

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211038

突变量与形态学相结合的配电网故障时刻检测方法

张运驰¹, 高厚磊¹, 袁通¹, 向岷江²

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 国网济南供电公司, 山东 济南 250012)

摘要: 在配网应用中, 以故障时刻为同步基准的差动保护需要精准地检测故障发生时刻。而常见的相电流突变量故障时刻检测方法的误差受故障发生时刻、分布式电源故障特性等因素的影响较大, 会给差动保护带来较大的同步误差。为此, 提出了适用于配电网故障时刻自同步原理的精确故障时刻检测方法。首先以传统相电流突变量检测算法为基础选取数据窗, 然后对窗内数据应用改进多分辨形态梯度算子进行处理, 得到凸显波形突变情况的梯度信号。之后利用该梯度信号的极值点位置提取故障发生时刻。最后 PSCAD 仿真以及现场试验数据验证结果表明, 该方法检测精度高、稳定性好, 可有效减小因故障时刻检测而产生的同步误差。

关键词: 配网差动保护; 自同步原理; 同步误差; 故障时刻检测; 改进多分辨形态梯度

A fault time detection method in a distribution network based on a sudden change of current and mathematical morphology

ZHANG Yunchi¹, GAO Houlei¹, YUAN Tong¹, XIANG Minjiang²

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. State Grid Jinan Power Supply Company, Jinan 250012, China)

Abstract: Differential protection based on fault time self-synchronization principle requires to detect fault time accurately in distribution network. However, the error in the conventional phase current sudden-change-based fault time detection method is greatly affected by the fault occurrence time, distributed power generation fault characteristics and other factors. These can cause a large synchronization error in the differential protection. Therefore, an accurate fault time detection method is proposed, one which is suitable for the fault time self-synchronization principle in a distribution network. First, a data window is selected based on a conventional phase current sudden-change detection algorithm, and then an improved multi-resolution morphological gradient operator is used to process the data to obtain the gradient signal. This highlights the waveform mutation. Then the fault time is extracted through extreme point positions of the gradient signal. Finally, PSCAD simulation and field test data show that this method has high detection accuracy and good stability, and can effectively reduce the synchronization error caused by fault time detection.

This work is supported by the Science and Technology Project of the Headquarters of State Grid Corporation of China (No.5100-202055018A-0-0-00).

Key words: distribution network differential protection; self-synchronization principle; synchronization error; fault time detection; improved multi-resolution morphological gradient

0 引言

在继电保护应用中, 精确地检测故障时刻有着非常重要的意义, 尤其是对于采样率普遍不高的配电网。由于分布式电源(Distributed Generator, DG)的广泛接入, 配电网的网络结构发生了很大变化,

由传统的辐射状网络变为多源网络^[1-4], 而且分布式电源的接入使得系统的故障特性也发生了部分改变^[5-7]。为了提升配电网的供电可靠性, 实现配电网快速故障隔离, 高可靠性的纵联保护逐步替代传统三段式电流保护, 在配网中得到了一定的应用^[8-12]。但受限于配电网的通信建设水平, 传统的差动保护数据同步方法难以实现。

文献[13]考虑到目前有源配电网的故障特征和通信条件, 提出充分式电流幅值差动保护思想, 对

基金项目: 国家电网公司总部科技项目资助(5100-202055018A-0-0-00); 山东电力公司科技项目资助(5206011900DG)

数据同步的要求较低。文献[14]针对配电网线路较短的特点, 提出了故障时刻自同步原理, 两端保护以各自检测到的故障发生时刻作为时间基准进行后续的计算。该方法将两侧保护通过故障发生时刻联系起来, 无需额外的对时手段, 但此方法不可避免地会产生由于两侧保护检测故障发生时刻的延时不同而带来的同步误差。传统的故障时刻检测采用相电流突变量检测原理, 该原理的检测延时会受到故障发生时刻、DG 故障特性和启动门槛值等因素影响^[15], 当两侧检测延时相差较大时会产生较大的同步误差, 一旦超过了同步误差的允许裕度, 就可能会造成区内故障时保护的拒动。因此, 准确地检测故障发生时刻可以减小故障时刻自同步原理产生的误差。

文献[16]利用小波变换对超高压输电线路进行故障时刻的提取, 多用于故障定位, 但小波变换本身存在时移, 且对采样率有较高的要求。文献[17-21]将数学形态学应用于暂态分量滤波、故障测距以及行波保护, 通常对装置采样率的要求较高, 需实时计算, 难以直接应用于配电网。文献[22]对电流突变量进行波形拟合, 根据故障后数据得到的拟合波形与实际波形的相关度差异寻找突变点, 该方法存在低采样率时检测误差较大以及所需数据窗较长的问题。文献[23]根据奇异值分解原理构造 Hankel 矩阵, 得到信号的细节部分, 利用模极大值法求取奇异点, 但该方法对数据窗长度具有一定要求。

数学形态学(Mathematical Morphology, MM)中的形态梯度法(Morphological Gradient, MG)可以有效地提取图像的边缘信息^[24-26], 对应一维函数信号的突变。因此, 本文提出了一种相电流突变量与形态学相结合的配电网故障时刻检测方法, 首先利用相电流突变量检测方法确定数据窗, 然后利用改进多分辨率形态梯度算子(Improved Multi-resolution Morphological Gradient, IMM)对采集到的相电流信号进行多级梯度处理, 从而得到输入信号的梯度输出, 梯度值变化最剧烈的位置对应原始信号的波形突变点, 即故障发生时刻。在此基础上应用故障时刻自同步原理, 可以极大地减小由故障发生时刻的检测延时不同导致的同步误差。此外, 本文方法对不同采样率的保护装置都具有较强的适用性, 为电流差动保护应用于配电网提供了有利条件。

