

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200166

# 基于延迟小角度法和自适应复合形态滤波器的 电压暂降检测方法

周军<sup>1</sup>, 类腾辉<sup>1</sup>, 何振梁<sup>2</sup>, 王岩<sup>3</sup>

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 国网江西省电力公司赣州供电公司, 江西 赣州 341000;  
3. 国网吉林省电力公司吉林供电公司, 吉林 吉林 132012)

**摘要:** 针对当前现代电网建设电压暂降故障频发和传统电压暂降检测算法准确性和快速性不足的问题, 提出一种电压暂降检测新方法。单相电压首先经过自适应复合形态滤波器进行最优尺度滤波处理, 再延迟一个小角度构造相互垂直且正交的  $\alpha\beta$  两相电压, 经过  $\alpha\beta$ -dq 变换得到电压暂降幅值、相位跳变和持续时间等特征量。在 Matlab/Simulink 中搭建新型电压暂降检测算法仿真模型, 与传统滤波算法和电压暂降检测算法进行了对比分析。基于 TMS320F28069DSP 处理器设计了高速的数据采集与处理电路, 搭建了电压暂降检测平台, 对所提方法进行了工程验证。仿真结果表明所提方法在电网谐波噪声干扰、电压暂降、相位跳变等工况下具有较高的准确性及灵敏度, 实测系统总体响应时间小于 5 ms, 所提方法可行有效。

**关键词:** 电压暂降; 自适应复合形态滤波器; 延迟小角度法; DSP

## Voltage sag detection method based on the delayed small angle method and an adaptive composite morphological filter

ZHOU Jun<sup>1</sup>, LEI Tenghui<sup>1</sup>, HE Zhenliang<sup>2</sup>, WANG Yan<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;  
2. Ganzhou Power Supply Company, State Grid Jiangxi Electric Power Company, Ganzhou 341000, China;  
3. Jilin Power Supply Company, State Grid Jilin Electric Power Company, Jilin 132012, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of frequent voltage sag faults in modern power grid construction as well as insufficient accuracy and speed of traditional voltage sag detection algorithms, a new voltage sag detection method is proposed. First, the single-phase voltage is filtered by an adaptive composite morphological filter at optimal scale. Then, the single-phase voltage is delayed by a small angle to construct mutually perpendicular and orthogonal  $\alpha\beta$  two-phase voltages. After  $\alpha\beta$ -dq transformation, characteristic quantities such as voltage transient amplitude, phase jump and duration are obtained. The new voltage sag detection algorithm simulation model is built in Matlab/Simulink. It is compared with traditional filtering algorithms and voltage sag detection algorithms. Based on a TMS320F28069DSP processor, a high-speed data acquisition and processing circuit is designed, and a voltage sag detection platform is built. The proposed method has passed engineering verification. The simulation results show that the proposed method has high accuracy and sensitivity under harmonic noise interference, voltage sag, phase jump and so on, and the overall response time of the measured system is less than 5 ms. The proposed method is feasible and effective.

This work is supported by Industrial Technology Research and Development Project of Jilin Province Development Reform Commission (No. 2019C057-3).

**Key words:** voltage sag; adaptive composite morphological filter; delay small angle; DSP

## 0 引言

随着现代电网技术的发展和用电设备的技术革

新, 电能质量问题在电气设备维护、电力经济投入等方面的影响越来越突出。研究报告表明电压暂降和短时中断已成为事件型电能质量的首要问题<sup>[1]</sup>。电压暂降按照电气与电子工程师协会 IEEE 的定义, 是指工频条件下电压均方根值减小到 0.1~0.9 倍额定电压之间, 并且持续 0.5 周波至 1 min<sup>[2]</sup>。快速准

基金项目: 吉林省发展和改革委员会产业技术研究与开发项目资助(2019C057-3)

确检测出电压暂降幅值、起止时间及相位跳变情况是动态电压补偿器和应急电源等装置进行电压补偿或快速投切的基础和前提<sup>[3]</sup>。因此对电压暂降的实时检测具有非常重要的意义。

单相故障及大容量和敏感负荷的并网等是实际电力系统产生电压暂降的主要原因<sup>[4]</sup>。消除电网复杂的噪声、谐波干扰, 实现对单相电压暂降的准确、快速检测是现代配电网、微电网建设的研究热点<sup>[5]</sup>。文献[6]结合 LES 滤波器和对称分量法形成的电压暂降算法对谐波有很好的抑制效果, 配合锁相环使用满足了快速响应的要求, 但是对锁相环的控制技术要求较高。在参考文献[7]中, 提出了一种瞬时电压  $dq$  分解法, 将单相电压延迟  $30^\circ$  并通过  $\alpha\beta/dq$  变换获得特征值, 该方法提高了检测的实时性但忽略了滤波环节对检测结果精确度的影响。在参考文献[8]中, 提出了一种改进的无延迟  $dq$  变换算法, 通过推导得到虚拟三相电压, 并通过  $abc/dq$  变换得出特征值, 该方法可以立即检测到电压暂降的开始, 但会引起更大的过冲和放大的谐波。

