

# 采用数字技术的小电流接地选线和故障定位装置

陶利国<sup>1</sup>, 许云峰<sup>2</sup>

(1. 湖南省永州电力勘测设计院, 湖南 永州 425000; 2. 北京市天利自动化设备研究所, 北京 100083)

**摘要:** 小电流接地选线装置准确性差一直是困扰厂家和用户的难题。介绍了一种基于外加信号法的新型小电流接地选线装置, 该装置针对目前模拟装置在信号源及选频方面存在的缺点, 综合当前先进的电子技术和计算机技术, 采用了数字信号源技术、数字选频技术等关键技术, 从根本上解决了模拟电路由于温度漂移, 元器件老化所产的频率不准, 频率不稳定的缺陷。现场运行结果证明该装置是小电流接地选线的理想设备。

**关键词:** 小电流接地选线; 故障定位; 外加信号法; 数字信号源; 数字选频

## Grounding fault identification device based on the digital technology

TAO Li-guo<sup>1</sup>, XU Yun-feng<sup>2</sup>

(1. Yongzhou Power Survey and Design Institute, Yongzhou 425000, China;  
2. Beijing Tianli Institute of Automated Equipment, Beijing 100083, China)

**Abstract:** How to improve the accuracy of the proper judgment is a difficult problem to the manufacturer and users. In this paper, a new kind of the fault line selection device based on the signal injection is introduced. Combining with the advanced electronic and computer technology, this device aims at the disadvantage of existing analog device including signal generating and frequency selection. The key is digital signal producing and the digital frequency selection technology. It is a better resolution to overcome the frequency inaccuracy and low stabilization due to the temperature drift and the component ageing. Facts proved that this device is ideal for selecting the fault line from the system.

**Key words:** fault line selection; fault location; applied signal; digital signal source; digital frequency selection

中图分类号: TM774 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)07-0086-05

## 0 引言

我国 3~66 kV 配电网大多采用小电流接地方式即中性点非有效接地方式, 包括中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统。中性点非有效接地系统的优点在于, 发生单相接地故障时, 系统能带故障运行, 但非接地相相电压升高, 长时间运行会破坏绝缘而导致故障扩大, 必须尽快确定故障线路并予以切除, 这就提出了单相接地故障选线问题。

小电流接地选线装置按选线原理可分为零序电流电压法和外加信号法。零序电流、电压法通过接地时系统零序电压、零序电流的特征选线, 既利用接地时系统自身的信号特征确定接地线路。基于系统零序电流、零序电压的选线判据很多, 但基于这种选线原理的装置无法用于不能获取线路零序电流的接地选线。这种情况下当出现线路接地时, 不得

不采用原始落后的人工拉路法选线。外加信号法通过在系统中电压互感器二次侧外加一特定频率的信号, 该信号通过电压互感器耦合到一次侧, 再从母线流向接地线路, 最后流入接地点, 接地线路有信号流过, 非接地线路无信号流过。根据上述原理, 在每条线路的起始端安装一信号检测器, 当信号检测器检测到特定信号时判定该线路为接地线路, 未检测到特定信号时判定该线路为非接地线路。该方法彻底解决了不能获取零序电流的线路的接地选线问题。

## 1 装置组成及工作原理

### 1.1 装置组成

装置由主机、信号检测器和故障定位器三部分组成, 如图 1 所示。主机及故障定位器每个变电站配置一台, 信号检测器每条被检测线路配置一台。

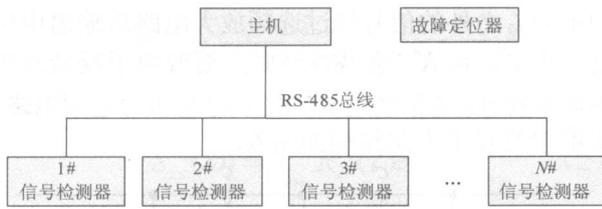


图1 TLXJ-2小电流接地选线装置组成框图

Fig.1 The constitution of the TLXJ-2 grounding fault identification device

## 1.2 装置工作原理

当系统发生单相接地故障时, 主机通过检测零序电压及 A、B、C 三相电压确定接地线路所在母线及接地相别, 然后在接地线路对应母线的 PT 二次侧外加一特定频率 (215 Hz) 的电流信号, 该信号由母线沿接地线路接地相流动并经接地点入地, 如图 2 虚线所示为 A 相接地时外加信号电流在系统中的流动情况。如图 1 所示, 信号检测器接收该特定频率的电流信号产生的电磁波, 将接收到的电磁波信号转换成电压信号, 并经 A/D 转换成数字信号, 运算结果通过 RS485 总线送到主机, 主机根据各信号检测器发回的检测信号判定接地线路。当判定接地线路后, 故障查找人员用故障定位器沿接地线路寻踪, 就可以找到接地点的准确位置。

