

# 中小型水电站中发电机定子单相接地保护原理的探讨

穆大庆<sup>1</sup>, 尹项根<sup>2</sup>

(1. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410076; 2. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 针对中小型水电站的发电机提出了一种具有选择性的发电机定子单相接地保护原理, 该原理是利用比较发电机各相之间出线侧与中性点侧差动电流工频变化量的关系来判断定子单相接地故障。理论分析和 MATLAB 仿真结果表明, 正常运行时各相差动电流工频变化量的大小及相位相同; 发电机外部系统单相接地时, 故障相差动电流工频变化量的大小及相位与非故障相也一致; 而发电机定子绕组内部单相接地时, 故障相差动电流工频变化量远大于非故障相差动电流工频变化量, 且方向相反。因此该保护原理可较好地地区分发电机定子绕组内部单相接地和外部系统单相接地, 其构成原理较简单、判别能力较强, 有利于改善中小型水电站中发电机定子单相接地保护的性能。

**关键词:** 中小型水电站; 定子接地保护; 相间工频变化量

**中图分类号:** TM772 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)22-0010-06

## 0 引言

目前在发电机定子单相接地保护中, 零序电压保护属于无选择性保护<sup>[1-3]</sup>, 即不能判断接地点是否在本发电机定子内部。由零序电压和三次谐波电压构成的 100% 定子接地保护在定子绕组靠近中性点的 50% 以内单相接地时可由三次谐波保护正确反映, 但在 50% 以上定子单相接地时三次谐波保护不能反映, 而是由零序电压保护来反映, 因此在 50% 以上范围单相接地仍存在无选择性问题, 即不能很好地区分单相接地是在 50% 以上的定子绕组内部还是在发电机定子绕组外部。然而在大多数中小型水电站发电机组的接线中往往存在一机多变, 多机多变, 甚至还具有机压出线负荷等多种接线形式<sup>[4]</sup>。因此在中小型水电站中采用具有选择性的发电机定子接地保护就有着一定的意义。零序电流保护是一种具有选择性的接地保护, 然而由于该保护的整定值需躲过发电机本身的对地电容电流, 在整定时其值较难确定, 误差较大, 使保护的可靠性不高, 而且发电机机压母线上所连接的元件较少时, 该保护的动作灵敏度较低<sup>[1,2]</sup>。行波保护也是一种具有选择性的定子接地保护<sup>[3]</sup>, 但是由于发电机所对应的行波首半波持续时间相应很短, 使该保护的测量和判定有较大困难, 而且在工频相电压瞬时值过零点附近发生定子单相接地时, 该保护很难正确反映, 因此行波保护性能也存在不足<sup>[5]</sup>。高次谐波保护是另一种有选择性的接地保护, 然而高次谐波分

量的大小与电网结构、运行方式、故障处过渡电阻等诸多因素有关, 因此灵敏度往往也受到影响。

本文所探讨的新保护原理也属于一种有选择性的定子接地保护原理, 它是“相间工频变化量比较法”小电流接地选线原理<sup>[6]</sup>在发电机定子接地保护中的应用, 是利用发电机各相出线侧与中性点侧差动电流的工频变化量的相量差之间的关系来判断单相接地点是否在本发电机定子绕组内部, 其构成原理较为简单, 能比较明显地区分发电机定子绕组内部接地还是外部其他元件接地, 而且整定时不必考虑发电机对地电容参数。尽管该保护原理对数据采集系统的分辨率要求相对较高且在靠近发电机定子中性点附近存在很小的死区, 但仍不失为一种具有选择性的有效的发电机定子单相接地保护原理。

## 1 发电机定子绕组发生单相接地时电容电流的变化特点

### 1.1 正常运行时发电机两侧各相电容电流

如图 1 所示为一台发电机供电系统, 发电机外部所有元件用一个等效网络表示, 发电机各相对地电容用集中参数  $C_f$  表示, 外部等效网络各相对地总等效电容用集中参数  $C_{\Sigma}$  表示, 发电机出口侧及中性点侧的电容电流皆以指向母线的方向为正方向, 以中性点为电位参考点。下标 (0) 代表系统正常运行状态, 下标 I 代表发电机出口侧, 下标 II 代表发电机中性点侧, 下标 f 代表本台发电机, 下标 x 代表本发电机外部等效网络。

