

## 基于小扰动原理的单相接地选线装置

邹浩斌<sup>1</sup>, 胡少强<sup>1</sup>, 刘利平<sup>1</sup>, 孙何洪<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广东工业大学自动化学院, 广东 广州 510090)

**摘要:** 在有消弧线圈的配电网中, 快速选线技术是一项关键技术。通过对中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统线路发生单相接地故障的分析, 提出了一种小扰动选线原理。介绍了运用该原理, 以 DSP (数字信号处理器) 芯片作为核心运算控制单元的单相接地选线装置的选线原理、方法以及硬件构成原理。并详细分析了该装置在现场 (中性点经 KD-XH 消弧线圈接地的系统) 运行的情况, 实践证明了该装置的选线正确率达到 96% 以上。该装置适用于电网电容电流变化范围大、小电容电流、高阻接地的配电网系统。

**关键词:** 配电网; 消弧线圈; 中性点接地; 单相接地; 接地故障选线; 零序功率方向

### Single-phase grounding selected-line equipment based on small disturbance theory

ZOU Hao-bin<sup>1</sup>, HU Shao-qiang<sup>1</sup>, LIU Li-ping<sup>1</sup>, SUN He-hong<sup>2</sup>

(1. Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Automation College, Guangdong University of Industry, Guangzhou 510090, China)

**Abstract:** In the distribution network with an arc suppressing coil, quick line selection technology is very important. After the analysis of the single-phase earth fault in the system of neutral point non-connecting-to-earth and the system of neutral point connecting-to-earth via arc suppressing coil, this paper puts forward the small disturbance theory. Based on this theory, the line selection theory, method and hardware construction of selected-line equipment for single-phase grounding fault are also introduced, which adopts digital signal processing (DSP) as a control unit. There is a detailed analysis of the operation of the equipment in the system of neutral point connecting-to-earth via KD-XH arc suppressing coil, and the result proves an accuracy of 96% of line selection with the equipment. The equipment is applicable for the distribution network of small capacitance current, grounding through high resistance and the capacitance current of which varies greatly.

**Key words:** distribution network; arc suppressing coil; neutral grounding; single-phase earth fault; line selection of grounding fault; zero sequence power direction

中图分类号: TM774

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)02-0020-05

## 0 引言

配电网中性点接地方式的选择是关系到电力系统运行可靠性的一项重大决策, 须综合考虑多种因素并通过经济比较才能决定。理想的消弧线圈接地处理方式是, 采用快速动作的消弧线圈作为接地设备, 使得配电系统能在瞬时性单相接地故障时自动恢复正常; 对非瞬时性单相接地故障, 在消弧线圈补偿的同时在很短的时间 (小于 10 s) 内能正确判断接地线路, 将故障线路切除。该运行方式既兼顾并强化了允许带单相接地运行的消弧线圈接地方式自动消除瞬时性接地故障、将接地故障电流降到残流的优点, 又兼顾了小电阻接地方式长期的工频过电压水平低、快速隔离故障线路的优点, 可带

来明显的经济效益和社会效益, 是一种理想的新型中性点接地运行方式, 从而提高配电网的供电可靠性。

在有消弧线圈的配电网中, 快速选线技术一直是一道难题。它必须在以下苛刻的工况下具有足够的检测灵敏度和高度准确性: 当单相接地故障时, 由于消弧线圈的补偿使故障电流减小为很小的残流 (一般不超过 10 A), 而且补偿得越好残流越小; 当高阻接地时, 残流将更小, 而高阻接地又占接地故障的大多数; 在对地电容电流很小的配电网中, 残流将更小, 而这是变电站建设初期常见的情况; 为了保持消弧线圈能够可靠消弧的快速响应这一重要性能, 选线不得延误消弧; 为了将接地故障持续时间限制到最小以便降低系统的长期工频过电

压, 选线必须快速完成(秒级)。

此外, 还要考虑最不利的组合情况, 例如, 在电容电流很小的配电网中的高阻接地情况; 同时要考虑灵活多变的情况, 例如, 已安装了大容量消弧线圈的变电站建设初期电容电流很小的情况, 电容电流变化较大的情况, 接地故障过程中电压和电流的不稳定情况, 等等。所有这些情况下必须完成快速正确选线, 就成为快速选线的关键技术。

## 1 装置的选线原理和方法

在小电流接地系统中, 若其中一条出线发生单相接地故障, 全系统都会出现零序电压, 在这个零序电压的作用下, 系统会出现零序电流。单相接地时接地系统的零序网络图如下。为了使分析过程清晰明了, 假定出线III的 A 相发生接地故障, 过渡电阻为零, 且无电弧重燃现象(如图 1 所示, K 断开为中性点不接地; K 合上为中性点经消弧线圈接地)。

