基于小波测位的闪变检测算法及其实现

杨 坤, 杨洪耕

(四川大学电气信息学院,四川 成都 610065)

摘要: 小波分析是分析非稳定信号的一种有效方法,是一种很好的电能质量信号的检测和分析工具。该文提出了基于快速小波变换的闪变算法,并将该算法在数字信号处理器(DSP)上实现。该算法可以准确定位闪变分量出现的位置,并从该时刻起进行快速傅立叶变换(FFT),从而得到包络信号的频率及幅值。该方法具有良好的检测闪变分量性能,并有效地节约了DSP计算快速傅立叶变换(FFT)的时间。

关键词: 快速小波变换; 电能质量; 数字信号处理器(DSP); 快速傅立叶变换(FFT)

中图分类号: TM764; TM93 **文献标识码**: A **文章编号**: 1003-4897(2004)21-0048-04

0 引言

电压幅值的波动是灯光闪烁的主要原因,因此它被定义为电压闪变。由于灯光闪烁是可以察觉的,有时还是刺激的,电压闪变已经成为电力公司和广大用户共同关心的一个重要的电能质量问题。

目前国内外常采用的电压波动分量的测试方法可分为三种,平方检测法、整流检测法和有效值检测法[1],这三种检测方法都不适用于时变的电压闪变信号的检测与时频分析。而小波变换对于非稳定信号能够准确的检测出扰动出现的时间。本文采用能够在DSP中实现的快速小波变换对闪变分量进行准确定位,再用快速傅立叶变换对出现闪变的时段进行分析,从而准确得到闪变分量的频率分量及其幅值。而对短时闪变和长时闪变的计算将由PC机统计和计算。

1 快速小波变换(FWT)

平方可积的信号 $f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换定义为[2]:

$$Wf(a,b) = \langle f(t), \Psi_{a,b}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\, \Psi^{*}\left(\frac{t-b}{a}\right) \mathrm{d}t \qquad (1)$$

式中 $\Psi_{a,b}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \Psi\left(\frac{t-b}{a}\right)$ 为小波函数,它是由母小波函数 $\Psi(t)$ 生成的,a 为尺度因子,b 为平移因子,* 代表取共轭。

若取 $a = 2^{-j}$, $b = 2^{-j}k$,信号 $f(t)$ 的二进小波变换为[2]

$$Wf(j,k) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t)\, \Psi_{j,k}^{*}(t)\, \mathrm{d}t \qquad (2)$$

式中 $\Psi_{j,k}(t) = 2^{j/2} \Psi(2^{j}t - k)$, $j, k \in Z$。

基于多分辨率分析的理论,Mallat给出了快速小波变换(FWT)的算法。平方可积函数空间 V_0 可分割成一系列闭子空间 $\{V_j\}_{j \in Z}$,它们满足下列性质[2]:

$$V_j \supset V_{j+1}, \quad V_j = V_{j+1} \oplus W_{j+1} \qquad (3)$$

式中 W_{j+1} 为 V_{j+1} 在 V_j 中的正交补空间,V_j 和 W_j 分别称为尺度 j 的尺度空间和小波空间。而 Φ 和 Ψ 分别为相应的尺度函数和小波函数,函数 $f(t)$ 属于由尺度函数 Ψ 生成的MRA的基本子空间 V_0,可以表述成[2]:

$$f(t) = \sum_{k} C_J \Phi_{J,K}(t) + \sum_{k} D_J \Psi_{J,k}(t) \qquad (4)$$

式中右边第一部分是 $f(t)$ 在尺度空间 $V_j (j = J)$ 的投影,它是 $f(t)$ 的平滑近似;第二部分是 $f(t)$ 在小波空间 W_j 的投影,它是对 $f(t)$ 的细节补充。其中的分解系数