为了使电压暂降检测算法同时满足快速性和准确性, 本文提出了延迟小角度法和自适应复合形态滤波器的单相电压暂降检测方法。首先以信噪比极大值、噪声方差极小值为基准构造自适应复合形态滤波结构和尺寸, 对单相电压中包含的干扰信号针对性地消噪处理, 然后将单相电压延迟一个小角度构造相互垂直且正交的两相电压, 进而得到电压暂降特征量。延迟小角度法算法简单、计算速度快, 弥补了滤波环节的检测延时。仿真和基于 DSP 的硬件实验结果表明, 新型检测算法在响应速度和精确度上具有明显优势, 具有良好的应用前景。

## 1 延迟小角度法

由于延迟  $30^\circ$  或  $60^\circ$  的  $\alpha\beta$  变换法会使检测的实时性减弱, 因此考虑将单相电压延迟一个很小的角度  $\theta$ , 再通过已知三角函数的关系构造  $u_\alpha$  和  $u_\beta$ <sup>[9]</sup>。该方法是瞬时电压  $dq$  分解法和无延迟  $dq$  变换算法之间的折中<sup>[10]</sup>。

由延迟  $60^\circ$  构造法令  $u_\beta = u_\alpha = U \sin(\omega t + \varphi)$ , 然后将  $u_\beta$  延迟一个小角度  $\theta$  得到  $u_\theta$ ,  $u_\theta$  和  $u_\beta$  幅值相同, 构造向量  $u_{01}$  和  $u_{02}$  关系如图 1 所示。

由向量关系易知

$$\begin{cases} u_{01} = -u_\alpha \sin \theta \\ u_{02} = u_\beta \cos \theta \\ u_{01} + u_{02} = u_\theta \end{cases} \quad (1)$$

三式联立可以解得

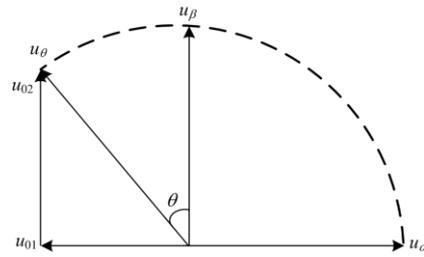


图 1 延迟小角度法构造  $\alpha\beta$  量矢量图

Fig. 1 Constructing  $\alpha\beta$  vector by delay small angle method

$$u_\alpha = \frac{u_\beta}{\tan \theta} - \frac{u_\theta}{\sin \theta} \quad (2)$$

将  $u_\alpha$  和  $u_\beta$  变换到  $dq$  坐标系的关系式为

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

根据直流分量  $u_d$  和  $u_q$  就可以求出单相电压  $U$  的瞬时电压有效值与相位值为

$$\begin{cases} u = \sqrt{u_d^2 + u_q^2} \\ \varphi = \arctan\left(\frac{u_q}{u_d}\right) \end{cases} \quad (4)$$

当检测的信号中含有谐波分量时, 可表示为

$$u_\beta = U \sin(\omega t + \varphi) + \sum U_k \sin(k\omega t + \varphi_k) \quad (5)$$

$$u_\theta = U \sin(\omega t + \varphi - \theta) + \sum U_k \sin(k\omega t + \varphi_k - k\theta) \quad (6)$$

经过  $dq$  变换可得含有谐波分量的  $u_d$  和  $u_q$ :

$$\begin{aligned} u_d = & U \cos \varphi + \frac{1}{\sin \theta} \sum U_k [\cos(\delta_{k+1} - k\theta) - \cos(\delta_{k+1} - \theta)] + \\ & \frac{1}{\sin \theta} \sum U_k [\cos(\delta_{k-1} - k\theta) - \cos(\delta_{k-1} - \theta)] \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} u_q = & U \sin \varphi + \frac{1}{\sin \theta} \sum U_k [\sin(\delta_{k+1} - k\theta) - \sin(\delta_{k+1} - \theta)] + \\ & \frac{1}{\sin \theta} \sum U_k [\sin(\delta_{k-1} - k\theta) - \sin(\delta_{k-1} - \theta)] \end{aligned} \quad (8)$$

式中:  $\delta_{k+1} = (k+1)\omega t + \varphi_k$ ;  $\delta_{k-1} = (k-1)\omega t + \varphi_k$ 。

由上式可知电压基波的运算结果为直流分量, 第  $k$  次高频振荡信号则分解为  $k \pm 1$  次高频振荡信号的叠加。角度  $\theta$  越小, 延时越短, 检测的速度更快, 但是会对高频振荡分量有很大的放大作用<sup>[11]</sup>。这里, 角度  $\theta$  与采样频率  $f_s$  的取值有关, 假设信号的频率为  $f(\text{Hz})$ , 系统的采样频率为  $f_s(\text{Hz})$ , 信号在一个周期  $T$  的采样点数为  $N$ , 则

$$N = \frac{f_s}{f} \quad (9)$$

延迟  $n$  个采样点, 则延迟的相位差

$$\theta = \frac{n \times 360}{N} = \frac{n \times 360 \times f}{f_s} \quad (10)$$

