

# 非直接接地系统中检出单相接地线路的新方法

葛耀中<sup>1</sup>, 奚秉国<sup>2</sup>

(1. 西安交通大学, 陕西 西安 710049; 2. 南京自动化研究院, 江苏 南京 210003)

**摘要:** 提出了适用于非直接接地系统中发生单相接地故障时检出接地故障线路的一种新方法——零序电容电流补偿法。理论分析和仿真结果表明, 该方法适用于中性点不接地或经消弧线圈接地系统, 具有简单可靠和灵敏性好的特点。这种方法很容易在微机保护中实现。

**关键词:** 接地故障选线; 继电保护; 非直接接地电网

**中图分类号:** TM774 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2001)09-0001-05

## 1 前言

我国 10~35kV 电网中一般采用中性点不接地或经消弧线圈接地方式。当发生单相接地故障时, 由于故障点电流较小, 且不影响对负荷的正常供电, 一般允许继续运行 1~2h。但仍应及时检出接地故障线路以防止单相接地故障进一步扩大。

目前检出接地故障线路的方法大致可分为三类, 即稳态分量法、暂态分量法和注入信号法。尽管根据上述方法实现了多种接地选线装置, 但各有其优缺点和局限性, 迄今对小接地电流系统还没有一种完善的保护原理。因此, 这仍然是一个值得进一步深入研究的课题<sup>[1]</sup>。

本文提出了利用零序电容电流补偿原理实现非直接接地电网中发生单相接地时检出接地故障线路的新方法。理论分析和仿真结果表明, 该方法利用的是稳态分量, 有简单、可靠和灵敏度高等特点, 能适用于中性点不接地或经消弧线圈接地的电网, 并很容易在微机保护中实现。

## 2 零序电流补偿法的基本原理与判据

### 2.1 基本原理

在小接地电流系统中, 若其中一条出线发生单相接地故障, 全系统都会出现零序电压, 在这个零序电压的作用下, 系统中会出现零序电流。对于非故障线而言, 零序电流就是该线路的零序电容电流(如图 1 所示), 方向为母线流向线路; 对于故障线路而言, 在中性点不接地系统中(图 1 所示为其零序网络图, 开关 K 断开), 故障线路中的零序电流为非故障线路零序电流总和, 方向为线路流向母线, 在中性点经消弧线圈接地的系统中(图 1 所示为其零序网络图, 开关 K 闭合), 故障线路中的零序电流为非故障线零序电流与消弧线圈中的电感电流之和, 方向为

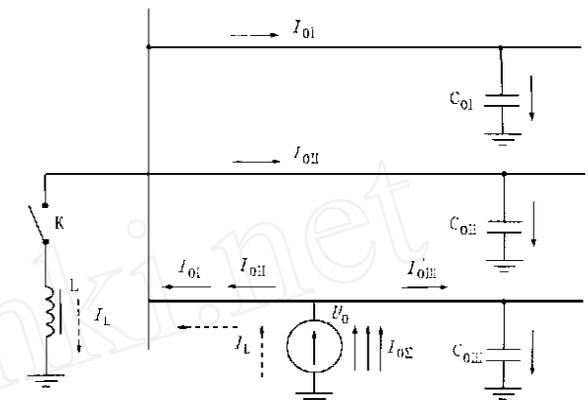


图 1 单相接地时接地系统的零序网络图

母线流向线路。于是利用系统中出现的零序电压, 对每一条出线的零序电流进行补偿, 补偿的大小为本线路的零序电流的大小, 方向为线路流向母线。从而使非故障线路的零序电流为零, 而故障线的零序电流则为所有线路零序电容电流之和或系统经消弧线圈补偿后的零序电流。因此可以判定, 经补偿后零序电流  $I_j$  为零或近似为零的线路为非故障线路, 不为零的线路为故障线路。

### 2.2 算法与判据

根据零序电流补偿法的基本原理, 补偿后的电流  $I_j$  可表示为

$$\left. \begin{aligned} I_j &= 3I_0 + I_{BS} \\ \text{或} \quad |I_j| &= |3I_0| - |I_{BS}| \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中  $3I_0$  ——外部单相接地时流过本线路零序电容电流;

