

DOI: 10.7667/PSPC171585

# 基于配电自动化主站的单相接地故障定位系统设计与应用

王兴念<sup>1</sup>, 张维<sup>2</sup>, 许光<sup>1</sup>, 郭上华<sup>2</sup>, 张全忠<sup>2</sup>, 许冲冲<sup>3</sup>

(1. 珠海许继电网自动化有限公司, 广东 珠海 519060; 2. 珠海许继电气有限公司, 广东 珠海 519060;  
3. 国网北京市电力公司, 北京 100045)

**摘要:** 为满足大量配电终端、故障指示器接入配电自动化主站, 提出基于单相接地故障录波暂态量故障特征提取方法和融合故障录波故障特征量和故障事件信息的单相接地故障区段定位策略。设计基于配电自动化主站的单相接地故障在线定位系统。为满足工程应用, 给出现场设备混装、通信延时、启动条件缺失条件下的解决方案以及融合单相接地、短路接地故障信息的统一处理策略。工程现场应用结果表明, 基于配电自动化主站的单相接地故障定位系统能满足各种接线方式下、复杂环境的应用需要。

**关键词:** 配电自动化; 单相接地故障; 故障录波; 信息融合; 故障定位

## Design and application about single-phase grounding fault location system based on distribution automation master station

WANG Xingnian<sup>1</sup>, ZHANG Wei<sup>2</sup>, XU Guang<sup>1</sup>, GUO Shanghua<sup>2</sup>, ZHANG Quanzhong<sup>2</sup>, XU Chongchong<sup>3</sup>

(1. Zhuhai Xujizhi Power Automation Ltd., Zhuhai 519060, China; 2. Zhuhai Xuji Electrical Ltd., Zhuhai 519060, China;  
3. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100045, China)

**Abstract:** In order to meet the large number of distribution terminal and fault indicator connected into distribution automation master station, a transient fault feature extraction method based on single-phase grounding fault recording wave and localization strategy of single-phase grounding fault and fusioning fault record fault feature and fault event information are proposed. A on-line single-phase grounding fault location system based on distribution automation master station is designed. In order to meet the engineering application, the solution of equipment mixing on site, communication delay and start-up condition absence is given and the unified processing strategy of fusioning fault information for single-phase round and short-circuit is presented. The application results in engineering field show that the single-phase grounding location system can meet the application requirements of various wiring modes and complex environment.

This work is supported by Special Fund for Applied Science and Technology Research and Development of Guangdong Provincial Science and Technology Department (No. 2015B012128006) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52020116000F).

**Key words:** distribution automation; single-phase grounding fault; fault record; information fusion; fault location

## 0 引言

我国中压配电网以中性点不直接接地方式为主, 配电网线路故障主要分为相间短路故障和单相接地故障。配电网线路发生单相接地故障, 根据规程可允许带故障向负荷供电 1~2h 以提高供电可靠性, 但其造成非故障相电压升高至线电压, 长时间带故

障运行可使之扩大为相间短路, 影响电力系统安全, 因此, 研究单相接地故障区段定位技术成为提高配电网供电可靠性的热点之一<sup>[1-6]</sup>。随着配电自动化主站实用化应用推进, 各种类型、不同厂家的配电终端和故障指示器接入配电自动化主站, 当发生单相接地故障时, 架空暂态录波型故障指示器上送故障录波, 其他类型故障指示器或配电终端上送故障事件信息, 因此, 基于配电自动化主站的单相接地故障定位需要重点解决以下两个问题: (1) 基于故障录波的故障特征量提取<sup>[7-10]</sup>, 融合故障特征量和故障

基金项目: 广东省科技厅应用型科技研发专项资金项目 (2015B012128006); 国家电网科技项目 (52020116000F)

事件信息<sup>[11-12]</sup>的故障处理策略, 以及满足现场设备混装、单相接地故障演变成短路故障等场景下的故障统一处理; (2) 解决工程应用中设备安装多样性、信息丢失、启动判据缺失导致故障定位失效等问题。

综上, 本文针对故障录波提出应用多种数字处理方法提取故障特征量形成冗余、应用贝叶斯概率融合故障特征量和故障事件信息的故障定位策略, 以及融合单相接地、短路接地故障信息的故障统一处理方法, 并从工程应用角度给出了通信不稳定、启动条件缺失、处理效率低的应对策略。

## 1 系统设计

### 1.1 总体设计方案

配电网单相接地故障定位系统由配电自动化主站层、通信网络层、设备层组成(如图 1 所示)。当发生单相接地时, 配电设备层通过通信网络层上送单相接地故障信息、故障录波文件至配电自动化主站, 配电自动化主站在对配电终端、故障指示器上送信息解析的基础上进行故障定位, 并根据配电网运行状态自动生成网络重构方案, 调度人员可根据实际应用选择手动、半自动或自动方式进行故障隔离并恢复供电。