$$c_{j+1}(k) = \sum_{m} h(m-2k) \cdot c_j(m) \qquad (5)$$

$$d_{j+1}(k) = \sum_{m} g(m-2k) \cdot c_j(m) \qquad (6)$$

其中: $h(k)$ 是多分辨率分析的尺度系数, $g(k)$ 是多分辨分析的小波系数,它们又可看成共轭镜像滤波器中的低通滤波器单位冲击响应和高通滤波器单位冲击响应,两者的关系是 $g(k) = (-1)^{1-k} h(1-k)$,则高通滤波器的频率响应 $g(e^{jw}) = h(e^{j(w-\pi)})$,它与低通滤波器频率响应以 $\frac{\pi}{2}$ 为轴线左右对称。快速小波变换的分解过程如图1。

式(5)和(6)表明,离散平滑近似信号 $c_{j+1}(k)$ 和

基金项目: 中华电力基金会许继奖教金资助项目

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

图 1　快速小波变换的分解过程

Fig. 1　Resolution of FWT

离散细节信号 $d_{j+1}(k)$ 分别是信号序列 $c_j(k)$ 与滤波器单位冲击响应 $h(k)$ 和 $g(k)$ 卷积后二抽样得到的信号序列。最初输入的 $c_0(k)$ $(j=0)$ 直接采用 $f(t)$ 的采样序列 $f(n)$。

实际应用中序列总是有限的。为了满足多分辨率分析的要求,可以采用零插值法和周期扩展法来扩展有限序列。零插值法是将序列支撑以外的元素都设为零。如果序列不是以零开头或结尾,就会在序列的边界处人为地产生不连续性,从而使得在 $d(k)$ 相应位置出现较大的值。而且在零插值法中,输入序列与系数序列的支撑长度不是相互独立的,这增加了计算量。

周期扩展法是把序列当作一个周期信号进行扩展,序列的支撑长度就是周期的长度,而且这种周期性能沿着尺度传递。另外,可以利用 DSP 的循环寻址功能实现序列的周期性扩展,从而提高了 FWT 的计算速度。而大多数的数字信号处理器(DSP)的指令系统中有"循环寻址"(circular addressing)的指令。周期性扩展可以通过循环寻址实现。循环寻址是间接寻址的特殊情况,它采用一个循环缓存区,这个循环缓存区通常用于卷积、相关、数字滤波等算法中。可以看成一个滑动的窗口,窗口内是最新的待处理的数据,如果有新的数据输入,就覆盖掉原有的数据,从而形成循环缓存。

2　电压闪变信号的检测

2.1　电压闪变的数学模型

电压闪变是由电网电压的幅值波动变化所引起的,通常将电压波动看成以工频电压为载波,其电压的方均根或峰值受到以电压波动分量作为调幅波的调制。对于任何波形的调幅波均可看作是由各种频率分量合成。将电压的瞬时值解析式写成[1]:

$$u(t) = A(1 + m_i\cos\Omega_i t)\cos\omega t \qquad (7)$$

式中: A 为工频载波电压的幅值; ω 为工频载波电压的角频率; m 为调幅波电压的幅值; Ω 为调幅波电压的角频率。

电力网电压中常常含有高频的谐波分量,应在分析闪变分量时先滤掉高频的谐波分量,以免在快速傅立叶计算时产生频率混叠。

2.2　电压信号的快速小波变换

电力系统信号分析应用中,必须选择合适的小波基,以达到满意地分解和特征提取效果。电力系统瞬时信号的定位多采用 Db4 (Daubechies) 小波,它具有 4 阶消失矩,中心频率较高,易于提取频率范围较宽地暂态信号和抑制低频载波的混入,且 Db4 小波只有 8 个滤波器系数,进行快速小波变换的计算量较小[3]。

本文先用 MATLAB 进行仿真,确定了该方法的可行性。模拟的输入信号是在 50 Hz 的工频电压信号中加入了 10 Hz 和 25 Hz 两种频率的调幅波,幅值分别为 20 和 30。在计算时先要将模拟信号进行离散化,每周期采样 128 个点,具体过程分为以下四步:

1) 通过对输入信号进行以 Db4 为小波基的快速小波变换,即多尺度小波分解后得到平滑近似信号和离散细节信号,在细节信号中可以清楚地找到闪变信号出现的位置;

2) 从闪变信号出现时的前一个周期的实时采样数据开始,记录过零点,通过计数找到每个周期的峰值和谷值,直到获得 128 个周期的峰值和谷值,便进行快速傅立叶变换,在本文的实际应用中计数是采用可编程器件(CPLD)来实现的;

3) 通过快速傅立叶变换以得到调幅波的幅值和频率,并记录出现的时间;

4) 从小波分解后的细节信号中判断该闪变信号是否结束,或是有新的调幅波加入,控制快速傅立叶变换的继续进行或终止。

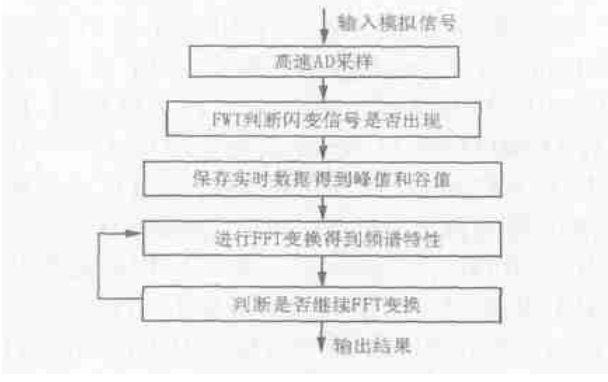

图 2　闪变信号检测过程

Fig. 2　Process of flicker measurement

采用小波变换可以准确的对闪变信号进行定位,再通过快速傅立叶变换可以准确地得到调幅波的幅值和频率,这样使得处理器在无闪变信号时只用进行小波变换,而只有出现闪变信号时才启动快

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

速傅立叶变换,节约了处理器用于计算快速傅立叶变换的时间。只取每个周期的峰值和谷值即每周期只采样两个点,采样频率为 100 Hz,可以通过增加进行快速傅立叶变换的周期数来提高频谱特性中频率的分辨率。如果进行快速傅立叶变换的周期数为 M,则在离散的频谱特性中基频分量 f_b 就出现在第 M 点处,因此每个点所代表的频率为 f_b/M,本文中频谱特性的频率分辨率就为 50/128 = 0.391。其仿真结果如图 3 所示,从图中可以得出 f_1 = 10.17 Hz, f_2 = 25 Hz。

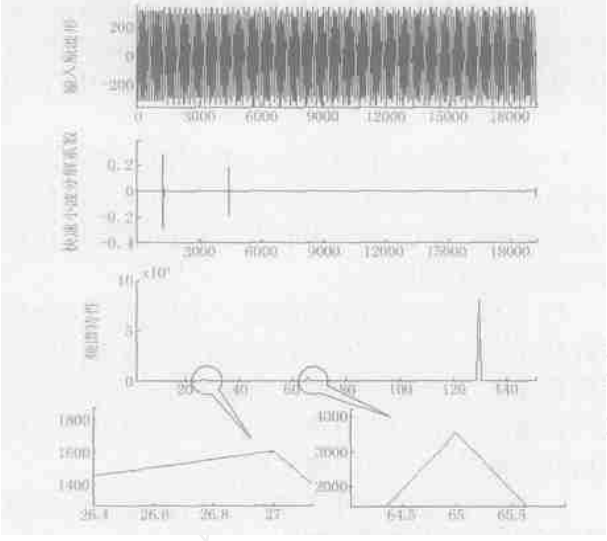

图 3 Matlab 仿真结果

Fig. 3 Results of Matlab simulation

3 该方法在 DSP 中的实现

现有的闪变测试仪多采用数字信号处理器(DSP)作为中心处理器,本文采用 Ti 公司的 TMS320VC33 运算浮点数的 DSP 作为处理器,最高具有 150MFLOPS 32 bit 浮点数运算能力[5]。片内带 34 K×32 bit 双口 SRAM,具有上电自动加载功能,能从低速低成本的 FLASH 中将程序自动加载到片内的 SRAM 中高速运行。本文采用的硬件结构如图 4 所示,其中系统的控制部分由 CPLD 来实现,它控制系统的采样、DSP 与存储器及上位机的通讯、各部分的工作时序。

