

配电网单相接地故障区段定位矩阵算法的研究

齐 郑¹, 高玉华², 杨以涵¹

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 廊坊供电公司, 河北 廊坊 065000)

摘要: 配电网由于分支多、接地电阻大, 单相接地故障定位问题长期以来没有得到很好的解决。提出了一种基于矩阵算法的配电网单相接地故障区段带电定位方法。针对 FTU (Feeder Terminal Unit) 测量数据建立故障信息特征矩阵, 对于中性点不接地系统, 特征矩阵中的元素为 FTU 测量到的零序电流与零序电压的相位差; 对于中性点经消弧线圈接地系统, 利用残流增量原理, 特征矩阵中的元素为 FTU 测量到的零序电流幅值变化量。应用统一判据对特征矩阵进行分析, 确定故障点所在的区段, 同时分析了当故障信息不完整时的解决方法。现场试验数据充分验证了该方法的正确性与可行性。

关键词: 配电网; 故障区段定位; 故障信息特征矩阵; 消弧线圈; 残流增量; 单相接地; 在线定位

Research on matrix-based algorithm for single-phase-to-earth fault section location in distribution grid

QI Zheng¹, GAO Yu-hua², YANG Yi-han¹

(1. School of Electric and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. Langfang Power Supply Company, Langfang 065000, China)

Abstract: Due to the large amount of branches and high grounding resistance of distribution grid, the grounding fault location has not been solved effectively. The matrix-based live location method is proposed for single-phase-to-earth fault section in distribution grid. Fault message character matrix is designed according to the data measured by FTU. For neutral point insulation system, the element of character matrix is the phase difference between zero-sequence voltage and zero-sequence current measured by FTU. For neutral point grounded by arc-suppression coil system, the element of character matrix is the variant of zero-sequence-current measured by FTU using the theory of remnant current increment. Through analysis of character matrix using united criterion, fault section is determined and the solution is analyzed when fault information is not completed. The correctness and feasibility of this technology has been fully approved by site experiments.

Key words: distribution grid; fault section location; fault information character matrix; arc-suppression coil; remnant current increment; single-phase ground; on-line locating

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)20-0159-05

0 引言

我国配电网的特点是分支多、覆盖区段广、接地电阻大, 而且多数采用中性点非有效接地方式, 单相接地故障定位问题长期以来困扰供电部门, 没有得到很好解决。

目前配电网发生单相接地故障后存在两种处理措施, 第一种是先将故障线路停电, 然后进行定位, 称为停电定位或离线定位, 如 C 型行波定位法等^[1]; 第二种是带故障运行过程中进行定位, 称为带电定位或在线定位。相对于停电定位来说, 带电定位的难度更大, 而现场在很多情况下需要进行带电定位。文献[2]提出采用 A 型行波进行定位, 其缺点是配

网通常存在多级分支和大量的终端, 发生接地故障后行波折、反射情况复杂, 无法有效区分故障点的特征波。文献[3]提出利用测量零序电磁场的方法定位, 但无法解决中性点经消弧线圈接地方式的单相接地故障定位。文献[4]提出“S”信号注入法, 其不足之处在于由于线路对地的分布电容在高次谐波作用下容抗变小, 使得高阻接地情况下信号能够在非故障区段流通, 无法正确定位。文献[5]提出“故障指示器”方法, 其不足之处在于对于中性点非有效接地系统, 接地电流远远小于负荷电流, “故障指示器”无法进行有效识别。

随着配电网自动化的广泛开展, 馈线终端设备 (FTU) 等现场监控终端越来越多地得到应用, 为

故障定位方法提供了强有力的数据平台。目前很多学者提出了基于 FTU 的短路故障区段定位方法^[6-11]，但是对基于 FTU 的单相接地故障区段定位方法研究不多。文献[7]提出了利用自动化开关 FTU 进行单相接地的区段定位，不足之处在于需要逐个区段识别，不适用于计算机分析，当网络复杂时，搜索难度增加。

本文提出了一种基于矩阵算法的配电网单相接地故障区段带电定位方法。针对 FTU 测量数据建立故障信息特征矩阵，并且对于中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统，特征矩阵的形式统一。应用统一判据对特征矩阵进行分析，确定故障点所在的区段，同时分析了当故障信息不完整时的解决方法。该算法尤其适用于网络复杂情况下的计算机计算。

