

# 快速自动消弧线圈接地系统选线方案研究

许庆强<sup>1</sup>, 伍雪峰<sup>1</sup>, 丁士长<sup>1</sup>, 毕潇昶<sup>2</sup>

(1. 江苏省电力试验研究院有限公司, 江苏 南京 210036; 2. 西北电力培训中心电力系, 陕西 西安 710054)

**摘要:** 针对目前消弧线圈智能化程度和动作速度的提高对选线难度的增加, 以及现有小电流接地选线本身存在的问题, 提出了一种利用暂态零序电流识别故障线路的选线原理, 用作经快速自动跟踪消弧线圈接地的选线方案。该选线方案首先选出零序电流突变量最大的三条线路, 然后在零序电流突变量积分取得极大或极小值时比较极性, 从而选出故障线路。由于只用到暂态零序电流量, 该选线判据不受 PT 异常情况的影响, 可以适用于任意方式的不直接接地系统。理论分析和现场故障录波数据验证了新选线方案的准确性和有效性。

**关键词:** 电力系统; 选线; 消弧线圈; 暂态电流

**中图分类号:** TM713 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)21-0001-04

## 0 引言

我国绝大部分配电网采用中性点非直接接地方式, 其最大的优点是发生单相接地故障时, 并不破坏系统电压的对称性, 且故障电流较小, 不影响对用户的连续供电, 系统可继续运行 1~2 h。由于非故障相电压升高, 可能引起系统绝缘的薄弱环节被击穿, 发展为相间故障, 影响用户的正常用电。因此, 发生单相接地后必须及时找到并切除故障线路<sup>[1,2]</sup>。

配电网中, 单相接地占电力系统整体故障的 80% 以上, 为此国内许多学者们进行了大量的研究, 提出了多种接地故障选线方法: 基波零序电流判别法、基波零序功率方向判别法、首半波法、导纳法、谐波法、能量法、谱功率法、注入信号法、改变网络参数法、并联中值电阻法等等<sup>[3~11]</sup>。基于这些方法构成的选线装置在现场得到较大程度的应用, 使得选线装置的动作准确率在近年得到很大的提高, 但现场小电流装置的不正确动作情况还是时常发生, 特别是在经自动跟踪消弧线圈接地系统中。

## 1 自动跟踪消弧线圈接地系统

随着变配电网中电缆线路的增加, 系统的电容电流急剧增加, 许多地区已超过国家规定的标准, 使得系统中性点必须采用经消弧线圈接地方式, 消弧线圈的作用是尽量减小故障接地电流, 减缓电弧熄灭瞬间故障点恢复电压的上升速度。配电网事故中 90% 属于瞬时性故障, 消弧线圈接地方式能自动熄弧, 提高供电可靠性。

以前我国电网中普遍采用手动调匝消弧线圈, 其缺点是在需要调分接头时必须让消弧线圈退出运

行, 即不能在线调节消弧线圈, 影响到自动消除瞬时性故障的效果。为了能快速恢复瞬时性单相接地故障, 国内逐步研究出自动跟踪消弧线圈, 且消弧线圈的智能化和动作速度得到不断提高。

快速自动跟踪消弧线圈接地系统主要适用的选线原理为有功分量判别法<sup>[8]</sup>、谱功率法<sup>[9]</sup>、并联中值电阻法<sup>[10]</sup>和 1/6 原理法<sup>[11]</sup>等。其中, 有功分量判别法必须与带阻尼电阻的自动跟踪消弧线圈装置配套使用, 适用范围比较窄; 谱功率法的原理分析比较透彻, 但是在现场的运行经验不够, 产品的可靠性有待提高; 并联中值电阻法的选线准确性比较高, 在现场取得很好的使用效果, 其缺点是在选线过程中需要对一次系统进行操作, 增加了一次系统的风险, 其中值电阻的选择比较讲究, 投资的费用比较大。文献 [11] 中提到的选线原理, 对动作速度更快的消弧线圈接地系统, 其选线动作准确性大打折扣。