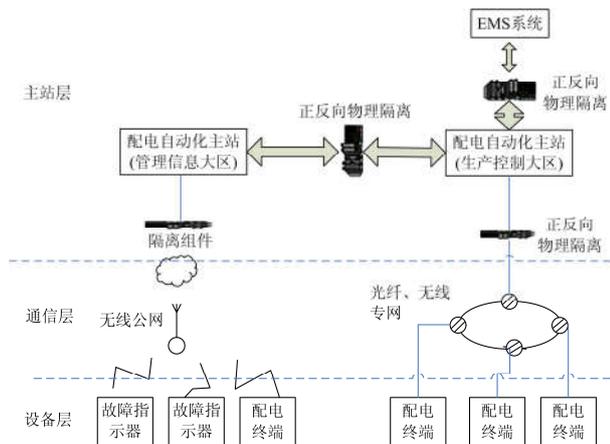


图 1 单相接地故障定位总体方案结构图

Fig. 1 Structure diagram of single-phase ground fault location

1) 主站层。采集故障指示器与配电终端故障信息、故障录波文件并对其解析和进行故障定位。即对不具备单相接地判定的架空暂态录波型故障指示器上送故障录波文件进行数据解析和提取故障特征, 并根据配电自动化主站实时运行状态、配电网拓扑对其进行单相接地故障定位; 对具备单相接地故障判定故障指示器或配电终端采集故障事件信息, 参考短路故障定位方法实现故障定位; 针对混

装线路融合线路上各类配电终端、各类故障指示器信息进行单相接地故障定位等。配电自动化主站提供单相接地录波解析、故障事件分析、单相接地定位、故障处理、故障展示、录波展示、故障信息查询、故障可视化、故障报告等功能。

2) 通信网络层。采用光纤、无线等通信方式, 遵循国家电力信息安全防护相关规定构建通信信息网, 并应用 IEC60870-5-101/104、IEC61850 通信规约实现配电设备层与配电自动化主站之间的通信和数据传输。

3) 设备层。设备层主要包括站所终端(DTU)、馈线终端(FTU)、各类架空/电缆故障指示器。

### 1.2 功能设计

配电网单相接地故障定位系统采用分层设计, 在软件结构上可分为数据层、引擎层、应用层及展示层, 如图 2 所示。



图 2 故障定位系统功能结构图

Fig. 2 Fault location software functional structure diagram

1) 数据层。主要包括故障事件信息、故障录波文件、网络拓扑信息、实时数据、配电网运行数据、配电网属性等单相接地故障在线检测及故障诊断所需要的基础数据。

2) 引擎层。主要包括特征量提取与故障定位算法库、可视化引擎、规则引擎等。其中特征量提取与故障定位算法库实现对故障录波文件特征量提取、故障选线与故障区段定位; 可视化引擎用于实现图、表等可视化展示等; 规则引擎用于建立不同故障诊断所需规则。

3) 应用层。主要包括录波数据查询、故障类型诊断、故障特征查询、故障定位、故障预警等应用功能。

4) 展示层。主要包括应用 GIS、接线图、图表等对单相故障信息、处理流程、处理结果进行可视

化展示。

## 2 单相接地故障区段定位策略

### 2.1 单相接地自动识别与处理流程

在实际工程应用中，一条母线下不同馈线间可能安装不同类型故障指示器或配电终端，单相接地故障可能发展成短路接地故障等多种应用场景，对此，配电自动化主站对故障处理进行优化（如图3所示）。

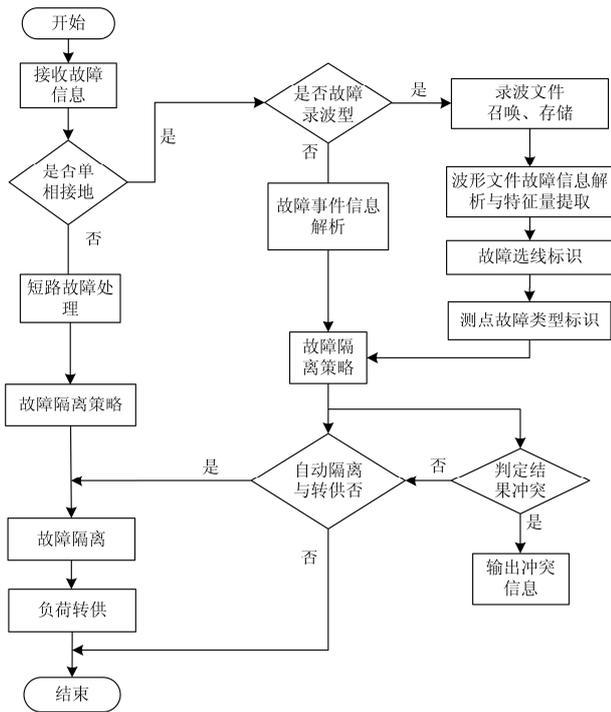


图3 单相接地故障处理流程图

Fig. 3 Processing flow chart of single-phase grounding fault

1) 配电自动化主站接收变电站、配电设备故障信息，并根据接收到的信息自动识别属于单相接地还是短路故障，并进入不同的故障判定流程。

2) 当线路发生短路故障时，配电自动化主站根据变电站出口断路器 FCB 跳闸和相应的保护动作信息启动故障判定，并根据收集到的故障事件信息进行故障区段的定位和以临近自动化开关编制最小停电范围的故障隔离操作步骤。