由上式可以计算得到当信号的频率设置为 50 Hz, 延迟小角度设置为 10° 时, 采样频率为 10 kHz 延迟 5.56 个采样点, 采样频率为 12.8 kHz 延迟 7 个采样点, 延迟点数为非整数不能满足嵌入式处理器的要求, 因此, 需要合理选择采样频率  $f_s$ 。

## 2 自适应复合形态滤波器

### 2.1 形态学基本运算

基于数学形态学的滤波器是一种新型的滤波算法, 通过“探针”(结构元素)的连续移动获得信号的形态特征<sup>[12]</sup>。基本运算包括膨胀、腐蚀、开放、封闭等<sup>[13]</sup>。

假设输入信号  $f(n)$  为定义在  $F=(0,1,\dots,N-1)$  上的离散函数, 结构元素序列  $g(n)$  为  $G=(0,1,\dots,M-1)$  上的离散函数, 且  $N \geq M$ , 则  $f(n)$  关于  $g(n)$  的腐蚀、膨胀分别定义为

$$(f \ominus g)(n) = \min [f(n+m) - g(m)] \quad (11)$$

$$m \in 0, 1, \dots, M-1$$

$$(f \oplus g)(n) = \max [f(n-m) + g(m)] \quad (12)$$

$$m \in 0, 1, \dots, M-1$$

形态开和形态闭定义为

$$(f \circ g)(n) = (f \ominus g \oplus g)(n) \quad (13)$$

$$(f \bullet g)(n) = (f \oplus g \ominus g)(n) \quad (14)$$

利用开运算抑制信号峰值噪声, 闭运算抑制信号波谷噪声的特点把这两种运算结合起来形成了开-闭( $O_c$ )和闭-开( $Co$ )滤波器<sup>[14]</sup>, 定义如下:

$$O_c = (f \circ g) \bullet g \quad (15)$$

$$Co = (f \bullet g) \circ g \quad (16)$$

开-闭滤波器和闭-开滤波器均存在输出统计偏移, 所以可以将这两种滤波器组合后取平均来减小这个误差, 该混合滤波器定义为

$$Z_n(x) = \frac{Co(x) + O_c(x)}{2} \quad (17)$$

自适应复合形态滤波器采取这种形态复合运算形式<sup>[15]</sup>。

### 2.2 自适应复合形态滤波器原理

形态滤波的特点为: 当滤波信号与形态滤波的结构元素形状和尺寸相匹配时, 信号特征才能被保留<sup>[16]</sup>。考虑到电网复杂的工作环境, 仅用单一形态结构元素以固定尺寸滤波无法保证检测结果的准确性并且应用范围更加局限<sup>[17]</sup>。

考虑将多种基本结构元素如三角形结构元素、半圆形结构元素、正弦形结构元素等两两复合构成复合形态结构元素, 以达到针对性的消噪效果<sup>[18]</sup>。以半圆形和三角形结构元素复合成一种新型复合形态结构元素为例。

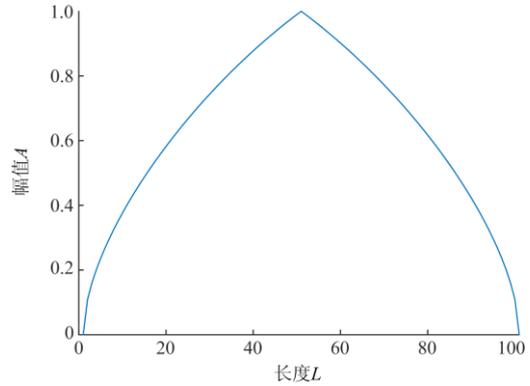


图2 复合形态结构元素

Fig. 2 Composite morphological structural elements

形态结构元素尺寸在一定程度上影响滤波器滤波效果<sup>[19]</sup>, 因此自适应滤波器同时要完成复合形态结构元素和结构元素尺寸的最优选取。自适应滤波器最优选取的原则可用噪声均方差和信噪比进行衡量。噪声均方差的定义为

$$y_{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y(n)_i - u(n)_i)^2 \quad (18)$$

式中:  $y(n)$  代表滤波后输出信号;  $u(n)$  代表假想无噪声信号;  $n$  为采样点数,  $n=1, 2, \dots, N$ 。  $y(n)$  与  $u(n)$  的差, 即噪声信号的平方累加再除以  $n$ , 得到的噪声均方差正比于噪声功率, 噪声均方差越小, 说明噪声功率越低, 滤波效果越好<sup>[20]</sup>。

