

基于 EMD 和 TEO 的电力系统短期扰动检测新方法

王波, 杨洪耕

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 借鉴经验模态分解 EMD (Empirical Mode Decomposition) 的思想提出一种电力系统短期扰动检测定位的新方法, 该方法通过一个对称三角模态来保留信号的扰动信息进而定位扰动。同时, 在扰动准确定位的基础上, 提出对原信号进行分段 EMD, 并采用 Teager 能量算子求取幅值包络来识别扰动类型的分析方法。该方法能够克服 EMD 过程产生的模态混叠导致检测失效的问题, 与 Hilbert - Huang 变换方法和小波检测方法相比, 所提方法能够更加简单快速地对扰动的检测。仿真结果表明了该方法的有效性。

关键词: EMD; Teager 能量算子; 对称三角模态; Hilbert 变换; 短期扰动

中图分类号: TM714 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)08-0056-06

0 引言

电力系统短期扰动包括电压凹陷、电压凸起和电压中断。传统的傅里叶变换分析方法不能满足突变扰动检测分析的需要, 而小波变换由于具有时频局部化特性, 可实现对扰动信号的检测, 因此在电能质量检测中得到广泛应用^[1,2]。然而采用小波变换进行检测时, 如希望得到较好的检测效果, 通常存在着小波基选择困难的问题^[3]。

HHT (Hilbert - Huang Transform) 方法是一种新的分析非平稳信号的时频方法, 它由 EMD 和 Hilbert 变换两部分组成。这种方法直接从信号本身获取基函数的概念, 具有很好的自适应性。文献 [4, 5] 将 HHT 方法作为电能质量检测的新方法分别用于电力系统谐波、闪变以及暂态信号的检测分析, 仿真结果表明该方法具有良好的检测性能。然而该方法在信号扰动发生有相位突变时, 在 EMD 过程中可能引入异常极值点, 使得分解过程产生模态混叠现象, 这种情况下采用所得扰动分量的 Hilbert 变换求取瞬时频率和瞬时幅值包络可能无法准确检测到扰动。同时, Hilbert 变换运算量较大, 且存在着明显的端点效应, 这些都直接影响检测的速度和精度。

Teager 能量算子 TEO (Teager Energy Operator) 方法作为一种解调方法, 已经在多个领域得到应用^[6,7]。该方法能够简单快速地求取调幅调频信号包络, 其实时性和解调精度都优于 Hilbert 变换^[8], 然而与 Hilbert 变换一样, 该方法同样只适用于单组分信号, 因此文献 [9] 提出采用 EMD 与 TEO 相结合的方法对机械故障进行诊断, 取得了较好的效果, 但

是该方法仍然存在着 EMD 可能产生模态混叠的问题。

本文首先借鉴 EMD 的思想提出一种短期扰动检测定位的新方法——对称三角模态法: 通过在原始信号上叠加一个对称三角模态的方法来保留信号的扰动信息进而定位扰动。然后在扰动定位的基础上提出采用分段 EMD 和 Teager 能量算子求取扰动幅值包络的分析方法。该方法克服了 EMD 过程中模态混叠现象可能导致的检测分析误差以及 HHT 中采用 Hilbert 变换求取扰动幅值包络的缺点, 具有更加简单快速的算法实现。与小波检测相比, 本文方法同样能够快速简单地实现扰动定位。

1 EMD 方法原理

经验模态分解 (EMD) 方法^[10]能够将信号分解为有限个不同特征尺度的本征模函数 (MF, Intrinsic Mode Function) 与一个余项之和。这些本征模函数是满足如下条件的信号序列: 它的极值点和过零点的个数相等或者最多相差 1; 在任意点, 由数据的极大值和极小值构成的包络线的平均值为零。

对于一个给定的信号 $s(t)$, 其 EMD 分解如下:

1) 通过三次样条拟合信号 $s(t)$ 的所有极大和极小值点得到上下包络线并计算包络平均值 m_1 , 求取 $s(t)$ 和 m_1 的差值:

$$h_1 = s(t) - m_1 \quad (1)$$

2) 将 h_1 作为新的 $s(t)$ 重复步骤 1) 直到 h_1 满足 MF 的条件, 记 $c_1 = h_1$, 则 c_1 为第一个 MF 分量, 它对应最小特征尺度 (最高频率) 分量。