1 故障信息特征矩阵的建立

1.1 节点特征矩阵

首先建立配电网的节点特征矩阵，需要注意的是本文所研究的节点并不是配电网的物理节点，而是如下三类节点：①线路的出线断路器；②线路上的 FTU 设备；③线路末端。对上述所有的节点进行统一编号，同时给配电网上的主干线及各个分支确定一个参考方向：由变电站电源指向负荷方向为主干线及各个分支的参考方向。该参考方向也是线路零序电流的参考方向。

节点特征矩阵 D 的元素按如下原则赋值：

①编号 $i < j$ 时，如果节点 i 和节点 j 之间存在一条支路，且节点 i 指向节点 j 的方向与参考方向相同，则 $d_{ij} = 1$ ；

②编号 $i < j$ 时，如果节点 i 和节点 j 之间存在一条支路，且节点 i 指向节点 j 的方向与参考方向相反，则 $d_{ij} = -1$ ；

③编号 $i \geq j$ 时，或者节点 i 和节点 j 之间不存在支路时， $d_{ij} = 0$ 。

如图 1 所示的配电网，包含五个节点，将网络分成了三个区段，由上述原则可以确定节点特征矩阵 D 为：

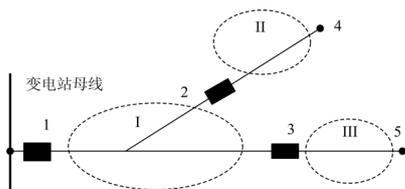


图 1 配电网结构

Fig.1 Structure of distribution grid

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

1.2 中性点不接地系统故障信息特征矩阵

对于中性点不接地系统，发生单相接地后容性零序电流由故障点流向母线及线路其他分支。定义母线至故障点的所有支路的集合为故障路径。故障路径上的节点必然检测到零序电流滞后零序电压 90° ，其他非故障路径上的节点必然检测到零序电流超前零序电压 90° 。

定义中性点不接地系统的故障信息序列 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$ ，其中 n 表示节点的总数， X 元素按如下原则赋值：

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{节点 } i \text{ 零序电流滞后零序电压 } 90^\circ \\ -1 & \text{节点 } i \text{ 零序电流超前零序电压 } 90^\circ \\ 0 & \text{节点 } i \text{ 为线路末端} \end{cases}$$

将 X 中的元素按顺序替代节点特征矩阵 D 中的对角元素就形成了故障信息特征矩阵 P 。

如图 1 所示，如果单相接地故障发生在节点 2 和 4 之间，故障信息序列 $X = [1, 1, -1, 0, 0]$ ，代入节点特征矩阵 D ，得到故障信息特征矩阵 P 为

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

同理，如果单相接地故障发生在节点 1 和 2 之间，故障信息特征矩阵 P 为：

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

1.3 中性点经消弧线圈接地系统故障信息特征矩阵

对于中性点经消弧线圈接地系统，发生单相接地后由于消弧线圈的补偿作用，故障路径上的节点检测到零序电流同样超前零序电压 90° ，与非故障路径上的节点一致。因此无法用相位信息构造故障信息特征矩阵 P ，为此利用残流增量的原理构造故障信息特征矩阵 P 。

残流增量的原理是：当系统发生单相接地故障后，短时改变消弧线圈的电抗值，则消弧线圈参数改变引起的补偿电感电流的变化只会反映在故障路

径的零序电流中。需要注意的是, 当发生经过渡电阻接地时, 由于消弧线圈参数改变将导致零序电压发生变化, 会使各节点的零序电流都发生变化, 此时应将零序电流按零序电压折算回金属性接地情况, 这样折算后的零序电流也可以表现出只有故障路径变化的特性。FTU测量数据时需要利用 GPS 或北斗系统获得时标信息, 这样就能够区分残流变化前后的零序电流数值。

定义中性点经消弧线圈接地系统的故障信息序列 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]$, 其中 n 表示节点的总数, X 元素按如下原则赋值:

$$x_i = \begin{cases} 1 & \text{节点}i\text{折算后的零序电流发生变化} \\ -1 & \text{节点}i\text{折算后的零序电流没有发生变化} \\ 0 & \text{节点}i\text{为线路末端} \end{cases}$$

