

DOI: 10.7667/PSPC161172

## 分布式智能的小电流接地故障定位方法

孙桂花<sup>1</sup>, 王敬华<sup>2</sup>, 张璇<sup>3</sup>, 刘国栋<sup>4</sup>, 孔涛<sup>5</sup>, 李龙坤<sup>6</sup>

(1. 国网山东省菏泽市定陶区供电公司, 山东 菏泽 274000; 2. 山东科汇电力自动化股份有限公司, 山东 淄博 255087; 3. 山东理工大学, 山东 淄博 255049; 4. 国网山东省电力公司菏泽供电公司, 山东 菏泽 274000; 5. 山东送变电工程公司, 山东 济南 255000; 6. 国网山东省电力公司泰安供电公司, 山东 泰安 271000)

**摘要:** 为了减少通信压力和提高供电可靠性, 提出一种分布式智能的小电流接地故障定位方法。该方法以故障点两侧的暂态零序电流相似程度低和波形差异大为基础; 利用配电自动化系统终端采集故障信息, 通过对等通信网络使相邻馈线终端之间交换彼此的故障信息, 并两两计算它们之间的暂态零序电流相似系数; 由馈线终端确定故障区段, 且把故障定位的最终结果上报给主站。该方法由馈线终端单独完成, 不需要主站参与, 适应性广, 定位速度快, 通信压力小, 可显著提高供电可靠性。通过 ATP 仿真验证了分布式智能小电流接地故障定位方法的可行性。并给出了 ATP 仿真实验, 实验分析结果表明了该故障定位方法的可行性和有效性。

**关键词:** 分布式智能; 实时网络拓扑; 馈线终端; 相似系数; 故障定位

### Small current grounding fault location method of distributed intelligence

SUN Guihua<sup>1</sup>, WANG Jinghua<sup>2</sup>, ZHANG Xuan<sup>3</sup>, LIU Guodong<sup>4</sup>, KONG Tao<sup>5</sup>, LI Longkun<sup>6</sup>

(1. State Grid Dingtao Power Supply Company, Heze 274000, China; 2. Shandong Kehui Power Automation Co., Ltd., Zibo 255087, China; 3. Shandong University of Technology, Zibo 255049, China; 4. State Grid Heze Power Supply Company, Heze 274000, China; 5. Shandong Transmission and Transformation Engineering Company, Jinan 255000, China; 6. State Grid Tai'an Power Supply Company, Taian 271000, China)

**Abstract:** In order to reduce the communication pressure and improve the power supply reliability, a distributed intelligent fault location method for small current grounding is presented. The method based on that the similarity degree of the transient current signals is low on both sides of the fault point, but that of the same side is high. It collects failure information by the terminal of the distribution automation system, and exchanges the fault information between the adjacent terminal unit feeder by the peer to peer communication network. Then the transient zero sequence current similarity coefficient is calculated and the fault section is determined by the feeder terminal; and the final result of fault location is reported to the master station. The method is completed by the feeder terminal, which does not require the participation of the master station; it have wide adaptability, the fault section location speed is fast, and the communication pressure is small, thus the reliability of power supply can be significantly improved. The feasibility of the distributed intelligent fault location is verified by the ATP simulation. And making ATP simulation experiment, it turns out that this fault location method is effective and feasible.

This work is supported by Science and Technology Project of the State Grid Corporation of China (No. 52130416000D).

**Key words:** distributed intelligence; real-time network topology; feeder terminal; similarity coefficient; fault location

## 0 引言

在我国, 配电网中性点广泛采用不接地或小电

流接地方式, 而配电网故障中最主要的故障形式是单相接地故障, 占总故障的 80%以上, 严重影响用户的正常生活。故障定位技术存在较大的困难, 一直是困扰电力部门的一大难题。经过长时间的研究, 小电流接地故障定位已有所进步, 但仍然缺少成熟、实用的故障定位方法<sup>[1]</sup>。因此, 配电网发生故障后,

基金项目: 国家电网公司科技项目 (52130416000D); 淄博市校城融合发展计划 (2016ZBXC121)

