

# 基于直流法的配电网单相接地故障离线定位研究

杨鹏<sup>1</sup>, 杨以涵<sup>1</sup>, 杨景<sup>2</sup>, 冯少辉<sup>3</sup>, 孙新海<sup>4</sup>

(1. 华北电力大学电气工程学院, 北京 102206; 2. 山东理工大学, 山东 淄博 255000;  
3. 太原供电分公司, 山西 太原 030012; 4. 沧州供电公司, 河北 沧州 061001)

**摘要:** 传统的配电网单相接地故障定位方法只能够在各自有效范围内定位故障点, 无法适用于各种网络结构和故障情况, 主要原因是没能解决配电网故障定位的关键难题: 结构复杂、分支多, 电容大, 接地电阻大。不同于以往的定位方法, 所提出的直流定位法利用直流信号进行故障定位, 该方法能够克服以上难题, 是配网故障定位的有效方案。方法是首先向故障线路注入直流信号, 然后通过关键分支点的直流强度检测判断故障路径, 直至找到故障点。仿真和现场实验都证明基于直流信号的故障定位方法是可行的、有效的。

**关键词:** 配电网; 故障定位; 单相接地; 直流定位法

## Study of DC off-line fault location method for distribution networks with single grounding phase

YANG Peng<sup>1</sup>, YANG Yi-han<sup>1</sup>, YANG Jing<sup>2</sup>, FENG Shao-hui<sup>3</sup>, SUN Xin-hai<sup>4</sup>

(1. School of Electrical Power Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;  
2. Shandong University of Technology, Zibo 255000, China; 3. Taiyuan Electric Power Cooperation, Taiyuan 031002, China;  
4. Cangzhou Electric Power Cooperation, Cangzhou 061001, China)

**Abstract:** Traditional fault location methods of distribution network all have their shortcomings when facing to the most difficult problems of distribution networks——too many branches, big capacitance and large grounding resistance, so none of them can take universal use. Different from the traditional methods, the DC location method proposed here can solve all the difficulties above based on DC current. First, injecting a DC current to the fault line, then detecting the currents of the key branching points depending on which the fault route can be known, and continuing the detection along the fault route until finding out the fault point. Some simulations have been done in this paper and in the end field test are carried out. All of them prove the feasibility and availability of the DC location method.

**Key words:** distribution networks; fault location; single grounding phase; DC location method

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)22-0057-04

## 0 引言

电网断电对社会生活造成的影响愈来愈大, 经济损失难以估计。因此, 快速准确定位故障, 对电力系统的经济性、安全性、可靠性非常重要。配电网是电网中结构最复杂, 分布面积最庞大的部分, 故障频繁, 尤其是单相接地故障, 发生概率最大, 因此研究配电网单相接地故障定位问题很有必要。

目前, 国内对配电线路故障定位的研究按原理可以分为: 行波法、S注入法和故障指示器技术等。

行波定位方法的原理是, 记录行波在故障点与接收点之间传播一次或者往返一次的时间, 然后利用波速和时间计算故障距离<sup>[1~3]</sup>。只有捕捉到故障

点反射回行波检测装置的行波波头, 才能使用行波定位, 但是行波传播过程中遇到波阻抗不连续点(主要包括分支节点和故障点)会发生衰减<sup>[4]</sup>, 尤其在结构复杂的配电网, 这种衰减作用直接导致行波定位的失败。

S注入法的原理是通过母线 PT 向配网母线注入交流电流, 其基波频率处于工频  $n$  次谐波与  $n+1$  次谐波之间, 然后利用专用的信号电流探测器查找故障线路和故障点<sup>[5,6]</sup>。使用该方法的关键是使注入电流尽可能多的流向故障点, 而不被或者较少被线路电容分流<sup>[7]</sup>, 但是配电网故障接地电阻较大, 从 3、4 k $\Omega$  到十几 k $\Omega$ , 而且往往有线路较长的情况, 限制了 S 注入法的定位效果<sup>[8]</sup>。

