

# 基于零序电流比值变化的小电流接地选线方法

徐梅<sup>1</sup>, 杨文荣<sup>1</sup>, 吴淑梅<sup>2</sup>, 王柱<sup>1</sup>

(1. 河北工业大学电磁场与电器可靠性省部共建国家重点实验室培育基地, 天津 300130;

2. 河北科技大学电气信息学院, 河北 石家庄 050018)

**摘要:** 在小电流接地电网发生单相接地故障时, 由于消弧线圈的补偿, 接地残流过小, 难以准确选线。分析现有小电流选线原理和方法, 总结提出零序电流比值选线法。它根据消弧线圈容量变化前后, 零序电流比值变化趋势不同, 确定接地故障线路。对该方法进行理论分析, 推导出零序电流比值关系式。并利用 Matlab 工具进行仿真分析, 结果符合理论推导。此方法不需要延缓切除阻尼电阻, 有足够快的响应速度, 算法简单, 实现容易, 对配电网当前状态和长远发展有良好适应性。

**关键词:** 小电流接地; 零序电流比值; 单相接地故障; 选线; 消弧线圈

## A method of single-phase grounded feeder detection in indirectly earthed power system based on judging the change of zero-sequence current ratios

XU Mei<sup>1</sup>, YANG Wen-rong<sup>1</sup>, WU Shu-mei<sup>2</sup>, WANG Zhu<sup>1</sup>

(1. Province-Ministry Joint Key Laboratory of Electromagnetic Field and Electrical Apparatus Reliability,

Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China; 2. Hebei University of Science & Technology, Shijiazhuang 050018, China)

**Abstract:** When single-phase-to-ground fault occurs in the indirectly power system, with the compensation current of the arc-suppressing coil, it is difficult to select the fault line. After analyzing the line selection methods at present, the zero-sequence current ratio method is presented. It is based on judging the change of zero-sequence current ratios after the compensation. According to the deduction, the formula is presented. Simulation with Matlab shows that this calculation method has high accuracy. The delay of cutting damping resistance is not needed, and it can select the fault line quickly and accurately.

**Key words:** indirectly power system; zero sequence current ratio; single-phase-to-ground fault; line selection; arc-suppressing coil

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)14-0068-04

## 0 引言

国内中低压配电网多采用小电流接地方式, 主要有三种方式: 中性点不接地; 中性点经高电阻接地和中性点经消弧线圈接地(即谐振接地)。前两种接地方式中, 故障线路的零序电流是非故障线路的零序电流之和, 但方向相反, 已有多种基于单相接地故障稳态量分析的小电流接地选线方法<sup>[1,2]</sup>。

运行经验表明, 配电网的接地故障大多数为瞬时性故障。对于单相接地瞬时故障, 谐振接地方式通过补偿使接地电弧瞬间熄灭, 系统可以恢复正常运行; 对于永久性故障, 由于消弧线圈的补偿, 接地残流过小, 难以判断故障线路。

目前, 谐振接地选线方法主要有, 零序五次谐波法, 零序有功电流方向法<sup>[3]</sup>, 注入信号法<sup>[4]</sup>, 基于小波变换的选线方法<sup>[5]</sup>等。

零序五次谐波法受实际运行情况, 设备性能等因素影响, 谐波含量往往不确定, 存在可靠性问题。有功电流方向法只适用于消弧线圈并(串)联电阻接地方式, 在预调式消弧线圈中, 一般装有阻尼电阻, 接地故障发生很短时间就要切除。阻尼电阻切除后, 该选线方法就失效。注入信号法由于各种谐波干扰, 接地电阻影响, 往往无法自适应。小波变换的选线方法由于暂态分量小, 时间短, 很难准确判断。

