# 基于形态滤波器预滤波的电压扰动检测方法

牛胜锁1,程博1,李金博1,吕林飞1,伏修来2

(1.华北电力大学 电气与电子工程学院,河北 保定 071003;

2. 国网浙江电力公司 宁波供电公司,浙江 宁波 315000)

摘要:提出一种基于数学形态学滤波和求导法 dq 变换的电压扰动检测方法。首先为了减小待检测信号中脉冲、谐波等多种噪声对检测结果的干扰,利用自适应理论构建一种复合形态滤波器对含噪待检测信号进行预处理,然后利用多重直线形态滤波器改进的求导法 dq 变换对预处理后电压信号进行电压扰动检测,以快速准确地检测出待测电压的幅值、相位。搭建仿真模型,分别对自适应复合形态滤波器滤波流程、自适应复合形态滤波器性能、多重直线形态滤波器改进的求导法 dq 变换电压扰动检测性能进行仿真分析。最后搭建电压扰动发生硬件平台,对所提方法在扰动情况下的电压检测能力进行验证。

关键词:求导法 dq 变换;自适应复合形态滤波器;电压扰动检测;幅值相位

中图分类号:TM933 文献标识码:A DOI:10.19457/j.1001-2095.dqcd23534

#### Voltage Disturbance Detection Method Based on Morphological Filter Pre-filtering

NIU Shengsuo<sup>1</sup>, CHENG Bo<sup>1</sup>, LI Jinbo<sup>1</sup>, LÜ Linfei<sup>1</sup>, FU Xiulai<sup>2</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University,
Baoding 071003, Hebei, China; 2. Ningbo Power Supply Company, State Grid
Zhejiang Electric Power Company, Ningbo 315000, Zhejiang, China)

Abstract: A voltage disturbance detection method based on mathematical morphological filtering and derivation dq transformation was proposed. Firstly, in order to reduce the interference of pulses, harmonics and other noises in the signals to be detected, a composite morphological filter was constructed based on adaptive theory to preprocess the noisy signals to be detected. Then the voltage disturbance of the preprocessed voltage signal was detected by the improved derivation dq transformation of multiple linear morphological filter, so that the amplitude and phase of the voltage to be measured can be detected quickly and accurately. The simulation model was built, the filtering flow of adaptive composite morphological filter, the performance of adaptive composite morphological filter, and the voltage disturbance detection performance of derivation dq transformation method improved by multiple linear morphological filter were analyzed. Finally, a voltage disturbance generation hardware platform was built to verify the voltage detection capability of the proposed method in the case of disturbance.

Key words: derivation dq transformation; adaptive composite morphological filter; voltage disturbance detection; amplitude and phase

随着社会的发展,电网中敏感负荷的数量越来越多,对电网电能质量要求也越来越高,故电能质量问题越来越受到重视。在生产生活中,启动大容量电机、用电设备故障瞬间经常伴随着电压暂降、电压突升、电压相位跳变等电能质量问题<sup>[1]</sup>。

国内外众多学者致力于研究电压扰动检测

问题,现阶段均方根值检测法、快速傅里叶变换 (fast Fourier transform,FFT)法、峰值电压法、变换 法、小波变换法、缺损电压法等是电压检测的主流。其中,均方根值检测法、缺损电压法不能很明确地给出电压变化的起止时刻,也不能反应相位跳变;小波变换法的数据处理量比较大,在现阶段处理这些数据过于复杂;FFT法存在电压突

**基金项目:**国家重点研发计划项目(2017YFB0902901)

作者简介: 牛胜锁(1980—), 男, 博士, 讲师, Email: niushengsuo@163.com

通讯作者:程博(1995—),男,硕士研究生,Email:328875933@qq.com

变时不能保证半波对称的缺点;峰值电压法虽然 实现简单,但是存在检测过程中时延过大的缺 点<sup>[2]</sup>。借助 abc-dq 坐标变换的 dq 变换法可有效解 决以上问题,dq 变换电压检测法是一种基于瞬时 无功理论的三相电压扰动检测法,但实际系统中 三相故障发生的概率比较小,大多数的故障属于 单相故障,因此采取 dq 变换法对单相电压故障进 行检测有着非常重要的意义<sup>[3]</sup>。

