

基于数学形态滤波和Hilbert变换的电压闪变测量

舒 泓, 王 毅

(北京交通大学电气工程学院, 北京市 海淀区 100044)

Voltage Flicker Detection Method Based on Mathematical Morphology Filter and Hilbert Transform

SHU Hong, WANG Yi

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Haidian District, Beijing 100044, China)

ABSTRACT: With the rapid increase of portion of large capacity arc furnace load in power system, voltage flicker has become a serious problem. In order to develop solutions to the problem, accurate and fast measurement of voltage flicker is required. But voltage flicker measurement method recommended by IEC can only provide statistical assessing indices such as short time flicker severity and long time flicker severity, which can't explain features of voltage flicker. A novel flicker detection method based on Mathematical Morphology (MM) filter and Hilbert transform is proposed in this paper. Compared to traditional digital filters, MM Filter has higher calculation speed and easier hardware realization, which can filter out impulses, white noises and high frequency noises contained in flicker signal and at the same time keep the original characters of flicker disturbances. Then to the filtered flicker curves, a track method based on Hilbert transform is adopted to get voltage flicker's envelope, which is the base of attaining relevant parameters of voltage flicker. Simulation experiments validate the proposed method's superior performance.

KEY WORDS: voltage flicker; wavelet transform; mathematical morphology filter; Hilbert transform

摘要: 随着电力系统中大容量冲击负荷的不断增多, 配电网中的电压闪变也越发严重, 因此需要对其进行检测和分析, 为进一步的治理奠定基础。而 IEC 推荐的闪变测量方法只能给出闪变的统计性评价指标如短时闪变严重度和长时闪变严重度, 此种指标无法说明闪变的具体参数特征。为此, 文中给出了基于数学形态滤波和 Hilbert 变换的电压闪变快速测量计算方法。其中, 基于数学形态学的滤波方法相比传统的数字滤波方法计算速度更快, 更易于硬件实现, 而且能够在保留电压闪变信号扰动特性的前提下有效地去除电压闪变信号中含有的尖峰脉冲、白噪声, 高频噪声等干扰, 将去噪后的信号进行 Hilbert 变换可准确地测出闪变的包络, 为

进一步测量电压闪变的有关参数奠定了基础。仿真试验证明了所提方法的有效性。

关键词: 电压闪变; 小波变换; 数学形态滤波; Hilbert 变换

0 引言

随着电力系统中冲击性负荷的增加, 电网中存在的电压波动、电压闪变也日趋严重。闪变已经成为电能质量扰动的一种重要类型。为了抑制和治理电压波动和闪变, 电网投入了一定的静止补偿设备, 这些补偿设备的研制和整定均需要准确详尽的电压闪变参数, 以提供正确的治理决策^[1-2]。

目前, 广泛讨论和研究的闪变评价指标多为基于统计型的评价指标, 如短时闪变严重度和长时闪变严重度等^[1-2]。IEC 给出的闪变仪也是基于这些统计性指标的。这些统计性的指标通常基于白炽灯的光通量或人的视觉感受角度定义, 只能反映闪变的强弱, 而不能给出闪变的具体参数, 对闪变的治理策略及装置研制指导意义不大。

常见的闪变调制波检波方法可分为 3 种, 即半波有效值法、平方解调法和全波整流法。半波有效值检波是一种平均效果, 易受到基波电压和基波频率的影响。平方解调和全波整流都需要设计频带很严格的低通滤波器或者带通滤波器, 滤除直流、工频以及谐波, 滤波器造成的延时较大, 动态响应速度较慢^[3]。文献[4]提出了基于快速傅里叶变换的闪变信号检测方法, 但傅里叶变换的致命缺点在于只适合处理稳定信号, 对于不稳定信号很容易造成频谱泄漏, 从而影响测量结果的准确性。文献[5-6]提出了基于小波变换的电压闪变信号检测方法, 但是这种检测方法计算量大, 小波基选择困难, 较难在

低廉的硬件系统中实现。Soliman^[7]等人提出了最小绝对值线性优化状态估计算法,得出闪变的电压幅值相角的线性估计模型,但该方法推导复杂计算量大,缺乏快速算法。因此,非常有必要研究一种能够准确测量电压闪变参数的快速算法。

