

# 采用小波包分析和拟同步检波的电压闪变信号检测新方法

张宇辉, 陈晓东, 刘思革

(东北电力学院, 吉林 吉林 132012)

摘要: 提出了用小波包分析和拟同步检波的电压闪变信号检测新方法。该方法用软件来模拟硬件的同步检波, 大大减少了投资成本; 用小波包子带滤波器代替传统的低通滤波器, 不仅能够对电压闪变信号进行不失真的包络检测, 而且能够检测出电压闪变信号发生的时间、频率以及幅值。仿真结果表明, 该方法对电压闪变信号检测和时频分析性能良好, 特别适用于突变的、非平稳的电压波动与闪变信号的检测。

关键词: 电压闪变; 小波包; 拟同步检波

中图分类号: TM93 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)03-0006-04

## 0 引言

电压闪变是衡量电能质量的一个重要方面<sup>[1]</sup>。随着国民经济的不断发展, 电力系统负荷快速增长, 其中冲击性负荷(诸如电弧炉、轧机、电焊机以及电力机车等)的广泛使用, 使得某些供电系统的电压波动达到了不能容忍的程度。

目前, 国内外采用的电压闪变测试方法主要有三种: 半波有效值法、平方解调法和全波整流法<sup>[2]</sup>。但就实际电路而言, 使用半波有效值法, 即要将均方根值的计算时间准确地整定在半个工频周期上, 实现起来相当困难; 平方解调法和全波整流法检出的信号幅值与调制频率无关, 因而必将引入检测误差, 检测误差大小随调制频率增高而增大。另外, 这三种测试方法都不适用于时变的电压闪变信号的检测与时频分析。本文提出了采用小波包分析和拟同步检波的电压闪变信号检测新方法。拟同步检波指的是用软件来模拟传统方法中的硬件电压同步跟踪设备, 在这里使用两点法来确定采样信号的初相角, 从而产生与采样信号同步的工频信号。小波包分析能够为信号提供一种更精细的分析方法, 它将频带进行多层次划分, 对多分辨率分析没有细分的高频部分进一步分解, 并能够根据被分析信号的特征, 自适应地选择频带, 使之与信号频谱相匹配<sup>[3]</sup>。本文采用小波包子带滤波器代替传统同步检波器中的低通滤波器, 既可以检测出电压闪变的包络信号, 又可以检测出电压闪变的高频细节, 从而检测出电压闪变信号的突变时间。

## 1 正交小波包变换原理

### 1.1 小波包定义

设  $(x)$  与  $(x)$  是相应的正交尺度函数与正交小波, 其尺度和解关系为:

$$\begin{aligned} (x) &= \sum_k h_k (2x - k), \quad (x) = \sum_k g_k (2x - k) \\ (2x - l) &= \sum_k [a_{l-2k} (x - k) + b_{l-2k} (x - k)] \end{aligned}$$

其中:  $l \in \mathbf{Z}, g_k = (-1)^k h_{-k+1}, a_k = h_k/2, b_k = g_k/2$ , 即两尺度关系与分解关系可用一个序列  $\{h_k\}$  或一个符号  $H(z)$  得到, 其中序列  $\{h_k\}, \{g_k\}$  为多分辨率分析中定义的共轭滤波器, 记为  $\phi_0(x) = (x), \phi_1(x) = (x)$ 。则由:

$$\phi_{2l}(x) = \sum_k h_{k-l} \phi_0(2x - k) \quad (1)$$

$$\phi_{2l+1}(x) = \sum_k g_{k-l} \phi_0(2x - k) \quad (2)$$

定义的函数  $\phi_n$  称为关于正交尺度函数  $(x)$  的小波包。  $n = 2l$  或  $2l + 1, l = 0, 1, \dots$ 。

### 1.2 $L^2(\mathbf{R})$ 的正交分解

令  $\{\phi_n\}$  是关于  $H$  的小波包族, 对于每个  $n \in \mathbf{Z}_+$ , 用  $\{\phi_n\}$  以下列方式生成的子空间族  $U_j^n = \text{clos}_{L^2} \{ \sum_k \phi_n(2^j x - k) : k \in \mathbf{Z}, j \in \mathbf{Z} \}$ ; 记  $\{V_j\}$  为用  $\phi_0(x) = (x)$  生成的多分辨率分析;  $\{W_j\}$  为用  $\phi_1(x) = (x)$  生成的正交补子空间序列。则有:  $U_j^0 = V_j, U_j^1 = W_j, j \in \mathbf{Z}$ 。那么, 正交分解  $V_{j+1} = V_j \oplus W_j, j \in \mathbf{Z}$  可为  $U_{j+1}^0 = U_j^0 \oplus U_j^1, j \in \mathbf{Z}$ 。对任意非负整数  $n$  有:

$$U_{j+1}^n = U_j^{2^n} \oplus U_j^{2^n+1}, j \in \mathbf{Z} \quad (3)$$

由式(3)和  $U_j^1 = W_j$ , 得到小波空间  $W_j$  的二进制细致分解为:

$$W_j = U_{j-k}^{2^k} \oplus U_{j-k}^{2^k+1} \oplus \dots \oplus U_{j-k}^{2^k-1} \quad (4)$$

对每个  $m = 0, 1, \dots, 2^k - 1, k = 1, 2, \dots, j = 1, 2, \dots$ , 族  $\{ \sum_l \phi_{2^k}^{2^k+m}(2^{j-k} x - l) : l \in \mathbf{Z} \}$  是  $U_{j-k}^{2^k+m}$  的一个

规范正交基。小波包对  $w_j$  的分解相当于  $w_j$  的第  $j$  个频带被分割成  $2^k$  个子频带。

### 1.3 小波包的分解算法及重构算法

设  $f_j^n(x) = U_j^n$ , 则  $f_j^n(x)$  可表示为:

$$f_j^n(x) = \sum_k d_k^{j,2n} (2^j x - l) \quad (5)$$

由式(3),  $f_{j+1}^n(x)$  分解为  $f_j^{2n}(x)$  与  $f_j^{2n+1}(x)$  的分解算法为:

$$\begin{aligned} d_k^{j,2n} &= \sum_k a_{k-2l} d_k^{j+1, n} \\ d_k^{j,2n+1} &= \sum_k b_{k-2l} d_k^{j+1, n} \end{aligned} \quad (6)$$

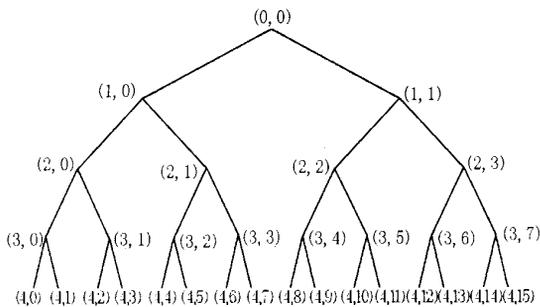


图1 小波包分析的树

Fig. 1 Tree diagram of wavelet package analysis

小波包分解过程如图1所示。其实际过程是通过一组低、高通组合的共轭正交滤波器  $H$ 、 $G$  不断将信号分割到不同的频带上。滤波器组每作用一次,信号长度减少一半。同样,由  $f_j^{2n}(x)$  与  $f_j^{2n+1}(x)$  重构  $f_{j+1}^n(x)$ , 其算法为:

$$d_k^{j+1, n} = \sum_k [h_{l-2k} d_k^{j,2n} + g_{l-2k} d_k^{j,2n+1}] \quad (7)$$

## 2 电压闪变信号检测与时频分析新方法

### 2.1 电压闪变的数学模型

电压闪变是由电网电压的幅度起伏变化所引起的,所以电压波动与闪变信号用调幅电压表示<sup>[4]</sup>:

$$f(t) = A(t) \cos(\omega t) = \sqrt{2} U [1 + M a(t)] \cos(\omega t) \quad (8)$$

式中,  $\omega$  为工频角频率;  $U$  为电网电压额定值;  $M$  为调频的幅度,其值一般为 1%,最高可达 10%;  $A(t)$  为包络信号,  $a(t)$  为调制信号。 $a(t)$  使用模拟电弧炉的调制信号:

$$a(t) = \frac{1}{m} \cos(m \omega t) \quad (9)$$

式中,  $\omega$  为调制信号的基波角频率,  $m$  为谐波次数。

### 2.2 电压闪变信号的包络检波原理

传统的同步检波器由电压跟踪装置、相乘器、采样器和滤波器组成<sup>[5]</sup>。它的检波流程是:通过电压跟踪装置对待检信号进行跟踪,然后发出同相位波形,与待检信号一同送入相乘器相乘,再对其采样,

用低通滤波器滤波分析。

本论文利用软件来替换电压跟踪装置、相乘器和低通滤波器等硬件设备,实现检波功能。检波流程如下:

对待检信号  $f(t)$  进行采样,送入微机;

利用两点法鉴别采样信号的初相角,计算同步电压  $U(t) = \cos(\omega t + \theta)$ ;

计算  $x(t) = f(t) * U(t)$ ;

用小波包滤波,提取闪变包络信号和工频信号进行分析。

### 2.3 同步电压信号的确定

用小波或小波包直接对采样信号分解分析时,由于闪变信号的频率范围为 0.01 ~ 25 Hz,幅值小于基波幅值的 10%,所以受基波干扰很大<sup>[6]</sup>。把同步电压同采样信号相乘,即可将电压闪变信号的频谱分别向低搬移到零频率附近和向高搬移到 100 Hz 附近,从而分离出电压闪变的包络信号。

对于同步电压的求取,本文使用两点法。如图2所示:

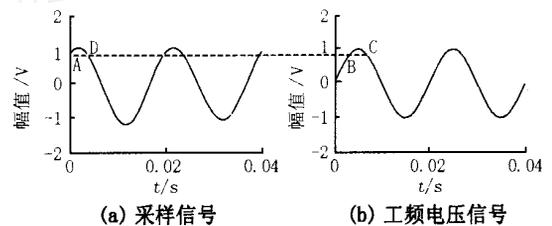


图2 两点法求取同步信号图

Fig. 2 Two-point method for collecting synchronous signal

图2(a)为采样信号,  $A$  点为采样信号的起始点,同步电压的求取关键在于要在图2(b)上找到与  $A$  点同相位的点。从图2可以看出,与  $A$  点等幅值的点可能是  $B$  点,也可能是  $C$  点,在这里使用两点法来判断。

两点法:在图2(b)上找到第一个周期内与  $A$  点等幅值的两点  $B$  点和  $C$  点 ( $B$  点在前,  $C$  点在后)。在图2(a)上找到一个周期  $T$  内,与  $A$  点幅值同号的最大值点 ( $D$  点)。当  $A$  点和  $D$  点时间间隔小于  $T/4$  时,  $B$  点与  $A$  点同相;当  $A$  点和  $D$  点时间间隔大于  $T/2$  时,  $C$  点与  $A$  点同相。

确定了起始点,同步电压也就确定下来了。

### 2.4 拟同步检波原理

由于  $f(t)$  中可能含有闪变信号,所以用两点法测出的同步电压的初相位与  $f(t)$  中的工频初相位不一定相同,故本文称其为拟同步检波。

设拟同步电压的初相位与  $f(t)$  中的工频初相

位差为  $\theta$ ,  $f(t)$  由式 (8) 定义, 则同步电压为:  $U(t) = \cos(\omega t + \theta)$ 。所以:

$$x(t) = f(t) * U(t) = \sqrt{2}A(1 + M\cos(\omega t))\cos(\omega t) \cdot \cos(\omega t + \theta) = \frac{\sqrt{2}}{2}A[M\cos(2\omega t + \theta)\cos(\omega t) + \cos(2\omega t + \theta) + M\cos(\theta)\cos(\omega t) + \cos(\theta)] \quad (10)$$

尽管拟同步电压的初相位与  $f(t)$  中的工频初相位存在相角差  $\theta$ , 但  $\theta$  是一个很小的值。由式 (10) 可知,  $x(t)$  经变换后变为四项。前两项在 100 Hz 频率附近; 第三项为闪频信号 (其幅值有变化); 第四项为直流分量, 且当  $\theta = 0$  时, 其为 1, 与传统方法一样。

这样, 通过以上方法对采样信号进行变换, 就可以把电压闪变的包络信号分离出来。

### 2.5 小波包分析

设采样频率为 1.6 kHz。提取  $U_7^0$  (包含频段 0 ~ 6.25 Hz)、 $U_7^1$  (包含频段 6.25 ~ 12.5 Hz)、 $U_7^2$  (包含频段 12.5 ~ 18.75 Hz) 和  $U_7^3$  (包含频段 18.75 ~ 25 Hz) 对  $v(t)$  进行分析。若要求精度, 可以再进行细分, 也可以设计小波包让其根据信号的频率自动分频。

提取  $U_7^{63}$  (包含频段 87.5 ~ 400 Hz)。这一频段受噪声影响较小, 且利用模极大值可以找到信号突变点, 即可以确定闪变发生和终止的时间。