3) 当线路发生单相接地故障时，配电自动化主站根据站内上送的变电站母线接地信号或选线装置动作等信号，启动单相接地故障判定。配电自动化主站通过线路属性自动识别是否安装架空暂态录波型故障指示器，启动相应单相接地处理流程。在完成故障特征分析后，融合相关故障信息进行故障定位，若发现定位结果相互矛盾，推出故障提示信息，交由人工处理故障。

4) 在单相接地故障处理过程中，若配电自动化主站接收到对应线路出口断路器跳闸和保护动作信息，则把本次事故判定为相继故障(即判定单相接地故障发展成短路接地故障)，并融合单相接地故障信息对其进行故障定位和编制负荷转供策略，以实现故障统一处理。

### 2.2 故障录波型的单相接地故障信息解析

当发生单相接地时，架空暂态录波型故障指示器一般上送三相电流、零序电流和三相电场强度录波文件，配电自动化主站可采用不同方法提取故障录波的单相接地故障特征量形成冗余，并应用贝叶斯概率方法融合多种故障特征进行容错故障定位，以提升单相接地故障定位准确性。

#### 1) 基于相关性分析的零序电流故障特征提取

参考文献[13-14]对单相接地暂态零序电流特征分析可知：故障线路与健全线路的暂态零序电流波形不相似，健全线路间暂态零序电流波形相似；故障点两侧暂态零序电流波形不相似并极性相反，故障点电源侧以及故障点负荷侧暂态零序电流波形相似。为此，应用数字处理相关系数法对零序电流波形相关性进行分析提取故障特征量实现故障选线、选段。其具体处理过程如下。

①根据配电网拓扑关系，按式(1)计算同一条母线下每条出线第一个测点两两间相关系数  $\rho_{mn}$ ，按式(2)计算每个测点综合相关系数  $\rho_m$ 。若存在  $\rho_m \leq \delta_{\text{阈值}}$  的测点，则该测点对应线路上故障标识；若不存在测点  $\rho_m \leq \delta_{\text{阈值}}$ ，则母线上故障标识。

$$\rho_{mn} = \frac{\sum_{i=1}^N X_{i-n} X_{i-m}}{\sqrt{\sum_{i=1}^N X_{i-n}^2 \sum_{i=1}^N X_{i-m}^2}} \quad (1)$$

$$\rho_m = \frac{1}{L-1} \left( \sum_j \rho_{mj} - \rho_{mm} \right) \quad j=1, \dots, L \quad (2)$$

式中： $X_{i-n}$ 、 $X_{i-m}$  为  $m$ 、 $n$  测点故障录波采样点  $i$  的值； $L$  为测点总数。

②根据配电网拓扑关系，对配电线路从电源侧到负荷末端各测点按式(1)计算相邻测点相关系数  $\rho_{mn}$ 。若  $\rho_{mn} \geq \delta_{\text{阈值}}$ ，表明两测点波形相似，则两测点依据靠近母线侧的测点标识打上相同标识。若  $\rho_{mn} < \delta_{\text{阈值}}$ ，表明两测点波形不相似，则两测点打上不同标识，即靠近母线侧打上故障标识，负荷侧打上非故障标识。

#### 2) 基于相电流突变的故障特征提取

参考文献[15]对单相接地时相电流突变量分析

可知: 健全线路三相电流突变量幅值大小相等、相位相同、波形一致; 故障线路的故障点之前, 仅 2 个健全相突变电流幅值相同、相位相同、波形一致, 故障点之后的三相电流突变量幅值大小相等、相位相同、波形一致。为此, 可利用数字处理相关系数法对两相间相电流突变量的波形相似性进行分析, 计算其相关系数  $\rho_{AB}$ 、 $\rho_{BC}$ 、 $\rho_{CA}$ , 实现单相接地故障选线、选段。其具体过程如下。

①按式(3)计算各测点相电流突变量  $\Delta I(k)$ 。

$$\Delta I(k) = I(k) - I(k - N) \quad (3)$$

式中:  $N$  为工频周期采样点数;  $I(k)$  为相电流采样点  $k$  的值。

②按式(1)计算同一条母线下每条出线第一个测点的两相间相电流突变量的相关系数  $\rho_{AB}$ 、 $\rho_{BC}$ 、 $\rho_{CA}$ 。当测点  $\min(\rho_{AB}, \rho_{BC}, \rho_{CA}) \leq \delta_{\text{阈值}}$ , 则该测点对应配电线路打上故障线路标识, 否则打上非故障标识。

