

# 基于 FTU 和“S”信号注入法的 配电网接地故障定位技术的研究

杜刚<sup>1</sup>, 刘迅<sup>1</sup>, 苏高峰<sup>2</sup>

(1. 河南开封供电公司, 河南 开封 475000; 2. 河南新乡供电公司, 河南 新乡 453002)

**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解决。提出了 FTU 与“S”信号注入法相结合的配电网单相接地故障定位技术, 利用线路 FTU 检测线路零序电压和零序电流判断接地故障的区段, 再向线路中注入“S”信号, 沿线路利用电磁感应原理检测该信号, 从而确定接地故障点的准确位置。为了保证“S”注入信号不受线路对地电容的分流影响, 深入研究了 FTU 配置的临界区段长度计算方法。该定位方法可实现带电准确快速定位, 现场试验充分验证了该技术的正确性与可行性。

**关键词:** 小电流接地系统; 单相接地故障; 故障定位; 配电网自动化; “S”注入信号

## Research on technology of grounding fault location combining FTU and “S” signal injecting method in distribution grid

DU Gang<sup>1</sup>, LIU Xun<sup>1</sup>, SU Gao-feng<sup>2</sup>

(1. Kaifeng Power Supply Company, Kaifeng 475000, China; 2. Xinxiang Power Supply Company, Xinxiang 453002, China)

**Abstract:** Due to the large amount of branches and high grounding resistance of distribution grid, the single-phase-to-earth fault location has not been solved effectively. The single-phase-to-earth fault location technology is proposed by combining FTU and “S” signal injection method. Firstly, the zero-sequence voltage and zero-sequence current are measured by using line FTU so that the fault area is located. Then the “S” signal is injected, and the signal can be measured by electromagnetic induction theory so as to find the exact location of grounding fault. To avoid the influence of distributed capacitance to “S” injection signal, the calculation method of length of FTU isolation area is intensively studied. Moreover, the on-line location is possible by using this method. The correctness and feasibility of this technology have been fully proved by site experiments.

This work is supported by Chinese National Programs for High-technology Research and Development(863 Program) (No.2009AA12Z328).

**Key words:** neutral point ineffectively grounded system; single-phase-to-earth fault; fault location; distribution automation; “S” injecting signal

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)12-0073-04

## 0 引言

我国配电网的特点是以架空线路为主、分支多、覆盖区域广、接地电阻大, 而且多数采用小电流接地方式, 接地故障定位问题长期以来没有得到很好解决。特别是很多情况下要求带故障运行中进行故障定位, 即带电定位, 其难度更大。

目前实用化的配电网接地故障带电定位技术有三种, 第一种方法是“S”信号注入法<sup>[1-3]</sup>, 其不足

之处在于由于线路对地的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域流通, 无法正确定位; 第二种方法是“故障指示器”方法<sup>[4-5]</sup>, 其不足之处在于对于中性点非有效接地系统而言, 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, 而且该方法只能确定到故障区段, 无法确定到故障点的准确位置; 第三种方法是基于 FTU 的定位方法<sup>[6-7]</sup>, 该方法只能确定到故障区段, 无法确定到故障点的准确位置, 仍需要人工目测进行查找。

本文提出了 FTU 与“S”信号注入法相结合的

基金项目: 863 项目 (2009AA12Z328)

配电网接地故障定位技术,首先利用线路 FTU 检测线路零序电压和零序电流判断接地故障的区段,然后再向线路中注入“S”信号,沿线路利用电磁感应原理检测该信号,从而确定接地故障点的准确位置。为了保证“S”注入信号不受线路对地电容的分流影响,深入研究了 FTU 配置的区段长度计算方法。该方法定位可带电进行准确快速定位,现场试验充分验证了该技术的正确性与可行性。

### 1 利用 FTU 确定故障区段

随着配网自动化的广泛开展,大量的 FTU 设备在线路上安装使用,FTU 不仅能够测量线路上关键节点的相电压、相电流,同样可以测量零序电压和零序电流。因此可以分析各个检测点的零序电压和零序电流数据将故障确定在两个检测点之间,即确定故障区段。

