

# 10 kV 系统单相接地故障自动隔离与定位技术的研究

齐郑<sup>1</sup>, 张善<sup>2</sup>, 杨开增<sup>3</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 山东枣庄供电公司, 山东 枣庄 277102;  
3. 东北电力开发公司, 辽宁 沈阳 110179)

**摘要:** 10 kV 系统由于分支多、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。提出了基于电压-时间型线路重合器与交流注入法相结合的 10 kV 系统单相接地故障定位技术, 利用线路重合器对接地故障进行准确隔离, 确定故障区段同时减小线路对地电容的影响; 在故障区段注入 60 Hz 的交流信号, 沿线路检测该信号, 确定接地故障点的准确位置。为了保证交流注入信号不受线路对地电容的影响, 深入研究了重合器最优隔离区段长度的计算方法。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; 电压-时间型线路重合器; 交流信号

## Research on technology of grounding fault isolation and location in 10 kV grid

QI Zheng<sup>1</sup>, ZHANG Shan<sup>2</sup>, YANG Kai-zeng<sup>3</sup>

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Zaozhuang Power Supply Company, Zaozhuang 277102, China; 3. Northeast Electric Power Development Co, Shengyang 110179, China)

**Abstract:** Due to the large amount of branches and high grounding resistance of distribution grid, the grounding fault location in 10kV system has not been solved effectively. The grounding fault location technology in 10kV system is proposed by combining voltage-time line sectionalizer and AC signal method. Firstly, the grounding fault is isolated by line sectionalizer, so that the fault is located and the influence caused by distributed capacitance is weakened. Then 60Hz AC signal is injected at the fault area, and the signal can be measured so as to find the exact location of grounding fault. To avoid the influence of distributed capacitance to AC injection signal, the calculation method of optimal length of isolation area is intensively studied. The correctness and feasibility of this technology has been fully proved by site experiments.

**Key words:** neutral point ineffectively grounded system; single-phase-to-earth; fault location; recloser of voltage-time; AC signal

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)02-0027-03

## 0 引言

我国 10 kV 系统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困扰供电部门, 没有得到很好解决。

目前实用化的 10 kV 系统接地故障定位技术有三种: 第一种方法是“故障指示器”方法<sup>[1-2]</sup>, 其不足之处在于对于小电流接地系统而言, 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; 第二种方法是“S”信号注入法<sup>[3-5]</sup>, 其不足之处在于由于线路对地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; 第三种方法是基于配网自动化技术的方法, 目前应用比较广泛的是电压-时间型线路重合器<sup>[6-7]</sup>。线路重合器能够将线路分为若干个区段, 在发生短路或接地故障后, 与继电保护装置和接地选线装置配合, 快速断开故障区段, 并保证非故障区段的恢复供电。但线路重合器只能确定到故障区段, 无法确定到故障点的准确位置, 仍需要人工目测查找故障点。

本文提出了线路重合器与交流法相结合的 10 kV 系统故障定位技术, 首先利用线路重合器对接地故障进行隔离, 确定故障区段同时减小线路对地电容的影响; 然后在故障区段注入 60 Hz 的交流信号, 沿线路检测该信号, 确定接地故障点的准确位置。为了保证交流注入信号不受线路对地电容的

影响,深入研究了重合器最优间隔距离的计算方法。现场的实际运行充分验证了该技术的正确性与可行性。

### 1 电压-时间型线路重合器的工作原理

电压-时间型线路重合器的工作原理是基于电压延时方式,无需通信设备,利用整定时间进行站内外设备的配合,适用于以架空线路为主的 10 kV 系统。

重合器有两个基本时间,第一个是检测到一侧电压后的合闸延迟时间,称为 X 时间;第二个是合闸后控制闭锁信号时间,称为 Y 时间。重合器在正常工作时处于闭合状态。当线路发生单相接地故障后,选线装置发出跳闸信号驱动出线断路器跳闸,线路上的所有重合器因失电而断开。在出线断路器第一次重合后,第一级重合器检测到一侧有电压,延迟 X 时间后闭合;第二级重合器检测到一侧有电压,同样延迟 X 时间后闭合,以此类推。这样线路上的重合器顺序投入,直至投到故障区段后出线断路器再次跳闸,所有重合器再次断开,由于故障区段前的重合器检测到从闭合到断开的的时间小于 Y 时间,因此发闭锁指令。当出线断路器第二次重合后,正常区间恢复供电,而故障区间由于重合器闭锁而隔离。

### 2 交流注入法的定位原理

交流注入法的定位原理如下:当重合器对故障区段进行隔离之后,从故障区段注入60 Hz 的高压交流信号,保持注入电流为100~200 mA。人工手持检测器从故障区段的始端开始沿线路进行检测。如果检测到某个位置前后信号相差两倍以上,则可以断定该位置为故障点。