滤波后信号的信噪比定义为

$$y_{SNR} = 10 \log \left( \frac{P_s}{P_n} \right) \quad (19)$$

式中,  $P_s$  和  $P_n$  分别代表信号和噪声的有效功率。信噪比越大说明信号含有的噪声越小, 即滤波效果越好<sup>[21]</sup>。

## 3 电压暂降检测算法原理

新型电压暂降检测算法原理图如图 3 所示。

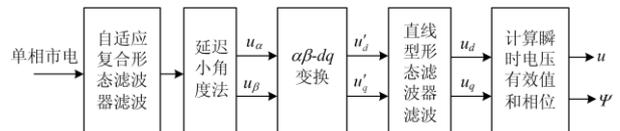


图3 电压暂降检测算法原理图

Fig. 3 Schematic diagram of voltage sag detection algorithm

单相市电首先进入自适应复合形态滤波器, 对其中包含的噪声干扰和谐波进行滤波预处理, 自适应复合形态滤波器去噪流程如图 4 所示。

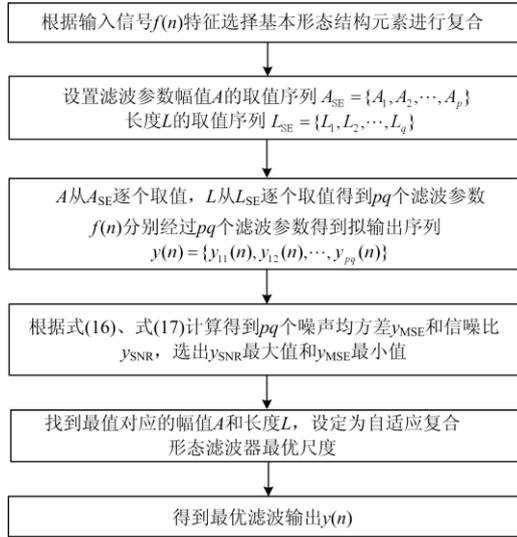


图 4 自适应复合形态滤波器去噪流程图

Fig. 4 Denoising flowchart of adaptive composite morphological filter

由于输入的单相市电的噪声是随机的, 但是短时间内其噪声的特性是不变的<sup>[22]</sup>, 因此可以将输入信号按时间序列分段处理, 用上一段信号求得的自适应复合形态滤波器的最优尺寸处理下一段输入信号, 以保证信号处理的实时性。时间段的设定适应于所处应用环境。

滤波后的输出信号经过延迟小角度法构造  $u_\alpha$  和  $u_\beta$ , 再将  $u_\alpha$  和  $u_\beta$  变换到  $dq$  坐标系得到  $u'_d$  和  $u'_q$ , 变换为  $d$  轴和  $q$  轴的分量包括从正序基本分量变换的直流分量, 从负序基本分量变换而来的双频交流分量<sup>[23]</sup>。因此, 选择直线型形态滤波器提取  $d$  轴和  $q$  轴的直流分量得到  $u_d$  和  $u_q$ , 通过计算便可以得到电压有效幅值和相位。

## 4 仿真分析

### 4.1 自适应复合形态滤波器滤波流程分析

利用 Matlab/Simulink 来产生幅值为 200 V, 采样频率为 12.8 kHz, 发生 50% 电压暂降的单相电网电压。仿真中添加了 3% 的三次谐波、2% 的五次谐波、3% 的七次谐波, 添加了 20 dB 的高斯白噪声以及少量脉冲噪声。叠加后待处理的信号如图 5 所示。

三角形结构元素对脉冲噪声的抑制效果明显, 正弦型结构元素能最好地保留实际电网信号, 因此融合这两种结构元素构成复合元素。仿真中信号的最大峰值为 200 V, 经验表明, 结构元素幅值设置

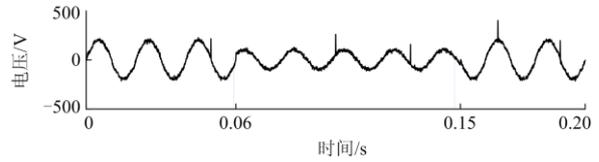


图 5 待处理信号波形

Fig. 5 Pending signal waveform

在信号振幅的 1/50 和 1/10 之间<sup>[24]</sup>。设置结构元素的幅值备选序列 {4, 8, 12, 16, 20}。最大干扰宽度未知, 对于脉冲噪声, 如果最大宽度为  $T$  且采样周期为  $T_s$ , 结构元素长度  $L$  理论上只需要大于  $T / T_s$ <sup>[25]</sup>。经过多组数据测试, 对比选择了能够使信噪比出现极大值的一组长度备选序列, 设定为 {5, 7, 9, 11, 13, 15}。根据自适应复合形态滤波器去噪流程, 计算并统计噪声均方差值  $y_{MSE}$  及信噪比  $y_{SNR}$ , 将复合结构元素在各幅值、长度下的  $y_{SNR}$  和  $y_{MSE}$  值变化趋势绘制如图 6 和图 7 所示。

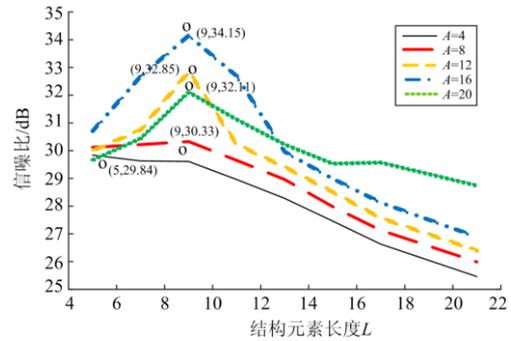


图 6 复合结构元素尺度对输出信号信噪比的影响  
Fig. 6 Effect of composite structural element scale on signal-to-noise ratio of output signal