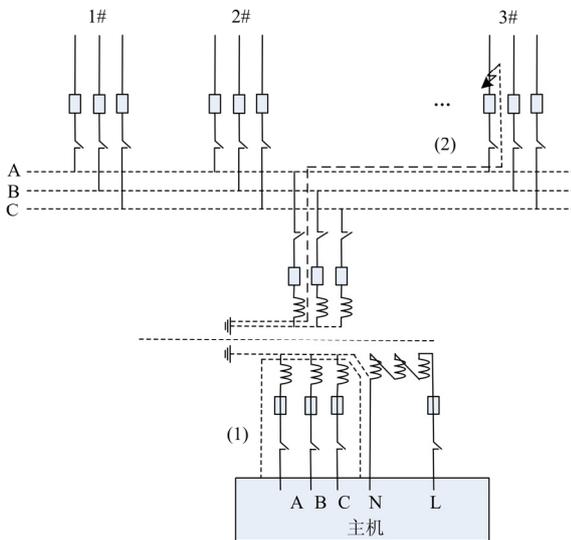


图2 TLXJ-2接地选线装置工作原理示意图

Fig.2 Principle of TLXJ-2 grounding fault identification device

## 2 装置特点

本装置与依靠零序电流零序电压选线的装置相比, 具有如下显著特点:

1) 不需安装零序电流互感器, 特别适合老站改造和架空出线的变电站。

2) 具有故障定位功能。

3) 分布式结构, 接线简单, 扩充方便, 一条线路的信号检测器故障不影响其它线路正常选线, 可靠性高。

4) 选线过程不受系统运行方式及有无消弧线圈的影响, 选线准确率高。

本装置与国内同类产品相比, 具有如下显著特点:

1) 信号检测器采用模拟选频与数字选频技术相结合, 从根本上解决了模拟选频频率漂移的缺陷, 与模拟选频相比, 抗干扰能力强, 选频准确, 频率分辨率高, 稳定性好, 选线准确率高。

2) 信号源采用数字信号源, 从根本上解决了模拟信号源频率漂移的缺陷, 与模拟信号源相比, 输出信号频率稳定。

## 3 几个关键技术

### 3.1 数字信号源

信号源的频率精度和稳定性直接决定外加信号法小电流接地选线装置的选线准确度。模拟信号源具有信号频率不准确, 随着元器件老化, 温度变化, 信号频率变化的缺点。本装置采用单片计算机输出 PWM 脉宽调制信号, 经过滤波电路得到一个频率准确、稳定的正弦波信号。且输出信号的幅值和频率均可通过计算机整定。

### 3.2 模拟选频与数字选频技术相结合

信号检测器安装在开关柜内或户外开关附近, 紧靠高压输电线路, 高压输电线路流过的工频电流数百安培, 且含有大量高次谐波, 三次谐波、五次谐波分量可达数十安培, 而流过的信号电流只有几毫安至几十毫安, 最大五十毫安。干扰比信号的幅值大数千倍, 且频率非常接近。因此对信号检测器的选频特性要求很高, 模拟电路需多级选频放大串联, 容易产生自激, 调试十分困难, 工作不稳定。且模拟选频电路包含大量阻容元件, 阻容元件数值容易随时间和温度变化, 导致接收频率特性变化。为了从根本上解决模拟电路的致命问题, 本装置采用模拟选频与数字选频技术相结合, 将天线接收的模拟信号经一级双 T 选频放大后转换成数字信号, 进行数字滤波, 再进行频谱分析, 选出外加特定信号。

#### 3.2.1 选频放大电路

选频放大是本装置的关键技术之一, 因为信号只有微伏级, 而干扰比信号大数千倍甚至数万倍, 且干扰与信号的频率非常接近, 在这种场合下滤去干扰选出信号, 因此对电路的选频特性要求很高,