文献[4]提出对待检测的单相电压延迟60°或 者90°构造虚拟三相电压后,使用abc-dq坐标变 换来检测单相电压,此方法虽然能检测单相电 压,但在构造虚拟三相电压的过程中,人为引入 了信号延迟,影响了检测的实时性。文献[5]提出 了一种无时延的 dq 变换电压检测法,通过对待检 测单相电压求导,来构造虚拟三相电压,解决了 人为引入时延的问题,很大程度上增强了检测的 实时性,但由于该方法中使用了传统 butterworth 低通滤波器,时延问题没有彻底解决。在相电压 求导法的基础上,用一个直线形态滤波器代替传 统的 butterworth 低通滤波器的改进求导法电压扰 动检测法,理论上实时性问题得到了解决师。实 际的电压检测环境中,故障发生的同时,往往待 检测电压中含有大量噪声和谐波的干扰,在这种 情况下,如仅采用一个直线形态滤波器来代替 butterworth 低通滤波器,不对噪声电压信号进行 预处理,噪声将会干扰测量结果,导致测量结果 存在精度差的问题。

为了使电压检测精度更高,本文基于对含噪声电压信号预处理和求导法 dq 变换电压检测,提出一种自适应复合形态滤波器对待检测含噪声电压信号预处理,用多重直线形态滤波器改进求导法 dq 变换对预处理后电压信号进行电压扰动检测方法。首先确定复合形态滤波器结构元素的最优幅值和长度,待幅值与长度确定后,再确定复合结构元素最优组成比例,然后对待检测电压有针对地进行消除噪音预处理,最后通过采用多重直线形态滤波器改进求导法 dq 变换对单相电压扰动进行检测。

### 1 自适应复合形态滤波原理

#### 1.1 形态学基本运算

数学形态学是建立在积分几何论基础上的 一门与现实生活联系紧密的学科,在数字图像处 理领域被广泛使用。在信号处理中,利用结构元 素("探针")连续不断的移动来收集并处理信号的信息,根据探针的不同类型对信号全局或局部的特征进行筛选处理,以达到信号处理的目的。

电力信号具有一维的特点,在一维形态学信号处理中有以下数学形态学变换:

设f(n)是待处理的一维多值信号,其定义域为D[f]={0,1,2,3,···,N};结构元素由g(x)组成,其定义域是D[g]={0,1,2,3,···,P};其中,P<N且都为整数。膨胀腐蚀的具体数学定义如下:

$$(f\Theta g)(n) = \min \{f(n+x) - g(x)\} \qquad (1)$$

$$(f \oplus g)(n) = \max\{f(n-x) + g(x)\}$$
 (2)

在膨胀和腐蚀的基础上,我们又引出了闭运算、开运算,其定义分别为

$$(f \bullet g)(n) = (f \oplus g \Theta g)(n) \tag{3}$$

$$(f \circ g)(n) = (f \Theta g \oplus g)(n) \tag{4}$$

### 1.2 复合形态滤波器原理

结构元素是信号处理的"探针",对形态滤波器的滤波效果起着决定性作用,目前还没有一套成熟的方案来定量选择结构元素,只能根据经验来选取结构元素形状<sup>[7]</sup>。

电网电压信号为余弦形,信号中的白噪声可以很好地被结构元素为余弦型的形态滤波器滤除,同时电网中的脉冲信号可以很好地被结构元素为三角型的形态滤波器滤除<sup>[8]</sup>。两种形状组成的复合结构元素较单一形状结构元素形态滤波效果更好,且复合结构元素中,各形状的比例也对滤波效果有一定影响<sup>[8]</sup>。

采用三角型结构元素和正弦型结构元素按 照一定比例组成复合结构元素如图1所示。

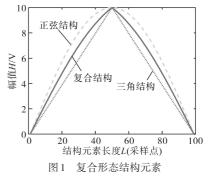


Fig.1 Compound morphological structural elements

## 1.3 滤波效果的衡量

噪声均方差定义为

$$y_{\text{MSE}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} [y(n)_i - u(n)_i]^2$$
 (5)

