

# 注入法选线在小电流接地系统中的应用研究

战祥新, 郝世勇

(海军航空工程学院青岛分院, 山东 青岛 266041)

**摘要:** 注入信号法是一种效果较好的选线方法, 其原理广泛应用于小电流接地系统单相接地故障的自动选线。在现场运行中, 由于外部环境因素的变化, 有时会发生选线错误、漏判等现象。通过对注入法机理的深入分析, 借助 Matlab 软件仿真研究, 给出了注入法正确使用的外部条件。

**关键词:** 小电流接地系统; 注入信号法; Matlab; 单相接地故障

## Study of the signal injection method in indirectly earthed power system

ZHAN Xiang-xin, HAO Shi-yong

(Qingdao Branch, Naval Aeronautical Engineering Academy, Qingdao 266041, China)

**Abstract:** The signal injection method is widely used for automatic selecting fault line in indirectly earthed power system, which has great effect in the system of single-phase ground fault. Because external surrounding factors changed, sometimes mistakes would occur in local circumstance, such as misjudgment, not judging, etc. According to analyzing the method principle in detail by Matlab simulation, this paper points out the correct exterior conditions by using the method.

**Key words:** indirectly earthed power system; signal injection method; Matlab; single-phase-ground fault

中图分类号: TM773 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)06-0011-03

## 0 引言

我国 6~35 kV 配电网中性点有不接地、经消弧线圈接地、经高阻接地三种形式, 称为中性点非有效接地系统, 又称小电流接地系统。根据电力运行部门的故障统计, 单相接地故障是配电网故障中最常见的, 发生率最高。由于故障电流小, 系统可带故障继续运行一定时间(规程规定 1~2 h), 不必立即跳闸, 从而不影响对负荷的连续供电<sup>[1]</sup>。因此, 小电流接地系统被广泛应用于各地配电网中。

小电流接地系统发生单相接地故障时, 系统仅有零序电压、零序电流发生改变, 而没有其它比较明显的故障特征。所以以前对其接地故障检测原理和方法的研究, 一直是围绕零序电压、零序电流的特点来进行的。基于零序电流的稳态量和暂态量, 已经研制出了多种反应零序电流基波和谐波特征的接地自动选线方法<sup>[1,2]</sup>, 如零序电流比幅法、零序功率方向法、五次谐波法、首半波法、能量法、小波分析法等。由于故障电流微弱、故障电弧不稳定等原因, 在实际运行过程中, 受零序电流互感器角度误差和测量误差及环境气候等影响, 时常发生误判

而达不到理想的使用效果。

1998 年, 由山东大学电力学院桑在中教授提出的基于“S 注入法”的选线定位原理, 与上述方法相比, 在理论和实用上有了较大突破。此法突破以往大多是利用零序电流作为单相接地选线判据的局限, 为自动选线问题的研究提供了新的思路。根据该原理开发的 TY 系列通用小电流接地系统单相接地选线与定位保护装置, 已广泛应用于全国十几个省市的电力、石油、冶金等部门<sup>[3]</sup>。但在实际运行过程中, 由于外部环境因素的变化, 有时会发生选线错误、漏判等现象。本文通过对注入法机理的深入分析, 并借助 Matlab 软件仿真, 研究了注入电流信号的频率、接地过渡电阻等对选线的影响, 给出了注入法正确使用的外部条件。

## 1 注入信号法基本原理简述<sup>[3,4]</sup>

注入法系统由主机和电流探测器组成。其原理简图如图 1。

信号电流发生器通过五根线(如图中所示的 A、B、C、N、L)与电压互感器 PT 的副边相连; 信号电流探测器对出线电流进行探测, 由主机内部电源

对其可充电电池进行充电, 进入工作状态。

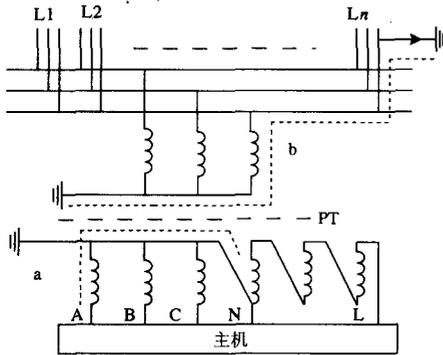


图1 信号注入法原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of principle for signal injection method