直流分量包含在  $U_7^0$  频段的重构信号中。在该频段上找出确定的闪变发生时间内幅值最大点  $D1$  (对应幅值为  $F_{01}$ ) 和幅值最小点  $D2$  (对应幅值为  $F_{02}$ ), 则直流分量幅值  $F_0 = (F_{01} + F_{02})/2$ 。设定能量阈值, 找出能量超过该阈值的频段 (能量定义为重构信号各点幅值的平方和)。在该频段闪变发生的时间内, 找出幅值极大值点集合 (对应为波峰), 求出平均幅值  $F_{11}$ ; 找出幅值极小值点集合 (对应为波谷), 求出平均幅值  $F_{12}$ , 则测得闪变幅值为  $F_1 = (F_{11} - F_{12})/2$ 。

由式 (10) 可知, 直流分量幅值为  $F_0 = \frac{\sqrt{2}}{2}A\cos(\theta)$ , 测得闪变幅值为  $F_1 = \frac{\sqrt{2}}{2}A\cos(\theta)M$ 。而电压闪变的实际幅值为  $M$ 。故实际闪变信号的幅值  $M = F_1/F_0$ 。

## 3 仿真

### 3.1 含有多个闪变频率的仿真

设采样频率为 1.6 kHz, 采样信号中含有两种

闪变频率 ( $f_1 = 3$  Hz、 $f_2 = 15$  Hz), 拟同步电压的初相位与  $f(t)$  中的工频初相位差为  $\theta = \pi/6$ 。则利用 Db24 小波包对  $v(t)$  分解后, 提取的  $U_7^0$ 、 $U_7^1$ 、 $U_7^2$  和  $U_7^3$  频段重构图如图 3 所示。

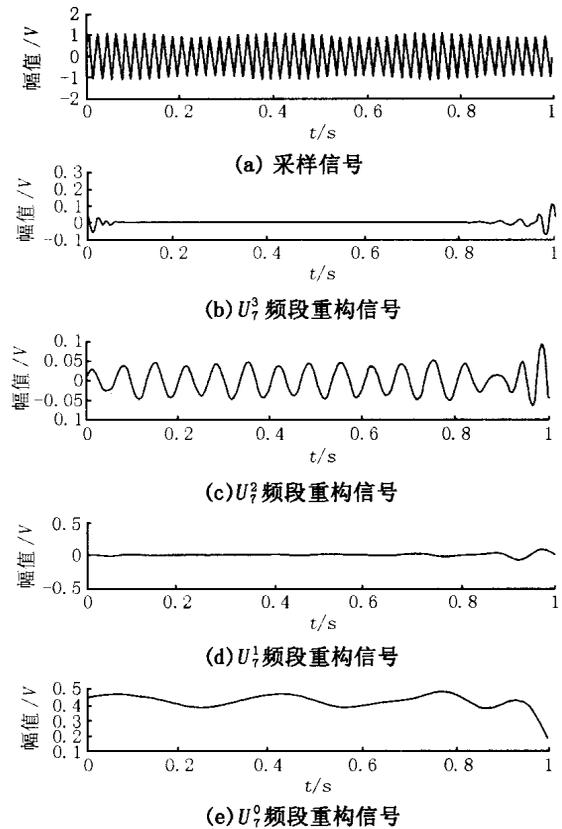


图 3 小波包对多个闪变频率分析重构图

Fig. 3 Reconstruction of wavelet package analysis of multi-frequency voltage flicker

由图 3 可以看到, 闪变信号按频率分布规律分别落在  $U_7^0$  和  $U_7^2$  上。以各频段的中心频率作为测得闪变频率, 若要提高计算精度, 可以继续分解。在  $U_7^0$  上可以计算出直流分量的幅值。

### 3.2 含有突变的闪变信号仿真

设采样信号中含有一种闪变频率 ( $f = 7.5$  Hz), 在 0.23 s 时发生, 0.83 s 时结束; 拟同步电压的初相位与  $f(t)$  中的工频初相位差为  $\theta = \pi/6$ 。则利用小波包对  $v(t)$  分解后, 提取的  $U_7^0$ 、 $U_7^1$  和  $U_7^{63}$  频段重构图如图 4 所示。

由图 4 可知, 在  $U_7^0$  上可以计算出直流分量幅值; 在  $U_7^1$  上可以计算出闪变信号的幅值和频率; 在  $U_7^{63}$  上可以找到闪变发生和终止时刻。

