

# 基于单相电流行波的故障选线原理研究

施慎行, 董新洲

(清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 为解决小电流系统行波故障选线现场应用问题, 提出了一种基于单相电流行波的故障选线原理: 不管是故障相还是非故障相, 故障线路单相接地故障相电流初始行波远大于非故障线路, 且故障线路行波与非故障线路行波极性相反。该故障选线方法既不需要配备专用的零序电流互感器, 也能克服两相或多相电流行波选线现场接线复杂且易于出错的不足; 既能够满足电缆出线小电流系统的选线需要, 也能满足架空出线系统的选线需要。仿真实验结果表明: 所提方法是正确可行的。

**关键词:** 故障选线; 电流行波

## Study of fault line selection using single-phase current traveling waves

SHI Shen-xing, DONG Xin-zhou

(The State Key Laboratory on Electric Power System, Department of Electrical Engineering,  
Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The paper presents a novel fault line selection using single-phase current traveling wave after analyzing each phase current traveling wave of fault line and sound lines generated by single-phase-to-ground fault. Whether the phase is faulted phase or sound phase, single-phase-to-ground fault generated current traveling wave in faulted line is much higher than the wave in sound line, and the polarity is reverse. The method works well without special zero-sequence current transducer and is easy to be implemented in the field with simple wiring compared with two-phase or three-phase current traveling wave methods. And the method can not only be applied to cable lines but also overhead lines. Simulation results show that the method is correct and available.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50377019).

**Key words:** fault line selection; current traveling wave

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)14-0013-04

## 0 引言

小电流系统故障选线是个老大难问题<sup>[1]</sup>。小电流系统指接地故障电流较小的系统, 如中性点不接地系统、中性点经消弧线圈接地系统等等。由于小电流系统发生单相接地故障后, 故障电流小, 与系统正常运行时的负荷电流相比, 故障特征不明显, 因此难以正确选出故障线路。

近年来, 故障暂态分析不断深入, 对电力系统故障认识不断完善。其中, 故障行波分析研究表明: 单相接地故障行波特征与系统接地方式无关。这为研究小电流系统故障选线提供了新的思路。文献[2~4]提出了基于零模电流行波和线模电流行波的选线原理。这些原理通过比较变电站内各回馈出线上的模量电流行波的幅值和极性选择故障线路, 原

理清晰。然而, 模量行波的获取增加了现场应用的困难。获取零模电流行波需要现场配备合适的零序电流互感器, 而架空线路无法安装零序电流互感器。线模电流行波获取是通过两相电流互感器, 接线复杂容易出错。

如果能够提出仅利用单相电流行波的故障选线原理, 将有助于克服现有行波选线方法的不足, 促进行波故障选线方法在实际系统中的应用, 解决小电流系统故障选线问题。本文基于行波故障分析, 研究了单相接地行波故障特征, 提出了基于单相电流行波的故障选线原理。

## 1 故障初始行波分析

电力系统发生故障, 电网结构将发生变化。根据叠加原理, 故障后的网络可以分解为故障前的负荷网络和故障分量网络的叠加, 如图1所示。故障分量网络是由故障直接产生的, 包含所有的故障信

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50377019)

息,故障行波也不例外。而在故障分量网络中,故障点将其分解为系统正常运行时就存在的系统侧和故障直接产生的故障支路两部分<sup>[5]</sup>。

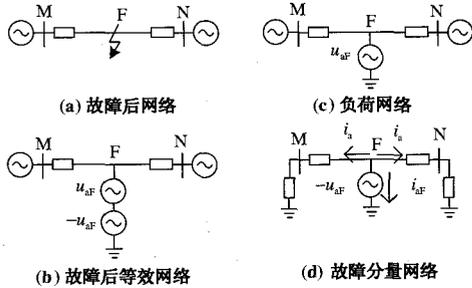


图 1 故障后网络及其分解

Fig.1 Post-fault network and its disassembly

假设故障为 A 相接地故障,则故障支路上的电气量满足式 (1):

$$\begin{cases} u_{af} = -u_{af} \\ i_{bf} = 0 \\ i_{cf} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $u_{af}$  为负荷网络中故障点的 A 相电压;  $u_{af}$  为故障点 A 相初始电压行波;  $i_{bf}$  和  $i_{cf}$  为故障支路上电流行波。

对故障分量网络中的系统侧而言,系统侧的电气量满足式 (2):

$$\begin{cases} u_0 = Z_0 i_0 \\ u_1 = Z_1 i_1 \\ u_2 = Z_1 i_2 \end{cases} \quad (2)$$

