

# 基于可去间断点的连续采样飞点检测算法

吴文举, 占捷文

(长园深瑞继保自动化有限公司, 广东 深圳 518057)

**摘要:** 电力系统电气量采样中的飞点数据是引起保护误动的主要原因之一。目前, 国内外对于飞点等异常采样的研究较少, 且这些异常采样检测算法存在着针对性不强、灵敏度不高等不足。深入研究飞点产生的原因及其特征, 提出一种基于连续函数可去间断点的飞点检测算法, 并给出了灵敏且自适应的检测门槛, 运用本算法能够迅速、准确地检测出飞点数据。另外, 还提出基于正弦函数的预测修复算法, 检出飞点后运用该修复算法可将飞点修复到正常值, 不需闭锁保护, 完全消除了飞点对保护的影响。仿真实验结果表明, 所提算法是可行的。

**关键词:** 智能变电站; 飞点; 异常采样; 可去间断点; 正弦预测

## A flying spot detection algorithm for continuous sampling based on removable discontinuous points

WU Wenju, ZHAN Jiewen

(CYG Sunri Co., Ltd., Shenzhen 518057, China)

**Abstract:** Flying spot results in a lot of protection malfunctions. Few researches are focusing on the flying spot. In practice, most abnormal samples detection algorithms are with ambiguous pertinence, insensitivity, ambiguous threshold and easy wrong ruling. Some detection algorithms only carry out simple latch-up protection, which decrease the malfunction rate while delay the protection action time. To solve these difficulties, a new sampling flying spot algorithm is proposed, which is based on removable discontinuous spot in continuous function. At the same time, a remedy algorithm based on predicting sine curve is proposed. The proposed algorithm can detect the flying spot effectively, and the remedy sampling algorithm can correct the flying spot without latch-up protection. The proposed algorithms can remove the malfunctions for flying spot. The simulation results show the proposed algorithms are effective.

**Key words:** smart substation; flying spot; abnormal sampling; removable discontinuous spot; sine prediction

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)04-0018-07

## 0 引言

随着智能变电站的推广及基于智能电网的新型保护原理装置的出现, 接入保护装置的 SV 数量已越来越多<sup>[1-7]</sup>。电力系统电气量采样飞点数据(连续光滑的电气量采样曲线上的异常采样数据, 以下简称“飞点”)已经成为造成保护误动的主要原因<sup>[8-9]</sup>。因此必须对飞点采样值进行实时判断, 避免飞点数据引起保护装置误动、系统误操作等情况发生。

保护的快速动作要求飞点检测延时必须很短, 但是要实现在较短的检测数据窗内准确区分飞点采样数据和系统故障时的正常暂态采样值, 有很大的难度。由于智能电网的建设时间还不长, 目前有关飞点等异常采样的检测方法较少, 同时这些方法均存在一些不足, 如针对性不强、灵敏度不高、门槛

不易整定、数据窗要求较长、实时性差、无法应用于快速保护、容易误判等<sup>[10-18]</sup>。检出异常采样后也仅仅是简单闭锁保护, 这样处理虽然降低了异常采样导致误动的机率, 却容易造成发生故障时保护动作速度变慢。

本文根据智能电网中飞点产生的原因及其特征, 提出了基于可去间断点的飞点检测及修复算法, 在最多延时 1 ms 的情况下, 实现对飞点的检测及修复, 消除飞点对保护的影响, 可满足各类保护的動作性能要求。

## 1 算法及方案比较

### 1.1 延长保护动作时间

延长保护动作时间确实可以避免飞点情况下保护误动, 当保护延时大于飞点的持续时间以及全周

傅氏、半周傅氏、半周积分等相关算法的数据窗长度时保护就不会误动。这种方案对于一些对保护动作时间要求不高的保护还是可行的,但对于高电压等级的快速保护,规范要求保护装置在 10 ms 左右就要出口,此时飞点仍处在数据窗内,所以此方案不适合用于高压快速保护。

### 1.2 双 AD 方案

现在规范要求保护装置接收合并单元的双 AD 采样数据,当两路 AD 的采样数据均满足动作要求时保护方能出口,此方案对于只有单路 AD 出错的情况能够可靠地闭锁保护。但是此方案在系统故障时若单路 AD 出现飞点,将导致保护的動作速度变慢;同时对于浪涌干扰,由于两路 AD 采到的数据基本一致,保护将有可能误动。所以此方案也存在一些不足。