本文提出了一种基于故障后短时间内积分算法的小电流接地选线技术, 适用于配电网中经智能化快速消弧线圈接地系统。用现场故障录波数据对该选线技术进行验证, 结果表明, 该选线技术能比较可靠、有效地选出故障线路。

## 2 故障特征及选线动作判据

### 2.1 故障特征

根据文献 [11]~[14] 的分析, 小电流系统经消弧线圈接地时, 接地电流由基波电流和暂态电流组成, 且暂态电流远大于稳态电流。流过故障线路的暂态零序电流  $i_b$  由暂态电容电流  $i_c$  和暂态电感电流  $i_l$  两部分叠加而成。

$$i_b = i_c + i_l \quad (1)$$

由于消弧线圈的电感较大,其中电流不能发生突变。在故障发生后的很短一段时间内,暂态电容电流  $i_c$  远远大于暂态电感电流  $i_L$ ,在故障后短时间内通过暂态零序电流来判断故障时,消弧线圈的影响可以忽略不计。

通过对中性点经消弧线圈接地系统单相接地故障暂态电流的分析<sup>[12]</sup>,接地导线中暂态零序电流峰值比正常线路中暂态零序电流值大许多,而不宜采用暂态零序电流的方向作为选线判据。前一个结论是很明显的,在文献中分析得比较透彻;而后一个结论则是比较片面的,在故障后的长时间内,故障线路和非故障线路中暂态零序电流的方向是不确定的,由于消弧线圈中电流不能突变,必须要经过一个暂态过程,在这个暂态过程里,相当于消弧线圈不起作用,完全可以利用暂态零序电流的方向来构成判据,这个暂态过程的时间为故障后的首半波。

需要说明的是,这里的“首半波”不是传统意义上的首半个工频周波,而是指从发生故障到零序电流采样值由正变负(或由负变正)的这一段。随着消弧线圈快速动作的提高,“首半波”的时间也变得越来越短。不管“首半波”的时间的长短,在该时间段内,故障线路首端的零序电流数值上约等于系统非故障线路全部电容电流的总和,其方向为线路指向母线,与非故障线路中零序电流的方向相反。

文献[12]中指出不宜采用暂态零序电流的方向作为选线判据。作者认为,较长时间内的零序暂态电流确实不能通过极性比较得到选线判据,但是在故障后的“首半波”内的暂态零序电流的极性关系是确定的。

## 2.2 选线动作判据

为了充分利用故障后首半波内暂态零序电流的故障信息,提高选线的准确性和可靠性,采用群体比幅比相的多重判据。

选线判据中的启动元件为:

$$U_0(k) > U_{dz1} \quad (2)$$

$$U_0(k) - U_0(k-N) > U_{dz2} \quad (3)$$

其中:  $U_{dz1} = 10 \text{ V}$ ,  $U_{dz2} = 3 \text{ V}$ 。

当同时满足式(2)和(3)时,启动选线方案。选线流程图参见下面图1。

该选线方案的判据如下:

(1) 分别计算各条线路的零序电流积分值  $S_k =$

$\sum_{j=1}^n \int i_{k,j} - i_{k,(j-N/2)} dt \cdot T_s$ , 其中  $i_{k,j}$  为第  $k$  条线路零序电流的第  $j$  个采样点,  $j=1$  表示故障后的第一个采

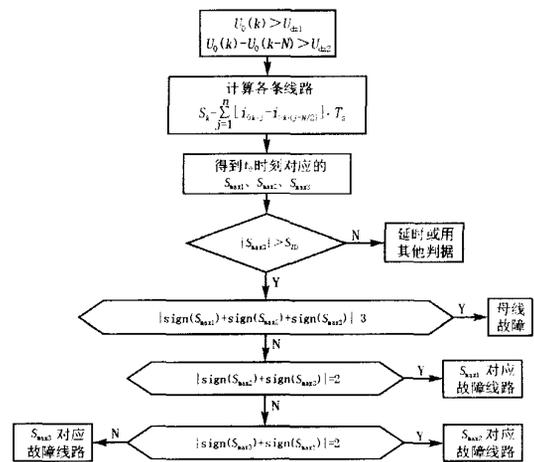


图1 选线流程图

Fig 1 Flow chart of fault-line selection

样值,也可以是故障前的采样值,  $T_s$  为采样周期,根据故障后前面若干个故障数据,确定出绝对值最大的前三条线路,分别设为  $S_{m1}$ 、 $S_{m2}$  和  $S_{m3}$ 。