其中:  $u_0$ ,  $u_1$  和  $u_2$  分别为故障点的零模和线模电压行波;  $i_0$ ,  $i_1$  和  $i_2$  分别为故障点两侧线路上的零模和线模电流行波;  $Z_0$  和  $Z_1$  分别为线路零模和线模波阻抗。

另外,在故障点,系统侧和故障支路的电流满足基尔霍夫定律,如式 (3):

$$\begin{cases} i_{af} = -2i_a \\ i_{bf} = -2i_b \\ i_{cf} = -2i_c \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $i_{af}$ ,  $i_{bf}$  和  $i_{cf}$  为故障支路的三相电流行波;  $i_a$ ,  $i_b$  和  $i_c$  为系统侧故障点两侧线路上的三相电流行波。

如采用凯伦贝尔变换阵作为相模变换矩阵,则其相模变换矩阵  $S$  和逆变换阵  $S^{-1}$  分别为:

$$S = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix}, \quad S^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

这样,相量方程 (1) 和 (3) 可转化为模量方程 (4) 和 (5):

$$\begin{cases} u_0 + u_1 + u_2 = -u_{af} \\ i_{0f} - 2i_{1f} + i_{2f} = 0 \\ i_{0f} + i_{1f} - 2i_{2f} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} i_{0f} + i_{1f} + i_{2f} = -2(i_0 + i_1 + i_2) \\ i_{0f} - 2i_{1f} + i_{2f} = -2(i_0 - 2i_1 + i_2) \\ i_{0f} + i_{1f} - 2i_{2f} = -2(i_0 + i_1 - 2i_2) \end{cases} \quad (5)$$

其中:  $i_{0f}$ ,  $i_{1f}$  和  $i_{2f}$  为故障支路的三模电流行波。

联立方程 (2)、(4)、(5), 可得故障点两侧线路上三模电流初始行波, 如式 (6):

$$\begin{cases} i_0 = -\frac{1}{Z_0 + 2Z_1} u_{af} \\ i_1 = -\frac{1}{Z_0 + 2Z_1} u_{af} \\ i_2 = -\frac{1}{Z_0 + 2Z_1} u_{af} \end{cases} \quad (6)$$

## 2 基本原理

电力线路故障发生后,故障点初始行波将向线路两侧传播。在波阻抗不连续点,行波将发生折反射,如图 2。由电压行波的折反射系数,可得电压反射行波和折射行波,

$$\begin{cases} u_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} u_i \\ u_z = \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} u_i \end{cases} \quad (7)$$

其中:  $u_i$ 、 $u_r$  和  $u_z$  分别为电压入射行波、反射行波和折射行波;  $Z_1$  和  $Z_2$  分别为入射线路和折射线路波阻抗。

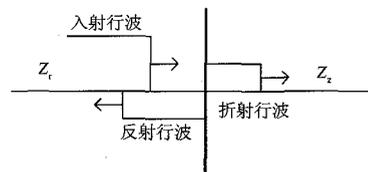


图 2 波阻抗不连续点行波折反射示意图

Fig.2 Traveling wave reflection and refraction at the point where wave impedance changes

假定反射行波是反行波,则入射行波和折射行波都是前行波,根据电压行波与电流行波之间的关系可得电流反射行波和折射行波,

$$\begin{cases} i_r = -\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} i_i \\ i_z = \frac{2Z_1}{Z_1 + Z_2} i_i \end{cases} \quad (8)$$

其中:  $i_i$ 、 $i_r$  和  $i_z$  分别为电流入射行波、反射行波和折射行波。

若波阻抗不连续点为变电站母线,该母线上接

有  $N$  回线路, 并且其中一回线路上发生了故障。则入射线路的波阻抗为线路波阻抗, 折射线路的波阻抗为健全的  $N-1$  回线路波阻抗的并联。因此, 变电站母线的电流反射行波和折射行波分别为,

$$\begin{cases} i_{br} = \frac{N-2}{N} i_{br} \\ i_{bz} = \frac{2(N-1)}{N} i_{br} \end{cases} \quad (9)$$

其中:  $i_{br}$ 、 $i_{br}$  和  $i_{bz}$  分别为变电站母线上的电流入射行波、反射行波和折射行波。

由于电磁波的速度很快, 变电站各条馈出线上的电流测量点距离变电站母线的距离很短, 所以故障线路上测得的电流行波为入射行波和反射行波的叠加。同时, 健全线路上测得的电流行波为折射行波的部分,

$$\begin{cases} i_{LF} = \frac{2(N-1)}{N} i_{br} \\ i_{LS} = \frac{2}{N} i_{br} \end{cases} \quad (10)$$

