

无线通信与注入信号法相结合的配电网单相接地自动定位

张慧芬¹, 潘贞存²

(1. 济南大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250022; 2. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 应用注入信号法的故障定位技术, 提出了不依赖配电网自动化的无线通信模式实现自动定位的方案, 给出了相应的自动故障定位算法。该算法以安装在故障馈线上的注入信号探测器为节点形成馈线的网络描述矩阵, 注入信号探测器探测的注入信号信息形成故障信息矩阵, 将故障信息矩阵和网络描述矩阵合并得到故障判定矩阵, 依据故障判定矩阵进行故障区域的判定。该方案有效地解决了配电网自动化系统不完善系统的自动定位问题, 已成功应用于实际工程中。

关键词: 注入信号法; 故障定位; 无线通信

Fault auto-location in power distribution based on wireless communications and injection signal method

ZHANG Hui-fen¹, PAN Zhen-cun²

(1. School of Control Science and Engineering University of Jinan, Jinan 250022, China;

2. College of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: The injection signal method is used for fault location. In order not to depend on the communication system of distribution automation, the wireless communication is proposed for fault auto-location using the injection signal method. The algorithm of automatically locating the fault point is given. It takes the signal detectors fixed on the faulty feeder as nodes to form the network describing matrix. The signal detectors transfer the detected results to the host system by wireless communication. And the faulty information matrix is constructed. The fault judgment matrix is formed by incorporating the network describing matrix and the describing matrix. The fault section can be identified according to the values of the fault judgment matrix. The schedule settles the problem of fault auto-location in imperfect communication system of distribution automation. It has been used in field successfully.

Key words: signal injection method; fault location; wireless communication

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)07-0015-04

0 引言

许多学者对配电线路单相接地故障定位进行了深入的分析和研究, 但该问题仍然是困扰电力系统运行部门的一个难点。配电线路虽然不像输电线路那样长, 但由于分支较多, 覆盖区域广泛, 这给故障定位加大难度。此外, 随着配电网规模不断扩大, 供电容量也在不断增加, 用户对供电质量提出很高要求, 这就要求具备有效的手段对单相接地故障进行准确、快速的定位。

基于注入信号法的配电网单相接地故障定位保护^[1]虽已在我国配电网中成功应用, 有效地解决了配电网单相接地故障定位问题, 而且定位精度高, 定位误差小于 10 m, 但一直是人工手动定位, 随着人们对供电可靠性的要求不断提高和配电网自

动化的发展, 现场一直渴望有定位精度高的自动定位保护来快速找到故障位置, 因此有必要用注入信号法的故障定位技术实现自动定位。实现配电网单相接地故障的自动定位, 有两个关键问题: 一是可靠准确地识别故障点的定位原理, 另一个是适用于配电网复杂网络结构的可靠的通信技术。本文应用注入信号法的故障定位技术, 原理可靠, 对注入信号电流的检测技术也比较成熟, 文献[2]提出的注入信号法自动故障定位算法在装有配电网自动化且通信系统完善的配电网中可以实现。近年来, 配电网自动化的发展较快, 在城市配电网中配电网自动化比较普及, 受配电网通信网络的限制, 在城镇和农村配电网中配电网自动化系统并不完善。因此, 基于配电网自动化的注入信号法自动故障定位的应用受配电网自动化使用范围的限制。

鉴于上述情况, 本文提出不依赖配电网自动化而又便于实现的无线通信模式来实现基于注入信号

基金项目: 济南大学博士基金项目 (B0618)

法的配电网单相接地故障自动定位。

1 自动定位方法

由文献[2]的分析可知,在配电系统发生单相接地故障时注入信号电流在母线电压互感器的一次侧中性点、故障线路、故障点和大地之间形成回路,根据故障线路沿线是否流过注入电流就可以判断故障点的确切位置。如果沿故障线路配置注入信号探测器,在系统发生单相接地故障时各探测器能够自动检测注入信号电流信号并将探测结果自动传送至主机,主机根据网络拓扑结构信息和探测器的探测结果信息就可以自动定位故障区段。可见,实现单相接地故障自动定位的关键有两部分,一是注入信号电流的自动检测和传送;二是主机结合故障馈线的网络拓扑结构对探测器的探测结果进行处理。

对注入信号电流的自动探测功能可由固定安装在户外各测点的信号探测器来完成。受安装条件和投资等因素的限制,只能将探测器安装在有限的测量点上,因此故障定位结果只能精确到相邻探测器安装点之间的区段,而不可能精确到点。显然,探测器的安装点越紧密,故障定位精度也越高,投资和系统复杂程度也越高;反之,虽然故障定位精度稍低,但可大大减少投资,简化系统结构。