故障指示器固定安装于配电网路上，通过检测配电线路故障电流，指示故障所在的出线、分支和区段。但是鉴于小电流接地系统的自身特点，发生单相接地故障尤其是高阻接地故障时，所产生的故障信号本身较弱，并且受到电磁干扰和谐波污染，导致获得的信号失真，这些都直接影响了故障指示器的选择性和准确性<sup>[9]</sup>。目前短路故障指示器的准确度尚不能达到 100%，何况接地故障指示器<sup>[10]</sup>。

以上方法都无法彻底解决配电网单相接地故障定位问题，经长期实验研究发现其主要原因是配电网复杂的结构和较高的接地电阻决定的。

### 1 配电网故障定位难点分析

通过对以上故障定位方法的研究和总结，结合现场实验，发现配电网故障定位主要有两大难题：

#### 1) 高故障接地电阻

对于单相金属性接地故障，故障信号强，现有的故障定位方法很容易确定故障点。但是高阻接地时，情况完全不同，故障信号微弱，而且随着接地电阻的增大进一步减弱，加上现场不可避免的噪声干扰，很多定位方法都会失效，这是目前很多定位技术没有取得满意的现场效果的主要因素之一。如何克服高阻的影响，一直是一个困扰配网故障定位研究者的难题。

#### 2) 线路分支多；总体长度长、对地电容大

分支点对暂态信号有衰减和畸变作用，当分支点多达 5、6 代时，返回接收端的暂态信号已经衰减的相当微弱，考虑噪声的影响，可能已经无法检测；

对地电容对注入到网络中的交流信号有分流作用，在线路电容大、故障点高阻接地的情况下，对地电容对注入电流的分流很大，当某分支处下游线路上各分支线路电流大小已经可以比较的时候，就无法判断故障路径。

定位方法只有解决以上难题，才可能彻底解决配电网故障定位问题。

### 2 直流定位法

针对以上难题，本文提出基于直流法的离线故障定位方法，以期有效解决配电网单相接地故障定位问题。所谓离线定位是指，选出故障线后立即停止对该线路的供电，让故障线路在停电的状态下进行定位操作的方法。

#### 2.1 单相直流法

该定位方法首先向故障线路的故障相注入直流电流，然后通过检测分支节点处各个分支的直流电流强度确定故障路径，沿故障路径继续同样的检测

和判断，缩小故障区间直到最终定位故障点。下面以图 2.1 为例说明单相直流法定位原理和过程。

定义：故障路径，从直流信号注入点到故障点的直直流路径，如图 1 O-A-B-故障点。

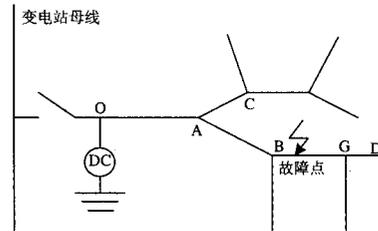


图 1 配电网拓扑图

Fig.1 Topology of some distributed grid

故障线路已经和电网隔离（假设 B 相故障），在故障线路始端任意位置（图 1 O 点）从 B 相注入直流电流 200 mA 左右。直流检测装置采用已经市场化的钳形电流表，测量时通过长绝缘杆将其夹到线路上，绝缘杆的长度要足以保证测量人员人身安全。该电流表利用霍尔效应原理产生与导线电流磁场成正比的霍尔电压，处理该电压即得到导线电流数值，有正负之分。

在第一个分支点（A 点）检测其下游各分支出线的 B 相直流电流：AC 支路及其下游网络没有接地点，所以理论上 AC 支路方向的测量值为零；AB 支路由于下游有故障接地点，而流过较大的直流电流。所以根据测量到的两个分支 B 相直流强度可以确定 AB 为故障路径。