由于地面的检测位置距离线路8~10 m,而且电流信号很小,因此必然存在一定的误差。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,因此不要求精度很高,只要故障点前后信号强度差别明显,检测器就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。

交流注入信号源的结构如图1所示。

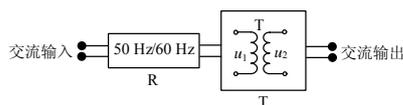


图 1 交流信号源结构

Fig.1 Structure of AC signal source

交流信号源与线路重合器安装在一个位置。图中R表示变频器,用于将50 Hz信号变为60 Hz信号,

其输入信号来自线路重合器的测量PT,因为故障区段隔离后重合器一侧带电,因此能够提供电压。T表示升压变压器,用于升高电压,使故障点能够可靠击穿,保证注入信号能够通过故障点对地构成回路。交流输出一端接故障相线路,另一端接地,向故障线路注入60 Hz、100~200 mA的交流信号。

采用60 Hz交流信号的优点是:

1) 交流信号能够在空间产生同频交变电磁场,该交变电磁场能够在较远距离处产生感应电动势,从而能够实现较远距离检测,即地面检测。

2) 60 Hz交流信号产生的电磁场不受周围环境中50 Hz电磁场的影响,便于区分。

3) 60 Hz频率较低,可以有效减小线路对地电容的分流影响。

### 3 隔离区段长度计算

#### 3.1 故障区段线路对地电容范围

利用交流注入法进行定位的前提是线路对地电容影响不大,否则将出现定位错误。

电容产生的影响如图 2 所示,在故障区段主干线上距离始端较近的地方发生高阻接地,从故障区段的始端注入 60 Hz 的高压信号后,在故障点前检测到电流  $I_1$ ,在故障点后检测到电流  $I_2$ 。设信号源电压为  $U$ ,接地电阻为  $R$ ,线路电容为  $C$ ,显然有

$$I_1 = \sqrt{\left(\frac{U}{R}\right)^2 + (\omega CU)^2}, I_2 = \omega CU$$

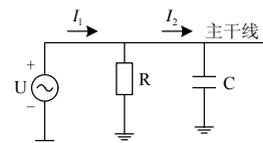


图 2 电容的影响

Fig.2 The influence caused by distributed capacitance

如果故障区段线路较长,当  $I_2 > I_1 / 2$  时,定位将出现错误。因此,必须保证  $I_2 < I_1 / 2$ ,即

$$C < \frac{1}{\sqrt{3}\omega R} \tag{1}$$

下面定量计算  $C$  的数值,一般 10 kV 系统,能够使零序电压越限报警的最高接地电阻为

$$R = 10 \text{ k}\Omega, \text{ 带入式(1)中, 得到}$$

$$C < 0.184 \text{ }\mu\text{F} \tag{2}$$

### 3.2 重合器的最优隔离区段长度

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 10 kV 系统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(2)所述的要求, 计算故障区段线路的长度为

$$L_{\max} = \frac{C}{C_0} = 16.85 \text{ km}$$

该长度即为重合器的最优隔离区段长度, 如果隔离区段长度大于  $L_{\max}$ , 则交流注入法可能失效; 如果隔离区段长度小于  $L_{\max}$ , 则会增加重合器的个数, 增加了建设投资。

在安装重合器时, 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重合器, 最终使各个区段长度等于  $L_{\max}$ 。

### 4 现场试验数据分析

本文提出的方法已在现场得到了实际应用, 并通过现场实际接地试验进行了验证。

该线路为 10 kV 配电线路, 全长 45 km, 其中主干线长为 35 km, 一条分支线长度为 10 km, 结构图如图 3 所示。

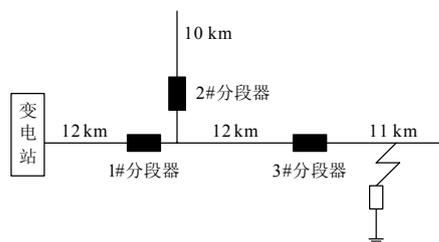


图 3 线路结构

Fig.3 Structure of line

为了保证重合器的间隔距离在最优间隔距离以内, 按照图 3 所示的位置安装三台线路重合器。其中主干线上安装两台, 分支线上安装一台, 共将线路分为四个区段, 每个区段长度在  $L_{\max}$  以内, 满足最优间隔距离的要求。