正常运行时, PT 副边各电压:

$$U_{AN} = U_{BN} = U_{CN} = 57.8 \text{ V} \quad U_{LN} = 0 \text{ V}$$

当发生单相金属性接地时(假设图1中A相发生单相接地), 有:

$$U_{BN} = U_{CN} = 100 \text{ V} \quad U_{LN} = 100 \text{ V}$$

即系统 A 相  $U_{AN} = 0 \text{ V}$  对地电压降为零, B、C 相对地电压升高为原来的  $\sqrt{3}$  倍。主机根据 PT 副边电压的变化, 自动判断出 A 相为接地相, 并将信号电源跨接在 A、N 端子之间, 向接地相(A相)注入一特殊的特定频率的信号电流, 其通路如图中虚线 a 所示。由于此时接地相 PT 原边(高压侧)处于被短接状态, 信号电流一定会感应到原边, 感应电流路径如图1中虚线 b 所示。电压互感器、故障相故障线路和接地点之间就形成了低电阻回路, 该注入电流的感应电流流经该回路, 经接地点入地。

## 2 注入信号在小电流接地系统单相接地故障中的分析

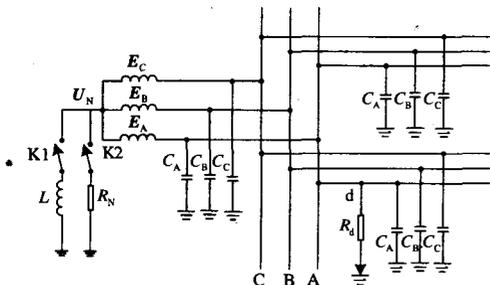


图2 小电流接地系统(两条线路)电气原理图

Fig.2 Electrical principle chart of indirectly earthed power system(two lines)

图2中当 K1、K2 断开时, 系统为中性点不接地。

假定 PT 接在母线上, 故障后信号电流对地支路的阻抗由故障点的过渡电阻和线路对地电容的容抗并联组成的。由于信号注入法的信号源只接在故障相 PT 的二次侧, 所以只在故障相中有感应电流。通过相间分布电容和电源变压器形成通路, 感应的信号电流也会流入非故障相。对于采用对称换位的三相系统而言, 相间电容是很小的, 因此非故障相对信号的分流作用可以不予考虑。

对于接地线路 A 相, 如图2中, 当 d 点发生经过渡电阻  $R_d$  接地时, PT 原边(高压侧)感应产生的电流信号经输电线路、d 点、过渡电阻  $R_d$  到大地流回信号源, 构成信号电流的一条主要通路。另外, 其它非故障线路的 A 相通过对地电容构成回路, 也感应出信号电流, 与流过故障线路的故障相 A 相电流形成比较。当过渡电阻较小时, 由于输电线路对地电容很小, 低频下的容抗较大, 因而经对地电容回路的分流较小。单相金属接地故障时 ( $R_d = 0$ ), 电容  $C_{0d}$  被短接, 非故障线路的分流作用就极小了。

图2中当 K1 闭合、K2 断开时为经消弧线圈接地, K1 断开、K2 闭合时为经高阻接地。两种接地方式都为注入信号增加了一条对地分流通路。

## 3 基于 Simulink 的注入信号法仿真

根据上面的分析, 建立 Matlab 环境下的 Simulink 仿真模型, 通过仿真来验证注入法的应用范围, 如图3。基本思路是根据注入法的原理, 建立了一个有六条线路的简单小电流接地系统仿真模型。假设断路器(Breaker1)在  $t = 0.1 \text{ s}$  时刻闭合, 系统发生 A 相接地故障, 延迟  $0.05 \text{ s}$ , 即断路器(Breaker2)在  $t = 0.15 \text{ s}$  时刻闭合, 注入信号加到线路中。系统中各输电线路加滤波器滤掉电源的  $50 \text{ Hz}$  正常负载电流, 使示波器只显示注入信号。