在对谐振接地电网单相接地故障的特征和现有选线方法的总结中, 提出了基于消弧线圈补偿前后各馈线零序电流比值发生变化的选线方法, 能更好适应多种运行方式。

## 1 零序电流比值选线法原理

谐振接地电网发生单相接地故障(假设故障发

生在第*k*条线路)时可以用图1零序网络表示。

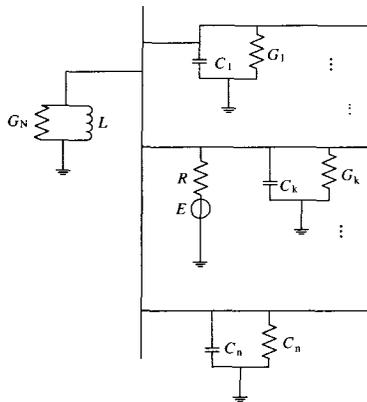


图1 谐振接地电网零序测量电流的分布

Fig.1 Zero-sequence network

图1中  $C_i$  和  $G_i$  分别为第*i*条线路的三相对地电容及三相对地有功损耗等值电导之和, 其中各相对地电容和电导分别相等, 即  $C_{ia} = C_{ib} = C_{ic} = \frac{1}{3}C_i$ ;

$$G_{ia} = G_{ib} = G_{ic} = \frac{1}{3}G_i。$$

$L$ 为消弧线圈的补偿电感。 $G_N$ 分两种情况: 对随调式消弧线圈,  $G_N$ 为消弧线圈的有功损耗等值电导  $G_{N1}$ , 因为它没有阻尼电阻器; 而预调式消弧线圈  $G_N$ 为消弧线圈的有功损耗等值电导  $G_{N1}$ 与并阻尼电阻器  $G_{N2}$ 的和。

零序电压为  $U_0$ , 则非故障线路的零序电流的有功分量为(假设第*k*条线路故障)

$$I_{0i} = U_0(G_i + j\omega C_i) \quad i=1,2,\dots,n; i \neq k \quad (1)$$

故障支路*k*的零序电流为:

$$I_{0k} = -U_0[G_N - j\omega L + \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n (G_i + j\omega C_i)] \quad (2)$$

故障线路与非故障线路两者的零序电流比值为:

$$\frac{I_{0k}}{I_{0i}} = \frac{\sqrt{(\sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n G_i + G_N)^2 + (\omega \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq k}}^n C_i - \frac{1}{\omega L})^2}}{\sqrt{G_i^2 + (\omega C_i)^2}} \quad (3)$$

由式(3)知, 故障线路与非故障线路两者的零序电流比值  $\frac{I_{0k}}{I_{0i}}$  会随着消弧线圈容量的变化而改变。

当故障线路零序电流在分子时, 则比值  $\frac{I_{0k}}{I_{0i}}$  与消弧

线圈容量变化的趋势相反; 若故障线路零序电流在分母, 则比值变化情况正好相反。由此可根据比值的变化情况确定故障线路是位于分子还是分母。

第*j*条非故障线路与第*i*条非故障线路的零序电流比值为:

$$\frac{I_{0j}}{I_{0i}} = \frac{\sqrt{G_j^2 + (\omega C_j)^2}}{\sqrt{G_i^2 + (\omega C_i)^2}} \quad (4)$$

由式(4)知, 任意两条非故障线路零序电流比值与消弧线圈电抗值无关, 在消弧线圈容量变化过程中维持不变。

如果母线出现故障, 任意两条线路零序电流比值  $\frac{I_{0j}}{I_{0i}}$  不变。由此可确定母线故障。

由以上分析知, 随消弧线圈容量的调节变化趋势的不同, 可以区别故障线路和非故障线路, 由此提出“零序电流比值选线法”。

将选线方法编成流程图, 如图2所示。零序电压  $U_0$  作为启动信号, 检测  $U_0$  是否大于定值  $U_T$ , 一般取  $U_T$  为相电压的50%。如果  $U_0 > U_T$ , 即认为系统发生故障, 则进行零序电流比值判断, 根据比值变化特点进行选线。