### 1.3 采样点判门槛

目前有的保护采用判采样点门槛的方法来提高保护的抗飞点能力,在数据窗内大于一定点数保护方可动作。由于飞点的持续时间不会很长,所以此方案对于一些动作时间不是很快的保护还是适用的。但是却不适用于如母差、线路光差这些在 5 ms 就可以动作的超快速保护,因为 MU 一个采样点异常,经插值同步后将可能出现 3 个异常点,经差分后将出现 5 个异常点,所以这类保护将有可能误动,所以此方案不适用于这类超快速保护。

### 1.4 专用采样处理算法

专用处理算法可以分为模糊算法和精确算法。模糊算法的特点是将输入数据经过一系列计算变换作为输出。如常用的数字滤波算法,其实质就是模拟传统的硬件滤波,用软件算法实现,如遗传算法、神经网络算法等<sup>[10-11,17-18]</sup>,这类算法通常能够大大削弱飞点的幅值,但是通常也会影响飞点附近的正常数据,因此这类算法适用于一些慢速的不灵敏的保护,对于一些以采样点为基础的高灵敏快速保护(如采样值母差,线路采样值光差等),由于其在时间域上的展宽,反而容易造成误动。实际上在传统的保护中曾经出现过一个很大的尖脉冲经硬件回路滤波展宽为 5 ms 的宽脉冲,从而导致保护误动的情况发生。

精确算法是通过一定的算法可以准确判断某个采样点为正常数据还是异常数据的算法,如文献[12-13]中提出的算法及本文提出的算法。这类算法由于针对性强,一般都能取得较好的效果。由于可以精确定位到异常数据点,检出异常点后通常采用闭锁保护或修复该异常点,并且不会影响到正常的数据点,所以一般不会导致保护误动。其中文献[13]

中的方法仅能检测出少数数值较大的点,其检测能力有限。文献[12]其实质是通过二阶差分(左右差分之差实质就是二阶差分)来检测飞点,连续三点二阶差分大于门槛则判中间一点为异常点,对于一个飞点的情况该算法通常能够准确检出。但是,由于飞点左右正常点的二阶差分比飞点的二阶差分要小,而该算法的门槛固定且按最大值考虑,所以该算法对于较小的飞点仍存在灵敏度不足的问题;同时对于高电压等级故障中出现高次谐波的情况,当采值率较低时可能出现误判,如含 10 次及以上谐波的故障波形在每周波 20 点采样时就有可能误判,当然可以通过提高二阶差分的门槛来避免误判,但门槛的提高势必又降低了灵敏度,所以文献[12]算法中的二阶差分门槛不容易取舍。同时文献[12-13]中的算法在检出飞点后也仅仅是简单闭锁保护,这样简单的处理虽然可解决飞点数据导致保护误动的问题,但是容易造成故障时保护动作速度变慢,甚至有发生保护拒动的可能。

## 2 基于可去间断点的飞点判别方法

### 2.1 飞点特征及产生原因

飞点的特征从波形上可以很容易看出,就是一个远离正常采样值的错误数据或持续时间很短的高频或尖脉冲。产生的原因主要有以下三种:

1) 由于电子式互感器和合并单元(MU)通常装在离一次设备较强的强电磁干扰环境中,这无形中增加了设备受干扰出错的几率,其特征为持续时间很短的高频波形或尖脉冲<sup>[8]</sup>。

2) 雷击浪涌干扰也是电力系统的主要干扰源之一,其为持续时间很短、能量很高的单极性尖脉冲<sup>[9]</sup>。

3) 由于 MU 采样数据以通信报文的形式传输,通常需经过交换机或级联等方式接入保护装置,通信中采用 CRC32 校验,CRC32 实质就是一个单向 HASH 函数,由于任何单向 HASH 函数都存在碰撞问题,理论上 CRC32 的碰撞几率为  $1/2^{32}$ ,虽然很小,但随着接入保护装置通信数量和级联数量的增加,保护装置收到错误数据的几率将不可忽视,其特征为一个远离正常采样值的错误数据<sup>[19]</sup>。

其中第一、二点为模拟干扰,由于合并单元通常采用就地安装,二回路电缆长度较传统保护大幅缩短,二次回路的感抗容抗大幅减小,这也削弱了合并单元对模拟干扰的抑制能力,导致 AD 采集到受干扰信号。