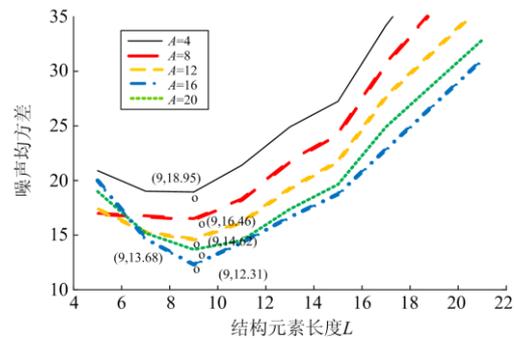


图 7 复合结构元素尺度对输出信号噪声均方差的影响  
Fig. 7 Effect of composite structural element scale on the mean square error of output signal noise

图中在各条曲线上用“O”标注出复合形态结构元素在五种幅值下  $y_{SNR}$  的极大值和  $y_{MSE}$  的极小值, 推断出结构元素最优尺度, 即  $A=16, L=9$ 。

### 4.2 自适应复合形态滤波器滤波效果分析

为了分析和比较所采用滤波器的滤波效果，分别使用了截止频率为 75 Hz 巴特沃斯低通滤波器、幅值和长度均为 10 的三角形形态滤波器、自适应复合形态滤波器来分别进行滤波，效果如图 8 所示。

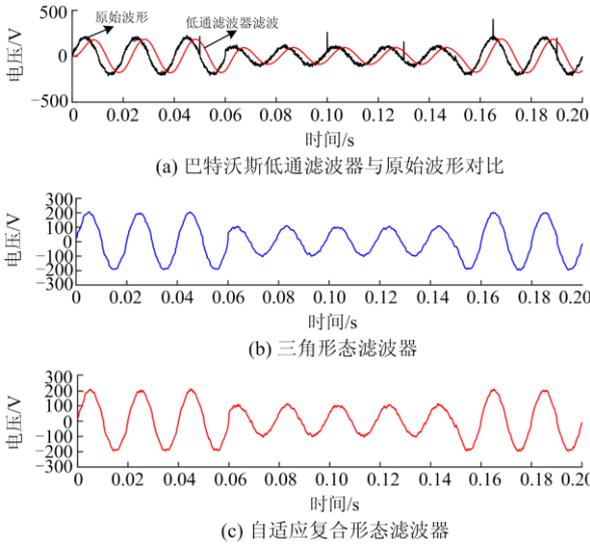


图 8 不同滤波器滤波效果比较

Fig. 8 Comparison of filtering effects of different filters

通过对比图中的滤波效果可知，使用巴特沃斯低通滤波器造成波形失真较大，伴有近 40 个采样点的延迟，使用三角形态滤波器和自适应复合形态滤波器处理后波形的信噪比分别为 26.54 和 34.15，自适应复合形态滤波器滤波后信号更接近理想信号，极大地消除了噪声信号对检测结果的干扰，适用于对精确度要求高的敏感设备滤波处理。

### 4.3 电压暂降检测结果分析

仿真条件 1: 无噪声和谐波干扰，利用 Simulink 产生幅值为 300 V，采样频率为 12.8 kHz，采样时间为 0.2 s 的单相电网电压。电压在 0.065~0.16 s (781~1920 个采样点)发生 50% 的电压暂降。利用 Simulink 对传统电压暂降 dq 变换法，即延迟 60°法、延迟 90°法、延迟小角度法(10°)进行了仿真分析，对比了几种方法的检测延时，效果如图 9 所示。

由图 9 可知，延迟 60°法和延迟 90°法分别延迟 3 ms 和 5 ms 检测到电压跌落，延迟小角度法实际延迟 0.6 ms；电压抬升时，延迟 60°和 90°法延时约 5 ms，延迟小角度法几乎实现了无延时检测。较其他两种方法，延迟小角度法在检测速度上有很大优势，但是对高频分量的放大效果也是最大的，由式(7)、式(8)分析可知，为了减小这种效果，可以使用自适应复合形态滤波器最大限度地滤除干扰信号，保证检测速度的快速性和结果的精确性。

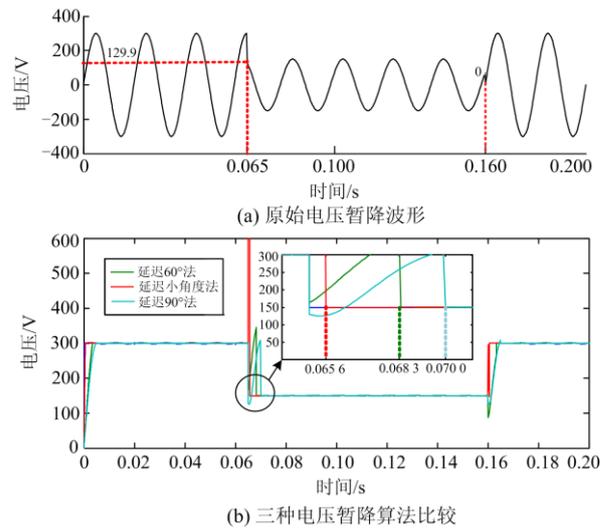


图 9 无噪声和谐波时电压暂降波形及不同电压暂降算法比较

Fig. 9 Voltage sag waveforms without harmonics and comparison of different voltage sag algorithms