迅速找到故障位置并及时处理, 对减小停电面积, 提高供电可靠性有很重要的意义。

目前, 小电流接地故障的区段定位技术分为两类, 即重合器模式和集中控制模式两类。重合器模式主要是利用故障时出线保护(重合器)多次重合, 分段开关根据开关处的故障电压、电流等信息与重合器配合来实现故障定位。文献[2]提出利用选线装置与电压一时间型重合器配合, 实现单相接地故障的隔离及非故障区段的供电恢复。该方法需要两次重合, 定位一般在 1~3 s 内完成, 会造成全线停电; 文献[3]提出重合器与电压-电流配合的改进方案, 实现单相接地故障区段定位。该方法克服了电压一时间型的缺点, 但故障处理时间仍然在分钟级, 会短时造成全线停电。而集中控制模式由配网主站收集终端检测的各项故障信息并决策, 主站下发控制命令由终端执行实现。文献[4]利用馈线终端采用通用分组技术(GPRS)向主站传输故障信息, 由故障判定矩阵确定故障区段。该方法繁琐, 定位时间长, 可靠性低。文献[5]利用故障信息建立了节点的邻接矩阵和节点信息矩阵, 采用异或算法判断故障区段。文献[6]提出一种基于相电流突变量的故障区段定位方法, 即利用故障点下游的三相电流突变量大小相等、波形一致而故障点上游的不具备上述特征, 以此来判断故障区段; 但易受变压器、负荷电流变化、暂态量及电流互感器的影响, 以使故障定位不准确。

因重合器模式和集中控制模式的故障定位及处理时间较长, 可靠性低<sup>[7]</sup>。为此, 本文提出一种分布式智能的小电流接地故障定位方法。该方法由馈线终端收集故障信息, 通过对等通信网络使相邻馈线终端之间交换彼此的故障信息, 由馈线终端确定故障区段, 该方法能准确、迅速地定位故障区段并及时处理, 对减少停电面积, 提高供电可靠性有重要的意义。

## 1 理论分析

### 1.1 暂态零序电流特征分析

如图 1 所示, 发生小电流单相接地故障, 系统将会产生暂态零序电流, 在故障点处将产生一个虚拟电压源  $U_{of}$ 。假设有  $n$  条输电线路, 其中一条发生故障, 检测点在 AD 线段中, 在 A、B、C、D 四处分别设置一个负荷开关, E 为故障点<sup>[8]</sup>。

在 AB 区段的暂态零序电流为

$$i_{OB} = i_{OA} - i_{C_1} \quad (1)$$

式中:  $i_{OA}$  为故障点右侧所有正常线路的暂态零序电流相加;  $i_{C_1}$  为 AB 段与大地之间的暂态零序电流。

由上可知, CD 区段的暂态零序电流为

$$i_{OD} = i_{OC} - i_{C_3} \quad (2)$$

式中:  $i_{OC}$  为故障点右侧所有正常线路的暂态零序电流之和;  $i_{C_3}$  为 CD 段与大地之间的暂态零序电流。

由式(1)、式(2)得, 各个检测点的暂态零序电流之差等于它们之间线段的暂态电容电流<sup>[9]</sup>。由于 AB、CD 段的线路比较短, 故线段之间的暂态电流远远小于健全线路的零序电流总和, 所以可以忽略 AB、CD 与大地之间的电容电流, 则 AB、CD 段两端的暂态零序电流近似相等, 即  $i_{OB} \approx i_{OA}$ ,  $i_{OD} \approx i_{OC}$ , 二者的波形相似。

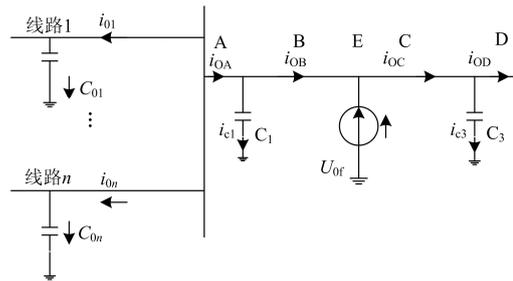


图 1 故障的零模等效网络图

Fig. 1 Zero fault mode equivalent network diagram

由图 1 可知, 故障点处的虚拟电压源  $U_{of}$  产生的暂态零序电流为

$$i_f = i_{OB} + i_{OC} \quad (3)$$

通过对故障点处的暂态电流分析可知, 故障点到母线端(上游区段)的暂态零序电流方向由 B 到 A, 即  $i_{OB}$ ; 故障点到负荷侧(下游区段)的暂态零序电流方向由 C 到 D, 即  $i_{OC}$ 。因为故障点上游的谐振频率大, 下游的谐振频率小, 即二者差异大, 使得故障点左右两侧的暂态电流的差异也很大<sup>[10]</sup>。由此可见, 故障点左侧和右侧的暂态电流流向相反, 二者差异很大, 相似性低。

### 1.2 相关分析原理

相似系数是描述 2 个函数之间在任意时刻的相似程度<sup>[11]</sup>。相似系数能分析函数中每一个分量的大小和角度关系, 是描述随机变量的重要统计学特征。因此, 可以求相邻检测点暂态电流之间的相似系数, 来分析它们之间的相似程度<sup>[12]</sup>。

