

DOI: 10.13382/j.jemi.2017.06.020

一种适用于单相电压的改进电压暂降检测算法

许伟梁¹ 施火泉¹ 童庆国²

(1 江南大学物联网工程学院 无锡 214122; 2 浙江盾安机电科技有限公司 诸暨 311835)

摘要:针对目前电压暂降检测方法存在的精确性低、实时性较差的缺点,提出了一种基于改进 dq 变换与顺序形态滤波器相结合的暂降检测新方法。研究论述了改进 dq 变换用于电压暂降检测的算法基本原理,介绍了顺序形态学概念,并由此基础设计了形态学滤波器,同时阐述了滤波器参数的选取方法。通过设置不同的信噪比与超前角度,仿真论证了新方法在理想条件和非理想条件下的暂降检测效果,并与传统方法进行了比较和分析。证明了新方法可以更高效精确地检测到暂降的特征值和起止时间。

关键词:电压暂降; dq 变换; 顺序形态; 幅值相位

中图分类号: TN702 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4031

Improved voltage sag detection algorithm for single phase voltage

Xu Weiliang¹ Shi Huoquan¹ Tong Qingguo²

(1 School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;

2 Zhejiang DunAn Electromechanical Technology Co. Ltd., Zhuji 311835, China)

Abstract: Aiming at the shortcoming of low accuracy and poor real-time performance of voltage sag detection method, a new method based on improved dq transform and sequential morphological filter is proposed. Basic principle of improved dq transform for voltage sag detection algorithm is researched, the concept of order morphology is introduced. And thus, the morphological filter is designed, and the method of selecting filter parameter is expounded. By setting different signal noise ratio and leading angle, the simulation results show that the new method can detect the sag under ideal condition and non-ideal condition. It is proved that the new method can detect the eigenvalues and the stopping time of the sag more efficiently and accurately.

Keywords: voltage sag; dq transform; order morphology; amplitude phase

1 引言

近些年,随着我国经济的不断发展,人们对电能的使用需求也越来越大。因此,对电能质量^[1]提出了很高的要求。而在电能质量问题中,电压暂降问题已成为当今社会中各电力系统和用电设备正常运行的最大隐患。对电压暂降进行实时检测是研究电压暂降问题最基本也是最重要的一个环节。国内外许多专家学者已经在电压暂降检测方面做了很多研究。提出了基于 S 变换、基于 p-q-r 理论、基于傅里叶变换原理、基于向量机、基于形态学的诸多电压暂降检测新方法^[2-6]。但每种方法都有其

一定的局限性和不足,故需要一些综合性的分析方法。

电压暂降,是指供电电压的均方根值在极短的时间内突然跌落到额定电压幅值的 10% ~ 90%, 其典型持续时间为 0.5T ~ 30T 的一种现象^[7]。单相 dq 变换法根据所得电压构造出 $\alpha\beta$ 静止坐标系中的分量,再将其转换到 dq 旋转坐标系中,最后通过滤波器得到暂降特征量。该方法改进了传统 dq 变换法,使其适用于单相电压系统,同时可以检测到相位变化,但增加了 90° 的延迟,使检测动态性变差,不利于实时检测。文献[8]将顺序形态方法运用到电力信号的处理中,证明了顺序形态运算在处理电力信号过程中有着独特的优势。文献[9]首次将顺序形态滤波器运用到电能质量扰动检测中,不仅减少了

扰动定位的动态响应时间,同时也提高了扰动检测的准确性。

本文在传统单相 dq 变换法的基础上,提出了一种改进 dq 变换方法,并与形态滤波器相结合。与传统方法相比,本文方法缩短了延迟时间,减少了计算量,提高了检测精度和实时性,并且在后续仿真中也验证了该方法的优越性。

2 单相 dq 变换算法

目前普遍运用基于 dq 变换原理的方法来进行电压暂降各特征值的检测。图 1 所示为 $\alpha\beta$ - dq 坐标系间的转换关系。由图 1 可知,电压矢量 U 投影在 $\alpha\beta$ 静止坐标系上的两个分量分别为 $U_\alpha = U \cos(\omega t + \varphi)$ 和 $U_\beta = U \sin(\omega t + \varphi)$ 。由于 dq 旋转坐标系相对于 $\alpha\beta$ 静止坐标系以角速度 ω 旋转,因此电压矢量 U 与 dq 旋转坐标系同步旋转。其投影在 dq 旋转坐标系上的向量分别为 $u_d = U \cos\varphi$ 和 $u_q = U \sin\varphi$ 。将 U_α 和 U_β 变换到 dq 坐标系的公式如下:

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\omega t & \sin\omega t \\ -\sin\omega t & \cos\omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: \mathbf{C} 为由 $\alpha\beta$ 坐标系变换到 dq 坐标系的算法矩阵。

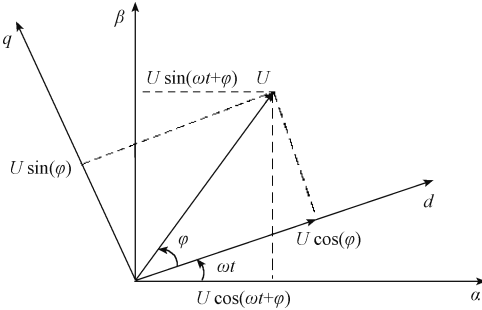


图 1 $\alpha\beta$ 坐标系和 dq 坐标系转换

Fig. 1 Transformation of $\alpha\beta$ and dq coordinate system

再用低通滤波器对电压分量 U_d 和 U_q 进行滤波,便可根据式(2)得到基波电压的幅值和相位跃变。

$$\begin{cases} U = \sqrt{U_{d0}^2 + U_{q0}^2} \\ \varphi = \arctan \frac{u_{q0}}{u_{d0}} \end{cases} \quad (2)$$

上述检测方法相比于传统 dq 变换法,该方法能够适用于单相系统,同时算法简单,容易实现,但 U_α 分量是通过 U_β 分量延迟 90° 构造获得,从而增加了 90° 检测延迟,动态响应变差,不能满足电压暂降的实时性检测。

3 改进 dq 变换算法

针对传统单相 dq 检测算法中需要延迟 90° 的缺点,

本文在原先算法的基础上加以改进,提出了一种在理论上可以消除延迟的新算法。

设所需检测的单相电压 $u = U \cos(\omega t + \varphi)$, 由传统 dq 法可知,在构造坐标系时,令:

$$u_\theta = U \cos(\omega t + \varphi + \theta) = U \cos(\omega t + \varphi) \cos\theta - U \sin(\omega t + \varphi) \sin\theta = u \cos\theta - U_\beta \sin\theta \quad (3)$$

U_α 可以通过 U_α 超前 90° 来获得,因此:

$$U_\beta = -U \cos(\omega t + \varphi + 90^\circ) = U \sin(\omega t + \varphi) \quad (4)$$

同理,设 U_α 超前的角度为 θ , 则 u_θ 为:

$$u_\theta = U \cos(\omega t + \varphi + \theta) = U \cos(\omega t + \varphi) \cos\theta - U \sin(\omega t + \varphi) \sin\theta = u \cos\theta - U_\beta \sin\theta \quad (5)$$

由式(5)可得:

$$U_\beta = \frac{u \cos\theta - u_\theta}{\sin\theta} = \frac{u}{\tan\theta} - \frac{u_\theta}{\sin\theta} \quad (6)$$

将 U_α 和 U_β 代入 dq 坐标系,由式(1)可得:

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \mathbf{C} \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\omega t & \sin\omega t \\ -\sin\omega t & \cos\omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ \frac{u \cos\theta - u_\theta}{\sin\theta} \end{bmatrix} \quad (7)$$

从而通过计算可得:

$$\begin{cases} U_d = u \cos\omega t + \frac{\sin\omega t}{\sin\theta} (u \cos\theta - u_\theta) \\ U_q = -u \sin\omega t + \frac{\cos\omega t}{\sin\theta} (u \cos\theta - u_\theta) \end{cases} \quad (8)$$

最后通过式(2)即可求出电压暂降的幅值与相位变化。

从理论的角度看,本文提出的新算法可将超前角度完全消除,从而实现暂降检测的实时性。但当 θ 过小时, $1/\sin\theta$ 会变大,从而导致 u_d 和 u_q 的最终计算结果受假设电压 u 的交流成分影响变大,故本文超前角度 θ 不能取太小。