1 相电流突变量故障检测原理

在实际工程应用中, 常用的故障时刻检测方法为相电流突变量检测法(以下简称突变量算法), 它是通过判断实时相电流变化量是否超过设定的门槛值来实现的, 判据一般如式(1)所示^[14]。

$$\begin{cases} \Delta i_{\varphi}(k) > I_{\text{set}} \\ \Delta i_{\varphi}(k+1) > I_{\text{set}} \\ \Delta i_{\varphi}(k+2) > I_{\text{set}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\Delta i_{\varphi}(k)$ 表示瞬时相电流突变量的第 k 个采样点值, 对连续三个点进行判断是为了避免数据扰动的影响; φ 为相别, 三相中任意一相满足判据即可; I_{set} 为设定的门槛值。 $\Delta i_{\varphi}(k)$ 的表达式为

$$\Delta i_{\varphi}(k) = ||i_{\varphi}(k) - i_{\varphi}(k-N)| - |i_{\varphi}(k-N) - i_{\varphi}(k-2N)|| \quad (2)$$

式中: $i_{\varphi}(k)$ 表示瞬时相电流的第 k 个采样点值; N 为每个周波的采样点数。

文献[15]表明, 传统突变量算法检测故障时刻的误差主要与判据门槛值、故障电流幅值、故障初始角、非周期分量衰减速度等因素有关。此外, 也与采样率有关, 其他条件均相同时, 采样率越高, 检测误差越小。图 1 展示了突变量算法所产生的检测误差。

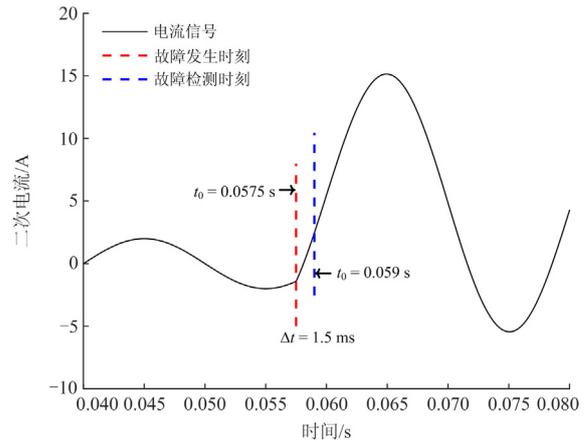


图 1 突变量算法的检测延时

Fig. 1 Detection delay of mutation algorithm

图中, t_0 为实际故障发生时刻, 按照式(1)中的判据, 门槛值取 0.2 倍额定电流, t 为突变量算法检测到的故障时刻, Δt 为突变量算法的检测延时。以图中情况为例, 突变量算法的检测延时为 1.5 ms, 工频 50 Hz 下对应的电角度为 27° 。

在故障时刻自同步原理中, 精确的故障时刻检测有利于保证电气量计算的准确性, 而当两侧均存在检测延时且两侧延时不相等时, 就会出现同步误差, 如图 2 所示, 两侧信号的检测延时 Δt 之差即为同步误差, 此处为 0.5 ms, 工频 50 Hz 下对应为 9° 。文献[27]的分析表明, 分布式电源的接入会使故障区段两端电流的故障特性产生较大差异, 两侧的检

测延时会有较大偏差,从而导致较大的同步误差,可能超过差动保护的同步允许裕度,进而影响内部故障时保护的正确动作。

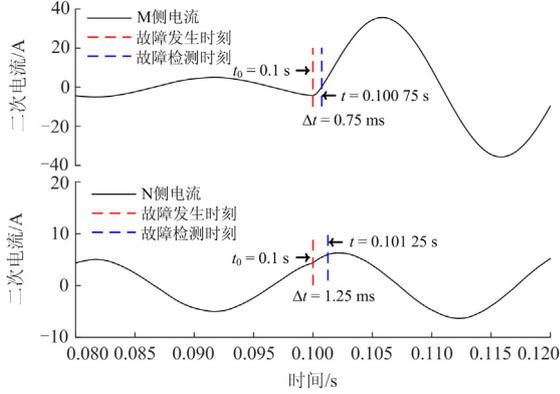


图2 故障时刻自同步原理的同步误差

Fig. 2 Synchronization error caused by self-synchronization principle at fault time

2 数学形态学检测故障时刻

2.1 数学形态学基础

数学形态学广泛应用于图像识别与处理领域,其本质是对集合进行的操作,所涉及的数学计算只有加、减和取最大值运算,不涉及乘除法,计算简单,它完全在时域中对信号进行处理,不涉及频域的信息。一般二值形态学多用于处理图像,而灰度形态学则用于处理一维函数信号^[28]。数学形态学中,腐蚀和膨胀是两个基本的形态学运算,对于输入信号 $f(n)$, 其定义域为 D_f , 对于结构元素 $g(m)$, 其定义域为 D_g , D_f 的长度大于等于 D_g 的长度。对 $f(n)$ 进行形态学运算相当于用 $g(m)$ 去扫描输入信号,其中膨胀运算表示为式(3),腐蚀运算表示为式(4)。

$$(f \oplus g)(n) = \max_{m \in D_g} (f(n-m) + g(m)), (n-m) \in D_f \quad (3)$$

$$(f \ominus g)(n) = \min_{m \in D_g} (f(n+m) - g(m)), (n+m) \in D_f \quad (4)$$

式中, m 、 n 分别为输入信号和结构元素的采样点序号。式(3)、式(4)的数学差分为基本的形态梯度算子,即

$$G(n) = (f \oplus g)(n) - (f \ominus g)(n) \quad (5)$$

在一维信号处理中,形态梯度算子能够很好地反应波形突变,改变式(5)中结构元素的长度和原点位置并进行多级运算,可以得到多分辨形态梯度算子^[29]。当输入信号为 $G^0(n)$ 时,具体表达式为