③按式(1)计算故障线路各测点两相间相电流突变量的相关系数  $\rho_{AB}$ 、 $\rho_{BC}$ 、 $\rho_{CA}$ 。当测点  $\min(\rho_{AB}, \rho_{BC}, \rho_{CA}) \leq \delta_{\text{阈值}}$ , 对其打上故障标识, 否则打上非故障标识。

3) 基于 S 变换的相对能量熵的零序电流故障特征提取

广义 S 变化结合了短时傅里叶变换和小波变换优点, 具有良好的时频局部变化特性, 能有效地反映信号在各频率下的特征, 充分显现待分析信号的故障特征细节部分, 可提高故障检测的精确度和可靠性<sup>[16-17]</sup>。对采集到的  $N$  个离散信号点  $x(k)$  进行 S 变换过程如下:

$$S(m, n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(n+k) e^{\frac{2\pi^2 k^2}{n^2}} e^{\frac{j2\pi mn}{N}} \quad n \neq 0 \quad (4)$$

$$S(m, n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) \quad n = 0 \quad (5)$$

$$X(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} x(k) e^{-\frac{j2\pi nk}{N}} \quad (6)$$

式(4)一式(6)中,  $N$  为采样数。

相对信息熵反映信息有序化程度, 信息越有序相对信息熵越低, 反之越高。根据单相接地暂态零序电流特征可知: 非故障线路的暂态零序电流波形相似, 其相对信息熵小, 而故障线路暂态零序电流与非故障线路的暂态零序电流波形差异明显, 其相对信息熵大; 在故障点两侧零序电流波形差异大, 其相对信息熵大; 故障点前端、后端与非故障线路零序电流波形相似, 其相对信息熵小。因此可利用相对信息熵作为特征量进行故障选线、定位<sup>[18-19]</sup>。

基于 S 变换的相对信息熵特征量提取过程如下:

①零模能量函数为在一定时间内零模电压、电流乘积积分, 在各测点统一采用母线零序电压, 零模能量函数  $E_i$  如式(7), 对其按照式(4)一式(6)经 S 变换可得在对应频率  $f_n$  下暂态能量  $W_{i-n}$  如式(8)。

$$E_i(t) = \int_0^t u_{0i}(\tau) i_{0i}(\tau) d\tau \quad i = 1, \dots, L \quad (7)$$

$$W_{i-n} = \sum_m [S(m, n)]^2 \quad i = 1, \dots, L \quad (8)$$

式(7)、式(8)中:  $i_{0i}(\tau)$ 、 $u_{0i}(\tau)$  分别为测点  $i$  的零序电流和零序电压;  $L$  为测点总数。

②根据配电网拓扑关系, 按式(9)计算同一母线下第一个测点两两间的相对能量熵  $m_{ij}$ , 按式(11)计算测点  $i$  的综合能量熵  $m_i$ 。取同一母线下综合能量熵最大的测点对应线路打上故障标识。

$$m_{ij} = \sum_n |q_{i-n} \ln \frac{q_{i-n}}{q_{j-n}}| \quad (9)$$

$$q_{i-n} = \frac{W_{i-n}}{\sum_{n=1}^K W_{i-n}} \quad (10)$$

$$m_i = \sum_{j=1}^L (m_{ij} + m_{ji}) \quad (11)$$

式(9)一式(11)中:  $q_{i-n}$  为在频率  $f_n$  下所占权重系数;

$\sum_{n=1}^K W_{i-n}$  为测点在所有频率下能量和。

③根据配电网拓扑关系, 按式(9)一式(11)计算线路相邻测点的相对能量熵  $m_{ij}$  和综合能量熵  $m_i$ , 取本线路综合能量熵最大的测点  $i$  打上故障标识, 测点  $i$  至电源侧测点打上故障标识, 测点  $i$  至负荷侧测点打上非故障标识。

### 2.3 基于贝叶斯概率单相接地故障定位

在工程现场安装大量故障指示器并采用无线公网进行信息传输, 在信息传输过程中可能出现故障信息漏报、误报、错报现象, 为提升单相接地故障定位正确率, 应用贝叶斯概率方法实现故障容错<sup>[20]</sup>。