在配电自动化系统中,通常在各分段开关和联络开关处配置 FTU(Feeder Terminal Unit)采集相关参数,注入信号电流探测器也可以安装在 FTU 处并借用 FTU 的电源,完成注入信号的自动探测功能,这样安装的优点一是可以与 FTU 共享部分资源,节约成本,二是与 FTU 同处安装,便于管理和维护。在配电网自动化系统不完善或没有配电网自动化系统的配电网,需建立新的通信信道。

探测器输出结果传送至主机后,主机要对信息进行辨识和处理,结合当前故障馈线的网络拓扑结构得出接地故障区段,为运行和检修人员提供参考。

2 基于弧结构矩阵的自动故障定位算法

2.1 故障馈线的拓扑描述

将故障馈线看作是一种赋权图,将线路上注入信号探测器的安装点看作是节点(Node),节点的权为流过该节点的注入信号电流。将相邻两个节点间的配电网馈线看作是图的边(edge),边的权即为该条边上流过的注入信号电流。这样处理之后达到了简化节点数量的目的。故障馈线的描述可以采用邻接矩阵或邻接表的形式^[3],本文采用故障馈线的有向图描述模型。

将两节点间的馈线当作有向边(也可成为弧),

其方向就是线路上注入信号电流的方向,并采用 N 行 N 列的 C 矩阵加以描述, C 矩阵称作弧结构矩阵,其中 N 为馈线中节点的个数,即

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1N} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ c_{N1} & c_{N2} & \cdots & c_{NN} \end{bmatrix} \quad (1)$$

若节点 i 和 j 之间存在一条由 i 指向 j 的边,则 $c_{ij} = 1$, $c_{ji} = 0$,弧结构矩阵 C 中的空闲元素为 0。

根据描述馈线结构的弧结构矩阵 C ,可以重现馈线的结构。观察弧结构矩阵 C 可以找出馈线的分支点以及每个分支点分支的数量,从而可以找出馈线的每个分支所安装探测器的编号。为了寻找分支线路末端方便,注入信号探测器从母线开始顺序编号。由弧结构矩阵的构成方法知,分支线路的末端不再有指向下一节点的边,对应弧结构矩阵 C 中的行元素全为 0。

节点描述矩阵如下:故障信息矩阵 G ,即 $[g_1 \ g_2 \ \cdots \ g_N]$ 。若节点 i 有注入信号电流信息,则 $g_i = 1$,否则 $g_i = 0$ 。

2.2 自动故障定位算法

配电网有闭环结构、开环运行的特点,整个配电网呈辐射状结构,任意一条馈线呈树状结构,因此故障区域由 2 个节点确定:馈线首端节点和故障点。电流流动具有连续性,一节点的任意子节点流过注入信号电流,那么母节点也流过注入信号电流。推而广之,如果一节点流过注入信号电流,而且以其为根的树中有任意节点流过注入信号电流,那么注入信号电流在此树中是连续的,根节点不是故障点;如果此树中除了根节点以外所有节点都没有注入信号电流,那么电流在此树中是非连续的,根节点是故障点,根节点及其子节点所确定的区域就是故障区域。这就是故障信息不完整时进行故障定位的原理。自动定位判据如下:

由弧结构矩阵 C 和故障信息矩阵 G 合并得到故障判定矩阵 D ,把故障信息矩阵 G 的元素按顺序替代 C 的对角元素即可得到故障判定矩阵 D ^[4,5]:

$$D = \begin{bmatrix} g_1 & c_{12} & \cdots & c_{1N} \\ c_{21} & g_2 & \cdots & c_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ c_{N1} & c_{N2} & \cdots & g_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d_{11} & d_{12} & \cdots & d_{1N} \\ d_{21} & d_{22} & \cdots & d_{2N} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ d_{N1} & d_{N2} & \cdots & d_{NN} \end{bmatrix} \quad (2)$$

由故障判定矩阵 D 得如下判据: 设以节点 i 为根的树的所有节点为集合 O 。对两个条件: ① $d_{ii} = 1$; ② 对于 $\forall j \in O$, 且 $j \neq i$, $d_{ij} = 1, d_{ji} = 0$ 。若节点 i 同时满足①、②两个条件, 则故障发生在节点 i 和节点 j 确定的区段上, 称该判据为第一判据; 若节点 i 只满足①条件, 则故障发生在节点 i 所在分支上, 称该判据为第二判据。

