

文章编号:1671-6833(2011)04-0068-04

# 小电流接地系统暂态零序电压电流特征仿真研究

蒋建东, 陈帆, 任建

(郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

**摘要:** 为了分析小电流接地系统暂态零序电压电流的特征, 在 Matlab 中建立了小电流接地系统的仿真模型, 详细介绍了模型的建立方法. 对单相接地故障进行了仿真, 分析了小电流接地系统暂态过程中零序电压、零序电流、零序电流中 5 次谐波电流及零序电流变化率的特征.

**关键词:** 小电流接地系统; 暂态零序电压; 暂态零序电流

**中图分类号:** TM862 **文献标志码:** A

## 0 引言

我国的 3~10 kV 电网, 主要采用中性点不接地方式, 35~60 kV 电网, 主要采用中性点经消弧线圈接地方式, 采用这两种接地方式的系统称为小电流接地方式. 在小电流接地系统中最常发生的故障为单相接地故障, 发生故障后, 短路电流数值很小, 保护装置不会立即动作; 线电压仍保持对称, 系统允许短时运行<sup>[1]</sup>. 但非故障相电压升高, 中性点对地电压发生偏移, 可能会破坏设备绝缘, 导致区域性故障, 因此要求合适的选线方法, 以便及时、准确地找出故障线路并排除故障.

目前已经提出的一些选线方法, 如群体比幅比相法、谐波法、暂态能量法、零序导纳法、小波法<sup>[2-6]</sup>等, 由于受电压初相角及故障点接地电阻等因素的影响, 在使用中选线效果不理想<sup>[7]</sup>. 单相接地暂态过程中的暂态零序量信息丰富, 并且含有三相信息, 利用零序暂态量的特征进行选线理论上可以有效地改善选线精度<sup>[8]</sup>. 笔者在 Matlab 中建立了小电流接地系统的故障仿真模型, 利用该模型对单相接地时的暂态零序电压、暂态零序电流特征进行了仿真分析.

## 1 基于 Matlab 的小电流接地系统建模

### 1.1 仿真模型的建立

图 1 所示为一个小电流接地系统, 系统电源经升压变压器与母线相连, 通过三回线路和降压

变压器与用户相连. 利用 Matlab 中的电源模型、变压器模型、线路模型、负载模型、故障模型建立了小电流接地系统的单相接地故障仿真模型, 如图 2 所示. 图 2 中中性点的接地方式为不接地或经消弧线圈接地, 通过一个开关来控制.

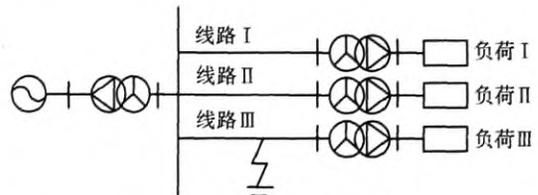


图 1 小电流接地系统示意图

Fig. 1 Small current neutral grounding system

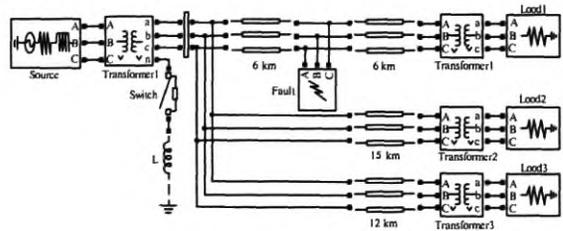


图 2 单相接地故障仿真模型

Fig. 2 Simulation model of single phase-to-ground fault

### 1.2 参数设置

电源用一个含有内阻抗的三相对称电压源来模拟, 三相电源采用星形接线, 其参数如表 1 所示.

变压器模型的参数如表 2 所示.

收稿日期: 2011-02-10; 修订日期: 2011-05-16

资助基金: 河南省科技攻关计划资助项目(112102210116); 郑州大学大学生创新性实验计划项目(2009cxsy097).

作者简介: 蒋建东(1975-), 男, 河南南阳人, 郑州大学副教授, 博士, 研究方向为电力系统运行分析与控制、电力系统故障分析与诊断.