$$G_{g^+}^\gamma(n) = (G^{\gamma-1} \oplus g^+)(n) - (G^{\gamma-1} \ominus g^+)(n) \quad (6)$$

$$G_{g^-}^\gamma(n) = (G^{\gamma-1} \ominus g^-)(n) - (G^{\gamma-1} \oplus g^-)(n) \quad (7)$$

$$G^\gamma(n) = G_{g^+}^\gamma(n) + G_{g^-}^\gamma(n) \quad (8)$$

式中: $G^\gamma(n)$ ($\gamma=1,2,3,\dots$) 表示第 γ 级梯度运算的输出; $G_{g^+}^\gamma(n)$ 和 $G_{g^-}^\gamma(n)$ 分别表示第 γ 级信号的上升沿和下降沿; g^+ 、 g^- 为对应的结构元素,如式(9)、式(10)所示。

$$g^+ = \{g_1, g_2, \dots, g_{l-1}, \underline{g}_l\} \quad (9)$$

$$g^- = \{\underline{g}_1, g_2, \dots, g_{l-1}, g_l\} \quad (10)$$

式中: g_i ($i=1,2,\dots,l$) 为结构元素第 i 个位置的值;下划线处的元素是形态运算的起点,即结构元素的原点; $l=2^{-\gamma+1} \cdot l_0$, l_0 为第一级梯度运算中结构元素的长度。

2.2 改进多分辨形态梯度检测故障时刻

传统利用扁平结构元素的多分辨形态梯度运算可用于故障测距,在高采样率下能够准确地定位行波波头到达时刻,但在配电网常规采样率保护中,该方法在相电流峰谷值处也会检测到奇异性^[25],从而影响故障时刻检测的准确性。为了能够准确地检测信号突变并且能够适用于一般采样率的保护,本文在文献[25]的基础上利用斜坡结构元素形成了各级结构元素相同的改进多分辨形态梯度算子,由于其结合了多分辨滤波与形态学梯度,因而具有较强的抑制噪声和凸显奇异特征的能力。文献[25]为了检测电流互感器的饱和,采用了幅值随输入信号变化的多分辨结构元素,但这会导致采样数据量及计算量的增加。因此,本文结合配网实际故障特征与保护需求,为突出信号细微的变化,且尽可能地适合较低采样率,选取的各级结构元素均为

$$g^+ = K \cdot \{1, 0\} \quad (11)$$

$$g^- = K \cdot \{0, 1\} \quad (12)$$

式中, K 为斜坡结构元素的幅值。当选取的结构元素非零时,要想完全反应输入信号的变化情况,需要满足斜坡结构元素的斜率大于输入信号相邻两点的斜率,否则梯度运算的结果便会出现平顶波,无法正确反应信号的变化情况。为减少算法所需的采样数据和计算量,考虑实际配网中故障电流的幅值,本文中 K 取 $20I_N$, I_N 为电流互感器二次侧额定电流。结构元素均为左端原点,共进行3级梯度运算,每级均采用相同的结构元素,得到三级改进形态梯度 IMM3 的输出结果 G^3 。如图3所示,该信号能够很好地反应原始信号的突变情况,图中波形采样率为4 kHz。

基于上述分析,本文提出了一种相电流突变量与形态学相结合的配电网故障时刻检测方法:为了避免扰动及噪声干扰的影响,在传统突变量算法的

基础上进行数据处理, 记突变量算法检测到的故障时刻为 k_0 。考虑到形态学运算的端点效应问题^[30], 即由于数据窗的截断, 窗内两端数据的处理结果与实际存在误差, 因此需要留出几个采样点的裕度; 结合文献[15]中可能存在的最大检测延时, 选取 k_0 点之前 $N/2$ 个采样点以及 k_0 点之后 $N/4$ 个采样点的数据构成数据窗, 进行三级形态梯度变换, 得到 G^3 信号; 获取 G^3 信号的第一极值点和第二极值点, 由于多分辨形态梯度运算在时域上的对称性, 两者取平均得到的中间采样点(非整数时向上舍入取整)即为信号突变位置, 对应的时刻记为检测到的故障发生时刻 T_k 。算法整体流程如图 4 所示。