由上述判据, 自动定位算法流程如下: 先用第一判据判别, 若满足第一判据, 则故障在节点 i 和节点 j 确定的区段上; 否则再用第二判据判别, 若满足第二判据, 则故障在节点 i 所在分支线路上。

从自动定位算法流程可以看出, 该判据同时利用两个判据, 涵盖了多种情况, 不论故障线路是否有分支线路, 也不论故障是否发生在分支线路的末端, 该判据均能确定出故障所在区段。

3 无线通信模式

探测器探测结果的回传需要借助通信系统完成。在配电自动化系统比较完善的情况下, 可以借助现有的信道将探测器的输出信息传送至主机, 由于对配电系统单相接地故障定位的实时性要求不高, 因此有充足的时间收集、传送探测器的输出信息。在通信措施不完善或不便与配电自动化系统共享通信信道的情况下, 需要建立新的通信信道。通信的种类和方式有很多可供选择, 但考虑到投资、安装等各方面条件, 可优先考虑无线通信方式, 如数字电台、GSM 网络、GPRS 网络等都是安装简便、成本低廉、性能优良的通信方式, 非常适合于接地故障自动定位系统中。

无线通信模式一方面实现了不依赖配电网自动化的单相接地故障定位, 还能够与配电网自动化通信, 另一方面提高了注入信号的完备性, 在装有配电网自动化的配电网系统中, 就有配电网自动化通信系统和无线通信系统两种通信系统可用, 为完备注入信号信息又提供了一个条件。随着无线通信技术的发展与普及, GSM 短信技术已比较成熟可靠, 成本也大大降低, 因此本文以 GSM 无线网络为通信信道。

根据前述自动故障定位算法, 在需要自动定位的线路上每间隔一定距离安装带有 GSM 短信功能的信号电流探测器。进行故障定位时, 线路上所有信号电流探测器将探测结果通过短信上传给带有 GSM 短信功能的检测主机, 由检测主机对各探测器信息处理给出故障所在区段。在 GSM 短信的通信模式中, 线路上各信号电流探测器、检测主机和注入信号主机之间以 GSM 短信的形式交换信息。

4 实例分析

上述 GSM 短信通信模式和基于注入信号原理自动定位算法已用于技术项目“配电网全线接地定位系统研究”中, 图 1 为项目所应用的 10 kV 系统图。

该系统环网接线, 变电站 A 母线带有 9 条出线, 变电站 B 母线带有 5 条出线, 变电站 A 和变电站 B 之间的联络线是需要自动故障定位的线路, 联络线上有分段开关和联络开关, 而且联络线上有分支线路, 正常运行时联络开关断开。

为了实现注入法自动故障定位, 变电站 A 和变电站 B 的 10 kV 母线处分别安装一台注入信号主机, 需定位的联络线上的分段开关处以及各分支线路出口安装信号电流探测器。注入信号主机和信号电流探测器的分布如图 1 所示。图中, S1~S13 为分段开关, D1~D13 为信号电流探测器及短信模块, 母线处有注入信号主机及短信模块和检测主机及短信模块。

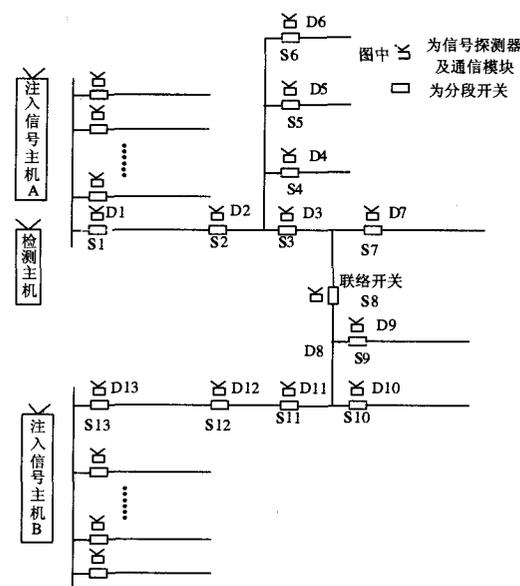


图 1 10 kV 系统接线图及 GSM 手机短信通信系统图
Fig.1 A 10 kV distribution system and communication system based GSM short message

