

# 基于 RTDS 的小接地系统单相接地故障选线方法比较分析

庄良文<sup>1</sup>, 黄立滨<sup>1</sup>, 柳山<sup>2</sup>, 王学强<sup>1</sup>, 田盈<sup>3</sup>

(1. 国家继电器质量监督检验中心, 河南 许昌 461000; 2. 珠海醋酸纤维有限公司热电站, 广东 珠海 519075;  
3. 许昌继电器研究所, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 小接地系统发生单相接地故障的几率很高, 目前针对该故障的选线方法有很多种。在 RTDS 上建立一个小接地系统, 在其线路上模拟各种典型故障, 测试各种选线方法对故障线路判别的正确与否, 选出一个最适合用于小接地系统单相接地故障选线的方法。

**关键词:** 小接地系统; 单相接地故障选线; RTDS

**中图分类号:** TM773 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2003)11-0032-04

## 1 引言

目前国内的小接地系统(NUGS)主要有两种类型:中性点不接地系统(NUS)和中性点经消弧线圈接地系统(NES)。NUGS发生单相接地故障的几率很高,但此时供电仍然可以保证电压的对称性,且故障电流较小,可以继续运行1~2h。但是,如果不尽早找出故障线路并加以处理的话,易使故障扩大成两点或多点接地短路,弧光接地还会引起全系统过电压,破坏系统安全运行,所以必须及时找到故障线路予以切除。

RTDS是由加拿大曼尼托巴 HVDC 研究中心开发的专门用于实时电力系统仿真的装置,它具备对电力系统的完全实时仿真和带被测设备进行闭环试验,在全世界已经得到了广泛应用。在国外,动模试验已经很少在传统的实际模型上进行,大部分的试验都是在 RTDS 上进行的。国家继电器质量监督检验中心自 1998 年引进 RTDS 以后,不断地在上面开展各种电力系统继电保护的研究与试验,积累了大量的经验。

我国从 1958 年开始就一直对小接地系统的保护方式进行研究,目前国内对该类故障采用的保护原理主要有幅值法、相位法、群体比幅比相法、五次谐波法、零序功率法等。这几种方法原理都比较成熟,在实践中都得到了应用,不少专家学者对这些方法的优劣性在各种情况下都作了比较,但是,还没有在 RTDS 上做过比较,本文拟在 RTDS 上对这几种保护原理作一分析比较,进一步验证小接地系统可能出现的各种工况对这几种原理的影响,同时验证 RTDS 用于电力系统仿真的真实性和可行性。

## 2 各种选线原理的简介

### 2.1 比幅法<sup>[1]</sup>

当小接地系统某一出线回路出现单相接地故障时,流过故障线路的零序电流等于所有非故障线路对地电容电流之和,即故障线路上的零序电流比其他线路的零序电流都大。所以只需比较各条线路上零序电流的幅值大小就可以找出故障线路。但是,在实际系统运行中,受线路长短、系统运行方式和过渡电阻大小的影响,系统中可能出现某条线路的电容电流比故障线路的零序电流还大的情况,因此,该原理出现了一种变形,在实际中得到了应用。即将各条线路上的零序电流与其他线路上的零序电流之和做一比较,相等的那一条线路就是故障线路,如果均不相等,则是母线故障。

### 2.2 比相法<sup>[1]</sup>

当小接地系统某一出线回路出现单相接地故障时,故障线路的零序电流方向是从线路流向母线,而非故障线路的零序电流则是从母线流向线路,所以根据判断零序电流的方向即可判断出故障线路。但是,当故障线路很短时,零序电压和零序电流很小,会出现“时针效应”<sup>[2]</sup>,装置容易误判。并且,如果系统是经消弧线圈接地的话,这条原理就失效了。