式中: $u(n)_i$ 为形态滤波后信号; $y(n)_i$ 为无噪音信号;n为信号总采样点数; $y_{MSE}$ 为噪声均方差。

噪声均方差越小,说明滤波效果越好。

噪声信噪比定义为

$$y_{\rm SNR} = 10\log(P_{\rm s}/P_{\rm n}) \tag{6}$$

式中: $P_s$ 为信号功率; $P_n$ 为形态滤波后的含噪声信号功率; $Y_{SNR}$ 为信噪比。

信噪比越大,说明滤波效果越好。

### 1.4 自适应复合形态滤波器信号预处理原理

实际电网中待检测信号往往含有噪声,在短时间内其特征是不变的<sup>191</sup>。为了保证电压扰动检测的实时性,将待检测含噪声信号按时间进行分段处理,本时间段通过信噪比和均方差两个参数,确定下一时间段的形态学滤波器的最优结构元素参数,每个时间段自适应复合形态学滤波流程如图2所示。

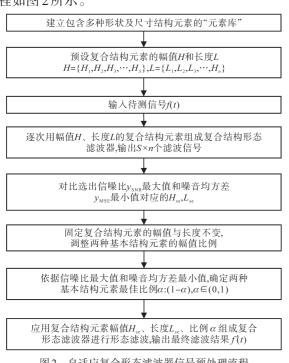


图 2 自适应复合形态滤波器信号预处理流程 Fig.2 Signal preprocessing flow of adaptive composite morphological filter

### 2 改进电压扰动检测原理

### 2.1 无时延求导法电压检测原理

 $\alpha, \beta$  轴分别是坐标系中两个静止的坐标轴,d, q 轴分别为在静止坐标系中以 $\omega$  角速度旋转的旋转坐标轴,两者的电压关系如下:

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix}$$
(7)

单相电压的  $U_d$ ,  $U_q$ 通过低通滤波器滤波后为  $U_{d0}$ ,  $U_{q0}$ (为了避免传统低通滤波器引入的测量滞后问题, 提出了直线型形态滤波器来代替低通滤

波器),再通过下式得到瞬时电压有效值U与瞬时相位 $\varphi$ :

$$\begin{cases} U = \sqrt{U_{d0}^2 + U_{q0}^2} \\ \varphi = \arctan(U_{q0}/U_{d0}) \end{cases}$$
 (8)

式(7)选择了用差分求导 $U_{\beta}$ 来构造 $U_{\alpha}$ ,如下式所示:

$$\begin{cases} U_{\beta} = U_{m} \sin(\omega t + \varphi) = U_{s} \\ U_{\alpha} = U_{m} \cos(\omega t + \varphi) = U_{s}'/\omega \end{cases}$$
 (9)

式中: $U_m$ 为待检测电压信号的幅值; $U_s$ 为待检测单相电压信号: $U'_s$ 为对 $U_s$ 的求导结果。

实际电压采集的是离散信号,而求导算法只能对连续模拟信号处理。故需对离散信号进行差分处理,如下式所示:

$$U_{s}' = \frac{U_{s}(t+T) - U_{s}(t-T)}{2T} \tag{10}$$

理论上当电压采样周期 T 在无限小的情况下,差分结果近似等于理想电压波形求导结果。可以采用提高采样频率的方法来减少测量误差。

### 2.2 改进求导法 dq 变换电压扰动检测原理

自适应复合形态滤波器预滤波后的待检测信号经过求导差分计算,将会使残留噪声放大,为了消除残留噪声,对 $\alpha\beta$ -dq变换后的直流信号采用直线型形态滤波器来消除其含有的残留的谐波畸变信号。但在含有较多残留的谐波畸变的直流信号中,一次直线型形态滤波不能完全消除谐波畸变,故提出分别对计算出的相位 $\varphi$ 、幅值U再次进行直线型形态滤波,以进一步消除谐波畸变,具体流程如图3所示。