表 1 电源模型参数  
Tab.1 Source parameters

线电压/kV	频率/Hz	电感/H	X/R
10.5	50	0.002	10

表 2 变压器模型参数  
Tab.2 Transformer parameters

类型	电源侧	负荷侧
额定容量/MVA	31.5	10
变比	35/11	10/6.6
空载损耗/kW	25.3	10
短路损耗/kW	119	48
短路电压比/%	8	7.5
空载电流比/%	0.6	0.6

电力线路分为架空线路和电缆线路两种,笔者针对架空线路进行建模.在配电网中存在着各种各样的非线性电力电子元件,可能使三相参数不对称,此时采用集中参数模型会出现较大的误差,因此文中使用分布参数模型,其参数如表 3 所示.

表 3 架空线路模型参数  
Tab.3 Overhead line parameters

线路	I	II	III
长度/km	16	15	12
正序电阻/ $(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.17	0.17	0.17
零序电阻/ $(\Omega \cdot \text{km}^{-1})$	0.23	0.23	0.23
正序电感/ $(\text{H} \cdot \text{km}^{-1})$	$7.6 \times 10^{-3}$	$7.6 \times 10^{-3}$	$7.6 \times 10^{-3}$
零序电感/ $(\text{H} \cdot \text{km}^{-1})$	$3.4 \times 10^{-2}$	$3.4 \times 10^{-2}$	$3.4 \times 10^{-2}$
正序电容/ $(\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$	$6.1 \times 10^{-8}$	$6.1 \times 10^{-8}$	$6.1 \times 10^{-8}$
零序电容/ $(\text{F} \cdot \text{km}^{-1})$	$3.8 \times 10^{-8}$	$3.8 \times 10^{-8}$	$3.8 \times 10^{-8}$

根据已经建立的仿真模型,在 Matlab 中对仿真参数进行如下设置:仿真开始时间为 0.0 s,结束时间为 0.12 s;解算器选择变步长(Variable-step),算法使用 ode23tb(Stiff/TR-BDF2);最大步长、最小步长、初始步长都选择自动方式(Auto);相对容差为 $(1 \times 10^{-3})$ ,绝对容差采用自动方式(Auto).

## 2 暂态零序电压电流量特征仿真分析

笔者按照中性点不接地和经消弧线圈接地两种情况,对线路 I 的 A 相在 0.02 s 时发生接地故障,0.1 s 时故障解除,进行了仿真.

### 2.1 暂态零序电压特征

中性点不接地系统发生单相接地故障后母线的零序电压波形如图 3 所示.由图 3 可以看出,在线路没有发生故障,三相电压对称,零序电压为 0 kV;在时发生相接地故障,各相电压不再对称,线路出现零序电压;在接地故障清除后,各相电压又恢复到正常运行值,零序电压重新变为 0 kV.中性点经消弧线圈接地系统的零序电压特征和中性点不接地系统的相同,常常把零序电压的这一特点作为启动选线的条件.

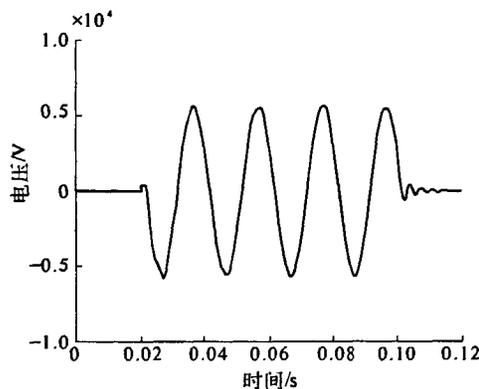


图 3 暂态零序电压

Fig.3 Transient zero sequence voltage

### 2.2 暂态零序电流特征

中性点不接地系统各线路暂态零序电流如图 4 所示.由图 4 可以看出,故障前各线路没有零序电流,故障后各线路开始出现零序电流;故障线路的零序电流幅值最大,约等于非故障线路零序电流的幅值之和,故障线路的零序电流相位与非故障线路的相位相反.故在中性点不接地系统中,可以利用零序电流幅值、相位进行选线.