现场试验为 3#重合器后侧线路单相经  $10 \text{ k}\Omega$  电阻接地, 接地后经过两次重合闸 3#重合器闭锁, 将故障区段成功隔离。随后通过 3#重合器的 PT 向故障区段故障相注入 150 mA、60 Hz 交流信号。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

线路重合器与交流法相结合的 10 kV 系统故障定位技术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, 弥补了单独使用线路重合器的不足。

确定重合器的最优隔离区段长度能够有效避免线路电容对交流法的影响, 保证交流法的准确定位。

现场的实际运行充分验证了该技术的正确性与可行性, 该技术是解决 10 kV 系统单相接地问题的有效方法。

### 参考文献

- [1] 张斌,袁钦成,袁月春,等. 配电网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.
- [2] 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(33):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(33):79-84.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.

(下转第49页 continued on page 49)

- Methods of Fault Line Selection for Single-phase-to-earth Fault in Networks with Ungrounded Neutral[M]. Relay, 2001, 29 (4): 16-20.
- [3] 孟润泉, 梁翼龙, 宋建成, 等. 基于谐波检测的井下高压电网选择性漏电保护系统[J]. 继电器, 2001, 29 (5): 37-40.  
MENG Run-quan, LIANG Yi-long, SONG Jian-cheng, et al. The Selective Leakage Protection System for Underground HV Distribution Networks based on Harmonic Detection[J]. Relay, 2001, 29 (5): 37-40.
- [4] 龚静. 小电流接地系统单相接地故障的 7 次谐波选线新方法[J]. 电工技术, 2005, (9): 6-9.  
GONG Jing. The New Method for Detecting Single Phase-to-ground Fault Line in Ineffectively Grounded Systems by using the Seventh Harmonious[J]. Electric Engineering, 2005, (9): 6-9.
- [5] Chaari O, Meunier M, Brouaye F. Wavelets: A New Tool for the Resonant Grounded Power Distribution System Relaying[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11 (3): 1301-1308.
- [6] 索南加乐, 张超, 王树刚. 基于模型参数识别法的小电流接地故障选线研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (19): 65-70.  
SUONAN Jia-le, ZHANG Chao, WANG Shu-gang. Fault Line Selection in the Non-Solid Earthed Network Based on the Model Identification Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (19): 65-70.
- [7] 董新洲, 毕见广. 配电线路暂态行波的分析 and 接地选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (4): 1-6.  
DONG Xin-zhou, BI Jian-guang. Analysis on Transient Traveling Wave and Study on Fault Line Selection for Distribution Lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (4): 1-6.
- [8] 桑在中, 张慧芬, 潘贞存, 等. 用注入法实现小电流接地系统单相接地选线保护[J]. 电力系统自动化, 1996, 20 (2): 11-12.  
SANG Zai-zhong, ZHANG Hui-fen, PAN Zhen-cun, et al. Protection for Single to Earth Fault Line Selection for Ungrounded Power System by Injecting Signal[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20 (2): 11-12.
- [9] 薛永端, 陈羽, 徐丙垠, 等. 利用暂态特征的新型小电流接地故障监测系统[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (24): 83-87.  
XUE Yong-duan, CHEN Yu, XU Bing-yin, et al. Characteristic Transient Based Monitoring System for Earth Fault in Non-Solidly Earthed Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (24): 83-87.
- [10] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.  
GE Yao-zhong. New Types of Protective Relaying and Fault Location Their Theory and Techniques[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996.

收稿日期: 2009-02-15; 修回日期: 2009-04-12

作者简介:

薛永端 (1970-), 男, 博士, 研究员, 研究方向为配电网自动化及其故障检测; E-mail: xueyd@kehui.cn

李长安 (1976-), 男, 硕士, 研究方向为小电流接地故障选线;

徐丙垠 (1961-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统故障检测、配电网自动化。

(上接第 29 页 continued from page 29)

- 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.
- [6] 韩晓春, 杨富营. 电压型馈线自动化设备的应用与实践[J]. 继电器, 2005, 33(11):71-79.  
HAN Xiao-chun, YANG Fu-ying. Application and Practice of Voltage-type Feeder Automation Equipment[J]. Relay, 2005, 33(11):71-79.
- [7] 刘健, 程红丽, 李启瑞. 重合器与电压-电流型开关配合的馈线自动化[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22):68-71.  
LIU Jian, CHENG Hong-li, LI Qi-rui. Feed Automation Based on Reclosers and Voltage-current-mode Pole-mounted Switches[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22):68-71.
- [8] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

收稿日期: 2009-08-15; 修回日期: 2009-10-09

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

张 善 (1965-), 男, 工程师, 从事电力系统运行调度工作;

杨开增 (1951-), 男, 工程师, 从事电力企业管理工作。