沿故障路径来到 B 点进行与 A 点相同的检测，根据测得的直流信号强度可以判断 BG 为故障路径。

继续沿故障路径前进来到 G 点进行同上测量，G 点下游两分支由于没有接地点，理论上测得的直流电流为零。根据以上判据，就可以确定故障位于 BG 分支上（BG 定义为故障段），沿 GB 线路返回，采用直流定位法结合人工巡线即可迅速定位故障点。以上定位过程只进行了三次测量（A、B、G）就将故障缩小到很小的故障段内部，结合分段刀闸可以将故障段切除，迅速恢复其他正常网络的供电。

以上分析中认为 AC、GD 等方向上故障相的测量值为零是在理想条件下的近似，但实际现场中由于配电变压器的存在，该理想条件不再成立。

#### 2.2 配电变对单相直流法的影响

如图 2，设定 B 相 G 点发生接地故障，接地电阻 1 kΩ，假设在 G 点前后 10 km 的 E、F 两点

各有一配电变压器, 忽略配电变电阻, 则配电变对直流信号等效为短路线 (E、F 两点三相短路)。在 B 相始端加 1kV 直流, 分别检测 a、b、c、A、B、C 六点的直流电流值。

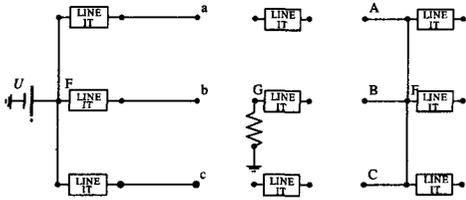


图 2 配电变对注入直流通流仿真图

Fig.2 Simulation of distribution transformer's effect to injected DC

表 1 检测电流对比

Tab.1 Comparison of tested current

检测点	a	b	c	A	B	C
电流 / mA	160	760	160	160	-320	160

对比 a、b、c 三点电流容易发现, 由于配电变的存在, 从故障相注入的直流信号流动到了非故障相, 但是直流电的主要路径仍是故障相; 若故障点后有配电变压器, 那么在故障点之后故障相电流反向流动 (见表 1 B 点数据)。忽略非故障相电流信号, 仅仅根据故障相电流的强度以及电流方向仍能够辨识故障路径, 虽然此时的判据不如理想情况下那么明显。为了完全克服配电变的影响, 本文提出单相直流法的改进方法——三相直流法。

### 2.3 三相直流法

表 1 中非故障路径上三相电流矢量和为零 (A、B、C 三点数据代数和为零), 以此得到启发对单相直流法进行改进, 衍生三相直流法。不同于单相直流法, 三相直流法需要将输入端三相并联注入直流 (在电流注入点将线路 A、B、C 三相都通过高压导线接到电源输出端口, 如图 3 D 点示)。

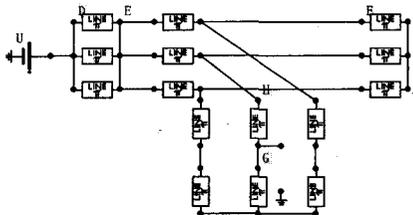


图 3 三相直流法仿真图

Fig.3 Simulation of three phases DC method

线路结构说明: DE、EF 长度都为 5 km, E 点有配电变 (忽略配电变电阻, 对于直流法配电变等效短路); F 点之后 10 km 处有配电变; H 点之后

5 km 处 G 点 B 相接地, 过渡电阻 1 kΩ, 故障点后还有 5 km 线路, 其末端有配电变。在线路首端注入 200 mA 电流, 测量各点 A、B、C 三相的直流电流并求代数和, 数据如表 2。

表 2 图 3 三相电流矢量和

Tab.2 Summation of DC current of Fig.3

测点	D	E	F	G	H
数据 / mA	200	200	0	0	200

故障路径上的点 D、E、H 三相电流代数和为 200 mA, 而非故障路径上的点 F 其值为零, 故障路径判据非常明显。

该仿真实验结论:

1) 对于单相接地故障, 故障路径上各点的三相直流电流代数和等于首端直流源输出电流, 而非故障路径上的点三相电流代数和为零。

2) 相对单相直流法, 三相直流法增加了测量工作量, 但是十分理想地克服了配电变对故障定位的影响, 故障路径判据更明显。

对结论第一点从电路理论容易分析: 将非故障路径之后的网络等效成对外只有三个端子 (三相输入) 的网络, 由 KCL 知, 三相输入电流矢量和为零 (如图 3 F、G 点); 整个故障线路只有两个接地点 (首端直流源接地和故障点接地), 同样根据 KCL 定律可知, 从电源端流入的直流电流必将全部流过故障点, 而故障路径是该电流流到故障点的必经通路, 所以故障路径上各点的三相电流代数和等于直流源输出电流 (如图 3 D、E、H 点)。

对比其他定位方法, 直流定位法的优势体现在:

(1) 直流电流信号在中途没有衰减, 为准确测量定位提供了有利条件。由于分布电容的影响, 交流信号传输过程中会有衰减。

(2) 克服了线路电容的影响。电容对直流信号等效与开路, 所以线路长度不再是制约定位效果的因素。

(3) 克服了配电路径多分支的影响。对于直流信号非故障路径上的分支可以等效成电容, 而电容即开路。

(4) 克服了高接地电阻的影响。无论接地电阻多大, 注入的直流电流都将全部流过接地点, 所以故障路径上各点三相电流代数和必然等于电源注入电流。

由于直流法的这些优点, 使它成为有效解决配网单相接地故障定位问题的有效方法。

### 3 现场实验

#### 3.1 单相直流法

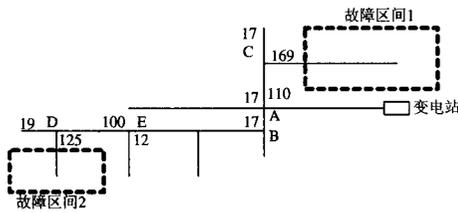


图 4 某配电网网络结构拓扑图

Fig.4 Topology of some distributed grid

将实验线路退出运行，并在接地线保护下设置单相接横担典型故障。拆除地线，在变电站从故障相注入直流电流信号 150 mA。首先在 A 点用直流信号检测器分别检测电源下方三条出线的故障相电流值（数据如图 4 所示，单位：mA），AC 方向电流信号最强，判断故障在 AC 支路上；到 C 点重复同样的检测过程，确定故障区间 1 如图 4 所示，在故障区间内部检测结合现场寻线很快定位故障点。

排除故障后，又换点设置相同故障进行了第二次实验，已知故障在 BD 方向。直流源输出同样的电流，故障查找人员首先来到 E 点，检测确定故障在 E 点下游（数据如图示），沿故障路径到 D 点，检测进一步缩小故障区间（故障区间 2），故障区间 2 线路较短，人工巡线即发现故障点。

#### 3.2 三相直流法

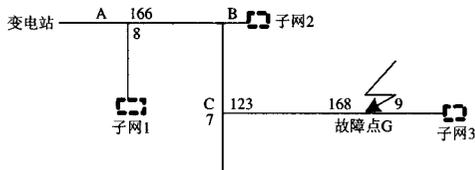


图 5 某配电网网络结构拓扑图

Fig.5 Topology of some distributed grid

将实验线路退出运行，并在接地线保护下设置单相接横担故障。拆除接地线，在变电站三相并联注入直流电流信号 150 mA。检测人员首先来到 A 点测量各分支三相数据，并求其代数和（代数和数据如图 5 示），判断故障在 AB 及其下游网络；跳过 B 点直接来到 C 点检测，根据测量数据判断故障在 CG 及其下游网络；沿故障路径检测发现故障点 G。