3) 将 c_1 从原始信号中分离出来得到 r_1

$$\tilde{r}_1 = s(t) - c_1 \quad (2)$$

将 \tilde{r}_1 视为新的 $s(t)$, 重复步骤 1)、2), 求出以后的各个不同特征尺度的 MF 分量, 直到 $|r_n|$ 很小或 r_n 基本呈现单调趋势, 循环结束。

这样就将信号 $s(t)$ 分解为有限个单组分 MF 分量和一个趋势项 r_n 的合成:

$$s(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n \quad (3)$$

然而当将上述 EMD 方法用于分解包含多个谐波分量的短期扰动信号时, 扰动发生时的相位跳变会在信号中引入异常事件^[11], 异常事件在数据中形成局部的高频信号使得经验模态分解过程产生模态混叠现象, 而不能正确地分解信号成分。那么对此情况下得到的扰动信号 MF 分量采用已有文献的 HHT 方法的 Hilbert 变换, 将无法实现准确的扰动定位, 同时计算得到的扰动信号 MF 分量的 Hilbert 瞬时幅值包络也将具有相当大的误差, 也使其无法用于扰动类型的识别。为了解决上述模态混叠带来的问题, 本文借鉴 EMD 的思想提出一种新的扰动定位方法——对称三角模态法, 并在此基础上进行扰动信号分析。

2 对称三角模态法

其基本思想如下: 由于扰动时的相位跳变在信号中引入了异常事件, 而它表现为信号中的异常极值点 (对应着局部最小特征尺度), 我们构想如果在整个原扰动信号中都稳定存在一个如图 1 所示的只在极值点处对应采样的对称三角波信号 $tr(t)$, 则这个信号极值点所对应的特征尺度将与扰动发生处的特征尺度相一致。

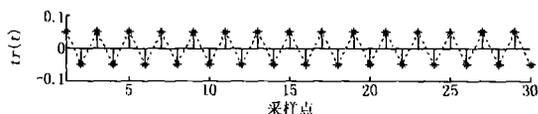


图 1 极值点采样的对称三角波

Fig 1 Symmetrical triangle wave sampling at extrema

那么在原始信号 $x(t)$ 的基础上叠加这样一个具有一定幅值的对称三角波信号 $tr(t)$, 我们可以发现这个对称三角波信号不但能够将原始信号的平稳部分逐点极值化, 使得原信号在整体上具有与扰动处一致的最小特征尺度, 同时在扰动处能够将原始信号的扰动信息“添加”为对称三角波信号的扰动变化。如图 2 所示, 图 2(a) 为扰动信号突变处局部放大图形, 信号突变出现在采样点 2544 处。图 2(b) 是在原始信号上叠加对称三角波后的局部放大波形, 图中用

星形和圆点分别表明信号波形的极大值和极小值点, 用虚线表示上下包络线以及包络均值。由图 2(a) 和图 2(b) 对比可见, 在原始信号的平稳部分, 经过对称三角波的叠加后, 平稳部分任意相邻两点成为极大值点和极小值点, 且与所叠加对称三角波的极值点完全对应, 这样叠加信号 $xtr(t) = x(t) + tr(t)$ 在平稳部分具有的最小特征尺度即为对称三角波的极值点确定的特征尺度。而在原信号扰动发生的位置上, 扰动点处的跳变信息被叠加在了对称三角波对应位置的极值点幅值上, 这样在整个时间范围上, 叠加了对称三角波 $tr(t)$ 的信号 $xtr(t)$, 将具有与对称三角波相同的特征尺度, 并且这个特征尺度在局部和整体上都为最小特征尺度。

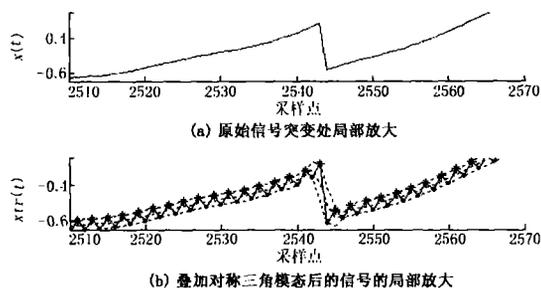


图 2 原始信号与叠加对称三角模态后的信号的局部放大图形

Fig 2 Local magnified image of original signal and the signal superposed with a symmetrical triangle mode