在 DSP 中实现该算法关键是快速小波变换的实现,其汇编程序的主要部分是计算某一尺度的展开值,以下是 TMS320VC33 中程序的主要部分:

```
LDI     @INPUT,AR0  ;输入序列
LDI     @NCOEF,AR1  ;尺度系数
LDI     @WTCOEF,AR2 ;小波系数
```

图 4 电能质量监测硬件结构图

Fig. 4 Hardware architecture of power quality monitor

```
LDI     0,IR0
LDI     @DX,BK  ;输入序列的长度
LDI     @NUMBER,RC;外循环次数
SUBI    1,RC
RPTB    BLOCK;外循环
LDF     0.0,R0
LDF     0.0,R2
PUSH    ST
PUSH    RS
PUSH    RE
PUSH    RC
RPTS    @N-NUM  ;循环次数为小波系数的个数
MPYF    *AR0-++%,*AR2++,R0
‖ADDF R0,R2 ;   输入序列于小波数相乘再累加,指针 AR0 按循环寻址
ADDF R0,R2;     R2 存放尺度值
POP     RC
POP     RE
POP     RS
POP     ST
STF     R2,*AR1—+;
ADDI    2,IR0;
LDI     @INPUT,AR0;重新指向输入序列
NOP     *++AR0(IR0);
BLOCK LDI @WTCOEF,AR2
```

以上程序段只是通过上一尺度值输入序列与小波系数相乘并累加来计算下一尺度的尺度值。当一个尺度下的所有尺度值计算出来后,可以将其作为输入序列再次调用程序,直到计算出希望达到的尺度数。

本文中采用 DB4 小波进行快速小波变换,可以得到闪变信号的出现位置。通过设定阀值可以确定快速傅立叶变换的启动。而快速傅立叶变换有比较成熟的程序,本文中采用 256 个点的快速傅立叶变换,即每 128 个工频周期计算一次。快速傅立叶变

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

换的基本流程如图 5 所示[4]。其主要存在的问题是输出的序列的顺序是置乱的,是按"比特反转"排列的,采用 TMS320VC33 中的比特反转寻址就可以将输出的序列按频率顺序排列[6]。

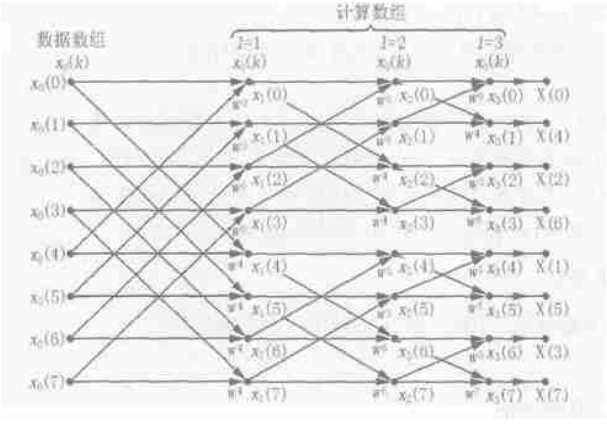

图 5　$N = 8$ 的标准 FFT 信号流程图

Fig. 5　Process of FFT on $N = 8$

在 DSP 中进行快速傅立叶变换要通过生成正弦表来计算旋转因子,正弦表的结构如式(7)[6]:

$$\sin\text{-}T[i] = \sin(i * 2 * pi / N * r * 2) \qquad (7)$$

通过欧拉公式和正弦表计算 FFT 算法的旋转因子如式(8):

$$W_N^h = \left(e^{-j\frac{\pi}{2^{l-1}}}\right)^h \qquad (8)$$

而主程序主要完成每段的计算:

$$F_h^l = F_h^{(l-1)} - W_N^h F_{h+2^{l-1}}^{(l-1)} \qquad (9)$$

$$F_{h+2^{l-1}}^l = F_h^{(l-1)} - W_N^h F_{h+2^{l-1}}^{(l-1)} \qquad (10)$$

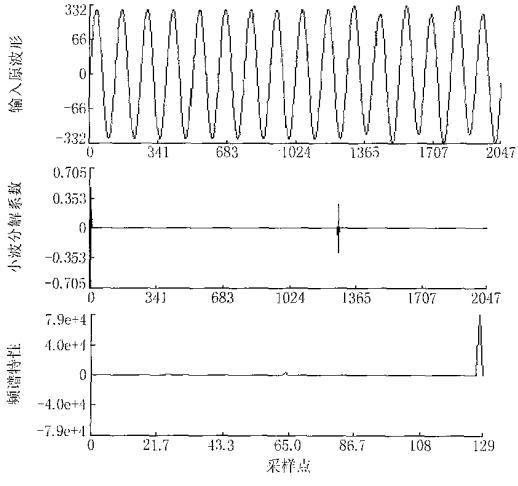

图 6　DSP 仿真结果

Fig. 6　Result of DSP simulation

最后得出系统的频谱特性,从而获得闪变信号即调幅波的频率和幅值,其仿真结果如图 6 所示。文中采用的是 TMS320VC33 的仿真程序 CC4.1(Code Composer Version4.10),其图形窗口只能显示 2048 个点,图中只显示了输入信号的前 2048 个点。DSP 的仿真结果同样能准确的找到闪变出现的位置,并计算出调幅波的幅值和频率。

实际中的闪变扰动不是一直存在的,只有在波动性负荷工作时才会出现,采用这种方法就可以避免在闪变监测仪中一直运算 FFT 变换,而且单纯的 FFT 变换不能分辨出闪变扰动出现的时间,只有快速小波变换才能清晰地说明闪变扰动出现的时间。

4　结论

本文提出的基于小波测位的闪变信号检测的方法综合了小波变换和快速傅立叶变换的优点,利用了小波对非稳定信号的敏感性,有利于快速准确地找到闪变信号出现的位置,而快速傅立叶变换能够准确、快速的得到信号的频谱,分析出调幅波的频率和幅值。这样可以节约处理器用于计算多点数的快速傅立叶变换的时间,以实现更多的算法在同一个处理器上的运行。通过在目标 DSP 上编程实现该算法也证明了这种综合的小波信号检测法在实际应用中是可行的。

参考文献:

[1]　孙树勤(SUN Shu-qin). 电压波动与闪变(Voltage Fluctuation and Flicker)[M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press),1998.

[2]　程正兴(CHENG Zheng-xing). 小波分析算法与应用(The Method of Wavelet and Implementation)[M]. 西安:西安交通大学出版社(Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press),1998.

[3]　何正友(HE Zheng-you). 电力系统暂态信号分析中小波基的选择原则(Mother Wavelet Option Method in the Transient Signal Analysis of Electric Power Systems)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),2003,27(10):45-48.

[4]　Blan E O. 快速傅立叶变换(The Fast Fourier Transform)[M]. 柳群,译(LIU Qun, Trans). 上海:上海科学技术出版社(Shanghai: Shanghai Science and Technology Press),1979.

[5]　TMS320VC33 Data Sheet[Z]. Texas Instruments Incorporated, 2000.

[6]　TMS320C3X. User's Guide[Z]. Texas Instruments Incorporated, 2000.