对比单相直流法和三相直流法实验也可以看出，三相直流法判据更加明显，非故障三相相代数和都在 10 以下，而故障相在 100 以上，现场人员很容易根据测量数据判断故障路径。

### 4 小结

目前的定位方法不能理想解决长线路和高故障电阻情况下的配网故障定位问题。

直流定位法不受线路长度影响，而且在高压直流条件下，可以维持接地点的击穿状态；显著降低接地电阻。三相直流法虽然需要检测更多数据，但是其判据比单相直流法更加明显。

现场实验证明基于直流信号的方法是解决配电网定位问题的有效方法。

#### 参考文献

- [1] 严凤, 杨奇逊, 齐郑, 等. 基于行波理论的配电网故障定位方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 37-43.  
YAN Feng, YANG Qi-xun, QI Zheng, et al. Study on Fault Location Scheme for Distribution Network Based on Traveling Wave Theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 37-43.
- [2] 方力谦, 李晓明, 黄斌. 输电线路行波故障定位装置研究现状与展望[J]. 高压电器, 2005, 41(5): 377-400.  
FANG Li-qian, LI Xiao-ming, HUANG Bing. Current State and Prospects on the Traveling Wave Fault Location of Transmission Line[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(5): 377-400.
- [3] 蔡秀雯, 杨以涵, 等. 基于脉冲发射原理的配电网故障定位方法的研究[J]. 继电器, 2007, 35(2).  
CAI Xiu-wen, YANG Yi-han, et al. A New Scheme of Travelling Wave Fault Location for Distribution Network Based on Wavelet Transform[J]. Relay, 2007, 35(2).
- [4] 张一尘. 高电压技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.  
ZHANG Yi-chen. High Voltage Technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [5] 桑在中, 潘贞存, 丁磊, 等. “S 注入法”选线定位原理及应用[J]. 中国电力, 1997, 30(6): 44-45, 62.  
SANG Zai-zhong, PAN Zhen-cun, DING Lei, et al. The Principle and Application of “S Injection Method” [J]. Electric Power, 1997, 30(6): 44-45, 62.
- [6] 张慧芬, 潘贞存, 桑在中. 基于注入法的小电流接地系统故障定位新方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(3): 64-66.  
ZHANG Hui-fen, PAN Zhen-cun, SANG Zai-zhong. Injecting Current Based Method for Fault Location in Neutral Isolated Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(3): 64-66.
- [7] 潘贞存, 张慧芬, 等. 信号注入式接地选线定位保护的分析和改进[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(4): 71-75.  
PAN Zhen-cun, ZHANG Hui-fen, et al. Analysis and Modification of Signal Injection Based Fault Line Selection Protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(4): 71-75.

(下转第 71 页 continued on page 71)

正是采用了 ASN.1 的编码规范, IEC61850 标准已不再关心具体的通讯过程, 而是大量的研究和规范了数字化变电站内 IED 设备间的数据交换模型和互操作规范, 因此, 要实现和实施好数字化变电站系统, 研究透彻 ASN.1 规范就是非常重要的了, 这也是实现 IEC61850 的核心技术之一。

### 参考文献

- [1] ISO/IEC 8822:1994, Information Technology – Open Systems Interconnection – Presentation Service Definition[S].
- [2] ISO/IEC 8825-1:2000, Information Technology – ASN.1 Encoding Rules: Specification of Basic Encoding Rules (BER), Canonical Encoding Rules (CER) and Distinguished Encoding Rules(DER)[S].
- [3] IEC 61850-7-1, Communication Networks and Systems in Substations – Part 7-1: Basiccommunication Structure for Substation and Feeder Equipment-Part 7-1: Principles and Models[S].
- [4] IEC 61850-8-1, Communication Networks and Systems in Substations – Part 8-1: Specific Communication Service Mapping (SCSM) – Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3[S].
- [5] IEC 61850-9-1, Communication Networks and Systems in Substations – Part 9-1: Specific Communication

Service Mapping (SCSM) – Sampled Values over Serial Unidirectional Multidrop Point to Point Link[S].