### 2.2 基于可去间断点的飞点判别方法

由电力系统理论知道,正常情况下电力系统波形均为分段连续的波形<sup>[4]</sup>,这一特性为判断飞点提

供了理论依据。飞点其值远大于其前后正常采样点，或一个很大的尖脉冲，可以看作是一个点在时间轴上的放大，其特征完全符合数学上对可去型间断点的定义。

若函数  $f(x)$  在  $n$  点满足  $f'_+(n) = f'_-(n)$ ，则函数  $f(x)$  在  $n$  点是连续的；若函数  $f(x)$  在  $n$  点无定义，或  $f'_+(n) = f'_-(n)$ ，但  $\lim_{x \rightarrow n} f(x) = A \neq f(n)$ ，则  $n$  点是可去间断点。式中  $f'_-(n)$ 、 $f'_+(n)$  为  $n$  点的左右极限。

对于离散的采样数据，当采样步长充分小时，其在某点处的左、右导数可用前后相邻采样点差分进行判断，即

$$\begin{aligned} f'_-(n) &\Rightarrow \Delta f(n) = f(n) - f(n-1) \\ f'_+(n) &\Rightarrow \Delta f(n+1) = f(n+1) - f(n) \\ f'_+(n) = f'_-(n) &\Rightarrow f'_+(n) - f'_-(n) = \Delta f(n+1) - \Delta f(n) = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中， $\Delta f(n)$ 、 $\Delta f(n+1)$  为离散函数  $f(x)$  在  $n$ 、 $n+1$  点的差分。

由飞点的特征和数学函数连续性及可去间断点的定义可以得出基于可去间断点的飞点判据如下：

1) 采样在  $n$  点不连续

$$\begin{aligned} f'_+(x) \neq f'_-(x) &\Rightarrow |f'_+(x) - f'_-(x)| \neq 0 \\ &\Rightarrow |\Delta f(n+1) - \Delta f(n)| > \varepsilon_2 \end{aligned} \quad (2)$$

式中， $\varepsilon_2$  为二阶差分门檻。

2) 采样在  $n$  点有突变

$$\begin{cases} |f'_-(n)| \geq \varepsilon_1 \Rightarrow |\Delta f(n)| \geq \varepsilon_1 \\ |f'_+(n)| \geq \varepsilon_1 \Rightarrow |\Delta f(n+1)| \geq \varepsilon_1 \end{cases} \quad (3)$$

式中， $\varepsilon_1$  为一阶差分门檻。

3) 采样在  $n$  点异常突变后立刻恢复正常，表现为左差分值与右差分值大小基本一样，但方向相反。

$$\begin{cases} |f'_-(n)| \geq \beta |f'_+(n)| \Rightarrow |\Delta f(n)| \geq \beta |\Delta f(n+1)| \\ f'_+(n) \times f'_-(n) < 0 \Rightarrow \Delta f(n) \times \Delta f(n+1) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

式中， $\beta$  为左右差分对称系数。

整理式(2)~式(4)，得出飞点综合判据式(5)。

$$\begin{cases} |f'_-(n)| \geq \varepsilon_1 \\ |f'_+(n)| \geq \varepsilon_1 \\ |f'_-(n)| \geq \beta |f'_+(n)| \\ |f'_+(n) - f'_-(n)| \geq \varepsilon_2 \\ f'_+(n) \times f'_-(n) < 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} |\Delta f(n)| \geq \varepsilon_1 \\ |\Delta f(n+1)| \geq \varepsilon_1 \\ |\Delta f(n)| \geq \beta |\Delta f(n+1)| \\ |\Delta f(n+1) - \Delta f(n)| \geq \varepsilon_2 \\ \Delta f(n) \times \Delta f(n+1) < 0 \end{cases} \quad (5)$$

### 2.3 差分门檻计算

此判据的灵敏度主要由一阶差分门檻和采样率

决定，在采样率确定的情况下灵敏度将仅取决于一阶差分门檻  $\varepsilon_1$ 。一阶差分门檻可以简单按最大故障电流来考虑，但这样会降低灵敏度。考虑正弦波形在没有突变情况下，幅值是不变的，如果能够快速计算幅值，利用快速计算幅值来自适应确定一阶差分的门檻，则门檻可以取得比较低，有助于提高灵敏度。

