

# 基于形态滤波和 Hilbert 变换的电压暂降检测研究

许伟梁 施火泉 魏超

(江南大学物联网工程学院 无锡 214122)

**摘要:** 电压暂降已成为电能质量暂态问题中最为突出的一类。针对电压暂降检测中具有的准确性低、实时性较差的缺点,提出了一种基于 Hilbert 变化与形态滤波相结合的暂降检测方法。研究论述了 Hilbert 变化用于电压暂降检测的算法基本原理,介绍了数学形态学概念,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。仿真论证了该方法在单相接地故障引起的电压暂降中的检测效果,并与单相 dq 变换法进行了比较。从仿真结果可以看出该方法可以更高效精确地检测到暂降的幅值以及相位。

**关键词:** 电压暂降; Hilbert 变换; 形态滤波; 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:** 510.1050

## Research on detection of voltage sag based on morphological filter and Hilbert transform

Xu Weiliang Shi Huoquan Wei Chao

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

**Abstract:** Voltage sag has become an increasingly prominent issue in power quality. In this paper, a new voltage sag detection method based on Hilbert transform and morphological filter is proposed to solve the problem of low accuracy and poor real-time performance in voltage sag detection. The basic principle of Hilbert transform for voltage sag detection is discussed. The concept of mathematical morphology is introduced, and the morphological filter is constructed based on it. The selection of filter parameters is given. The performance of this method in voltage sag caused by single-phase-to-ground fault is analyzed and compared with single-phase dq transformation method. Simulation results show that the method can detect the sag amplitude and phase more quickly and accurately.

**Keywords:** voltage sag; Hilbert transform; morphological filter; amplitude phase

### 1 引言

近 20 多年来,随着计算机应用技术、自动化控制技术和大功率电力电子技术等高新技术的快速发展,基于计算机、微处理器的许多高性能自动化的电子设备大量被使用在日常的生活和工作学习中。它们对系统的可靠性十分依赖,同时对电能质量<sup>[1]</sup>也提出了很高的要求。而在电能质量问题中,电压暂降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。电压暂降不仅会导致生活和工作上的诸多不便,而由于其影响范围广,还会导致巨大的经济损失,甚至会影响人身安全。因此,全面及时地检测电压暂降已经必不可少,并且能够为后期的电压补偿打下很好的基础。

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 0.5~30 T 的一种现象。电压暂降通常是由输配电线路短路故障、大型感应电动机的启动以及雷击所引起<sup>[2]</sup>。传统的电压暂降检测方法有:有效值法、峰值电压法、基波分量法。但以上方法只能检测出电压暂降的幅值,而不能得到暂降发生的时刻以及可能造成的相位变化。目前,DVR (dynamic voltage restorers, DVR)中最常用的是基于瞬时无功功率的 dq 变换法<sup>[3]</sup>,该方法将 abc 坐标系下的三相电压进行 park 变换,将其转到 dq 坐标系下,然后通过低通滤波器得到直流量,最后经过 park 反变换即可得到电压暂降的幅值。但显然,该方法只适用于三相电压,同时也无法检测出暂降发生时相位的变化以及暂降的起止时刻。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。同时,还有许多新的方法被用于电压暂降的检测。比如,文献[4]提出了基于S变换、文献[5]提出了基于p-q-r理论、文献[6]提出了基于傅里叶变换原理、文献[7]提出了基于向量机的相位检测新方法。但每种方法都有其一定的局限性,故需要一些综合性的分析方法。

本文提出的方法利用 Hilbert 变换的特点克服了延时 $90^\circ$ 的缺点,首先通过 Hilbert 变换将实际电压构造 $\alpha\beta$ 坐标系下的分量,然后将其转换至dq旋转坐标系下,通过dq分解法得到暂降的幅值与相位变化,最后通过数学形态滤波器取代常用低通滤波器进行滤波,得到更精确的暂降特征量。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,并且在后面 MATLAB 仿真中也验证了该方法的优越性。

## 2 Hilbert 变换简介

对于任意一个连续的时间信号,其 Hilbert 变换  $\hat{g}(t)$  定义为:

$$\hat{g}(t) = H(g(t)) = g(t) * h(t) = g(t) * \frac{1}{\pi t} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{g(\tau)}{t-\tau} d\tau \quad (1)$$

其中,  $h(t) = 1/\pi t$ , \* 为卷积符号。

Hilbert 变换幅值恒为 1,其相角为

$$\varphi(t) = \begin{cases} +\frac{\pi}{2}, & t < 0 \\ -\frac{\pi}{2}, & t > 0 \end{cases} \quad (2)$$