那么将信号 $xtr(t)$ 进行经验模态分解所得到的第一个 MF 分量 c_1 (对应最小特征尺度) 如图 3(a) 所示。可见 MF 分量 c_1 就是叠加的对称三角波信号, 而原信号的扰动信息则作为发生在对称三角波相应位置上的扰动信息, 随着这个三角模态的提取被保留在它的波形中。此后再对分解得到的这个三角模态分量进行简单的处理就可以实现对原信号的扰动定位。

对 c_1 分量简单处理如下: 从 c_1 中减去叠加的信号 $tr(t)$, 并对相减后的信号作向前差分得到数据 $d(t)$, 求出 $d(t)$ 的绝对值 $rd(t)$, 由扰动定位信号 $rd(t)$ 的模极大值就可准确定位扰动, 如图 3(b) 所示。

同时, 在仿真中我们发现, 由于叠加对称三角模态后对原始信号逐点极值化, 使得信号 $xtr(t)$ 的任意两个极大值 (极小值) 点间都只有一个采样点, 且为相邻极小值 (极大值) 点, 并且从图 2(a)、2(b) 中我们可以看到, 原始信号逐点极值化后拟合得到的

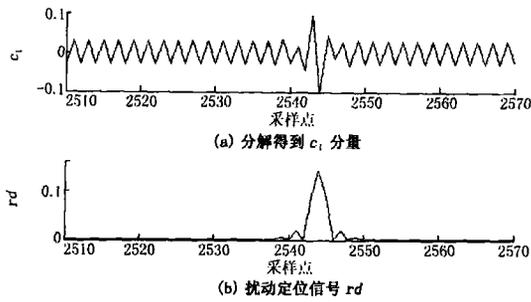


图3 EMD得到 c_1 分量及其扰动定位信号 rd

Fig 3 c_1 of EMD and localization information rd of disturbance

包络线能够非常好地逼近 $x_{tr}(t)$ 的实际包络线,那么所得的包络均值也就成为信号局部均值相当准确的近似了。因此利用原始信号逐点极值化后的这些特点,本文在进行扰动定位时又对 EMD 方法做了如下改进:

1) 用线性插值代替原 EMD 方法中的三次样条插值就可以很好近似信号包络线和包络均值,同时对求得的包络均值进行端值延拓以得到长度为 N 的信号均值序列,这里 N 为原信号数据长度。

2) 只进行 EMD 方法的步骤 1) 而不再进行多次包络拟合迭代,同样可以提取相当准确的三角模态 c_1 分量。

通过上面的改进,本文提出的扰动定位方法在算法上更加简化,编程实现上更加容易,大大节省了计算量,缩短了定位时间。

基于上述方法原理及其改进,我们可以得到对称三角模态对短期扰动信号 $x(k)$ 进行扰动定位的具体实现步骤如下:

1) 对 $x(k)$ 叠加对称三角模态 $tr(k)$:

$$x_{tr}(k) = x(k) + tr(k) \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (4)$$

2) 线性插值求取信号包络均值 arg :

$$\begin{aligned} arg\ en(k) &= \\ \frac{[x_{tr}(k) + x_{tr}(k+2)]/2 + x_{tr}(k+1)}{2} &= \\ \frac{[x_{tr}(k) + x_{tr}(k+1) + x_{tr}(k+1) + x_{tr}(k+2)]}{4} & \end{aligned} \quad (5)$$

$$arg(k) = \begin{cases} arg\ en(1) & k = 1 \\ arg\ en(k-1) & k = 2, \dots, N-1 \\ arg\ en(N-2) & k = N \end{cases} \quad (6)$$

3) 分解出 c_1 分量:

$$c_1(k) = x_{tr}(k) - arg(k) \quad k = 1, 2, \dots, N \quad (7)$$

4) 求取扰动定位信号 rd :

$$d(k) = c_1(k) - tr(k) \quad (8)$$

$$rd(k) = |d(k+1) - d(k)| \quad (9)$$

$$k = 1, 2, \dots, N-1$$

5) 由扰动定位信号 rd 的极大值定位扰动。

在利用上述方法准确定位扰动后,采用对原扰动信号以扰动起止时刻为分界点分段进行 EMD,再对由 EMD 提取得到的各段基波分量采用 TEO 方法而不是 Hilbert 变换求取其瞬时幅值包络的方法,综合三段基波幅值包络的情况来确定扰动幅值,判别扰动类型。