两个相邻检测点暂态零序电流  $i_{01}(t)$ 、 $i_{02}(t)$  之间的相似系数  $\rho$  为

$$\rho = \frac{\sum_{t=1}^n i_{01}(t)i_{02}(t)}{\sqrt{\sum_{t=1}^n i_{01}^2(t) \sum_{t=1}^n i_{02}^2(t)}} \quad (4)$$

式中:  $i_{01}$ 、 $i_{02}$  分别为相邻检测点的暂态电流;  $n$  为

暂态电流的数据长度。

由式(4)可知,相似系数为2个不同信号的相乘,若  $\rho=1$ ,则说明两检测点的相似程度高;若  $\rho=0$ ,则说明两检测点的相似程度低<sup>[13]</sup>。因此,相关系数的取值为[0, 1]。

对于健全区段相邻两检测点的 FTU 检测到的暂态电流相似系数接近于 1,相似程度高;对于故障点两侧的 FTU 检测到的暂态零模电流相似系数接近于 0,相似程度极低<sup>[14]</sup>。

## 2 分布式智能小电流接地故障定位方法

### 2.1 分布式的系统构成

如图 2 所示,分布式馈线系统由馈线终端 FTU、对等通信网络及配电自动化主站组成<sup>[15]</sup>。

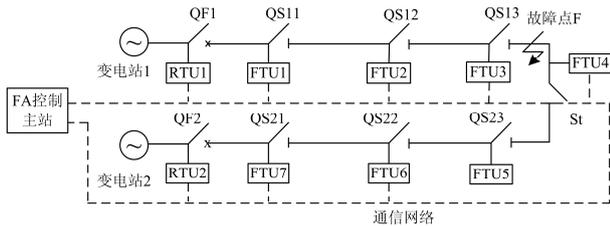


图 2 分布式馈线 FA 的结构示意

Fig. 2 Diagram of a FA system

馈线终端 FTU 是分布式 FA 系统的核心,主要是监视线路及开关设备的运行状态,并对开关进行控制。分布式 FA 系统功能是在线路正常运行时,线路上的馈线终端监控开关的运行状态并采集信息,如电流、电压、功率和开关状态等,并将采集的信息上传至主站;在线路发生故障时,馈线终端检测故障信息,除获得本身的故障信息外,还通过对等通信系统与相邻的馈线终端相互交换故障信息。通过分析相邻馈线终端之间交换的故障信息,确定故障区段。故障定位的整个过程不需要主站控制,馈线终端单独完成,只是将故障定位的最终结果上报配电自动化主站。

### 2.2 分布式智能故障定位的通信技术

通信系统是分布式 FA 最重要的部分,主要的通信方式有光纤通信、中压载波通信、无线通信等。因为分布式 FA 系统对对等通信的可靠性及实时性的要求较高,故分布式 FA 系统一般采用光纤通信方式。而光纤的组网方式有:光纤工业以太网和 EPON(Ethernet Passive Optical Network)。本文采用 EPON 的组网方式,实现馈线终端之间的信息传输。

分布式控制的基础是 GOOSE 信息的可靠性传输。GOOSE 信息的可靠传输能够使各馈线终端实时、准确地进行信息交换,给分布式故障定位提供了数据

支持。分布式故障定位需要的 GOOSE 信息有故障时间、暂态零序电流、开关状态、开关位置等。GOOSE 实现流程图如图 3 所示。

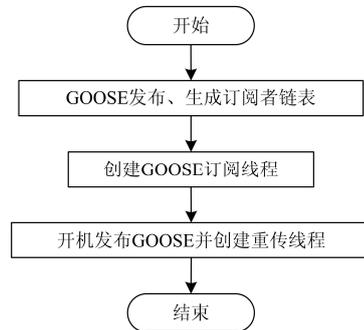


图 3 GOOSE 实现流程图

Fig. 3 Flow chart of GOOSE

馈线终端可以得到本终端订阅的相邻馈线终端的 GOOSE 信息,再结合本身的故障信息判断故障区段。馈线终端订阅的信息视配电网的实际运行状态而定,若配电网的网架结构发生改变,则需要对订阅信息进行修改。

UDP 是一种简单的面向无连接不可靠的传输协议,即用户数据协议。相邻馈线终端通信时,UDP 可以采用单播、多播、广播等通信方式,且实时性好,效率高、传输时间短,正好可以满足 GOOSE 信息的传输,故 GOOSE 信息的传输采用 UDP 协议。