导数算法只需要知道输入正弦量在某一时刻  $t$  的采样值以及该时刻该值的导数，即可算出幅值和相位，下面以电流为例，推导计算过程。其中电流量用式(6)表示。

$$i(t) = I_m \sin(\omega t + \theta) \quad (6)$$

则  $t$  时刻电流的导数为

$$i'(t) = \omega I_m \cos(\omega t + \theta) \quad (7)$$

或

$$\frac{i'(t)}{\omega} = I_m \cos(\omega t + \theta) \quad (8)$$

由式(7)、式(8)，可得

$$I_m^2(t) = i^2(t) + \left(\frac{i'(t)}{\omega}\right)^2 \quad (9)$$

结合装置离散采样数据，可以快速计算出  $n$  点幅值平方  $I_{m(n)}^2$  为

$$I_{m(n)}^2 = i_n^2 + \left(\frac{\Delta i_n}{k}\right)^2 \quad (10)$$

式中： $k = 2 \sin \frac{\pi}{N}$ ，为一阶差分系数， $N$  为每周波采样点数； $i_n$  为当前点采样值， $\Delta i_n = i_n - i_{n-1}$ ，为当前点采样值与上一点采样值的差分。

在已经计算出  $I_m$  的情况下，可以通过下式确定一阶及二阶差分门檻为

$$\varepsilon_1 = \delta_1 k I_{m(n-t)} \quad (11)$$

$$\varepsilon_2 = \delta_2 k^2 I_{m(n-t)} \quad (12)$$

式中： $I_{m(n-t)}$  为前  $t$  点的快速幅值， $t$  为尖脉冲最大上升沿宽度多一点； $k$  为一阶差分系数； $\delta_1$  为一阶差分门檻系数， $\delta_2$  为二阶差分门檻系数， $\delta_1$ 、 $\delta_2$  只需考虑波形畸变即可，正常情况下可分别取 2、10。例如当  $N=80$  点，电流有效值为 1 A 的情况下，该判据的灵敏度(一阶差分门檻)为

$$\varepsilon_1 = \delta_1 k I_{m(n-t)} = 2 \times 2 \times \sin \frac{\pi}{N} \times (\sqrt{2} \times 1) = 0.222 \text{ A} \quad (13)$$

### 3 正弦修复算法

在检出飞点后简单地按闭锁保护方式处理，但故障的时候会使保护动作变慢，考虑到飞点的持续时间很短，通常小于 2 ms，本算法在 1 ms

左右即可检出。所以在检出飞点时可以用前面的正常采样值运用一定的算法把飞点的错误数据修复到正常值, 下面给出正弦预测算法。

由三角函数知道: 若已知  $i(\phi) = I_m \sin \phi$ , 则有

$$\begin{aligned} i(\phi + \Delta\phi) &= I_m \sin(\phi + \Delta\phi) = \\ &= I_m \sin \phi \cos(\Delta\phi) + I_m \cos \phi \sin(\Delta\phi) = \\ &= i(\phi) \cos(\Delta\phi) + i'(\phi) \sin(\Delta\phi) \end{aligned} \quad (14)$$

对于离散采样, 若已知  $i(n)$ , 则有:

$$i(n + \Delta n) \approx i(n) \cos\left(\frac{2\pi}{N} \Delta n\right) + \frac{\Delta i(n)}{k} \sin\left(\frac{2\pi}{N} \Delta n\right) \quad (15)$$

即利用  $n$  点采样  $i(n)$  和  $n$  点采样的差分  $\Delta i(n)$  便可以计算出  $n + \Delta n$  点的采样值  $i(n + \Delta n)$ 。由于采样基本是等间隔并且飞点持续时间很短, 所以  $\cos\left(\frac{2\pi}{N} \Delta n\right)$ 、 $\sin\left(\frac{2\pi}{N} \Delta n\right)$  可以预先算好, 检出飞点后通过与正常采样相差的点数查表求得。

## 4 仿真结果

### 4.1 随机飞点

在每周波 80 点采样的正常波形中随机插入异常采样数据(见图 1), 用于模拟数据传输过程中出错并通过校验的情况。可以看出该算法能够成功检测出飞点数据(见图 2)并成功进行修复, 修复后的波形跟原始采样波形几乎一样(见图 3)。可见该算法对于数据传输过程中出错的检测和修复是有效的。

