

# 基于采样值估算的电压扰动快速定位方法

董继民

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要:** 提出了采用两个采样值来推算其下一个采样点值并与实际采样值比较的暂态电能质量扰动快速定位方法。该方法首先以连续两个采样点值推算第三个采样点值, 然后减去实际第三点采样值, 得出无扰动情况下偏差为零的关系式。当有扰动信号发生时, 形成偏差。采用估值计算中的估算系数作为判定采样信号扰动的线性自适应阈值, 比较其偏差值落在阈值范围内的情况, 可快速定位出采样信号的扰动起止时刻。该方法简单快捷, 线性度好, 可以实时在线完成。实验结果表明了该方法的正确性与有效性。

**关键词:** 电能质量; 暂态扰动检测; 采样值估算; 自适应阈值; 电压事件

## Fast sample-extrapolation-based detection method of voltage transient disturbances

DONG Ji-min

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** This paper presents a sample extrapolation method, and based on it, develops a fast identification technique of transient disturbances to power quality. In this method, from two present samples the voltage at next instant can be estimated, and a combination of these three values is equal to zero, and this relation will be destroyed on occurrence of disturbances. A linear adaptive threshold for judging whether a disturbance is present is derived by using an extrapolation factor. Thus, whenever the combination of three consecutive samples is not equal to zero and the deviation is greater than the threshold, the algorithm will give a signal, indicating a disturbance appears. This approach has advantages such as straightforwardness, fastness, and better linearity, and can be implemented in real time. Simulations have shown its validity and applicability.

**Key words:** power quality; transient disturbances detection; extrapolation; adaptive threshold; voltage events

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)09-0092-04

## 0 引言

电压扰动信号的检测是进行电能质量分类和评估的前提, 它主要用来判断采集的电气信号中是否存在扰动, 对存在扰动的信号则存储并进行详细分析。检测算法不需要进行精确地计算, 要求在线、实时完成, 因此其执行必须速度快且简单。

目前广泛应用的时频分析方法, 如文献[1]的双小波分析方法、文献[2]的小波神经网络分析方法和文献[3]的模糊辨识方法等<sup>[4-5]</sup>都可以同时获得暂态电能质量扰动信号的时域和频域信息, 但其缺点是需将时域信号进行频域变换, 算法复杂、时间开销大, 结果缺乏直观性, 实时性差。文献[6]提出了采用当前周期的电压信号与前一个周期信号之间的差值信号来进行检测, 并一般按最大采样值的 5% 设定阈值, 这样在采样信号比较小的小信号

扰动将无法获得满意的效果, 也由于周期性扰动信号的同线性而需采用别的方法进行判定。

本文根据正弦连续量等间隔采样特征, 提出了采用两点采样值对下一点采样值进行估算及基于该估值计算与实际采样值进行比较的电能质量扰动检测快速定位方法。首先采用两点采样值对下一点采样值进行估值计算并减去实际采样值得出实际偏差信号, 然后比较其偏差值落在以估算系数形成的自适应阈值范围内的情况, 快速定位出采样信号的扰动起止时刻。该方法计算时只需三个采样点, 且计算简单, 响应速度快, 线性度好, 很适合在线检测装置。

## 1 采样值估算方法

设正常运行时电网电压可以表示为:

$$u(t) = A \sin(\omega t + \phi_0) \quad (1)$$

假定每周波等间隔采样  $K$  点, 则任意连续三点的采样值可表示为:

$$\begin{aligned} u_{ki-1} &= A \sin \varphi_k \\ u_{ki} &= A \sin(\varphi_k + \Delta\varphi) \\ u_{ki+1} &= A \sin(\varphi_k + 2\Delta\varphi) \end{aligned} \quad (2)$$

式中:  $A$  表示基波最大值;  $\varphi_k = \omega t + \varphi$  表示采样时信号的角度;  $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{K}$  表示采样间隔角度。

