

短时电能质量扰动检测的一种新方法

刘安定¹, 肖先勇¹, 邓武军²

(1. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065; 2. 宜宾电业局, 四川 宜宾 644000)

摘要: 将 DCT(离散余弦变换)变换和差变算法结合起来进行短时电能质量扰动的检测。对含强噪声的短时电能质量扰动采样信号(电压凹陷、电压凸起和电压间断)进行 DCT变换,从所得 DCT系数中提取出差变信号,通过 DCT系数和差变序列检测出扰动的幅值和起止时间。仿真结果表明,用该方法检测扰动,分析过程简单,利用 DCT系数的噪声鲁棒性能实现强噪声环境下的扰动信号检测,且检测精度较高。

关键词: 电能质量扰动; DCT变换; 噪声鲁棒性; 差变序列

中图分类号: TM714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)08-0027-04

0 引言

大型电力变压器、电力电子设备及其它非线性负荷的大量使用已对电能质量产生了负面影响,而工业自动化、微处理器及电力电子等智能器件又易受电力系统扰动的影响。因此电力部门需要对电能质量进行连续检测以便采取合理的措施改进电能质量^[1]。其中电能质量短时扰动检测分析在电能质量分析中占有重要的地位。

国内外许多专家学者利用小波变换进行各种电能质量分析^[2~5]。但是小波变换对信号噪声比较敏感,当噪声污染严重或扰动发生、终止在信号过零点时,可能无法检测或误测到信号突变点,使方法失效。文献[6]提出用 DB1小波低频分解系数检测电压凹陷、凸起和间断,可避开噪声影响,不过检测精度有限。文献[7]中通过在时域定义的差变信号确定短时电能质量扰动的位置和范围,但是这种方法不能提供信号的频域信息,无法有效地区分信号的高频信息和低频信息,当不同频率范围的扰动在时域相互叠加时不易分辨。

本文将 DCT变换与差变算法结合起来,利用 DCT系数消除噪声干扰,再通过差变算法从 DCT系数中提取出差变序列,实现对扰动的时域定位,检测出强噪声下短时扰动的各项特征参数,且检测精度相对较高。

1 DCT变换的基本原理

由傅里叶级数可知任何信号 $f \in C^N$ 都可以写为一些余弦函数的线性组合,且这些余弦函数在 C^N 是正交的。因此总可以用余弦块基来分解信号。不过余弦块基是通过将直线分为不相交区间的非连续

长方形窗口而计算的,用这种窗口去乘一个信号会产生间断,导致高频时的大幅值系数。为避免这些间断瑕疵,有必要使用光滑窗口。于是最终得到了局部余弦基。

离散化的局部余弦基 $g_{p,k}[n]$ 是 $l^2(Z)$ 的规范正交基,它的定义如下所示,

$$g_{p,k}[n] = g_p[n] \sqrt{\frac{2}{l_p}} \cos \left[\left(k + \frac{1}{2}\right) \frac{n - a_p}{l_p} \right] \quad (0 \leq k < l_p, p \in Z) \quad (1)$$

式中: $g_p[n]$ 是离散的光滑窗口, p, k 分别代表对时域和频域的划分, l_p 是时域 p 的长度, a_p 是时域 p 的左端点, $\{e_{l,k}[n]\} = \sqrt{\frac{2}{l}} \cos \left[\left(k + \frac{1}{2}\right) \frac{n + \frac{1}{2}}{l} \right] \quad (0 \leq k < l)$ 是离散型余弦基。典型的局部余弦基波形如图 1 所示。

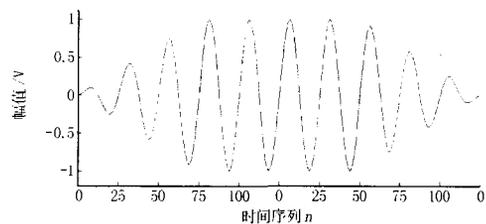


图 1 局部余弦基波形

Fig 1 Waveform of local cosine function

局部余弦基可形式地表为时频平面的一个精确覆盖。每个局部余弦基的高能量集中的时域和频域被 Heisenberg 长方形所逼近^[8],如图 2 所示。局部余弦基 $\{g_{p,k}\}_{(k \in N, p \in Z)}$ 对应于大小随时间变化的时频网格,它的时频范围为

$$[a_p, a_{p+1}] \times \left[p, k - \frac{1}{2l_p}, p, k + \frac{1}{2l_p} \right]$$