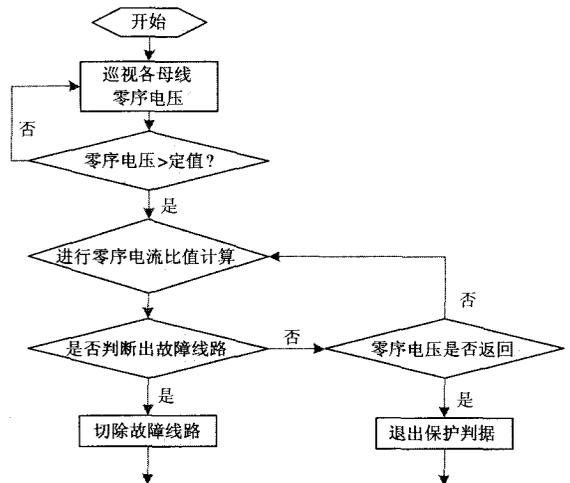


图2 选线方法流程图

Fig. 2 Flow chart for the line selection system

## 2 仿真分析

利用Matlab中的Simulink工具建立一个简单的三回路中性点不接地系统的仿真模型, 对该模型用

以上方法进行仿真分析。仿真模型中消弧线圈的建立是根据文献[6,7]中可控饱和电抗器的理论, 搭建磁阀式消弧线圈。

仿真情况如下:

第1条回路至第3条回路零序电容均为0.80 μF。为便于分析曲线, 第3条回路A相在0.001 s发生单相接地故障, 0.35 s时故障结束。图3为谐振接地电网线路单相故障仿真模型。

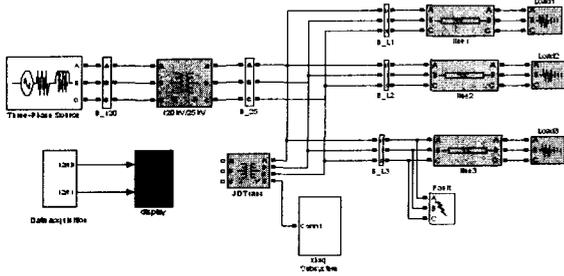


图3 谐振接地电网模型

Fig. 3 A model system for the simulation

为方便区分,  $K_1$ 定义为线路1与线路2零序电流比值  $\frac{I_{01}}{I_{02}}$ ;  $K_2$ 定义为线路2与线路3零序电流比值  $\frac{I_{02}}{I_{03}}$ 。图4为弧道电阻 $R=0 \Omega$ , 即发生金属性接地时,  $K_1$ 和 $K_2$ 波形; 图5为弧道电阻 $R=300 \Omega$ ,  $K_1$ 和 $K_2$ 波形。

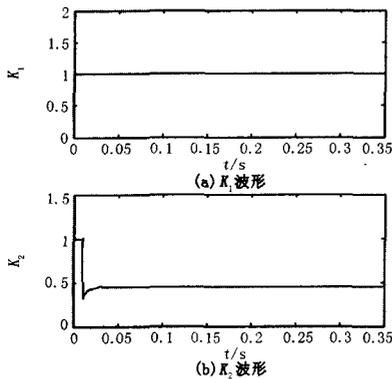


图4 线路故障 $R=0 \Omega$ 时, 各比值波形

Fig. 4 Waveform of  $K_1$  and  $K_2$ , when fault is in line and  $R=0 \Omega$

改变各回路零序电容, 仿真结果类似上述情况, 在此不再重复。

不论弧道电阻为 $0 \Omega$ 或 $300 \Omega$ , 非故障回路零序电流之间的比值在发生单相接地故障后总是保持不变, 而由于消弧线圈容量的调节变化导致故障线路零序电流与非故障线路零序电流比值有明显的变化, 由此区分故障线与非故障线。