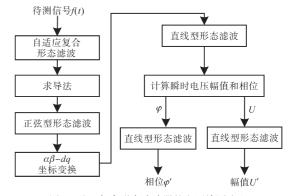


图 3 基于复合形态滤波器的电压检测流程 Fig. 3 Voltage detection flow based on composite morphological filter

# 3 实验仿真分析

# 3.1 自适应复合形态滤波器滤波流程仿真分析 利用 Matlab/Simulink 平台产生幅值为 310 V、

频率为50 Hz的电压,设置采样频率为12.8 kHz, 信号共有 2 561 个采样点,从第 512 个采样点发 生跌落至70%幅值的电压无噪信号,在信号上添 加20 dB的高斯白噪声和少量脉冲信号生成含噪 声待检测信号,含噪待检测信号如图4所示,图中 信噪比为19.358 5 dB,均方差为103.128 5。

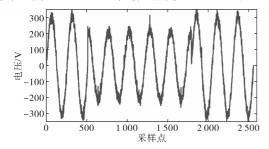


图4 含噪声待检测信号

Fig.4 Signal with noise to be detected

经验表明,结构元素幅值一般设置为信号幅 值的1/50~1/10<sup>[7]</sup>。为此根据自适应复合形态滤波 器去噪流程(见图2),预设复合结构元素可能的幅 值为H={6,12,18,24,30},预设复合结构元素可能 的长度为L={5,7,9,11,13,15,17,19,21,23,25}, 复合结构元素中三角型结构元素和余弦型结构 元素的比例为1:1,对含噪声电压信号(见图4)进 行检测,计算对比多组信号信噪比ysus和均方差 γ<sub>MSE</sub>,选出复合形态滤波器最优幅值和长度。不 同高度和长度下输出信号信噪比ysnR和均方差  $y_{MSE}$ 分别如图 5、图 6 所示。

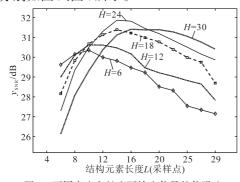


图 5 不同高度和长度下输出信号的信噪比 Fig.5 Signal-to-noise ratio of output signals with different heights and lengths

在图 5、图 6 中, 当幅值 H=24, 长度 L=13 时, 信噪比 y<sub>SNR</sub> 和均方差 y<sub>MSE</sub> 分别取最大值和最小 值,故选出复合结构元素所对应的最优幅值H=24和最优长度L=13。

当确定复合结构元素的幅值 H=24、长度 L= 13后,进一步调整复合结构元素中余弦型和三角 型各结构元素占比,统计不同占比情况下过滤后 信噪比与均方差,如表1所示。根据信噪比和均

方差最优原则,当余弦型占比40%、三角型占比 60%时,对应的复合形态滤波器滤波效果最好。

综上可知,对该含噪信号自适应复合形态滤 波器进行滤波时,选用幅值为24、长度为13、余弦 型和三角型占比为40%:60%的结构元素,滤波 效果最好。

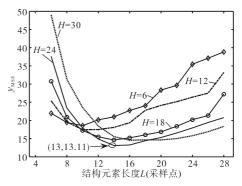


图 6 不同高度和长度下输出信号的均方差 Fig.6 Mean square deviation of output signal

with different height and length

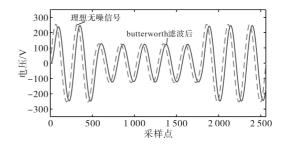
## 表 1 复合结构元素余弦型和三角型比例统计 Tab.1 Proportional statistics of cosine and triangle of

composite structural elements

余弦型和三角型占比	信噪比y <sub>SNR</sub> /dB	均方差y <sub>MSE</sub>
10%:90%	30.122 1	14.872 5
20%:80%	30.760 1	14.982 4
30%:70%	31.152 0	13.612 5
40%:60%	31.917 2	13.053 5
50%:50%	31.864 3	13.122 1
60%:40%	31.175 8	13.463 2
70%:30%	30.853 1	14.133 5
80%:20%	30.273 5	14.562 7
90%:10%	29.992 5	14.962 5