Hilbert 变换实际上就是一个幅值为 1,正频率部分相移 $-90^\circ$ ,负频率成分相移 $+90^\circ$ 的全通滤波器。信号经变换后,各频率分量的幅值保持不变,但相位会出现 $90^\circ$ 的相移。

在 MATLAB 中,Hilbert 变换得到的解析信号中,实信号为原始信号本身,而虚信号则为原始信号的 Hilbert 变换。图 1 为一个正弦信号作 Hilbert 变换后的仿真图。

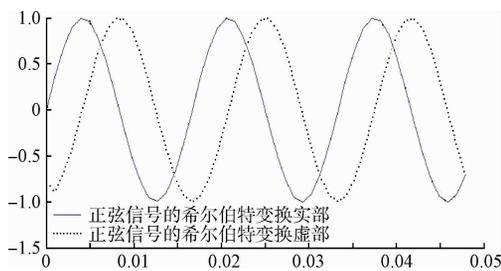


图 1 正弦信号 Hilbert 变换仿真

## 3 数学形态滤波器选取

### 3.1 数学形态学的基本算法

数学形态学<sup>[8]</sup>是建立在积分几何和随机理论等数学理

论基础上的一门计算简单、运行快速的方法学。数学形态学方法的基本思路是:通过所测信号的几何特征来构成相应的形态滤波器,接着对信号进行去噪以及滤波处理,从而得到信号的特征,同时尽量保持原信号的细节。目前,数学形态学在边缘检测<sup>[9]</sup>、图像信息处理等许多方面被大量运用。

数学形态滤波是在数学形态学的基础之上,利用结构元素在所测信号中的不停移动,来探索信号中各个部分的相互联系,从而提取有效特征的方法。形态运算主要是布尔运算与少量的加运算与减运算。相比于一般的数字滤波器<sup>[10]</sup>,其算法更简便并且实时性较好。鉴于电力系统中电压采样信号属于一维,故下文只给出一维信号的数学形态变换。

假设  $f(x)$  为一维输入信号, $g(m)$  为结构元素。 $D(f)$  和  $H(g)$  分别为  $f$  和  $g$  的定义域,其中  $D(f) = \{0, 1, 2, \dots, N\}$ ;  $H(g) = \{0, 1, 2, \dots, P\}$ , 且  $P < N$ ,  $P$  和  $N$  为整数。则离散输入信号  $f$  关于  $g$  的腐蚀和膨胀运算定义为

$$(f \ominus g)(x) = \min\{f(x+m) - g(m)\} \quad (3)$$

$$(f \oplus g)(x) = \max\{f(x-m) + g(m)\} \quad (4)$$

式中: $x$  和  $m$  为满足上述定义域的数; $\ominus$  为腐蚀运算; $\oplus$  为膨胀运算。

由式(3)和(4)可以得到形态学中开、闭运算的定义如下:

$$(f \circ g)(x) = (f \ominus g \oplus g)(x) \quad (5)$$

$$(f \bullet g)(x) = (f \oplus g \ominus g)(x) \quad (6)$$

式中: $\circ$  为开运算; $\bullet$  为闭运算。

由此即可得到形态学中的两种滤波器开闭( $O_c$ )与闭开( $Co$ )运算,其定义如下:

$$O_c(f) = (f \circ g) \bullet g \quad (7)$$

$$Co(f) = (f \bullet g) \circ g \quad (8)$$

### 3.2 形态滤波器的构造

腐蚀运算和膨胀运算是数学形态运算的两种基础运算,并由此可以得到形态开、闭运算。根据 Hilbert 和 dq 变换的信号特征,在选取合适的结构元素条件下,对变换后的信号进行式(7)或式(8)所示滤波器进行滤波,可以去除信号中的噪声,进而得到电压暂降深度以及相位跳变。但由于形态开-闭( $O_c$ )和闭-开( $Co$ )两种滤波器存在统计偏移的缺点,会导致  $O_c$  滤波器和  $Co$  滤波器的输出幅度相比于实际偏小或偏大,从而达不到理想的滤波效果。因此,本文选择采用混合  $O_cCo$  滤波器,即两种滤波器的平均形式

$$O_cCo(f) = [O_c(f) + Co(f)]/2 \quad (9)$$

### 3.3 结构元素的选取

结构元素相当于常用数字滤波器中的滤波窗口,它的选取一定程度上决定着滤波器的滤波效果<sup>[11]</sup>。形态学中常用的结构元素有余弦、三角形、半圆、直线型。通常选取尽可能小的结构元素,同时结构要尽量与待检测信号的图形特征相似。根据电力系统中信号特点和本文所用方法,由于需要保留信号中的直流成分,滤除谐波<sup>[12]</sup>和噪声干