本装置采用高 Q 值的双 T 选频电路。如图 3 所示。

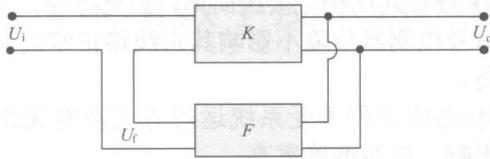


图 3 双 T 选频放大电路

Fig.3 Frequency selecting amplifier using twin T circuit

选频放大器是从多种频率的输入信号中选取所需的一种频率信号加以放大，图 3 中所示的方框图可以构成选频放大电路，其中 K 是基本放大电路，方框 F 是选频负反馈网络。因此选频放大器实际上是一种具有选频作用的负反馈电路，电路的闭环增益为：

$$K_F = \frac{K}{1 + FK}$$

式中： $K = \frac{U_o}{U_i}$  是开环增益； $F = \frac{U_f}{U_o}$  是反馈系数。

一般用 RC 选频网络实现选频，图 4 表示出反馈系数 F 与信号频率的变化关系（频率特性曲线）。当  $f = f_0$  时  $F = 0$ ，意思是对谐振频率  $f_0$  来说，放大电路不存在负反馈，故  $K_F = K$ 。此时放大器的输出电压最大。随着频率远离频率点  $f_0$ ，F 急剧增加，相应的  $K_F$  也很快衰减至零，如图 5 所示，因此，

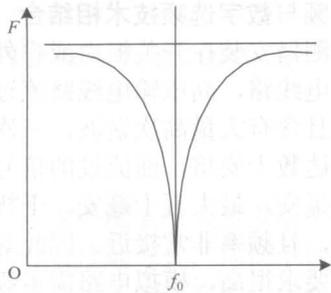


图 4 频率特性曲线

Fig.4 Performance curves of frequency

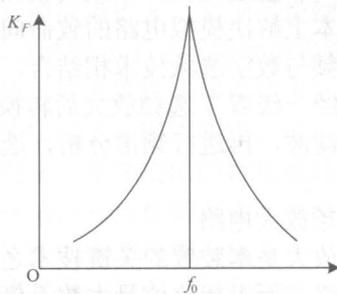


图 5 闭环增益曲线

Fig.5 Gain curves of closed loop

频率为  $f_0$  之外的信号经过选频放大电路后输出电压就很小了，而  $K_F$  衰减特性则主要取决于反馈网络的选频特性。通常使用 RC 双 T 电路作为选频电路，实用中的双 T 电路结构如图 6。

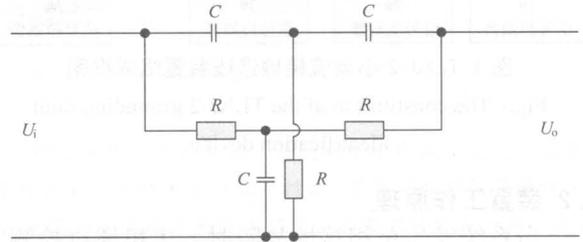


图 6 双 T 电路

Fig.6 Twin T circuit

### 3.2.2 数字选频算法

根据系统工作原理，检测器接收到的信号主要是主机注入到母线，并在接地线路上耦合的信号，该信号的特点是：信号为低频正弦波、频率已知且固定，信号强度相对较弱。通过接收电路接收到的信号中，除了与注入信号相关的成分外，还包含有其他频率的信号（主要是工频信号和谐波）和各种干扰与噪声，因此要获得接收和检测结果，就要对采集到的信号数据进行计算和分析。

对噪声中正弦信号参量估计研究领域已有很多种方法，比如自相关法、多重自相关法、互相关法以及互功率谱法等。本文根据信号的特点以及计算的可实施性，通过快速傅立叶变换技术计算两个序列的互功率谱来检测微弱信号。

以下是本装置中使用的互功率谱法测量原理。

由于发送信号的频率已知，可以在接收端产生一个频率与发送信号相同的“纯净的”正弦或余弦信号，作为本地参考信号，将其与混有噪声的接收信号进行相关，通过计算互相关函数或互功率谱的方法提高电路的抗干扰性能。

图 7 中  $x(t)$  为正弦信号  $s(t)$  叠加了不相关的噪声  $n(t)$ ，经过放大后得到的结果。 $y(t)$  为正弦参考信号经过移相得到的信号。

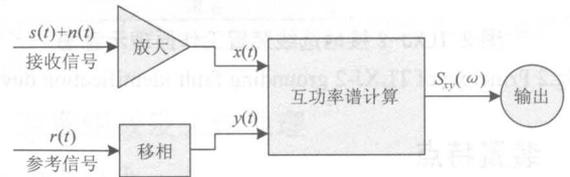


图 7 互功率谱测量原理

Fig.7 Measuring principle of mutual power spectrum

设  $x(t)$ 、 $y(t)$  的互相关函数为

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t-\tau)dt \quad (1)$$

根据 Wiener-Khinchine 定理, 互功率谱

$$S_{xy}(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} R_{xy}(\tau)e^{-j\omega\tau} d\tau \quad (2)$$