$I_{BS}$  ——补偿电流。

由  $I_j$  的幅值区分接地和非接地故障线路有以下几种方法:

#### 1) 绝对值判据

绝对值判据可表示为

$$|I_j|$$

式中 —— 阈值。

满足式(2)的线路判定为接地故障线路。

2) 相对判据

相对判据由比较各条线路补偿后的零序电流幅值大小决定,表示为

$$|I_{JK}| = \max[|I_{ji}|], i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

由式(3),第 K 条线路被判定为接地线路。

3) 综合判据

将绝对值判据和相对判据结合起来可

组成综合判据。首先利用式(1)检出接地故障线路,当检出线路数大于 1 条时,再进一步利用式(2)判定出接地故障线路。

上述三种判据各有其优缺点,可根据实际条件进行选择。在补偿电流能较准确获得的条件下,绝对值判据最为简单可靠。

3 算法分析

为了使分析过程清晰明了,假定出线的 A 相发生接地故障,过渡电阻为零,且无电弧重燃现象(如图 1 所示)。

3.1 中性点不接地系统

3.1.1 非故障线路中的零序电流及补偿情况分析

系统中出线的 A 相接地之后,其向量图如图 2 所示,各相对地电压为:

$$U_{A-D} = 0$$

$$U_{B-D} = E_B - E_A = \sqrt{3} E_A e^{-j150^\circ}$$

$$U_{C-D} = E_C - E_A = \sqrt{3} E_A e^{j150^\circ}$$

故障的零序电压为

$$U_0 = \frac{1}{3} (U_{A-D} + U_{B-D} + U_{C-D}) = - E_A \quad (4)$$

非故障线路、中的零序电流为:

$$3I_{0i} = 3j U_0 C_{0i}, \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

式中  $U_0$  为系统中出现的零序电压;

$C_{0i}$  为出线、的零序电容;

为零序电流、电压的角频率。

由图 2 所示,零序电流超前零序电压  $90^\circ$ ,因此取补偿电流为:

$$I_{bsi} = - 3j U_0 C_{0i} \quad (6)$$

所求得的补偿后的零序电流  $I_j$  为:

$$I_{ji} = 3I_{0i} + I_{bsi} = 3j U_0 C_{0i} + (- 3j U_0 C_{0i}) = 0 \quad (7)$$

3.1.2 故障线路中的零序电流及补偿情况分析

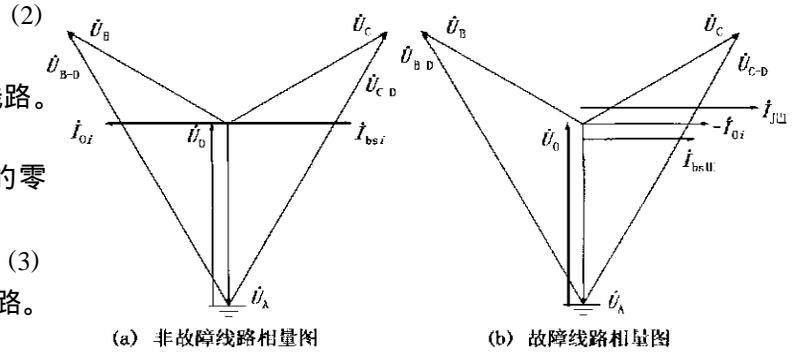


图 2 中性点不接地系统单相接地时的向量图

在故障线路中,零序电流为所有非故障线零序电流之和,如图 1 所示,非故障线路的零序电流、电压向量如图 2(b)所示,零序电流的方向滞后零序电压  $90^\circ$ ,而与补偿电流的方向相同,因此补偿后的零序电流为:

$$I_j = - \sum_{i=1,2} 3I_{0i} + I_{bs} = - 3j U_0 C_0 \quad (8)$$

式中

$$I_{bs} = - 3j U_0 C_0 ;$$

$C_0$  为系统的所有零序电容之和。

从上面的分析可见,在中性点不接地的系统中,经过补偿之后,非故障线路中零序电流为零,故障线路中零序电流为所有出线的零序电流之和。

3.2 中性点经消弧线圈接地系统中补偿原理的应用

3.2.1 非故障线路中的零序电流及补偿情况分析

对于非故障线路而言,中性点不接地和中性点经消弧线圈接地的情况是一样的,式(4)~(7)同样成立。

3.2.2 故障线路中的零序电流及补偿情况分析

在图 1 中,故障点的零序电容电流,即全系统的对地电容电流为:

$$I_C = 3j U_0 C_0 \quad (9)$$

而消弧线圈中的电感电流为:

$$I_L = \frac{U_0}{jL} \quad (10)$$

其方向与系统对地电容电流相反,从而使接地电流减弱,经消弧线圈补偿后的接地电流为:

$$I_D = I_C + I_L = 3j U_0 C_0 + \frac{U_0}{jL} = U_0 (3j C_0 + \frac{1}{jL}) \quad (11)$$

由于在实际系统中,大多采用过补偿方式,过补偿度为  $P = 5\% \sim 8\%$ ,所以接地电流的方向与电感电流一致,故障的零序电流也与非故障线中的零序

电流方向一致,均为母线流向线路,各向量如图3所示。经零序电流补偿后的故障线的零序电流为:

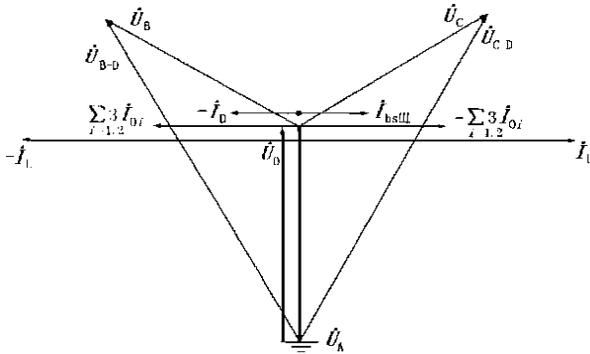


图3 中性点经消弧线圈接地系统单相接地时的故障线路向量图

$$I_{0j} = - \sum_{i=1,2} 3I_{0i} + I_{bs} - I_L = - 3j U_0 C_0 - \frac{U_0}{jL} = - 3j U_0 C_0 - (I_D - 3j U_0 C_0) = - I_D \quad (12)$$

式中  $I_D$  为经消弧线圈补偿后的零序接地电流,即残流。

由上述分析可见,在中性点经消弧线圈接地系统中,经过零序电流的补偿,非故障线路的零序电容电流为零,故障线路中的零序电流的大小与接地点的残流相等,其方向在补偿前后并不改变,均为母线流向线路。实际上接地点的残流往往还有一定的数值,即使残流小到几安,利用式(2)、(8)依然可以正确选线。

## 4 考虑实际影响因素后的算法分析

### 4.1 过渡电阻的影响

当过渡电阻不为零时,零序电容电流会有所减少,各向量间的关系如图2或图3所示,但不论中性点是不接地还是经消弧线圈接地,在非故障线路中下面的关系总是成立的:

$$3I_0 = (\dot{E}_A + \dot{U}_0)j C_A + (\dot{E}_B + \dot{U}_0)j C_B + (\dot{E}_C + \dot{U}_0)j C_C = 3j U_0 C_0 \quad (13)$$

式中  $\dot{E}_A$ 、 $\dot{E}_B$ 、 $\dot{E}_C$  为各相电势;

$\dot{U}_0$  为中性点对地电压;