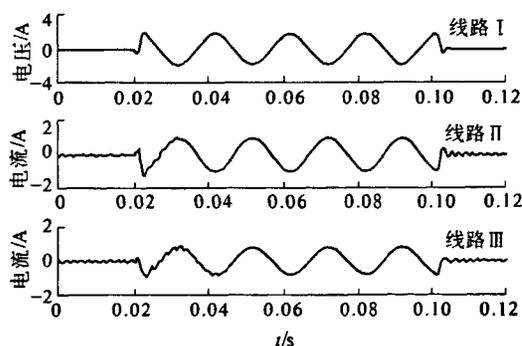


图 4 中性点不接地系统的暂态零序电流  
Fig.4 Transient zero sequence current in neutral ungrounding system

中性点经消弧线圈接地时各线路暂态零序电

流如图5所示.由图5可以看出,暂态过程中,故障线路的零序电流幅值较大,与非故障线路的零序电流幅值没有固定的关系,且故障线路的零序电流相位与非故障线路的相位也不呈现特定的关系.故在中性点经消弧线圈接地系统中,由于消弧线圈电感电流的补偿作用,利用零序电流幅值和相位进行选线将会不准确,需要采取其他方法.

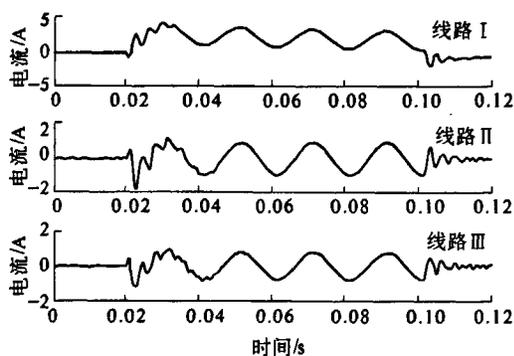


图5 中性点经消弧线圈系统的暂态零序电流

Fig.5 Transient zero sequence current in neutral grounding through arc-suppression coil system

### 2.3 暂态零序电流中的谐波电流特征

对中性点不接地系统和经消弧线圈接地系统单相接地故障时线路的暂态零序电流进行谐波分析,结果如表4和表5所示,表中电流幅值为相对于基波电流幅值的百分数.从表4和表5可以看出,中性点不接地系统和经消弧线圈接地系统单相接地故障时线路的暂态零序电流谐波分量具有相同的特点,2次、3次、4次、5次、6次和7次谐波含量较大;故障线路的谐波相位与非故障线路相反.可以利用暂态零序电流中的谐波电流特征进行选线.

表4 中性点不接地系统暂态零序电流中的谐波分量

Tab.4 Harmonic current of transient zero sequence current in neutral ungrounding system

谐波	线路 I		线路 II		线路 III	
	幅值/ %	相角/ rad	幅值/ %	相角/ rad	幅值/ %	相角/ rad
2	17.42	2.91	17.66	-0.21	17.11	-0.24
3	17.73	2.79	17.67	-0.17	17.81	-0.27
4	19.43	2.70	19.76	-0.27	19.04	-0.51
5	24.88	2.55	25.66	-1.02	23.91	-0.56
6	35.23	1.32	37.65	-1.52	32.19	-1.88
7	14.02	1.24	15.21	-2.90	12.61	-1.63
8	9.24	1.09	10.5	-1.95	7.79	-1.94

### 2.4 暂态零序电流变化率特征

为了更清晰的分析暂态零序电流变化率的特征,将中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统单相接地故障时各线路的零序电流放在一个图上并局部放大,分别如图7和图8所示.从图中可以看出,故障后各线路均产生一个零序电流突变量;故障线路零序电流变化的方向与非故障线路零序电流变化的方向相反;所有非故障线路的零序电流变化的方向相同;故障线路的零序电流变化率大于非故障线路.这些特征不受中性点接地方式的影响.基于上述特征,可利用暂态电流变化率作为区分故障线路与非故障线路的判据.发生单相接地故障后,可以利用暂态零序电流变化率进行选线.