3 Teager 能量算子及其解调原理

Teager 能量算子 (TEO)^[12] 是一个非线性算子,能够跟踪信号的瞬时能量。对于连续时间信号 $x(t)$,其能量算子定义为

$$[x(t)] = [x(t)]^2 - x(t) \cdot x(t) \quad (10)$$

其中: $x(t)$, $x(t)$ 分别为 $x(t)$ 的一阶和二阶导数。

对于调幅信号 $x(t) = A(t) \cos(\omega_c t + \phi)$,其中 $A(t)$ 为瞬时幅值, ω_c 为信号频率, ϕ 为信号初相角。由式 (1) 可得其能量算子为:

$$[x(t)] = \underbrace{A^2(t)}_{D(t)} \cdot \underbrace{\cos^2(\omega_c t + \phi)}_{E(t)} \quad (11)$$

当幅值包络 $A(t)$ 的最高频率 $\omega_a \ll \omega_c$ 时,一般均有 $E(t) \ll D(t)$,因此在计算时忽略 $E(t)$ 的影响,可以得到:

$$|A(t)| = \sqrt{[x(t)]} / \omega_c \quad (12)$$

对于经过采样频率 f_s 离散采样后的该调幅信号 $x(n) = A(n) \cos(n \cdot \omega_c / f_s + \phi)$,则由 (3) 可得:

$$|A(n)| = \sqrt{[x(n)]} / \omega_d \quad (13)$$

其中: $\omega_d = \omega_c / f_s$, $[x(n)]$ 为 $x(n)$ 对应离散形式的 Teager 能量算子,并且有:

$$[x(n)] = x^2(n) - x(n+1) \cdot x(n-1) \quad (14)$$

从式 (13) 和式 (14) 可以看出,信号的瞬时幅值可以通过离散信号连续三个采样点的值计算得到,并且每次只需要进行三次乘除法,一次开方和一次加减法运算,实现起来简单而快速。

由于上述 TEO 解调方法求取信号瞬时幅值包络的方法只适用于单组分信号,对于多组分信号则必须提取其有用的单组分分量来分析,这个可由前述 EMD 方法来实现。

4 短期扰动检测与分析仿真

本文在 Matlab6 中将上述基于 EMD 的对称三

角模态方法与 TEO 解调相结合的检测方法用于典型的电力系统短期电压扰动分析。

设含谐波成分的扰动信号如式 (15) 所示:

$$s(t) = x(t) + \sum A_i \sin(2 m_i f t) \quad (15)$$

式中: $x(t)$ 为扰动分量。

仿真中,电压短期扰动信号设置如表 1 所示。设置采样频率为每工频周波 512 点,取电压分析信号长度为 10 个周波,扰动发生的起止时刻分别为 0.058 6 s 和 0.139 3 s,并且在电压凹陷发生时伴随 30° 的相位跳变,扰动信号波形分别如图 4(a)、5(a)、6(a) 所示。

表 1 仿真信号成分

Tab 1 Components of the simulated signal

扰动类型	扰动幅值	谐波次数	谐波幅值
电压凸起	1.5	3, 5, 7	0.3, 0.2, 0.1
电压凹陷	0.5	3, 5, 7	0.2, 0.1, 0.1
电压中断	0	3, 5, 7	0.2, 0.1, 0.1

大量仿真表明对称三角模态幅值取为 0.05 ~ 0.1 即可,在这里取为 0.05。然后采用对称三角模态法进行扰动检测定位,扰动定位结果分别如图 4(b)、5(b)、6(b) 所示,可见本文方法能够很准确地定位典型短期扰动的起止时刻。