4 顺序形态滤波算法与设计

4.1 顺序形态滤波算法

顺序形态学^[10]是由数学形态学^[11]发展而来的。顺序形态学是将数学形态学和排序统计学两者联合在一起^[12],不但包括了原有的形态运算和中值变换^[13],还新增了百分位值的全新观念。

设 $f(x, y)$ 为定义在二维离散空间 $Z^{(2)}$ 上的信号, $0 < f(x, y) < M$; 结构元素 B 为 $Z^{(2)}$ 上的有限子集, $0 < \mu(B) = k < +\infty$, $x = (x, y) \in Z^{(2)}$, $B = \{x_1, x_2, \dots, x_k\}$, $f(x, y)$ 在 B 上的 k 个值从小到大的排列顺序为 $f(x_1^*) \leq f(x_2^*) \leq \dots \leq f(x_k^*)$, 那么 $f(x, y)$ 在 B 上的 d 阶顺序量定义为:

$$\text{ord}\{d; f|B\} = {}^d f(x_d^*) \quad (9)$$

式中: $d = 1, 2, \dots, k$ 。

若式(9)成立, $f(x, y)$ 对于结构元素 B 的顺序形态变换 $f(p)B$ ($p=0, 1|(k-1), \dots, 1$) 定义为:

$$(f(p)B)(x) = \text{ord}\{ (k-1)p + 1; f| B_x \} \quad (10)$$

即 $f(x, y)$ 在 B_x ($B_x = \{x-b; b \in B\}$) 上的 $(k-1)p + 1$ 阶顺序量。令 $d = (k-1)p + 1$ 则对应于百分位 $p=0, 1|(k-1), \dots, 1, d=1, 2, \dots, k$ 。 d 称为顺序形态变换的阶数。

顺序形态变换关于离散点集在几何学上的定义是: $f(p)B$ 是 B 中至少含有 $f(x)$ 的 $k - (k-1)p$ 个点的那些 x 组成的集合。复合顺序形态变换定义为:

$$f(p, q)B = (f(p)B)(q)B \quad (11)$$

式中: $p, q=0, 1|(k-1), \dots, 1$ 。

顺序形态变换中, 百分位值 p 和阶数 d 的任意改变能够产生结构元素内许多相异的形态变换。例如, 当 p 取特殊值 1, 0 时, 对应的有 $f(1) f(0)$ 分别为数学形态学中的膨胀、腐蚀运算^[14]。

4.2 顺序形态滤波器的设计

1) 百分位值的确定

在传统的数学形态方法中, 结构元素是选择的固定一种, 实际上并不利于消除信号内的噪声。同时, 若信号中存在与基波相似波形的谐波^[15]时, 会对检测结果产生偏差。所以, 顺序形态变换中用百分位值这一新理念来代表升序排列的长度。设长度为 N 的结构元素, 那么对于任意采样点上, 都将对每个长度值作升序选取, 并依次排列, 接着在升序排列中点的周围选取 K 个值, 同时选取当中第 $(M-1) * p + 1$ 个值来替换之前的采样点。百分位值避免了传统数学形态方法中只求取临界大小值的缺点, 而是通过顺序排列选取在原信号周围与其类似的点, 从而保证信号特性的精确度。与传统形态滤波相比, 不但提高了检测的准确性, 同时也减少了计算量。

不同的百分位值选取, 可以进行不同类型的滤波变换。百分位值越大, 精确度越高, 但会加大计算量。根据实际电网信号特征, 选取百分位值为 0.5。

同时本文选用复合顺序形态变换。根据 p, q 值的相异搭配选取来达到润滑信号的目的。本文选取 $p=0.5, q=1$ 或 0。复合形态变化 $f(0.5, 1)B$ 表示先实现中值滤波再做膨胀运算, $f(0.5, 0)B$ 是对信号实现中值滤波再做腐蚀运算。

$$f_{dN} = [f(0.5, 1)B + f(0.5, 0)B] / 2 \quad (12)$$

2) 结构元素的选取

同形态运算的组合方法一样, 结构元素的大小与形状也很大程度上决定着滤波器对电压信号的处理结果。当前常使用的结构元素有直线型、曲折线型、三角形型、圆形型等。由于电力信号通常为二维信号, 因此本文滤波器的结构元素将选用直线型。