分析式 (2), 可知第三点采样值可以用前两点采样值来推算, 即:

$$u_{ki+1} = 2u_{ki} - u_{ki-1} - 2u_{ki}\alpha \quad (3)$$

式中:  $2u_{ki}\alpha$  称为估值系数,  $\alpha = 1 - \cos(-\Delta\varphi) > 0$ 。

显然, 在电网没有扰动的理想情况下三采样值满足式 (4) 的平衡关系, 即:

$$2u_{ki} - u_{ki-1} - u_{ki+1} - 2u_{ki}\alpha = 0 \quad (4)$$

## 2 基于估值计算的扰动信号分析

当系统受到扰动时, 其式 (4) 的平衡关系式被破坏。接前分析, 设第三个采样点后的采样值含有扰动信号, 其采样点值可表示为:

$$\begin{aligned} u_{ki+2} &= A \sin(\varphi_k + 3\Delta\varphi) + s(t_0) \\ u_{ki+3} &= A \sin(\varphi_k + 4\Delta\varphi) + s(t_1) \end{aligned} \quad (5)$$

式中:  $s(t_0), s(t_1)$  分别为扰动信号开始时的两个采样点值。以采样值估算方法, 结合扰动前的式 (2) 采样数据, 分别将式 (5) 的两个扰动采样数据代入式 (4), 有:

$$\begin{aligned} 2u_{ki+1} - u_{ki} - u_{ki+2} - 2u_{ki+1}\alpha &= -s(t_0) \\ 2u_{ki+2} - u_{ki+1} - u_{ki+3} - 2u_{ki+2}\alpha &= \\ 2s(t_0) - s(t_1) - 2s(t_0)\alpha & \end{aligned} \quad (6)$$

通过式 (6) 的分析可知, 当采样信号遇到干扰时, 可方便地提取其首值及其与第 2 个干扰点信号的综合值, 据此可以对扰动信号的起点进行识别, 同样当扰动结束时也可采用反推估值方法 (即利用式 (4), 采用后面的两个采样数据对前面一个采样数据进行估值计算, 暂称反推法), 提取扰动信号的结束信号, 据此形成扰动结束定位脉冲的发出条件。

## 3 基于自适应阈值的扰动信号快速定位

为灵敏且可靠地判定电能质量的扰动情况, 考虑式 (6) 的实际采样值变化不可能完全理想化, 为此引入一个采样值可靠系数  $\delta$  ( $\delta > 0$ ), 并变换式 (4) 为式 (7), 令偏差为  $\xi$ , 构成一个绝对值启动条件约束式。

$$\xi = |2u_{ki+1} - u_{ki} - u_{ki+2} - 2u_{ki+1}\alpha| > \delta \quad (7)$$

当提取的扰动信号, 见式 (6) 所示, 大于  $\delta$  时, 启动条件满足, 发出启动脉冲。

对于检测设备,  $\delta$  值的大小, 直接关系到它的检测灵敏性和可靠性, 考虑固定阈值的判定其相对采样值幅值的线性度检测效果不好, 因此令  $\delta = 2u_{ki+1}\alpha + \varepsilon$ , 形成基于采样信号的自适应线性阈值判定式, 即:

$$\xi > 2k_k |u_{ki+1}| \alpha + \varepsilon \quad (8)$$

式中:  $k_k \geq 1$ , 为可靠系数;  $0 < \varepsilon < 1$ , 考虑采样信号为零的特例。

当启动记录后, 判定什么时间扰动结束, 发出一个停止定位脉冲就成为关键。基于前面的分析, 当扰动结束假定恢复到原来的状态或过度到一个新的状态时 (不超过原来标称电压波动的 0.5%, 也可由用户设定), 采用反推法, 提取结束时刻的扰动偏差值, 当该值小于式 (8) 的设定阈值时, 构成扰动结束负脉冲发出的必要条件。如果此后连续 3 点采样值与其扰动启动脉冲前的同一历史数据比较, 不超过其历史数据的 0.5% 时, 认为扰动结束, 发出定位结束脉冲。否则继续采用反推法和与历史数据比较法判定结束时刻。如果上述条件不满足, 按 IEEE 关于电磁现象与电能质量的分类中最长事件小于 10 min 计算<sup>[7]</sup>, 则一次事件最长记录 10 min 后自动结束。