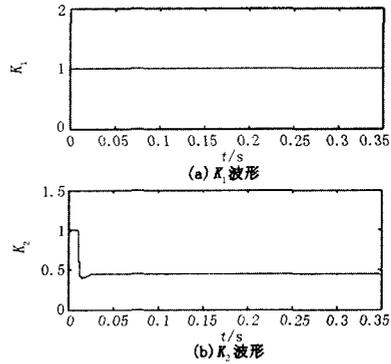


图5 线路故障 $R=300 \Omega$ 时, 各比值波形

Fig. 5 Waveform of  $K_1$  and  $K_2$ , when fault is in line and  $R=300 \Omega$

现在讨论母线故障时各比值变化。为便于观察, 线路参数作了改动。第1条回路和第3条回路零序电容均为 $0.40 \mu F$ , 第2条回路零序电容均为 $0.80 \mu F$ 。当弧道电阻 $R=0 \Omega$ ,  $K_1$ 和 $K_2$ 如图6。弧道电阻 $R=300 \Omega$ 时,  $K_1$ 和 $K_2$ 波形与 $R=0 \Omega$ 时情况类似, 不再重复。

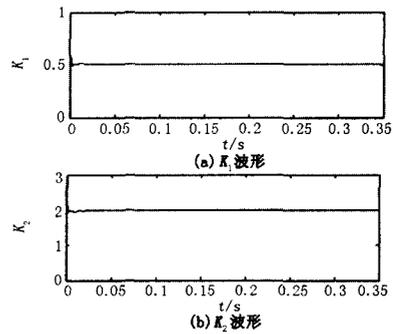


图6 母线故障时,  $R=0 \Omega$ , 各比值波形

Fig. 6 Waveform of  $K_1$  and  $K_2$ , when fault is in bus and  $R=0 \Omega$

各回路零序电流之间的比值在发生单相接地故障后, 无论消弧线圈容量怎样变化, 总是保持不变。这与上面的回路发生故障情况显然不同, 由此可以区分母线故障与线路故障。

分别对 3 条线路和母线发生故障进行仿真试验, 结果如图 7。其中  $\Delta K_1$  为发生故障前后  $K_1$  值之差,  $\Delta K_2$  同理。由  $\Delta K_1$  和  $\Delta K_2$  的变化可以确定故障线路。

在消弧线圈接地的配电网中, 由于接地故障电流大大减小, 为了达到在使用消弧线圈后仍能正确选线的目的, 许多预调消弧系统采用故意延误补偿 (通常延迟 $0.5 \sim 1$  s后再短接阻尼电阻), 使较大的接地故障电流保留一段时间以利选线的做法, 这样

虽满足了选线准确的需要, 但却使消弧系统的响应速度大为降低, 对消弧效果极为不利, 尤其不利于限制间歇性的弧光接地, 忽视了对消弧系统响应速度的重要性。

表1 故障选线数据

Tab.1 Fault line selection data

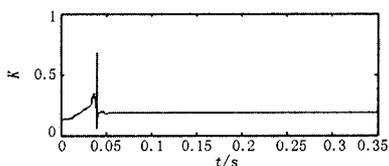
| 故障次数 | $\Delta K_1$ | $\Delta K_2$ | 故障线路 |
|------|--------------|--------------|------|
| 故障1  | 0.45         | 0            | L1   |
| 故障2  | 0.59         | 1.36         | L2   |
| 故障3  | 0            | 0.45         | L3   |
| 故障4  | 0            | 0            | 母线   |

延误补偿的目的在于获得较大的接地故障电流, 增大有功分量。本文判据在于补偿前后各回路零序电流比值变化, 补偿初始就可以切除阻尼电阻。那么判据关系式(3)变为:

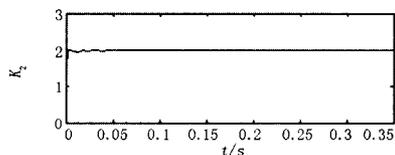
$$\frac{I_{Ok}}{I_{Oi}} = \frac{\sqrt{(\sum_{i=1, i \neq k}^n G_i + G_{N1})^2 + (\omega \sum_{i=1, i \neq k}^n C_i - \frac{1}{\omega L})^2}}{\sqrt{G_i^2 + (\omega C_i)^2}} \quad (5)$$