### 2.3 信号同步

本文计算暂态零序电流相似系数所用的故障信息是相邻馈线终端采集的暂态零序电流信号。计算暂态零序电流相似系数时要求 2 个馈线终端采集的暂态零序电流信号的时间保持同步。在实际的应用中,相邻馈线终端记录暂态电流信号很难实现精确的同步。为了减少时间不同步造成的误差,用平移数据窗的方法来实现信号同步,以满足暂态电流相似系数的计算要求。实现数据同步的重点是找到故障线路上各个馈线终端采集暂态零序电流的起始时刻,若起始时刻一致,就认为数据同步了。对于馈线终端采集的 2 个暂态零序电流波形,先固定其中的一个波形不动,将另一个暂态零序电流的数据窗平移,并计算暂态零序电流的幅值,其幅值为

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{T_0} i^2(t) dt} \quad (5)$$

式中:  $T_0$  的选取应当遵循尽量多地保留暂态信号而尽量少地保留工频信号;  $i(t)$  是暂态零序电流的瞬时值。

按式(5)求取暂态电流幅值,幅值最大的点暂态零序电流的相关系数也最大,起始时刻相差的也就越小,此时就近似地认为同步了。

因此, 利用平移过程中求取暂态电流幅值最大的方法来克服故障起始时刻不同带来的误差, 保证了暂态零序电流相似系数算法的可靠性。此时, 暂态零序电流的相似系数计算公式为

$$\rho_{\max} = \max[\rho(\tau)] = \max \frac{\sum_{n=1}^N i_k(t) i_{k+1}(t+\tau)}{\sqrt{\sum_{n=1}^N i_k^2(t) \sum_{n=1}^N i_{k+1}^2(t+\tau)}} \quad (6)$$

式中:  $i_k(t)$  和  $i_{k+1}(t)$  分别为相邻馈线终端检测到的暂态零序电流;  $t$  为采样序列;  $N$  为数据总长度;  $\tau$  为暂态零序电流平移的点数, 由于相邻馈线终端传输暂态电流信息需要延时几毫秒, 故一般根据现场相邻馈线终端对时的精度, 设置  $\tau$  的长度为 1~2 ms。

因故障点两侧的暂态零序电流信号相似程度较低, 即使求最大的暂态零序电流相似系数, 也会低于阈值, 仍然满足故障定位的原理。

### 2.4 分布式故障定位过程

故障线路上, 故障点上游(或下游)同侧的相邻馈线终端之间的暂态零序电流波形相差很小, 两波形的暂态零序电流相似系数大, 接近于 1; 故障点两侧的馈线终端之间的暂态零序电流波形相差很大, 两波形的暂态零序电流相似系数小, 接近于 0。

当线路发生故障时, 馈线终端 FTU 利用暂态电流的突变量启动, 馈线终端启动后除了记录故障信息外, 同时广播自己检测到的暂态零序电流信息(包括启动时间、终端地址以及暂态零序电流幅值)。

故障线路上的其他终端接收到网络上广播的暂态零序电流信息后, 就会查询在有效时间内是否有突变量启动记录, 若有, 则比较网络上广播的暂态零序电流与自己检测到的暂态零序电流的幅值, 暂态零序电流的幅值按式(5)计算, 若发现自己检测到的暂态零序电流幅值大, 则会启动邻域检测程序。为了提高故障定位的可靠性, 从故障线路中选择暂态零序电流幅值较大的馈线终端时, 从中选择至少有 3 个馈线终端来启动领域检测程序。启动领域检测程序的流程如图 4 所示。

选择故障线路的暂态零序电流幅值较大的馈线终端(至少 3 个)之后, 启动领域检测程序, 领域检测的流程如图 5 所示。馈线终端采用网络拓扑查询, 分别向相邻的馈线终端发送请求暂态零序电流命令, 被查询的相邻馈线终端接收查询命令并返回暂态零序电流信息; 经过一段时间之后, 收集到所有相邻馈线终端的暂态零序电流信息后, 两两计算