$C_A$ 、 $C_B$ 、 $C_C$  为各相对地电容,当三相对称时,其值相等。

上式与式(5)完全一致,对其进行补偿后,可得:

$$I_{0bs} = 3I_0 + I_{bs} = 0 \quad (14)$$

式(13)和式(14)表明,在非故障线路中,即使过渡电阻不为零,经补偿后的零序电流仍然为零,虽然非故

障线路的零序电流也会因过渡电阻而减少,但是过渡电阻的大小也改变了零序电压的大小和相角,因而补偿电流  $I_{bs}$  也是实时地依据零序电压的变化而变化的,从而使非故障线路中的  $I_{0bs}$  不受过渡电阻的影响。在故障线路中,式(8)和式(12)仍然成立,式(8)仍然可以用于选线。

### 4.2 线路结构不对称的影响

当线路结构不对称时,系统的中性点就会出现不对称电压,在忽略电网阻尼率时,不对称电压可表示为:

$$\dot{U}_{un} = - \dot{K}_C E \quad (15)$$

式中  $E$  为电源电势

$$\dot{K}_C = \frac{C_A + 2C_B + C_C}{C_A + C_B + C_C}$$

它表示电网的不对称度。

而由此产生的不对称电流可表示为:

$$\dot{I}_{un} = - j (C_A + C_B + C_C) \dot{U}_{un} \quad (16)$$

当电网的不对称度较大时,考虑比较恶劣的情况,假定  $1.1C_A = C_B = C_C$ ,则由式(15)可得  $|\dot{U}_{un}| = 3.03\% E$ ,由此引起的不平衡电流对接地线检测的影响可以在本文下面提出的整定计算方法中消除。

## 5 整定计算方法

由上述接地选线原理及算法可以看出,实现本方法的关键在于准确获得各条被检测线路所需的零序补偿电流。考虑到离线整定算法需要根据网络中的有关参数通过计算求出补偿电流,然后再输入到微机保护中去。这种方法需要知道单位线路长度的电容和线路长度以及其它相关电容电流值,计算结果很难准确,也会给用户带来不便,因此不宜采用。为此提出以下可行的整定计算方法。

### 1) 接地实验法

接地实验法是在装置投入运行后,在被检测线路外部做一次单相接地实验,实验后微机保护装置会根据实验结果直接得到每条线路的补偿电流并自动进行整定计算,不需人为再输入任何定值。

为了简化装置的计算,在微机装置中可只存储补偿电流的幅值,此外,还应储存对应的接地电压值  $U_0$ ,以便消除过渡电阻的影响。

在非直接接地系统中,做一次暂时性接地实验并不困难,且可以得到准确的补偿电流值。

2) 自动整定法

自动整定法是整定计算过程全部由微机本身自动完成。在检测装置投入运行后,补偿电流和零序电压均处于清零状态,待第一次发生单相接地故障时,处于区外的各条线路均可直接得到所需的补偿电流值,如果接地故障发生在所有被检测线路的外部,整定计算即可一次完成。如果在任何一条线路上,则除接地线外的其它线路可完成自动整定任务。接地故障线路查出后,其装置仍需清零,待下一次发生区外故障时,才能完成自动整定计算。