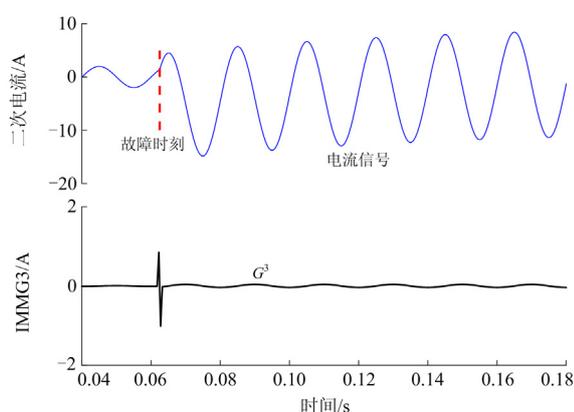


图 3 原始故障电流及 IMM3 输出结果

Fig. 3 Original fault current and IMM3 output

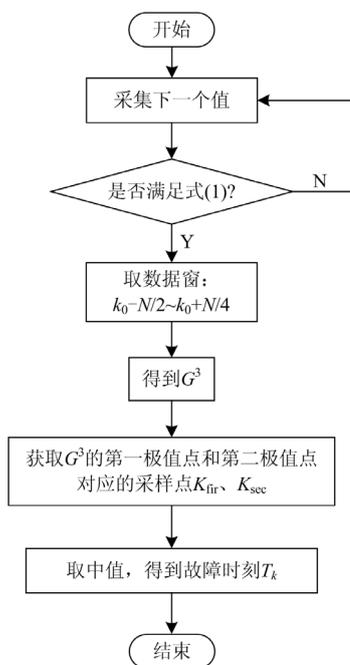


图 4 故障时刻检测算法流程图

Fig. 4 Flow chart of fault detection algorithm

3 仿真分析

为了验证本文所提算法的性能, 在 PSCAD 仿真软件中搭建了 10 kV 有源配电网模型, 如图 5 所示。交流系统容量为 200 MVA; 线路 L1 长度为 2.7 km, 接有 3 MVA 负荷; 线路 L2 长度为 3.8 km; 线路 L3 长度为 2.1 km, 接有 2 MVA 负荷; 线路 L4 长度为 1 km, 接有 6 MVA 负荷; 线路阻抗为 $0.17 + j0.34 \Omega/\text{km}$, 负荷功率因数均为 0.9。两分布式电源均为逆变类 DG, DG1 额定输出功率为 1 MW, DG2 额定输出功率为 4 MW。故障位置设置在距 M 侧 1.8 km 处, 电流互感器二次额定电流均为 5 A, 采样率选为 4 kHz, 相电流突变量算法的阈值值设为 0.3 倍的额定电流。

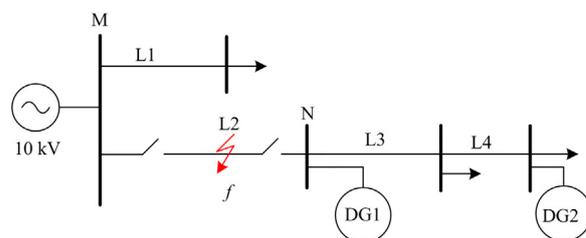


图 5 仿真系统图

Fig. 5 Simulation system diagram

3.1 算法的精确性

为了验证本文所提方法的精确性, 仿真两种不同的故障情形。首先, 当故障发生时刻恰为采样时刻时, 仿真 0.501 25 s 时故障位置处发生三相短路故障, 过渡电阻设为 5Ω , 得到 M、N 两侧故障电流。利用本文算法对故障发生时刻进行检测, 得到 A 相电流及检测结果, 如图 6、图 7 所示。图中, 3 级形态梯度的输出可以很好地反应波形的突变情况, 再加上以突变量检测算法为基础选择数据窗, 提高了算法的抗干扰性和可靠性。本文算法对 M、N 两侧 A 相电流的检测结果均为: 第一极值点对应时刻 $T_{fir} = 0.501 \text{ s}$, 第二极值点对应时刻为 $T_{sec} = 0.501 5 \text{ s}$, 得到故障发生时刻 $T_k = 0.501 25 \text{ s}$, 与实际故障发生时刻相同。当采样时刻并非故障发生时刻时, 考虑不同的故障初始角时本文算法的检测误差, 并且与突变量算法进行对比。故障初始角(以故障发生时刻代替)会影响故障电流的波形特征, 设置图 5 中 f 点处发生两相短路故障, 过渡电阻为 5Ω , 随机设置不同故障发生时刻, 得到 M、N 两侧 A 相电流的检测结果及对应检测误差, 如表 1、表 2 所示。

由表 1、表 2 中的数据可以看出, 随着故障初

始角的改变, 传统突变量算法的检测误差较大, 而本文算法产生的检测误差均小于一个采样间隔且很稳定。表 1 数据源于系统侧电流, 由于其故障电流幅值较大, 非周期分量衰减较快, 突变量算法的检测误差相对较小且变化不会特别剧烈。但 DG 侧由于其弱馈特性, 故障电流的幅值不会很大, 此时不同的故障初始角会引起很大的检测误差, 进而造成严重的同步误差。例如, 在 0.506 11 s 时, 突变量算法的检测结果为: M 侧 0.506 25 s, 检测误差为 2.52°; N 侧 0.51 s, 检测误差为 70.02°; 两侧产生的同步误差为 67.5°。而本文算法对 M、N 侧电流的检测结果均为: 故障发生时刻为 0.506 s, 检测误差为 -1.98°, 两侧产生的同步误差为 0。由于故障发生时刻具有随机性, 而保护装置的采样率有一定限