将 X 中的元素按顺序替代节点特征矩阵 D 中的对角元素就形成了故障信息特征矩阵 P 。

如图 1 所示, 如果单相接地故障发生在节点 2 和 4 之间, 故障信息序列 $X = [1, 1, -1, 0, 0]$, 代入节点特征矩阵 D , 得到故障信息特征矩阵 P 为

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

通过上述方法可以建立配电网的故障信息特征矩阵 P , 该矩阵能够充分反映发生单相接地后各个节点的特征。对于中性点不接地或经消弧线圈接地, 故障信息特征矩阵 P 的表述形式一致。

2 故障定位的统一判据

2.1 定位算法

建立故障信息特征矩阵 P 之后, 采用如下步骤进行故障定位计算:

(1) 划分故障区段, 同时确定每个故障区段包含哪些支路。如图 1 中, 区段 I 包含三条支路 12、13 和 23, 这三条支路发生接地故障后的现象相同;

(2) 按式 (1) 计算各个区段的故障测度

$$\begin{cases} M_k = \sum m_{ij} \\ m_{ij} = p_{ii} + p_{jj} p_{ij} \end{cases} \quad (1)$$

其中: M_k 表示第 k 个区段的故障测度; m_{ij} 表示该区段包含的某条支路的故障测度; p_{ii}, p_{jj}, p_{ij} 表示该支路所对应的故障信息特征矩阵 P 中的元素。

(3) 对比各个区段的故障测度, 故障测度非负并且值最小的区段为故障区段。

上述算法的原理是: 根据故障信息特征矩阵 P 中的元素定义可知, 故障路径节点对应的元素为 1, 非故障路径节点对应的元素为 -1 或 0, 因此通过式 (1) 计算后, 必然故障路径所包括区段的测度值为非负, 而非故障路径所包括区段的测度值为负, 同时故障路径当中故障区段的测度值为最小。

如图 1 所示, 如果单相接地故障发生在节点 2 和 4 之间, 各个区段的故障测度如表 1 所示。

表 1 故障测度数据

Tab.1 Data of fault measurement

| 区段 | 包括支路 | 支路测度 | 区段测度 |
|-----|------|------|------|
| I | 12 | 2 | 4 |
| | 13 | 0 | |
| | 23 | 2 | |
| II | 24 | 1 | 1 |
| III | 35 | -1 | -1 |

由表 1 可见, 区段 I、II 的测度为非负, 说明这两个区域在故障路径上, 而区段 II 的测度最小, 说明区段 II 为故障区段, 判断正确。

如果单相接地故障发生在节点 1 和 2 之间, 各个区段的故障测度如表 2 所示。

表 2 故障测度数据

Tab.2 Data of fault measurement

| 区段 | 包括支路 | 支路测度 | 区段测度 |
|-----|------|------|------|
| I | 12 | 0 | 0 |
| | 13 | 0 | |
| | 23 | 0 | |
| II | 24 | -1 | -1 |
| III | 35 | -1 | -1 |

由表 2 可见, 只有区段 I 的测度为非负, 说明区段 I 为故障区段, 判断正确。

由于中性点不接地方式及经消弧线圈接地方式两种情况下, 故障信息特征矩阵 P 的表述形式一致, 因此定位算法也一致, 因此称为统一判据。

2.2 故障信息不完整时的解决方法

设某配电网区段 1 发生故障, 区段 2 包含区段 1, 由故障信息特征矩阵 P 的建立及故障定位的统一判据可知, 区段 2 同样满足故障判据。因此如果故障信息不完整时, 判定的故障区段范围会扩大, 但是不会出现错误。

当某些节点处没有配置 FTU, 或者因 FTU 故障而不能得到该节点信息时, 在形成节点特征矩阵 D 以及故障信息特征矩阵 P 时不考虑这些节点即可, 即 D 、 P 两个矩阵的维数降低, 上述故障定位