1) 贝叶斯概率容错定位方法。贝叶斯概率的故障定位方法是指将各种可能的故障区段都假设为故障, 假定故障信息正确的概率为  $p_c$ , 故障信息漏报、错报或误报的概率为  $1 - p_c$ , 对应第  $j$  区段故障, 在收到故障信息证据  $C$  下, 其故障的条件概率为  $\delta_j(C)$  (见式(12))、相对概率为  $P_j(C)$  (见式(13)), 选取最大相对概率对应区段为故障区段。

$$\delta_j(C) = \prod_{j \in \alpha} p_{c,j} \prod_{k \in \beta} (1 - p_{c,k}) \quad (12)$$

$$P_j(C) = \frac{\delta_j}{\sum_{i=1}^N \delta_i} \quad (13)$$

式(12)、式(13)中： $\alpha$ 和 $\beta$ 分别为与故障定位假设相符和不符合的故障信息集合； $N$ 为故障假设的总数。

2) 现场设备安装多样性下的故障定位在工程应用。在现场线路上配电设备安装复杂、多样，根据单相接地处理和判定总体可分为三种：某条母线下线路全部安装架空暂态录波型故障指示器(如图4母线I接线)；某条母线上安装具备自举功能的配电终端或故障指示器(如图4母线II、母线III接线)；在具备选线功能的线路上混装架空暂态录波型故障指示器或自举功能的故障指示器或配电终端(图4母线VI接线)。在现场应用中，配电自动化主站应采用不同处理流程以兼容现场设备安装多样性情况下单相接地定位。

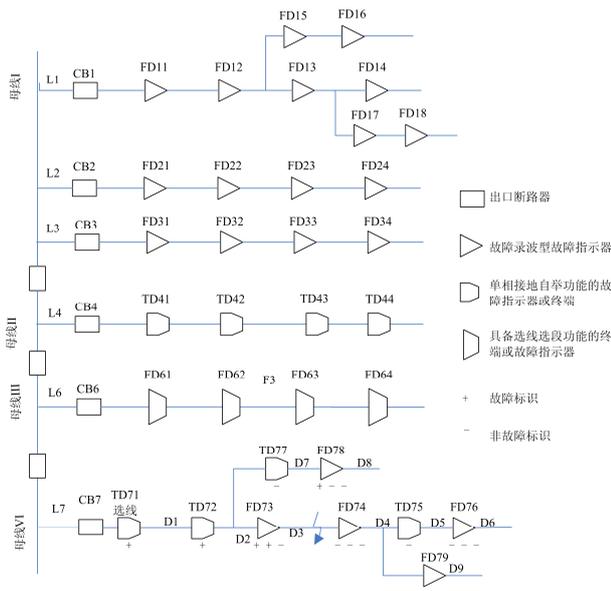


图4 安装各种设备的配电网线路示意图

Fig. 4 Schematic diagram of distribution line of installing various devices

① 针对母线下全部线路安装架空暂态录波型故障指示器情形：配电自动化主站首先对收集到的故障录波文件进行故障特征量提取，然后根据变电站选线装置上送选线信号、以及由故障特征量提取时打上的线路故障标识按照多数服从少数原则<sup>[20]</sup>进行故障选线。最后根据故障特征量提取时打上的各测点故障标识，应用式(12)、式(13)计算各区段贝叶斯条件概率和相对概率，选取相对概率最大区段为故障区段。

② 针对安装具备自举功能配电设备的线路情

形：当线路上发生单相接地时，配电设备以单相接地故障事件状态变化的形式上送，配电自动化主站对上送的单相接地故障信号进行解析，并应用式(12)、式(13)计算各区段贝叶斯条件概率和相对概率，选取相对概率最大区段为故障区段。

③ 针对一条线路混装多种类型设备情形：一般在配电线路出口安装选线功能的配电设备或变电站选线装置，配电自动化主站首先根据接收到的选线信号进行选线；其次对故障录波文件提取故障特征量并标识各测点故障类型；然后综合接收到的单相接地自举信号与录波型测点故障标识，应用式(12)、式(13)计算贝叶斯条件概率和相对概率，最后选取相对概率最大区段为故障区段。如图4混装线路L7在D3区段发生单相接地故障时，FD72、FD78存在误报信号时，应用贝叶斯概率实现容错故障定位结果如表1所示。

表1 L7线路D3区段故障定位示例

| 故障区段 | 条件概率            | 相对概率        | 故障区段 |
|------|-----------------|-------------|------|
| D1   | 0.000 020 589 1 | 1.084 190%  | 否    |
| D2   | 0.000 185 302 0 | 9.757 712%  | 否    |
| D3   | 0.001 667 718 2 | 87.819 408% | 是    |
| D4   | 0.000 002 287 7 | 0.120 466%  | 否    |
| D5   | 0.000 000 254 2 | 0.013 385%  | 否    |
| D6   | 0.000 000 000 3 | 0.000 018%  | 否    |
| D7   | 0.000 020 589 1 | 1.084 190%  | 否    |
| D8   | 0.000 002 287 7 | 0.120 466%  | 否    |
| D9   | 0.000 000 003 1 | 0.000 165%  | 否    |