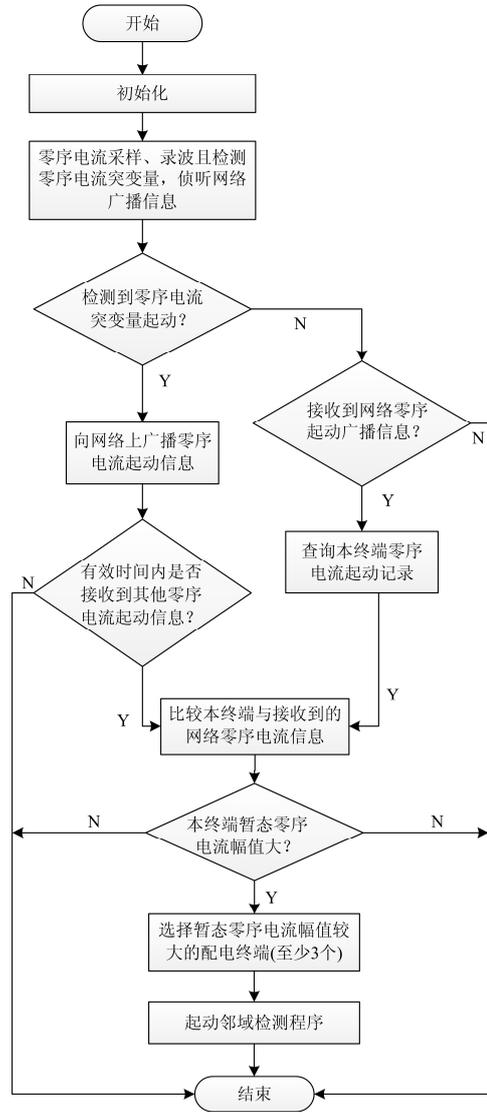


图 4 启动邻域检测程序的流程图

Fig. 4 Flowchart of starting the field test procedure

该终端与相邻终端的暂态零序电流相似系数。通过计算比较, 从中选择暂态零序电流相似系数最小的区段为疑似故障区段, 然后与预先设置好的阈值相比较, 若暂态零序电流相似系数小于阈值, 则判断为故障区段; 否则, 为疑似故障区段。最后把故障区段或者故障疑似区段上报给主站。

### 3 ATP 仿真实验

利用电磁暂态仿真软件 ATP 进行仿真实验。仿真模型如图 6 所示, 线路参数的设置如下: 模型有 4 条输电线路, 即  $l_1, l_2, l_3, l_4$ , 线路长度分别为 5km、8 km、10 km、13 km。故障发生在  $l_3$  上, 检测点 A、B、C、D 离母线的距离分别为 1 km、2 km、4 km、6 km。架空线路的参数: 正序电阻参数  $R_+$  为 0.17  $\Omega$ /km。

