第32卷第1期 2015年2月

文章编号:1005-0523(2015)01-0086-07

# 基于LMS 形态滤波和 Hilbert 变换的电能质量扰动定位

## 宋平岗,文发

(华东交通大学电气与电子工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:针对电能质量中常见的几种暂态扰动,为了实现对其正确地检测和定位,提出了一种最小均方(LMS)自适应形态滤波和 Hilbert变换相结合的方法。首先,扰动信号中往往夹杂中各种噪声,采用基于LMS算法的广义形态学滤波器对扰动信号进行 降噪处理。然后,对降噪后的信号进行Hilbert变换,提取扰动信号的幅值包络,可以实现对扰动的初步定位。最后,对提取的幅 值包络进行后向差分处理,形成定位脉冲,实现对暂态扰动起止时刻和持续时间的精确定位。通过在不同条件下的仿真对比实 验,证明了该方法的有效性。

关键词:电能质量;暂态扰动;LMS;Hilbert变换;后向差分 中图分类号:TM714 文献标志码:A

电能是现在科技社会利用相当广泛的一种能源,对国家工业进步和经济发展起到了不可估量的作用。 然而电网中各种冲击性、非线性和波动性负荷给电能造成了严重污染,对电网和用户都造成了较大的危害和 损失。其中电压暂降、暂升、短时中断等电能质量的暂态扰动越来越引起人们的关注,实现对暂态扰动的正 确检测和定位是此类故障分析和解决的前提。目前,用于电能质量分析的方法多种多样,主要包括傅里叶变 换<sup>[1]</sup>、小波变换<sup>[2]</sup>、S变换<sup>[3]</sup>、dq变换<sup>[4]</sup>等。傅里叶变换用于提取信号的频谱特征,只能反映分析时段以内的整 体信息,不适合非平稳和带有短时冲击信号的分析。小波变换需要对小波基进行选择,计算量巨大,导致实 时性很难得到保证。S变换具有很高的频率分辨率但是需要考虑最佳特征量的选择。dq变换通过延时虚 构三相电压来提取特征量,但是对于信号的分析具有延时性。在此提出首先采用基于LMS算法的自适应广 义形态学滤波器和Hilbert变换以及后向差分结合的方法分析电能质量扰动。

### 1 数学形态学

### 1.1 数学形态学基本原理

数学形态学(MM)<sup>[5]</sup>由 Matheron G和Serra J共同提出,MM 是在积分几何和随机集论的基础上建立起来的一种数学分析方法。一般只需要进行加、减法和取极大值或极小值等运算,具有计算简单,易于硬件实现的优点。其基本运算有腐蚀、膨胀、开运算和闭运算等。电能质量分析中通常只涉及一维信号,下面只对一维离散情况下的多值形态变换进行讨论。

设 f(n) 和 g(n) 为分别定义在 2 个离散域  $F = \{0, 1, \dots, N-1\}$  和  $G = \{0, 1, \dots, M-1\}$  的实函数,其中 N > M, f(n) 为输入信号, g(n) 为结构元素。则 f(n) 关于 g(n) 的腐蚀运算和膨胀运算分别定义为<sup>[6-7]</sup>

$$(f\Theta g)(n) = \min[f(n+m) - g(m)] \quad m \in 0, 1, \dots, M-1$$
(1)

$$(f \oplus g)(n) = \max[f(n-m) + g(m)] \quad m \in 0, 1, \cdots, M-1$$

$$(2)$$

由膨胀和腐蚀运算可得形态开(f。g)和形态闭(f·g)分别为

收稿日期: 2014-11-10

作者简介:宋平岗(1965—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为再生能源系统和电力牵引与传动控制。

$$(f \circ g) = (f \Theta g \oplus g)(n) \tag{3}$$

$$f \cdot g) = (f \oplus g \Theta g)(n) \tag{4}$$

以上4种基本运算具有不同的滤波效果。不同的级联组合形式得到效果不同的滤波效果<sup>[8]</sup>。

(

### 1.2 广义开一闭和闭一开滤波器

传统的开一闭和闭一开滤波器并不能同时完全滤除正、负脉冲噪声。形态滤波器的滤波效果既取决于 变换的组合,而且和结构元素的尺寸以及形状有关。一般只有与结构元素相匹配的信号才能被保持。根据 以往的经验,滤除白噪声通常使用半圆结构元素,滤除脉冲噪声通常采用三角形结构元素。因此采用不同尺 寸的结构元素,通过开闭运算的不同组合和不同结构元素的使用,文献<sup>101</sup>构造了一类广义开一闭和闭一开滤 波器,其定义如下:

设 f(x) 为输入离散信号;  $g_1$ 、 $g_2$  为结构元素,则广义形态开一闭(GOC)和闭一开(GCO)滤波器定义为

$$GOC(f) = (f \circ g_1 \cdot g_2)(x) \tag{5}$$

$$GCO(f) = (f \cdot g_1 \circ g_2)(x) \tag{6}$$

### 1.3 自适应形态滤波

由于开运算存在反扩张性,闭运算存在扩张性使得形态开—闭(OC)滤波器输出偏小,闭—开(CO)滤 波器输出偏大,使用单独的广义形态滤波器并不能同时对正负噪声达到很好的滤波效果。在此采用一种基 于 LMS 算法的自适应加权组合广义形态滤波器<sup>[10]</sup>。通过自适应算法,分别采用半圆和三角形结构元素,得到 更好的滤波效果,其结构如图1所示。



### 图1 自适应广义形态滤波器原理图

### Fig.1 The adaptive generalized morphological filter

输入信号  $x(n) = s_0(n) + d(n)$ ,  $s_0(n)$  为理想信号, d(n) 为噪声, y(n) 为滤波输出号,  $y_1(n)$  和  $y_2(n)$  分别为 广义开-闭和闭-开滤波器的输出,  $y_{11}(n)$  和  $y_{12}(n)$  分别为  $y_1(n)$  和  $y_2(n)$  经 LMS 算法后的输出,  $s_1(n)$  和  $s_2(n)$ 为期望响应,这里用  $y_1(n+1)$  和  $y_2(n+1)$  替代。  $e_1(n)$  和  $e_2(n)$  为误差信号

$$e_{1}(n) = s_{1}(n) - y_{11}(n) \tag{7}$$

$$e_2(n) = s_2(n) - y_{21}(n) \tag{8}$$

$$y(n) = y_{11}(n) + y_{21}(n)$$
(9)

关于最小均方(least mean square,LMS)算法原理如下。

令  $y_1(n) = OC[x(n)], y_2(n) = CO[x(n)], 则$ 

$$y_{11}(n) = \sum_{i=1}^{2} a_i(n) \cdot y_i(n)$$
 (10)

$$y_{2i}(n) = \sum_{i=1}^{2} a_i(n) \cdot y_i(n)$$
(11)

输出信号的均方差E为

$$E[e_{1}^{2}(n)] = E[|s_{1}(n) - y_{11}(n)|^{2}]$$
(12)

$$E[e_{2}^{2}(n)] = E[|s_{2}(n) - y_{21}(n)|^{2}]$$
(13)

下面举一个其中一个输出  $y_{II}(n)$  的均方差来说明 LMS 权系数  $a_{I}(n)$  的计算。

取单个误差样本的平方  $e_1^2(n)$  作为均方误差  $E[e_1^2(n)]$  的估计,并计算其对权系数的导数为

$$\frac{\partial \left[e_1^{(2)}(n)\right]}{\partial a_i(n)} = -2y_{11}(n) \cdot e_1(n) \quad i = 1,2$$

$$\tag{14}$$

利用最陡下降法优化权系a<sub>i</sub>数,可得到

$$a_{i}(n+1) = a_{i}(n) - \mu \frac{\partial \left[e_{1}^{2}(n)\right]}{\partial a_{i}(n)} \quad i = 1,2$$
(15)

将(14)式代入(15)式中,可得(16)式,其中式中μ为控制收敛速度的参数。

$$a_i(n+1) = a_i(n) + 2\mu \cdot y_i(n) \cdot e_1(n) \quad i = 1,2$$
(16)

### 2 Hilbert 变换

希尔伯特(Hilbert)变换在信号分析与处理中得到了广泛的运用<sup>[11]</sup>,Hilbert对基波和各次谐波进行-90° 取信号幅值的包络,其原理如下。

对一个实信号 x(t) 或 x(n),其 Hilbert 变换  $\hat{x}(t)$  定义为

$$\hat{x}(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(t - \tau)}{\tau} d\tau = x(t) * \frac{1}{\pi t} = x(t) * h(t)$$
(17)

式中:  $\hat{x}(t)$ 为Hilbert变换结果; x(t)是通过一个滤波器的输出;该滤波器的单位冲击响应  $h = 1/(\pi t)$ ; \*表示卷积; t为时间;  $\tau$ 为积分变量。

Hilbert变换器的频率响应为

$$H(j\omega) = -j \operatorname{sgn}(\omega) = \begin{cases} -j\omega > 0\\ j\omega < 0 \end{cases}$$
(18)

