

基于曲线拟合法的定制 电力设备快速检测算法

刘 兵¹, 阮江军¹, 罗 湘², 袁 翔³, 余世峰¹

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072;

2. 中国电力科学研究院, 北京 100085; 3. 北京超高压公司, 北京 100045)

摘要: 定制电力配套设备的运用可有效地补偿电压暂降和瞬时断电, 其研究开发过程中遇到的一大难题是: 寻求快速算法, 以便在 3 ms 以内检测出电压暂降和瞬时断电。在分析常规保护用检测算法如有效值算法、缺损电压法、辨别导数算法、三相 $d-q$ 分解法、利用单相电压延迟 60° 构造三相虚拟电压 $d-q$ 变换法和利用求导数法构造三相虚拟电压 $d-q$ 变换法的优缺点基础上, 提出了基于曲线拟合法的快速检测算法。通过研究两采样值积曲线拟合法、三采样值积曲线拟合法的优缺点, 比较曲线拟合法与前面提到的检测算法, 并比较两采样值积曲线拟合法与三采样值积曲线拟合法, 得出两采样值积曲线拟合法更适合于在定制电力配套设备中运用。基于 DSP 仿真器上编程仿真, 分析得到的各种检测算法处理电压暂降的结果波形, 证实了该观点。

关键词: 定制电力; 电压暂降; 检测算法; 导数算法; $d-q$ 分解法; 曲线拟合法

中图分类号: TM 714.2

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)09-0055-04

0 引言

传统的电能质量都是基于系统稳态而言^[1]。近几年随着大量非线性、冲击性用电设备接入电网, 加之对电能质量异常敏感的高精尖设备越来越多, 暂态电能质量倍受关注^[2-4]。

电压暂降和瞬时断电是目前最受重视的暂态电能质量问题^[5-7]。针对此类问题, 美国电科院率先提出了定制电力技术^[8]。其中的各种设备, 包括动态电压恢复器(DVR)、固态切换开关(SSTS)等, 有一个共同特点, 即迅速检测出电压波形缺损, 及时启动装置。为此, 国内外学者进行了大量的研究^[9-16], 主要分为以下几方面:

- a. 基于单一特征值的有效值法、峰值法;
- b. 基于点对点(point to point)比较的波形相邻周期比较法、丢失电压(missing voltage)法;
- c. 基于数学变换的方法, 主要有傅里叶变换法、短时傅里叶变换法、小波变换法、 $\alpha\beta 0$ 变换法、 $dq0$ 变换法、Dyn 测度法、最小二乘法、卡尔曼滤波法等。

这里从国家电网公司重点研究项目——10 kV 定制电力配套产品研制的实际出发, 分析了目前较常用的检测算法的局限, 首次提出将曲线拟合法运用于定制电力设备检测算法中, 并在详细分析和比较中确认两采样值积曲线拟合法较适合。基于 DSP 仿真器上的编程仿真, 证实了两采样值积曲线拟合法较之其他算法的实际运用可行性。

1 常用检测算法的局限

1.1 常规有效值计算方法

根据连续周期信号有效值的定义, 电压有效值可利用时间域一个周期数字均方根运算得到:

$$U = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i^2} \quad (1)$$

为了实时检测电压有效值的骤然变化, 实际中常采用一个周期数据序列的滑动平均计算:

$$U(k) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=k-N+1}^k u_i^2} \quad (2)$$

局限性:

此方法虽然简单, 但是由于对电压波形具有明显的平滑作用, 实时性比较差; 而且只能得到电压暂降的幅值, 无法得到电压暂降的相位。

1.2 缺损电压法

缺损电压等于期望的电压瞬时值减去电压暂降后的实际电压瞬时值, 即

$$\Delta u = |u_p - u_{\text{sag}}| \quad (3)$$

$$u_p(t) = \sqrt{2} U \sin(\omega t - \varphi_a) \quad (4)$$

$$u_{\text{sag}}(t) = \sqrt{2} U_{\text{sag}} \sin(\omega t - \varphi_b) \quad (5)$$

式中 Δu 为缺损电压; u_p 为期望的电压瞬时值; u_{sag} 为电压暂降后的实际电压瞬时值。

通过判断 Δu 的大小决定是否检测出电压降到规定值以下, 是否该启动定制电力设备。

局限性:

- a. 此方法为点对点电压突变检测算法, 受采集

系统白噪影响较大,需增加判断时间,多点判断;

b. 期望电压瞬时值选取无标准,往往取前一周对应采集点数据,受频率偏移影响较大;

c. 无法检测出电压相角变化大小;

d. 最大的问题是,采集电压瞬时值呈周期变化,求出的缺损电压瞬时值也呈周期变化,往往在 0° 时无法及时检测出电压缺损、在 90° 时易误检出电压缺损。

1.3 导数算法

导数算法假设单相电压是正弦基波量,利用单相电压的导数值间接求出相电压的有效值,即假设 t_1 时刻电压为

$$u_1 = \sqrt{2} U \sin(\omega t_1 + \alpha_0) = \sqrt{2} U \sin \alpha_1 \quad (6)$$

则 t_1 时刻电压的导数为

$$u_1' / \omega = \sqrt{2} U \cos \alpha_1 \quad (7)$$

式中

$$U = \sqrt{\frac{u_1^2 + (u_1' / \omega)^2}{2}} \quad (8)$$

$$\alpha_1 = \arctan(u_1 \omega / u_1') \quad (9)$$

优点:

能快速计算出暂降后电压有效值和变化后电压相角。

局限性:

a. 求有效值时,需要开根号,求相角时需要求反正切,计算量很大;

b. 基于严格意义上的正弦基波量,对于幅值缓慢变化的电压量,会带来一定误差,且受频率偏移影响较大;

c. 求导运算方法,导致电压突变量以及谐波量引入的离散计算误差很大;

d. 两采样点相隔越近,则求导计算过程抗白噪能力越差,两采样点相隔越远,差分法求出的导数越不准。

1.4 三相电压 d - q 变换法

三相电压 d - q 变换法利用三相电压瞬时采样值,进行派克变换,求出 d 轴分量,其直流量对应三相交流电压基波分量有效值,即

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{bmatrix} \sin \omega t & \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\cos \omega t & -\cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) & -\cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

优点:

此方法物理概念清晰,原理上能够迅速求出三相平衡电压有效值。

局限性:

a. 此方法针对三相平衡量有效,很难求出三相不平衡量各相电压有效值及电压相位;

b. 派克变换后 d 轴分量的二次以上谐波引入

计算误差较大;

c. 变换公式中频率 ω 的误差具有累加性。

1.5 用单相电压延迟 60° 构造三相电压 d - q 变换法

基于配电网中三相电压不平衡情况较多,三相电压 d - q 分解法不适用,有些学者提出了利用单相电压延迟 60° 构造三相电压 d - q 变换法。

本算法利用单相电压延迟 60° 构造三相电压,再对虚拟三相电压进行派克变换,求出 d 轴分量,进而求出实际电压有效值。

构造三相虚拟电压公式如下(以正常 a 相电压为例):

$$u_a = \sqrt{2} U_a \sin \omega t$$

$$u_b = -\sqrt{2} U_a \sin \omega t + \sqrt{2} U_a \sin(\omega t - \pi/3) \quad (11)$$

$$u_c = -\sqrt{2} U_a \sin(\omega t - \pi/3)$$

接着,利用式(10)进行派克变换,求出 d 轴分量,进而求出三相交流电压基波分量有效值和相角。

优点:

原理清晰,能够实现单相电压相位和幅值的求解。

局限性:

a. 实际利用延迟 120° 电压值构造虚拟三相电压,引入三分之一周期延时;

b. 同样存在派克变换后 d 轴分量的二次以上谐波引入较大计算误差;

c. 变换公式中频率 ω 的误差具有累加性;

d. 计算量较大;

e. 更重要的是,构造本身严格假定信号工频周期性,会引入较大误差。

1.6 用求导数法构造三相虚拟电压的 d - q 变换法

此方法假设单相电压是标准的正弦基波量,利用单相电压的导数值间接求出虚拟的另外两相电压量。构造公式如下(以正常 a 相电压为例):

$$u_a = \sqrt{2} U_a \sin \omega t \quad (12)$$

$$u_a' = \sqrt{2} U_a \omega \cos \omega t \quad (13)$$

$$u_b = -\frac{u_a}{2} - \frac{\sqrt{3}}{2\omega} u_a' \quad (14)$$

$$u_c = -\frac{u_a}{2} + \frac{\sqrt{3}}{2\omega} u_a' \quad (15)$$

接着,利用式(10)进行派克变换,计算出 d 轴分量,进而求出三相交流电压基波分量有效值和相角。

优点:

a. 构造三相电压,解决了延迟 60° 带来的时间延迟;

b. 虚拟三相电压构造更简单。

局限性:

a. 构造虚拟三相电压时,一旦含有谐波或突变量,求导法将引入很大的误差;

b. 求导的方法对高频噪声有放大作用;

c. 同样存在派克变换后 d 轴分量的二次以上谐波引入较大计算误差;