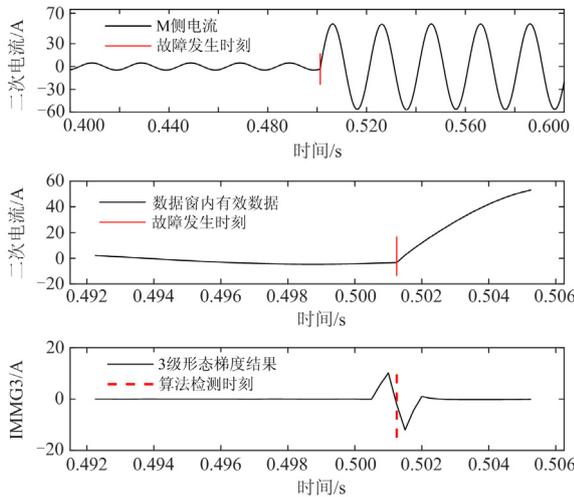


图 6 M 侧 A 相电流及本文算法检测结果

Fig. 6 Phase A current of M-side and results of this algorithm

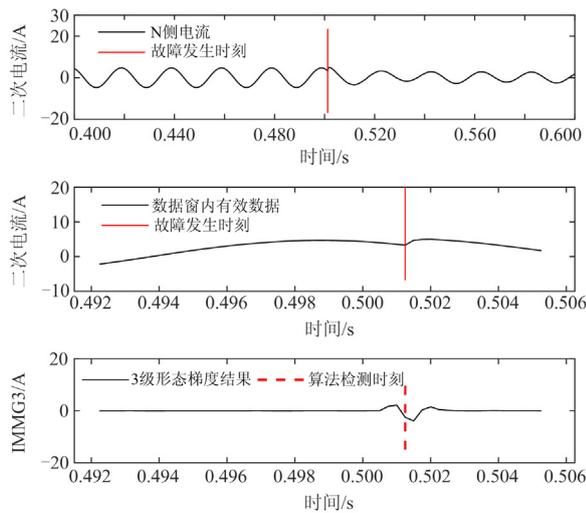


图 7 N 侧 A 相电流及本文算法检测结果

Fig. 7 Phase A current of N-side and results of this algorithm

表 1 M 侧 A 相电流两种算法的检测结果

Table 1 Detection results of two algorithms for phase A current of M-side

故障时刻/ms	故障时刻检测结果/ms		检测误差/(°)	
	本文算法	突变量算法	本文算法	突变量算法
501.10	501.00	501.50	-1.80	7.20
502.40	502.25	502.50	-2.70	1.80
503.36	503.25	503.50	-1.98	2.52
504.60	504.50	504.75	-1.80	2.70
505.64	505.50	505.75	-2.52	1.98
506.11	506.00	506.25	-1.98	2.52
506.55	506.50	506.75	-0.90	3.60
507.69	507.50	509.00	-3.42	23.58
508.91	508.75	509.25	-2.88	6.12
509.70	509.50	510.00	-3.60	5.40

表 2 N 侧 A 相电流两种算法的检测结果

Table 2 Detection results of two algorithms for phase A current of N-side

故障时刻/ms	故障时刻检测结果/ms		检测误差/(°)	
	本文算法	突变量算法	本文算法	突变量算法
501.10	501.00	501.50	-1.80	7.20
502.40	502.25	502.50	-2.70	1.80
503.36	503.25	503.50	-1.98	2.52
504.60	504.50	504.75	-1.80	2.70
505.64	505.50	506.00	-2.52	6.48
506.11	506.00	510.00	-1.98	70.02
506.55	506.50	510.00	-0.90	62.10
507.69	507.50	510.00	-3.42	41.58
508.91	508.75	510.00	-2.88	19.62
509.70	509.50	510.25	-3.60	9.90

制, 大多数情况下的故障发生时刻并非采样时刻。本文所提算法虽然可以较精确地定位到信号突变点, 但仍会产生一定的误差, 该检测误差很小且两端检测误差几乎完全相等, 同步误差几乎全为 0。针对检测误差为负值的问题, 具体应用到保护中可以采取在本文检测到故障时刻之后的一个点开始计算, 仍不会对数据的同步造成影响。

3.2 低采样率的适应性

为了验证本文算法同样也可以适用于较低采样率保护, 仿真 0.501 25 s 时发生两相短路故障, 过渡电阻同样设置为 5 Ω, 采样率设为 1.6 kHz, 得到 M、N 两侧故障电流。利用本文算法对故障发生时刻进行检测, 得到 A 相电流及本文算法的检测结果, 如图 8、图 9 所示。