采用分布参数模型, 选用架空线路的标准参数<sup>[6]</sup>: 正序电阻  $0.17 \text{ } \Omega/\text{km}$ , 电感  $7.6e-3 \text{ H}/\text{km}$ , 电容  $61e-9 \text{ F}/\text{km}$ ; 零序电阻  $0.23 \text{ } \Omega/\text{km}$ , 电感  $34.4e-3 \text{ H}/\text{km}$ , 电容  $38e-9 \text{ F}/\text{km}$ 。

由于配电网输电线路都较短, 模型中六条线路长度分别设置为  $5 \text{ km}$ 、 $6 \text{ km}$ 、 $5 \text{ km}$ 、 $4 \text{ km}$ 、 $3 \text{ km}$ 、 $2 \text{ km}$ 。线路故障发生在第一条线路的末端。

注入信号电流峰值为  $10 \text{ A}$ , 相位为  $0^\circ$ , 频率变化。三相电源采用中性点不接地方式, 频率为  $50 \text{ Hz}$ , A 相初相为  $0^\circ$ , 电阻为  $0.312 \text{ } \Omega$ , 电感为  $6.63e-3 \text{ H}$ 。

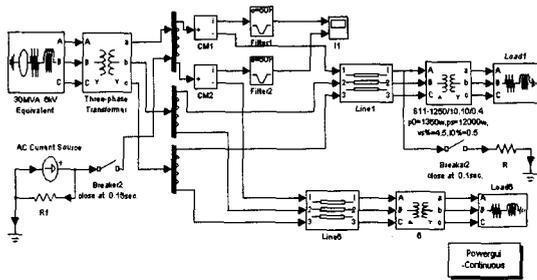


图3 仿真模型简图  
Fig.3 Diagram of simulation model

考虑到注入信号法是在已经明确了故障相的前提下,选择故障线路的。因此只需得出故障相的故障线路与非故障线路的电流对比即可。根据仿真数据,作出输入各频率电流信号后,故障线路信号电流与非故障线路信号电流的比值随过渡电阻的变化曲线表,横坐标为过渡电阻,纵坐标为比值。如图4、5所示。

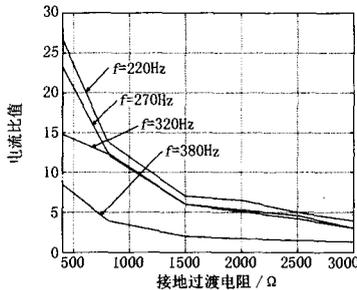


图4 电流比值变化表(高频段)

Fig.4 Diversification of current ratio (high frequency part)

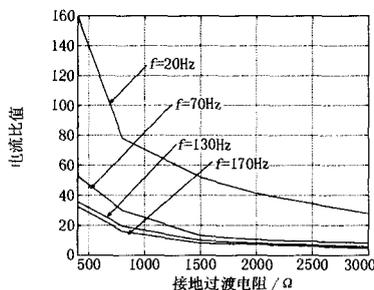


图5 电流比值变化表(低频段)

Fig.5 Diversification of current ratio (low frequency part)

1) 当电流输入信号的频率低于100 Hz时,如图5。曲线斜率较大,尤其在接地电阻较小时,故障线路电流与非故障线路电流的比值特别大。这是因为频率  $f$  小时,容抗  $X_C = 1/(j\omega C_0) = 1/(j2\pi f C_0)$  很大,非故障线路的电流就很小了。