仿真条件 2: 幅值为 200 V，采样频率为 12.8 kHz 的单相电压，分别发生 50% 暂降、30°相位跳变和 30% 暂降、60°相位跳变，添加 3%，2% 和 3% 的三、五、七次谐波和 10 dB 的高斯白噪声。新型电压暂降检测算法与未使用自适应滤波器的电压暂降检测算法比较如图 10、图 11 所示。

对图 10、图 11 观察可知，当信号受到复杂噪声、谐波干扰时，未对初始信号进行自适应滤波处理得不到精确的检测结果，并且伴随着检测延时，高频分量放大效果明显；通过新型电压暂降方法中的

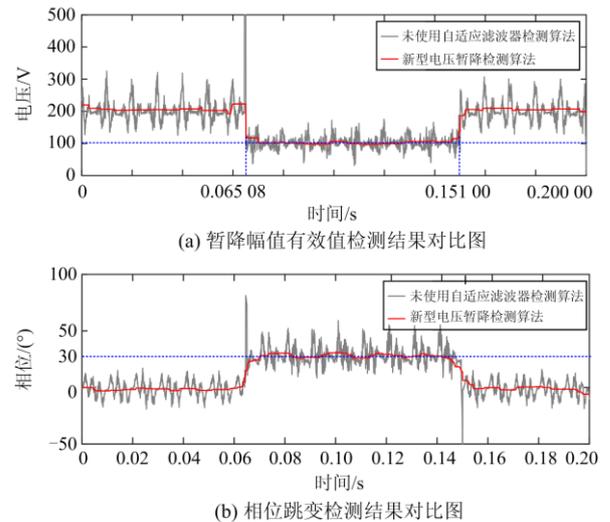


图 10 50%电压暂降、30°相位跳变两种方法检测结果比较  
Fig.10 Comparison of test results by using the two methods when 50% voltage sag and 30° phase jump

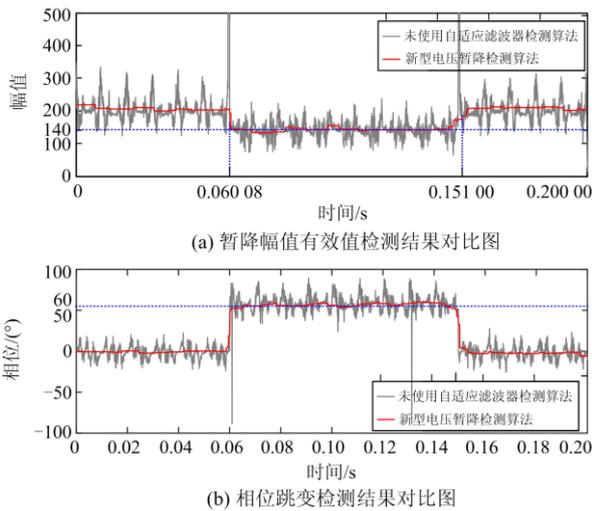
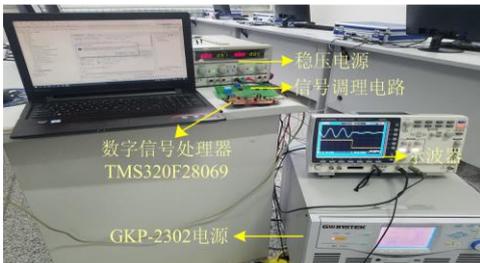


图 11 30%电压暂降、60°相位跳变两种方法检测结果比较  
Fig. 11 Comparison of test results by using the two methods when 30% voltage sag and 60° phase jump

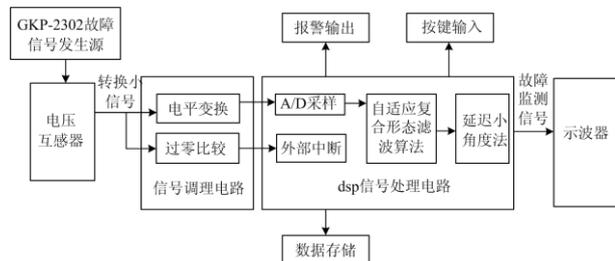
自适应滤波处理后, 滤除了干扰成分且抑制了延迟小角度法对高频分量的放大作用。在检测的实时性方面, 当电压暂降到正常值的 90% 时延时为 1~2 ms, 说明所提方法提高了检测速度的快速性和结果的准确性。

## 5 实验验证

搭建电压暂降检测硬件平台如图 12 所示。利用可编程交直流电源 GKP-2302 产生频率为 50 Hz 的电压暂降信号, 以电源最大输出电压 200 V 为基准, 将故障信号首先经过 200/5 V 电压互感器转换为小