显然,这种方法是最简便易行的,只是丢失了第一次接地的检测机会。一般情况下,要在第二次接地故障时才能正确检出接地故障线路。

3) 装置整定的自动调准

由于和本线路相连的其它线路和设备有可能变动,从而导致第一次得到的补偿电流出现误差。为此,在每一次线路外部接地故障后都可自动地将上一次的定值刷新调准。

6 算例及仿真

6.1 仿真系统模型说明

仿真所用的系统模型如图 4 所示,系统参数和线路参数如图所示,发电机中性点所接的电感代表消弧线圈,开关断开时为中性点不接地,开关合上时表示中性点经消弧线圈接地。

6.2 仿真结果

6.2.1 中性点不接地系统

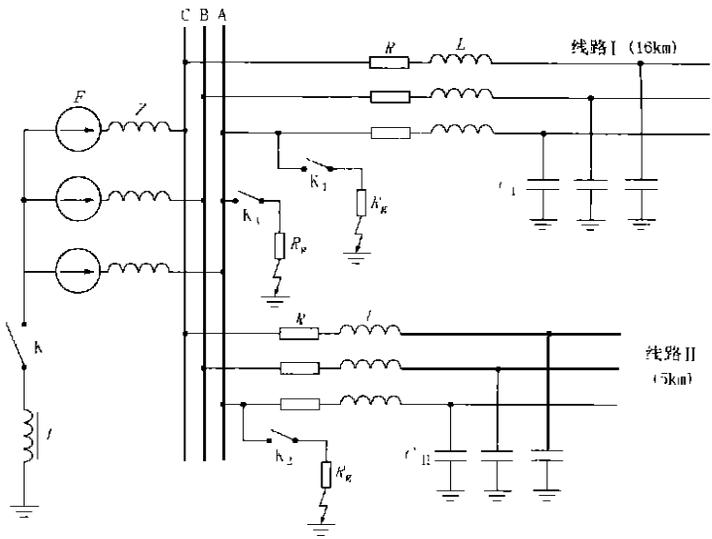
现仅以有两条长度不等地出线的系统进行仿真,仿真系统如图 4 所示,两条出线长度分别为 5km 和 16km,仿真表格中的首端指 200m 处,末端指实际线路的末端。

1) 母线故障

母线接地故障的仿真结果如表 1 所示。

表 1 中性点不接地系统母线故障仿真结果

过渡电阻(Ω)	0	100	500	1000
零序电压	10011.74	10015.45	9992.391	9921.245
补偿电流	线 0.352271	0.352402	0.351591	0.349087
线	0.110085	0.110126	0.109872	0.109090
零序电流	线 0.348898	0.352473	0.351657	0.349154
线	0.109100	0.110127	0.109874	0.109092
补偿结果	线 0.003373	0.000071	0.000066	0.000067
线	0.000985	0.000001	0.000002	0.000002



系统阻抗  $Z = 10\Omega$  电源电压  $U = 10.5\sqrt{3}kV$  消弧线圈电感  $L = 21.9H$   
 线路参数  $R_0 = 1.10\Omega/km$   $L_0 = 0.0014H/km$   $C_0 = 0.0005 \times 10^{-6}F/km$   
 $R_1 = 0.181\Omega/km$   $L_1 = 0.0011H/km$   $C_1 = 0.011 \times 10^{-6}F/km$

图 4 小接地电流仿真系统原理图

2) 短线故障

短线(线路 I)接地故障的仿真结果如表 2 所示。

表 2 中性点不接地系统线路 接地故障的仿真结果

过渡电阻(Ω)	0	100	500	1000
零序电压	10005.23	10015.63	9992.452	9920.941
补偿电流	线 0.352042	0.352408	0.351593	0.349077
线	0.110013	0.110128	0.109873	0.109086
首端 零序电流	线 0.353811	0.352479	0.351659	0.349146
线	0.353810	0.352485	0.351660	0.349141
补偿结果	线 0.001769	0.000071	0.000066	0.000069
线	0.463823	0.462613	0.461533	0.458227
零序电压	10018.45	10019.35	9996.074	9924.662
补偿电流	线 0.352508	0.352539	0.351720	0.349208
线	0.110159	0.110169	0.109913	0.109127
末端 零序电流	线 0.351541	0.352608	0.351788	0.349276
线	0.351546	0.352610	0.351785	0.349275
补偿结果	线 0.000967	0.000069	0.000069	0.000068
线	0.461705	0.462779	0.461698	0.458402

6.2.2 中性点经消弧线圈接地系统

仿真系统如图 4 所示,其中消弧线圈的电感值是按 5%的补偿度求得的。图中 k 闭合。

1) 母线故障

母线接地故障的仿真结果如表 3 所示。

表3 中性点经消弧线圈接地系统母线接地故障仿真结果

过渡电阻( )	0	100	500	1000	
零序电压	9989.758	10006.78	10006.66	10006.27	
补偿电流	线	0.351498	0.352097	0.352093	0.352079
	线	0.109843	0.110030	0.110029	0.110025
零序电流	线	0.346399	0.352164	0.352159	0.352146
	线	0.108402	0.110031	0.110030	0.110027
补偿结果	线	0.005099	0.000067	0.000066	0.000067
	线	0.001441	0.000001	0.000001	0.000002

