

基于复小波变换的暂态电能质量扰动检测与分类

冯浩, 周维维, 刘毅

(输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆市沙坪坝区 400044)

Detection and Classification of Transient Power Quality Disturbances Based on Complex Wavelet Transform

FENG Hao, ZHOU Luo-wei, LIU Yi

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University),
Shapingba District, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: A method that derives complex wavelet corresponding with Daubechies real wavelet is proposed. On this basis, by use of phase information of complex wavelet transform several types of short duration power quality disturbances (SDPQD) are analyzed. To remedy the defect that the characteristic of the phase diagram obtained from complex wavelet transform is not obvious, the improved phase diagram, by which the phase variation can be observed more clearly, is put forward, thus the disturbances can be located more accurately; meanwhile, according to the characteristics exhibited by the improved phase diagram, various disturbances can be easily classified. Simulation results show that using the improved phase diagram several types of SDPQD can be detected and classified easily and effectively.

KEY WORDS: power quality; short duration disturbance; complex wavelet transform; phase

摘要: 根据 Daubechies 实小波生成相应的复小波, 在此基础上, 利用复小波变换的相位信息分析几种常见的短时电能质量扰动。针对由复小波变换得到的相位图特征不明显的问题, 提出了改进相位图, 能更清楚地观察到扰动时的相位变化, 便于更精确地对扰动进行定位, 同时根据改进后的相位图所表现出来的特征可以简单地对各种扰动进行分类。仿真分析表明, 利用改进后的相位图可以简单有效地实现对常见的短时扰动的检测与分类。

关键词: 电能质量; 短时扰动; 复小波变换; 相位

0 引言

近年来, 随着电网中电力电子设备、电弧炉、轧钢机等非线性负荷和冲击性负荷的广泛应用, 电能质量问题日益成为电力部门和用户普遍关注的

问题, 特别是暂态电能质量问题, 诸如电压凸起(voltage swells)、电压凹陷(voltage sags)、短时中断(momentary interruptions)等短时电能质量扰动(short duration power quality disturbances, SDPQD)^[1-3]给工业生产和敏感负荷造成了严重影响, 因此, 对各种SDPQD进行有效的检测和分类具有重要意义。

小波变换(wavelet transform, WT)具有良好的时频局部化特性^[4], 能同时提取信号的时频信息, 适合突变信号和不平稳信号的检测, 已经成为一种高效的信号分析工具, 并在检测和识别短时电能质量扰动中得到了广泛应用^[5-9]。而常用的实值小波变换只能提供信号的幅频特性, 不能充分利用信号的相位信息, 影响检测信号扰动的准确性。与之相比, 复小波变换含有丰富的相位信息, 不仅能提供信号的幅频特性, 而且能提供信号的相频特性^[10-12], 因此能更好地提取扰动的特征信息。但是目前对复小波的应用大多是利用其复合信息^[11,13]对扰动进行检测, 计算量较大, 而且很少涉及到利用复小波变换进行分类。

本文通过对复小波变换的深入研究, 提出一种利用改进相位信息来检测和区分各种常见扰动的方法。利用现有的正交紧支实小波构造出相应的复小波, 分析了5种常见的SDPQD: 电压凸起、电压凹陷、短时中断、暂态脉冲和暂态振荡。针对由复小波变换得到的相位图特征不明显的问题, 提出一种改进的相位图, 能更加清楚地观察到波形畸变时相位的变化情况, 便于更精确地对扰动进行定位, 同时根据改进后的相位图所表现出来的特征可以简单地对各种扰动进行分类。仿真实例分析证明, 本文提出的改进相位图能很好地检测与区分以上几种常见扰动, 方法简单有效。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50677071)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC)(50677071).