(2) 观察  $S_{m1}$  随着时间的变化情况,在故障后短时间内(可以取为  $3 \text{ ms}$ )  $S_{m1}$  取得极大或极小值的时刻定义为  $t_0$ , 对应采样点为  $j = n_0$ , 计算得到  $S_{max1}$ 、 $S_{max2}$  和  $S_{max3}$ 。

(3) 若  $S_{max1}$ 、 $S_{max2}$  和  $S_{max3}$  中某一个的正负号与其余两个不同,对应该条线路判为故障线路;若  $S_{max1}$ 、 $S_{max2}$  和  $S_{max3}$  的符号相同,则判为母线故障。

在图1的流程图中,  $t_0$  是从故障发生时刻开始计时的,  $t_0$  的数值近似等于该次故障中零序电流达到“首半波”的时间。只有当  $S_{max1}$ 、 $S_{max2}$  和  $S_{max3}$  的数值均大于某一定值门槛时,才认为数据是可信的,能可靠用于判断相互之间的极性。在本论文中该定值门槛取为  $S_{zd} = 10 \text{ A} \cdot \text{ms}$ 。

经过快速自动消弧线圈接地系统,在发生瞬时性故障时能自动熄弧而消除故障。为了防止瞬时性故障引起装置的误动作,在选线出结果后装置延时动作,在该延时期内,一旦检测到零序电压恢复正常则短时闭锁选线装置。

## 3 现场录波数据验证

为验证该选线判据的准确性,采用文献[3]中的仿真系统模型和参数,增加三条长度分别为  $20 \text{ km}$ 、 $30 \text{ km}$  和  $45 \text{ km}$  的出线,利用电磁暂态仿真软件 ATP 对不同故障条件下的小电流接地故障进行了比较详尽的仿真,由 KD-XH 型智能化消弧线圈的特性来模拟快速自动消弧线圈的响应特性。对仿真结果

统计表明,对不接地系统和经固定消弧线圈接地系统,该选线判据的动作准确率达到 95%,对于经自动消弧线圈接地系统,动作准确率为 85%以上,仿真中不能准确选线的主要原因是经较大的过渡电阻接地时,不满足条件  $|S_{\max 3}| > S_{ZD}$ 。

由于篇幅所限,下面只详细给出用现场 2 个变电站(设为变电站甲和变电站乙)的故障录波数据进行验证的仿真结果(见图 2、图 3、图 4 及表 1)。这两个变电站均采用中性点经自动调谐消弧线圈接地方式,母线出线总数在 10 条以上,且大多数为电缆架空线混和线路。变电站甲共记录 4 组永久性接地故障数据,包括 3 组线路故障和 1 组母线故障,录波数据的采样频率为 31.5 kHz;变电站乙共记录 3 组线路永久性故障数据,录波数据的采样频率为 15.75 kHz。

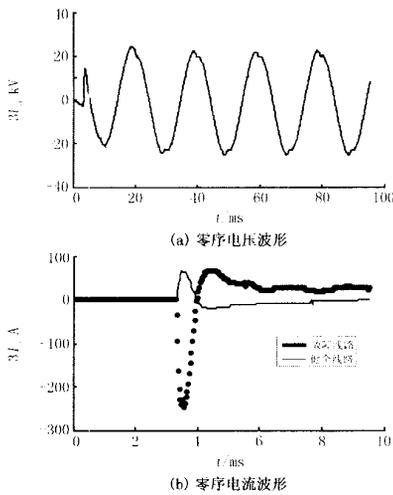


图 2 变电站甲发生线路故障的录波波形  
Fig 2 Fault recording of the first station when fault occurs in the line