## 4 结论

本文提出了用小波包分析和拟同步检波法对闪

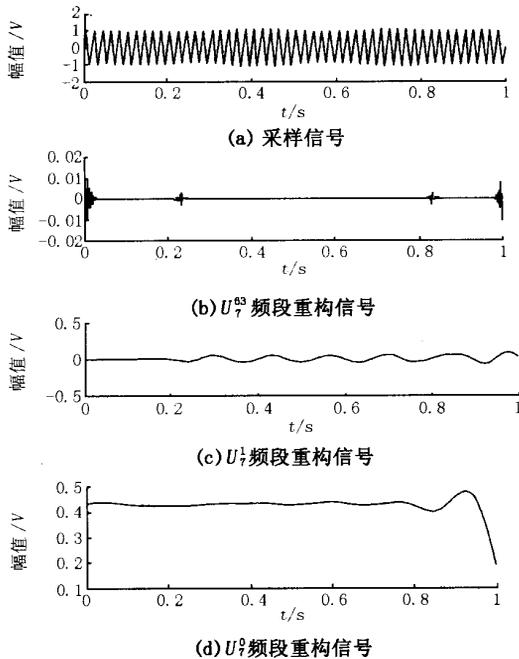


图4 小波包对突变闪变信号分析重构图

Fig. 4 Reconstruction of wavelet package analysis of sharp and flicker signals

变信号进行检测。该方法的优点是：

用计算机模拟同步电压来代替电压跟踪装置并通过微机计算代替相乘器,大大减少设备投资。

利用小波包对处理后的信号进行分析,能检测出闪变的幅值、频率及突发的时间。与小波变换相比,小波包分析能够为信号提供一种更加精确的分析方法,它将频带进行多层次划分,对多分辨分析没有细分的高频部分进一步分解,更适合对闪变信号频率的检测。

参考文献：

[1] 林海雪(LIN Hai-xue). 新国家标准“电能质量小波波

动和闪变”介绍(Introduction of the New National Standard of Power Quality Voltage Fluctuation and Flicker) [J]. 供用电(Electric for Producing and Using), 2001, 18(6): 4-10.

[2] 同向前,余健明(TONG Xiang-qian, YU Jiann-ming). 电网电压中波动信号检出方法的研究(Study on the Detection of Voltage Flicker from the Voltage Net) [J]. 仪器仪表学报(Chinese Journal of Scientific Instrument), 1998, 19(3): 234-238.

[3] 崔锦泰(CUI Jintai). 小波分析导论(Analysis of Wavelet) [M]. 西安:西安交通大学出版社(Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press), 1995.

[4] Poisson O, Rioual P, Meunier M. New Signal Processing Tools Applied to Power Quality Analysis [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1999, 14(2): 561-566.

[5] 周兆京,周文晖,李青(ZHOU Zhao-jing, ZHOU Wen-hui, LI Qing). 采用小波分解和同步检波的电压闪变信号检测新方法(A New Method for the Detection of Voltage Flicker Using Wavelet Transform and Synchronous Detection) [J]. 电力系统及其自动化学报(Proceedings of the EPSA), 2001, 13(6): 23-27.

[6] 王庆禹,褚福磊(WANG Qing-yu, CHU Fu-lei). 小波变换中的能量泄露问题(Energy Leaking in Wavelet Transform) [J]. 机械科学与技术(Mechanical Science and Technology), 2000, 20(1): 12-17.

收稿日期: 2003-05-23; 修回日期: 2003-07-15

作者简介:

张宇辉(1962-),男,副教授,从事电力系统继电保护理论研究;

陈晓东(1975-),男,硕士研究生,研究方向为小波、混沌等非线性理论在电力系统中的应用;

刘思革(1975-),男,硕士研究生,研究方向为小波、混沌等非线性理论在电力系统中的应用。

## Detection of voltage flicker using wavelet package analysis and simulating synchronous detection

ZHANG Yu-hui, CHEN Xiao-dong, LIU Si-ge

(Northeast Institute of Electric Power Engineering, Jilin 132012, China)

**Abstract:** This paper proposes a new method for the detection of voltage flicker, which uses wavelet package analysis and simulating synchronous detection. It uses soft program to simulate synchronous detection of the hard device, which decreases the cost greatly; and uses wavelet package instead of conventional low-pass filter, which not only can achieve the real envelope detection of voltage flicker, but also can detect the time, frequency and amplitude of the signals. Simulation results show that this method has good performances of detection and time frequency analysis, and it is very applicable in the detection of the sharp and non-stationary voltage fluctuating, and flicker signals.

**Key words:** voltage flicker; wavelet package; simulating synchronous detection