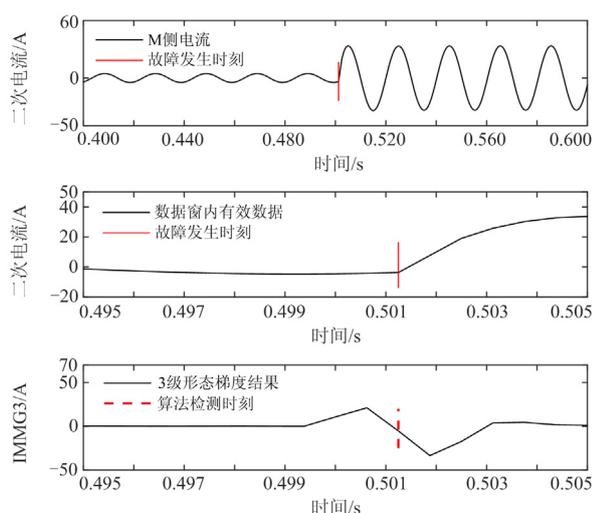


图 8 M 侧 A 相电流及本文算法检测结果

Fig. 8 Phase A current of M-side and results of this algorithm

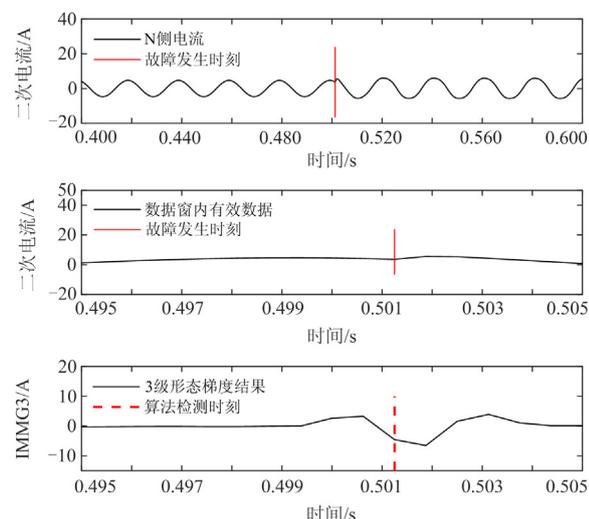


图 9 N 侧 A 相电流及本文算法检测结果

Fig. 9 Phase A current of N-side and results of this algorithm

由图 8、图 9 可以看出, 本文算法对于配网中普遍采用较低采样率的保护仍然适用, 算法对 M、N 两侧电流的检测结果均为: 第一极值点对应的时刻 $T_{\text{fir}} = 0.495 \text{ s}$, 第二极值点对应的时刻 $T_{\text{sec}} = 0.5075 \text{ s}$, 得到故障发生时刻为 0.50125 s , 与实际故障发生时刻相同。当故障发生时刻并非采样时刻时, 以 3.1 节中 0.50611 s 时发生故障为例, 仅改变采样率为 1.6 kHz , 其余设置均相同, 得到 M、N 两侧电流信号。利用本文算法检测故障发生时刻, M 侧检测到的故障时刻为 0.50625 s , 检测误差为 2.52° , N 侧检测到的故障时刻为 0.505625 s , 检测误差为 -8.73° , 产生的同步误差为 11.25° , 恰为该采样率下的一个采样间隔, 仍小于保护允许的同步

误差裕度。而利用突变量算法检测时, M 侧检测到的故障时刻为 0.506875 s , 检测误差为 13.77° , N 侧检测到的故障时刻为 0.510625 s , 检测误差为 81.27° , 检测误差远大于本文算法所得到的结果。

仿真条件保持不变, 从 0.6 s 起间隔 1 ms 进行 10 次仿真。定义 ε_{max} 为 10 次仿真中最大检测误差绝对值与采样周期的比值, ε_{min} 为 10 次仿真中最小检测误差绝对值与采样周期的比值, ε_{avg} 为 10 次仿真平均检测误差绝对值与采样周期的比值, 本文算法对两侧 A 相电流的检测结果如表 3 所示。

表 3 1.6 kHz 采样率时算法的检测误差Table 3 Detection errors of the algorithm with 1.6 kHz sampling rate

	$\varepsilon_{\text{max}}/\%$	$\varepsilon_{\text{min}}/\%$	$\varepsilon_{\text{avg}}/\%$
M 侧	100	0	42
N 侧	160	0	90

由仿真结果可以看出, 当采样率降低时, 本文算法的检测误差在分布式电源侧偶尔会出现大于一个采样间隔的情况, 但平均检测误差仍保持在一个采样间隔之内, 而且两侧产生的同步误差均未超过一个采样间隔。

3.3 单相接地故障的应对能力

为检测所提算法在小电阻接地系统中的适应性, 针对图 5 所示系统, 在 M 母线处安装一经 5Ω 电阻接地的接地变压器, 在 f 处仿真经不同电阻接地的 A 相接地故障, 过渡电阻分别取 0Ω 、 5Ω 、 10Ω 、 20Ω 。按照 3.1 节中的故障时刻各进行 10 次仿真, 采用表 3 中定义的误差指标, 得到本文算法对两侧 A 相电流的检测结果, 如表 4 所示。

表 4 单相接地不同故障电阻时算法的检测误差

Table 4 Detection errors of the algorithm for single-phase earth fault with different fault resistance

过渡电阻/ Ω		$\varepsilon_{\text{max}}/\%$	$\varepsilon_{\text{min}}/\%$	$\varepsilon_{\text{avg}}/\%$
0	M 侧	44	8	33.2
	N 侧	160	8	61.2
5	M 侧	64	8	36
	N 侧	160	20	69.6
10	M 侧	80	8	47.2
	N 侧	160	20	69.6
20	M 侧	80	8	49.2
	N 侧	120	44	69.6

由结果可知, 发生单相接地故障时, 分布式电源侧由于故障前后电流幅值变化不大, 可能会出现检测误差大于一个采样间隔的情况, 但平均检测误差仍保持在一个采样间隔之内, 而且两侧产生的同步误差也未超过一个采样间隔。值得注意的是, 当

本算例中的接地电阻大于 $10\ \Omega$ 时, 0.1 倍额定电流门槛值的相电流突变量算法已无法启动, 继续降低其门槛值, 本文方法仍能够精确地检测故障发生时刻。但过渡电阻继续增大时, 由于分布式电源侧相电流波形变化特征极不明显, 三级形态梯度运算的极值难以取到, 此时可以考虑同时用本文方法处理零序电流, 以提高算法的抗过渡电阻能力。

4 现场数据验证

利用现场配电网试验中的实测数据对本文方法进行验证。所用电流数据为发生 C 相接地故障时的二次值, 额定值为 $5\ \text{A}$, 采样率为 $6\ 400\ \text{Hz}$, 包含 992 个采样点, 故障前线路空载。现场 C 相电流波形及本文算法检测结果如图 10、图 11 所示。

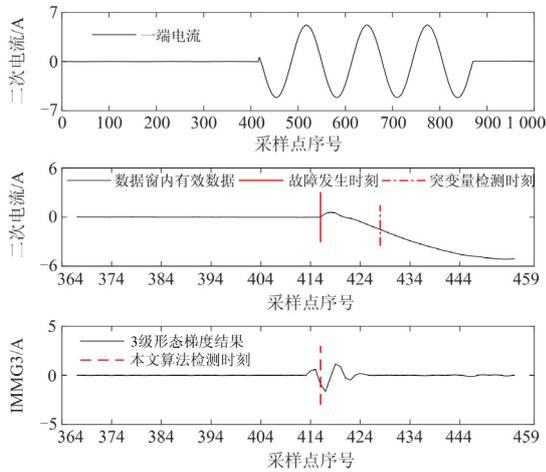


图 10 现场一端 C 相电流及本文算法检测结果
Fig. 10 Phase C current of one side in field and results of this algorithm