1 复小波变换简介

设被分析信号经复小波变换后得到的复系数为 W_C ，令其实部与虚部分别为 W_{Re} 和 W_{Im} ，即 $W_C=W_{Re}+jW_{Im}$ ，则其幅值信息与相位信息分别为

$$W_M = \sqrt{W_{Re}^2 + W_{Im}^2} \tag{1}$$

$$W_{PH} = \arctan(W_{Im} / W_{Re}) \tag{2}$$

可见，信号的复小波变换实际上是对该信号在 2 个互相正交的空间同时做实小波变换，相比于实小波变换只能得到原信号 1 个空间中的信息，复小波同时提供了 2 个正交空间的信息。这样，复小波变换除了提供实小波变换的幅值信息外，还提供了 2 个正交空间中信号分量间特有的关系信息——相位信息。利用复小波变换得到的相位信息能敏感地反映信号的突变信息，更全面、清晰地表现出信号的畸变^[13]。

通过对多种实小波的比较发现，Daubechies 系列小波具有正交、时频紧支撑、高正规性等优点，在处理短时电能质量扰动检测时效果最佳，并且 Db 系列小波中的 Db4 小波处理能力最优^[14]。因此，本文根据文献[11,13]中的方法，以 Db4 实小波为基础构造了相应的复小波，其滤波器组系数为： $-0.0178-j0.0843$ ， $-0.1020+j0.1409$ ， $0.5129+j0.1398$ ， $-0.6822-j0.3095$ ， $0.2613-j0.0266$ ， $0.0829+j0.1963$ ， $-0.0494-j0.0289$ ， $-0.0058-j0.0277$ ，以此来对各种 SDPQD 进行分析。

2 改进相位算法

用 Matlab 建立电压凹陷扰动信号的数学模型：

$$u(t) = \begin{cases} \sin(2\pi ft), & t < t_1, t > t_2 \\ 0.8\sin(2\pi ft), & t_1 \leq t \leq t_2 \end{cases} \tag{3}$$

设信号的基波频率为 $f=50\text{Hz}$ ，扰动起始时刻为 $t_1=0.06\text{ s}$ ，结束时刻为 $t_2=0.13\text{ s}$ ，通过 Matlab 程序对扰动信号进行 Db4 复小波变换，在尺度 1 下得到的波形如图 1 所示。其中图 1(b)为按照式(2)计算得到的相位图，可以看出，在扰动起始时刻 0.06 s 和结束时刻 0.13 s，相位波形发生了变化，可据此来检测扰动。但扰动点对应时刻的确定存在一定的难度，同时此相位图中含有大量的非扰动信号反映出的信息，并且在扰动持续时间 Δt 内的特征不明显，不便于对扰动进行分类。

为解决此问题，本文提出一种改进的方法，可使扰动信息更加明显地表现出来。其主要思想是通过复小波对与扰动信号基波频率相同的正弦信号

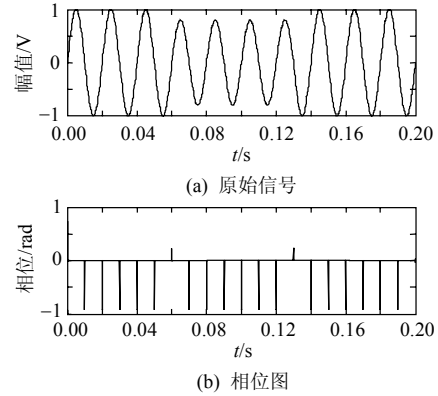


图 1 Db4 复小波检测电压凹陷结果
Fig. 1 Detection results of voltage sags by Db4 complex wavelet

进行变换，得到一组标准的相位系数 W_{PH0} ，将其它含有扰动的信号通过复小波变换后得到的相位系数 W_{PH} 与之作差，得到一组新的数据 W_{PH1} ，这样非扰动信息就可以被抵消掉，余下的信息就是扰动的特征信息。改进算法流程如图 2 所示。