其中:  $i_{LF}$  和  $i_{LS}$  分别为故障线路和健全线路测得的电流行波。

由于电力系统中统一规定, 电流的正方向为由母线指向线路, 所以电流互感器输出的电流行波为,

$$\begin{cases} i_{LF} = \frac{2(N-1)}{N} i_{br} \\ i_{LS} = -\frac{2}{N} i_{br} \end{cases} \quad (11)$$

以上的分析没有涉及三相线路之间的耦合关系, 所以其仅适用于互相独立的模量电气量。由于线路上不同模量的行波速度不同, 所以线模行波首先到达测量点。代入式(6)求得的线模电流初始行波, 结合相模逆变换矩阵, 可得测量点的相量初始电流行波,

$$\begin{cases} i_{Lfa} = \frac{4(N-1)}{N} \frac{1}{Z_0+2Z_1} u_{af} \\ i_{Lfb} = \frac{2(N-1)}{N} \frac{1}{Z_0+2Z_1} u_{af} \\ i_{Lfc} = \frac{2(N-1)}{N} \frac{1}{Z_0+2Z_1} u_{af} \\ i_{LSa} = \frac{4}{N} \frac{1}{Z_0+2Z_1} u_{af} \\ i_{LSb} = \frac{2}{N} \frac{1}{Z_0+2Z_1} u_{af} \\ i_{LSc} = \frac{2}{N} \frac{1}{Z_0+2Z_1} u_{af} \end{cases} \quad (12)$$

其中:  $i_{Lfa}$ 、 $i_{Lfb}$  和  $i_{Lfc}$  分别为故障线路 a、b 和 c 相电流互感器测得的电流行波;  $i_{LSa}$ 、 $i_{LSb}$  和  $i_{LSc}$  分别为健全线路 a、b 和 c 相电流互感器测得的电流行

波。

由式(12)可得: 对线路上测得的相电流初始行波而言, 不管是故障相还是非故障相, 故障线的电流行波的大小是非故障线同一相的  $N-1$  倍, 且极性相反。这也就是小电流系统单相电流行波故障选线的基本原理。

以上分析表明: 基于单相电流初始行波的故障选线与系统的中性点接地方式无关, 不仅适用于小电流系统, 包括中性点不接地系统, 中性点经消弧线圈系统等等, 甚至对大电流系统, 如中性点直接接地系统也同样适用。所提原理比较故障线路与非故障线路电流行波之间的相对关系, 所以从原理上讲, 不受电流行波绝对大小的影响。也就是说该原理不受故障电阻, 线路波阻抗(线路形式)、线路回数的影响; 基本不受故障初始电压的影响。但与现有基于模量行波的选线原理比较, 其还受零模初始行波的影响, 下面具体分析零模故障初始行波下的新原理性能。

### 3 零模故障初始行波对新原理的影响分析

由于线路上不同模量的行波传播速度不同, 线模行波首先到达测量点, 零模故障初始行波后到达测量点。当零模行波到达测量点, 各相上的电流行波为:

$$\begin{cases} i_{Lfa} = -\frac{2(N-1)}{N} \frac{1}{Z_0+2Z_1} u_{af} \\ i_{Lfb} = \frac{2(N-1)}{N} \frac{1}{Z_0+2Z_1} u_{af} \\ i_{Lfc} = \frac{2(N-1)}{N} \frac{1}{Z_0+2Z_1} u_{af} \\ i_{LSa} = \frac{2}{N} \frac{1}{Z_0+2Z_1} u_{af} \\ i_{LSb} = \frac{2}{N} \frac{1}{Z_0+2Z_1} u_{af} \\ i_{LSc} = \frac{2}{N} \frac{1}{Z_0+2Z_1} u_{af} \end{cases} \quad (13)$$

零模初始行波到达测量点后, 测量点测得的电流行波为线模初始行波与零模初始行波的叠加, 如式(14)。

$$\begin{cases} i_{Lfa}' = \frac{6(N-1)}{N} \frac{1}{Z_0+2Z_1} u_{af} \\ i_{Lfb}' = 0 \\ i_{Lfc}' = 0 \\ i_{LSa}' = \frac{6}{N} \frac{1}{Z_0+2Z_1} u_{af} \\ i_{LSb}' = 0 \\ i_{LSc}' = 0 \end{cases} \quad (14)$$

由式(14)可得: 零模初始行波到达测量点后, 故障线路与健全线路的故障相之间仍满足大小  $N-1$  倍, 极性相反的规律, 故障选线原理仍然适用; 而非故障相的电流行波则不再存在, 故障选线原理