记 $H(j\omega) = |H(j\omega)|e^{j\varphi\omega}$ ,则

$$H(j\omega) = 1 \tag{19}$$

$$\varphi(\omega) = \begin{cases} -\frac{\pi}{2} & \omega > 0 \\ \frac{\pi}{2} & \omega < 0 \end{cases}$$
(20)

定义可以看出,Hilbert变换可以看作是一个幅频特性为1的全通滤波器<sup>[12]</sup>,通过滤波器后信号发生相位移,负频率会做+90°的相位移,正频率做-90°相位移。频谱分量的幅度大小不受到影响。信号 *x*(*t*)的幅值 *a*(*t*),相位 *φ*(*t*)和瞬时频率 *f* 如下式

$$a(t) = \sqrt{x^{2}(t) + x^{2}(t)}$$
 (21)

$$\varphi(t) = \arctan\frac{\hat{x}(t)}{x(t)}$$
(22)

$$f = \frac{1}{2\pi} \frac{\mathrm{d}\varphi(t)}{\mathrm{d}t} \tag{23}$$

由Hilbert得到的幅值 a(t)进行后差分计算,使扰动信号更加明显,得到如下等式

$$y(n) = s(n) - s(n-1)$$
 (24)

式中: s(n)为第 n 次采样的信号幅值 a(t); n 为采样数; y(n) 为近似的差分值,即信号连续采样点之间的变化值。

#### 仿真分析 3

### 3.1 3种扰动定位仿真分析

根据电力系统中的暂态扰动现象的特点,给出了现实生活中常发生的电压扰动信号的算式,为以下基于 MATLABR2010 仿真验证提供支撑。

电压暂降为电网中的电压突降至 0.1~0.9 pu 范围内,维持 0.5 周期到 1 min。其信号算式为

$$f(t) = \{1 - a[u(t - t_1) - u(t - t_2)]\} \sin 2\pi f t \quad 0.1 \le a \le 0.9, T \le t_2 - t_1 \le 9T$$

$$(25)$$

十户口林中

(26)  $f(t) = \{1 + a[u(t - t_1) - u(t - t_2)]\} \sin 2\pi ft \quad 0.1 \le a \le 0.8, T \le t_2 - t_1 \le 9T$ 电压中断为电网中的一相或者多相电压突降至低于 0.1 pu,维持 0.5 周期到 1 min,其信号算式

$$f(t) = \{1 - a[u(t - t_1) - u(t - t_2)]\}\sin 2\pi f t \quad 0.9 < a \le 1, T \le t_2 - t_1 \le 9T$$
(27)

在叠加白噪声和单位脉冲噪声的情况下对电压扰动信号进行仿真,设正弦信号频率为50 Hz,幅值为 1 pu,叠加的噪声信号为幅值为1 pu的脉冲噪声和方差为0.06的白噪声,LMS形态滤波器的结构元素采用长 度为9的半圆和长度为11的三角形结构元素,下图中电压在0.0856~0.1842s分别发生暂降、暂升和短时 中断扰动。其中暂降、暂降幅值为50%。



Fig.3 Detection of voltage swell



Fig.4 Detection of voltage interruption

从图2~图4检测结果可以看出,电压扰动信号在脉冲和白噪声的干扰下首先经过LMS形态滤波器滤波,可以有效地消除噪声干扰,滤波后的电压再经过Hilbert变换提取其幅值包络。鉴于正常信号只要有扰动发生,其幅值就会发生改变,包络也相应发生变化,这为扰动的开始和结束时刻定位提供了条件。最后对提取的包络进行后差分定位处理,可以达到放大扰动定位的效果,使扰动的定位更加精确。采用该算法对这3种扰动检测得到的定位结果为0.0857~0.1841s实现了预期的效果。

### 3.2 算法的适应性和稳定性分析

3.2.1 不同噪声强度对定位结果的影响

在电压暂降幅度为50%的情况下,叠加的噪声信号含有两个幅值为1pu的脉冲噪声,白噪声方差分别在0.08,0.10和0.12,定位误差如表1所示。

噪声方差 -	起始时刻/ms			结束时刻/ms			
	理论	实际	误差	理论	实际	误差	
0.08	85.6	85.8	0.2	184.2	184.3	0.1	
0.10	74.1	74.3	0.2	124.4	124.7	0.3	
0.12	124.1	124.2	0.1	164.4	164.5	0.1	