对于中性点不接地系统如图1所示,某线路E点发生故障,相当于在E点接入一个零序电压源,由这个零序电源在线路上产生零序容性电流。鉴于零序网络主要由线路对地电容构成,线路中零序电流主要为容性电流,故障线路的零序电流方向如图1所示。

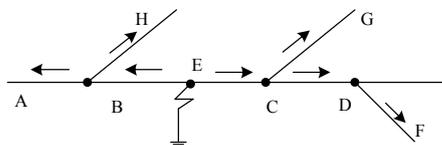


图1 故障线路的零序电流方向

Fig.1 Zero-sequence current direction of fault line

根据上面分析,得出中性点不接地系统区段定位判据如下:

- 1) 分支判别。如果某分支零序电流滞后零序电压 $90^\circ$ ,则该分支为故障分支;如果某分支零序电流超前零序电压 $90^\circ$ ,则该分支为正常分支。
- 2) 故障区段判别。如果某个检测点检测到零序电流滞后零序电压 $90^\circ$ ,下一个检测点检测到零序电流超前零序电压 $90^\circ$ ,则这两个检测点之间就是故障区段。

对于中性点经消弧线圈接地系统如图2所示,由于消弧线圈产生的电感电流的补偿作用,使得线路上各个检测点的零序电流都超前零序电压 $90^\circ$ ,故障线路的零序电流方向如图2所示。

此时必须采用残流增量原理进行区段定位,在接地时调节消弧线圈的脱谐度产生残流增量,由于电感电流只能从电源流向接地点,因此故障路径上的零序电流会发生变化,而正常分支和故障点之后

的零序电流不会发生变化。需要注意的是在经电阻接地时,消弧线圈调节前后零序电压会发生变化,需要将零序电流进行折算<sup>[8]</sup>。

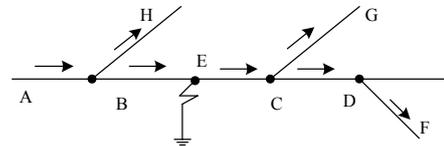


图2 故障线路的零序电流方向

Fig.2 Zero-sequence current direction of fault line

根据上面分析,得出中性点经消弧线圈接地系统区段定位判据如下:

- 1) 分支判别。如果某分支零序电流在消弧线圈调节前后没有变化,则该分支为故障分支;如果某分支零序电流发生变化,则该分支为正常分支。
- 2) 故障区段判别。如果某个检测点检测到零序电流发生变化,下一个检测点检测到零序电流没有发生变化,则这两个检测点之间就是故障区段。

### 2 利用“S”信号注入法确定故障点

“S”信号注入法的定位原理如下:当发生单相接地故障时,从PT二次侧注入高频的交流信号,频率在工频50 Hz的整数倍之间如(220 Hz),以防止外界电磁场干扰。保持一次侧的注入电流为150 mA。从故障区段的始端开始沿线路进行检测。检测时,如果遇到分支,则分别检测两个分支的信号,故障一定在信号强的一侧分支上。如果没有分支,如果某个位置前后的检测信号出现变化,则可以断定该位置为故障点。

地面的检测位置距离线路8~10 m,且“S”信号很小,在测量时存在一定的误差。但是,检测器测量到的信号与线路上流过的信号成正比变化,由于故障点前后“S”信号强度差别明显,因此检测器能够在误差允许范围内测量出信号的特征,并准确找到故障点。

### 3 FTU配置的临界区段长度

#### 3.1 故障区段线路对地电容范围

利用“S”信号注入法进行定位的前提是线路对地的电容影响不大,否则在判断分支时将出现错误。

电容产生的影响如图3所示,距离故障区段始端较近的地方有一条短分支,在该短分支上发生高阻接地,从故障区段的始端注入“S”信号后,在故障的分支上检测到电流 $I_1$ ,在非故障的主干线上检测到电流 $I_2$ 。设信号源电压为 $U$ ,接地电阻为