检测主机负责整个系统的运算与管理, 注入信号主机监视配电系统工作是否正常, 在发生故障时向故障系统注入信号电流并选择故障线路, 安装在线路上的信号电流探测器检测其安装处是否流过注入信号电流。检测主机、注入信号主机和线路上所有信号电流探测器之间通过短信交换信息。

系统正常运行时, 注入信号主机监测系统的三相电压和零序电压, 注入信号主机指示系统运行正

常, 不向系统注入特殊电流信号, 并通过短信向检测主机传送系统运行正常的信息; 检测主机以短信方式定时检测注入信号主机和各信号电流探测器的状态。

一旦系统发生单相接地故障, 假设图 1 中 F 处发生了单相接地故障, 注入信号主机 A 根据三相电压和系统零序电压快速判断出系统发生了单相接地故障, 注入信号主机 A 发短信通知检测主机配电系统发生了单相接地故障。检测主机接收到注入信号主机 A 发来的故障信息短信后, 通知注入信号主机 A 向系统注入信号电流, 延时一段时间后, 向发生故障的注入信号主机 A 索要其选线结果, 注入信号主机 A 通过短信将选线结果上报给检测主机。因故障发生在需要定位的联络线及其分支线路上, 检测主机继续向联络线及其分支线路上的信号电流探测器 D1~D7 索要探测结果, 信号电流探测器 D1~D7 以短信形式向检测主机发送探测结果, 检测主机根据 2.2 节介绍的自动定位算法计算出故障所在区段。最后, 检测主机向注入信号主机 A 发短信, 通知注入信号主机 A 停止向系统注入信号电流。

图 1 中 D1, D2, ..., D13 为需要自动定位线路上注入信号探测器编号, 也即为需定位线路上的节点编号。假设 F 处发生单相接地故障, 即在节点 7 所在分支发生故障, 系统正常运行时联络开关是断开的, 这样故障馈线的弧结构矩阵 C 和故障信息矩阵 G 分别为:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$G = [1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1]$$

可得到故障判定矩阵 D 为:

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

用自动算法流程考察故障判定矩阵 D , 不满足第一判据, 而有 $d_{77} = 1$, 满足第二判据, 所以故障节点 7 所在分支线路上。

5 结论

应用注入信号法的故障定位技术, 原理可靠, 提出了不依赖配电网自动化而又便于实现的无线通信模式来实现基于注入信号法的配电网单相接地故障自动定位。由有向连接关系确定的不对称网络描述矩阵和考虑了方向的注入信号电流, 综合上述因素进行方向对比后确定故障区间。该自动定位算法不论故障线路是否有分支线路, 也不论故障是否发生在分支线路的末端, 该判据均能确定出故障所在区段。有效地解决了配电网自动化系统不完善系统的自动定位问题, 已成功应用于实际工程中。

参考文献

- [1] 桑在中, 潘贞存, 李磊, 等. 小电流接地系统单相接地故障选线测距和定位的新技术[J]. 电网技术, 1997, 21(10): 50-55.
SANG Zai-zhong, PAN Zhen-cun, LI Lei, et al. New Method for Fault Line Selection and Fault Point Location in Non-effective Grounding Systems[J]. Power System Technology, 1997, 21(10): 50-55.
- [2] 张慧芬. 配电网单相接地故障检测技术研究(博士学位论文)[D]. 济南: 山东大学, 2006.
ZHANG Hui-fen. Study on Earth Fault Detection in Distribution Network, Doctoral Dissertation[D]. Jinan: Shandong University, 2006.
- [3] 刘建立, 程红丽, 毕鹏翔. 配电网的简化模型[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 77-82.
LIU Jian-li, CHENG Hong-li, BI Peng-xiang. A Simplified Model for Distribution System[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 77-82.
- [4] 卫志农, 何桦, 郑玉平. 配电网故障定位的一种新算法[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(14): 48-50.
WEI Zhi-nong, HE Hua, ZHENG Yu-ping. A Novel Algorithm for Fault Location in Power Distribution Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(14): 48-50.
- [5] 陈鹏, 滕欢, 滕福生. 故障信息不足时配电网故障定位的方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(10): 71-72, 80.
CHEN Peng, TENG Huan, TENG Fu-sheng. An Algorithm for Fault Location in Power Distribution Network under the Condition of Lack of Fault Information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 71-72, 80.

收稿日期: 2007-08-20; 修回日期: 2007-10-17

作者简介:

张慧芬(1970-), 女, 副教授, 博士, 研究方向为电力系统继电保护与自动监控技术。E-mail: cse_zhf@ujn.edu.cn