

# 基于暂态零序电流的小电流接地故障选线仿真

张新慧<sup>1,2</sup>, 潘贞存<sup>1</sup>, 徐丙垠<sup>2</sup>, 薛永端<sup>3</sup>

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山东理工大学电气与电子工程学院, 山东 淄博 255049;  
3. 济南科汇自动化系统工程有限公司, 山东 济南 250100)

**摘要:** 建立了伴有电弧过程的小电流接地系统的仿真模型, 利用电磁暂态程序 EMTP 全面仿真了不同故障情况对故障稳态和暂态电压、电流幅值特征和相位特征产生的影响。借助于 Matlab 程序设计得到了相应的零序电压及零序电流的幅值、相位及波形。通过对仿真数据及波形的进一步分析, 得到了基于暂态零序电流的故障检测方法灵敏度高于基于稳态零序电流的检测方法, 它不仅适用于中性点不接地系统, 而且也适用于中性点经消弧线圈接地系统及间歇性电弧接地故障的结论。

**关键词:** 小电流接地系统; 单相接地故障; 故障选线; 检测方法; EMTP 仿真; 电弧接地故障

## Faulty feeder selection simulation based on transient zero-sequence current

ZHANG Xin-hui<sup>1,2</sup>, PAN Zhen-cun<sup>1</sup>, XU Bing-yin<sup>2</sup>, XUE Yong-duan<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;  
2. School of Electrical & Electronic Engineering, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China;  
3. Jinan Kehui Automation System Engineering Co., Ltd, Jinan 250100, China)

**Abstract:** A simulation model of non-solidly grounded system with arc procedure is presented in the paper. Overall simulating of amplitude and phase characteristics of steady-state and transient fault voltage and current on diverse fault conditions is performed by using Electromagnetic Transient Program EMTP. The amplitude, phase and waveform of the corresponding zero sequence voltage and current can be obtained by designing Matlab program. By further analyzing the simulation date and waveform, this paper gets the following conclusions: the sensitivity of detection method based on transient zero-sequence current is higher than that of the steady-state based method, it is not only applicable to the isolated neutral system, but also adaptable to Peterson coil grounded system and intermittent arcing fault.

**Key words:** non-solidly grounded system; single-phase earth fault; faulty feeder selection; detection method; EMTP simulation; intermittent arcing fault

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)03-0005-05

## 0 引言

我国的中压配电网一般采用中性点不接地或经消弧线圈接地系统。单相接地故障是最常见的故障, 由于故障电流很小, 所以给故障检测带来了很大困难。传统的利用故障稳态信息的检测方法不适用于中性点经消弧线圈接地的系统及间歇性电弧接地故障。而故障产生的暂态电流幅值远远大于稳态电流幅值, 所以利用暂态信号的检测灵敏度很高; 同时由于暂态信号的主频率很高, 使得消弧线圈的补偿作用可以忽略不计, 因而暂态检测法不仅适用于中性点不接地系统, 而且也适用于中性点经消弧线圈接地系统。

本文提出了一种伴有电弧过程的小电流接地系统的数学模型, 用于分析发生单相接地故障时故障线路和非故障线路中稳态和暂态零序电流的特征。对由于中性点装设消弧线圈、接地过渡电阻不同、故障点位置不同、故障初始角不同等对故障暂态的幅值特征和相位特征产生的影响也一并做了讨论。

## 1 利用暂态零序电流幅值与极性的检测原理

### 1.1 比较故障相与健康相零序电流的幅值

暂态分量幅值法<sup>[1-3]</sup>是根据故障线路暂态零序电流幅值远远大于非故障线路暂态零序电流幅值的原理进行选线。从保证检测灵敏度及易于实现的角度

度出发, 本文通过比较故障暂态零序电流的有效值来选择故障线路, 其计算公式<sup>[4]</sup>为:

$$I_{0t} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I_{0tj}^2} \quad (1)$$

其中:  $I_{0tj}$  是故障后零序电流的第  $j$  个采样数据,  $I_{0t}$  为第  $T$  条出线暂态零序电流信号的有效值,  $N$  为暂态信号的总采样个数。