其中

$$p, k = \frac{(k+1/2)}{l_p} \quad (2)$$

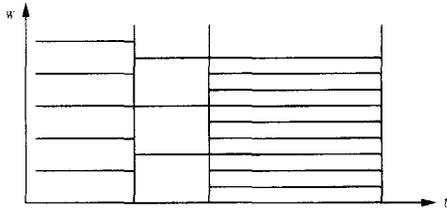


图 2 局部余弦基的 Heisenberg 盒

Fig 2 Heisenberg box of local cosine function

对信号 f 作 DCT 变换 (即离散余弦变换) 就是求 $\langle f, g_{p,k} \rangle$ 。分解系数 $\langle f, g_{p,k} \rangle$ 可通过折叠 f 为 h_p , 并计算它与定义在 l_p 上的正交基 $\{e_{p,k}\} (0 \leq k < l_p)$ 的内积而算得。对于时域 p , DCT- 系数

$$C_{p,k} = \langle f, g_{p,k} \rangle = \langle h_p, e_{p,k} \rangle = \sum_{n=p,0}^{k < l_p} h_p[n] \cdot \sqrt{\frac{2}{l_p}} \cos\left[\left(k + \frac{1}{2}\right) \frac{n - a_p}{l_p}\right] \quad (3)$$

式中: h_p 是 f 的折叠, 也就是用光滑窗口 $g_p[n]$ 与信号 f 相乘。另外, 还应根据要求不同恰当地选择时域划分的长度 l_p 。

2 在短时电能质量扰动检测中的应用

本文研究的短时电能质量扰动包括电压凹陷、电压凸起和电压间断。电压凹陷是指工频电压的有效值降至 0.1~0.9 pu, 持续时间在 0.01 s~1 min 的电磁扰动现象。电压凸起是指工频电压的有效值增至 1.1~1.8 pu, 持续时间在 0.01 s~1 min 的电磁扰动现象; 电压间断是指供电电压或负荷电流减小至小于 0.1 pu 且持续时间不超过 1 min 的电磁扰动现象。

由前面可知 DCT 变换是一种线性正交变换, DCT 系数代表了时域 p , 频域 k 上信号在局部余弦族函数上的投影。如果信号发生扰动, 则对应时频区域的 DCT 系数也会产生变化。重点应考虑的是如何选择时域划分的长度。很显然, 只考虑绝对值大小的话, 最小以半个基波周期 $T/2$ 为单位划分信号时域, 则作 DCT 变换后可直接检测出扰动。不过此时对扰动的时域定位只能精确到 0.01 s。为了进一步提高检测精度, 可以适当缩短时域划分, 也就是使图 2 中的 Heisenberg 盒变窄。缩短时域划分的长

度会在一定程度上影响信号幅值的检测, 在增加时域定位精度的同时会稍稍增大幅值检测的误差。不过这种误差的增加是很有限的, 不会对其精确度造成明显的影响 (见仿真结果)。相对在时域精度的大幅增加, 增加这点误差是很值得的。当然, 缩短时域长度也应该在一个适当的范围内, 当取得太短时, 幅值的检测就会明显受到信号噪声的影响, 产生较大的误差。本文仿真中取 $T/8$ 为单位划分信号时域。

作 DCT 变换后, 每个信号周期对应若干个 DCT 系数, 如下所示在 DCT 域定义一个差变序列

$$diff(m) = C(m) - C(m - l) \quad (4)$$

式中: $C(m)$ 是扰动所在频段的 DCT 系数, l 应根据时域划分的不同取不同的值, 本文中 l 的值为 4。通过监测差变序列 $diff$ 的突变起始点就能检测到是否有电能质量扰动出现, 进而得到扰动时间和扰动幅度。

在检测和分析过程中, 该方法充分利用了 DCT 变换的一些性质。首先, 一个 DCT 系数考察的是一段时长内信号的表现, 其幅值主要由信号本身决定, 对噪声不敏感, 有较好的噪声鲁棒性。而且, 由定义可知, DCT 变换可以实现对信号的降维, 减少数据再处理时的运算量。应用到本文中, 可以简单地从 DCT 域提取出一个差变序列, 最终实现对扰动的定位。

3 仿真分析

3.1 仿真信号分析过程

实际电压信号的检测过程中总会引入噪声, 即检测到的电压信号是由原始信号和噪声线性组合而成, 特别是系统故障时引起的信号扰动, 可能会产生强烈的噪声, 使信噪比达到一个相当低的水平。本文中扰动仿真信号采样频率为 6.4 kHz, 采样时间为 10 个工频周期, 信噪比取 25 dB 左右。

图 3~5 分别是用本文提出的方法分析电压凹陷, 电压凸起和电压间断所得波形。由采样频率知每个基波周期有 128 个采样点, 如前所述, 以 $T/8$ 即每 16 个采样点为单位划分信号。由于这里所涉及的都是基波频率范围的扰动, 因此在分析时可只考察基频范围的 DCT 系数。

将 $l_p = T/8$ 代入式 (2) 可得

$$\left[p, k - \frac{1}{2l_p}, p, k + \frac{1}{2l_p} \right] = \left[\frac{(k+1/2)}{l_p} - \frac{1}{2l_p}, \frac{(k+1/2)}{l_p} + \frac{1}{2l_p} \right] =$$