在准确定位扰动起止时刻后,以扰动起止时刻为分界点将信号分为:扰动前,扰动中,扰动后三段,然后对原扰动信号进行分段 EMD,提取每一段基波信号分量,再对提取的各段基波分量由 TEO 解调求取其瞬时幅值包络,最后综合三段基波幅值包络的情况即可确定扰动幅值,识别扰动类型。同时在处理 EMD 方法的边界效应问题^[13]时,针对所分析的扰动信号两端为周期信号的特点,本文采用了周期延拓的边界处理方法,取得了较好的边界处理效果。对仿真扰动信号进行分段 EMD 和 TEO 的结果如图 4(c)、5(c)、6(c) 所示,我们可以清楚地看到电压凸起幅值为 1.5 左右,电压凹陷幅值为 0.5 左右,而电压中断幅值为 0,计算结果很准确地反应了仿真信号的情况。

同时,图 4(d)、5(d)、6(d) 给出了对由 EMD 得到的各段基波分量采用 Hilbert 变换求取幅值包络的结果。由图可见, Hilbert 变换求取的幅值包络在各段边界处存在较严重的端点效应,同时通过仿真得到:对 EMD 分解得到的扰动分量进行各段幅值包络求取,采用 TEO 总用时为 0.01 s,而采用 Hilbert 变换的时间则为 0.07 s。如果采用 Hilbert 变换要消除端点效应的影响则必须进行适当的端点数据延

拓,但这样又必定会增加运算时间。因此,通过比较可以看出,采用本文的 TEO 方法在检测分析的速度和精度上都能得到更好的效果。

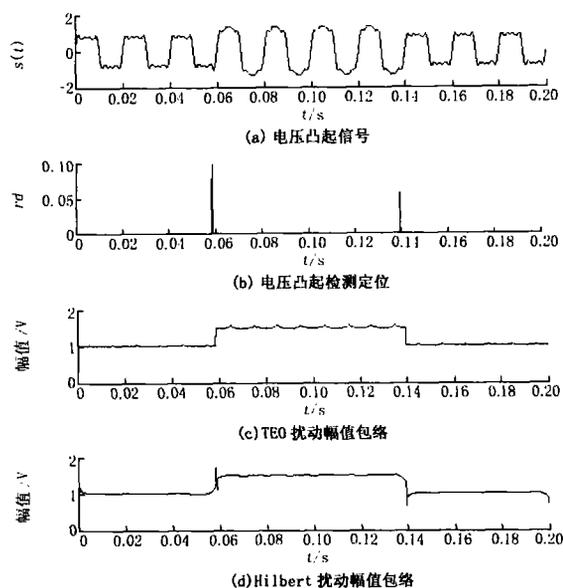


图 4 电压凸起检测分析

Fig 4 Detection and analysis of voltage swell

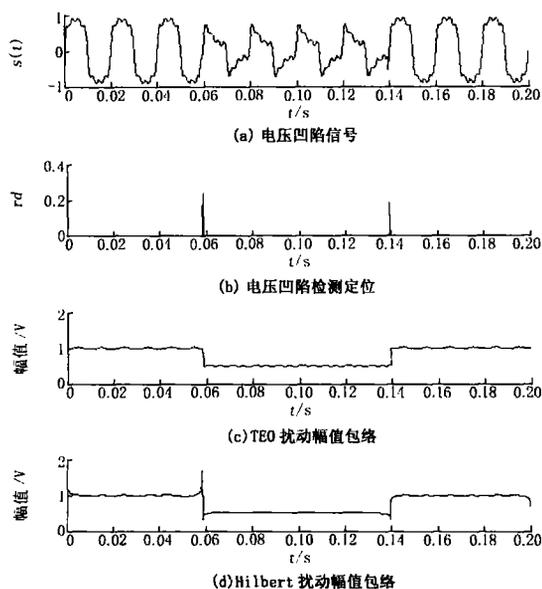


图 5 电压凹陷检测分析

Fig 5 Detection and analysis of voltage sag

同时本文选取 db4 小波基采用 Mallat 算法进行一层离散小波变换,并使用这一层细节分量来定位扰动。与本文定位方法比较后得到如下结论:

1) 本文方法克服了小波检测中小波基选取的困难,具有很好的扰动定位效果。

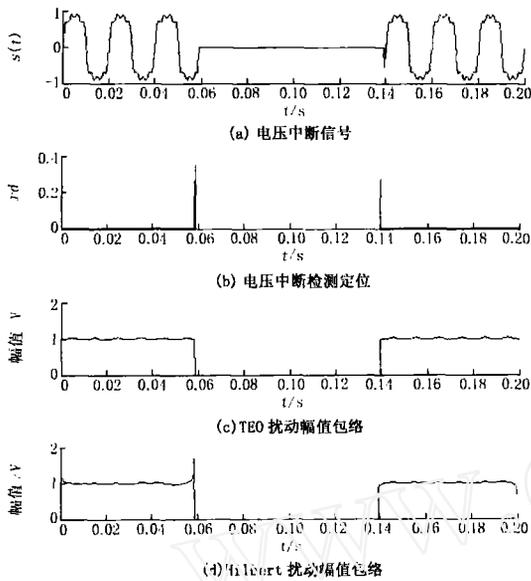


图6 电压中断检测分析

Fig 6 Detection and analysis of voltage interruption

2)以仿真信号的检测定位为例,小波定位扰动用时 0.05 s,而采用本文方法为 0.01 s,这表明了本文方法具有更好的实时性。

3)更为重要的是,由前面算法步骤可以很清楚地看到:本文提出的对称三角模态法具有相当简单的算法实现,只需要进行简单的线性插值以及基本的加减运算即可实现,而小波变换则需要进行较复杂的卷积和分解运算,因此与小波检测定位方法相比,本文方法大大降低了算法复杂程度,更加易于编程实现。

5 结论

本文提出了一种新的扰动检测定位方法——对称三角模态法,简单而快速地实现了扰动定位。同时在定位扰动的基础上提出进行分段 EMD,并针对 HHT 采用 Hilbert 变换求取扰动分量幅值包络的缺点,提出采用 Teager 能量算子进行幅值包络求取的方法。仿真结果表明:与小波方法相比,本文方法简单易行,能够更加快速准确地实现扰动检测,同时克服了 EMD 过程中模态混叠现象以及 Hilbert 变换可能导致的检测分析误差。与小波检测相比,本文方法在扰动定位方面,同样具有更加快速简单的算法实现。

参考文献:

[1] 严居斌,刘晓川,杨洪耕,等.基于小波变换模极大值

原理和能量分布曲线的电力系统短期扰动分析[J].电网技术,2002,26(4):16-18

YAN Ju-bin, L U Xiao-chuan, YANG Hong-geng, et al Analysis of Short-term Power System Disturbance Based on Modular Maximum Principle and Energy Distribution Curve of Wavelet Transform [J]. Power System Technology, 2002, 26(4): 16-18

[2] 朱锋峰,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

[3] 何正友,钱清泉.电力系统暂态信号分析中小波基的选择原则[J].电力系统自动化,2003,27(10):45-48.

HE Zheng-you, QIAN Qing-quan Mother Wavelet Option Method in the Transient Signal Analysis of Electric Power Systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 45-48

[4] 李天云,赵妍,韩永强,等. Hilbert-Huang 变换方法在谐波和电压闪变检测中的应用[J].电网技术,2005,29(2):73-77.

LI Tian-yun, ZHAO Yan, HAN Yong-qiang, et al Application of Hilbert-Huang Transform Method in Detection of Harmonic and Voltage Flicker [J]. Power System Technology, 2005, 29(2): 73-77.

[5] 李天云,赵妍,李楠.基于 EMD 的 Hilbert 变换应用于暂态信号分析[J].电力系统自动化,2005,29(4):49-52.

LI Tian-yun, ZHAO Yan, LI Nan Apply Empirical Mode Decomposition Based Hilbert Transform to Power System Transient Signal Analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4): 49-52

[6] Maragos P, Kaiser J F, Quatieri T F. Energy Separation in Signal Modulations with Application to Speech Analysis [J]. IEEE Trans on Signal Processing, 1993, 41(10): 3024-3051.

[7] Abdel-Galil T K, El-Saadany E F, Salama M M A. On-line Tracking of Voltage Flicker Utilizing Energy Operator and Hilbert Transform [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(2): 861-867.

[8] 刘红星,左洪福,姜澄宇,等.关于能量算子解调方法的研究[J].数据采集与处理,1999,14(3):298-301.

