

基于瞬时负荷统计特性检测电能质量扰动源

高 瑛, 杨洪耕

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 提出一种基于检测点产生的瞬时负荷统计特性快速确认扰动源的方法, 展示了该原理在谐波、电压凹陷、电压膨胀、瞬间电压降落四种扰动, 在 MATLAB 下的仿真和计算结果。结果表明在每种情况下此方法都可以对扰动源进行迅速准确的检测。同时还对每种情况计算电压与实际电压的偏离程度进行了分析, 并求出了各种情况下的电压偏离方差。最后, 根据扰动源产生原因对扰动源类型的识别进行了研究。

关键词: 扰动源; 瞬时负荷参数; 偏离方差; 电能质量

中图分类号: TM935 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2004)17-0011-05

0 引言

随着科学技术和国民经济的快速发展以及电力市场的逐步形成, 电能质量问题受到了电力部门和用户的广泛关注^[1], 扰动源定位问题已经成为该领域研究的重要课题。

电力系统扰动源的主要表现形式有: 电压凹陷、电压膨胀、瞬间电压降落等。谐波也可看成某种特殊形式的扰动源。长期以来, 国内外学者在此方面做了大量研究。文献[2]提出了一种基于临近点波形比较的方法, 但它不能检测周期性的平顶及相控负荷波形的扰动源。文献[3]介绍了另一种通过神经网络来识别扰动源的方法, 它的局限性表现在一种特定的神经网络只能检测出一种波形畸变的现象。小波变换理论的蓬勃发展为分析电能质量提供了一种强有力的工具, 文献[4]等将其用于检测波形畸变, 卓有成效。但在背景噪声下判断精度受到影响。文章[5]介绍了一种基于非线性特征识别谐波源的方法, 但仅用于识别谐波干扰。

本文基于检测点产生的瞬时负荷的统计特性对扰动源进行检测。所谓瞬时负荷的统计特性是指负荷参数在 N 个连续瞬间所表现出来的统计特征。具体地说, 它在谐波中表现为非线性特征, 在电压凹陷、电压膨胀、瞬间电压降落三种情况中表现为时变特征。

1 基本原理

电力系统参数的非线性与时变特征。

在任一系统中, 电压 u 都可以用电流 i 与时间 t

的函数表示:

$$u = f(i, t) \quad (1)$$

如果电压与电流的关系是线性的, 即从时间 t_1 到 t_2 系统参数固定, 在该时段内的任一时刻式(1)可线性表示为:

$$u = f(i, t) = \sum C_i(t) X_i \quad (2)$$

其中: X_i 是电流 i 及 i 关于时间 t 的各阶导数, $C_i(t)$ 为电流 i 的各阶导数关于时间 t 的系数, 也就是实际系统中的系统参数。

如果电压与电流的关系是非线性的, 则必然有:

$$u = f(i, t) \neq \sum C_i(t) X_i \quad (3)$$

此时, 定义偏离程度为:

$$S = f(i, t) - \sum C_i(t) X_i \quad (4)$$

如果从 t_1 到 t_2 线性系统的系统参数 $C_i(t)$ 发生变化, 则

$$u = f(i, t_1) = \sum C_i(t_2) X_i \quad (5)$$

其偏离程度也可以定义为:

$$S = f(i, t_1) - \sum C_i(t_2) X_i \quad (6)$$

同样都是偏离程度, 但式(4)与式(6)的意义各不相同。式(4)表示由系统参数非线性特征引起的差异; 式(6)表示由系统参数时变特征引起的差异。

2 数学模型

2.1 扰动源的定位

在对扰动源进行定位的时候, 本文的基本方法是模拟瞬时负荷参数 (R & L) 的特征。

在一个 RL 电路中, 瞬时电压 $v(t)$ 与瞬时电流 $i(t)$ 的关系可以表示为:

$$v(t) = R(t) i(t) + \frac{d}{dt} [L(t) i(t)] \quad (7)$$

在一个极短的时间内, R 、 L 的值可以被认为是

一个常数。则上式(7)可被改写为(8)：

$$v(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (8)$$

如果 $v(t)$ 表示某条母线的瞬时电压, 则 $i(t)$ 表示相应的支路的瞬时电流。

在三个连续的瞬间 (t_1, t_2, t_3) 上式(8)可以被改写为：

$$v(t_2) = Ri(t_2) + \frac{L[i(t_3) - i(t_1)]}{t_3 - t_1} \quad (9)$$

同样, 对接下来的三个连续瞬间有：

$$v(t_3) = Ri(t_3) + \frac{L[i(t_4) - i(t_2)]}{t_4 - t_2} \quad (10)$$

改写为矩阵形式, 得(11)：

$$\begin{bmatrix} v(t_2) \\ v(t_3) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i(t_2) & I_2 \\ i(t_3) & I_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ L \end{bmatrix}$$

or $y = [i]z$ (11)

其中: I_1 和 I_2 是一阶导数 $di(t)/dt$ 在 $t = t_1$ 和 $t = t_2$ 两个时间点的值。

对上式(11)进行矩阵的线性变换得到式(12), 可以求到 R & L 的值。

$$z = [i]^{-1}y \quad (12)$$

公式(12)在每三个连续的时间点, 可以求得一组 R & L 的值, 若对负荷一个周期 T 的 ($2n$) 个连续的时间点依次进行计算, 最终可以得到 n 个 R, L 的值。把所得到的负荷参数 (R & L 的值) 分别画在两个以时间为横轴的图上, 观察波形。如果在一段时间内表现为定常特性, 则这个支路是线性负荷 (非扰动源)。如果在图中表现为非线性或时变特征, 则这个支路有扰动源。

2.2 扰动源偏离程度分析

偏离程度的确定是建立在两个电压波形的比较上的, 其中一个为负荷本身的实际参数畸变波形, 另一个波形通过假设负荷是线性定常的 (R & L 常数), 通过计算求得其计算参数波形。比较它们之间的不同可以得到每个负荷参数的偏离程度。

假设瞬时负荷参数是线性定常的, 则

$$v_{\text{计算}}(t + \frac{t}{2}) = Ri(t + \frac{t}{2}) + L \frac{i(t + \frac{t}{2}) - i(t)}{t} \quad (13)$$

这样, 在测量支路畸变电流的瞬间 ($t + t/2$), 相应的计算电压值也可以求到。对 $2n$ 个连续的瞬间 (从 $t = t_1$ 到 $t = t_{2n}$), 可以通过各个点的瞬时电流 $i(t + t/2)$, 求到相应的计算电压 $v_{\text{计算}}(t + t/2)$ 。这样就可以得到两组波形。一组是反映扰动源

特征的实际电压, 一组是假设负荷是线性定常所求得的计算电压。那么, 通过比较某个瞬间的实际电压和计算电压的不同, 就可以知道这个瞬间的电压偏离程度。

$$S(t) = \frac{v_{\text{实际}}(t) - v_{\text{计算}}(t)}{v_{\text{实际}}(t)} \quad (14)$$

对于 $2n$ 个连续瞬间来说, 只需要用上述的公式(14)重复计算 $2n$ 次, 就可以分别求到各个时间点相应的 s 值。并且可以由这组 s 值计算负荷偏离方差 (s)。算法如下：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{2N} (S_n - \bar{S})^2}{N}} \quad (15)$$

由此还可以通过计算分段方差 s_1, s_2, s_3 来区分由非线性引起的扰动和由时变特性引起的扰动。

3 算例

3.1 谐波

谐波产生的根本原因是由于电力系统中某些设备和负荷的非线性特性, 即所加的电压与产生的电流不成线性关系造成的波形畸变^[6]。

如图1所示: $v(t), i(t)$ 分别是一个谐波支路上测得的畸变电压 $v(t)$ 和畸变电流 $i(t)$, 用上述算法分别求的其相应的瞬时负荷参数相对其平均值的比值 R 和 L , 以及对应的电压偏离程度 S 。其电压的总谐波畸变率为 $THD_v = 2.63\%$, 电压的偏离方差 $s = 0.10473$ 。可见, 谐波的偏离是由非线性特征引起的, 且与其电压畸变率有关, 而一般许多国家规定电压畸变率不超过 5% , 所以谐波的偏离方差通常都比较小。