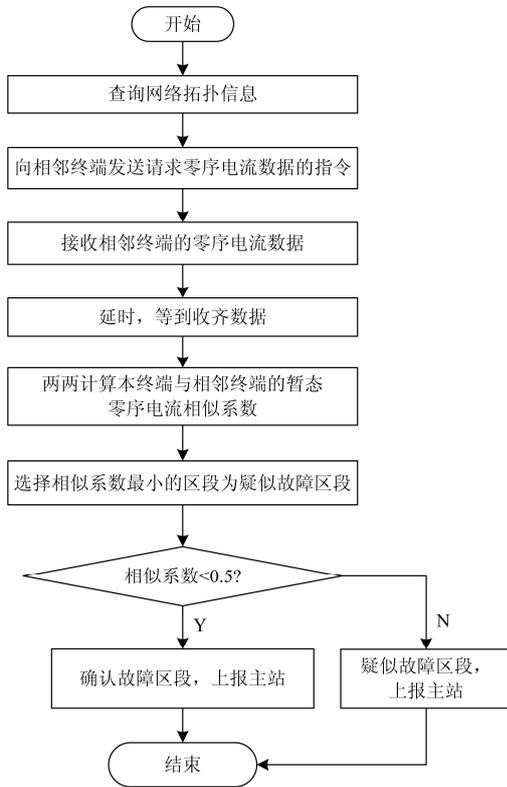


图 5 领域检测程序图

Fig. 5 Field test procedure figure

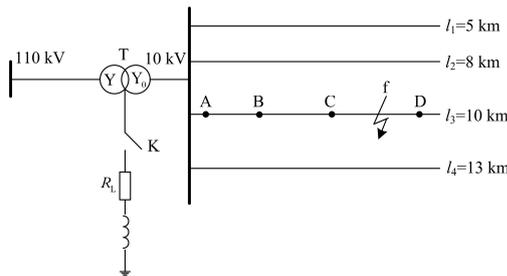


图 6 小电流接地故障的仿真模型

Fig. 6 Simulation models of small current grounding fault

零序电阻参数  $R_0$  为  $0.32 \Omega/\text{km}$ 。正序电感参数  $L_+$  为  $1.1017 \text{ mH}/\text{km}$ 。零序电感参数  $L_0$  为  $3.56 \text{ mH}/\text{km}$ 。正序电容参数  $C_+$  为  $0.115 \mu\text{F}/\text{km}$ 。零序电容参数  $C_0$  为  $0.0062 \mu\text{F}/\text{m}$ 。线路负荷 Load1、Load2、Load3、Load3 的有功负荷分别为  $1 \text{ MW}$ 、 $0.2 \text{ MW}$ 、 $2 \text{ MW}$ 、 $4 \text{ MW}$ ，其他参数相同，即频率为  $50 \text{ Hz}$ ，有功功率为  $1 \times 10^6 \text{ W}$ ，感性无功为  $0.41 \times 10^6 \text{ W}$ ，容性无功为  $0$ 。实际工程上谐振接地采用过补偿方式，若过补偿为  $10\%$  时，消弧线圈的电感为  $L=0.8607 \text{ H}$ ，阻尼电阻为  $R=30 \Omega$ ，仿真时间为  $0.2 \text{ s}$ ，系统在  $0.04 \text{ s}$  时发生 A 相金属性单相接地。

当接地电阻为  $5 \Omega$  时，采用分布式控制方式采集检测点的 A、B、C、D 的暂态零序电流波形如图

7—图 9 所示；为了克服信号数据同步的问题，将靠近故障点的暂态零序电流波形不动，相邻检测点的暂态零序电流波形左平移  $0.5 \text{ ms}$ 。

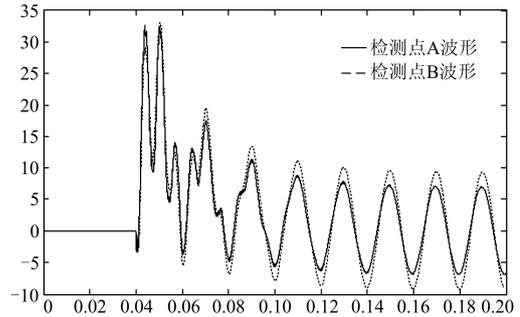


图 7 检测点 A、B 的暂态零序电流对比

Fig. 7 Transient zero sequence current contrast of detection points A, B

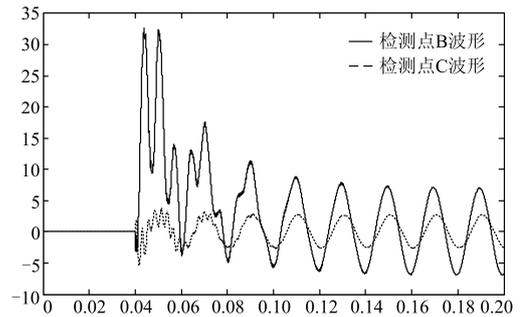


图 8 检测点 B、C 的暂态零序电流对比

Fig. 8 Transient zero sequence current contrast of detection points B, C

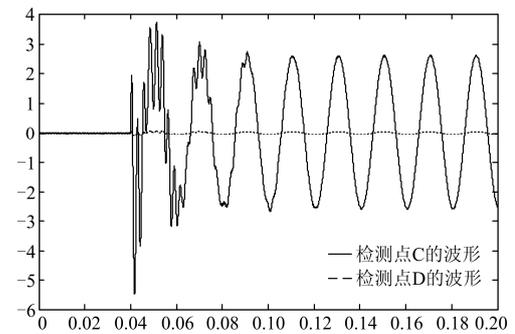


图 9 检测点 C、D 的暂态零序电流对比

Fig. 9 Transient zero sequence current contrast of detection points C, D

由图 7—图 9 的暂态零序电流波形可知，检测点 A、B、C 之间的暂态零序电流波形相似度高，检测点 C、D 的暂态零序电流波形相似度低。经 Matlab 对检测点的数据处理，得到暂态电流的波形相似系数为： $\rho_{AB} = 0.9837$ ； $\rho_{BC} = 0.9387$ ； $\rho_{CD} =$

0.4500。通过相邻馈线终端暂态零序电流相似系数的比较可知, 故障区段为 CD 区段。

同时, 还对不同接地电阻和不同电压故障时刻进行了仿真。当接地电阻为  $5\ \Omega$ , 不同电压初相角时, A、B、C、D 检测点之间的暂态电流相似系数值, 如表 1 所示。故障发生在电压初相角为  $90^\circ$ , 不同接地电阻时, A、B、C、D 检测点之间的暂态电流相似系数值, 如表 2 所示。

表 1 不同电压初相角时相邻检测点的暂态零序电流相似系数  
Table 1 Transient zero sequence current similarity coefficient of adjacent detection point is different voltage first phase angle