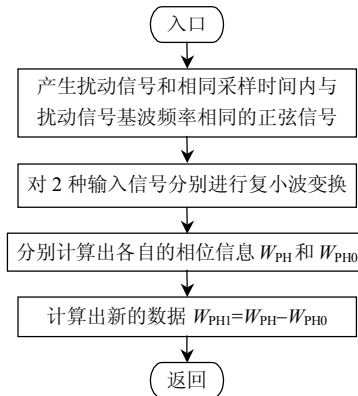


图 2 改进算法流程
Fig. 2 Flow chart of the improved algorithm

用上述方法对图 1(b)进行改进，得到如图 3 所示的改进相位图。

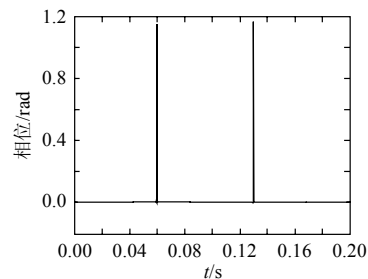


图 3 改进后的相位波形
Fig. 3 The improved phase waveform

从图 3 可以很清楚地看出：在信号没有突变的区间相位值几乎为零；而在突变点处相位值表现出极大值。由此可根据以下步骤得到准确的扰动起止时刻：

- 1) 计算 $|W_{PH1}|$ 的平均值 \bar{M} 。

2) 依次计算 $|W_{PHI}|$ 中每个数据与 \bar{M} 的相对差存入新的数组 M 中, 即 $M=(|W_{PHI}|-\bar{M})/\bar{M}$ 。

3) 将数组 M 中的元素与设定阈值(根据仿真情况, 这里设为100)进行比较, 找出数组 M 中大于阈值的元素组成新的数组 P 。

4) 数组 P 中的第1个元素和最后一个元素所对应的时刻即为扰动发生的起止时刻。

按照上述步骤计算出图3中扰动的起始时刻为0.0601s, 结束时刻为模极大值对应的时刻0.1301s, 可见与理论值相差甚小。同时数组 P 中的元素均为与扰动有关的特征信息, 有利于对扰动的分类。

3 仿真分析

基于文献[15]中的电能质量扰动数学模型, 笔者建立了电压凸起、短时中断、暂态脉冲、暂态振荡这4种常见扰动的数学模型, 根据Matlab产生扰动数据, 利用改进后的相位图分别对这几种扰动进行仿真分析。图4~7分别给出了通过Db4复小波变换在尺度1下得到的仿真结果。

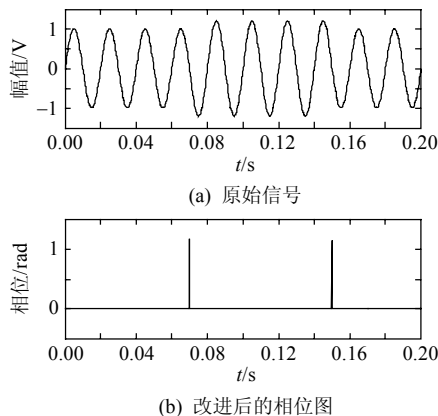


图4 Db4复小波检测电压凸起结果
Fig. 4 Detection results of voltage swells by Db4 complex wavelet

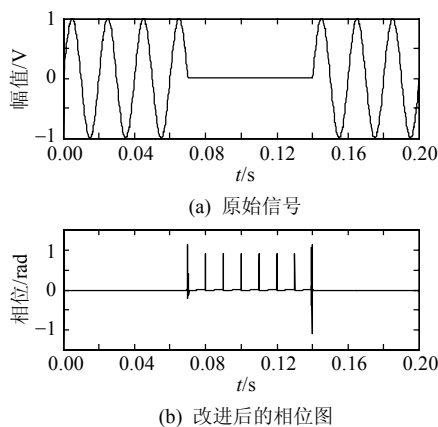


图5 Db4复小波检测短时中断结果
Fig. 5 Detection results of momentary interruption by Db4 complex wavelet