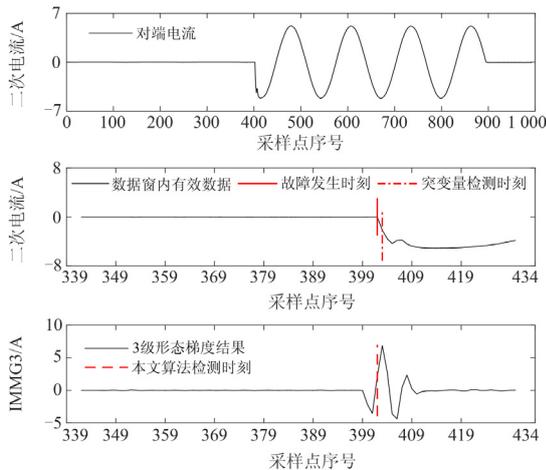


图 11 现场对端 C 相电流及本文算法检测结果
Fig. 11 Phase C current of another side in field and results of this algorithm

对于原始故障电流数据, 一端电流的故障时刻为第 416 个采样点, 对端电流的故障时刻为第 402 个采样点。由图 10、图 11 可以看出, 本文算法均能够准确地检测故障发生时刻, 没有检测误差。由故障时刻检测导致的同步误差为 0 ; 而利用突变量算法检测的结果如下: 一端检测时刻为第 428 个采样点, 对端检测时刻为第 403 个采样点, 检测误差分别为 $1.875\ \text{ms}$ 和 $0.156\ \text{ms}$, 由故障时刻检测导致的同步误差约为 30.94° 。

5 结论

故障时刻自同步原理的提出为差动保护在配网中的应用提供了极大便利, 而精确的故障时刻检测方法可以减小自同步原理本身带来的同步误差, 提高差动保护的可靠性。本文基于相电流突变量及改进多分辨形态梯度算子提出了一种适用于配电网的精确故障时刻检测方法。仿真分析和现场数据验证均表明:

- 1) 本文方法可以精确地检测信号的突变位置, 受衰减直流分量和故障发生时刻的影响小, 检测误差很小且没有大的波动, 极大地降低了因故障检测而产生的同步误差。
- 2) 本文方法以传统突变量检测算法为基础, 受数据扰动的影响较小; 考虑形态学端点效应的影响, 仅需 $3/4$ 个周波的数据窗, 且只需故障之后 $1/4$ 个周波的数据, 采样率高时数据窗可进一步缩短; 形态学不涉及复杂的运算过程, 仅需要在突变量检测方法的基础上增加极小的计算量。
- 3) 本文方法对保护装置的采样率要求不高, $1.6\ \text{kHz}$ 时仍可保持极小的检测误差和同步误差, 可适用于配电网中较低采样率的保护装置。

参考文献

[1] KEANE A, OCHOA L F, BORGES C L T, et al. State-of-the-art techniques and challenges ahead for distributed generation planning and optimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1493-1502.

[2] 黄景光, 张宇鹏, 李江峡, 等. 基于阻抗修正的反时限过流保护新方案[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(9): 88-94.

HUANG Jingguang, ZHANG Yupeng, LI Jiangxia, et al. A novel impedance correction-based inverse-time overcurrent protection scheme[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(9): 88-94.

[3] 郭利爽, 马宏涛, 李凤婷. 基于电抗器电压暂态特性的直流配电网故障检测方案[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(2): 72-78.

- GUO Lishuang, MA Hongtao, LI Fengting. Fault detection scheme for dc distribution network based on voltage transient characteristics of reactor[J]. *Power Capacitors & Reactive Power Compensation*, 2021, 42(2): 72-78.
- [4] MARGOSSIAN H, DECONINCK G, SACHAU J. Distribution network protection considering grid code requirements for distributed generation[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2015, 9(12): 1377-1381.
- [5] 高生凯, 曹炜, 张旭航, 等. 一种改进型配网自适应过流保护方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(7): 110-119.
- GAO Shengkai, CAO Wei, ZHANG Xuhang, et al. A novel adaptive overcurrent protection method for a distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(7): 110-119.
- [6] 张帆, 杨翺, 商佳宜, 等. 考虑负荷损失最小的配网孤岛划分策略研究[J]. *高压电器*, 2021, 57(4): 181-188.
- ZHANG Fan, YANG Xuan, SHANG Jiayi, et al. Study on island partition strategy of distribution network considering minimum load loss[J]. *High Voltage Apparatus*, 2021, 57(4): 181-188.
- [7] 谢民, 王同文, 徐靖东, 等. 分布式电源对配网继电保护影响及综合改进保护方案[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(19): 78-84.
- XIE Min, WANG Tongwen, XU Jingdong, et al. Effect of distributed generation on relay protection of distribution network and comprehensive improvement of protection scheme[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(19): 78-84.
- [8] GAO Houlei, LI Juan, XU Bingyin. Principle and implementation of current differential protection in distribution networks with high penetration of DGs[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2017, 32(1): 565-574.
- [9] 明潇宇, 吕飞鹏, 余晓, 等. 含 T 接逆变型分布式电源配电网的纵联保护方案[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(11): 74-79.
- MING Xiaoyu, LÜ Feipeng, YU Xiao, et al. Pilot protection scheme for distribution network with T-connected inverter interfaced distributed generation[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(11): 74-79.
- [10] 徐萌, 邹贵彬, 高磊, 等. 含逆变型分布式电源的配电网正序阻抗纵联保护[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(12): 93-99.
- XU Meng, ZOU Guibin, GAO Lei, et al. Pilot protection of positive sequence impedance for distribution network with inverter-based distributed generator[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(12): 93-99.
- [11] 李再男, 段建东, 路文超, 等. 柔性中压直流配电网线路加速纵联保护[J]. *电力系统自动化*, 2021, 45(9): 80-88.
- LI Zainan, DUAN Jiandong, LU Wenchao, et al. Accelerated line pilot protection of flexible MVDC distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2021, 45(9): 80-88.
- [12] 高厚磊, 徐彬, 向珉江, 等. 5G 通信自同步配网差动保护研究与应用[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(7): 1-9.
- GAO Houlei, XU Bin, XIANG Minjiang, et al. Research and application of self-synchronized differential protection for distribution networks using 5G as the communication channel[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(7): 1-9.
- [13] 朱妍, 陆于平, 黄涛. 计及谐波频率特征的含风电配电网充分式电流幅值差动保护[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(16): 130-136.
- ZHU Yan, LU Yuping, HUANG Tao. Sufficient current amplitude differential protection considering frequency characteristic of harmonics for distribution network with wind power[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(16): 130-136.
- [14] 由伟翰. 基于故障信号同步的配网差动保护技术[D]. 济南: 山东大学, 2009.
- YOU Weihang. Differential protection of distribution network based on fault signal synchronization[D]. Jinan: Shandong University, 2009.
- [15] 李娟, 高厚磊, 武志刚, 等. 有源配电网差动保护自同步原理及误差分析[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(9): 78-85.
- LI Juan, GAO Houlei, WU Zhigang, et al. Data self-synchronization method and error analysis of differential protection in active distribution network[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(9): 78-85.
- [16] 郑华珍, 乐全明, 郁惟镛, 等. 基于小波理论的超高压电网故障时刻提取[J]. *电网技术*, 2005, 29(19): 63-68.
- ZHENG Huazhen, LE Quanming, YU Weiyong, et al. Location of fault moment by wavelet in ultra-high-voltage network based on fault record data[J]. *Power System Technology*, 2005, 29(19): 63-68.
- [17] 刘杰荣, 张耀宇, 关家华, 等. 基于量测大数据和数学形态学的配电网故障检测及定位方法研究[J]. *智慧电力*, 2020, 48(1): 97-104.
- LIU Jierong, ZHANG Yaoyu, GUAN Jiahua, et al.