$R$ , 线路电容为  $C$ , 显然有

$$I_1 = \frac{U}{R}, I_2 = \omega CU$$

设注入信号频率为 220 Hz, 则

$$\omega = 2\pi f = 1381.6 \text{ rad/s}$$

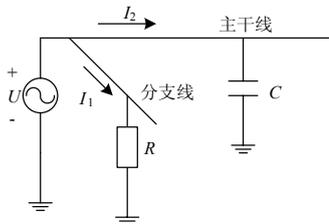


图3 电容的影响

Fig.3 Influence caused by distributed capacitance

如果故障区段线路较长, 线路的电容较大, 当  $I_2 > I_1$  时, 判断分支将失败。因此, 如果正确判断分支, 必须保证故障区内  $I_2 < I_1$ , 即

$$C < \frac{1}{\omega R} \quad (1)$$

下面定量计算  $C$  的数值, 配电网接地故障等值电路模型如图 4 所示。其中:  $E_\phi$  表示相电动势;  $U_0$  表示中性点电压;  $X$  表示系统电抗, 若中性点不接地, 则  $X$  为系统电容容抗, 若中性点经消弧线圈接地, 则  $X$  为消弧线圈与系统电容并联的等值电抗;  $R$  表示接地电阻。

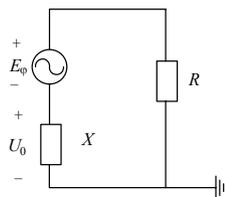


图4 接地故障等值电路

Fig.4 Equivalent circuit of grounding fault

设中性点电压达到 10% 的相电压时发出接地报警, 则  $\frac{E_\phi \cdot X}{\sqrt{R^2 + X^2}} = 10\% E_\phi$ , 得到

$$R = 9.95X \quad (2)$$

以 10 kV 系统为例, 对于中性点不接地系统, 金属性接地电流一般不超过 5 A; 对于中性点经消弧线圈接地系统, 经消弧线圈补偿之后的金属性接地残流一般也不超过 5 A, 因此  $X = 1154.7 \Omega$ 。带入式 (2), 得到  $R = 11489.3 \Omega$ , 再带入式 (1), 得到

$$C < 0.063 \mu\text{F} \quad (3)$$

### 3.2 FTU 配置的临界区段长度

架空线路的电容电流经验公式<sup>[8]</sup>为:

$$I_C = 2.7 \times U_\phi \times 10^{-3} \times (1 + 10\%) \text{ A/km}$$

其中:  $U_\phi$  为线路额定线电压, kV; 以 10 kV 系统为例,  $I_C = 0.0297 \text{ A/km}$ , 因此单相对地电容为  $C_0 = 5.46 \times 10^{-3} \mu\text{F/km}$ 。考虑到一般配电网除了架空线路外还有少部分电缆, 而且用户配电装置也存在对地电容, 因此系统对地电容要高于该值, 乘以修正系数 2, 得到  $C_0 = 10.92 \times 10^{-3} \mu\text{F/km}$ 。

为了满足式 (3) 所述的要求, 计算故障区段线路的临界长度为

$$L_{\max} = \frac{C}{C_0} = 5.77 \text{ km}$$

该长度即为 FTU 配置的临界区段长度, 如果区段长度大于或等于  $L_{\max}$ , 则“S”信号注入法可能定位错误; 只有当区段长度小于  $L_{\max}$  时, 才能够保证定位正确。但不宜将区段长度设置的过小, 否则会增加 FTU 的个数, 增加了建设投资。

该临界区段长度是在最大接地电阻情况下分析得到, 如果实际接地电阻小于等于最大接地电阻, 则能够准确定位。

在安装 FTU 时, 首先在主干线上安装, 如果存在较长的分支长度大于  $L_{\max}$ , 则在该分支上也应安装分段器, 最终使各个区段长度小于  $L_{\max}$ 。

### 4 现场试验数据分析

本文提出的方法已通过现场实际接地试验进行了验证。

该系统中性点不接地, 线路为 10 kV 配电线路, 全长 10 km, 在线路中间安装一台 FTU, 将线路分为两个区段, 每个区段长度在  $L_{\max}$  以内, 满足临界间隔距离的要求。结构如图 5 所示。

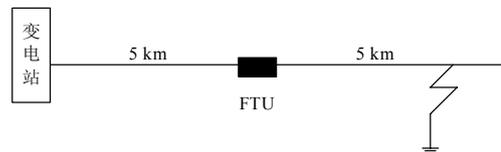


图5 线路结构

Fig.5 Structure of line

现场试验为 FTU 后侧线路单相接地, 接地后 FTU 判断检测点处零序电流滞后零序电压  $90^\circ$ , 判断故障点在第二个区段。随后注入 150 mA、220 Hz “S” 信号。沿线路进行检测过程中发现某点前的