- d. 变换公式中频率 ω 的误差具有累加性;
- e. 计算量较大。

2 曲线拟合法

2.1 算法介绍

2.1.1 两采样值积曲线拟合法

两采样值积曲线拟合法假设单相电压是标准的正弦基波量,利用连续两点采样值的乘积计算电压幅值和相角。

计算幅值

$$u_1 = U_m \sin \omega t_1 \quad (16)$$

$$u_2 = U_m \sin(\omega t_1 + \Delta T) \quad (17)$$

$$U_m^2 = \frac{u_1^2 + u_2^2 - 2u_1u_2 \cos \omega \Delta T}{\sin^2 \omega \Delta T} \quad (18)$$

计算相角

电压变化前连续两点:

$$u_1 = U_m \sin(\omega t_1 - 2\pi) \quad (19)$$

$$u_2 = U_m \sin[\omega(t_1 + \Delta T) - 2\pi] \quad (20)$$

电压变化后连续两点:

$$u_{h1} = U_{hm} \sin(\omega t_1 - \theta) \quad (21)$$

$$u_{h2} = U_{hm} \sin[\omega(t_1 + \Delta T) - \theta] \quad (22)$$

联立得:

$$\theta = \arcsin \frac{u_1 u_{h2} - u_2 u_{h1}}{U_m U_{hm} \sin \omega \Delta T} \quad (23)$$

优点:

原理简单,能实现单相电压相位和幅值的求解。

缺点:

- a. 计算时窗较小,会放大高次谐波信号;
- b. 由于计算时窗可能跨越信号突变前后,会出现不真实的计算结果;
- c. 处理实际波形时,标准正弦基波量的前提假设会引入一定误差。

2.1.2 三采样值积曲线拟合法

三采样值积曲线拟合法假设单相电压是标准的正弦基波量,利用3个连续等时间间距的采样值两两相乘,通过适当的组合求出采样值的幅值和相位。

计算幅值:

$$U_m^2 = \frac{u_2^2 - u_1u_3}{\sin^2 \omega \Delta T} \quad (24)$$

相角计算同式(23)。

优点:

原理简单,能实现单相电压相位和幅值的求解。

缺点:

- a. 信号突变时,由于计算时窗可能跨越信号突变前后,同样会出现不真实的计算结果;
- b. 数据窗仍较小,对高次谐波有一定放大作用;
- c. 当 u_1, u_2, u_3 相差不大时,受采集系统白噪声影响,会出现 $u^2 - u_1u_3$ 小于零的伪值,导致 U_m^2 计算失败。

2.2 曲线拟合法可行性比较分析

通过分析比较以上各种方法,可得出4个结果。

- a. 用非 $d-q$ 变化法较可行。理由:同样是利用

单相信号, $d-q$ 分解法需要构造三相虚拟电压,引入一定误差,而非 $d-q$ 分解法无此误差; $d-q$ 分解法利用派克变换, ω 的偏差会带来累积现象,而非 $d-q$ 分解法无此累积现象; $d-q$ 分解法总的计算量较非 $d-q$ 分解法大; $d-q$ 变换后,需引入二次以上高阻滤波器,平滑作用导致巨大时延,较之非 $d-q$ 算法慢。

- b. 非常规保护用检测算法较可行。理由:缺电压法理论上无法克服误动和拒动现象;常规有效值算法无法克服平滑延时。

- c. 曲线拟合法较导数算法可行。理由:求导法会严重放大白噪声干扰,且会更严重放大谐波干扰。

- d. 两采样值积曲线拟合法较三采样值积曲线拟合法可行。理由:三采样值积曲线拟合法较两采样值积曲线拟合法,跨越突变量前后的时间更长,虚假计算值更多;三采样值积曲线拟合法由于白噪造成 $u_2^2 < u_1u_3$, 开根号会计算出 U_m 虚假值,导致计算器溢出;对于同次谐波,两采样值积曲线拟合法引入的误差较三采样值积曲线拟合法大,但相差不多。