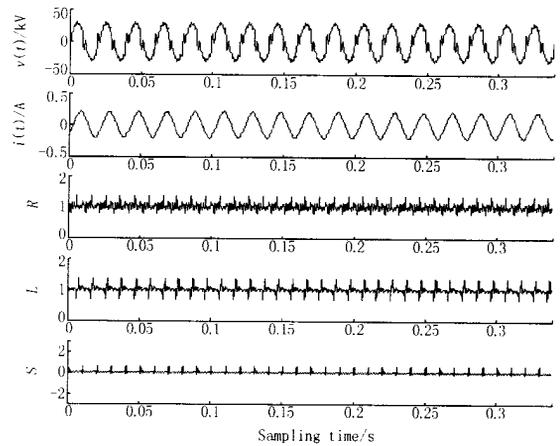


图1 谐波的分析结果

Fig.1 Result of harmonics analysis

3.2 电压凹陷

电压凹陷可看作电力系统中电压的暂时丢失。其典型特征是电压的幅值下降到原来的 10% ~ 90%, 并且持续时间较长, 在 0.5 个周期到 1 s。当瞬间短路出现或大的冲击负荷、大功率的电动机投入时, 易产生这个扰动。图 2 是一个电压凹陷的事例, 持续时间为 3 个周期, 电压幅值下降了 20%。

在 MATLAB 下的仿真图如下:

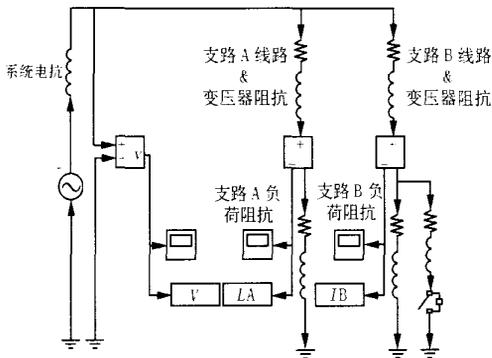


图 2 电压凹陷在 MATLAB 下的仿真图

Fig.2 Simulation diagram of voltage sag in MATLAB

假设在一条母线上, 支路 A 是发生电压凹陷扰动的支路, 支路 B 是没有扰动的支路。在 MATLAB 中的做仿真取仿真时间为 1.5 s, 扰动时间为最长的 1 s, 进行仿真以后可以分别得到支路 A 和 B 的电压、电流的波形和在各个连续时间点的值。

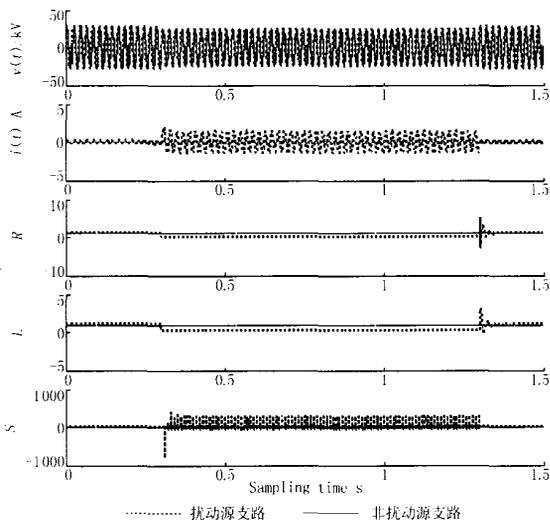


图 3 电压凹陷的分析结果

图 3 Result of voltage sag analysis

用上文所述的方法计算 A、B 各支路的瞬时负荷电阻和电感, 以出现次数最多的那个值为基准, 计算每一时刻的相对负荷电阻和电感, 分别记为: R 、

L 。并计算相应的电压偏离程度 S , 电压偏离方差 s 。由计算可得: 支路 A 的电压偏离方差 $s_A = 33.274$, 支路 B 的电压偏离方差 $s_B = 0.031027$ 。