### 3.2 自适应复合形态滤波滤波性能验证

为了验证自适应复合形态滤波器滤波效果, 分别用截止频率为100 Hz的传统 butterworth 低通 滤波器、三角型形态滤波器、占比40%:60%的自 适应复合形态滤波器对图4含噪声待检测信号进 行了滤波。仿真结果如图7、图8所示。



截止频率为100 Hz的低通滤波器滤波效果 Fig.7 Filtering effect of low-pass filter with cutoff frequency of 100 Hz

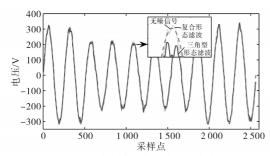


图 8 自适应复合形态滤波器滤波效果

Fig.8 Filtering effect of adaptive composite morphological filter

滤波前含噪声信号的信噪比为19.358 5 dB, 滤波后三种滤波器滤波效果统计如表2所示。 butterworth低通滤波器滤波后波形见图7,由于产 生了36个采样时长的延迟作用,导致滤波实时性 比较差,严重影响以后电压检测的实时性;三角 型滤波器滤波后信噪比为29.425 2 dB,滤波后的 信号噪声有了明显消除,但在滤波处理电压波形 峰值信号时,峰值信号发生畸变,见图8;三角型 与余弦型占比为40%:60%组成的自适应复合形 态滤波器滤波后的信噪比为31.622 0 dB,能够高 效实时地对噪声信号进行滤除。

综上可知,自适应复合形态滤波器更加适用 于含噪电压检测信号的预处理。

#### 表2 三种滤波器滤波效果比较

Tab.2 Comparison of filtering effects of three kinds of filters

滤波器名称	实时性	信噪比y <sub>SNR</sub> /dB
butterworth滤波器	滞后36个采样点	5.324 9
三角型形态滤波器	滞后5个采样点	29.425 2
自适应复合形态滤波器	滞后5个采样点	31.622 0

#### 3.3 多重直线型形态滤器改进求导法性能验证

为了验证多重直线形态滤波器改进求导法的检测性能,对图4所示的含噪声信号用自适应复合形态滤波器预处理后,仿真比较三种方法下的求导法 dq 变换电压幅值的检测结果。方法一是在 dq 坐标变换后不采用任何滤波器对 dq 变换结果进行处理,直接进行计算;方法二是在 dq 坐标变换后,依据传统方法,使用 butterworth 低通滤波器对其滤波结果进行处理,处理后的结果进行幅值计算;方法三是采取多重形态滤波器改进求导法 dq 变换,依照图 3 所示流程,采取多重直线形态滤波器对 dq 变换后的结果进行处理。三种方法仿真结果如图 9 所示。

由图9可知,虽然方法一实时性最好,但幅值结果噪声大,准确性差,方法二采用截止频率为100 Hz的 butterworth 低通滤波器进行滤波,虽准确性得到提升,但检测结果会滞后约50个采样

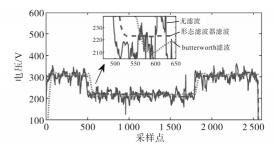


图9 不同滤波器在求导法 dq 变换中检测结果

Fig.9 Detection results of different filters in dq derivation method 点,实时性不好。在方法三中,采用多重长度为65、幅值为0的直线型形态滤波器来改进求导法dq变换后的数据,在仿真中,电压跌落发生后大约经过5个采样点,检测幅值达到理论检测值221.3 V,满足检测误差±3%的要求。

由以上仿真可知,在对含噪声电压信号进行 检测时,采用多重直线型形态滤器改进求导法来 进行检测,检测实时性和准确性更佳。

### 4 实验验证

为了实际验证本文所提方法效果,利用NF公司WF1973可编程电源和线性负载搭建电压扰动发生硬件平台,如图 10 所示,通过日本横河WT3000功率分析仪采集电压数据。通过可编程电源,产生正常电压幅值为142 V,在扰动发生时,幅值为50 V、相位为90°的跳变,且扰动前后伴随一定的噪声干扰,如图11所示。