3 仿真

为了验证2.2节中探讨的正确性,在闻庭公司的TDS2407EA上进行了仿真。仿真条件如下:

模拟量为单相电压量,连续采集2个周期,频率50.5 Hz,第1个周期电压幅值141 V,第2个周期电压幅值100 V,第1个周期结束时相角突变 28.125° ($5/64 \times 360^\circ$)。

仿真结果如图1~5所示。

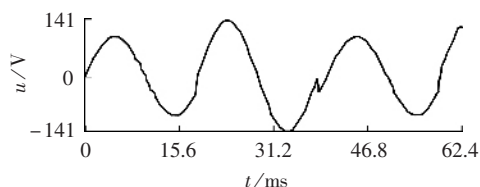


图1 单相电压波形

Fig.1 Waveform of single-phase voltage

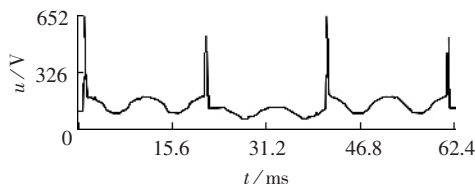


图2 求导算法仿真结果波形

Fig.2 Simulative waveform of derivative detection algorithm

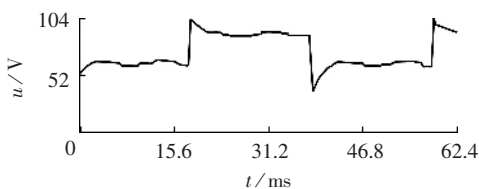


图3 求导数构造三相虚拟电压 $d-q$ 分解法仿真结果波形

Fig.3 Simulative waveform of derivative dummy three-phase $d-q$ transform algorithm

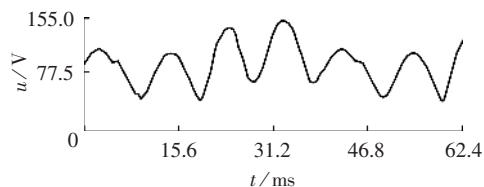


图 4 单相电压延迟 60°构造虚拟电压 $d-q$ 分解法仿真结果波形

Fig.4 Simulative waveform of 60-degree-delay dummy three-phase $d-q$ transform algorithm

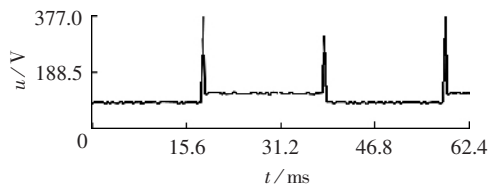


图 5 两采样值积曲线拟合法仿真结果波形

Fig.5 Simulative waveform of two-point curve fitting algorithm

如第 2 节中所述原因,由于出现计算溢出现象,三采样值积曲线拟合法无法得出仿真结果波形。

4 结论

通过第 1、2 节中系统地分析各种检测算法,结合第 3 节中实际仿真,得出以下结论:

- 目前研究的各种算法各有利弊;
- 相比较而言,实际运用曲线拟合法较为可行;
- 三采样值积曲线拟合法实际计算中溢出的弊端,使其丧失了许多优势;
- 相比较而言,两采样值积曲线拟合法较适合实际运用,速度完全满足要求,但仍需改进,以期更好地克服谐波干扰。

参考文献:

- [1] ARNOLD R. Solutions to the power quality problem [J]. Power Engineering Journal, 2001, 15(2): 65-73.
- [2] BARROS J, DIEGO R I. Discussion of sensitivity of personal computers to voltage sags and short interruptions [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(1): 543-544.
- [3] MILANOVIC J V, GUPTA C P. Probabilistic assessment of financial losses due to interruptions and voltage sags. Part I: the methodology [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(2): 925-932.
- [4] 林海雪. 现代电能质量的基本问题 [J]. 电网技术, 2001, 25(10): 5-12.
LIN Hai-xue. Main problems of modern power quality [J]. Power System Technology, 2001, 25(10): 5-12.
- [5] VILATHGAMUWA D, WIJEKOON H M, CHOI S S. A novel technique to compensate voltage sags in multilane distribution system—the interline dynamic voltage restorer [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1603-1611.
- [6] ADAMS R A, MIDDLE K S W, CAMN E H. Solving customer power quality problems due to voltage magnification practicality [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 1515-1520.
- [7] 林海雪. 电力系统中电压暂降和短时断电 [J]. 供用电, 2002,

19(1): 9-13.