### 2.3 群体比幅比相法<sup>[1]</sup>

该方法综合了比幅和比相两种方法的优点,它是首先通过比幅选出几个幅值较大的零序电流,然后用这几个零序电流和零序电压比相,最后出来的结果就是故障线路。这样在一定程度上解决了比相法因为“时针效应”所造成的误动。但是,与比相法相同,该法在中性点经过消弧线圈接地的系统中失效。

## 2.4 五次谐波法<sup>[1]</sup>

针对以上几种方法在 NES 中失效的问题,提出了这个五次谐波法。这个方法的原理就是利用零序电流的五次谐波分量进行判断。已知零序电流五次谐波分量在 NES 中有着与 NUS 中零序电流基波相同的特点,再利用前面的原理即可对 NES 的单相故障进行选线。但是,五次谐波分量在零序电流中所占的比例很小,大约只有 5%~6%,容易受到负荷中的五次谐波源和噪声等的干扰,造成选线不准确。

## 2.5 零序功率法<sup>[3]</sup>

当中性点不接地系统某一出线回路出现单相接地故障时,故障线路的零序无功功率方向为正,而非故障线路的零序无功功率则为负。依据这一原理可以判断中性点不接地系统的故障线路。当消弧线圈接地系统某一出线回路出现单相接地故障时,利用故障线路的零序无功分量无法判断出故障线路,但是,利用故障线路的零序有功分量小于零,而非故障线路的零序有功分量大于零就可以判断出故障线路。

## 3 实验模型

### 3.1 中性点不接地系统

系统原理接线图如图 1 所示。

图中:S1 为系统等值电源,S2、S3、S4 为负荷等值电源,line1、line2、line3、line4 分别为线路 1、线路 2、线路 3 和线路 4。

系统等值电源: $U_N = 37 \text{ kV}$ ,系统等值阻抗: $Z_S = 0.1 \angle 78.3^\circ$ 。

线路参数: $R = 0.13 \text{ } / \text{ km}$ ,  $X_L = 0.48 \text{ } / \text{ km}$ ,  $X_C = 0.65903 \text{ M} \cdot \text{ km}$ ;  $R_0 = 0.37 \text{ } / \text{ km}$ ,  $X_{L0} = 1.2 \text{ } / \text{ km}$ ,  $X_{C0} = 0.90194 \text{ M} \cdot \text{ km}$ 。

线路长度:线路 1: 40 km;线路 2: 80 km;线路 3: 40 km;线路 4: 40 km。

### 3.2 中性点经消弧线圈接地系统

系统原理接线图如图 2 所示。

图中:S1 为系统等值电源,S2、S3、S4 为负荷等值电源,line1、line2、line3、line4 分别为线路 1、线路 2、线路 3 和线路 4。

系统等值电源: $U_N = 37 \text{ kV}$ ,系统等值阻抗  $Z_S = 0.1 \angle 78.3^\circ$ ,中性点经 6.0 h + 165 的消弧线圈接地,补偿度 175%, $R/L = 11.4$ 。