同时, 结构元素的形状会随着宽度的增加而变得复杂, 会大大增加相应的计算量。对于直线形结构元素来说, 低通能力会随着宽度的变长而增强, 防噪效果越好。综合考虑电力信号的特征与本文改进算法的原理, 本文会根据改进算法中 θ 角度的不同而选取不同结构元素长度的直线型结构元素, 并进行仿真对比分析。

5 仿真分析

5.1 无谐波电压暂降检测

为了验证本文提出的新检测方法的有效性, 在 MATLAB 中进行了相关的仿真实验。仿真中各个参数设置如下: 电压有效值为 110 V, 在 0.06 ~ 0.16 s 期间发生电压暂降, 暂降幅度为 50%, 同时伴随 50° 的相位跳变。设采样频率为 12.8 kHz, 即每周波采样 256 点, 超前角度 θ 根据不同仿真情况而定。图 2 所示为电压暂降波形。

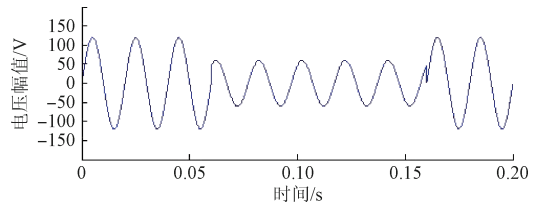
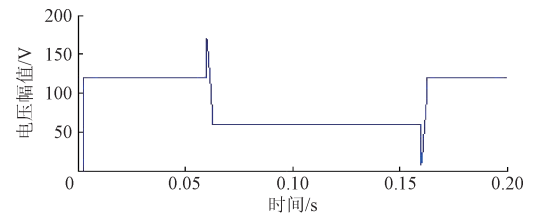


图2 理想电压暂降波形

Fig. 2 Waveform of idea voltage sag

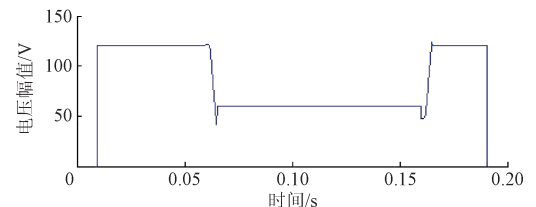
针对改进算法以及形态滤波, 对不同的超前角度以及结构元素长度做了详细的仿真实验。

仿真1: 令 θ 取 90°, 即超前 64 个采样点来构造 u_θ , 通过改进的 dq 算法来检测暂降, 幅值直接检测结果如图 3(a)



(a) 直接检测结果

(a) Direct detection result



(b) 形态运算检测结果

(b) Morphological operation detection result

图3 $\theta = 90^\circ$ 的暂降幅值检测结果

Fig. 3 Result of sig amplitude detection of $\theta = 90^\circ$

所示。对直接检测结果用长度为 65 的结构元素进行形态运算处理,所测结果如图 3(b)所示。

仿真 2:令 θ 取 11.25° ,即超前 8 个采样点来构造 u_θ ,通过改进的 dq 算法来检测暂降,幅值直接检测结果如图 4(a)所示。对直接检测结果用长度为 9 的结构元素进行形态运算处理,所测结果如图 4(b)所示。