(a) 电压暂降检测硬件平台



(b) 电压暂降检测硬件原理图

图 12 电压暂降检测硬件平台和原理图

Fig. 12 Voltage sag detection hardware platform and schematic

信号, 信号调理电路实现对电压的抬升, 过零点电路通过下降沿触发 DSP 中断。控制系统采用 DSP-TMS320F28069 进行算法处理, 当检测到暂降发生, I/O 端口立即输出一个低电平故障检测信号, 示波器记录原始电压暂降波形(通道 2)和故障检测信号(通道 1)。

由上述实验平台产生 200 V 跌落至 40 V、相位跳变为 150° 的电压暂降信号, 经信号调理电路处理后输出 300 mV 到 60 mV 的模拟信号, 自适应滤波器根据模拟信号特征选取最优尺度完成接下来 1 分钟内输入信号的滤波处理, 模拟信号及故障检测信号示波器截图如图 13 所示。表 1 为 5 组均匀抽取的电压暂降幅值与相位跳变检测结果。

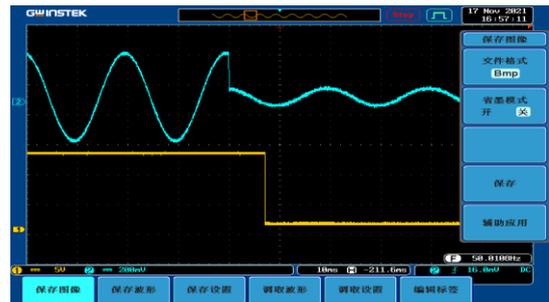


图 13 模拟信号及故障检测信号示波器截图

Fig. 13 Screenshot of oscilloscope with analog signal and fault detection signal

表 1 暂降幅值与相位跳变检测结果

Table 1 Results of amplitude and phase transition detection

	暂降幅值/V	相位跳变/(°)	检测用时/ms
结果 1	159.4	148.3	5
结果 2	141.2	128.9	4.5
结果 3	121.1	109.3	4.7
结果 4	98.7	91.4	5
结果 5	81.3	69.1	4.2

由图 13 可知电压从 200 V 跌落至 40 V 检测用时 5 ms, 检测结果为 159.4 V 和 148.3°, 检测误差分别为 0.3% 和 1.2%。由表 1 计算得到, 暂降幅值的检测误差小于 2%, 相位跳变的检测误差小于 2%。检测用时总体小于 5 ms, 这主要是由硬件电路延时造成, 并在一定程度上与自适应滤波器构造延时有关, 可考虑适当调整滤波器构造参数以缩短检测延时。

## 6 结论

(1) 本文提出的自适应复合形态滤波器可以根据噪声特点自适应滤波处理, 适用于对精确度要求较高的敏感设备滤波处理。工程应用时根据精度要

求控制滤波时间窗，避免产生过大的检测延时。

(2) 所采用的延迟小角度算法原理清晰，检测速度快，角度  $\theta$  的选取要参考采样频率，尽可能使延迟点数取正整数满足实际需要。

(3) 仿真结果和实验平台验证了所提算法的准确性、实时性和有效性。所提方法有待于在不间断应急电源(UPS)并网及动态电压恢复器(DVR)电压波动检测等环境中进一步开发和应用。

参考文献

[1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[2] 李建闽, 林海军, 梁成斌, 等. 基于双分辨率 S 变换和学习向量量化神经网络的电能质量扰动检测方法[J]. 电工技术学报, 2019, 34(16): 3453-3463.  
LI Jianmin, LIN Haijun, LIANG Chengbin, et al. Detection method of power quality disturbances based on double resolution S transform and learning vector quantization neural network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(16): 3453-3463.

[3] 李振华, 胡廷和, 杜亚伟, 等. 基于窗函数和谱线插值理论的谐波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 78-88.  
LI Zhenhua, HU Tinghe, DU Yawei, et al. Harmonic detection method based on the theory of windows and spectrum line interpolation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 78-88.

[4] 薛尚青, 蔡金锭. 三相电压跌落检测新方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 91-97.  
XUE Shangqing, CAI Jinding. An advanced detection method for three-phase voltage sag[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 91-97.

[5] 瞿硕, 黄纯, 江亚群, 等. DVR 电压暂降检测新方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 234-239.  
QU Shuo, HUANG Chun, JIANG Yaqun, et al. A new detection method of voltage sag applied in DVR[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 234-239.

[6] 龙毅, 欧阳金鑫, 熊小伏, 等. 基于零序功率变化量的配电网单相高阻接地保护[J]. 电工技术学报, 2019, 34(17): 3687-3695.  
LONG Yi, OUYANG Jinxin, XIONG Xiaofu, et al. Protection principle of single-phase high resistance fault for distribution network based on zero-sequence power variation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(17): 3687-3695.

[7] 杨达亮, 卢子广, 杭乃善. 新型单相电压暂降实时检测方法及其实现[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2):

110-113.  
YANG Daliang, LU Ziguang, HANG Naishan. Method and realization of real-time single-phase voltage sag detection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(2): 110-113.

[8] 曹立志, 王小君, 和敬涵, 等. 基于 DSP 的电压暂降检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(13): 78-83.  
CAO Lizhi, WANG Xiaojun, HE Jinghan, et al. Research of voltage sag detection methods based on DSP[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 78-83.