由图 3 可见, 支路 A 上的计算电阻 R 和计算电感 L 波形变化明显比支路 B 要剧烈的多, 根据电力系统参数的非线性与时变特征, 可以判定扰动源应该发生在支路 A 上。同时由图 3 可知, 支路 A 的参数的偏离程度明显大于支路 B 的参数偏离程度。与此同时, 由于该扰动偏离是由时变特性引起的, 所以其偏离方差较大。

当然在真实的电力系统中, 没有一种负荷的参数是完全恒定的常数。所以认为瞬时负荷参数具有明显非线性或时变特征的支路有扰动源。

3.3 电压膨胀

与电压凹陷相反, 电压膨胀是指电压幅值暂时变大。在单相短路时, 非故障相容易出现这种情况。

电压膨胀的仿真模型与电压凹陷的仿真模型基本一致, 只需改动部分参数的设置即可。

图 4 给出了电压膨胀的波形和分析结果。电压膨胀与电压凹陷的唯一不同就在于电压的幅值变换的方向, 分析的结果与电压凹陷的相同, 这里就不重复了。其中, 支路 A 的偏离方差 $s_A = 1.3319$; 支路 B 的偏离方差 $s_B = 0.0060671$ 。

由图 4, 显然支路 A 上瞬时负荷参数的变化明显大于支路 B, 同样可以判定扰动源在支路 A 上。与由电压偏离方差的判断结果一致。

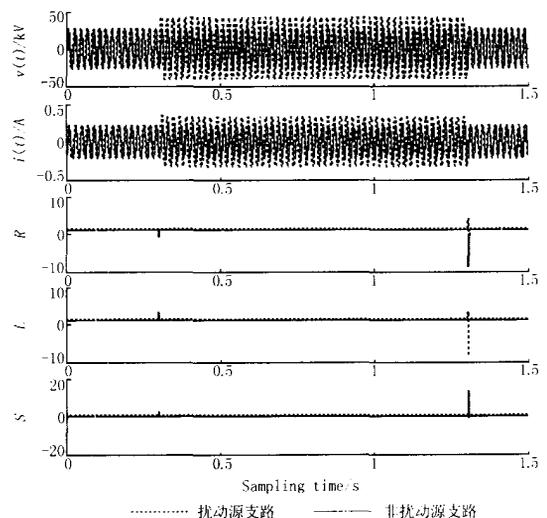


图 4 电压膨胀的分析结果

图 4 Result of voltage swell analysis

3.4 瞬间电压降落

瞬间电压降落是指电压在很短的时间里下降又

回升。

其仿真模型和分析均与上两例类似。但是此例中引入了噪声干扰。仿真和计算结果如下：

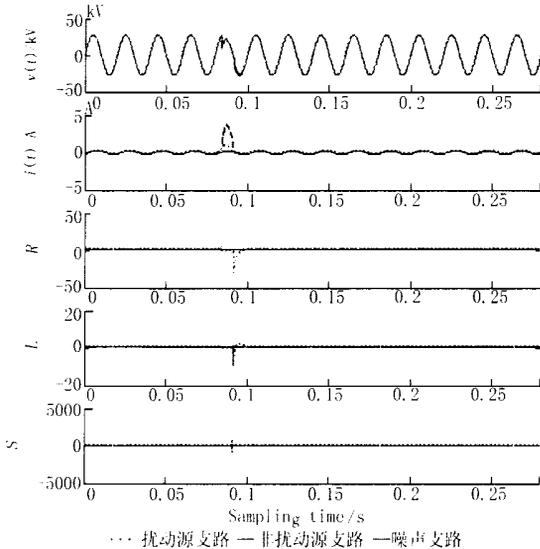


图5 瞬间电压下降的分析结果

Fig. 5 Result of short-time transform of voltage dip

计算可得:支路 A 的偏离方差 $s_A = 12.774$ 。支路 B 的偏离方差 $s_B = 0.18303$ 。噪声支路 C 的偏离方差 $s_C = 44.593$ 。