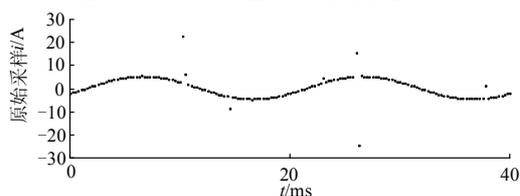


图 1 插入异常数据后的波形

Fig. 1 Oscilloscope with abnormal data

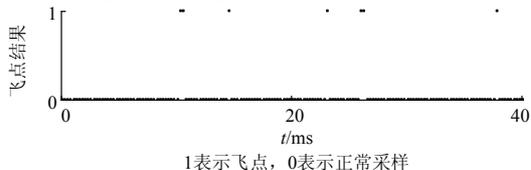


图 2 插入异常数据波形的飞点检测结果

Fig. 2 Flying spot detection results with abnormal data

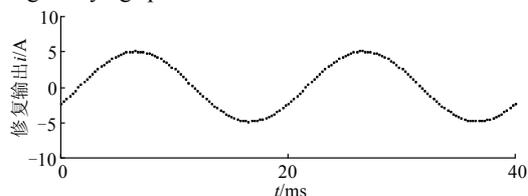


图 3 插入异常数据采用本算法修复后波形

Fig. 3 Oscilloscope remedied by the proposed algorithm

### 4.2 浪涌干扰

在每周波 80 点采样的正常波形中施加浪涌干扰试验波形(见图 4), 用于模拟现场运行中的雷击或其他强电磁干扰。可以看出该算法能够成功检测出尖脉冲(见图 5), 并对 2 ms 宽的主要干扰部分进行成功修复, 修后的波形除含有部分幅值非常小的高频外基本还原真实波形(见图 6), 这样波形对保护的影响非常小, 完全不会导致保护误动。仿真结果说明本算法对浪涌之类尖脉冲的检测是有效的, 且能较好地修复波形。

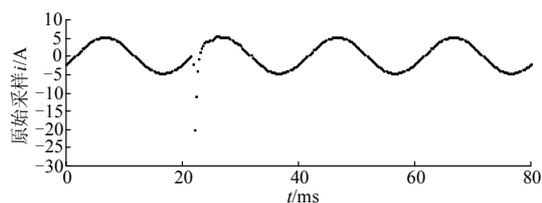


图 4 浪涌干扰后的波形

Fig. 4 Oscilloscope with surge disturbance

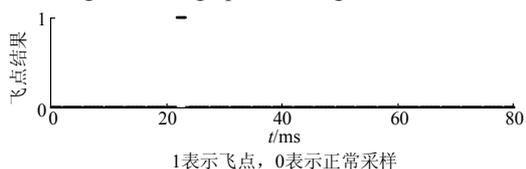


图 5 浪涌干扰波形的飞点检测结果

Fig. 5 Flying spot detection results with surge disturbance

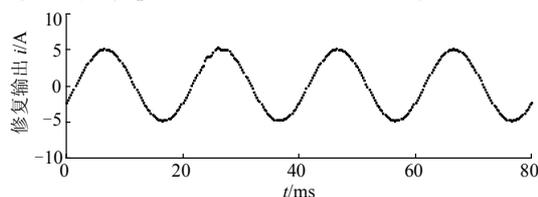


图 6 浪涌干扰经飞点修复后波形

Fig. 6 Oscilloscope remedied by the proposed algorithm

### 4.3 饱和波形

以下为每周波 100 点采样的 RTDS 数模转换性故障 CT 饱和波形(见图 7), 用于模拟现场的故障波形及不同深度的 CT 饱和波形。仿真结果见图 8、图 9。可以看出, 该算法对故障中不同深度的饱和波形均不会误判。

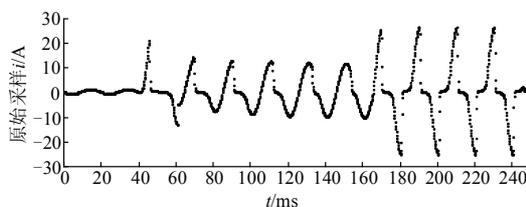


图 7 饱和原始波形

Fig. 7 Saturation oscilloscope

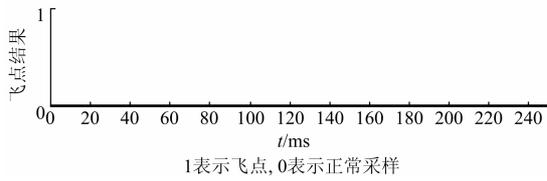


图 8 饱和波形飞点检测结果

Fig. 8 Flying spot detection results for saturation oscillograph

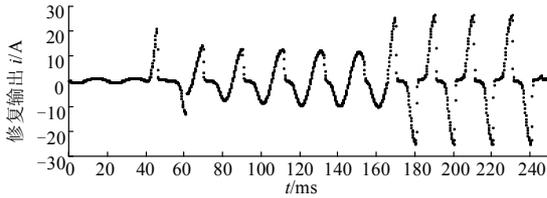


图 9 饱和经飞点修复后波形

Fig. 9 Oscillograph remedied by the proposed algorithm

#### 4.4 故障畸变波形

以下为每周波 80 点采样的 RTDS 数模故障波形 (见图 10), 用于模拟现场故障时波形畸变。仿真结果见图 11、图 12。可以看出, 该算法对故障时波形畸变也不会误判。