扰,故选取直线型结构元素。

结构元素的滤波效果很大一部分由其形状决定。对于直线结构元素,其形状由其宽度决定<sup>[13]</sup>。虽然滤波器的低通能力会随着结构元素宽度的增加而变强,使滤波效果得到提升,但是其动态响应性能会变差<sup>[14]</sup>。同时,不同的结构元素值,会对滤波后的信号产生一个明显的直流偏移量<sup>[15]</sup>,为了减少偏移量产生的误差,结构元素的值取为 0。综上所述,为了考虑滤波的效果与动态性能,在采样频率为 12.8 kHz 的情况下,本文选取结构元素的长度为 60。

#### 4 检测算法原理分析

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 2 为  $\alpha\beta dq$  坐标系间的转换关系图。由图可知,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  $\omega$  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  $U_\alpha$  和  $U_\beta$  变换到 dq 坐标系的公式如下:

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中:  $C$  为由  $\alpha\beta$  坐标系变换到 dq 坐标系的算法矩阵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(11)得到基波电压的幅值和相位跃变。

$$\begin{cases} U = \sqrt{U_{d0}^2 + U_{q0}^2} \\ \varphi = \arctan \frac{u_{q0}}{u_{d0}} \end{cases} \quad (11)$$

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  $U_\alpha$  分量是通过  $U_\beta$  分量延迟  $90^\circ$  构造获得,从而增加了  $90^\circ$  检测延迟,动态

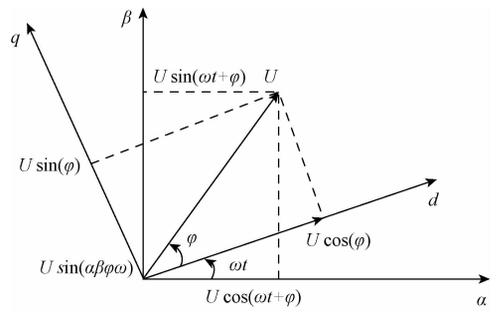


图 2  $\alpha\beta$  坐标系和 dq 坐标系转换

响应变差,不能满足电压暂降的实时性检测。

针对上述问题,本文提出了一种新的基于 Hilbert 变换的电压暂降检测方法,该方法的核心思路是:通过 Hilbert 变换的相频特性可得,信号序列的正相成分经过 Hilbert 变换后会发发生相移,与初相位相比延迟  $90^\circ$ 。由上述分析可知,在基于 dq 变换的电压暂降检测方法中, $U_\alpha$  分量是通过  $U_\beta$  分量延迟  $90^\circ$  构造获得。将 Hilbert 变换的相频特性应用到本文提出的新检测方法中,即对  $U_\beta$  分量进行 Hilbert 变换,从而得到该相电压在  $\alpha$  轴上的分量  $U_\alpha$ 。

具体算法如下,令  $U_\beta = U \sin(\omega t + \varphi)$ ,对  $u_\beta$  做 Hilbert 变换,由 Hilbert 变换特性可知,相位延迟  $90^\circ$ ,得到  $\alpha$  轴分量,即  $u_\alpha = H(u_\beta) = U \cos(\omega t + \varphi)$ 。从而可同时获得  $\alpha$ 、 $\beta$  轴分量  $U_\alpha$  和  $U_\beta$ 。接着通过形态滤波器得到直流成分  $U_{d0}$  和  $U_{q0}$ 。最后由式(11)即可获得电压的幅值和相位变化。图(3)为本文检测方法原理框图。

本文方法改进了单相 dq 变换法中需要延迟  $90^\circ$  的缺点,在没有延迟的情况下,就可得到  $\alpha\beta$  坐标系下的两个分量。不仅提高了检测的动态性,也避免了出现短时扰动现象,使检测结果更加准确。

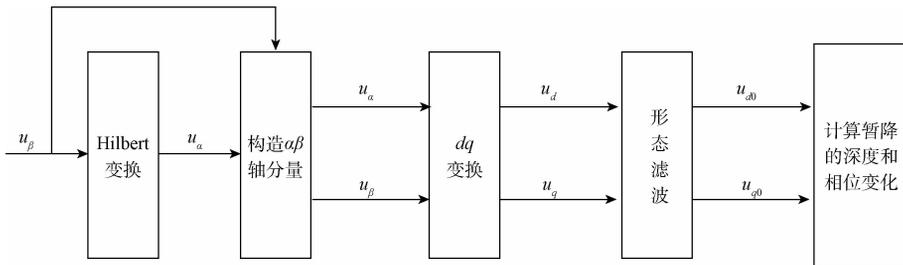


图 3 电压暂降检测新方法原理

综上所述,本文提出的电压暂降检测方法的主要步骤如下:

- 1) 将收集到的某相电压数字序列  $y(n)$  作为  $\alpha\beta$  坐标系下  $\beta$  轴的分量;
- 2) 对信号进行 Hilbert 变换,即得到  $\alpha$  轴的分量;
- 3) 根据式(10),将  $\alpha$  和  $\beta$  轴分量转换到 dq 旋转坐标系中;
- 4) 由数学形态滤波器,得到 dq 坐标系电压分量中的

直流成分  $U_{d0}$ 、 $U_{q0}$ ;

- 5) 根据式(11),计算得到电压暂降的幅值以及相位。

#### 5 仿真与分析

##### 5.1 理想电压暂降波形检测仿真分析

本文利用 MATLAB 软件对设计的方法进行仿真,同时与传统 dq 变换法进行对比。仿真中选择 10 个左右周期的电压波形进行分析,设置相电压的有效值为 220 V,频

率为 50 Hz,在 0.06~0.16 s 内发生单相电压接地故障,暂降幅值为 50%,暂降发生时产生 30°的相位跳变。

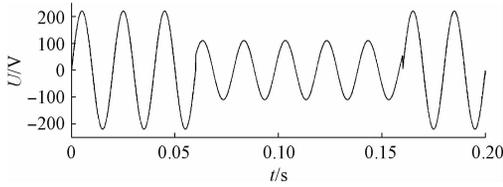


图 4 理想电压暂降波形

图 5 为 3 种不同电压暂降幅值检测方法的比较。(a) 为瞬时  $dq0$  法, (b) 为  $90^\circ$  延迟法, (c) 为本文提出的 Hilbert 变换法。

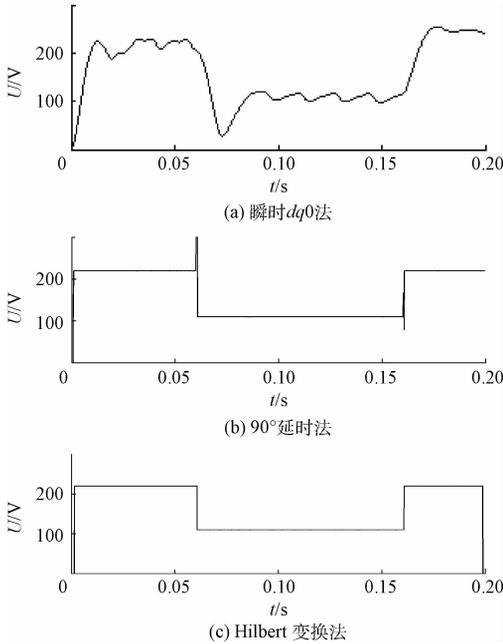


图 5 电压暂降幅值直接检测结果

由图 5 可以看出,瞬时  $dq0$  法,可以较为准确地检测到电压暂降的幅值。但该方法通过延迟角度构造三相电压,计算量过大,会造成检测的延迟,同时无法给出精确的暂降起止时刻以及发生的相位跳变。

延时  $90^\circ$  法,对暂降的幅值和相位跳变检测较精确,同时计算量较小。但延迟大,实时响应性能不够好。

本文方法,继承了  $90^\circ$  延时法的优点,检测精度高,计算量小,同时有着更快的动态响应,提高了检测的实时性。

表 1 3 种检测方法特点对比

| 类别             | 暂降幅值 | 相位跳变 | 延迟角度 | 计算量 |
|----------------|------|------|------|-----|
| 瞬时 $dq0$ 法     | 能    | 不能   | 60   | 大   |
| $90^\circ$ 延时法 | 能    | 能    | 90   | 较小  |
| Hilbert 法      | 能    | 能    | 小角度  | 小   |

### 5.2 含谐波的电压暂降波形检测仿真分析

仿真中设置采样频率为 12.8 kHz,即一个周期的采样点为 256。由于实际电网中的电压信号通常含有谐波成分和噪声,为了更加准确的测得电压暂降特征值,需要加低通滤波器进行滤波。传统  $dq$  变换检测法通常选用二阶 Butterworth 滤波器,截止频率为 500 Hz。本文改用形态滤波器,根据上文的设计选择长度为 60 的直线型结构元素。