序号	1	2	3	4
初相角/ $^\circ$	30	45	60	90
$\rho_{AB}$	0.92	0.94	0.94	0.89
$\rho_{BC}$	0.983	0.943	0.965	0.983
$\rho_{CD}$	0.425	0.425	0.356	0.365
故障区段	CD 段	CD 段	CD 段	CD 段

表 2 不同接地电阻时相邻检测点的暂态零序电流相似系数  
Table 2 Different grounding resistor adjacent detection points transient zero sequence current similarity coefficient

序号	1	2	3
接地电阻/ $\Omega$	30	45	60
$\rho_{AB}$	0.987	0.935	0.965
$\rho_{BC}$	0.983	0.957	0.991
$\rho_{CD}$	0.450	0.437	0.500
故障区段	CD 段	CD 段	CD 段

从仿真结果可知, 故障发生在不同接地电阻、电压初相角时, 通过计算比较馈线终端与相邻馈线终端之间的暂态零序电流相似系数可知, 故障点两侧的暂态零序电流相似系数最小, 准确判断故障区段为 CD 区段。该算例说明了该方法不受电压初相角和接地电阻的影响且可以更加迅速、精确地找到故障位置, 提高供电可靠性。

## 4 适用性分析

### 4.1 接地方式的影响

中国配电网采用小电流接地方式, 小电流接地方式又分为中性点不接地和中性点经消弧线圈接地。因为接地方式会对暂态零序电流产生影响, 但对暂态零序电流的相似性, 可以不考虑消弧线圈给暂态电流的故障特性带来的影响。因为消弧线圈不会改变暂态电流的故障特性。在故障点上游相邻检测点的暂态电流仍具有相似性, 在故障点下游的相邻检测点同上游一样。在故障点两侧的暂态电流差

异依然很大, 二者不具有相似性。

### 4.2 对地分布电容的影响

由于线路电流比较小, 可以忽略不计, 因此暂态零序电流的大小主要为线路对地电容的电流。只要改变线路对地电容的大小会直接影响暂态零序电流的幅值, 但是并不会改变故障点上游或下游相邻馈线终端暂态零序电流相似程度高, 而故障点两侧的相邻馈线终端相似程度低。因此, 改变线路对地电容的大小并不会影响分布式故障定位的准确性。

### 4.3 馈线终端不启动的影响

馈线终端利用暂态零序电流的突变量启动, 但考虑到故障点下游的馈线终端会因暂态零序电流过小而不能启动。此时用原有的故障定位方法已不再满足要求。分布式控制方式利用实时网络拓扑查询相邻终端的暂态零序电流信息, 即使故障点下游的馈线终端不启动, 也能得到下游馈线终端的暂态零序电流信息, 并两两计算相邻终端暂态零序电流相似系数, 确定故障区段。分布式定位方法, 保证了馈线终端启动的可靠性, 同时防止了馈线终端暂态零序电流信息的漏报。只要有一个馈线终端启动, 就会启动邻域检测程序, 就能确定故障区段。

### 4.4 通信网络的影响

分布式故障定位, 利用相邻馈线终端相互通信, 以获取暂态零序电流的故障信息, 来确定故障区段。相邻馈线终端采用光纤通信时, 装置间相互通信在  $10\ \text{ms}$  以内, 保证了调取录波数据的实时性; 采用无线通信时, 故障前录波数据的长度需要根据信道情况设定。通信网络设置的好坏, 直接影响相邻馈线终端的相互通信, 严重影响故障定位的准确性和可靠性, 故对通信网络的设置应高度重视。

## 5 结论

本文提出一种分布式智能的小电流接地故障定位方法。该方法只需要暂态电流信号, 不用暂态电压信号, 能适用于所有的检测点, 适应范围广; 馈线终端启动的可靠性高, 防止漏报; 与传统的定位方法相比, 分布式故障定位由馈线终端单独完成, 不需要主站参与, 通信压力小, 可以更加迅速、精确地找到故障位置, 提高供电可靠性。通过 ATP 仿真验证了分布式智能小电流接地故障定位方法的可行性和准确性, 以及该方法不受电压初相角和接地电阻的影响。

### 参考文献

- [1] 高艳丰, 朱永利, 闫红艳, 等. 一种新型的输电线路双端行波故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 8-13.  
GAO Yanfeng, ZHU Yongli, YAN Hongyan, et al. A new