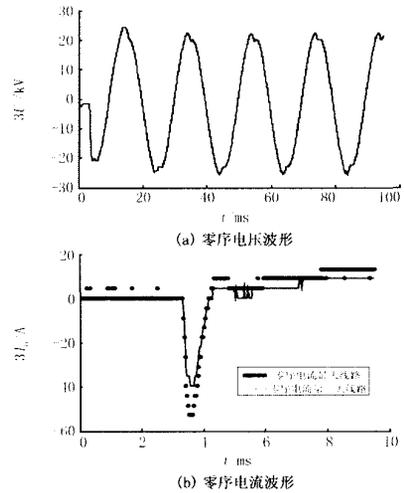


图 3 变电站甲发生母线故障的录波波形  
Fig 3 Fault recording of the first station when fault occurs in the bus

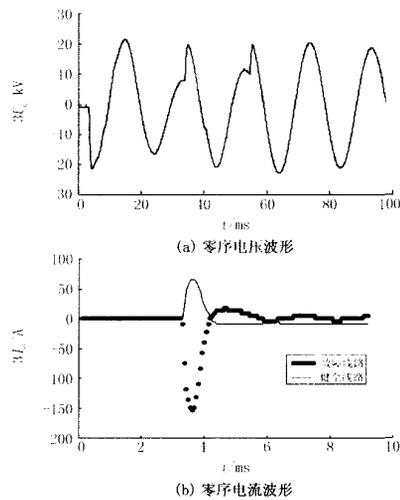


图 4 变电站乙发生线路故障的录波波形  
Fig 4 Fault recording of the second station when fault occurs in the line

表 1 选线判据的仿真结果

Tab 1 Result of the fault-line selection criterion

变电站甲					变电站乙						
顺序	$t_0 / \text{ms}$	$S_{\max 1}$	$S_{\max 2}$	$S_{\max 3}$	判据结果	顺序	$t_0 / \text{ms}$	$S_{\max 1}$	$S_{\max 2}$	$S_{\max 3}$	判据结果
		$/\text{A} \cdot \text{ms}$	$/\text{A} \cdot \text{ms}$	$/\text{A} \cdot \text{ms}$				$/\text{A} \cdot \text{ms}$	$/\text{A} \cdot \text{ms}$	$/\text{A} \cdot \text{ms}$	
线路故障 1	0.67	-102.8	26.7	26.0	正确	线路故障 1	0.82	-79.1	35.8	34.1	正确
线路故障 2	0.86	211.6	-46.2	-41.8	正确	线路故障 2	1.016	147.2	-61.4	-31.3	正确
线路故障 3	0.89	-213.8	47.7	44.6	正确	线路故障 3	1.33	74.0	-27.9	-17.8	正确
母线故障	0.86	-29.8	-24.9	-20.6	正确						

从表 1 的仿真结果看出,这两个变电站的消弧线圈的动作速度比较快,零序电流首半波时间为 1 ms 左右。如果是变电站出线发生故障,在绝对值最

大的前三者  $S_{\max 1}$ 、 $S_{\max 2}$  和  $S_{\max 3}$  中,  $S_{\max 1}$  的数值是最大的,且其极性与  $S_{\max 2}$ 、 $S_{\max 3}$  相反,即  $S_{\max 1}$  对应为故障线路;如果是母线故障,则  $S_{\max 1}$ 、 $S_{\max 2}$  和  $S_{\max 3}$  的极性

相同。表 1 仿真结果表明,文中的选线判据能准确得到选线结果。

在 110 kV 配网中,单相接地故障的同时偶尔会发生 PT 熔丝的慢熔现象,使得二次电压在峰值附近出现持续的毛刺波。在这种情况下,如果选线判据中用到零序电压,会影响到选线判据的准确性。文中的选线判据中只用到零序电流,因此不受 PT 异常情况的影响。当然,文中方法需要较高的数据采样频率(至少为 10 kHz),才能保证采样电流信号不失真,现在的 A/D 完全能达到这样的采样速度。