- [6] Olivier Dubuisson. ASN.1 Communication Between Heterogeneous Systems[S].
- [7] 李永亮,袁志雄,陈斌,等. 对基于 TCP / IP 的 IEC61850 特定通信服务映射 MMS 的分析与实现[J]. 电网技术, 2004, 28(24): 33-38,42.  
LI Yong-liang, YUAN Zhi-xiong, et al. Analysis and Implementation of TCP/IP Based Specific Communication Service Mapping MMS in IEC61850[J]. Power System Technology, 2004, 28(24): 33-38,42.
- [8] 李贺禄,蒋凡,等.基于面向对象方法的 ASN.1 编解码的设计与实现[J]. 计算机工程, 2002, 28(12): 101-103.  
LI He-lu, JIANG Fan, et al. Design and Implementation of Encoding and Decoding for ASN.1 Based on Object-oriented Method[J]. Computer Engineering, 2002, 28(12): 101-103.

收稿日期: 2008-01-21

作者简介:

李永亮 (1969-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为数字化变电站技术与实现; E-mail:liyl@epri.ac.cn

葛维春 (1961-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 主要从事电力系统分析计算及科技管理工作。

(上接第 60 页 continued from page 60)

- [8] 王慧, 范正林, 桑在中. S 注入法与选线定位[J]. 电力自动化设备, 1999, (3): 18-20.  
WANG Hui, FAN Zheng-lin, et al. The "S Signal Injection Method" and Its Application in Single Phase-to-earth Fault Line Identification and Fault Point Location[J]. Electric Power Automation Equipment, 1999, (3): 18-20.
- [9] 卢兴旺. 线路故障指示器的分类及应用[J]. 电器设备, 2006, (1): 60-61.  
LU Xing-wang. The Classification and Application of Electrical Line Fault Indicator[J]. Electric Equipment, 2006, (1): 60-61.
- [10] 张斌, 等. 配电线路故障指示器现状分析[J]. 供用电,

2005, 22(5): 29-30.

ZHANG Bin, et al. Actuality of Distribution Lines Fault Indicator[J]. Distribution & Utilization, 2005, 22(5): 29-30.

收稿日期: 2008-01-22; 修回日期: 2008-05-19

作者简介:

杨鹏 (1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制, 小电流接地电力系统故障定位; E-mail: yangpeng8461@sina.com

杨以涵 (1927-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制, 数字电力系统等;

杨景 (1987-), 女, 学士, 研究方向为电子信息技术。

(上接第 65 页 continued from page 65)

### 参考文献

- [1] 高景德,王祥珩,李发海.交流电机及其系统的分析[M]. 北京:清华大学出版社,1993.  
GAO Jing-de, WANG Xiang-heng, LI Fa-hai. Analysis of Alternative Current Machine and Its System[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.
- [2] 夏勇军,尹项根,陈德树,等. 大型水轮发电机内部故障暂态仿真模型简化及仿真验证[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12):70-74.  
XIA Yong-jun, YIN Xiang-gen, CHEN De-shu, et al. Simplification and Validation of Transient Simulation Model of Large Hydraulic Generator Internal Short Circuit Faults[J]. Automation of Electric Power Systems,

2006, 30(12):70-74.

- [3] 张龙照. 同步电机定子绕组不对称状态的研究(博士学位论文)[D]. 北京:清华大学,1989.

ZHANG Long-zhao. Analysis of Synchronous Machines with Asymmetrical Armature Windings, Doctoral Dissertation[D]. Beijing: Tsinghua University, 1989.

收稿日期: 2008-02-20

作者简介:

夏勇军 (1978-), 男, 博士, 工程师, 主要从事电力系统继电保护研究及工程应用工作; E-mail:xiayj@hbepc.com.cn

刘句良 (1971-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事发电厂设备的检修维护工作。