance classification based on Hilbert transform and classification trees[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2010, 47(11): 22-26, 35.
- [6] 李新欣. 基于希尔伯特-黄变换的船舶声信号特征提取[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2014, 19(3): 69-73.
LI Xinxin. Ship noises classification based on Hilbert-Huang transform[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2014, 19(3): 69-73.
- [7] 刘志刚, 张巧革, 张杨. 电能质量复合扰动分类的研究进展[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 146-153.
LIU Zhigang, ZHANG Qiaoge, ZHANG Yang. Review of power quality mixed disturbances identification[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 146-153.
- [8] 李文帆, 刘志刚, 孙婉璐. 基于 HHT 的电能质量检测系统研制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 41(23): 123-127.
LI Wenfan, LIU Zhigang, SUN Wanlu. Development of power quality detection system based on HHT[J]. Power System Protection and Control, 2011, 41(23): 123-127.
- [9] 李天云, 赵妍, 李楠, 等. 基于 HHT 的电能质量检测新方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17): 52-56.
LI Tianyun, ZHAO Yan, LI Nan, et al. A new method for quality detection based on HHT[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(17): 52-56.
- [10] 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.
- [11] 陈霞. HHT 变换在电气化铁道电能质量检测中的应用[J]. 电气技术, 2011(6): 56-60.
CHEN Xia. Application of Hilbert-Huang transform to detection of electrified railway power quality[J]. Electrical Technology, 2011(6): 56-60.
- [12] 王娜娜, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 基于 EMD-TEO 及信号能量分析法的主导低频振荡模式识别[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 198-204.
WANG Nana, LIU Dichen, LIAO Qingfen, et al. Identification of the dominant inertial mode based on EMD-TEO and signal energy method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 198-204.

收稿日期: 2014-12-04; 修回日期: 2014-12-16

作者简介:

田振果(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向电力系统控制; E-mail: 348082683@qq.com

傅成华(1958-), 男, 教授, 主要从事智能控制研究;

吴浩(1980-), 男, 副教授, 主要从事电力系统控制研究。

(编辑 周金梅)