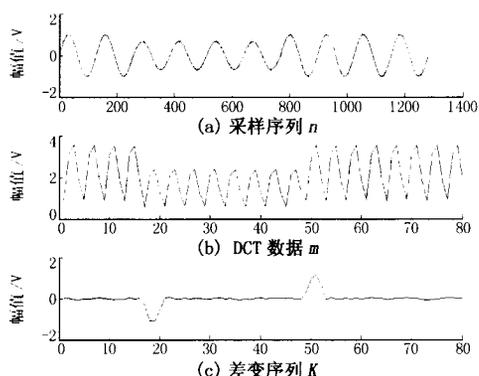


图3 电压凹陷采样信号及分析

Fig 3 Voltage sag sampling signal with analysis

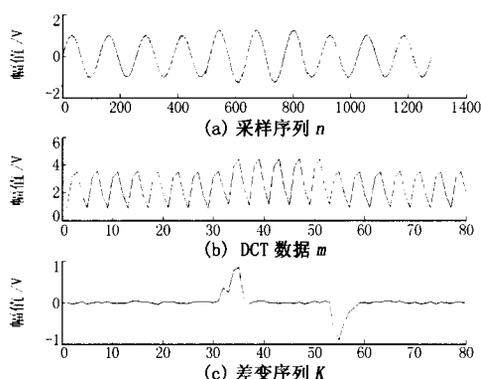


图4 电压凸起采样信号及分析

Fig 4 Voltage swell sampling signal with analysis

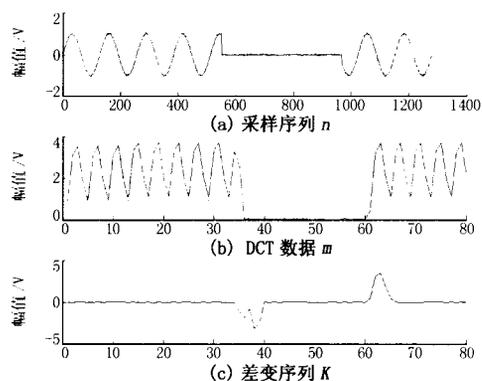


图5 电压间断采样信号及分析

Fig 5 Voltage interruption sampling signal with analysis

$$[4kf, 4(k+1)f]$$

式中, f 是基频频率, 显然只要取 $k=0$, 就可得 $[0, 4f]$, 该频段包含了要分析的扰动, 同时也可将高频信息分离出去, 避免了高频扰动和低频扰动可能存在的时域混叠。又由于信号噪声主要集中在高频范围, 因此还可以进一步剔除噪声干扰。

将 $l_p = T/8$ 和 $k=0$ 代入式 (3) 可得,

$$C_{p,k} = \sum_{n=p} h_p[n] \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{T/8}} \cos\left[\left(0 + \frac{1}{2}\right) \frac{n - a_p}{T/8}\right] = 4 \sum_{n=p} h_p[n] \sqrt{1/T} \cos\left[\frac{4}{T}(n - a_p)\right] \quad (5)$$

通过上式可得对应频段的 DCT 系数 $C_T(m)$, 如图 3(b)、4(b)、5(b) 所示。再通过公式 (4), 就可得对应的差变序列, 如图 3(c)、4(c)、5(c) 所示。由差变序列的定义可知, 对于扰动时间大于一个周期的短时电能质量扰动, 扰动时间长度应等于两个相邻的突变点之间的距离^[7]。对于本文中的三类扰动, 一般其扰动时长均超过一个周期, 因此扰动的起止时间应分别取前后两个相邻的突变点。例如对本文中电压凹陷仿真信号, 从图 3 中可以很明显看出在第 17 个差变系数时出现第一个突变点, 对应凹陷的起始时间, 在第 49 个系数出现第二个突变点, 对应凹陷的终止时间。同理可对电压凸起和电压间断作出分析。另一方面, 由于 DCT 变换是线性正交变换, DCT 系数幅值 (绝对值) 与信号幅值成正比关系, 因此可以通过 DCT 系数幅值确定扰动幅度。在确定扰动时间后, 求出 DCT 系数在扰动期间的最大值 (或最小值) 和正常期间最大值 (或最小值) 的比值, 就可得扰动幅度。