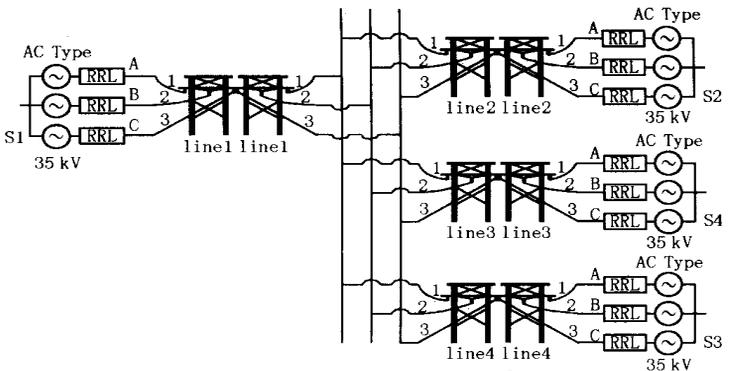


图 1 中性点不接地系统

Fig. 1 System with unearthed neutral point

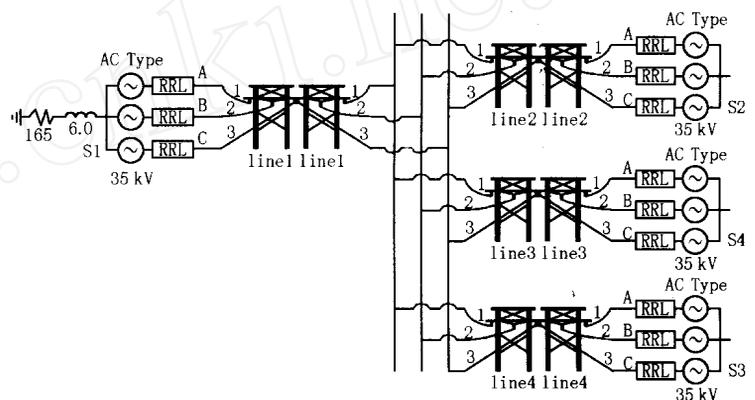


图 2 中性点消弧线圈接地系统

Fig. 2 System with arc-extinction coil earthed neutral point

线路参数: $R = 0.13 \text{ } / \text{ km}$ ,  $X_L = 0.48 \text{ } / \text{ km}$ ,  $X_C = 0.65903 \text{ M} \cdot \text{ km}$ ;  $R_0 = 0.37 \text{ } / \text{ km}$ ,  $X_{L0} = 1.2 \text{ } / \text{ km}$ ,  $X_{C0} = 0.90194 \text{ M} \cdot \text{ km}$ 。

线路长度:线路 1: 40 km;线路 2: 80 km;线路 3: 40 km;线路 4: 40 km。

## 4 实验结果

### 4.1 中性点不接地系统故障之一

采用中性点不接地系统,不改变系统参数,在线路 2 中点发生 A 相接地故障,实验结果见表 1。

表 1 实验结果 1

Tab. 1 Testing results 1

	$3 I_{01}$	$3 I_{02}$	$3 I_{03}$	$3 I_{04}$	$3 U_0$
最大值	12.2 A	27.2 A	7.81 A	7.82 A	89.3 kV
基波幅值	5.15 A	12.59 A	3.71 A	3.71 A	84.2 kV
基波相角	-87.66°	91.64°	-86.67°	-86.67°	0°

表 1 中: $3 I_{01}$ 、 $3 I_{02}$ 、 $3 I_{03}$ 、 $3 I_{04}$  分别为线路 1、2、3、4 的零序电流; $3 U_0$  为母线的零序稳态电压峰值;基波相角取的是故障一周波后的值。

由表 1 中可以看出,利用比幅、比相、群体比幅比相和零序功率法这几种原理均能正确找出故障线路。五次谐波因为含量较基波小得多,且最后还是要用这三种原理来判断,多用于经消弧线圈接地系统,故在中性点不接地系统的故障判别里不把它列为比较对象。

#### 4.2 中性点不接地系统故障之二

采用中性点不接地系统,在线路 3 末端加上一个三相  $2\mu\text{F}$  的电容,在线路 2 中点发生 A 相接地故障,实验结果见表 2。

表 2 实验结果 2

Tab. 2 Testing results 2

	$3I_{01}$	$3I_{02}$	$3I_{03}$	$3I_{04}$	$3U_0$
最大值	8.98 A	106.72 A	97.1 A	6.33 A	99.54 kV
基波幅值	5.37 A	70.2 A	60.8 A	3.90 A	88.35 kV
基波相角	-88.6°	91.62°	-88.6°	-89.6°	0°

表 2 中: $3I_{01}$ 、 $3I_{02}$ 、 $3I_{03}$ 、 $3I_{04}$ 分别为线路 1、2、3、4 的零序电流; $3U_0$ 为母线的零序稳态电压峰值;基波相角取的是故障一周波后的值。