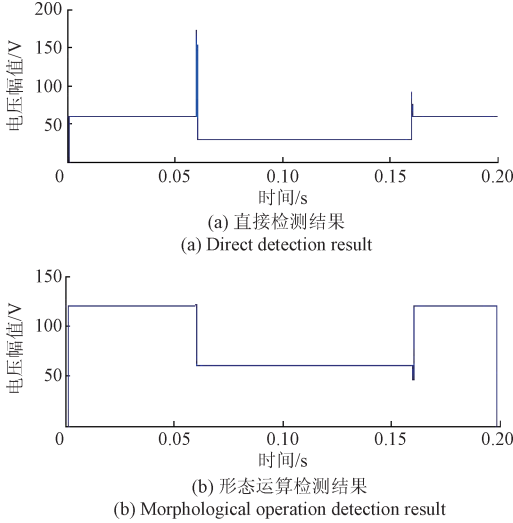


图 4 $\theta = 11.25^\circ$ 的暂降幅值检测结果

Fig. 4 Result of sig amplitude detection of $\theta = 11.25^\circ$

从仿真 1 和 2 中可以看出,直接检测结果都发生了振荡现象,同时图 4(a)中还有着明显向上的尖脉冲信号,这是由于 θ 取值较小,造成式(8)中分母 $\sin\theta$ 过小;在经过形态学算后的检测结果中,都较好的去除了检测结果中的信号振荡,准确检测出了暂降幅度。但通过比较图 3(b)与图 4(b)可以看出,前者的动态响应较差,需要经过一定的延时才能检测出暂降幅值,而后者延时较小,响应速度快。这是由于 θ 取值较小,只需延迟 1/32 个周期,而前者 θ 取 90° ,需要延迟 1/4 个周期。

表 1 不同 θ 取值的幅值检测比较

Table 1 Comparison of amplitude detection with different θ

θ	振荡现象	尖脉冲	检测延迟时间	动态响应
90°	有	无	1/4 工频周期	较好
11.25°	有	有	1/32 工频周期	好

从表 1 可以看出当 θ 取值较大时,检测过程中振荡现象较轻,但检测延迟大,动态响应差;而当 θ 取值较小时,虽然振荡现象更严重,但经形态滤波后延迟时间较少,检测实时性更好。因此合理选择 θ 的大小,对检测结果至关重要。

仿真 3:在原电压信号中加入 30 dB 的白噪声, θ 分别取为 11.25° 和 90° ,暂降幅值检测结果如图 5 所示。

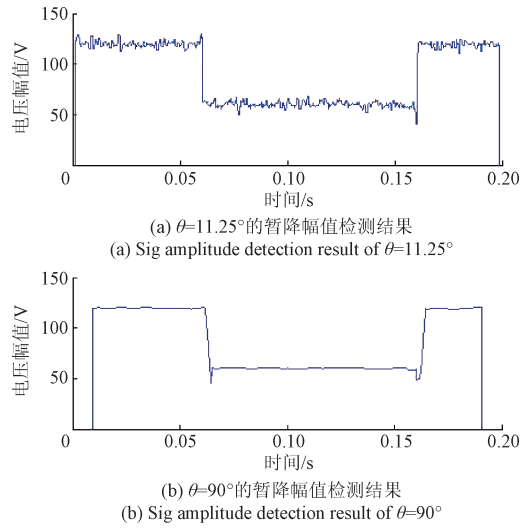


图 5 带噪声的暂降幅值检测结果

Fig. 5 Result of sig amplitude detection with noise

仿真 4:在原理想电压信号与加入 30 dB 白噪声后的信号中,令 θ 为 11.25° 时的暂降相位检测结果如图 6 所示。

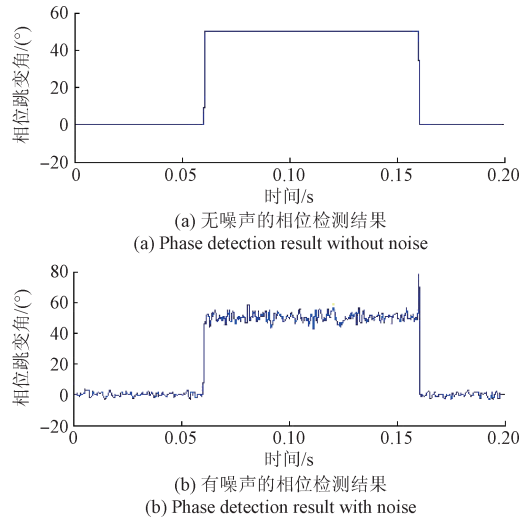


图 6 $\theta = 11.25^\circ$ 的暂降相位检测结果

Fig. 6 Result of sig phase detection of $\theta = 11.25^\circ$

从仿真 3 与仿真 4 可以看出,在加入相同分贝的高斯白噪声后, θ 取值较小时,检测结果受噪声的干扰较大。这是由于 θ 取值越小, $\sin\theta$ 也越小,由先前算法分析可知受噪声信号影响也会变得越大。同时可推测,当噪声信号信噪比越小时,其对检测结果的影响也越大。