- Distribution network fault location and detection method based on measurement big data and mathematical morphology[J]. Smart Power, 2020, 48(1): 97-104.
- [18] GUSH T, BUKHARI S B A, HAIDER R, et al. Fault detection and location in a microgrid using mathematical morphology and recursive least square methods[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2018, 102: 324-331.
- [19] 薛士敏, 崔淼. 基于形态学梯度算法的微电网行波保护方案[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 31-39.
XUE Shimin, CUI Miao. Current traveling wave based protection scheme for microgrids using morphological gradient algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 31-39.
- [20] 苏煜, 罗四倍, 王薇. 基于形态梯度与小波变换模之和的行波启动元件[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(23): 5-8, 34.
SU Yu, LUO Sibe, WANG Wei. Traveling-wave starting algorithm based on morphological gradient and wavelet transform modulus sum[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(23): 5-8, 34.
- [21] 王文东, 胡绪权, 徐正玉, 等. 基于形态滤波的接地网拓扑检测[J]. 电工技术学报, 2021, 36(17): 3685-3692.
WANG Wendong, HU Xuquan, XU Zhengyu, et al. Topology detecting method of grounding grids based on morphological filtration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(17): 3685-3692.
- [22] 董金金, 高厚磊, 李娟, 等. 基于电流突变量曲线拟合的故障时刻检测算法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4): 75-81.
DONG Jinjin, GAO Houlei, LI Juan, et al. Fault instant detection algorithm based on curve fitting of phase current increments[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 75-81.
- [23] 李娟, 高厚磊, 弓新月, 等. 一种用于配电网故障数据自同步的故障时刻检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 92-98.
LI Juan, GAO Houlei, GONG Xinyue, et al. A novel fault instant detection scheme for fault data self-synchronization method in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 92-98.
- [24] WU Q H, LU Z, JI T Y. Protective relaying of power systems using mathematical morphology[M]. London: Springer, 2009.
- [25] 林湘宁, 刘沛, 高艳. 基于数学形态学的电流互感器饱和识别判据[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(5): 46-50.
LIN Xiangning, LIU Pei, GAO Yan. A novel method to identify the saturation of the current transformer using mathematical morphology[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 46-50.
- [26] ZHANG Anqi, JI Tianyao, LI Mengshi, et al. An identification method based on mathematical morphology for sympathetic inrush[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(1): 12-21.
- [27] 李娟. 有源配电网电流差动保护原理与实现技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2016.
LI Juan. Studies on current differential protection and implementation technologies in active distribution networks[D]. Jinan: Shandong University, 2016.
- [28] 林湘宁, 刘沛, 刘世明, 等. 电力系统超高速保护的形态学-小波综合滤波算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 20-25.
LIN Xiangning, LIU Pei, LIU Shiming, et al. A novel integrated morphology-wavelet filter algorithm used for ultra-high speed protection of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 20-25.
- [29] 吴青华, 张东江. 形态滤波技术及其在继电保护中的应用[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(7): 45-49.
WU Qinghua, ZHANG Dongjiang. Morphological filtering techniques and applications in protection relaying[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(7): 45-49.
- [30] 黄家栋, 罗伟强. 采用改进数学形态学识别变压器励磁涌流的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 98-105.
HUANG Jiadong, LUO Weiqiang. New algorithm to identify inrush current based on improved mathematical morphology[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 98-105.

收稿日期: 2021-08-06; 修回日期: 2021-09-25

作者简介:

张运驰(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分布式故障自愈技术; E-mail: laonazyc@mail.sdu.edu.cn

高厚磊(1963—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力系统保护与控制; E-mail: houleig@sdu.edu.cn

袁通(1996—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护、5G应用。E-mail: yuantongsdu@126.com

(编辑 姜新丽)