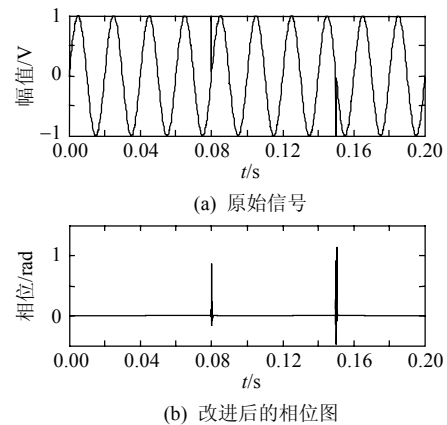


图6 Db4复小波检测暂态脉冲结果
Fig. 6 Detection results of transient pulse by Db4 complex wavelet

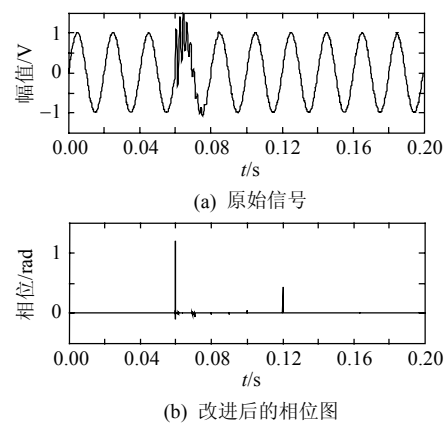


图7 Db4复小波检测暂态振荡结果
Fig. 7 Detection results of transient oscillation by Db4 complex wavelet

从图4~7中可以清楚地看出各扰动发生及结束时刻, 将其与Db4实小波变换得到的结果进行对比, 如表1、2所示。

表1 Db4复小波变换得到的短时扰动的理论与实测值
Tab. 1 Theoretical and detected values of short duration disturbance by Db4 complex wavelet transform

扰动类型	起始时刻/s		结束时刻/s	
	理论值	实测值	理论值	实测值
电压凸起	0.07	0.069 8	0.15	0.149 8
短时中断	0.07	0.070 0	0.14	0.140 0
暂态脉冲	0.08	0.080 0	0.080 2	0.080 1
暂态振荡	0.15	0.149 9	0.150 2	0.150 1

表2 Db4实小波变换得到的短时扰动的理论与实测值
Tab. 2 Theoretical and detected values of short duration disturbance by Db4 real wavelet transform

扰动类型	起始时刻/s		结束时刻/s	
	理论值	实测值	理论值	实测值
电压凸起	0.07	0.069 4	0.15	0.149 6
短时中断	0.07	0.069 5	0.14	0.139 8
暂态脉冲	0.08	0.080 2	0.080 2	0.080 4
暂态振荡	0.15	0.149 5	0.150 2	0.150 2
暂态振荡	0.06	0.060 4	0.12	无法检出

对比表 1、2 中的检测结果可以看出，利用复小波变换改进后的相位图检测出的扰动起止时刻更接近理论值。此外，对于暂态振荡的检测，利用本文提出的方法可以精确地检测出扰动的结束时刻，而利用实小波变换却无法检测出，这进一步证明了本文所提出检测方法的优越性。对于含有噪声的电能质量扰动信号，可以先采用文献[16-17]中的方法进行去噪处理，再使用本文的检测方法进行扰动检测，这里不再讨论。

4 含有各种扰动的混合信号检测与扰动的分类

设被分析正弦信号(基波为 50 Hz)中同时含有文中提到的 5 种 SDPQD，图 8 为 Db4 复小波在尺度 1 下的检测结果。

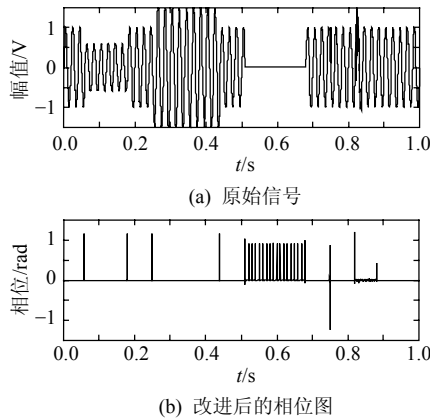


图 8 Db4 复小波检测混合信号结果
Fig. 8 Detection results of mixed-signal by Db4 complex wavelet