- fault location method of transmission lines based on double-terminal traveling wave[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 8-13.
- [2] 刘健, 张志华, 张小庆. 配电自动化主站的容错故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 6-11. LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing. Fault location with robustness for distribution automation systems (DAS)[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 6-11.
- [3] 刘健, 程红丽, 李启瑞. 重合器与电压—电流型开关配合的馈线自动化[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 68-71. LIU Jian, CHENG Hongli, LI Qirui. Feeder automation based on recloser and voltage-current-mode pole-mounted switches[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 68-71.
- [4] 胡福年, 孙守娟. 基于图论的矩阵算法在配电网故障定位中的应用[J]. 中国电力, 2016, 49(3): 94-98. HU Funian, SUN Shoujuan. Fault location of distribution network by applying matrix algorithm based on graph theory[J]. Electric Power, 2016, 49(3): 94-98.
- [5] 周羽生, 周有庆, 戴正志. 基于 FTU 的配电网故障区段判断算法[J]. 电力自动化设备, 2000, 20(4): 25-27. ZHOU Yusheng, ZHOU Youqing, DAI Zhengzhi. Algorithm for fault section judgement in power distribution network based on FTU[J]. Electric Power Automation Equipment, 2000, 20(4): 25-27.
- [6] 宋国兵, 李广, 于叶云, 等. 基于相电流突变量的配电网单相接地故障区段定位[J]. 电力系统自动化, 2011, 25(21): 84-90. SONG Guobing, LI Guang, YU Yeyun, et al. Single-phase earth fault section location based on phase current fault component in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 25(21): 84-90.
- [7] 伊洋, 刘育权, 陈宇强, 等. 基于信息综合判断的智能变电站网络通信故障定位技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 135-140. YI Yang, LIU Yuquan, CHEN Yuqiang, et al. Research of network communication fault location technique in smart substation based on comprehensive information judgment[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 135-140.
- [8] 李佩杰, 刘乾, 白晓清, 等. 一种基于有向图的配电网故障定位方法[J]. 现代电力, 2016, 33(1): 60-68. LI Peijie, LIU Qian, BAI Xiaoqing, et al. A method of fault location in distribution network based on directed graph[J]. Modern Electric Power, 2016, 33(1): 60-68.
- [9] 薛永端, 吴敏, 王俊江, 等. 一种电压型配电网单相接地故障处理方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(12): 68-71. XUE Yongduan, WU Min, WANG Junjiang, et al. Single phase fault isolation based on voltage measurements in non-solid grounded distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(12): 68-71.
- [10] 孙波, 孙同景, 薛永端, 等. 基于暂态信息的小电流接地故障区段定位[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 52-55. SUN Bo, SUN Tongjing, XUE Yongduan, et al. Single phase to ground fault section location based on transient signals in non-solidly earthed network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 52-55.
- [11] 马士聪, 徐丙垠, 高厚磊, 等. 检测暂态零模电流相关性的小电流接地故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 48-52. MA Shicong, XU Bingyin, GAO Houlei, et al. A new distributed protection principle based on adaptive division for relevant fault area[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 48-52.
- [12] 张林利, 徐丙垠, 薛永端, 等. 基于线电压和零模电流的小电流接地故障暂态定位方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 110-115, 198. ZHANG Linli, XU Bingyin, XUE Yongduan, et al. Transient fault locating method based on line voltage and zero-mode current in non-solidly earthed network[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 110-115, 198.
- [13] 薛永端, 李娟, 徐丙垠. 中性点经消弧线圈接地系统小电流接地故障暂态等值电路及暂态分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 25(22): 5703-5714. XUE Yongduan, LI Juan, XU Bingyin. Transient equivalent circuit and transient analysis of single-phase earth fault in arc suppression coil grounded system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 25(22): 5703-5714.
- [14] 刘鹏辉, 黄纯. 基于动态时间弯曲距离的小电流接地故障区段定位方法[J]. 电网技术, 2016, 40(3): 952-957. LIU Penghui, HUANG Chun. A fault section location method for small-current grounding fault in distribution network based on dynamic time warping distance[J]. Power System Technology, 2016, 40(3): 952-957.
- [15] 李勋, 黄荣辉, 姚森敬, 等. 一种改进行波时频复合分析的杆塔故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 130-136. LI Xun, HUANG Ronghui, YAO Senjing, et al. A novel fault location method by tower based on traveling wave time-frequency analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 130-136.

收稿日期: 2016-07-29; 修回日期: 2016-11-25

作者简介:

孙桂花(1988—), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网自动化; E-mail:1208386617@qq.com

王敬华(1972—), 男, 高工, 硕士研究生导师, 研究方向为配电网自动化。E-mail:wangjh@kehui.cn

(编辑 姜新丽)