本文提出了基于数学形态滤波和 Hilbert 变换的电压闪变信号测量方法。其中,数学形态滤波方法能够有效的滤除电压闪变信号中含有的高次谐波,白噪声等干扰,与传统的数字滤波器相比,运算简单,便于使用廉价的微处理器芯片实时实现,滤波后的信号采用 Hilbert 变换方法能准确有效的计算出电压闪变的有关参数。

1 闪变信号的数学模型

闪变通常是指人眼对由一定频率的电压波动所引起的照明异常而产生的直观视觉感受。根据扰动原因的不同,闪变有周期性和非周期性之分,其中对人们生产生活影响较大的为周期性电压闪变。周期性电压闪变可看成是对正弦电压的低频调制,如式(1)所示。

$$u(t) = (A_0 + \sum_{i=1}^m A_i \cos(\omega_i t + \theta_i)) \cos(\omega_0 t + \theta_0) = A(t) \cos(\omega_0 t + \theta_0) \quad (1)$$

式中: A_0, ω_0 分别为基波电压的幅值和角频率; A_i, ω_i 分别为调制波电压的幅值(最大为基波幅值的10%)和角频率(一般为1~10 Hz)。

根据闪变信号调制波的幅值和频率范围,可知闪变信号为典型的幅值低频调制的窄带信号。满足 Hilbert 变换的前提条件^[8],但考虑到闪变信号中含有的高次谐波等噪声,必须对原始闪变信号进行有效的滤波才能保证 Hilbert 变换的可行性和准确性。

2 基于数学形态学的电压闪变信号滤波

2.1 数学形态学滤波器的原理

数学形态学^[9](mathematical morphology, MM)的基本思想是利用一个称作结构元素的“探针”收集信号的信息,探针在信号中不断移动即可考察信号各个部分之间的相互关系,并提取有用信息分析与描述信号特征,数学形态变换能将一个复杂的信号分解为具有物理意义的各个部分,并将其与背景剥离,同时保持其主要的形态特征。数学形态学目前已经广泛应用于信号、图象分析和处理等工程领域^[10-11]。在电力系统中,数学形态学的应用主要集中在继电保护^[12-13]和信号去噪^[14-15]等方面。

MM的运算以腐蚀和膨胀这两种基本运算为基础,并引出形态开和形态闭,以及形态开、闭的级联组合。形态开-闭和闭-开滤波器虽然可以同时滤除信号中的正、负低谷噪声,但存在统计偏倚现象,这是由于开运算的反扩展性和闭运算的扩展性造成的,导致开-闭滤波器的输出幅度偏小,而闭-开滤波器的输出幅度偏大,所以单独使用它们并不能取得较好的滤波效果,而用两者的平均值能进一步使处理结果接近原信号。形态开-闭和闭-开滤波器的平均组合如式(2)所示。

$$y(n) = \{CO[f(n)] + OC[f(n)]\} / 2 \quad (2)$$

式中: $f(n)$ 为含噪声的原始输入信号; $y(n)$ 为形态滤波器的输出信号。

2.2 串联复合数学形态滤波器的设计

形态滤波器的滤波效果和结构元素的选择以及形态滤波器的结构密切相关,经验表明,半圆结构元素适于滤除白噪声干扰,三角结构元素适于滤除脉冲噪声干扰^[16]。

尽管形态组合滤波器可同时抑制信号中的正、负脉冲噪声,但由于只采用了一种结构元素,所以只能对一种噪声有较好的滤除效果,对于包含不只一种噪声的电压闪变信号,仅采用基于一种结构元素的形态组合滤波器难以达到预期的滤波效果。