由表 2 中可以看出,利用比相、群体比幅比相和零序功率法这三种原理可以正确找出故障线路;而对于比幅原理,由于  $3I_{02}$  和  $3I_{03}$  之间幅值差值比例仅为 1.1:1,故考虑到 CT 不平衡电流等干扰因素的影响,极有可能误动。

#### 4.3 中性点不接地系统故障之三

采用中性点不接地系统,将所有线路的长度均改为 25 km,在线路 2 的中点发生 A 相接地故障,实验结果见表 3。

表 3 实验结果 3

Tab. 3 Testing results 3

	$3I_{01}$	$3I_{02}$	$3I_{03}$	$3I_{04}$	$3U_0$
最大值	11.36 A	22.7 A	5.74 A	5.76 A	87.7 kV
基波幅值	3.73 A	8.37 A	2.30 A	2.33 A	83.99 kV
基波相角	-89.66°	90.65°	-88.65°	-88.65°	0°

表 3 中: $3I_{01}$ 、 $3I_{02}$ 、 $3I_{03}$ 、 $3I_{04}$ 分别为线路 1、2、3、4 的零序电流; $3U_0$ 为母线的零序稳态电压峰值;基波相角取的是故障一周波后的值。

由表 3 可以看出,通过比幅原理和零序功率法可以正确找出故障线路;而对于比相原理,由于  $3I_{02}$  和  $3U_0$  的比值达到了 1:10,所以如果用比相原理的话,由于“时钟效应”,有可能会误动。

#### 4.4 经消弧线圈接地系统单相接地故障之一

采用中性点经消弧线圈接地系统,参数不变,在

线路 2 的中点发生 A 相接地故障,实验结果见表 4。

表 4 实验结果 4

Tab. 4 Testing results 4

	$3I_{01}$	$3I_{02}$	$3I_{03}$	$3I_{04}$	$3U_0$
最大值	22.62 A	27.75 A	7.86 A	7.87 A	87.88 kV
基波幅值	9.87 A	6.13 A	3.69 A	3.70 A	82.88 kV
基波相角	78.3°	-123.3°	-90.0°	-90.0°	0°
五次谐波幅值	1.71 A	2.96 A	0.80 A	0.80 A	6.41 kV
五次谐波相角	-67.5°	103.5°	-81°	-81°	0°

表 4 中: $3I_{01}$ 、 $3I_{02}$ 、 $3I_{03}$ 、 $3I_{04}$ 分别为线路 1、2、3、4 的零序电流; $3U_0$ 为母线的零序稳态电压峰值;基波相角取的是故障一周波后的值。

从表 4 可以看出,比相、群体比幅比相原理均无法利用基波判别出故障线路,采用比幅、零序功率法、五次谐波法可以正确判别出故障线路。

#### 4.5 经消弧线圈接地系统单相接地故障之二

采用中性点经消弧线圈接地系统,参数不变,在线路 1 的首端发生 A 相接地故障,实验结果见表 5。

表 5 实验结果 5

Tab. 5 Testing results 5

	$3I_{01}$	$3I_{02}$	$3I_{03}$	$3I_{04}$	$3U_0$
幅值	62.11 A	39.42 A	15.01 A	14.99 A	112.05 kV
基波幅值	16.25 A	8.71 A	4.01 A	4.01 A	92.64 kV
基波相角	91.64°	-88.65°	-87.66°	-88.65°	0°
五次谐波幅值	5.23 A	2.75 A	1.24 A	1.24 A	8.87 kV
五次谐波相角	90°	-90°	-90°	-90°	0°

表 5 中: $3I_{01}$ 、 $3I_{02}$ 、 $3I_{03}$ 、 $3I_{04}$ 分别为线路 1、2、3、4 的零序电流; $3U_0$ 为母线的零序电压;基波相角取的是故障一周波后的值。