从图 8 可以看出，Db4 复小波可以有效地检测出各种扰动的起止时刻。同时，从图 8(b)所示的改进后的相位图可以看出，对于电压凹陷和凸起，其特征表现为 2 个极大值，在扰动持续时间 Δt 内相位系数几乎为零，此时只要检测出扰动持续时间 Δt 内原始信号的幅值即可区分这 2 种扰动。短时中断的特征是在扰动持续时间 Δt 内相位系数表现出多个极值，但在扰动开始和结束时刻模值更大，并且在 Δt 时间内信号幅值为零。暂态脉冲的特征是相位仅在极短的时间内出现一个极值。暂态振荡在扰动开始和结束时刻存在 2 个极值，并且在扰动持续时间 Δt 内存在很小的不为零的系数。因此，可以根据数组 P 中元素的个数 N 和信号的幅值 U 进行扰动的有效分类，在本文设定的仿真参数下编制的扰动识别子程序如图 9 所示。

与其他分类方法^[6,15]相比，这种利用复小波变

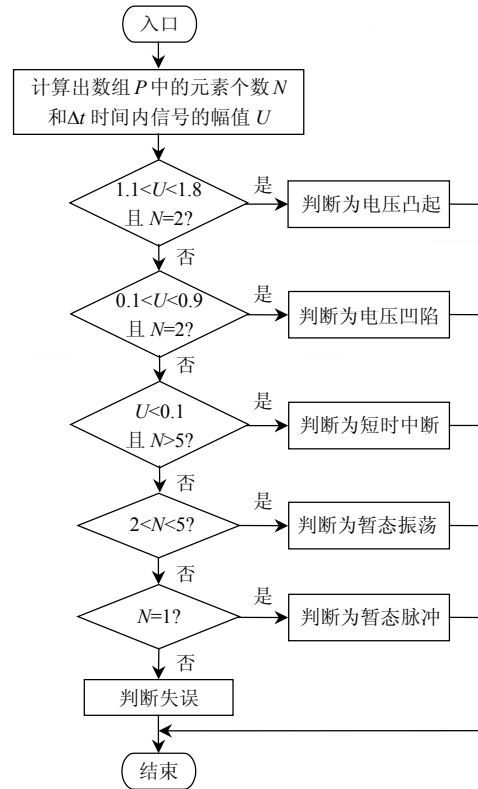


图 9 扰动识别子程序

Fig. 9 Subprogram for identifying disturbances

换改进相位信息的分类方法只需进行一个尺度的小波变换，算法更为简单，并且提取的特征量均为不同扰动各自特有的信息，因此误判率较低。

5 结论

1) 与实小波变换算法相比，改进相位法具有更高的精度，特别是对于暂态振荡的检测达到了实小波变换没有的效果。同时本算法只需对信号进行一层分解，方法简单有效。

2) 根据改进后的相位图所反映出的各种扰动独有的特征，能简单有效地对扰动进行分类。

3) 本文方法的不足之处在于对电压凹陷和电压凸起的分类不能只根据改进后的相位图，仍要通过原信号的幅值进行判断，有待进一步改善。

4) 本文提出的方法可通过数字信号处理器(digital signal processor, DSP)、现场可编程门阵列(field programmable gate array, FPGA)等硬件或 LabVIEW 软件来实现，实用性强，对此笔者将做进一步研究。

参考文献

[1] Dugan R C, McGranghan M F, Beaty H W. Electrical power systems quality[M]. New York: McGraw-Hill, 1996: 11-21.
[2] 林海雪. 现代电能质量的基本问题[J]. 电网技术, 2001, 25(10):