## 4 仿真实验数据

设采样电压频率为 50 Hz, 最大值为 100, 每周采样为 200 点, 取  $k_k = 1$ ,  $\varepsilon = 0.01$ 。图 1~3 给出了几种典型电压扰动情况的数据仿真实验判定分析。

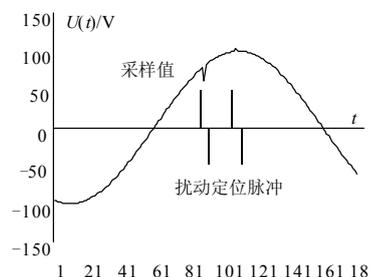


图 1 单一凹凸点扰动及定位脉冲

Fig. 1 Detection of voltage notch and swell

图 1 为电压波形中分别有单一凹凸点 (微小电压切口) 的扰动及判定情况。扰动凹点出现在第 90 个采样点, 扰动值为 60, 理想的采样值为 80.168, 启动正脉冲在第 88 点发出, 扰动结束负脉冲在第

93 点；凸点发生在第 109 点，扰动值为 103，理想采样值为 99.911，扰动幅度为 3.09%，启动正脉冲在第 107 点发出，扰动结束脉冲在第 112 点发出。

图 2 为发生电压连续凹陷扰动时的波形，在波形过零点附近的第 296 个采样点发生扰动，幅值降低到原幅值的 60%，第一个扰动点值由原来的 -38.72 降到 -23.23，扰动过程持续到 579 个采样点结束，持续时间 38.2 ms。扰动记录启动正脉冲在第 294 个采样点时发出，扰动结束负脉冲在 681 个采样点时发出。对采样信号过零中断时，相当于在原信号上叠加了一个反方向扰动信号，同样能准确识别，不再列图。

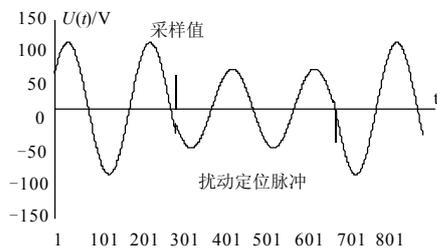


图 2 电压凹陷扰动及定位脉冲

Fig.2 Detection of voltage sag and position pulse

图 3 为周期性陷波扰动及信号过零点扰动波形及定位脉冲。采样信号在 97 点产生扰动，由理想的 -41.58 降为 -22.21，幅值下降 50%，持续 4 个采样点 (0.4 ms) 时间，启动脉冲在 95 点发出，停止脉冲在 103 点发出，297 点与 97 点一样，产生周期性扰动。而在信号过零点后 384 点又产生一个扰动，幅值升到原基波幅值的 130%，第一个扰动点由 2.039 升为 2.65，扰动时间持续 11 个采样点，其启动脉冲在 382 点，停止脉冲在 397 点，同前一样，提前 2 个启动，滞后 3 个结束。同时还分别进行了在采样信号最大值附近和过零点时叠加占基波幅值 1.5% 的三次谐波从零加入的平滑干扰实验，因波形畸变很小，难以清晰看出，故不在列出。

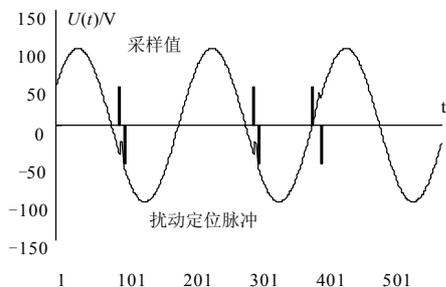


图 3 周期性陷波及定位脉冲

Fig. 3 Detection of periodic notches and position pulse

对于理想电网（标准基波运行），当每周采样

200 点时，相对识别精度可达 0.1% ( $2\alpha < 0.1\%$ )，即只要扰动值大于其理想采样真实值的 0.1%，就可准确识别，但过高的灵敏度也不是好事，当电网质量不高，系统本身含有谐波运行，而要检测其他扰动时，会因谐波的干扰而引起启动。此种情况下可加大可靠系数，满足质量不高电网的扰动检测。图 4 给出了此种情况下，采样点为每周波 100 点的 RTDS 实验故障录波图及分析判定情况。采样数据见表 1 所示，5 次谐波占 1%，9 次谐波占 0.5%，其他次谐波较小。考虑采样点为 100 时， $2\alpha < 0.4\%$ ，取  $k_k = 5$ ， $\varepsilon = 0.01$ 。