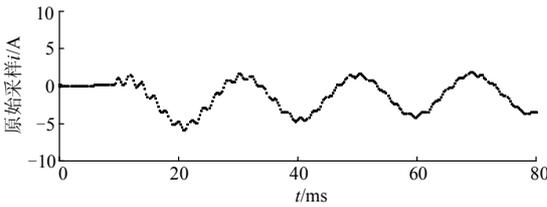


图 10 故障畸变原始波形

Fig. 10 Original oscillograph of malfunction aberration

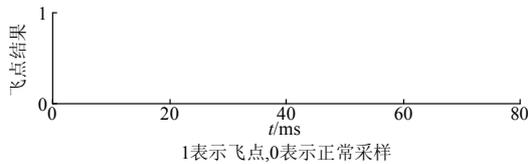


图 11 故障畸变波形的飞点检测结果

Fig. 11 Flying spot detection results with malfunction aberration

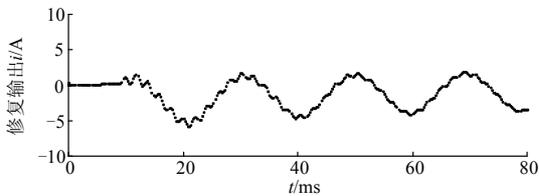


图 12 故障畸变经飞点修复后的波形

Fig. 12 Oscillograph remedied by the proposed algorithm

## 5 应用效果

### 5.1 母差保护

图 13 为截取自某变电站一个半接线母差受飞点影响误动的录波, 图 14 为导出的原始数据波形, 图 15 是经本算法修复后的波形。从图 14 可以看出有 3 个异常数据点, 从图 13 可以看出经差分后差流有 5 个异常数据点。由于该母差保护为采样值差动保护, 数据窗很短, 最快 5 ms 即可动作出口, 并且一个半接线母差没有电压闭锁, 因此飞点数据导致保护误动出口。从图 15 可以看出, 本算法成功地将飞点数据修复到正常值, 从而保护不会误动。

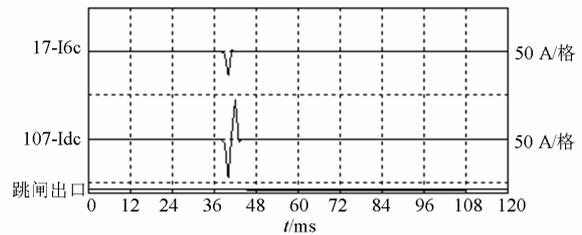


图 13 飞点导致母差误动的装置波形

Fig. 13 Device-oscillograph of the bus differential protection misoperation because of flying point

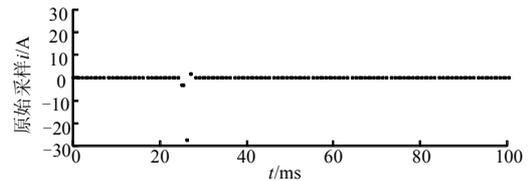


图 14 飞点导致母差误动的原始波形

Fig. 14 Original-oscillograph of the bus differential protection misoperation because of flying point

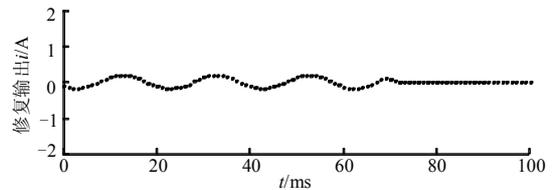


图 15 飞点导致母差误动的修复波形

Fig. 15 Remedied-oscillograph of the bus differential protection misoperation because of flying point

### 5.2 主变保护

图 16 截取自某变电站主变纵差保护受飞点影响误动的录波, 导出的原始数据波形如图 17 所示, 图 18 是经本算法修复后的波形。图 17 显示波形有 3 个异常数据点, 从图 16 可以看出经差分后差流有

5 个异常数据点。由于全周傅氏计算向量是 20 ms 的数据窗, 所以 5 个异常数据点最终会导致 25 ms 内向量计算异常。该主变纵差保护延时为 10 ms 且无电压闭锁, 从而导致保护 10 ms 误动出口。从图 18 可以看出, 本算法成功检测出飞点数据并修复到正常值, 确保保护不会误动。