#### 4 结论

本文提出了一种适用于配电网经智能化快速自动消弧线圈接地系统的小电流接地选线技术,其选线原理简单,动作判据在 PT 异常情况下不会发生误判断。现场故障录波数据验证了该选线判据的良好性能。

#### 参考文献:

- [1] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术 [M]. 北京:中国电力出版社, 2005.  
ZHU Sheng-shi The Principle and Technique of High Voltage Network Protection [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [2] 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.  
HE Jia-li, SONG Cong-ju Relay Protection Theory of Power System [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [3] 葛耀中, 龚秉国. 非直接接地系统中检出单相接地线路的新方法 [J]. 继电器, 2001, 29(9): 1-5.  
GE Yao-zhong, DOU Cheng-guo A New Method for Detecting Single Phase-to-ground Fault Line in Non-solidly Grounded Network [J]. Relay, 2001, 29(9): 1-5.
- [4] 何奔腾, 胡为进. 能量法小电流系统选线原理 [J]. 浙江大学学报, 1998, 32(7): 451-457.  
HE Ben-teng, HU Wei-jin A New Principle to Detect the Grounded Line in a Neutral Point Indirectly Grounded Power System Based on the Energy Function [J]. Journal of Zhejiang University, 1998, 32(7): 451-457.
- [5] 肖白, 穆刚, 等. 配电网单相接地故障选线方案 [J]. 继电器, 2005, 33(24): 1-5.  
XIAO Bai, MU Gang, et al Project of Fault Line Detection for Single-phase-to-earth in Distribution System [J]. Relay, 2005, 33(24): 1-5.
- [6] 桑在中, 张慧芬, 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, et al Signal Phase Grounding Fault Protection Fault Protection by Injecting Currents in Ineffective Grounding System [J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(2): 11-12, 35.

- [7] 曾祥君, 尹项根, 等. 基于注入变频信号法的经消弧线圈接地系统控制与保护新方法 [J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(1): 29-32.  
ZENG Xiang-jun, YIN Xiang-gen, et al New Method for Control and Protection Relay in a Compensated Medium Voltage Distribution Network Based on Injecting Various Frequency Current [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1): 29-32.
- [8] 张永健. 电网监控与调度自动化. [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.  
ZHANG Yong-jian Monitoring and Regulation Automation of Power System [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [9] 薛永端, 徐丙垠, 等. 小电流接地故障暂态方向保护原理研究 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 51-56.  
XUE Yong-duan, XU Bing-yin, et al The Principle of Directional Earth Fault Protection Using Zero Sequence Transients in Non-solid Earthed Network [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 51-56.
- [10] 王东. 消弧线圈并联电阻接地在城市配网中的应用 [J]. 江苏电机工程, 2005, 24(3): 31-33.  
WANG Dong Application of Arcing Suppression Coil with Parallel Resistance in Urban Distribution Networks Earthing [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2005, 24(3): 31-33.
- [11] 陈奎, 唐轶. 小电流接地系统电弧接地选线方法的研究 [J]. 继电器, 2005, 33(16): 5-9.  
CHEN Kui, TANG Yi Analysis of Detecting Fault Line of Arcing Grounded Fault in Isolated Neutral System [J]. Relay, 2005, 33(16): 5-9.
- [12] 王德江, 陈永衡, 马文阁. 中性点经消弧线圈接地系统单相接地故障暂态电流分析 [J]. 继电器, 2002, 30(15): 16-18.  
WANG De-jiang, CHEN Yong-heng, MA Wen-ge Analysis of Transient Current when Single-phase Grounding in Electric Power System Whose Neutral Point Connects to the Ground via Arc-suppression Coil [J]. Relay, 2002, 30(15): 16-18.
- [13] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.