也不再适用。这也就意味着，选线装置必须在零模初始行波到达之前，正确识别出线模初始行波，避免零模初始行波与线模初始行波发生混叠。

那么在什么样的情况下零模行波与线模行波会发生混叠呢？零模行波与线模行波发生混叠的条件是零模初始行波与线模初始行波到达测量点的时间差小于选线装置的采样时间间隔。对确定线路而言，行波波速度一定，所以是否发生混叠与故障位置密切相关，故障位置越靠近测量点时，越容易混叠。但如果选线装置的采样时间间隔足够小，发生混叠的故障位置范围也就足够小。

因此，基于单相电流行波的故障选线原理受故障位置的影响，在母线出口处存在选线死区。通过提高选线装置的采样率，可以缩小选线死区。

#### 4 结论

本文在行波故障分析的基础上，提出了基于单相电流行波的小电流系统故障选线新原理。所提原理不受中性点接地方式的影响，不受故障电阻、馈出线形式、线路回数 and 故障时刻电压的影响。

与现有电流行波故障选线原理，该原理还具有以下特点：

1) 与零模行波故障选线相比，单相电流行波故障选线不需要零序电流互感器，简单易行，尤其适用于架空线出线无法配置零序电流互感器的系统；而且单相电流初始行波损耗小，故障特征明显。

2) 与二相、三相电流行波故障选线相比，单相电流行波故障选线接线简单，易于现场应用。

3) 单相电流行波故障选线存在选线死区，应用中采样频率的要求高。

#### 参考文献

- [1] 肖白, 束洪春, 高峰. 小接地电流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 Protection[J]. Relay, 2001, 29(4): 16-20.
- [2] SU Qian-li, DONG Xin-zhou, SHI Shen-xing, et al. A New Principle of Fault Line Selection for Distribution[A]. In: The Seventh International Conference on Developments in Power System Protection[C]. 2001. 379-382.
- [3] 毕见广, 董新洲, 周双喜. 基于两相电流行波的接地选线方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(3): 17-20.  
BI Jian-guang, DONG Xin-zhou, ZHOU Shuang-xi. Fault Line Selection based on Two-phase Current Traveling Waves[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(3): 17-20.
- [4] DONG Xin-zhou, BI Jian-guang, BO Zhi-qian. Technique of Fault Line Selection for Non-directed Ground Neutral System[A]. In: Proceedings of 37th UPEC[C]. UK: 2002. 193-196.
- [5] 施慎行, 董新洲, 周双喜. 单相接地故障行波分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(23): 29-32.  
SHI Shen-xing, DONG Xin-zhou, ZHOU Shuang-xi. Analysis of Single-phase-to-ground Fault Generated Traveling Waves[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(23): 29-32.

收稿日期: 2007-11-16

作者简介:

施慎行(1978-), 男, 博士, 研究方向为电力系统行波故障分析及继电保护; E-mail: ssx99@mails.tsinghua.edu.cn

董新洲(1963-), 男, 教授, 研究方向为行波测距、行波保护、无通道保护以及小波分析在电力系统中的应用。

### “中国电力系统保护与控制学术研讨会”预通知

“中国电力系统保护与控制学术研讨会”预定于2008年10月18日—21日(18日报到)在山东烟台隆重召开, 敬邀各单位和专家向大会投稿并届时参加。

#### 会议征文内容:

超(特)高压交直流输电技术研究与应用; 电力系统保护与控制的新理论、新技术; 电力系统安全稳定分析与控制; 电力系统规划与可靠性技术; 电力市场; 配电网自动化; 厂、站自动化; 调度自动化; 电力系统通信技术; 电气化铁道保护与控制技术; 电网广域保护与自愈控制; 数字化变电站技术研究; 电力设备检测与故障诊断技术; 电力电子技术在电力系统的应用; 保护与控制设备运行经验与事故分析; 保护与控制设备制造技术及电磁兼容; 其他。

#### 会议征文办法:

论文必须未在全国性学术会议或公开发行的刊物上发表过; 论文格式参照《继电器》论文格式, 图表清晰、规范; 论文篇幅在6000字以内(含空格、图表); 来稿请务必写明: 作者简介、地址、单位、邮编、联系电话、电子邮件; 请用电子邮件投稿并使用回执确认收到投稿;

征文截止日期延长到2008年8月15日, 经专家评审后, 由《继电器》杂志社在8月31日前发论文录用通知, 并出版论文集;

投稿邮箱: [dibh2008@126.com](mailto:dibh2008@126.com); [dibh@dlwg.net](mailto:dibh@dlwg.net)

地址: 河南省许昌市许继大道32号; 邮编: 461000 联系电话: 0374-3212254 0374-3212234