通过功率分析仪装置对电压数据进行采集, 再采取不同方法对数据进行处理,得到所采电压 的幅值,如图12所示。



图 10 电压跌落发生采样装置硬件

Fig.10 Hardware of sampling device for voltage drop occurrence



图 11 电压跌落信号采样截图

Fig.11 Sampling screenshot of voltage drop signal

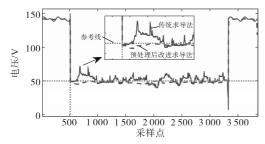


图 12 电压幅值检测结果

Fig.12 Result of voltage amplitude detection

通过图12所示检测结果分析得出,不对电压信号进行预处理,仅采用传统形态学滤波求导法对幅值和相位进行检测,受噪声影响,检测结果中毛刺较多,幅值的最大测量误差为42.2%,噪声极大地影响了检测的准确性,而提出的自适应形态滤波器预滤波和改进求导法相结合,在进行幅值相位检测时,幅值的最大测量误差为4.7%,很大程度上避免了电压所含噪声信号对测量结果的影响,提高了检测准确性。

综上可知,在噪声环境下的电压扰动检测中,自适应复合形态滤波器预滤波和改进求导法相结合优于传统检测方法,本文所提的方法得到验证。

### 5 结论

在传统形态学滤波器的基础上,提出了一种自适应复合形态滤波器,该滤波器对含噪声待检测电压信号预处理后,很大程度可以避免待检测电压信号中噪声对检测结果的影响。基于传统求导法 dq变换,还提出了采用多重直线型形态滤波器的改进求导电压检测法,该法与自适应复合形态滤波器预滤波处理相结合,可以有效提高电压检测准确性及实时性。基于自适应复合形态滤波器和改进求导法 dq变换的电压扰动检测法,原理简单,方法简便,利于工程上实现。通过仿真实验验证了在电压扰动情况下该方法具有很好的准确性及实时性。

#### 参考文献

- [1] 林海雪. 电能质量指标的完善化及其展望[J]. 中国电机工程学报,2014,34(29):5073-5079.
  - Lin Haixue. Perfecting power quality indices and prospect[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29):5073-5079.
- [2] 陈国栋. 动态电压恢复器电压跌落检测算法与控制技术综

述[J]. 电气工程学报,2015,10(5):20-33.

Chen Guodong. A survey on detection and control of dynamic voltage restorer[J]. Journal of Electrical Engineering, 2015, 10 (5); 20–33.

- [3] 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 Xiangning, Xu Yonghai, Liu Hao. Research on the detection method of voltage sag characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22 (1); 19–22.
- [4] 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 Guoliang, Liu Baozhi, Xiao Xiangning, 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.
- [5] 李天博,顾勇,陈坤华.基于复小波变换和Teager能量算子的电压跌落检测方法研究[J].电测与仪表,2020,57(4):43-48
  - Li Tianbo, Gu Yong, Chen Kunhua. Research on voltage sag detection method based on complex wavelet transform and Teager energy operator[J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2020, 57(4):43–48.
- [6] 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 Ping, Li Qingmin. Design and analysis of mathematical morphology-based digital filters[J]. Proceedings of CSEE, 2005, 25(11):60–65.
- [7] 何振梁. 智能应急电源单相电压跌落检测技术研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2019.
  - He Zhenliang. Research on single-phase voltage drop detection technology of intelligent emergency power supply[D]. Jilin: Northeast Electric Power University, 2019.
- [8] 周军,伏修来,李曙光. 基于求导法的 dq 变换结合形态学滤波的电压暂降检测方法[J]. 电测与仪表,2020,57(3):19-25. Zhou Jun, Fu Xiulai, Li Shuguang. Single phase voltage sag detection method based on derivation αβ-dq transformation combined with morphological filter[J]. Electric Measurement and Instrumentation, 2020, 57(3):19-25.
- [9] 周军,类腾辉,何振梁,等.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[J].电力系统保护与控制, 2021,49(1):148-155.
  - Zhou Jun, Lei Tenghui, He Zhenliang, et al. Voltage sag detection method based on the delayed small angle method and an adaptive composite morphological filter[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49 (1):148–155.

收稿日期:2021-05-21 修改稿日期:2021-06-28