### 1.2 比较故障相与健康相零序电流的极性

暂态分量方向法<sup>[1-3]</sup>是根据故障线路暂态零序电流的方向与非故障线路相反的原理进行选线。具体方法是选用某一条出线(设第  $m$  条)作为参考线路, 其它所有线路依次与参考线路作暂态零序电流采样值的内积运算<sup>[4]</sup>:

$$P_m = \sum_{j=1}^N i_{0kj} \times i_{0mj} \quad (2)$$

$P_m > 0$  表明第  $T$  条出线和参考线路同极性;  
 $P_m < 0$  表明第  $T$  条出线和参考线路反极性。

## 2 系统仿真及分析

### 2.1 系统仿真模型

仿真系统选用图 1 所示的单发电机和六条架空出线的辐射型网络。发电机的中性点悬空或接电感, 便构成了中性点不接地或经消弧线圈接地的系统。

### 2.2 模型参数<sup>[5]</sup>

仿真模型的电源为单发电机 10 kV 供电, 内阻为零, 模拟无限大电力系统。变压器参数为  $X_T = 11.18 \Omega$ ; 线路正序阻抗为  $Z_1 = (0.17 + j0.38) \Omega/\text{km}$ , 零序阻抗为  $Z_0 = (0.23 + j1.72) \Omega/\text{km}$ , 正序对地导纳为  $b_1 = (j3.045) \text{ us}/\text{km}$ , 零序对地导纳为  $b_0 = (j1.884) \text{ us}/\text{km}$ 。各线路长度如图 1 中所示。对于经消弧线圈接地系统, 其接地电感按过补偿 5% 选取。

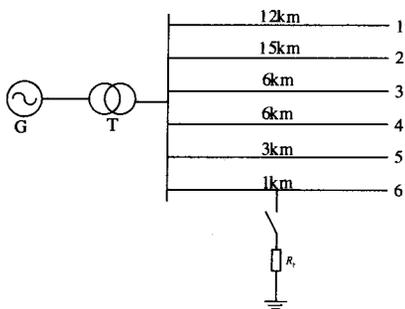


图 1 中性点非有效接地系统仿真模型

Fig. 1 Simulation model of non-solidly grounded system

### 2.3 仿真条件

1) 采样频率取 50 kHz。暂态零序电流真有效值的计算分别选取数据窗 250 点 (1/4 周波)、500 点

(1/2 周波)、1000 点 (一个周波) 进行比较, 得到计算暂态零序电流的最佳数据窗。

2) 故障初相角分别取  $90^\circ$ 、 $45^\circ$ 、 $0^\circ$  三种情况进行仿真。

3) 接地点过渡电阻分别取  $5 \Omega$ 、 $500 \Omega$ 、 $5 \text{ k}\Omega$  三种情况进行仿真。

4) 设故障点分别位于每条线路的首端、中间和末端以及母线等不同位置。

5) 采用 ATP-EMTP 的压控开关作为电弧的数学模型, 即当接地点电压达到最大值时, 开关合上, 表明电弧重燃, 当接地点电流过零时, 电弧熄灭, 如此反复拉弧, 作为实际电弧闪络的一种理想化模型。

6) 暂态零序电流的有效值和极性分别按公式 (1) 和式 (2) 进行计算, 通过编制 Matlab 应用程序调用 ATP 仿真<sup>[6,7]</sup>得到的数据进行处理, 绘出零序电压、零序电流的波形。

### 2.4 中性点不接地系统仿真结果分析<sup>[8]</sup>

由于篇幅所限, 下面仅列出线路 1 末端发生金属性接地 ( $R_F = 0$ ), 比较线路 1、2、4 的暂态零序电流 (一个周波) 与稳态零序电流的幅值和极性得到的仿真计算结果及波形。