2) 当电流输入信号的频率高于100 Hz而小于300 Hz时,如图4。过渡电阻较小时,故障线路电流

与非故障线路电流的比值较大,信噪比较大;而当过渡电阻增大(如大于2 kΩ)时,非故障线路电流迅速衰减,峰值都小于1.5 A。同时在该段注入信号频率周围频段上存在着大量的谐波噪声,包括工频的整数倍次谐波和各种非线性噪声干扰,有些是各种滤波器无法消除的,严重影响混淆了注入的有效信号。

3) 当频率再加大(大于300 Hz),非故障线路的对地容抗减小,对注入信号的分流作用明显。特别当接地电阻较大(大于1 kΩ)时,故障线路的电流就大幅度降低了,非故障线路电流变化幅度较小,这样由于故障线路的电流较小,就容易导致误判,无法正确选择故障线路。如  $f_0 = 320 \text{ Hz}$ ,  $R_g = 1.5 \text{ k}\Omega$  时,故障线路电流峰值小于0.6 A。

#### 4 结论

通过上面的分析,比较了同一仿真模型条件下不同频率电流输入信号在接地过渡电阻变化下的检测电流结果。考虑到实际系统运行时,同一个配电变压器会接有十几条甚至更多条三相线路出线,对注入信号的分流作用更明显。国家标准 GB/T 14549-93 «电能质量公用电网谐波»中规定:电网标称电压为10 kV、基准短路容量为100 MVA时,2次、3次、4次、5次谐波电流允许值分别为26 A、20 A、13 A、20 A。因此感应到的注入电流不能大于对应的谐波电流,再考虑接地过渡电阻的影响,应该尽量满足大范围的过渡电阻要求。因而有下列结论:

(1) 检测装置中的电流探测器必须具有很高的品质因数、很窄的通带宽度和很高的通带放大倍数,以隔离掉相邻次谐波,把有用信号检测出来,实现正确选线。通常选择位于工频  $N$  次与  $N+1$  次谐波之间的某一特定电流信号作为注入信号<sup>[3]</sup>。

(2) 选择注入信号频率时,一方面单纯考虑系统带电运行时,为避开系统中各次谐波,选择注入信号频率越高,谐波影响越小。而另一方面注入信号频率越高,非故障线路的分流作用越大,与故障线路的区分就不明显。折中的结果是选择  $N=4$ , 频率范围为200~250 Hz。这也是由于配电网中5次谐波含量最高<sup>[7]</sup>,为避开5次谐波所造成的。

(3) 由于单相接地故障多为间歇性电弧接地,过渡电阻变化范围很大。当接地弧光电阻较大,大于3 kΩ时,故障线路的感应电流就较小了,选线就很困难,容易误判、漏判。可见过渡电阻是影响注入法选线准确率的主要因素。

(下转第36页 continued on page 36)

- 权的定价[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 18-23.  
ZHANG Xian, WANG Xi-fan, WANG Jian-xue, et al. Pricing for Exotic Option of Interruptible Electricity Contracts[J]. Proceedings of CSEE, 2004, 12:18-23.
- [6] 张显, 王锡凡, 王秀丽, 等. 水电厂电量不确定性风险的管理[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 93-100.  
ZHANG Xian, WANG Xi-fan, WANG Xiu-li, et al. Electric Energy Uncertainty Risk Management of Hydropower Generators[J]. Proceedings of CSEE, 2006, 26(2):93-100.
- [7] 张少华, 李渝曾, 王长军, 等. 结合期权理论的双边可选择电力远期合同模型[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(21): 28-32.  
ZHANG Shao-hua, LI Yu-zeng, WANG Chang-jun, et al. Combining Option Theory with Modeling for Bilateral Optional Electricity Forward Contracts[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(21):28-32.
- [8] Geoss C G. Pricing Residential Load Shedding as a Call Option[J]. Energy, 1998, 23(4):309-316.
- [9] Deng Shi-jie, Johnson B, Sogomonian A. Exotic Electricity Options and the Valuation of Electricity Generation and Transmission Assets[J]. Decision Support Systems, 2001, 30(3):383-392.
- [10] 黄永皓, 江健健, 孟远景, 等. 电能平衡与辅助服务的辅助手段一期权[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 11-15.  
HUANG Yong-hao, JIANG Jian-jian, MENG Yuan-jing, et al. Options: a Complementary Mechanism for Energy Balance and Aucillary Services[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(5):11-15.
- [11] Marada G S, Lao C R. 现代金融方法论丛书-- 金融中的统计方法[M]. 王美今, 芮萌, 林嘉永, 译. 上海: 上海人民出版社, 2004.  
Marada G S, Lao C R. Modern Finance Methodology Collection-Statistical Method in Finance[M]. WANG Mei-jin, RUI Meng, LIN Jia-yong, Trans. Shanghai: Shanghai People's Publishing House, 2004.
- [12] Hull J C. 期权, 期货和其他衍生产品[M]. 张陶伟, 译. 北京: 华夏出版社, 2000.  
Hull J C. Options, Futures and Other Derivatives[M]. ZHANG Tao-wei, Trans. Beijing: Huaxia Press, 2000.
- [13] [http://quote.yahoo.com/\[EB/OL\]](http://quote.yahoo.com/[EB/OL])