考虑到  $r(t)$  与  $n(t)$  无关, 因此

$$S_{xy}(\omega) = K(j\omega)S_{sy}(\omega) \quad (3)$$

其中:  $K(j\omega)$  为放大器增益。

对于频率为  $\omega_0$  的正弦信号测量, 设  $r(t)$  移相后与  $s(t)$  同相位, 则  $S_{sy}(\omega_0) = U_s U_r / 2$ , 由此得到

$$U_s = \frac{2S_{xy}(\omega_0)}{K(j\omega_0)U_r} \quad (4)$$

式(4)可以看出, 只要测到  $\omega_0$  点的互功率谱  $S_{xy}(\omega_0)$ , 就可以计算出正弦信号的幅度。

目前, 在数字化计算上, 互功率谱估计是基于有限数据记录长度的周期图法。通过理论计算分析可知, 由于信号与噪声不相关, 互功率谱估计的期望值与噪声无关, 属于渐进无偏估计, 所以只要数据记录长度足够长, 并采用多次谱估计平均, 即可以准确测得信号功率谱值。

具体计算方法是: 先用快速傅立叶变换技术计算采集得到的序列信号的互相关函数, 再用间接法即 Blackman-Tukey 方法计算其功率谱。

设有两个有限长序列  $x(n)$  和  $y(n)$ , ( $n=0, 1, 2, \dots, N-1$ )。其中:  $x(n)$  是接收到的注入信号经过模数转换得到的序列;  $y(n)$  是与注入信号同频率的数字化正弦信号。它们的互相关函数为:

$$r_{xy}(m) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1-m} [x(n) - \bar{x}][y(n+m) - \bar{y}], \quad 0 \leq m \leq L-1 \quad (5)$$

式中:  $\bar{x}$  和  $\bar{y}$  分别是  $x(n)$  和  $y(n)$  的均值。

为了用相关方法计算功率谱, 首先对相关函数进行加窗处理。

$$\tilde{r}_{xy}(m) = r_{xy}(m)w(m), \quad 0 \leq m \leq L-1 \quad (6)$$

对加窗后的相关函数  $\tilde{r}_{xy}(m)$  进行快速傅立叶变换, 便得到互功率谱  $S_{xy}(k)$ , 即

$$S_{xy}(k) = DFT[\tilde{r}_{xy}(m)] \quad (7)$$

在上述计算中, 对接收到的信号数据进行分段处理, 并对谱计算结果进行多次平均, 以减少谱估计的方差, 提高对特定频率信号幅度的测量精度。

至此, 再根据式(4), 可以得到正弦信号的幅度  $U_s$ 。

在实际装置的数据采集和运算中, 选择记录长度为 1 s, 采样点数 1 024 点, 互功率谱估计的平均次数选为 1 024 次, 数据加汉宁窗平滑。为了减少谱估计的均方误差, 对互功率谱进行  $M$  次累加, 使方差减少  $M$  倍。

在程序设计中, 以模块化编程方式依次实现接收信号与同频参考信号的互相关函数、互功率谱及接收信号幅度的计算。

### 3.3 装置抗干扰性能

外加信号法小电流接地选线装置因为是依靠电磁波的发射和接收原理工作, 所以装置抗电磁波干扰的能力强弱直接决定该装置能否可靠工作。本装置除在硬件上采用了数字信号源、数字选频技术提高系统的稳定性和抗干扰性外, 在软件上还采取了抗干扰措施。系统正常工作时各信号检测器定时将检测到的特定频率信号的强度通过 RS485 总线送到主机, 主机记录下该数据, 有接地故障发生时, 各信号检测器将故障时检测到的特定频率信号的强度发送到主机, 主机根据故障前后特定频率信号强度数值差确定故障线路, 差值最大的为接地线路。因此, 本装置不但能抗变电站工频及谐波电流的干扰, 还能抵抗现场与注入信号同频率的干扰信号。

## 4 结束语

小电流接地选线装置自问世至今已有二十多年的历史, 随着选线原理的不断丰富, 电子技术和计算机技术的不断发展。装置的选线准确率不断提高, 外加信号法小电流接地选线装置由于采用了数字技术和数字选频算法, 选线准确率大大提高。经过两年多在数个变电站的运行结果证明, 外加信号法小电流接地选线故障定位装置选线准确, 故障定位准确, 发射、接收频率稳定, 抗干扰能力强, 是小电流接地选线故障定位的理想装置。

### 参考文献

- [1] 齐郑, 杨以涵. 中性点非有效接地系统单相接地选线技术分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(14): 1-5. QI Zheng, YANG Yi-han. Analysis of Technology of Fault Line Selection for Single-phase-to-earth Faults in Neutral Point Noneffectively Grounded System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 1-5.
- [2] 胡会军. 追根溯源小电流接地选线装置准确率堪忧[J]. 电器工业, 2005, 51(2): 36-39. HU Hui-jun. A Thorough Examination of Fault Line Selection Device for Small Current Grounding Systems, the Accuracy of Discrimination Remains Questionable[J].