收稿日期: 2004-02-25;　**修回日期**: 2004-04-28

(下转第 75 页　continued on page 75)

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

[2] 黄家裕,陈礼义,孙德昌(HUANG Jia-yu, CHEN Li-yi, SUN De-chang). 电力系统数字仿真(Power System Digital Simulation) [M]. 北京:水利电力出版社(Beijing: Hydraulic and Electric Power Press),1995.

[3] 汤涌(TANG Yong). 电力系统数字仿真技术的现状与发展(Present Situation and Development of Power System Simulation Technologies) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),2002,26(17).

[4] 夏道止(XIA Dao-zhi). 电力系统分析(Power System Analysis) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press),1998.

[5] 张扬,陆承宇,杜振东(ZHANG Yang, LU Cheng-yu, DU Zhen-dong). 电力系统仿真软件 PSS/E 简介(The Brief Introduction of Power System Simulation Software PSS/E) [J]. 华东电力(East China Electric Power),1997,(1).

[6] 韩祯祥,张琦,徐政(HAN Zhen-xiang, ZHANG Qi, XU Zheng). 一个大型集成化的电力系统仿真计算软件—NETOMAC(An Integrated Software Package for Power System Simulation and Computation—NETOMAC) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),1997,21(9).

[7] 许汉文,黄涌,陈坚(XU Han-wen, HUANG Yong, CHEN Jian). 电力系统实时数字仿真系统介绍(Real-time Digital Simulator in Power System) [J]. 华中电力(Central China Electric Power),2002(3).

[8] 郑三立,雷宪章(ZHENG San-li, LEI Xian-zhang), Retzman D. 电力系统计算机及实时数字仿真(上)—电力系统计算机仿真(Computer and Real-time digital Simulation of Power Systems, Part One: Computer Simulation of Power Systems) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),2001,25(7).

[9] Dommel H W. 电力系统电磁暂态计算理论(EMTP Theory Book) [M]. 李永庄,林集明,曾昭华,译(LI Yong-zhuang, LIN Ji-ming, ZENG Zhao-hua, Trans). 北京:水利电力出版社(Beijing: Hydraulic and Electric Power Press),1991.

收稿日期: 2004-02-24;　**修回日期**: 2004-03-24

作者简介:

王　卉(1978-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统电磁暂态仿真;E-mail: kfgirl@263.net

陈　楷(1980-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制;

彭　哲(1979-),女,助工,现从事电气设计方面工作。

Application of digital simulation techniques and several simulation tools in power system

WANG Hui[1], CHEN Kai[1], PENG Zhe[2], DU Gang[3]

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Hebei Electric Power Design Institution, Shijiazhuang 050031, China; 3. Kaifeng Electric Power Bureau, Kaifeng 475003, China)

Abstract: This paper introduces the classification, characteristics and application of the digital simulation techniques in power system, and then proposes the application of several popular simulation tools, finally discribes the prospect of digital simulation development of power system.

Key words: power system; digital simulation; digital simulation tools

(上接第 51 页　continued from page 51)

作者简介:

杨　坤(1979-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力市场及电能质量;E-mail: yangk32@sina.com.cn

杨洪耕(1949-),男,教授,主要研究方向为电力市场及电能质量。

Flicker measurement based on wavelet transform and its implementation on DSP

YANG Kun, YANG Hong-geng

(School of Electrical and Information, Sichuan University, Chengdu 610045, China)

Abstract: The wavelet transform (WT), which is a very powerful tool for analysing non-stationary signals, can effectively measure and analyse the power quality signals. This paper proposes a flicker method based on FWT and its implementation on DSP. This method can accurately find out the start time of flicker signals and use FFT to detect the frequency and amplitude of the flicker signals in the following. This method can also enhance the efficiency of FFT calculation by DSP.

The project is supported by XJ Education Bounty of China Electricity Fund.

Key words: FWT; power quality; DSP; FFT

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net