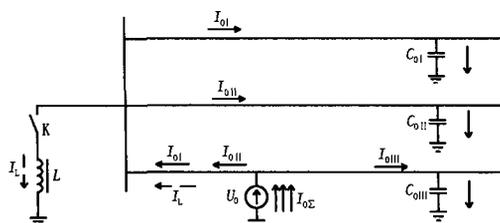


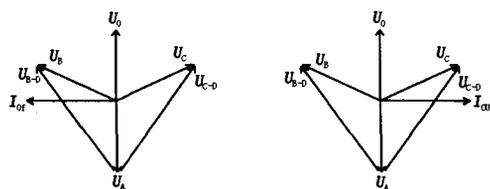
图 1 单相接地时系统的零序网络图

Fig.1 Network of zero-sequence current in single-phase fault system

### 1.1 中性点不接地系统

#### 1.1.1 非故障线路中的零序电流及电压分析

对于非故障线而言, 零序电流就是该线路的零序电容电流(如图 1 所示), 方向为母线流向线路。系统中出线III的 A 相发生接地后, 其向量图如图 2 所示。



(a) 非故障线路相量图 (b) 故障线路相量图

图 2 中性点不接地系统单相接地时的相量图

Fig.2 Vector diagram of single-phase earth fault in neutral point non connecting-to-ground system

#### 1.1.2 故障线路中的零序电流及电压分析

在故障线路中, 零序电流为所有非故障线零序

电流之和, 如图 1 所示。故障线路的零序电流、电压向量如图 2 (b) 所示, 零序电流的方向滞后零序电压  $90^\circ$ , 而与补偿电流的方向相同。

#### 1.1.3 中性点不接地系统的接地判据

##### 1) $I_0$ 大小判据

因为此时故障线路的故障零序电流为全系统的电容电流之和减去本线路电容电流, 而非故障线路的零序电流为本线路之电容电流。故取全部线路中零序电流最大的几条线路作为接地线路选择的对象, 并同时下面判断。

##### 2) $I_0$ 方向判断

故障线路零序电流的相位滞后于零序电压 ( $3U_0$ ) 约  $90^\circ$ ; 非故障线路零序电流的相超前于零序电压约  $90^\circ$ ; 因此故障线路零序电流与所有其它非故障线路零序电流方向相反, 相差约  $180^\circ$ 。选线装置以零序无功功率方向的方式判断:

以  $3U_0$  为基准(实轴), 将被测线路  $I_0$  的无功功率值  $Q$  进行计算: 对接地线路(零序电流滞后于零序电压约  $90^\circ$ ),  $Q > 0$ , 选出该线路; 未接地线路(零序电流领先于零序电压约  $90^\circ$ ),  $Q < 0$ ; 如果所有  $Q < 0$  (零序电流均领先于零序电压约  $90^\circ$ ), 则判为母线接地。

### 1.2 中性点经消弧线圈接地系统

#### 1.2.1 非故障线路中的零序电流及电压分析

对非故障线路而言, 中性点不接地和中性点经消弧线圈接地的情况是一样。

#### 1.2.2 故障线路中的零序电流及补偿情况分析

在图 1 中, 故障点的零序电容电流, 即全系统的对地电容电流为:  $3I_{C0} = 3j\omega U_0(C_{01} + C_{02} + C_{03})$

$$\text{而消弧线圈中的电感电流为: } I_L = \frac{U_0}{j\omega L}$$

其方向与系统对地电容电流相反, 从而使接地电流减弱, 经消弧线圈补偿后的零序接地电流, 即残流为:  $I_D = 3I_{C0} + I_L$

由上述分析可见, 在中性点经消弧线圈接地系统中, 经过零序电流的补偿, 非故障线路的零序电容电流为零, 故障线路中的零序电流的大小与接地点的残流相等, 其方向在补偿前后并不改变, 均为母线流向线路。由于在实际系统中, 大多采用过补偿方式, 过补偿度为  $P = 5\% \sim 10\%$ , 所以接地电流的方向与电感电流一致, 故障的零序电流也与非故障线中的零序电流方向一致, 均为母线流向线路。

### 1.2.3 有消弧线圈（经消弧线圈接地）系统的接地判据

对带有消弧线圈的系统，单相接地故障发生时消弧线圈会将一个电感电流（补偿电流）叠加在故障点流过的电容电流上，使故障点的电容电流被补偿，测得零序电流  $I_0$  一般是感性电流（过补偿），使得此时接地线路的零序电流也超前于零序电压，与线路的零序电流同方向，用上述零序电流方向的判别方法不能识别接地故障线路。