仿真 5:继续在原信号中加入 30 dB 的噪声,取长度为 64 的结构元素进行形态学运算后的暂降幅值和相位检测结果如图 7 所示。

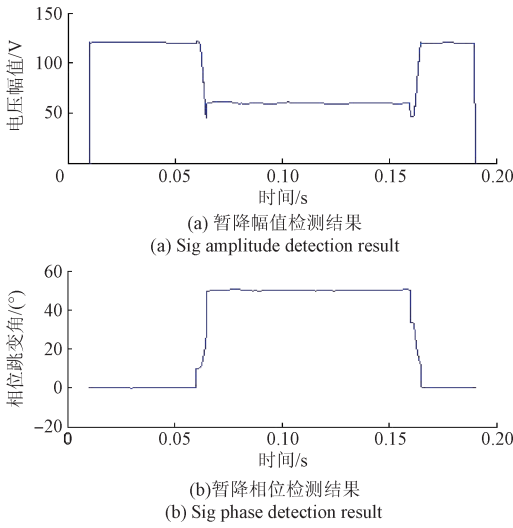


图7 形态滤波后的暂降检测结果
Fig.7 Result of sig detection after morphological filter

5.2 有谐波电压暂降检测

一般情况下电力系统中电压信号内会含有多次谐波,在完成电压暂降的检测后,需要对信号进行低通滤波。传统方法中通常是用 Butterworth 滤波器^[16]来进行滤波。图8所示为 Butterworth 低通滤波器的形状。本文设计了一种新的顺序形态滤波器,并将检测结果与传统的 Butterworth 滤波器进行了对比。