(下转第 8 页 continued on page 8)

算法[J]. 继电器, 2002, 30(12): 24-26

X DNG Xiao-fu, L N Jin-hong A Cable Fault Location Method Based on Power Balance Theory [J]. Relay, 2002, 30(12) 24-26

- [5] 文明浩, 陈德树, 尹项根. 远距离输电线路的能量平衡保护[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(2): 75-80  
WEN Ming-hao, CHEN De-shu, YN Xiang-gen Long Transmission Line Protection Based on the Principle of Balance of Energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21

(2): 75-80

收稿日期: 2006-06-13; 修回日期: 2006-09-12

作者简介:

乔占俊(1973-), 男, 硕士, 讲师, 从事高电压技术、继电保护等电气工程理论与实践教学与研究工作。E-mail: zhanjunqiao@126.com

### Studies on protection of extra high voltage transmission line based on discrete long line equation and power balance

Q IAO Zhan-jun<sup>1</sup>, L I Yong<sup>1</sup>, L I Xiang-zhong<sup>2</sup>

(1. Dept of Electromechanical Engineering, North China Institute of Science and Technology, Beijing 101601, China;

2. Jilin Petroleum Group Corporation, Thermal Power Plant, Jilin 138000, China)

**Abstract:** Because the voltage grade is higher and the transmission distance is longer in extra high voltage transmission line, the transient course after faults is complicated. When shunt reactors are adopted, the transient course is worsened. In order to keep the stability of whole electric power system, it should clear faults as soon as quickly, so a novel protection principle which can meet the new demands is needed. The paper proposes a discrete long line equation, and based on discrete equations, a novel protection principle based on power balance which uses voltage and current data on two ends of lines is proposed. The protection principle for extra high voltage transmission line can make fast protection for the transmission lines with shunt reactors and improve the transient course stability of the whole electric power system.

**Key words:** discrete long line equation; extra high voltage transmission line; transient course; power balance; transmission line protection

(上接第 4 页 continued from page 4)

YAO Huan-nian, CAO Mei-yue The Resonant Earth in Power System [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2000.

- [14] 戴剑锋, 张艳霞. 基于多频带分析的自适应配电网故障选线研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(5): 44-47.

DAI Jian-feng, ZHANG Yan-xia Study on Adaptively Choosing Fault Line Under Single-phase to Ground Fault Based on Analysis of Multi-frequency Bands [J]. Pro-

ceedings of the CSEE, 2003, 23(5): 44-47.

收稿日期: 2006-03-31; 修回日期: 2006-05-29

作者简介:

许庆强(1976-), 男, 博士, 主要从事电力系统仿真和继电保护的研究工作; E-mail: xuqq2008@126.com

伍雪峰(1975-), 男, 工程师, 主要从事电力系统方面的研究和管理的工作;

丁士长(1980-), 男, 硕士, 从事电力系统通信和继电保护方面的研究工作。

### Research on line-selection used for the grounding system with fast arc-suppression coil

XU Qing-qiang<sup>1</sup>, WU Xue-feng<sup>1</sup>, DNG Shi-chang<sup>1</sup>, B I Xiao-yi<sup>2</sup>

(1. Jiangsu Electric Power Research Institute Co. Ltd., Nanjing 210036, China;

2. Northwest Electrical Staff Training Center, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** With the operating time of the intelligent arc-suppression coil increased, it is more difficult to select the fault line in the neutral indirectly grounded distribution systems. In order to overcome the disadvantage of the existing technique of fault line selection, a new theory of selecting the fault line is proposed by using the transient zero sequence currents, which has been applying to the grounding system with fast arc-suppression coil. Firstly, the first three maximal abrupt values of zero sequence currents can be selected. When the accumulative total of zero sequence currents abrupt values get the maximum or particle, the fault line can be selected according to the polarity of the three values. For that the transient zero sequence currents are used only, the criterion is immune to the abnormality of the PT, and it can be applied to all kinds of the neutral indirectly grounded systems. The theoretical analysis and the results tested by the fault recording data in a practical environment show that the proposed method can choose out the fault line in distribution networks exactly and effectively.

**Key words:** power systems; line selection; arc-suppression coil; transient current