本装置与 KD-XH 型配电网智能化快速消弧系统（采用全新的高短路阻抗变压器式可控消弧线圈和大功率可控硅技术）配合使用时，通过选线装置与随调式 KD-XH 控制器的有效配合，使得消弧系统在接地过程中短时内使消弧线圈补偿度在小范围内变化，造出一个小扰动，选线装置根据小扰动前后零序电流的变化量的大小进行选线。

例如，上面 10 kV 中性点消弧线圈接地系统（该系统有 3 回出线，系统中出线 III 发生单相接地），对该系统过补 10% 时的各回线路零序电流信号如图 3 所示。改变 KD-XH 型配电网智能化快速消弧系统的补偿度，调到全补偿状态后的各回线路零序电流信号如图 4 所示。

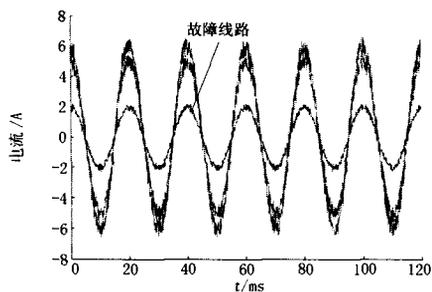


图 3 过度补偿 10% 时的零序电流

Fig.3 Zero-sequence current with over-compensation of 10%

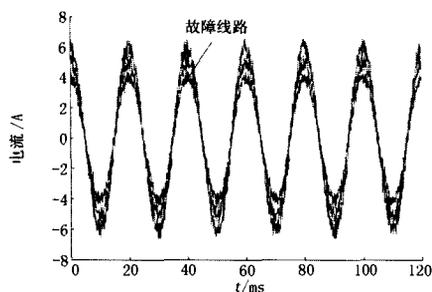


图 4 全补偿零序电流

Fig.4 Zero-sequence current of full compensation

可以看出，非故障线路在改变消弧线圈补偿度前后，线路中的零序电流基本不变；而发生接地的线路在改变消弧线圈补偿度前后，线路中零序电流的变化量最大。因此取全部线路中零序电流的变化量最大的线路作为接地线路，并综合功率方向等判据进行选线，保证选线结果的准确性。

## 2 基于小扰动原理选线装置构成原理

装置 CPU 板原理框图如图 5 所示。CPU 采用德州仪器公司高性能 16 位 DSP，每秒可完成定点运算 200 万次，保证装置快速准确的计算和进行复杂的逻辑判断；40 路模拟信号分两组分别输入 A/D 转换芯片，同时采样和转换，确保装置采集母线电压对各线路零序电流的相位精度，保证选线的准确性。

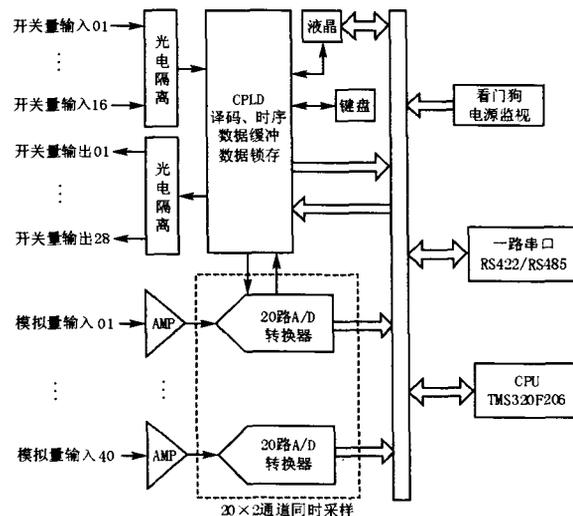


图 5 选线装置 CPU 板原理框图

Fig.5 Principle block diagram of hardware about CPU in selected-line equipment

CPU 板其它配置有：与消弧控制器配合的 8 路遥信量开入，8 路与外界两级光耦隔离 220 V 开入，10 路继电器出口，2 路 6 位 BCD 码用于送选线结果到跳闸箱，跳闸箱根据选线装置传来的跳闸指令执行相应的动作，1 路 6 位 BCD 码将选线结果送消弧控制器，大屏幕液晶显示接口，8 个触摸式按键，看门狗监视等。