#### (1) 仿真结果

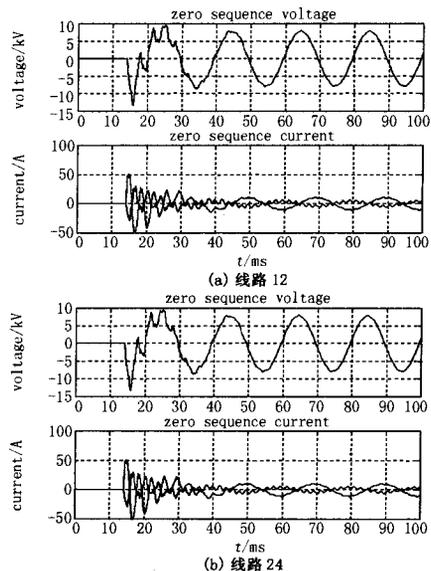


图 2  $\psi = 90^\circ$  时零序电压、零序电流波形图

Fig. 2 Waveform of zero sequence voltage and current when  $\psi = 90^\circ$

#### (2) 结果分析

通过总结大量的仿真计算结果及仿真得到的波形可以得出如下结论:

表 1  $\psi=90^\circ$ 时金属性接地仿真结果

Tab.1 Simulation result when  $\psi=90^\circ$

| 方法    | 线路   | $I_{0i}$ /A | $P_{tm}$ |
|-------|------|-------------|----------|
| 暂态分量法 | 线路 1 | 21.25       | -202740  |
|       | 线路 2 | 10.25       | 24139    |
|       | 线路 4 | 4.38        | -65012   |
| 稳态分量法 | 线路 1 | 7.41        | -21820   |
|       | 线路 2 | 3.32        | 3306.7   |
|       | 线路 4 | 1.21        | -8900.2  |

注: ①  $\psi$  表示故障相的初相角; ②  $P_{tm}$  表示线路  $T$  与  $M$  的相位比较:  $P_{tm} < 0$  表示线路  $T$  与  $M$  反相,  $P_{tm} > 0$  表示  $T$  与  $M$  同相; ③  $P_{tm}$  的填法: 本栏线路与下一栏线路进行相位比较, 末栏线路与首栏线路进行相位比较。

1) 故障线路的暂态零序电流大于非故障线路, 且与非故障线路暂态零序电流的方向相反, 如表 1 所示, 故障线路 1 的暂态零序电流为 21.25, 大于非故障线路 4 的暂态零序电流为 4.38, 二者的相位比较结果为 -65012, 前面的负号表示二者的极性相反。

2) 暂态检测法灵敏度高于稳态检测法。如表 1 所示, 故障线路 1 暂态零序电流 (一个周波) 为 21.25, 远远大于其稳态零序电流 7.41。

3) 短路瞬间故障相的相位角对暂态零序电流的幅值有很大影响, 但对稳态零序电流幅值影响甚小。

### 2.5 中性点经消弧线圈接地系统仿真结果分析<sup>[6]</sup>

下面仅列出线路 4 中段发生金属性接地 ( $R_F = 0\Omega$ ), 比较线路 2、3、4 的暂态零序电流与稳态零序电流的幅值和极性得到的仿真计算结果及波形。消弧线圈的电感采用过补偿 5% 计算。

#### (1) 仿真结果

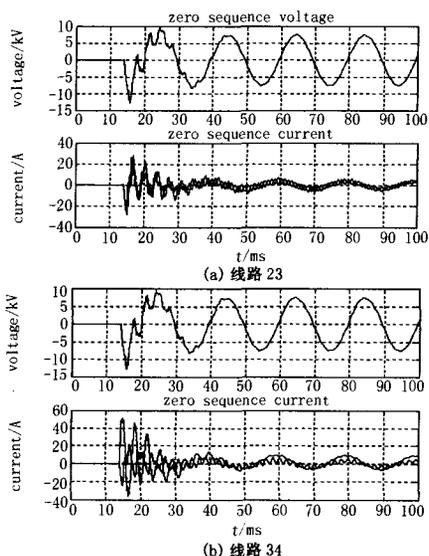


图 3  $\psi=90^\circ$ 时零序电压、零序电流波形图  
Fig.3 Waveform of zero-sequence voltage

and current when  $\psi=90^\circ$

表 2  $\psi=90^\circ$ 时金属性接地仿真结果

Tab.2 Simulation result when  $\psi=90^\circ$

| 方法    | 线路   | $I_{0i}$ (A) | $P_{tm}$ |
|-------|------|--------------|----------|
| 暂态分量法 | 线路 2 | 10.17        | 55246    |
|       | 线路 3 | 7.68         | -105030  |
|       | 线路 4 | 19.62        | -154840  |
| 稳态分量法 | 线路 2 | 3.18         | 4542.7   |
|       | 线路 3 | 2.68         | 11379    |
|       | 线路 4 | 5.45         | 15485    |