## 2) 长线故障

线路 接地故障的仿真结果如表4所示。

表4 中性点经消弧线圈接地系统线路 接地的仿真结果

过渡电阻( )	0	100	500	1000	
零序电压	10033.13	10006.73	10006.62	10006.28	
补偿电流	线	0.353024	0.352095	0.352091	0.352079
	线	0.110320	0.110030	0.110029	0.110025
零序电流	线	0.372675	0.374462	0.374476	0.374528
	线	0.111933	0.110032	0.110031	0.110026
补偿结果	线	0.019651	0.022367	0.022385	0.022449
	线	0.001613	0.000002	0.000002	0.000001
零序电压	10011.39	10004.81	10004.56	10004.24	
补偿电流	线	0.352259	0.352028	0.352019	0.352008
	线	0.110081	0.110009	0.110006	0.110002
零序电流	线	0.372705	0.374383	0.374404	0.374451
	线	0.111807	0.110009	0.110008	0.110003
补偿结果	线	0.020446	0.022355	0.022385	0.022443
	线	0.001726	0.000000	0.000002	0.000001

## 7 结论

(1) 本文提出了适用于在中性点不接地和经消弧线圈接地的系统中发生单相接地故障时检出故障线路的新方法——零序电容电流补偿法。理论分析和仿真结果表明了这种方法的正确性和有效性。它可以满足接地故障选线的可靠性和灵敏度的要求。

(2) 零序电容电流补偿法具有以下主要特点:

- 灵敏可靠,可以正确检测出接地故障线路;
- 可以区分线路故障和线路以外的故障,例如母线故障;
- 当仅有两条出线时,可以正确选出接地故障线路;
- 选线性能基本上不受线路长度和过渡电阻的影响。

(3) 本文提出了两种简单可行的整定计算方法可供用户选用。

## 参考文献:

- [1] 贺家李,宋从矩.电力系统继电保护原理.北京:电力工业出版社,2000.

收稿日期: 2001-03-26

作者简介: 葛耀中(1929-),男,教授,博士,长期从事自适应微机保护的教学与研究。

## A new method for detecting single phase-to-ground fault line in non-solidly grounded network

GE Yao-zhong<sup>1</sup>, DOU Cheng-guo<sup>2</sup>

(1. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** A new method for detecting single phase-to-ground fault line in non-solidly grounded networks——zero sequence capacitance current compensation method is presented in the paper. Theoretical analysis and simulation result have shown that the method can be successfully used in isolated neutral network or a network grounded with a neutral compensator coil. This method is easily implemented in a microprocessor based relay with high reliability and sensitivity.

**Keywords:** detection of single phase-to-ground line; protective relaying; non-solidly grounded network

## 许继 20kV 干式变压器样机通过评审

日前,许继变压器公司研制的用于国家重点工程三峡工程的20kV干式变压器样机顺利通过专家委员会评审,这对于保证许继签定的三峡工程18台20kV干式变压器供货合同的按时完成有着重要意义。

在评审会上,由沈阳变压器研究所、中国长江水利委员会设计院、武汉高压研究所、西安高压电气研究所和长江三峡电厂等单位的专家、高工组成的评审会认真听取了许继变压器公司技术负责人关于三峡工程20kV干式变压器样机的研制和检测情况介绍。随后,各位专家来到许继变压器公司,本着对三峡工程高度负责的态度,详细询问了该样机的生产情况,并分别考察了成品车间、线圈车间、套装工段、浇注工段等场所。

鉴于许继20kV干式变压器样机已通过国家变压器质量监督检验中心的全部性能试验,该样机的绝缘性能和技术参数符合国家标准要求,产品图样与技术文件完整、统一,质量保证体系完善,生产技术和工艺先进,外观美观,评审委员会最后一致认为:许继20kV干式变压器样机技术指标符合三峡合同要求,主要性能指标达到国际先进水平。