为此,本文设计了一种基于不同结构元素的串联形式复合形态滤波器,串联的每一级采用不同的结构元素,复合形态滤波器如图1所示。

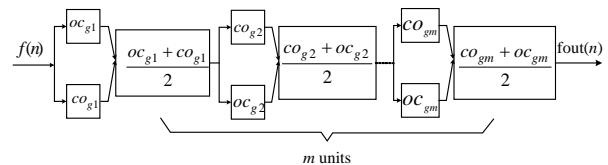


图1 复合形态滤波器结构图

Fig. 1 Framework of multiple MM filter

仿真试验中,信号采样频率为6.4 kHz,复合形态滤波器依次采用了3种结构元素,分别为三角形结构元素(trigonal structuring elements, TSEs),半圆形结构元素(semicircular structuring elements, SSEs)、直线型结构元素(line structuring elements, LSEs),其中三角形结构元素取值为[0, 0.0167, 0.0333, 0.0500, 0.0667, 0.0833, 0.1000, 0.0833, 0.0667, 0.0500, 0.0333, 0.0167, 0],半圆形的结构元素半径为0.06,长度为13,直线形的结构元素长度为3,取值为0.01。不同噪声背景下的滤波前后的信噪比比较如表1所示;滤波误差比较如表2所示。

仿真试验结果表明,在多种噪声并存(脉冲噪

声, 白噪声, 高次谐波, 直流偏移) 的背景下, 串联复合形态滤波器滤波后的信噪比大于单一结构元素形态组合滤波器, 而滤波误差小于单一结构元素形态组合滤波器。仿真结果还表明, 如果串联复合形态滤波器的每一级都选择对一定扰动类型滤波效果较好的结构元素(形状, 长度, 幅值), 串联复合形态滤波器的滤波效果也会好一些。

表 1 不同噪声背景下信噪比比较
Tab. 1 SNR comparison under different noise background

原始波形	三角滤波	半圆滤波	直线滤波	复合滤波
16.54	23.99	23.65	21.72	24.16
16.83	24.60	24.45	22.18	24.82
17.58	24.97	24.79	22.31	25.12

表 2 不同噪声背景下滤波误差比较
Tab. 2 Filter error comparison under different noise background

原始波形	三角滤波	半圆滤波	直线滤波	复合滤波
5.33×10^{-2}	4.05×10^{-2}	3.81×10^{-2}	4.71×10^{-2}	3.54×10^{-2}
5.46×10^{-2}	4.06×10^{-2}	3.87×10^{-2}	4.78×10^{-2}	3.62×10^{-2}
6.50×10^{-2}	4.23×10^{-2}	4.07×10^{-2}	5.12×10^{-2}	3.86×10^{-2}

注: 滤波误差的计算公式为 $E = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |y(n) - s(n)|$; $y(n)$ 为含噪声原始信号/滤波器输出信号; $s(n)$ 为不含噪声原始信号; N 为采样点数。

3 Hilbert 变换

窄带信号 $f(t)$ 的 Hilbert 变换为

$$HT[f(t)] = \hat{f}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{f(\tau)}{t - \tau} d\tau = f(t) * \pi t = f(t) * h(t) \quad (3)$$

式中: $HT[\cdot]$ 为 Hilbert 变换; $\hat{f}(t)$ 为信号 $f(t)$ 的共轭信号; $*$ 表示卷积; $f(t)$ 的幅值 $a(t)$ 、相位 $\phi(t)$ 和瞬时频率 f 可通过以下各式求出

$$a(t) = \sqrt{f^2(t) + \hat{f}^2(t)} \quad (4)$$

$$\phi(t) = \arctan \hat{f}(t) / f(t) \quad (5)$$

$$f = (1/2\pi) \cdot [d\phi(t) / dt] \quad (6)$$

4 仿真算例

4.1 单一调制频率电压闪变

以下仿真试验中, 电压闪变信号的采样频率均为 6.4 kHz, 采样时长 0.4 s; 原始闪变信号中含有的噪声包括白噪声(方差为 0.01), 脉冲噪声(幅值 1.2 pu 和 1.5 pu), 直流偏移(幅值为 0.01 pu, 频率为 1 Hz), 高次谐波(幅值为 0.05 pu 的 3 次和 5 次谐波)。含噪原始电压闪变信号滤波采用的形态滤波器为 2.2 中提到的串联复合形态滤波器。

根据电压闪变信号的数学模型, 具有单一调制频率的电压闪变信号参数设定值如表 3 所示; 原始

电压闪变信号经过串联形态滤波后, 由 Hilbert 变换求取闪变包络, 然后采用 Pisarenco 谐波分解法对去除直流偏置后的电压闪变包络进行分析得到的闪变参数的估计值如表 3 所示。图 2 为含噪单一调制频率电压闪变原始信号, 串联形态滤波后信号, 闪变包络及跟踪误差。