由图 5 可见,支路 A 上瞬时负荷参数的变化也明显大于支路 B,所以可以判定扰动源在支路 A 上。同时由图 5 可知,支路 C 的电压偏离程度明显比支路 A 大,而且支路 A 的电压的偏离程度明显比支路 B 大。由这个结论可以再次确定扰动源发生在支路 A 上,并且支路 C 上的噪声不对扰动源的定位产生干扰。

4 分析

4.1 扰动源类型的识别

由上面四种情况的扰动源分析可以看到:不同类型的扰动源,其瞬时负荷参数(R & L)和电压偏离程度的波形特征是不同的。

为了方便分析,将各种扰动情况下的偏离程度波形局部放大并进行比较,如图 6 所示。

由图 6 可见:谐波扰动的瞬时负荷参数和偏离程度波形在整个横轴上产生波动(非线性特征)。而其它三种扰动只发生在扰动出现的那段时间(时变特征)。其中电压凹陷扰动的瞬时负荷参数特征是在扰动发生时段内计算电阻 R 和电感 L 的数值有明显下降,电压偏离程度 S 波形波动严重。这是由

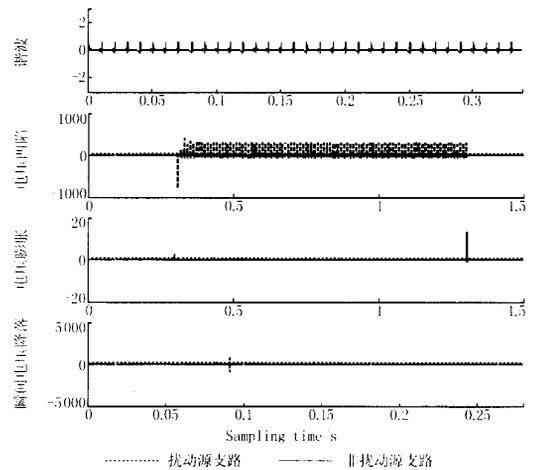


图6 各种扰动源的偏离程度比较

Fig. 6 Comparison of the degree of every disturbance source

其时变特性和扰动发生的原因引起的。而在电压膨胀扰动中瞬时负荷参数 R 和 L 及偏离程度波形只在开始和结束处有明显变化,偏离程度较小。这也是由时变特性和扰动原因(三相中的一相部分短路,所以引起的扰动程度较电压凹陷小)引起的。最后,瞬时电压下降的瞬时负荷参数波形表现为一个向下的尖角,偏离程度波形也只在扰动发生处有明显波动。这也与其时变特性非常吻合。

由上面这些特征,当测量出各支路电压、电流,对扰动源定位的同时,还可以对扰动源的类型进行识别。

4.2 扰动源产生原因的区分

扰动源,按其产生的原因可以分为两类:一种是由非线性特征引起的扰动(如:谐波等);一种是由时变特性引起的扰动(如:电压凹陷等)。

区分这两类扰动可以借助分段方差来实现。即将一个大于最长扰动持续时间的采样区间平均分为三段,分别求出这三段相对与整个采样区间的方差。如果这段时间内有由时变特性引起的扰动发生,则这三个分段方差必有一个的值明显大于或小于另外两个,并且这三个分段方差与偏离方差的值有明显差别。

下面以一个同时发生谐波和电压凹陷的扰动为例。将前面电压凹陷的算例中引入谐波,在 MATLAB 下取仿真时间为 1.5 s,扰动时间为最长的 1 s,进行仿真。结果如下图 7 所示。