收稿日期: 2007-08-22; 修回日期: 2007-10-24

作者简介:

葛佳佳(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力市场; E-mail: jiajia8366@tom.com

邹斌(1965-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力市场和自动化。

(上接第 13 页 continued from page 13)

### 参考文献

- [1] 李冬辉, 史临潼. 非直接接地系统单相接地故障选线方法综述[J]. 继电器, 2004, 32(18).  
LI Dong-hui, SHI Lin-tong. Survey of the Methods to Select Single-phase Fault Line in Neutral Point Indirectly Grounded Power System[J]. Relay, 2004, 32(18).
- [2] 徐丙银, 李天友, 薛永端, 等. 小电流接地故障选线及定位技术新发展[J]. 供用电, 2003, 20(4).  
XU Bing-yin, LI Tian-you, XUE Yong-duan, et al. The Development of Fault Line Identification and Fault Distance Measurement in Small Current Neutral Grounding System[J]. Distribution & Utilization, 2003, 20(4).
- [3] 桑在中, 潘贞存, 李磊, 等. 小电流接地系统单相接地故障选线和定位的新技术[J]. 电网技术, 1998, 21(10).  
SANG Zai-zhong, PAN Zhen-cun, LI Lei, et al. A New Approach of Fault Line Identification, Fault Distance Measurement and Fault Location for Single Phase-to-ground Fault in Small Current Neutral Grounding System[J]. Power System Technology, 1998, 21(10).
- [4] 桑在中, 潘贞存, 李磊, 等. “S注入法”与选线测距定位[J]. 电力系统及其自动化, 1998, 10(4).  
SANG Zai-zhong, PAN Zhen-cun, LI Lei, et al. S Signal Injection and Fault Line Identifying and Distance Measuring and Fault Point Locating Technique[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 10(4).
- [5] 朱丹, 蔡旭. 小电流接地电网改进能量法接地选线原理[J]. 继电器, 2004, 32(10).  
ZHU Dan, CAI Xu. Improved Energy Function to Detect the Grounded Line in Neutral Point Indirectly Grounded Network[J]. Relay, 2004, 32(10).
- [6] 薛永端. 基于暂态特征信息的配电网单相接地故障检测研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2003.  
XUE Yong-duan. Study on Fault Line Detection Based on Transient Characteristics for Single Phase-to-ground Fault in Distribution System[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2003.
- [7] 徐桂芝. 小电流接地系统单相接地故障测距装置的研制[D]. 济南: 山东大学, 2001.  
XU Gui-zhi. The Development of a Device for Single-phase-ground Fault Location in Neutral Ungrounded Power System[D]. Jinan: Shandong University, 2001.

收稿日期: 2007-07-09; 修回日期: 2007-11-13

作者简介:

战祥新(1973-), 男, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护. E-mail: zhanxiangxin@sohu.com