表 3 单一调制频率电压闪变参数表
Tab. 3 Parameters of voltage flicker with single modulation frequency

参数	A_0/pu	f_0/Hz	A_1/pu	f_1/Hz
设定值	1.00	50.00	0.10	5.00
估计值	0.98	49.99	0.09	5.01

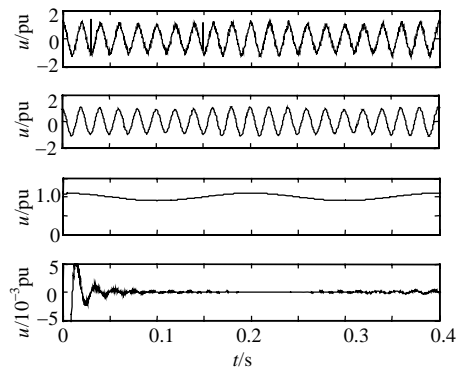


图 2 单一调制频率电压闪变原始信号及其滤波后信号、包络和跟踪误差

Fig. 2 Original flicker signal with single modulation frequency, filtered wave, its envelope and track error

4.2 多调制频率电压闪变

具有多调制频率的电压闪变信号参数设定值和估计值如表 4 所示。图 3 为含噪多调制频率电压闪变原始信号, 串联形态滤波后信号, 闪变信号包络及跟踪误差。

表 4 多调制频率电压闪变参数表
Tab. 4 Parameters of voltage flicker with multiple modulation frequencies

参数	A_0/pu	f_0/Hz	A_1/pu	f_1/Hz	A_2/pu	f_2/Hz
设定值	1.00	50.00	0.10	5.00	0.05	10.00
估计值	0.99	50.01	0.08	4.98	0.06	9.99

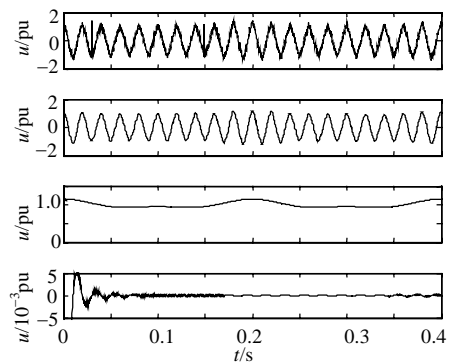


图 3 多调制频率电压闪变原始信号及其滤波后信号、包络和跟踪误差

Fig. 3 Original flicker signal with multiple modulation frequencies, filtered wave, its envelope and track error

4.3 调制波幅值发生变化的电压闪变

调制波幅值发生变化的电压闪变信号离散形式为

$$v(n) = (1 + A \cos(0.2\Omega_0 n)) \cos(\Omega_0 n + \Phi_0) \quad (7)$$

式中 $\Omega_0 = 2\pi \times 50 / 6400 = 0.049$

$$A = \begin{cases} 0.05 \text{ pu}, & 0 \sim 0.1s \\ 0.1 \text{ pu}, & 0.1 \sim 0.2s \\ 0.05 \text{ pu}, & 0.2 \sim 0.4s \end{cases}$$

图4为含噪幅变电压闪变原始信号,串联形态滤波后信号,闪变信号包络及跟踪误差。

从4.1~4.3试验结果可以看出,串联形态滤波方法对闪变信号中含有的多种噪声均达到了较好的抑制效果;在串联形态滤波的基础上,Hilbert变换方法能够以较小的误差跟踪电压闪变信号的包络,在准确跟踪包络的基础上可进一步获得电压闪变信号的具体参数。

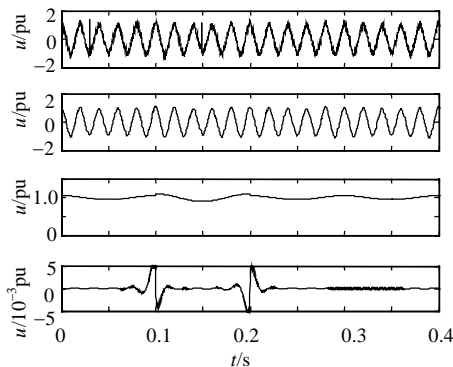


图4 幅变电压闪变原始信号及其滤波后信号、包络和跟踪误差

Fig. 4 Original flicker signal with variable amplitude, filtered wave, its envelope and track error