#### (2) 结果分析

通过总结大量的仿真计算结果及仿真得到的波形可以得出如下结论:

中性点经消弧线圈接地系统, 在过补偿方式下, 故障线路的稳态零序电流为由过补偿产生的过剩的电感电流, 其方向与非故障线路相同, 所以传统的稳态检测法不再有效, 而消弧线圈对故障后的暂态零序电流的幅值和相位均无影响。其它特性与中性点不接地系统相同。

### 2.6 过渡电阻的影响

以线路 3 中间分别经 5、500、5000 欧姆过渡电阻接地为例, 检测线路 1、2、3 的零序电压和零序电流。

#### (1) 仿真结果

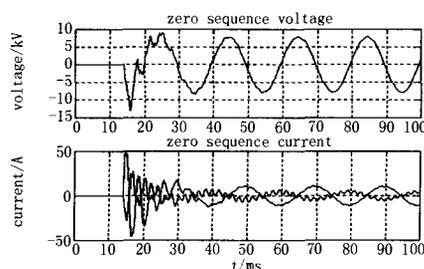


图 4  $R_F=5\Omega$  时线路 32 零序电压、零序电流波形图  
Fig.4 Waveform of zero-sequence voltage and current of line32 when  $R_F=5\Omega$

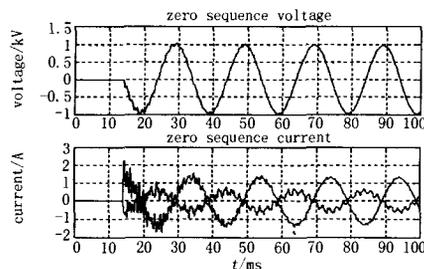


图 5  $R_F=5000\Omega$  时线路 32 零序电压、零序电流波形图  
Fig.5 Waveform of zero-sequence voltage and current of line32 when  $R_F=5000\Omega$

表 3 线路 3 中间故障接地仿真结果

Tab.3 Simulation result when fault occurring at the middle of line 3

| 方法  | 线路   | $R_F=5\ \Omega$ |          | $R_F=5000\ \Omega$ |          |
|-----|------|-----------------|----------|--------------------|----------|
|     |      | $I_{0i}/A$      | $P_{im}$ | $I_{0i}/A$         | $P_{im}$ |
| 暂态  | 线路 3 | 21.23           | -151740  | 0.97               | -270.46  |
| 分量法 | 线路 2 | 10.29           | 42939    | 0.43               | 89.62    |
|     | 线路 1 | 7.86            | -107100  | 0.42               | -231.73  |
| 稳态  | 线路 3 | 7.72            | -17540   | 0.86               | -227.77  |
| 分量法 | 线路 2 | 3.44            | 4212.4   | 0.37               | 67.43    |
|     | 线路 1 | 2.95            | -15076   | 0.29               | -176.45  |

(2) 结果分析

通过总结大量的仿真计算结果及仿真得到的波形可以得出如下结论:

1) 故障点的接地过渡电阻不同, 测得的稳态、暂态零序电流出现很大的差别, 接地电阻越小, 故障电流的幅值越大, 检测灵敏度越高。

2) 随着接地电阻的增大, 故障电流的幅值降低, 检测灵敏度也降低, 当接地电阻达到一定数值时, 例如当  $R_F=5000\ \Omega$  时, 故障线路的暂态零序电流还不到 1 A, 幅值太小, 不易检测, 而且此时故障线路与非故障线路零序电流的差值过小, 易引起误判。