China Electrical Equipment Industry, 2005, 51 (2): 36-39.

[3] 肖白, 束洪春, 高峰. 小电流接地系统单相接地故障选线方法综述[J]. 继电器, 2001, 29 (4): 16-20.  
XIAO Bai, SHU Hong-chun, GAO Feng. Survey of the Methods of Fault Line Selection for Single-phase-to-earth Fault in Networks with Ungrounded Neutral[J]. Relay, 2001, 29 (4): 16-20.

[4] 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, 35.  
SANG Zai-zhong, ZHANG Hui-fen, PAN Zhen-cun, et al. Protection for Single Phase to Earth Fault Line Selection for Ungrounded Power System by Injecting Signal[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20 (2): 11-12, 35.

[5] 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.

[6] 吴清, 许云峰. 小电流接地选线装置的现场接地选线试验[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (17): 105-107.  
WU Qing, XU Yun-feng. A Field Testing of Fault Line Selection Device for Small Current Grounding Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (17): 105-107.

[7] 许云峰. 小电流接地相关问题探讨[J]. 赛尔电力自动化, 2009, 78 (4): 61-62.  
XU Yun-feng. Discussion on Fault Line Selection for Small Current Grounding Systems[J]. Sale Automation of Electric Power, 2009, 78 (4): 61-62.

[8] 戴逸松. 微弱信号检测方法及仪器[M]. 北京: 国防工业出版社, 1994.  
DAI Yi-song. Method and Apparatus for Detecting Weak Signal[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 1994.

[9] 戴逸松, 石要武. 测量 nV 正弦电压的互功率谱方法[J]. 电工技术学报, 1992, 5 (2): 38-42.  
DAI Yi-song, SHI Yao-wu. An Approach Using Cross Power Spectrum Estimator for Measurement of nV Sinusoidal Signal[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1992, 5 (2): 38-42.

[10] 胡广书. 数字信号处理-理论、算法与实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.  
HU Guang-shu. Digital Signal Processing-Theory, Algorithm and Realization[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.

[11] 李一兵, 岳欣, 杨莘华. 多重自相关函数在微弱正弦信号检测中的应用[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2004, 25 (4): 525-528.  
LI Yi-bing, YUE Xin, YANG Xin-hua. Multiple Autocorrelation Method for Detecting Weak Sinusoidal Signal[J]. Journal of Harbin Engineering University, 2004, 25 (4): 525-528.

[12] 杨新峰, 杨迎春, 苑秉成. 强噪声背景下微弱信号检测方法研究[J]. 舰船电子工程, 2005, 25(6): 123-125.  
YANG Xin-feng, YANG Ying-chun, YUAN Bing-cheng. Study on Weak Signal Detection Method in a Stronger Noise Background[J]. Ship Electronic Engineering, 2005, 25 (6): 123-125.

收稿日期: 2009-04-16; 修回日期: 2009-06-27

作者简介:

陶利国 (1972-), 男, 工程师, 主要研究方向为电力系统自动化;

许云峰 (1962-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为小电流接地选线技术。E-mail: Xuyunfeng5511@163.com

(上接第 85 页 continued from page 85)

[8] 李刚, 王少荣, 程时杰. 广域电网同步状态监测系统实时通信[J]. 电网技术, 2004, 28(18): 39-43.  
LI Gang, WANG Shao-rong, CHENG Shi-jie. Real-time Communication in a Synchronous States Monitoring System for Wide Power Systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(18): 39-43.

[9] 国家电网公司. 电力系统实时动态监测系统技术规范[Z]. 2006.  
State Grid Company. Technology Guidance of Power System Real-time Dynamic Monitoring System[Z]. 2006.

[10] Labrosse J J. 嵌入式实时操作系统 uC/OS-II [M]. 邵贝贝, 译. 北京: 航空航天大学出版社, 2003.  
Labrosse J J. Embedded Real-time Operation System uC/OS-II [M]. SHAO Bei-bei, Translation. Beijing: University of Aeronautics and Astronautics Press, 2003.

收稿日期: 2009-05-14; 修回日期: 2009-06-27

作者简介:

李辉 (1982-), 男, 工程师, 硕士, 研究方向为电力系统自动化和智能电器。E-mail: lihui00312@163.com