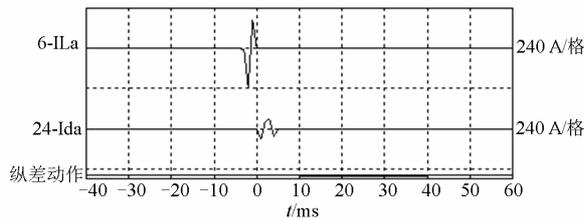


图 16 飞点导致主变差动误动的装置波形

Fig. 16 Device-oscillograph of the transformer differential protection misoperation because of flying point

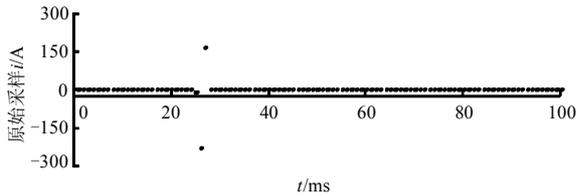


图 17 飞点导致主变差动误动的原始波形

Fig. 17 Original-oscillograph of the transformer differential protection misoperation because of flying point

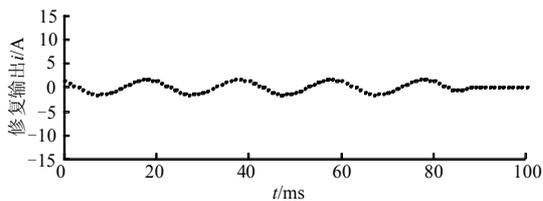


图 18 飞点导致主变差动误动的修复波形

Fig. 18 Remedied-oscillograph of the transformer differential protection misoperation because of flying point

### 5.3 EMC 干扰实验

由于规范要求合并单元能够采集 40 次以上的谐波, 所以合并单元的硬件滤波回路的截止频率就必须做到很高, 相对于传统保护的硬件回路, 削弱了数字化保护的抗干扰能力。在 EMC 浪涌干扰实验中, 未采用相应处理之前, 保护会出现频繁的启动甚至误动作, 无法通过实验; 在保护和合并单元均采用本算法对数据进行处理后, 两者均顺利通过了相关实验。所以, 本算法不仅适用于保护装置, 也同样适用于合并单元等有采样数据的场合。相关波形见图 4~图 6。

## 6 结语

本文根据智能电网中飞点产生的原因及其特征, 提出了基于可去间断点的飞点检测及修复算法。仿真结果表明本论文提出的算法可准确有效地检测出飞点, 并且对飞点数据的修复效果也是非常理想的。该算法的主要特点如下:

1) 延时小。对于只考虑一个飞点的情况, 本算法只延时一个点输出采样数据, 当考虑 2 ms 的尖脉冲, 其上升沿通常小于 1 ms, 本算法最多也就延时 1 ms 输出采样数据。

2) 门槛自适应。本算法门槛由正常采样波形通过快速计算幅值得到, 无需考虑电流、电压、变比等采样属性。

3) 灵敏度高。本算法的灵敏度取决于一阶差分门槛, 当采样率较高时, 灵敏度非常高, 如  $N=80$  点时, 可靠系数  $\delta_1=2$  时,  $\varepsilon_1=0.222I$  (见式(13))。

4) 饱和波形不会误判。由于本算法门槛是通过快速计算幅值得到, 饱和波形总有一段线性区, 这时已经快速算出了该线性区的基波幅值, 当 CT 饱和时, 由于从线性区至饱和区的波形只有单侧发生突变, 所以不会误判。

5) 故障畸变波形不会误判, 原因是差分反向之前已经计算出故障电流幅值, 以此计算出的差分门槛已经考虑了波形畸变。但前提条件是采样率必须满足对最高次谐波的采样定理。

## 参考文献

- [1] 廖泽友, 郭赞, 杨恢宏. 数字化变电站采样值传输协议的综述与对比分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(4): 113-118.  
LIAO Zeyou, GUO Yun, YANG Huihong. The summary and contrastive analysis of sampled values transmission communication protocol in digital substations[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(4): 113-118.
- [2] 赵应兵, 周水斌, 马朝阳. 基于 IEC61850-9-2 的电子式互感器合并单元的研制[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 104-110.  
ZHAO Yingbing, ZHOU Shuibin, MA Zhaoyang. Research and manufacture of merging unit based on IEC 61850-9-2[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 104-110.
- [3] 刘文, 杨慧霞, 祝斌. 智能电网技术标准体系研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 120-126.  
LIU Wen, YANG Huixia, ZHU Bin. Review of research on smart grid technical standard system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(10): 120-126.
- [4] 薄志谦, 张保会, 董新洲, 等. 保护智能化的发展与智能