### 3 工程应用

#### 3.1 故障判定条件优化

##### 1) 单相接地事故启动条件优化

配电自动化主站根据接收到的母线零序电压动作信号启动单相接地事故判定。变电站信息一般通过EMS转发至配电自动化主站，在现场应用中变电站信息存在未配置、未转发或转发丢失等情况，导致配电自动化主站接收不到变电站母线零序电压动作信号而不能正确启动单相接地故障程序。为此，对单相接地故障启动条件优化，即除变电站母线零序电压动作信号外，变电站母线单相接地动作信号、变电站选线装置动作信号或某条线路在规定时间内收到大于两个配电设备单相接地信号(如“录波锁定”遥信动作、单相接地动作信号)也作为单相接地故障启动条件。

##### 2) 单相接地信息收集优化

现场应用中故障指示器大多采用无线通信，考

考虑无线通信延迟、间歇性故障等原因, 为保证故障信息收集完整, 根据现场经验以母线为单位设定故障录波或故障事件收集计时器(如故障录波收集计时器为5 min, 故障事件收集计时器为2 min), 在设定计时器内收到故障信息(包括再次或多次收到)被视为同一单相接地故障。

### 3.2 现场试点应用

某电力公司在故障高发区10条长线路安装具备单相接地选线选段配电终端35台(其中10台设定为选线模式、25台设定为选段模式), 架空暂态录波型故障指示器50套, 线路采用如图5所示混装方式, 即选线选段配电终端和架空暂态录波型故障指示器在电路上混合安装。自2016年7月15日至从2016年11

月8日试运行以来配电自动化主站捕捉实际故障21次(如表2所示), 13次扰动数据(即临时故障)。下面对其中的两次故障进行详细分析:

①表2中第3次故障: 2016年8月12日中午12点01分, 配电自动化主站报汤河口站10 kV5#母线接地, 12点06分选线开关2#杆1114正确动作, 并成功隔离故障, 判定故障区段为选线2#杆1113开关以下。

②表2中第17个单相接地故障: 2016年9月24日晚上22点02分, 配电自动化主站报汤河口站10 kV5#母线接地, 22点08分选线开关动作, 22点09分选段开关动作成功隔离故障, 2#杆61#杆架空暂态录波型故障指示器上送接地故障波形, 并定位61杆151杆之间, 经查汤唛路115#杆雷击所致。