式(4)不变, 从关系式(4)、(5)不难看出消弧线圈容量的调节变化仍然能够引起  $\frac{I_{Ok}}{I_{Oi}}$  发生变化, 而  $\frac{I_{Oj}}{I_{Oi}}$  不会变化。因此, 此方法不需要延迟切除阻尼电阻, 能尽可能提高消弧系统响应速度。仿真情况与图4和图5类似, 不再重复。

以上分析虽然表明能够正确选线, 但如果两条相邻线路长度相差过大, 那么当长线路发生故障时, 故障前后两条线路比值差  $\Delta K$  变化不大, 无法正确选线。图8为4 km和40 km两线路比值故障前后波型。

图7 相邻线路长度相差过大时,  $K$  波型Fig. 7 Waveform of  $K$ , when one line is short, but the other one is very long

另外, 如果消弧线圈补偿前后, 其容量无显著变化。例如故障时, 如果消弧线圈已经或者接近在最佳补偿状态, 那么容量无需改变多少, 就能补偿接地电流。因此补偿前后两条线路比值差变化不大, 将无法正确选线。图8为线路2故障时, 消弧线圈容量极小变化时, 补偿前后线路2与线路3零序电流比值  $K_2$  波形变化。

图8 容量改变很小时,  $K_2$  波型Fig. 8 Waveform of  $K_2$ , when there are nearly no change of the compensation

综合以上分析, 虽然选线存在某些局限性, 但在实际应用中, 还是有极强的适应性。

### 3 结论

目前, 电网运行对电能质量、人身和设备安全等提出更加严格的要求, 采用谐振接地技术是中低压电网中性点接地方式发展的总趋势。零序电流比值选线方法算法简单, 实现容易, 不需要延迟切除阻尼电阻, 有足够快的响应速度和良好的应用前景。

### 参考文献

- [1] 肖白, 束洪春, 高峰, 等. 小电流接地系统单相故障选线方法综述[J]. 继电器, 2001, 29(4): 16-20.  
XIAO Bai, SHU Hong-chun, GAO Feng, et al. Survey of The Methods of Fault Line Selection for Single-phase-to-earth Fault in Nnetworks with Ungrounded Neutral[J]. Relay, 2001, 29(4): 16-20.
- [2] Hanninen E, Lehton M. Characteristics of Earth Faults in Electrical Distribution Networks with High Impedance Earthing[J]. Electric Power System Research, 1998(44): 155-161.
- [3] 牟龙华. 零序电流有功分量方向接地选线保护原理[J]. 电网技术, 1999, 23(9): 60-62.  
MU Long-hua. Principle of Selective Grounding Fault Protection Based on Active Component Direction of Zero-sequence Current[J]. Power System Technology, 1999, 23(9): 60-62.
- [4] 曾祥君, 尹项根, 于水源, 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, YU Shui-yuan, et al. New Methods for Control and Protection Relay in a Compensated Medium Voltage Distribution Network Based on Injection Various Frequency Current[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(1): 29-32.
- [5] 赵新红, 袁洪, 车伟, 等. 小波变换在小电流接地电弧故障选线中的应用[J]. 高电压技术, 2005, 31(11): 18-20.

(下转第 92 页 continued on page 92)

表 1 线路零序阻抗实测结果

Tab.1 Actual measurement result of zero sequence impedance

| 线路名称                         | 零序阻抗  | 零序电阻  | 零序电抗  |
|------------------------------|-------|-------|-------|
| 永官 5337 线(永山 5338 线两端接地)     | 0.554 | 0.082 | 0.547 |
| 永官 5337 线(永山 5338 线一端接地一端开路) | 0.791 | 0.204 | 0.764 |