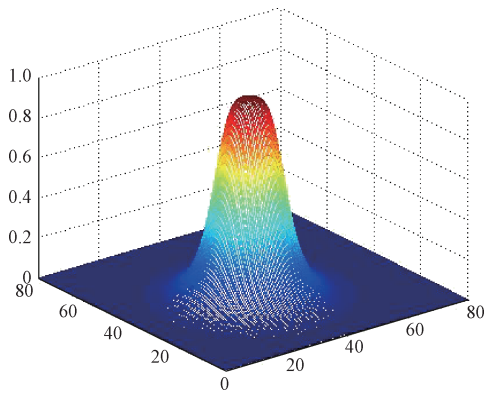


图8 Butterworth 低通滤波器形状
Fig.8 Butterworth low-pass filter shape

在电压信号中加入含量分别为3%、2%、3%的3、5、7次谐波,其他信号参数都与上文理想状态时一样,图9所示为含有多次谐波时的电压暂降波形图。

分别采用 Butterworth 滤波器与形态滤波器检测含有谐波的暂降信号,所得幅值和相位的检测结果分别如图10和11所示。

从图10和11可以看出,采用 Butterworth 滤波器和形态滤波器都能够测得电压暂降发生时的幅值变化和相位跳变。但可以明显看出,采用形态滤波器精确性高,延

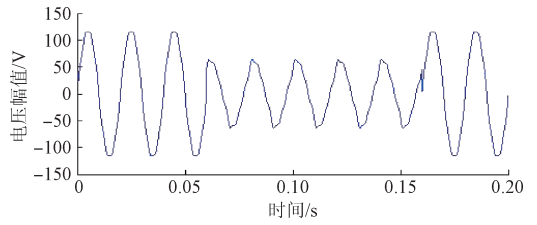


图9 含谐波的电压暂降波形

Fig.9 Waveform of voltage sag with harmonics

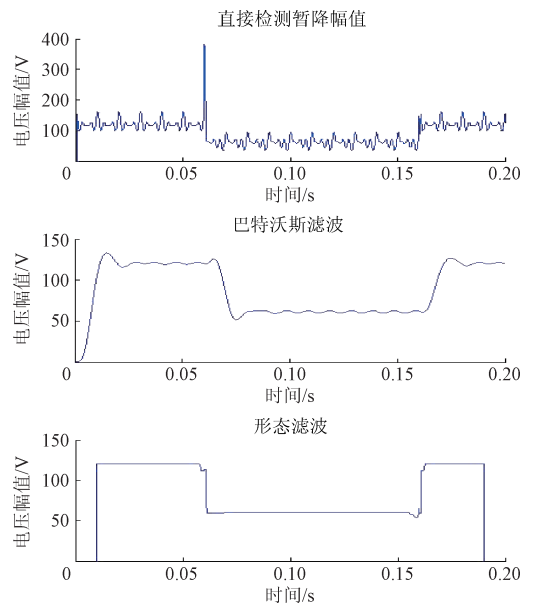


图10 使用 Butterworth 和形态滤波器的暂降幅值检测比较
Fig.10 Comparison of sig amplitude detection between Butterworth and morphological filters

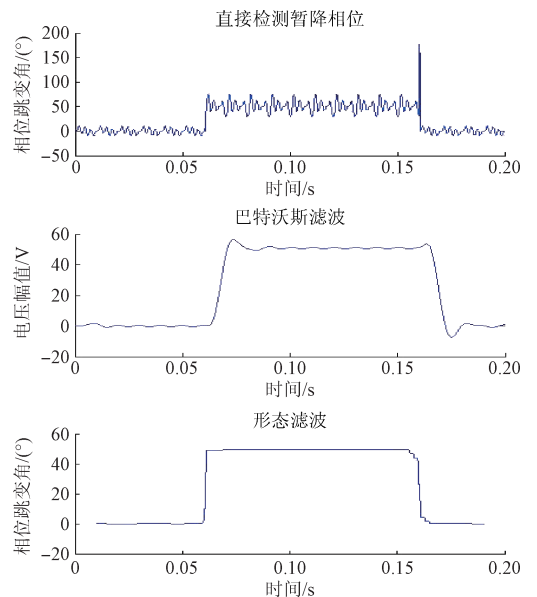


图11 使用 Butterworth 和形态滤波器的暂降相位检测比较
Fig.11 Comparison of sig phase detection between Butterworth and morphological filters

迟时间短;而 Butterworth 滤波器则延迟时间较长,检测精确性较低。两种滤波器暂降起止时刻检测比较如表 2 所示。

表 2 两种滤波器暂降起止时刻检测比较
Table 2 Comparison of sigs start-and-end time detection of two filters

时间	理论值	Butterworth 滤波		本文形态滤波	
		检测值	误差	检测值	误差
开始时间	0.060	0.067	0.007	0.061	0.001
结束时间	0.160	0.171	0.011	0.162	0.002

6 结 论

本文在传统 dq 变换法的基础上,提出了一种新的改进 dq 变换方法。理论上将传统方法中需延时 90° 缩短为可以任意小的角度。同时将新方法 with 顺序形态学相结合,所构造的形态滤波器在滤波效果上要优于传统低通滤波器。两者的综合应用,提高了电压暂降检测的精确性,加快了响应时间,对暂降电压后续的补偿有很大的实际价值与意义。

参考文献

- [1] 桑博,刘洪文,尹志勇. 单一电能质量扰动的分类识别研究[J]. 国外电子测量技术,2016,35(7):56-59.
SANG B, LIU H W, YIN ZH Y. Classification and identification of single power quality disturbances [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2016, 35(7):56-59.
- [2] 徐方维,刘亚梅,杨洪耕,等. 基于改进 S 变换的电压暂降识别[J]. 电力系统保护与控制,2013,41(17):19-24.
XU F W, LIU Y M, YANG H G, et al. Identification of voltage sag based on improved S transform [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17):19-24.
- [3] 谭智力,李勋,陈坚. 基于简化 p-q-r 理论的统一电能质量调节器控制策略[J]. 中国电机工程学报,2007,27(36):85-91.
TAN ZH L, LI X, CHEN J. Control strategy of unified power quality conditioner based on simplified p-q-r theory[J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2007, 27(36):85-91.
- [4] 徐健,李彦斌,樊一. 短时傅里叶变换和 S 变换用于检测电压暂降的对比研究[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(24):45-48.
XU J, LI Y B, FAN Y. Comparison of short time Fourier transform and S transform for detection of voltage

sag [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24):45-48.