同样计算 A、B 各支路的瞬时负荷电阻和电抗与其平均值的比值 R/L ,以及对应的偏离程度 S ,偏离方差 s 和分段方差。由计算可得:支路 A 的负荷

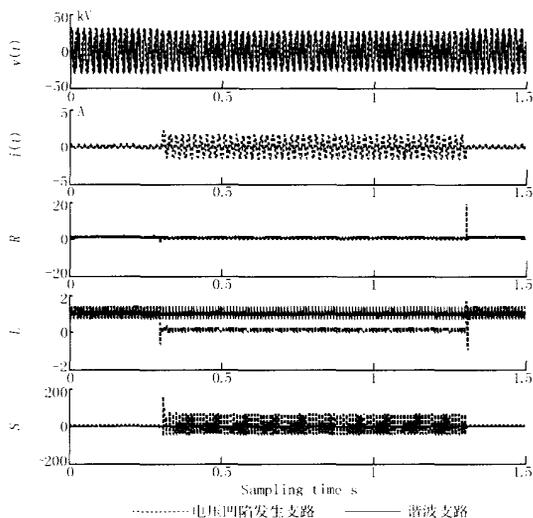


图7 电压凹陷在谐波背景下的分析结果

Fig.7 Result of voltage sag under the influence of harmonics

偏离方差 $s_A = 12.126$; 支路B的负荷偏离方差 $s_B = 0.10302$ 。支路A的分段方差: $s_{A1} = 10.317$, $s_{A2} = 15.207$, $s_{A3} = 10.854$; 支路B的分段方差: $s_{B1} = 0.10303$, $s_{B2} = 0.10302$, $s_{B3} = 0.10302$ 。可见,支路A的第二段方差明显大于第一、第三段,且这三个分段方差明显与偏离方差大小不同;而支路B的分段方差近似相等,且与偏离方差的大小也接近。由此可以判定支路A上有由时变特性引起的扰动(电压凹陷)发生。而支路B没有。

5 结论

提出了一种检测电能质量扰动源的新方法,即在检测点电压对电流的瞬时负荷特征的统计特性基础上检测电力系统扰动源。对算例的分析表明,这

种方法可以很好地对噪声情况下的电能质量的各种扰动源进行检测和识别。

参考文献:

- [1] Dugan R C, McGranaghan M F, Beaty H W. Electrical Power Systems Quality[M]. New York: McGraw Hill, 1996.
- [2] McEachern A. Handbook of Power Signatures[M]. Foster City (CA), 1998.
- [3] Kandil N, Sood V K, Khorasani K, et al. Fault Identification in an AC/DC Transmission System Using Neural Networks [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(2).
- [4] 徐永海,肖湘宁,杨以涵,等(XU Yonghai, XIAO Xiangning, YANG Yihan, et al).小波变换在电能质量分析中的应用(Application of Wavelet Transform in Power Quality Analysis) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems), 1999, 23(23): 55-58.
- [5] Ahmed A M, Abdel MM, Mahmoud A E. Separation of Customer and Supply Harmonics in Electrical Power Distribution Systems[A]. Ninth International Conference on Quality of Power Proceedings. Orlando (FL): 2000.
- [6] 林海雪,孙树勤(LIN Hair-xue, SUN Shu-qin). 电力网中的谐波(Harmonics in Power System) [M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press), 1998.

收稿日期: 2003-11-10; 修回日期: 2004-06-22

作者简介:

高瑛(1980-),女,硕士研究生,研究方向为电能质量监测与信号处理技术; Email: cindygy-scu@yahoo.com.cn

杨洪耕(1949-),男,教授,长期从事电能质量与谐波的研究工作。

Detection of power quality disturbance based on statistical characteristics of instantaneous load

GAO Ying, YANG Hong-geng

(Electrical and Information College, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: This paper provides a new method for fast qualitatively detecting the disturbance sources, which is based on their statistical instantaneous characteristics. There are four examples imitated under MATLAB including harmonics, voltage sag, voltage swell, shorttime transform of voltage dip. The results indicate that this new method can detect the disturbance sources accurately. This paper also analyses the disturbed degree of voltage of every disturbance sources and their disturbed deviation and the methods to identify every kind of disturbance sources and classify their causes.

This program is supported by National Natural Science Foundation of China(No. 5017702)

Key words: disturbance source; instantaneous load parameter; disturbed deviation; power quality