## 3 基于小扰动原理选线装置的特点

用 DSP（数字信号处理器）芯片作为核心运算控制单元；装置与 KD-XH 消弧系统相配合，根据消

弧线圈投入补偿前后各线路的电量特征, 采用相对电流比较的方法和功率方向的综合判据; 在消弧线圈退出和无消弧线圈的情况下, 采用零序电流相对值和功率方向判据; 采用多片 14 位多路 A/D 转换芯片, 实现母线电压与出线零序电流同时采样, 单台可接两段母线; 全优化硬件设计, CPU 系统采用总线不出板结构, 与外部的任何电气联系均通过光电隔离, 有效防止外界干扰。装置自动跟踪系统零序电流的变化, 不需调整和设置放大倍数, 可适用于现场一次零序电流 0.5~200 A 的系统; 提供系统接地的报警接点输出、选线结果编码遥信接点输出, 同时提供可选 RS422 或 RS485 的串行通信接口, 可与 RTU 或变电站自动化系统进行通信。

#### 4 装置的现场运行情况分析

采用小扰动原理的选线装置已在东莞市 110 kV 大龙站运行。该站有 3 台主变压器、四段母线, 现阶段有 16 条 10 kV 出线(总长约 100 km), 都由架空线路和电缆混合组成。为检验实际选线的准确性及收集必要的信息, 在该站安装了故障录波器, 用于对所有 10 kV 出线的零序电流进行录波。

2 年来所记录到的 186 次接地中, 绝大多数持续时间小于 1 s 不需选线, 仅有 65 次大于 1 s 需要选线。接地选线时电容电流的幅值与次数的统计见表 1。接地选线时中性点电压的幅值与次数的统计见表 2。

表 1 接地选线时电容电流的幅值与次数的统计

Tab.1 Capacitance current amplitude and number in ground

fault line selection

电容电流/A	2~5	5~10	10~15	15~20	20~25	25~30	30~31
发生次数/次	1	15	14	26	8	0	1

表 2 接地选线时中性点电压的幅值与次数的统计

Tab.2 Amplitude and numbers of voltage of neutral points in

ground fault line selection

$U_n$ /kV	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5
	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
发生次数	2	4	4	8	4	7	7	9	20

由表 1 可见, 电容电流幅值分散性大, 且有相当多次选线是在电容电流很小的条件下进行的。由表 2 可见, 有相当多次选线是在高阻接地的条件下进行的。

其选线结果的正确性可分 3 种情况检验。绝大多数选线结果(51 次)可由录波器数据得到判断。对

于缺乏录波器数据的(14 次), 有 2 次接地选线正确性已由实际情况得到证实; 另 12 次则参照选线正确性的经验, 对比选线记录数据, 可推断其正确性。在全部选线结果中, 没有发生错选的情况, 只有 2 次未能选出接地线路, 其余均选线正确。

上述数据说明, 经过 2 年多的运行实践证明该装置的选线正确率达到 96% 以上, 改进后经过运行实践, 证明其选线正确率已接近 98%, 选错率为 0。

#### 5 结语

该选线装置可靠、准确、响应快, 并且能启动相应的跳闸装置。在小电流接地系统中, 若发生单相接地故障, 快速控制消弧线圈, 最大限度地减少接地电容电流以消除单相瞬时性接地故障; 而发生非瞬时性故障时, 采用小扰动原理, 即在接地故障持续过程中的短时间内使消弧线圈补偿度在小范围内变化, 通过比较各线路零序电量的变化来选出故障线路, 并实现跳闸。该原理不同于“残流增量法”, 它不是比较各线路零序电量的幅值, 而是比较它们的变化量, 因此不需产生较大的残流增量, 只需很小的残流扰动且时间只有几个周波, 保证了电弧不会重燃。

值得关注的是, 在所有应选线的场合, 该装置从未错过, 即使个别情况下因电压波形紊乱未能选出, 也不会错选, 因此不会对系统运行产生任何负面影响。同时, 虽选线时电网的电容电流幅值分散性大, 且多数接地时电容电流小, 中性点电压低, 该装置仍能正确选线, 因此上述选线正确率统计结果也适用电网电容电流变化范围大、小电容电流、高阻接地的场合。

该技术经过广州智光电气有限公司应用、改进, 进一步提高了可靠性, 选线装置已经在全国电力系统和厂矿企业得到广泛运用, 投入运行过千套, 显示了这项技术推广应用的良好前景。

#### 参考文献

- [1] 齐郑, 刘宝柱, 王璐, 等. 广域残流增量选线方法在辐射状谐振接地系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (3): 84-88.
- QI Zheng, LIU Bao-zhu, WANG Lu, et al. Application of Wide Area Remnant Current Increment Method of Line Detection in Radial Neutral-point Resonant Grounded System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (3): 84-88.