- 继电器网络[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 1-12.  
BO Zhiqian, ZHANG Baohui, DONG Xinzhou, et al. The development of protection intellectualization and smart relay network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 1-12.
- [5] 王增平, 姜宪国, 张执超, 等. 智能电网环境下的继电保护[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 13-18.  
WANG Zengping, JIANG Xiangguo, ZHANG Zhichao, et al. Relay protection for smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 13-18.
- [6] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 基于综合阻抗比较原理的广域继电保护算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 179-186.  
LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. A study of wide-area protection algorithm based on integrated impedance comparison[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 179-186.
- [7] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 基于序电流相位比较和幅值比较的广域后备保护方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 242-250.  
LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Algorithm of wide-area protection on comparison of current phase and amplitude[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 242-250.
- [8] 牛元泰, 李洪涛, 吴征, 等. 一起110 kV 数字化变电站主变差动保护误动分析[J]. 变压器, 2013, 50(3): 66-69.  
NIU Yuantai, LI Hongtao, WU Zheng, et al. Analysis of differential protection false action of main transformer in 110 kV digital substation[J]. Transformer, 2013, 50(3): 66-69.
- [9] 段建东, 任晋峰, 张保会, 等. 超高速保护中雷电干扰识别的暂态法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(23): 7-13.  
DUAN Jiandong, REN Jinfeng, ZHANG Baohui, et al. Study of transient approach of discriminating lightning disturbance in ultra-high-speed protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(23): 7-13.
- [10] 孙国强, 卫志家, 周封伟. 改进迭代自组织数据分析法的不良数据辨识[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(11): 162-170.  
SUN Guoqing, WEI Zhinong, ZHOU Fengwei. The application of ISODATA to bad data detection and identification based on genetic algorithms[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(11): 162-170.
- [11] 陈波. 电力系统不良数据的辨识研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2010.  
CHEN Bo. The research of bad data identification in power system[D]. Guangzhou: South China University Technology, 2010.
- [12] 吴通华, 蒋雷海, 李友军, 等. 电力系统电气量异常采样值实时辨识方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 95-98.  
WU Tonghua, JIANG Leihai, LI Youjun, et al. Real time identification of abnormal sampling data of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 95-98.
- [13] 赵亮, 钱玉春, 刘宏君, 等. 数字化变电站抗异常数据的方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 97-99.  
ZHAO Liang, QIAN Yuchun, LIU Hongjun, et al. Abnormal data resisting method in digital substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 97-99.
- [14] 张永超. 电力系统不良数据检测和辨识方法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2006.  
ZHANG Yongchao. Bad data detection and identification in power system[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2006.
- [15] 李春, 林锦国, 叶曙光, 等. 基于小波的继电保护装置电磁干扰软件防护快速算法研究[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(11): 66-69.  
LI Chun, LIN Jinguo, YE Shuguang, et al. Fast software anti-interference algorithm of digital relay based on wavelet[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(11): 66-69.
- [16] 董继民. 基于采样值估算的电压扰动快速定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(9): 92-95.  
DONG Jimin. Fast sample-extrapolation-based detection method of voltage transient disturbances[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(9): 92-95.
- [17] 朱林, 段献忠, 苏盛, 等. 基于证据理论的数字化变电站继电保护容错方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 154-161.  
ZHU Lin, DUAN Xianzhong, SU Sheng, et al. Evidence theory based fault-tolerant method for protective relays in digital substations[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 154-161.
- [18] 汪珣, 尹项根, 张哲, 等. 基于遗传信息融合技术的广域继电保护[J]. 电工技术学报, 2010, 25(8): 174-179.  
WANG Yang, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Wide area protection based on genetic information fusion technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(8): 174-179.
- [19] WANG Xiaoyun, YU Hongbo. How to break MD5 and other Hash functions[M]. New York: Springer-Verlag, 2005: 19-35.

收稿日期: 2014-05-09; 修回日期: 2014-08-06

作者简介:

吴文举(1977-), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护和智能变电站; E-mail: wuwj@sznari.com

占捷文(1979-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护和智能变电站。

(编辑 葛艳娜)