表1 不同噪声干扰结果 Tab.1 Results of different noise interference

3.2.2 不同谐波对定位结果的影响

在电压暂降幅度为 50% 的情况下,叠加的噪声信号为两个幅值为1 pu 的脉冲噪声,白噪声方差为 0.06,不同谐波的定位误差如表 2 所示。

**表**2 不同谐波干扰结里

Tab.2 Results of different harmonic interference										
论水水	起始时刻/ms			结束时刻/ms						
咱仅仍致7八 -	理论	实际	误差	理论	实际	误差				
3	85.6	85.5	0.1	184.2	184.3	0.1				
3,5	75.4	75.4	0.1	154.4	154.6	0.2				
3,5,7	116.2	116.4	0.2	184.4	184.3	0.1				

### 3.2.3 不同降幅对定位结果的影响

在电压信号叠加的噪声信号含有两个幅值为1pu的脉冲噪声,白噪声方差为0.06的情况下,对不同降幅的扰动进行仿真实验,定位误差如表3所示。

幅度/% -	起始时刻/ms			结束时刻/ms		
	理论	实际	误差	理论	实际	误差
40	76.2	76.4	0.2	114.4	114.3	0.1
65	66.2	66.0	0.2	146.2	145.9	0.3
80	136.4	136.3	0.1	174.4	174.5	0.1

### 表3 不同降幅干扰结果 Tab.3 Results of different drop

由以上表格数据可以看出,本文采用的算法适应强,稳定性很高,定位的精度满足要求,在多种干扰下依 然能够正常的工作。

### 4 结论

1) 采用了基于 LMS 的自适应形态滤波,对干扰信号进行前期处理,能够高效快速的去除噪声干扰。

2) 对滤波后的干扰信号进行 Hilbert 变换,提取其幅值,能够初步定位扰动发生的起止时刻。

3) 对由Hilbert提取的幅值包络采用后向差分的处理,能够放大扰动的变化,实现更加精确的定位。

4) 本文采用的算法在不同的噪声和谐波以及不同程度的干扰下具有很强的适应性。

仿真及实验表明, LMS 的自适应形态滤波能够高效的去除噪声干扰,结合 Hilbert 变换和后差分的处理 能够精确的定位扰动。

### 参考文献:

[1] 赵凤展,杨仁刚. 基于短时傅里叶变换的电压暂降扰动检测[J].中国电机工程学报,2007,27(10):28-34.

- [2] 尚婕,陈红卫,李彦.小波变换在电能质量暂态信号检测中的应用[J].继电器,2003,31(2):27-30.
- [3] 占勇,程浩忠,丁屹峰,等.基于S变换的电能质量扰动支持向量机分类识别[J].中国电机工程学报,2005,24(4):51-56.
- [4] 李天云,赵妍,李楠,等. 基于 HHT 的电能质量检测新方法[J]. 中国电机工程学报,2005,25(17):52-56.
- [5] 崔屹.图象处理与分析--数学形态学方法及应用[M].北京:科学出版社,2002:1-30.
- [6] 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.
- [7] 宋平岗,周军,蔡双. 基于形态学分形维数的输电线路故障选相方法[J]. 华东交通大学学报,2014,31(3):90-91.
- [8] 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.
- [9] 张全明,刘会金.基于广义形态滤波的电力系统采样信号处理[J].电力自动化设备,2006,26(10):45-48.
- [10] 刘盼,王静,刘涤尘.改进的自适应广义形态滤波器设计[J].电网技术,2009,33(2):94-98.
- [11] 杨宏达.电压波动与闪变检测方法的研究[D].哈尔滨:哈尔滨理工大学,2010.
- [12] 谢静.基于时间域加窗 Hilbert 变换的地震边缘检测研究[D].四川:成都理工大学,2007.

## Power Quality Transient Disturbance Detection Based on LMS Morphological Filter and Hilbert Transform

Song Pinggang, Wen Fa

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: For the common kinds of transient disturbance in power quality, in order to realize the detection and location correctly, this paper presents a method combining adaptive generalized morphological filter based on LMS (least mean square)and Hilbert transform. Firstly, the disturbance signals are mixed with all kinds of noise and the generalized morphological filter based on LMS is used to filter the noise. Then, it makes the signals with Hilbert transform and extracts amplitude envelope of the disturbance signals which can realize preliminary positioning of the disturbance. Finally, it makes amplitude envelope with the backward difference which forms the positioning pulse and realizes positioning the begin–end time accurately. The simulation experiments under different conditions have proved the effectiveness of the proposed method.

Key words: power quality; transient disturbances; LMS; Hilbert transform; backward difference

(责任编辑 姜红贵)