- 5-12.
Lin Haixue. Main problems of modern power quality[J]. Power System Technology, 2001, 25(10): 5-12(in Chinese).
- [3] 肖湘宁, 徐永海. 电能质量问题剖析[J]. 电网技术, 2001, 25(3): 66-69.
Xiao Xiangning, Xu Yonghai. Power quality analysis and its development[J]. Power System Technology, 2001, 25(3): 66-69(in Chinese).
- [4] Daubechies I. Ten lectures on wavelets[M]. Pennsylvania: Society for Industrial and Applied Mathematics Philadelphia, 1992: 9-12.
- [5] 胡铭, 陈珩. 基于小波变换模极大值的电能质量扰动检测与定位[J]. 电网技术, 2001, 25(3): 12-16.
Hu Ming, Chen Heng. Detection and location of power quality disturbances using wavelet transform module maximum[J]. Power System Technology, 2001, 25(3): 12-16(in Chinese).
- [6] 严居斌, 刘晓川, 杨洪耕, 等. 基于小波变换模极大值原理和能量分布曲线的电力系统短期扰动分析[J]. 电网技术, 2002, 26(4): 16-18,33.
Yan Jubin, Liu Xiaochuan, Yang Honggeng, et al. Analysis of short-term power system disturbance based-on module maximum principle and energy distribution curve[J]. Power System Technology, 2002, 26(4): 16-18,33(in Chinese).
- [7] Santoso S, Powers E J, Hofmann P. Power quality assessment via wavelet transform analysis[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2): 924-930.
- [8] Poisson O, Rioual P, Meunier M. Detection and measurement of power quality disturbances using wavelet transform[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(3): 1039-1044.
- [9] Karimi M, Mokhtari H, Irvani M R. Wavelet based on-line disturbance detection for power quality applications[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(4): 1212-1220.
- [10] 何建军, 任震, 黄雯莹, 等. 电力系统奇异信号的复值小波分析[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(11): 1-4.
He Jianjun, Ren Zhen, Huang Wenying, et al. Complex wavelet analysis for singular signals of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(11): 1-4(in Chinese).
- [11] 陈祥训. 正交紧支复小波的生成及其在电力系统的应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7): 83-88.
Chen Xiangxun. Complex compactly-supported orthonormal wavelets and their applications in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(7): 83-88(in Chinese).
- [12] 薛蕙, 杨仁刚, 郭永芳. 利用复值小波变换检测轻微的电力系统扰动[J]. 电网技术, 2004, 28(17): 24-27.
Xue Hui, Yang Rengang, Guo Yongfang. Detection of minute disturbance by complex wavelet transform[J]. Power System Technology, 2004, 28(17): 24-27(in Chinese).
- [13] 刘守亮, 肖先勇. Daubechies 复小波的生成及其在短时电能质量扰动检测中的应用[J]. 电工技术学报, 2005, 20(11): 106-110.
Liu Shouliang, Xiao Xianyong. Daubechies complex wavelets and their application in short duration power quality disturbances detection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(11): 106-110(in Chinese).
- [14] Brito N S D, Souza B A, Pires F A C. Daubechies wavelets in quality of electrical power[C]. The 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Athens, Greece, 1998: 511-515.
- [15] 张全明, 刘会金. 最小二乘支持向量机在电能质量扰动分类中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 106-110.
Zhang Quanming, Liu Huijin. Application of LS-SVM in classification of power quality disturbances[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 106-110(in Chinese).
- [16] 任震, 张征平, 黄雯莹, 等. 基于最优小波包的电动机故障信号的消噪与检测[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 53-57.
Ren Zhen, Zhang Zhengping, Huang Wenying, et al. Denoising and detection of faulted motor signal based on best wavelet packet basis [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(8): 53-57(in Chinese).
- [17] 薛蕙, 杨仁刚. 基于小波包除噪的电能质量扰动检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 85-90.
Xue Hui, Yang Rengang. Power quality disturbance detection method using wavelet package transform based de-noising scheme [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 85-90(in Chinese).



冯浩

收稿日期: 2009-10-13。

作者简介:

冯浩(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事电能质量分析及谐波治理方面的研究, E-mail: vonherbert@cqu.edu.cn;

周维维(1954—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力电子技术、电路理论及应用等;

刘毅(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事电能质量监测方面的研究。

(责任编辑 沈杰)