[9] 陈晓静, 李开成, 张明, 等. 基于强跟踪滤波器的电压暂降检测[J]. 高电压技术, 2015, 41(10): 3454-3463.  
CHEN Xiaojing, LI Kaicheng, ZHANG Ming, et al. Voltage sag detection based on strong tracking filter[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3454-3463.

[10] HOU Kaiyuan, SHAO Guanghui, WANG Haiming, et al. Research on practical power system stability analysis algorithm based on modified SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 119-125. DOI: 10.1186/s41601-018-0086-0.

[11] 何娟, 刘晓波, 袁旭峰, 等. 含微网的配电网电压暂降检测算法仿真[J]. 智慧电力, 2019, 47(2): 15-21, 74.  
HE Juan, LIU Xiaobo, YUAN Xufeng, et al. Simulation of voltage sag detection algorithms for distribution network with microgrid[J]. Smart Power, 2019, 47(2): 15-21, 74.

[12] 金显吉, 佟为明, 卢雷, 等. 基于改进单相 dq 变换与形态滤波的电压暂降检测方法[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(4): 46-52.  
JIN Xianji, TONG Weiming, LU Lei, et al. A detection algorithm of voltage sag based on improved single-phase dq transformation and morphological filtering[J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(4): 46-52.

[13] 张俨, 彭志炜, 雷章勇, 等. 微电网谐波源危害及谐波检测技术[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(6): 27-35.  
ZHANG Yan, PENG Zhiwei, LEI Zhangyong, et al. Harmonic source hazard and harmonic detection technology in microgrid[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(6): 27-35.

[14] 齐郑, 李志, 张首魁, 等. 基于复合结构元素的新型自适应形态滤波器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(14): 121-127.  
QI Zheng, LI Zhi, ZHANG Shoukui, et al. Design of a new adaptive morphological filter based on composite structure elements[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(14): 121-127.

[15] 王佳浩, 潘欢, 纳春宁. 电网电压不平衡和谐波畸变

- 下新型并网锁相环设计[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 108-115.
- WANG Jiahao, PAN Huan, NA Chunling. A new grid-connected phase-locked loop design under grid voltage imbalance and harmonic distortion conditions[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 108-115.
- [16] LI J M, TENG Z S, TANG Q, et al. Detection and classification of power quality disturbances using double resolution S-Transform and DAG-SVMs[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(10): 2302-2312.
- [17] 邝昊云, 温和. 基于泰勒-傅里叶变换的电压闪变测量方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(22): 4798-4806.
- KUANG Haoyun, WEN He. Voltage flicker measurement based on Taylor-Fourier transform[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(22): 4798-4806.
- [18] 雷何, 高山, 林新春, 等. 基于包含谐波模型的加权最小二乘估计算法的电压暂降检测方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(9): 36-41.
- LEI He, GAO Shan, LIN Xinchun, et al. Voltage sag detection based on weighted least squares estimation algorithm with harmonic models[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(9): 36-41.
- [19] SHEN Y W, CUI M J, WANG Q, et al. Comprehensive reactive power support of DFIG adapted to different depth of voltage sags[J]. Energies, 2017, 10(6): 808-827.
- [20] 刘盼, 王静, 刘涤尘. 改进的自适应广义形态滤波器设计[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 94-98.
- LIU Pan, WANG Jing, LIU Dichen. Design of an improved adaptive generalized morphological filter[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 94-98.
- [21] 陈晓静, 李开成, 肖剑, 等. 一种实时电能质量扰动分类方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(3): 45-55.
- CHEN Xiaojing, LI Kaicheng, XIAO Jian, et al. A method of real-time power quality disturbance classification[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(3): 45-55.
- [22] WANG Y, BOLLEN M, XIAO X Y. Calculation of the phase-angle-jump for voltage dips in three-phase systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(1): 480-487.
- [23] 刘佳翰, 陈克绪, 马建, 等. 基于卷积神经网络和随机森林的三相电压暂降分类[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 112-118.
- LIU Jiahao, CHEN Kexu, MA Jian, et al. Classification of three-phase voltage dips based on CNN and random forest[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 112-118.
- [24] 李冬梅, 胡扬宇, 王利利, 等. 基于改进注入法的直流配电网双端测距故障定位方法[J]. 智慧电力, 2019, 47(12): 110-116.
- LI Dongmei, HU Yangyu, WANG Lili, et al. Double-end distance measurement fault location method for dc distribution network based on improved injection method[J]. Smart Power, 2019, 47(12): 110-116.
- [25] BAGHERI A, GU I, BOLLEN M, et al. A robust transform-domain deep convolutional network for voltage dip classification[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(6): 1-9.

收稿日期: 2020-02-19; 修回日期: 2020-04-01

作者简介:

周 军(1967—), 男, 硕士, 教授, 研究方向为电能质量监测与控制、电气设备状态监测与故障诊断; E-mail: jlzhoujun@126.com

类腾辉(1994—), 女, 通信作者, 硕士, 研究方向为电能质量监测与控制。E-mail: 1550426255@qq.com

(编辑 周金梅)