(3) 500 kV 线路常有较大的感应电压, 应使用倒相法将试验电源倒相, 去除感应电压对测量值的影响。当被测线路存在较大感应干扰电压时, 其零序阻抗测量等效电路图如图 5, 其中, A、B、C 三相线路存在的干扰电压分别为  $\dot{u}_{GA}$ 、 $\dot{u}_{GB}$ 、 $\dot{u}_{GC}$ , 分解为正序、负序和零序干扰电压后, 由于正负序三相互相抵消, 1、2 点之间的干扰电压实际仅由三相零序电压引起, 即  $\dot{u}_0$ ;  $E$  为试验电源电压, 取自现场的 400 V 电源, 并经调压器和多功能试验变压器 T 输出。试验时, 先用高内阻电压表测量 1 点对地电压即线路的感应零序电压  $U_0$ , 后在试验电压  $U_1$  下, 读取电流  $I_{01}$  和功率损耗  $P_{01}$  值, 再倒换隔离变压器输出电压极性, 在同电流条件( $I_{02} = I_{01} = I_0$ ) 下, 读取试验电压  $U_2$  和损耗  $P_{02}$ , 取两次测量后的平均值消除感应电压对测量的影响<sup>[3]</sup>。

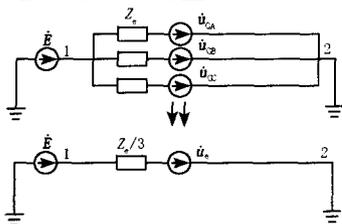


图 5 干扰较大时零序阻抗测量等效电路图

Fig.5 Zero sequence equivalent circuit with interference voltage

### 4 结论

(1) 输电线路零序阻抗参数与线路杆塔结构、运行方式、干扰电压、地质及接地网等因素有关, 架空地线接地使测得的零序阻抗略小, 土壤电阻率越大零序阻抗越大。

(2) 测量方法对测量结果有影响, 同杆架设双回路测量时需将非被测线路一端接地另一端开路, 减少由于互感对测量值的影响, 测得的结果更接近实际值。

(3) 输电线路零序阻抗参数由于影响因素较多, 应以实测为准。

(4) 应使用倒相法去除感应电压对测量值的影响。

### 参考文献

[1] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析[M]. 武汉: 华中理工大学出版社, 1996.  
 [2] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.  
 [3] 郭守贤, 王贻平, 程晋明. 输电线路工频参数抗干扰测量研究[J]. 高电压技术, 1999, 25(2):82-84,91. GUO Shou-xian,WANG Yi-ping,CHENG Jin-ming. Study on Anti-interference Measurement of Power-frequency Parameters of Transmission Line[J]. High Voltage Engineering, 1999, 25(2):82-84,91.

收稿日期: 2008-08-27; 修回日期: 2008-09-22

作者简介:

傅中(1977-), 男, 硕士研究生, 工程师, 从事高电压试验技术研究。E-mail: whufuzhong@163.com

(上接第 71 页 continued from page 71)

ZHAO Xin-hong, YUAN Hong, CHE Wei, et al. Study of Arc-grounding Fault Selection Based on Wavelet Analysis for the Small Current Neutral Grounding System[J]. High Voltage Engineering, 2005,31(11): 18-20.

[6] 田铭兴, 励庆孚. 磁饱和式可控电抗器的等效电路及仿真分析[J]. 电工技术学报, 2003, 18(6):46-67.

TIAN Ming-xing, LI Qing-fu. Calculation and Simulation of a Controllable Reactor of Transformer Type[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(6):46-67.

[7] 何润华, 潘靖, 霍春燕, 等. 基于变电抗的接地选线新方法[J].

电力自动化设备, 2007, 27(12):48-52.

HE Run-hua, PAN Jing, HUO Chun-yan, et al. Fault Line Selection Based on Variable Reactance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(12):48-52.

收稿日期: 2008-09-01; 修回日期: 2008-10-14

作者简介:

徐梅(1981-), 女, 硕士研究生, 从事继电保护研究; E-mail: xumei302@163.com

杨文荣(1969-), 女, 教授, 硕士研究生, 从事电工理论与新技术研究;

吴淑梅(1980-), 女, 硕士研究生, 从事检测技术及自动化装置研究。