统一判据仍然适用。

例如，图 1 中，若故障发生在节点 2，4 之间，但节点 2 的信息不确定，得故障信息序列

$$X = [1, *, -1, 0, 0]$$

删除无效节点 2，得故障信息序列

$$X = [1, -1, 0, 0]$$

矩阵 D ， P 中均不考虑节点 2，得

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

可以判定故障在节点 1、3 之间，由于失去了节点 2 的信息，导致故障区段的范围扩大了，包括了原来区段 I 和区段 II，结果仍然是正确的。

3 定位算法流程

综上，发生单相接地后带电定位的算法流程如图 2 所示。

由于 D 、 P 矩阵为稀疏矩阵，因此大大降低了计算机的资源占用，同时提高了运算速度。

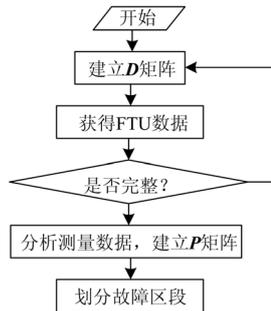


图 2 算法流程

Fig.2 Algorithm flow

4 算例分析

本文提出的方法已在现场得到了实际应用，并通过现场试验得到了验证。

如图 3 所示，该配电网为 10 kV 系统，试验线路上安装两个 FTU 装置分为三个区段，中性点接地方式为经消弧线圈接地，消弧线圈与一个 40 kVA 的电抗器相并联，用于产生残流增量。

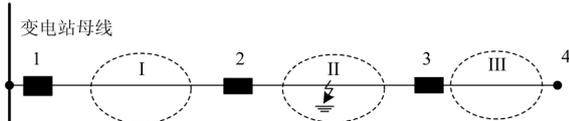


图 3 配电网结构

Fig.3 Structure of distribution grid

在区段 II 上模拟单相经 3 kΩ 电阻接地，接地后短时投入电抗器产生残流增量。投入电抗器前，

在变电站检测到的零序电压、电流波形如图 4 所示；投入电抗器后，在变电站检测到的零序电压、电流波形如图 5 所示。

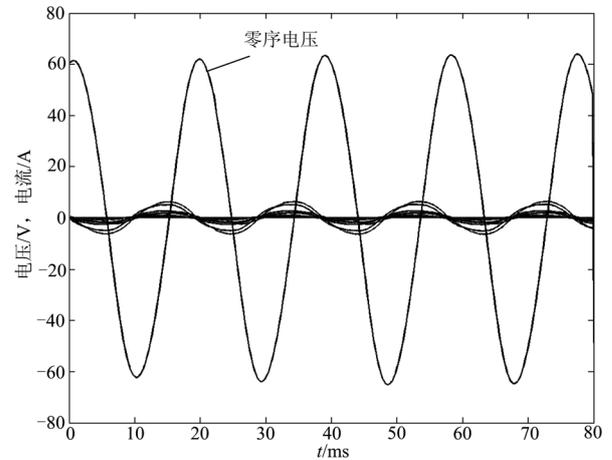


图 4 残流增量前检测的波形

Fig.4 Waveform measured before remnant current increment

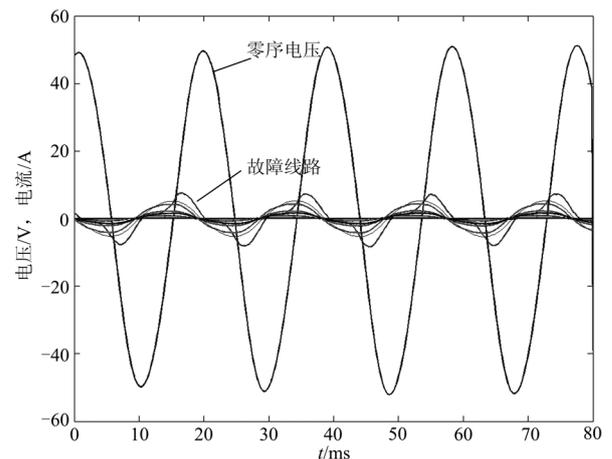


图 5 残流增量后检测的波形

Fig.5 Waveform measured after remnant current increment

节点 1~3 在电抗器投入前后检测到的零序电流数据如表 3 所示。

表 3 各节点零序电流数据

Tab.3 Zero sequence current of each node

| 节点 | 投入前/A | 投入后/A | 变化量/A |
|----|-------|-------|-------|
| 1 | 5.66 | 7.07 | 6.78 |
| 2 | 3.12 | 2.65 | 0.14 |
| 3 | 1.67 | 1.41 | 0.05 |

表 3 中零序电流的变化量是根据实际零序电压折算到金属性接地后的值。由于投入电抗器后电感电流变化 6.78 A，因此由表 3 可知节点 1 的零序电流发生变化，节点 2 和 3 的零序电流没有发生变化。建立故障信息特征矩阵 P 为：