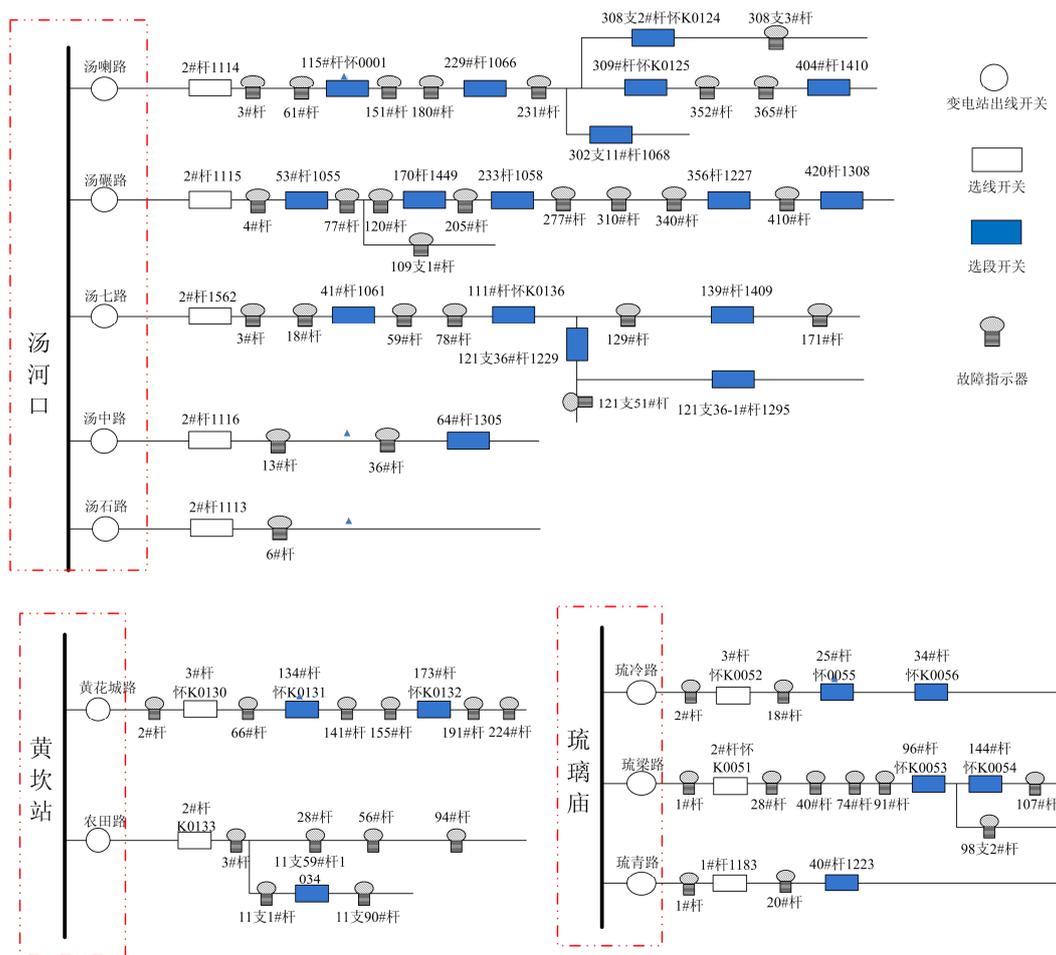


图5 某工程现场配电设备安装示意图

Fig. 5 Installation schematic diagram of distribution device on site

## 4 结语

随着配电自动化实用化推进, 各种类型的配电终端、故障指示器接入配电自动化主站为单相接地在线定位提供了条件。为此, 根据配电网单相接地

故障特征, 采用多种方法对故障录波提取故障特征量形成冗余, 提出应用贝叶斯概率融合故障特征量和故障事件信息的故障定位策略, 并结合工程应用中通信传输影响、设备安装等问题, 优化配电自动化主站故障处理以满足工程应用需要。后续, 将根

据工程应用进一步提升算法适应性。

表 2 单相接地故障定位记录

Table 2 Single-phase grounding fault location result

| 序号 | 故障线路               | 故障线路 | 定位结果                                      |
|----|--------------------|------|---|
| 1  | 2016/7/16 12:17:09 | 汤喇路  | 302 支 11#1068F 以下                         |
| 2  | 2016/7/21 4:08:39  | 琉梁路  | 96#杆 K0053F 以下                            |
| 3  | 2016/8/12 12:06:57 | 汤石路  | 2#1113F 以下                                |
| 4  | 2016/8/18 8:51:58  | 汤喇路  | 汤喇路 180#杆、汤喇路 308 支 3#杆、汤喇路 365#杆、2093 之间 |
| 5  | 2016/8/20 0:37:43  | 汤喇路  | 汤喇路 365#杆以下                               |
| 6  | 2016/8/21 7:32:26  | 汤喇路  | 汤喇路 151#杆、2093 之间                         |
| 7  | 2016/8/23 5:40:31  | 汤喇路  | 汤喇路 365#杆以下                               |
| 8  | 2016/8/23 13:08:21 | 汤喇路  | 汤喇路 231#杆、2093 之间                         |
| 9  | 2016/8/23 13:39:11 | 汤喇路  | 汤喇路 308 支 3#杆以下                           |
| 10 | 2016/8/24 11:40:36 | 汤喇路  | 汤喇路 3#杆、汤喇路 308 支 3#杆、2093 之间             |
| 11 | 2016/8/24 17:16:52 | 汤喇路  | 汤喇路 61#杆、汤喇路 151#杆之间                      |
| 12 | 2016/8/26 9:55:56  | 汤喇路  | 汤喇路 365#杆以下                               |
| 13 | 2016/9/7 14:09:51  | 汤中路  | 汤中路 13#杆、2090 之间                          |
| 14 | 2016/9/9 16:45:33  | 汤喇路  | 61#、2093 之间                               |
| 15 | 2016/9/9 19:11:44  | 汤喇路  | 180#、汤喇路 365#杆、2093 之间                    |
| 16 | 2016/9/10 2:58:49  | 汤七路  | 汤七路 3#杆、2092、2093 之间                      |
| 17 | 2016/9/24 22:09:12 | 汤喇路  | 61 杆 151 杆之间                              |
| 18 | 2016/10/21 7:31:42 | 黄花城路 | 3#杆杆 K0130F 以下                            |
| 19 | 2016/11/5 19:53:02 | 汤喇路  | 61#、151#之间                                |
| 20 | 2016/11/6 12:52:49 | 汤七路  | 129#杆、171#杆之间                             |
| 21 | 2016/11/8 11:44:39 | 汤七路  | 3#杆、2092(末端)、2093(末端)之间                   |