LIN Hai-xue. Voltage sag and short-time power cut in power system [J]. Distribution & Utilization, 2002, 19(1): 9-13.

- [8] MIDDLEKAUFF S W, JR C E R. System and customer impact: considerations for series custom power devices [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(1): 278-282.
- [9] FITZER C, BARNES M, GREEN P. Voltage sag detection technique for a dynamic voltage restorer [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40(1): 203-212.
- [10] MONTERO-HERNANDEZ O C, ENJETI P N. A fast detection algorithm suitable for mitigation of numerous power quality disturbances [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(6): 1684-1690.
- [11] LEE S J, KIM H. A novel control algorithm for static series compensators by use of PQR instantaneous power theory [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(3): 814-827.
- [12] 徐永海, 肖湘宁, 杨以涵. 基于 dq 变换和 ANN 的电能质量扰动辨识 [J]. 电力系统自动化, 2001, 25(14): 24-27.
XU Yong-hai, XIAO Xiang-ning, YANG Yi-han. Power quality detection on dq transform and ANN [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(14): 24-27.
- [13] 肖湘宁, 徐永海, 刘昊. 电压凹陷特征量检测算法研究 [J]. 电力自动化设备, 2002, 22(1): 19-22.
XIAO Xiang-ning, XU Yong-hai, LIU Hao. Research on the detection method of voltage sag characteristics [J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(1): 19-22.
- [14] 赵国亮, 刘宝志, 肖湘宁, 等. 一种无时延的改进 $d-q$ 变换在动态电压扰动识别中的应用 [J]. 电网技术, 2004, 28(7): 53-57.
ZHAO Guo-liang, LIU Bao-zhi, XIAO Xiang-ning, et al. Application of improved $d-q$ transform without time delay in dynamic voltage disturbance identification [J]. Power System Technology, 2004, 28(7): 53-57.
- [15] 刘应梅, 白晓民, 王文平. 基于 Dyn 测度的电压暂降检测方法 [J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 45-49.
LIU Ying-mei, BAI Xiao-min, WANG Wen-ping. A dynamics-based method for voltage sags detection [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(2): 45-49.
- [16] 周晖, 齐智平. 动态电压恢复器检测算法和补偿策略综述 [J]. 电网技术, 2006, 30(6): 23-29.
ZHOU Hui, QI Zhi-ping. A survey on detection algorithm and restoring strategy of dynamic voltage restorer [J]. Power System Technology, 2006, 30(6): 23-29.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

刘 兵 (1976-), 男, 湖北武汉人, 工程师, 博士研究生, 主要研究方向为电能质量和信号处理 (E-mail: liubing76118@126.com);

阮江军 (1968-), 男, 浙江上虞人, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电磁分析与检测、用户电力技术 (E-mail: Ruan308@126.com);

罗 湘 (1980-), 男, 湖南长沙人, 工程师, 硕士, 研究方向为电力电子装置的控制和保护;

袁 翔 (1979-), 男, 湖北孝感人, 工程师, 硕士, 研究方向为信号处理、传输技术及应用;

余世峰 (1982-), 男, 湖北枣阳人, 博士研究生, 研究方向为电能质量相关方面。

(下转第 82 页 continued on page 82)

Fast detection algorithm based on curve fitting algorithm for custom power device

LIU Bing¹, RUAN Jiang-jun¹, LUO Xiang², YUAN Xiang³, YU Shi-feng¹

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China;

3. Beijing Extra High Voltage Power Company, Beijing 100045, China)

Abstract: The key technique in the development of power custom devices, which can effectively compensate voltage sags and short interruptions, is the quick detection of voltage sags and short interruptions in 3 ms. Based on the study of different detection algorithms used in protects, such as virtual value algorithm, imperfect voltage algorithm, derivative algorithm, three phase $d-q$ decomposition algorithm, 60-degree-delay dummy three phase $d-q$ transform algorithm and differentiate dummy three phase $d-q$ transform algorithm, a fast detection algorithm is presented based on curve fitting. Both two-point curve fitting algorithm and three-point curve fitting algorithm are researched. After comparing all these detection algorithms, it is concluded that, the two-point curve fitting algorithm is the most practical for power custom devices. Simulation of voltage sag processing by different algorithms on DSP proves the conclusion.

Key words: power custom; voltage sag; detection algorithm; derivative algorithm; $d-q$ transform algorithm; curve fitting algorithm