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

各个区段的故障测度如表 4 所示。

表 4 故障测度数据

Tab.4 Data of fault measurement

| 区段 | 包括支路 | 支路测度 | 区段测度 |
|-----|------|------|------|
| I | 12 | 0 | 0 |
| II | 23 | -2 | -2 |
| III | 34 | -1 | -1 |

由表 4 可见, 只有区段 I 的测度为非负, 说明区段 I 为故障区段, 判断正确。

5 结论

本文提出了一种基于矩阵算法的配电网单相接地故障带电区段定位方法。该方法具有以下优点:

- ①快速准确建立形式统一的故障信息特征矩阵 P , 适用于网络复杂情况下的计算机计算;
- ②故障定位判断正确, 算法运行速度快, 占用计算机资源较少;
- ③对于不完整数据同样能够进行正确故障定位。

该方法适用于中性点不接地系统或经消弧线圈接地系统, 适用于金属性接地或经过渡电阻接地多种情况。现场试验数据充分验证了该方法的正确性与可行性。

参考文献

- [1] 于盛楠, 杨以涵, 鲍海. 基于C型行波法的配电网故障定位的实用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2007, 35 (10): 1-4, 12.
YU Sheng-nan, YANG Yi-han, BAO Hai. Study on fault location in distribution network based on C-type travelling-wave scheme[J]. Power System Protection and Control, 2007, 35 (10): 1-4, 12.
- [2] 于桂音, 陈平, 徐丙垠, 等. 基于行波原理的优化组合故障测距技术[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (9): 11-16.
YU Gui-yin, CHEN Ping, XU Bing-yin, et al. An optimal combined transmission line fault location technique based on travelling wave principles[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (9): 11-16.
- [3] 张利, 杨以涵, 杨秀媛, 等. 移动式比相法配电网接地故障定位研究, 中国电机工程学报 2009, 29 (7): 91-97.
ZHANG Li, YANG Yi-han, YANG Xiu-yuan, et al. Method of mobile phase-comparison for fault location of distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29 (7): 91-97.
- [4] 张朝平, 周有庆, 王娜. 基波电流注入法实现的单相接地选线[J]. 电力系统保护与控制, 2006, 34 (9): 70-72.
ZHANG Chao-ping, ZHOU You-qing, WANG Na. Single-phase earthing line selection based on first-harmonic current injection[J]. Power System Protection and Control, 2006, 34 (9): 70-72.
- [5] 王敏. 配电系统实施自动化的可靠性投资评估[J]. 电力系统保护与控制, 2004, 32 (7): 31-34.
WANG Min. Investment evaluation of reliability of distribution network automation[J]. Power System Protection and Control, 2004, 32 (7): 31-34.
- [6] 刘会家, 李宁. 一种基于 FTU 的馈线故障定位优化算法[J]. 电力系统保护与控制, 2004, 32 (10): 40-43.
LIU Hui-jia, LI Ning. An optimized algorithm for feeder fault location based on FTU[J]. Power System Protection and Control, 2004, 32 (10): 40-43.
- [7] 张国平, 杨明皓. 配电网 10 kV 线路单相接地故障区段定位的有效值法[J]. 电力系统保护与控制, 2005, 33 (8): 34-37.
ZHANG Guo-ping, YANG Ming-hao. A virtual value method of locating single-phase grounding fault section of 10 kV feeders in power distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2005, 33 (8): 34-37.
- [8] Lo K L, Ng H S. Power systems faults diagnosis using petrinets[J]. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 1997, 144 (3): 231-236.
- [9] Hadjicostis C, Verghese G C. Power system monitoring using petrinet embedding[J]. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 2000, 147 (5): 299-303.
- [10] Chen C S, Ke Y L, Wu I S. Coloured petri nets approach for solving distribution system contingency by considering customer load patterns[J]. IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, 2001, 148 (5): 463-470.
- [11] Huang Y C, Huang C M, Liao C C, et al. A new intelligent fast petri-net model for fault section estimation of distribution systems[C]. // Proceedings, PowerCon. International Conference on Power System Technology. 2000.

收稿日期: 2009-10-31; 修回日期: 2009-12-02

作者简介:

齐 郑 (1977-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为电力系统分析与控制、配电网自动化等; E-mail: qizheng319@126.com

高玉华 (1983-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配电网自动化;

杨以涵 (1927-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析与控制、光学互感器、配电网自动化等。