检测信号为 140 mA，该点后的检测信号为 50 mA，因此认为该点为故障点，定位正确。

### 5 结论

FTU 与“S”信号注入法相结合的配电网故障定位技术在带故障运行的状态下不仅能够快速确定故障区段，而且能够快速确定故障点的准确位置，弥补了单独使用 FTU 的不足。

确定 FTU 配置的临界区段长度能够有效避免线路电容对“S”注入信号法的影响，保证了准确定位。

现场的试验充分验证了该技术的正确性与可行性，该技术是解决配电网单相接地定位问题的有效方法。

### 参考文献

[1] 王慧, 胡珂, 桑在中. “S 注入法”与电压互感器的特殊接线方式[J]. 继电器, 2004, 32 (3): 26-28.  
WANG Hui, HU Ke, SANG Zai-zhong. A S' s signal injection method and special connection modes of voltage transformer[J]. Relay, 2004, 32 (3): 26-28.

[2] 马佳, 余文辉, 车伟扬, 等. 基于改进的S注入法的新型树状配电网故障检测装置[J]. 继电器, 2002, 30 (10): 51-54.  
MA Jia, YU Wen-hui, CHE Wei-yang, et al. A novel fault localizer of tree form distribution networks based on an improved S injection method[J]. Relay, 2002, 30 (10): 51-54.

[3] 蔡维, 张雪松, 刘承志, 等. 基于PT在线注入信号及神经网络跟踪小波变换模极大值变化的配电网故障定位方法[J]. 继电器, 2006, 34 (23): 44-53.  
CAI Wei, ZHANG Xue-song, LIU Cheng-zhi, et al. Distribution network fault location method based on PT injecting signal and neural network fault diagnosis system tracking the character of wavelet transform modulus maxima[J]. Relay, 2006, 34 (23): 44-53.

[4] 张斌, 袁钦成, 袁月春, 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, YUAN Qin-cheng, YUAN Yue-chun, et al. Actuality of distribution lines fault indicator[J]. Distribution & Utilization, 2005, 22 (5): 29-30.

[5] 李伟华, 何正友, 赵静. 应用于铁路自闭\_贯通线路故障定位的线上节点设计[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (23): 79-84.  
LI Wei-hua, HE Zheng-you, ZHAO Jing. Design of a wireless node applied to fault location for railway automatic blocking and continuous power line[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (23): 79-84.

[6] 霍琤, 彭敏放, 谭享波. 中性点不接地系统单相接地故障定位新方法[J]. 继电器, 2005, 33 (24): 16-19.  
HUO Zheng, PENG Min-fang, TAN Xiang-bo. New method of fault location for single-phase grounding in networks with ungrounded neutral[J]. Relay, 2005, 33 (24): 16-19.

[7] 尚德彬, 董军, 杨保华, 等. 配电网故障自动定位系统[J]. 工矿自动化, 2006, 20 (1): 46-47.  
SHANG De-bin, DONG Jun, YANG Bao-hua, et al. An automatic fault located system in distributed power network[J]. Industry and Mine Automation, 2006, 20 (1): 46-47.

[8] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 二版. 北京: 中国电力出版社, 2009.

收稿日期: 2009-08-15; 修回日期: 2009-09-29

#### 作者简介:

杜刚(1977-), 男, 工程师, 从事电气设计工作;  
刘迅(1976-), 女, 工程师, 从事电气设计工作;  
苏高峰(1982-), 男, 从事继电保护工作. E\_mail:

qizheng319@sohu.com

(上接第 72 页 continued from page 72)

### 参考文献

[1] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[2] 韩笑, 赵景峰, 形素娟. 电网微机保护测试技术[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2005.

#### 作者简介:

郑新才(1962-), 男, 高级工程师, 从事电力系统保护与控制技术研究工作; E-mail: Zhengxincai22@126.com  
丁卫华(1976-), 女, 工程师, 主要从事继电保护运行与管理工作;  
韩潇(1976-), 女, 高级工程师, 硕士, 研究方向为电力系统保护与控制。

收稿日期: 2009-07-23; 修回日期: 2009-09-21