5 结论

随着电力系统冲击性负荷的增多,电压闪变已经成为重要的电能质量问题之一,极大的影响了人们的生产和生活。本文将数学形态滤波方法与Hilbert变换方法结合起来,实现了对电压闪变参数的快速准确测量。其中,串联复合数学形态滤波器滤波效果好,计算简单,适于工程应用。基于Hilbert变换的电压闪变测量方法能够在串联复合形态滤波的基础上准确地测出闪变的包络,为进一步测量电压闪变的有关参数奠定了基础。大量的仿真试验结果证实了提出方法的准确性。

参考文献

- [1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 孙树勤. 电压波动与闪变[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

- [3] 马玉龙, 刘连光, 张建华, 等. IEC闪变测量原理的数字化实现方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(11): 92-95.
Ma Yulong, Liu Lianguang, Zhang Jianhua, et al. Research of digital flicker meter method based on IEC standard[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(11): 92-95(in Chinese).
- [4] Srinivasan K. Digital measurement of the voltage flicker[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(4): 1593-1998.
- [5] Zheng T, Makram E B. Wavelet representation of voltage flicker[J]. Journal of Electric Power System Research, 1998, (48): 133-140.
- [6] Teager H M. Some observations on oral air flow during phonation[J]. IEEE Trans. Acoustic. Speech and Signal Processing, 1980, ASSP-28, 599-601.
- [7] Soliman S A, El-Hawary M E. Measurement of power systems voltage and flicker levels for power quality analysis: a static law state estimation based algorithm[J]. International of Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2000, 22(6): 447-450.
- [8] 王秉均. 通信原理及其应用[M]. 天津: 天津大学出版社, 2000.
- [9] 崔屹. 图像处理与分析: 数学形态学原理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [10] Maragos P, Schafer R W. Morphological systems for multidimensional signal processing[J]. Proceedings of the IEEE, 1990, 78(4): 690-710.
- [11] Maragos P. Differential morphology: multi scale image dynamics, max min difference equations, and slope transforms[C]. IEEE International Conference on Image Processing, Austin (TX), 1994.
- [12] 林湘宁, 刘沛, 刘世明. 电力系统超高速保护的形态学小波综合滤波算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 19-22.
Lin Xiangning, Liu Pei, Liu Shiming. A novel integrated morphology-wavelet filter algorithm used for ultra-high speed protection of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 19-22(in Chinese).
- [13] 林湘宁, 刘沛, 高艳. 基于故障暂态和数学形态学的超高速线路方向保护[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 13-18.
Lin Xiangning, Liu Pei, Gao Yan. Ultra-high-speed line directional protection based on transient and mathematical morphology[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(4): 13-18(in Chinese).
- [14] 陈平, 李庆民. 基于数学形态学的数字滤波器设计与分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 60-65.
Chen Ping, Li Qingmin. Design and analysis of mathematical morphology based digital filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 60-65(in Chinese).
- [15] 于永, 宋海龙, 徐殿国. 基于改进的形态滤波器信号预处理的感应电机定子磁链信号获取方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 149-153.
Yu Yong, Song Hailong, Xu Dianguo. Research on acquisition of stator flux based on improved morphological filter signal pretreatment[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 149-153(in Chinese).
- [16] 岳蔚, 刘沛. 基于数学形态学消噪的电能质量扰动检测方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(7): 13-17.
Yue Wei, Liu Pei. Detection of power quality disturbances based on mathematical morphological (MM) filter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(7): 13-17(in Chinese).

收稿日期: 2007-02-14.

作者简介:

舒泓(1979—), 女, 博士研究生, 研究方向为电能质量在线检测, doctormouse@163.com;

王毅(1958—), 男, 博士生导师, 研究方向为电力系统检测和故障诊断。

(编辑 王彦骏)