从表 5 可以看出,比相、群体比幅比相原理无法利用基波判别出故障线路,采用对五次谐波进行比幅、比相判别虽然可以判别出故障线路,但因为故障线路电流的五次分量也不大,出现“时钟效应”,很容易误判;利用零序功率的有功分量和比幅法可以清楚地判断出故障线路。

## 5 结论

(1) 从在 RTDS 上的比较试验来看,对于中性点不接地系统,群体比幅比相原理和零序功率原理(采用无功分量)可以很好地区分出故障线路和非故障

线路,比幅和比相法虽然也可以区分出故障线路,但是这两种方法受出线方式和线路长度的影响,容易误判。在经消弧线圈接地系统中,可以通过比幅、五次谐波分量法、零序功率法(利用有功分量)来区分故障线路和非故障线路。在这几种方法中,零序功率法的灵敏度最高,同时对中性点不接地系统和消弧线圈接地系统有效,是一个较好的用于小接地系统单相故障选线的方法。

(2) 以上的试验结论在现实中和理论上都是符合的,这从另一个方面来说,利用 RTDS 仿真小接地系统是可行、可信的。

#### 参考文献:

[1] 肖白,等.小电流接地系统单相接地故障选线方法综述

[J].继电器,1998,26(4):16-20.

[2] 张树文,等.小电流接地系统单相接地保护原理和技术综述[J].电力情报,1994,(2):1-4.

[3] 杨汉生,等.基于零序功率的小电流选线方法[J].继电器,2002,30(11):30-32.

收稿日期:2003-01-24

作者简介:

庄良文(1979-),男,助工,现从事电力系统数字仿真研究以及高压直流系统研究工作;

黄立滨(1974-),男,硕士,现从事电力系统数字仿真研究以及高压直流系统研究工作;

柳山(1973-),男,助工,现从事电力系统变电站调度运行工作。

### Analysis of fault line selection method of non - solid earthed power system based on RTDS

ZHUANG Liang-wen<sup>1</sup>, HUANG Li-bin<sup>1</sup>, LIU Shan<sup>2</sup>, WANG Xue-qiang<sup>1</sup>, TIAN Ying<sup>3</sup>

(1. National Center for Quality Supervision and Test of Relays and Protection Equipments, Xuchang 461000, China;

2. Thermoelectricity plant Zhuhai cellulose fibers Co., Ltd, Zhuhai 519075, China;

3. Xuchang Relay Research Institute, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** Single - phase grounding fault occurs frequently in non - solid earthed power system. There are many ways for the fault line selection. In this paper, a non - solid earthed power system based on RTDS is built, and typical faults on its transmission line are simulated to testify the efficiency of each selection method. By that, the most efficient one could be gained.

**Key words:** non - solid earthed power system; fault line selection; RTDS

(上接第 31 页)

原理的失磁保护在发电机处于逆功率运行状态下失磁,将拒动,通过原理改进,可以实现正确动作。

收稿日期:2002-12-23; 修回日期:2003-04-01

作者简介:

赵民(1972-),男,工程师,从事继电保护的运行、管理工作。

### Operation analysis of field - loss protection when reverse - power starts in the generator

ZHAO Min<sup>1</sup>, YIE Shao-yi<sup>1</sup>, HOU Jia-cai<sup>1</sup>, SHEN Ai-bing<sup>2</sup>

(1. Hegang Power Generating Co., Ltd, Hegang 154109, China; 2. Shenyang Electric Power college, Shenyang 110036, China)

**Abstract:** This paper presents the basic principles of  $U_L - P$  type and impedance - type field - loss protection, and analyzes the operation of field - loss protection when the reverse - power starts in the generator. According to all kinds of tripping schemes of the  $U_L - P$  type field - loss protection, this paper discusses the problems should be resolved on the field - loss protection when the reverse - power starts in the generator.

**Key words:** field-loss protection; reverse - power in the generator; static stability impedance