3.2 仿真结果比较

分别用文献 [6] 提出的 DB1 小波低频系数法和本文提出的方法对三类扰动作检测, 仿真结果如表 1 所示。

表 1 综合仿真结果

Tab 1 Comprehensive simulation results				
类别	检测指标	实际值	DWT检测值	DCT检测值
凹陷	起始时间 /s	0.042 19	0.045 00	0.042 50
	终止时间 /s	0.121 83	0.120 00	0.122 50
	幅度 /V	0.675 00	0.674 10	0.671 90
凸起	起始时间 /s	0.078 13	0.085 00	0.080 00
	终止时间 /s	0.132 50	0.135 00	0.135 00
	幅度 /V	1.250 00	1.260 60	1.250 90
间断	起始时间 /s	0.085 94	0.090 00	0.087 50
	终止时间 /s	0.151 25	0.150 00	0.152 50

其中 DWT 检测值是按文献 [6] 提出的 DB1 小波法, 由 DB1 小波提取信号五尺度低频系数求得。由仿真结果知, 在扰动幅度的检测精度差不多的情况下, 本文所提方法对扰动起止时间的定位要比 DWT 更为精确, 很好地减少了检测误差。

4 结论

本文提出将 DCT 变换与差变算法相结合的方

法检测短时电能质量扰动,通过 DCT系数和从 DCT系数中提取的差变信号实现扰动的特征检测,利用了 DCT变换的线性正交性及 DCT系数的噪声鲁棒性。

该方法的特点是有较强的抗噪特性,对大多数特征指标具有较好的精度,为强噪声下的信号检测提供了一条新途径。

另外,由于变换后 DCT系数数据量较小,便于对数据作二次处理,可以考虑用 DCT系数定义分类特征量,实现对各种扰动的分类识别,这也是下一步可以作的工作。

参考文献:

- [1] 朱锋锋,任震,黄雯莹. 基于两个实值小波变换定量检测电能质量扰动的新方法[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 52-54
ZHU Feng-feng, REN Zhen, HUANG Wen-ying A New Method to Quantitatively Detect Power Quality Disturbances Based on Two Real Wavelet Transforms[J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 52-54
- [2] 周文晖,李青,周兆经. 采用小波多分辨率信号分解的电能质量检测[J]. 电工技术学报, 2001, 16(6): 81-84
ZHOU Wen-hui, LI Qing, ZHOU Zhao-jing Power Quality Detection Using Wavelet Multi-resolution Signal Decomposition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(6): 81-84
- [3] 胡铭,陈珩. 基于小波变换模极大值的电能质量扰动检测[J]. 电网技术, 2001, 25(3): 12-16
HU Ming, CHEN Heng Detection and Location of Power Quality Disturbances Using Wavelet Transform Modulus Maxima[J]. Power System Technology, 2001, 25(3): 12-16
- [4] Gaouda A M, Salama M M A, Sutan M R. Automated Recognition System for Classifying and Quantifying the Electric Power Quality[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(3): 244-248
- [5] Littler T B, Morrow D D J. Wavelet for the Analysis and Compression of Power System Disturbances[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(2): 358-364
- [6] 李天云,陈晓东,赵为红,等. 几种短时电能质量扰动分类和检测的双小波分析法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 26-29.
LI Tian-yun, CHEN Xiao-dong, ZHAO Wei-hong, et al Classification and Detection of Several Short Duration Disturbances for Power Quality Using Two Wavelet Analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 26-29.
- [7] 陈祥训. 采样小波技术的几种电能质量扰动的检测和分类方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(10): 1-6
CHEN Xiang-xun Wavelet based Measurement and Classification of Short Duration Power Quality Disturbances[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(10): 1-6
- [8] Matlab S 信号处理的小波导引[M]. 北京:机械工业出版社, 2002
Matlab S A Wavelet Tour of Signal Processing[M]. Beijing: China Machine Press, 2002

收稿日期: 2004-07-23; 修回日期: 2004-09-11

作者简介:

刘安定(1979-),男,硕士研究生,目前研究方向为小波变换在电能质量检测中的应用; E-mail: l-ad@163.com

肖先勇(1968-),男,副教授,从事电力系统及其自动化方面的科研和教学工作,研究方向为电能质量及电力市场;

邓武军(1967-),男,高级工程师,从事电力系统及其自动化方面的生产管理和研究工作。

A new method for detecting short duration disturbance of power quality

LIU An-ding¹, XIAO Xian-yong¹, DENG Wu-jun²

(1. Sichuan University, Chengdu 610065, China; 2. Yibin Power Supply Bureau, Yibin 644000, China)

Abstract: A new method of combining DCT transform and difference algorithm for detecting short duration disturbance of power quality is put forward. Sampled signals in heavy noises about short duration disturbances of power quality (voltage sag, voltage swell and voltage interruption) are transformed with DCT. After that difference signals can be extracted through DCT coefficients, and disturbance amplitude and disturbance time can be detected by DCT coefficients and difference sequence in the following. Simulation results show that, with this method, the analysis process is simplified, and the signal detection in heavy noises considering noise robustness of DCT coefficients can be realized with a high precision.

Key words: power quality disturbance; DCT transform; noise robustness; difference sequence