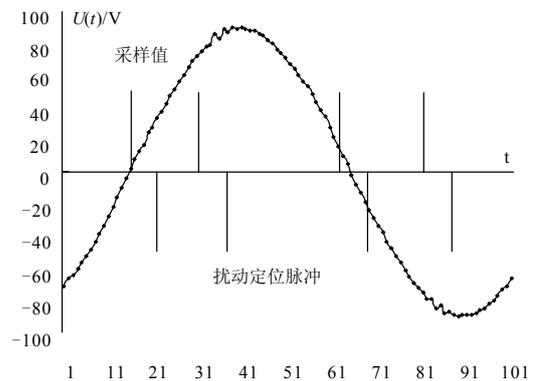


图 4 RTDS 试验波形及定位脉冲

Fig.4 Detection of RTDS experimentation and position pulse

表 1 RTDS 试验一周波数据（按列读取）

Tab.1 Data of RTDS experimentation				
-71.641	28.18	89.698	27.967	-72.343
-66.696	33.774	89.358	22.246	-75.576
-64.761	37.942	88.517	16.153	-78.755
-59.901	43.046	87.784	10.358	-79.606
-56.743	47.417	85.891	4.456	-85.232
-52.777	51.851	84.721	-1.85	-83.573
-48.193	56.498	82.243	-7.486	-88.294
-43.631	60.55	79.968	-12.452	-87.443
-38.165	64.921	76.714	-18.854	-89.336
-33.837	68.813	73.832	-23.607	-89.825
-27.51	72.162	71.482	-28.829	-89.528
-22.055	75.491	67.122	-33.71	-89.602
-15.781	78.681	64.772	-38.027	-88.666
-10.219	79.372	60.476	-43.461	-87.975
-4.296	85.742	56.743	-47.332	-85.997
1.808	83.434	53.234	-52.224	-84.806
7.54	88.73	48.321	-56.647	-82.328
12.973	87.411	44.025	-60.975	-79.925
17.291	89.655	38.357	-65.229	-76.767
24.618	89.56	34.178	-69.025	-73.47

从图 4 中可明显地看出, 在正负定位脉冲之间采样信号的不光滑点。

上述方法的扰动过程判定, 提前两个采样点启动记录脉冲, 滞后扰动结束三个采样点发出结束脉冲, 完成对扰动过程的全记录。采用该方法应注意, 程序初始化设定在脉冲停止状态, 只有在停止状态下才能发启动脉冲, 同样在启动状态下才能发停止复位脉冲, 否则在扰动持续过程中会引起重复启动或复位。

基于采样值估算的扰动信号自适应阈值判定方法其扰动信号的识别精度与其每周采样点数密切相关, 当每周采样 200 点时, 相对高质量电网, 识别精度可达 0.1%, 即只要扰动值大于其理想采样真实值的 0.1%, 就可准确识别, 采样频率越高, 检测精度越高。对于低采样频率或含有谐波运行的电网检测, 可适当放大可靠系数, 降低识别精度来检测其扰动情况。

## 5 结语

本文提出的基于采样值估算的电能质量扰动检测定位方法简单、迅捷、线性度好, 占用资源少, 可满足实际工程使用中不同检测设备精度的要求, 同时利用该文所述方法也可对单一扰动点数据进行移除并修正而提高其算法计算精度。