表5 中性点经消弧线圈系统暂态零序电流中的谐波分量

Tab.5 Harmonic current of transient zero sequence current in neutral grounding through arc-suppression coil system

谐波	线路 I		线路 II		线路 III	
	幅值/ %	相角/ rad	幅值/ %	相角/ rad	幅值/ %	相角/ rad
2	31.42	2.91	17.14	-0.22	17.24	-0.39
3	27.80	3.03	14.93	-0.41	15.30	-0.18
4	39.69	2.84	22.03	-0.38	21.44	-0.40
5	60.74	2.11	34.81	-0.61	31.95	-1.10
6	45.09	1.60	26.66	-1.79	22.66	-1.56
7	32.63	0.30	20.27	-2.05	15.20	-2.73
8	10.33	1.30	6.68	-2.14	4.68	-1.61

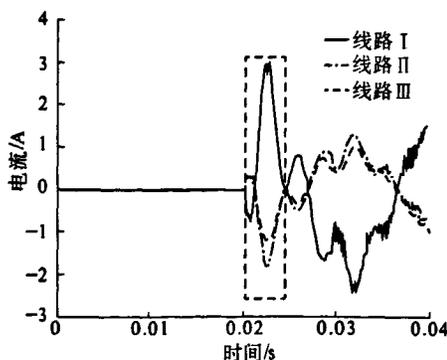


图7 中性点不接地系统暂态零序电流变化率

Fig.7 Transient zero sequence current changing rate in neutral ungrounding system

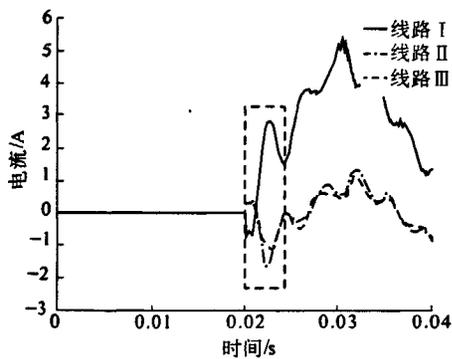


图8 中性点经消弧线圈接地系统暂态零序电流变化率  
Fig.8 Transient zero sequence current changing rate in neutral grounding through arc-suppression coil system

### 3 结论

(1) 中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统发生单相接地故障后各线路均出现零序电压,这一特点可作为启动选线的条件。

(2) 中性点不接地系统,故障线路的暂态零序电流幅值约等于非故障线路的暂态零序电流幅值之和,相位与非故障线路的相位相反。对中性点不接地系统,可以利用零序电流幅值、相位进行选线。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和相位与非故障线路没有固定关系。对中性点经消弧线圈接地系统,不能利用零序电流的幅值、相位进行选线。

(3) 中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统单相接地故障时线路的暂态零序电流谐波分量2次到7次谐波含量较大;故障线路的谐

波相位与非故障线路相反。可以利用暂态零序电流中的谐波电流特征进行选线。

(4) 中性点不接地系统和中性点经消弧线圈接地系统暂态零序电流变化率特征相同,故障线路的零序电流变化率大于非故障线路,这一特征可以作为区分故障线路与非故障线路的判据进行选线。

### 参考文献:

- [1] 徐青山. 电力系统故障诊断及故障恢复[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [2] 郝玉山, 杨以涵, 任元恒, 等. MLN系列小电流接地微机选线装置动作原理[J]. 电力情报, 1994, 2(2): 7-11.
- [3] 张立华, 徐文立. 小接地电流系统单相接地故障选线的一种算法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1998, 38(9): 74-76.
- [4] 朱丹, 贾雅君, 蔡旭. 暂态能量法原理选线[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(3): 75-78.
- [5] 曾祥君, 尹项根, 张哲, 等. 零序导纳法馈线接地保护的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 5-10.
- [6] 贾清泉, 刘连光, 杨以涵, 等. 应用小波检测故障突变特性实现配电网小电流故障选线保护[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 78-82.
- [7] 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, 2001.
- [8] 要焕年, 曹梅月. 电力系统谐振接地[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.

## Study on Transient Zero Sequence Voltage and Current Characteristics of Small Current Grounding System

JIANG Jian-dong, CHEN Fan, REN Jian

(School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou, 450001, China)

**Abstract:** In order to analyze the characteristics of transient zero sequence voltage and current in small current grounding system, the small current grounding system model is established in Matlab and the modeling method is introduced in detail. Based on the model, the phase-to-ground fault is simulated. The characteristics of transient zero sequence voltage, transient zero sequence current, transient five times harmonic current of zero sequence current and transient zero sequence current changing rate is analyzed.

**Key words:** small current neutral grounding system; transient zero sequence voltage; transient zero sequence current