- [2] Chaari O, Meunier M, Brouay E F. Wavelet, a New Tool for the Resonant Grounded Power Distribution System Relaying[J]. IEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(3):1301-1308.
- [3] 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 Non-effectively Grounded System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(14): 1-5.
- [4] 张山, 杨玉昆, 潘华东, 等. KD-XH型智能化快速消弧系统应用效果分析[J]. 高电压技术, 2001, 27(4):77-78.  
ZHANG Shan, YANG Yu-kun, PAN Hua-dong, et al. Analysis of Application of KD-XH Intelligent Arc Suppressing Coil[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(4):77-78.
- [5] Xiao J, Pan Z C, Cong W, et al. The Study on Selective Grounding Fault Protection of Networks on Floating Neutral Based on Fuzzy Principle[A]. In: IEEE/CSEE International Conference on Power System Technology Proceeding[C]. Kunming: 2002.
- [6] Thomas B, Frank R, Lynn S. Fault Locating in Ungrounded and High-resistance Grounded[J]. IEEE PCIC, 2000, 25: 245-251.
- [7] Shalin A I, Politov E N. Ground Fault Protection for 6-10 kV Distribution System[J]. Power and Electrophysics, 2002:430-433.

收稿日期: 2006-07-24; 修回日期: 2006-11-07

作者简介:

邹浩斌 (1975-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为配网规划、电力系统自动装置、电力系统分析、运行与控制等; E-mail: zouhaobin@sina.com.cn

胡少强 (1955-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统自动装置、电力系统安全监控与故障检测、电力变压器和高压电器的自动测试、配网规划、电力系统分析、运行与控制等;

刘利平 (1976-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为继电保护、电力系统分析、运行与控制等。

(上接第 5 页 continued from page 5)

- [3] 高如新, 王福忠, 余琼芳. 小波信号奇异性分析在配电网线路故障检测中的应用[J]. 电力科学与工程, 2003, (4):5-8.  
GAO Ru-xin, WANG Fu-zhong, YU Qiong-fang. Application of Wavelet Transform Singularity Analysis to Fault Detecting on Power Distribution Lines[J]. Electric Power Science and Engineering, 2003, (4):5-8.
- [4] 张全明, 刘会金, 周新启. 电能质量信号的小波软阈值去噪方法[J]. 高电压技术, 2006, 32(1):99-101.  
ZHANG Quan-ming, LIU Hui-jin, ZHOU Xin-qi. Wavelet Soft-threshold Denoising Method of Power Quality Signal[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(1):99-101.
- [5] 周静, 陈允平, 周策. 小波系数软硬阈值折中方法在故障定位消噪中的应用[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(1):65-68.  
ZHOU Jing, CHEN Yun-ping, ZHOU Ce. The Application of De-noise Based on Compromise Algorithm Between Soft-thresholding and Hard-thresholding of Wavelet Coefficient for Fault Location[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(1):65-68.
- [6] 王慧, 范正林, 桑在中. “S注入法”与选线定位[J]. 电力自动化设备, 1999, 13(3):18-20.  
WANG Hui, FAN Zheng-lin, SANG Zai-zhong. The “Signal Injection Method” and Its Application in Single Phase-to-Earth Fault Line Identification and Fault Point Location[J]. Electric Power Automation Equipment, 1999, 13(3):18-20.
- [7] 蔡玉梅, 何正友, 王志兵, 等. 行波法在 10kV 铁路自闭/贯通线故障测距中的应用[J]. 电网技术, 2005, 29(1):15-19.  
CAI Yu-mei, HE Zheng-you, WANG Zhi-bing, et al. Application of Traveling Wave Based Fault Location in 10kV Railway Automatic Blocking and Continuous Power Transmission Lines [J]. Power System Technology, 2005, 29(1):15-19.
- [8] 和敬涵, 季英业. 小电流接地系统单相接地故障测距方法的研究[J]. 华北电力技术, 2004, (1):1-3.  
HE Jing-han, JI Ying-ye. Research of Fault Distance Measure Algorithm for Non-direct-ground Neutral System[J]. North China Electric Power, 2004, (1):1-3.

收稿日期: 2006-08-20; 修回日期: 2006-11-30

作者简介:

蔡秀变 (1983-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制, 配电网行波测距; E-mail: caixiuwen102206@126.com

杨以涵 (1927-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制, 数字电力系统等;

田洪迅 (1970-), 男, 工程师, 研究方向为变电设备运行、检修。