## 参考文献

- [1] 李天云, 陈晓东, 赵为红, 等. 几种短时电能质量扰动分类和检测的双小波分析法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (11): 26-30.  
LI Tian-yun, CHEN Xiao-dong, ZHAO Wei-hong, et al. Double Wavelet Measurements and Classification of Short Duration Power Quality Disturbances[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (11): 26-30.
- [11] 涂春明, 罗安, 汤赐, 等. 注入式混合型有源电力滤波器的控制算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (24): 52-57.  
TU Chun-ming, LUO An, TANG Ci, et al. Control of Injection Type Hybrid Active Power Filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(24): 52-57.
- [12] 赵为, 余世杰, 沈玉梁, 等. 光伏并网发电系统的控制方法[J]. 电工技术, 2002(3): 12-13.  
ZHAO Wei, YU Shi-jie, SHEN Yu-liang, et al. A Novel Control of Grid-connected Photovoltaic System[J]. Electric Technology, 2002(3):12-13(in Chinese).
- [13] Milosevic Mirjana, Allmeling Jost, Andersson Goran. Interaction Between Hysteresis Controlled Inverters Used in Distributed Generation Systems[A]. in: IEEE Power

- [2] 王晶, 束洪春, 陈学允. 检测电压瞬时脉冲扰动的小波神经网络新方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (6): 50-54.  
WANG Jing, SHU Hong-chun, CHEN Xue-yun. Surge Disturbance Detection using Wavelet-based Neural Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (6): 50-54.
- [3] Chilukuri M V, Dash P K. Multiresolution S-transform based Fuzzy Recognition System for Power Quality Events[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19 (1): 323-330.
- [4] 文继锋, 刘沛. 一种电能质量扰动的检测和分类方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (1): 42-44.  
WEN Ji-feng, LIU Pei. A Method for Detection and Classification of Power Quality Disturbances[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (1): 42-44.
- [5] 李威, 王建曠, 冉启文, 等. 一种新的电力系统暂态波形检测方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (5): 45-48.  
LI Wei, WANG Jian-ze, RAN Qi-wen, et al. A Novel Measurement Method for Power System Transient Waveforms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (5): 45-48.
- [6] 石敏, 徐袭, 吴正国. 一种简单的电能质量扰动信号检测方法[J]. 继电器, 2006, 34 (15): 68-72.  
SHI Min, XU Xi, WU Zheng-guo. A Simple Method for Detecting of Power Quality Disturbance Signal[J]. Relay, 2006, 34 (15): 68-72.
- [7] 程浩忠. 电能质量[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.  
CHENG Hao-zhong. Power Quality[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2006.

收稿日期: 2009-06-19; 修回日期: 2009-08-11

作者简介:

董继民 (1960-), 男, 工程师, 学士, 主要从事电力系统运行控制与保护的教学与研究。E-mail: jimin\_dong@163.com

(上接第 79 页 continued from page 79)

- [11] 涂春明, 罗安, 汤赐, 等. 注入式混合型有源电力滤波器的控制算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28 (24): 52-57.  
TU Chun-ming, LUO An, TANG Ci, et al. Control of Injection Type Hybrid Active Power Filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(24): 52-57.
- [12] 赵为, 余世杰, 沈玉梁, 等. 光伏并网发电系统的控制方法[J]. 电工技术, 2002(3): 12-13.  
ZHAO Wei, YU Shi-jie, SHEN Yu-liang, et al. A Novel Control of Grid-connected Photovoltaic System[J]. Electric Technology, 2002(3):12-13(in Chinese).
- [13] Milosevic Mirjana, Allmeling Jost, Andersson Goran. Interaction Between Hysteresis Controlled Inverters Used in Distributed Generation Systems[A]. in: IEEE Power Engineering Society General Meeting[C]. Colorado(USA): 2004.
- [14] 刘治, 华传健, 王耀南. 基于遗传算法的前馈-反馈模糊控制[J]. 湖南大学学报, 1999(4): 151-155.  
LIU Zhi, HUA Chuan-jian, WANG Yao-nan. Forward-feedback Fuzzy Control Based on Genetic Algorithm[J]. Journal of Hunan University, 1999(4): 151-155.

收稿日期:

作者简介:

李立 (1961-), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为电力电子技术与交直流传动、测控技术与 DSP 应用。E-mail: xu9371@126.com