- [5] HU D M, LIU Q, NIU G CH. Study on phase retardation characteristic of LCVR using dispersion analysis and SVM [J]. Instrumentation, 2015, 2(2):11-17.
- [6] 陈鑫元,李筠,杨海马. 自适应阈值图像二值化及形态学处理的 FPGA 实现 [J]. 电子测量技术, 2016, 39(7):67-71.
CHEN X Y, LI J, YANG H M. FPGA implementation of adaptive threshold image two value and morphological processing [J]. Electronic Measurement Technology, 2016, 39(7):67-71.
- [7] 肖湘宁,韩民晓,徐永海. 电能质量分析与控制[M]. 北京:中国电力出版社,2010.
XIAO X N, HAN M X, XU Y H. Power quality analysis and control [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [8] 欧阳森. 基于顺序形态方法的电力信号处理方法[J]. 电工电能新技术, 2005, 24(1):45-48.
OUYANG S. Power signal processing method based on order morphological method [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2005, 24(1):45-48.
- [9] 李杨,黄纯,石佳. 基于顺序形态学-dq 变换的动态电能质量扰动检测算法[J]. 电工电能新技术, 2008, 27(2):51-54.
LI Y, HUANG CH, SHI J. Dynamic power quality disturbance detection algorithm based on order morphological and dq transform. [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2008, 27(2):51-54.
- [10] 李圣清. 电能质量治理技术及应用[M]. 北京:科学出版社,2014.
LI SH Q. Power Quality Control Technology and Application [M]. Beijing: Science Press, 2014.
- [11] 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.
CHEN P, LI Q M. Design and analysis of digital filter based on mathematical morphology [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2005, 25(11):60-65.
- [12] 程扬军,黄纯,何朝辉. 基于自适应顺序形态滤波的电能质量去噪算法[J]. 计算机仿真, 2009, 26(12):218-220.
CHENG Y J, HUANG CH, HE ZH H. Power quality denoising algorithm based on adaptive order morphological filter [J]. Computer Simulation, 2009, 26(12):218-220.
- [13] 闫钧华,朱可,张婉怡. 基于显著性图像边缘的全参考图像质量评价[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(9):

2140-2148.

YAN J H, ZHU K, ZHANG W Y. Full reference image quality evaluation based on saliency image edge [J]. Journal of Scientific Instrument, 2016, 37 (9): 2140-2148.

- [14] 赵昭, 刘利林, 张承学, 等. 形态学滤波器结构元素选取原则研究与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 22-25.

ZHAO ZH, LIU L L, ZHANG CH X, et al. Research and analysis on the principle of element selection for morphological filter structure [J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(14): 22-25.

- [15] 党克, 赵思敏, 于盛祥. 消除直流分量影响和谐波干扰的并网同步方法[J]. 电子测量与仪器学报, 2016, 30(10): 1551-1557.

DANG K, ZHAO S M, YU SH X. Grid connected synchronization method for eliminating DC component affecting harmonic interference[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2016, 30 (10): 1551-1557.

- [16] 刘彬. MATLAB 环境下 IIR 滤波器设计、仿真与验证[J]. 电子测量技术, 2011, 34(4): 7-10.

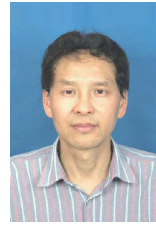
LIU B. IIR filter design, simulation and verification in MATLAB environment [J]. Electronic Measurement Technology, 2011, 34 (4): 7-10.

作者简介



许伟梁, 1993 年出生, 现为江南大学在读硕士研究生, 主要研究方向为电能质量检测与分析。

E-mail: 1432315336@qq.com



施火泉(通讯作者), 1962 年出生, 高级工程师, 硕士生导师, 主要研究方向为电力电子与电力传动、用电信息采集系统。

E-mail: shq@jiangnan.edu.cn

Shi Huoquan (Corresponding author) was born in 1962, senior engineer, M. Sc. supervisor. His main research interests include power electronics and electric power transmission, and electric power information acquisition system.



童庆国, 1980 年出生, 初级工程师, 主要研究方向为中央空调的自动控制。

E-mail: tongqg@dunan.cn

Tong Qingguo was born in 1980, junior engineer. His main research interest includes the automatic control of central air conditioning.