## 参考文献

- [1] 刘健. 配电网故障处理研究进展[J]. 供用电, 2015, 32(4): 8-15.  
LIU Jian. Advances on distribution network fault processing technology[J]. Distribution & Utilization, 2015, 32(4): 8-15.
- [2] ROOSTAEE S, THOMAS M S, MEHFUZ S. Experimental studies on impedance based fault location for long transmission lines[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 169-177. DOI: 10.1186/s41601-017-0048-y.
- [3] 马腾飞, 高亮. 含多微网的主动配电网故障区段定位算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 64-68.  
MA Tengfei, GAO Liang. Fault location algorithm for active distribution network with multi micro-grids[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 64-68.
- [4] 刘鹏程, 李新利. 基于多种群遗传算法的含分布式电源的配电网故障区段定位算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 36-41.  
LIU Pengcheng, LI Xinli. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on the multiple-population genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 36-41.
- [5] 马天祥, 程肖, 杜旭浩, 等. 配电自动化系统中单相接地故障定位新方法[J]. 陕西电力, 2016, 44(8): 67-75.  
MA Tianxiang, CHENG Xiao, DU Xuhao, et al. A new location method of single phase to earth fault in distribution automation system[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(8): 67-75.
- [6] 王晓卫, 田书, 李玉东, 等. 基于 S 变换特征频率序列的小电流接地系统故障区段定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 109-115.  
WANG Xiaowei, TIAN Shu, LI Yudong, et al. A novel fault section location method for small current neutral grounding system based on characteristic frequency sequence of S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 109-115.
- [7] 卢继平, 徐兵. 基于小波包能量相对熵的配电网单相接地故障区段定位[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(20): 26-31, 37.  
LU Jiping, XU Bing. Single-phase earth fault section location based on wavelet packet energy relative entropy in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(20): 26-31, 37.
- [8] 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.
- [9] 戴栩生, 黄纯, 叶倩, 等. 基于暂态相关性分析的小电流接地故障选线方法[J]. 中国电力, 2015, 48(1): 81-86, 141.  
DAI Xusheng, HUANG Chun, YE Qian, et al. Fault line selection algorithm based on correlation analysis of transient information of fault signal in neutral un-effectual grounded system[J]. Electric Power, 2015, 48(1): 81-86, 141.
- [10] 王韶, 朱姜峰. 基于改进相关性分析法的配电网单相接地故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 76-81.  
WANG Shao, ZHU Jiangfeng. Faulty line selection of single-phase to ground fault in distribution network based on improved correlation analysis method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 76-81.

- [11] 钱虹, 黄正润, 阮大兵. 配电网故障定位方法研究[J]. 上海电力学院学报, 2013, 29(2): 169-172.  
QIAN Hong, HUANG Zhengrun, RUAN Dabing. A survey of fault location methods in distribution network[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2013, 29(2): 169-172.
- [12] 谢章洪, 黄炜宏, 陈祥伟, 等. 一种配电网故障定位的实用矩阵算法[J]. 供用电, 2013, 30(3): 51-55.  
XIE Zhanghong, HUANG Weihong, CHEN Xiangwei, et al. A practical algorithm for fault location in distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2013, 30(3): 50-55.
- [13] 王韶, 朱姜峰. 基于改进相关性分析法的配电网单相接地故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(15): 76-81.  
WANG Shao, ZHU Jiangfeng. Faulty line selection of single-phase to ground fault in distribution network based on improved correlation analysis method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(15): 76-81.
- [14] 戴栩生, 黄纯, 叶倩, 等. 基于暂态相关性分析的小电流接地故障选线方法[J]. 中国电力, 2015, 48(1): 81-86, 141.  
DAI Xusheng, HUANG Chun, YE Qian, et al. Fault line selection algorithm based on correlation analysis of transient information of fault signal in neutral un-effectual grounded system[J]. Electric Power, 2015, 48(1): 81-86, 141.
- [15] 宋国兵, 李广, 于叶云, 等. 基于相电流突变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, 35(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, 35(21): 84-90.
- [16] 陶维青, 曹红光, 余南华, 等. S 变换在中性点不接地系统接地选线中的应用[J]. 化工自动化及仪表, 2014, 41(3): 279-284.  
TAO Weiqing, CAO Hongguang, YU Nanhua, et al. Application of S-transform to grounding line selection of neutral point ungrounded system[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2014, 41(3): 279-284.
- [17] 王晓卫, 田书, 李玉东, 等. 基于 S 变换特征频率序列的小电流接地系统故障区段定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 109-115.  
WANG Xiaowei, TIAN Shu, LI Yudong, et al. A novel fault section location method for small current neutral grounding system based on characteristic frequency sequence of S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 109-115.
- [18] 卢继平, 徐兵. 基于小波包能量相对熵的配电网单相接地故障区段定位[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(20): 26-31, 37.  
LU Jiping, XU Bing. Single-phase earth fault section location based on wavelet packet energy relative entropy in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(20): 26-31, 37.
- [19] 王晓卫, 田书, 李玉东, 等. 基于 S 变换特征频率序列的小电流接地系统故障区段定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 109-115.  
WANG Xiaowei, TIAN Shu, LI Yudong, et al. A novel fault section location method for small current neutral grounding system based on characteristic frequency sequence of S-transform[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(14): 109-115.
- [20] 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.

收稿日期: 2017-10-26; 修回日期: 2018-02-24

作者简介:

王兴念(1971—), 女, 硕士, 高工, 主要从事配电自动化、数据集成与配电管理等方面的技术与产品开发;  
E-mail: wangxingnian@zhxjcc.com

张维(1984—), 男, 博士研究生, 高工, 主要从事电力系统继电保护和配网自动化等方面的技术研究;

许光(1983—), 男, 学士, 工程师, 主要从事配电自动化技术与产品开发。

(编辑 魏小丽)