本文仅列出了以中性点不接地系统为例进行过渡电阻影响分析的结果, 中性点经消弧线圈接地系统也得到了相同的结论。

2.7 电弧接地故障

以线路 3 中间发生间歇性电弧接地<sup>[8]</sup>为例, 检测线路 3、2、4 的零序电压和电流。对于中性点经消弧线圈接地系统, 消弧线圈的电感值按过补偿 2% 考虑。

(1) 仿真结果

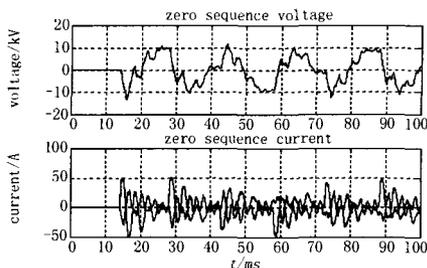


图 6 中性点不接地系统  $\psi=90^\circ$  时线路 32 零序电压、零序电流波形图

Fig. 6 Waveform of zero-sequence voltage and current of Line 32 in isolated neutral system when  $\psi=90^\circ$

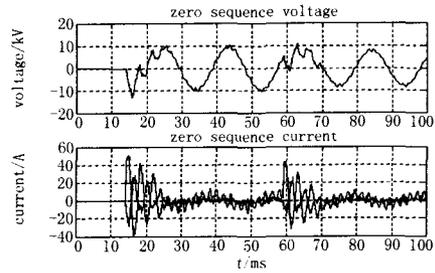


图 7 中性点经消弧线圈接地系统  $\psi=90^\circ$  时线路 32 零序电压、零序电流波形图

Fig. 7 Waveform of zero-sequence voltage and current of line 32 in Peterson coil grounded system when  $\psi=90^\circ$

表 4 线路 3 间歇性电弧接地仿真结果

Tab. 4 Simulation result when arcing earth fault occurring at the middle of line 3

| 方法    | 线路   | $I_0/A$ | $P_{im}$ |
|-------|------|---------|----------|
| 暂态分量法 | 线路 3 | 2.15    | 558.49   |
|       | 线路 2 | 5.31    | 513.81   |
|       | 线路 4 | 2.17    | 2839.0   |
| 稳态分量法 | 线路 3 | 32.46   | -114730  |
|       | 线路 2 | 15.45   | 13867    |
|       | 线路 4 | 6.61    | -33856   |

(2) 结果分析

通过总结大量的仿真计算结果及仿真得到的波形可以得出如下结论:

1) 暂态零序电流法同样适用于间歇性接地故障。事实上电弧的间歇性击穿可以增大暂态零序电流的幅值, 有利于提高检测的灵敏度。

2) 对于中性点不接地系统, 故障瞬间的相位角不同一般不会引起误判, 只是间歇性接地故障发生在相电压过零附近 ( $\psi=0^\circ$ ) 时, 其暂态零序电流较发生在相电压接近峰值 ( $\psi=90^\circ$ ) 时要小, 检测灵敏度稍低。

3) 对于中性点经消弧线圈接地系统, 在过补偿 2% 的情况下, 相电压接近峰值 ( $\psi=90^\circ$ ) 时发生间歇性电弧接地故障, 故障线路 3 的稳态零序电流幅值降低, 甚至低于非故障线路 4 的零序电流, 且方向与非故障线路 4 相同, 所以稳态法会引起误判, 但由仿真图形和结果可明显看出消弧线圈对故障后的暂态零序电流的幅值和相位均无影响, 所以暂态法优于稳态法。

此外, 我们还针对中性点不接地、经消弧线圈接地系统对不同线路在不同的故障情况下发生单相接地短路进行了大量的仿真工作, 其变化规律近似相同, 在此不一一列出。

### 3 结论

本文构造了中性点不接地和中性点经消弧线圈接地系统的仿真用数学模型,针对不同故障情况下的单相接地故障应用电磁暂态程序(EMTP)进行了仿真,通过编制 Matlab 应用程序对 EMTP 仿真产生的接地故障数据进行了处理,得到了相应的零序电压及零序电流的仿真数据及波形,据此比较故障稳态特征与暂态特征得到的结论如下:

1) 不论是中性点不接地系统还是中性点经消弧线圈接地系统,故障线路的暂态零序电流幅值均远远大于非故障线路,而且极性相反,所以暂态零序电流检测法的灵敏度高于稳态零序电流检测法;它不仅适用于中性点不接地系统,而且也适用于中性点经消弧线圈接地系统;

2) 基于暂态零序电流的故障检测方法同样适用于间歇性电弧接地故障;

3) 稳态零序电流与暂态零序电流的幅值均与故障点的接地过渡电阻有关,过渡电阻越小,电流幅值越大,检测灵敏度越高。当过渡电阻增加到一定值时,暂态零序电流的幅值很小,因而检测不出故障线路。这是中压配电网中有关故障检测与选线的难题,有待于进一步研究。

### 参考文献

- [1] 薛永端,冯祖仁,徐丙垠,等.基于暂态零序电流比较的小电流接地选线研究[J].电力系统自动化,2003,27(9):48-53.  
XUE Yong-duan, FENG Zu-ren, XU Bing-yin, et al. Study on Earth Faulty Line Selection Using Transient Zero Sequence Current in Non-Solidly Earthed Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(9): 48-53.
- [2] XUE Yong-duan, XU Bing-yin, CHEN Yu, et al. Earth

Fault Protection Using Transient Signals in Non-solid Earthed Network[A].In: IEEE/CSEE International Conference on Power System Technology Proceedings[C]. Kunming:2002.1763-1767.

- [3] 薛永端.基于暂态特征信息的配电网单相接地故障检测研究(博士学位论文)[D].西安:西安交通大学,2003.  
XUE Yong-duan. Earth Fault Detection Based on Characteristic Transient Information in Non-Solidly Earthed Network, Doctoral Dissertation[D]. Xi'an :Xi'an Jiaotong University,2003.
- [4] 吴维韩,张芳榴,等.电力系统过电压数值计算[M].北京:科学出版社,1989.  
WU Wei-han, ZHANG Fang-liu. Overvoltage Numerical Calculation in Power System[M]. Beijing: Science Press, 1989.
- [5] Dommel H W. Transients Program User's Manual[Z].
- [6] 李福寿.中性点非有效接地电网的运行[M].北京:水利电力出版社,1993.  
LI Fu-shou. The Operation of Non-directly Grounded Networks[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1993.
- [7] ATP-EMTP Rule Book [M].Canadian-American EMTP Users Group, 1997.
- [8] 刘万顺.电力系统故障分析[M].北京:水利电力出版社,1992.  
LIU Wan-shun. Fault Analysis of Power System[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1992.

收稿日期:2007-03-15; 修回日期:2007-11-13

作者简介:

张新慧(1971-),女,博士研究生,副教授,研究方向为电力系统继电保护;E-mail:zhxh626@126.com

潘贞存(1962-),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统继电保护及电力系统自动化监控技术;

徐丙垠(1961-),男,教授,博士生导师,研究方向为电力系统故障检测及其配电网自动化。

(上接第4页 continued from page 4)

- [4] 杨永生.基于面向对象技术的微机保护仿真[J].电力自动化设备,2001,7(21):46-48.  
YANG Yong-sheng. Based on Object-oriented Technology to Micro-protection Simulation[J]. Electric Power Automation Equipment,2001,7(21):46-48.
- [5] 卢娟,李兆成,陈钢杰,等.保护与测控领域通用可视化平台的设计与实现[J].电力系统自动化,2005,29(4):58-61.  
LU Juan, LI Zhao-cheng, CHEN Gang-jie, et al. Design and Implementation of a Universal Visual Platform in Protection and M&C Fields[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(4):58-61.
- [6] 贺家李,宋从矩.电力系统继电保护原理(第三版)[M].北

京:中国电力出版社,1994.

HE Jia-li, SONG Cong-ju. Power System Protection Principles, Third Edition[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1994.

收稿日期:2007-03-10; 修回日期:2007-06-10

作者简介:

邓秋娥(1977-),女,硕士,研究方向为电力系统自动化和微机保护;E-mail:dengqie@126.com

杜奇壮(1977-),男,硕士,研究方向为电力系统人工智能;

卢娟(1976-),女,硕士,研究方向为电力系统自动化和微机保护。