仿真模型中电压的信号基本参数与理想波形时一样,同时加入谐波成分。含有谐波成分的电压暂降原始波形图如下图 6 所示。

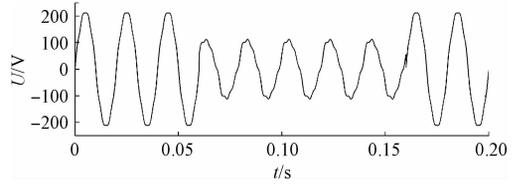


图 6 含谐波的电压暂降波形图

图 7 为未加低通滤波器滤波的原始电压信号暂降幅值与相位跳变检测波形。采用  $90^\circ$  延时法结合 Butterworth 滤波器与采用 Hilbert 变换结合形态滤波器的电压暂降幅值和相位检测结果分别如图 8 和图 9 所示。

从图 7 可见,在未加低通滤波器。直接检测  $\alpha\beta$ - $dq$  变换后的暂降幅值与相位,存在非常显著的跳动,检测精确度差,同时在电压暂降开始和结束时发生了较为明显的“过冲”现象。

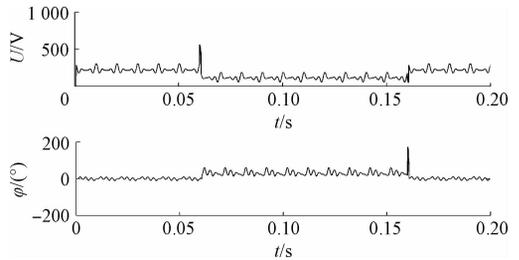


图 7 原始幅值和相位检测

从图 8 和图 9 可见,采用  $90^\circ$  延时法结合 Butterworth 滤波器与采用 Hilbert 变换结合形态滤波器的两种方法都可以大致测得电压暂降的幅值变化以及相位跃变。但通过图 8 可看出  $90^\circ$  延时法的检测结果在暂降的起止时刻仍存在一定的扰动,而本文方法利用 Hilbert 变换特性实现了检测的同步性。

同时可以看出,采用传统 Butterworth 滤波器延时较长,幅值检测精确度稍差,会有一定的误差;而形态滤波器延迟短,数据平稳,误差小,扰动幅度较小,可以精确测得暂降的起止时间,所以本文设计的形态滤波器在电压暂降检测上效果要好于常用的 Butterworth 滤波器。

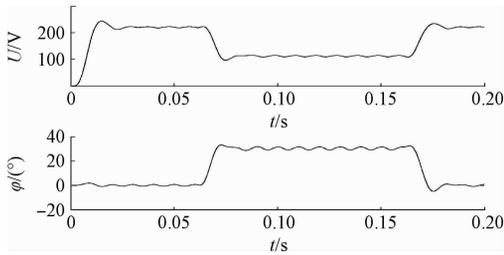


图 8 90°延时法幅值和相位检测

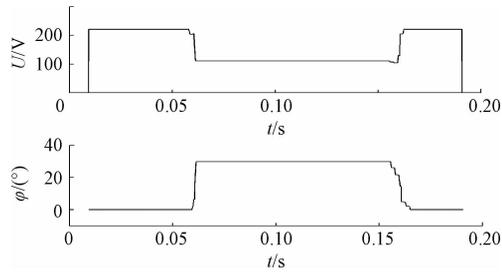


图 9 Hilbert 法幅值和相位检测

## 6 结 论

本文提出的电压暂降检测方法,利用 Hilbert 变换相移 90°的特性,同时得到  $\alpha\beta$  坐标系的两个分量,避免了延时的发生,相对于 90°延时法有更快的动态响应,形态滤波运算速度快,数据处理窗短,设计的形态滤波器应用于电压暂降检测中滤波效果要好于 Butterworth 滤波器。同时应用两者,不仅提高了检测的准确度和响应时间,而且对动态电压的恢复与补偿有很大的实际意义。

## 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.
- [2] 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.
- [3] 李圣清. 电能质量治理技术及应用[M]. 北京:科学出版社,2014.
- [4] 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.
- [5] 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.

- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [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.
- [12] 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.
- [13] 赵昭,刘利林,张承学. 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.
- [14] 金显吉,佟为明,卢雷. 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):47-52.
- [15] 丁宁,徐永海,肖湘宁. 基于 p-q-r 变换和数学形态滤波的电压暂降检测算法[J]. 电力自动化设备,2011,31(3):89-93.

## 作者简介

许伟梁,1993 年出生,硕士研究生,主要研究方向为电能质量分析、电力电子与电力传动。

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

魏超,1992 年出生,硕士研究生,主要研究方向为电力电子技术、光伏并网发电及逆变器控制。