L U Hong-xing, ZUO Hong-fu, JIANG Cheng-yu, et al Study on a New Demodulation Approach-energy Operator [J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 1999, 14(3): 298-301.

[9] 程军圣,于德介,杨宇.基于 EMD 能量算子解调方法及其在机械故障诊断中的应用[J].机械工程学报,

- 2004, 40(8): 115-118
- CHENG Jun-sheng, YU De-jie, YANG Yu Energy Operator Demodulating Approach Based on EMD and Its Application in Mechanical Fault Diagnosis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(8): 115-118
- [10] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al The Empirical Mode Decomposition and the Hilbert Spectrum for Nonlinear and Non-stationary Time Series Analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London, Series A, 1998, 454: 903-995.
- [11] 赵进平. 异常事件对 EMD 方法的影响及其解决方法研究[J]. 青岛海洋大学学报, 2001, 31(6): 805-814
ZHAO Jin-ping Study on Effects of Abnormal Events to Empirical Mode Decomposition Method and the Removal Method of Abnormal Signal[J]. Journal of Ocean University of Qingdao, 2001, 31(6): 805-814.
- [12] 刘红星, 陈涛, 屈梁生, 等. 能量算子解调方法及其在机械信号解调中的应用[J]. 机械工程学报, 1998, 34(5): 85-90
- L U Hong-xing, CHEN Tao, QU Liang-sheng, et al Energy Operator Demodulating Approach and Its Application in Mechanical Signal Demodulations[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1998, 34(5): 85-90
- [13] 陈忠, 郑时雄. EMD 信号分析方法边缘效应的分析[J]. 数据采集与处理, 2003, 18(1): 114-118
CHEN Zhong, ZHENG Shi-xiong Analysis on End Effects of EMD Method[J]. Journal of Data Acquisition & Processing, 2003, 18(1): 114-118

收稿日期: 2005-10-14; 修回日期: 2005-10-31

作者简介:

王波(1981-),男,硕士研究生,研究方向为电能质量的扰动检测与分析; E-mail: wwwbo1981@163.com

杨洪耕(1949-),男,教授,从事电能质量、电力谐波分析与控制方面的研究与教学工作。

A new method based on empirical mode decomposition and teager energy operator for detection of short-term power system disturbance

WANG Bo, YANG Hong-geng

(School of Information and Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: A new method based on the idea of EMD (Empirical Mode Decomposition) for the detection and localization of short-term power system disturbance is presented. This method reserves the disturbance information of signals through a symmetrical triangle mode to localize disturbance. Based on exact localization of disturbance, a method which uses piecewise EMD to the original signal and employs Teager energy operator to obtain amplitude envelope for identifying the type of disturbance is presented. This method can solve the problem of invalid detection of disturbance due to the modes mixing brought by empirical mode decomposition. Compared with Hilbert-Huang transform or wavelet detection method, the proposed method can make exact detection of disturbance simpler and quicker. Simulation results have proved the effectiveness of the proposed method.

Key words: EMD; Teager energy operator; symmetrical triangle mode; Hilbert transform; short-term disturbance

《高压直流输电与柔性交流输电控制装置》已出版

《高压直流输电与柔性交流输电控制装置》中文版 2006年2月由机械工业出版社出版,原著由 Kluwer Academic Publishers/ Springer Science 出版社于 2004年出版,作者为加拿大 Vijay K. Sood 博士,译者为浙江大学徐政教授。本书集中介绍了高压直流输电(HVDC)与柔性交流输电(FACTS)近十年来所取得的技术进步和发展,涉及的主题非常广泛,包括:电流源与电压源换流器,电力换流器的同步技术,电容器换相换流器,有源滤波器,高压直流输电系统中的典型扰动,仿真技术,基于链式换流器的静止同步补偿器,现代高压直流输电系统的发展趋势等。本书适合于从事 HVDC 与 FACTS 技术研究、开发、应用的技术人员和电力系统科研、规划、设计、运行的工程师以及高等学校电力系统专业的教师和研究生阅读。

全书 215 页,28 万字,定价 28 元。

购书联系电话:010-88379645, 88379646; 传真:010-68326287;

汇款到:北京市西城区百万庄南街 1 号机工书店邮购部,加 15% 的邮寄费。

邮编:100037