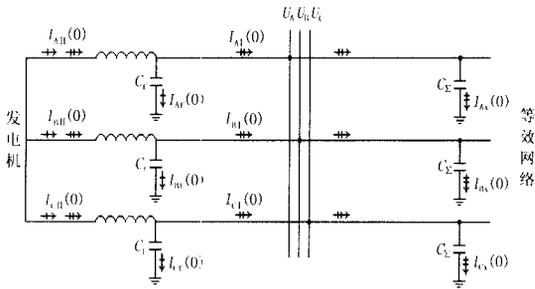


图 1 正常运行时的电容电流分布

Fig 1 Distribution of capacitive current on normal condition

出口侧各相电容电流分别为:

$$I_{A(0)} = I_{AX(0)} = j C_{\Sigma} U_A$$

$$I_{B(0)} = I_{BX(0)} = j C_{\Sigma} U_B$$

$$I_{C(0)} = I_{CX(0)} = j C_{\Sigma} U_C$$

中性点侧各相电容电流分别为:

$$I_{AII(0)} = I_{AX(0)} + I_{Af(0)} = j (C_{\Sigma} + C_f) U_A$$

$$I_{BII(0)} = I_{BX(0)} + I_{Bf(0)} = j (C_{\Sigma} + C_f) U_B$$

$$I_{CII(0)} = I_{CX(0)} + I_{Cf(0)} = j (C_{\Sigma} + C_f) U_C$$

发电机各相两侧电容电流的相量差 (差动电流) 分别为:

$$I_{A-cd(0)} = I_{AII(0)} - I_{AI(0)} = j C_f U_A$$

$$I_{B-cd(0)} = I_{BII(0)} - I_{BI(0)} = j C_f U_B$$

$$I_{C-cd(0)} = I_{CII(0)} - I_{CI(0)} = j C_f U_C$$

### 1.2 外部网络单相接地时发电机两侧各相电容电流

如图 2 所示,外部网 A 相接地。电容电流以指向母线为正方向。

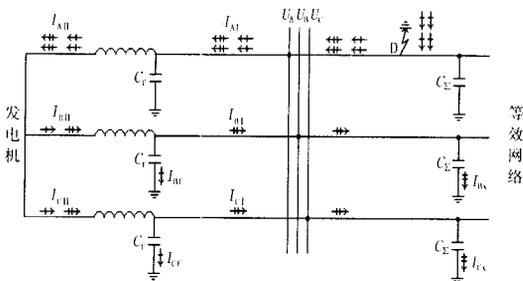


图 2 外部网络单相接地时的电容电流分布

Fig 2 Distribution of capacitive current when single phase ground fault occurs in outside system

此时各相对地电压分别为:

$$U_{AD} = 0, \quad U_{BD} = U_B - U_A, \quad U_{CD} = U_C - U_A$$

出口侧各相电容电流分别为:

$$I_{A1} = - (I_{BX} + I_{CX} + I_{Bf} + I_{Cf}) = - j (C_{\Sigma} + C_f) \cdot (U_B + U_C - 2U_A)$$

$$I_{B1} = I_{BX} = j C_{\Sigma} (U_B - U_A)$$

$$I_{C1} = I_{CX} = j C_{\Sigma} (U_C - U_A)$$

中性点侧各相电容电流分别为:

$$I_{AII} = I_{AI} = j 3 (C_{\Sigma} + C_f) U_A$$

$$I_{BII} = I_{BX} + I_{Bf} = j (C_{\Sigma} + C_f) (U_B - U_A)$$

$$I_{CII} = I_{CX} + I_{Cf} = j (C_{\Sigma} + C_f) (U_C - U_A)$$

发电机各相两侧电容电流的相量差 (差动电流) 分别为:

$$I_{A-cd} = I_{AII} - I_{AI} = 0$$

$$I_{B-cd} = I_{BII} - I_{BI} = j C_f (U_B - U_A)$$

$$I_{C-cd} = I_{CII} - I_{CI} = j C_f (U_C - U_A)$$

发电机各相差动电流的工频变化量 (故障后与故障前的相量差) 分别为:

$$I_{A-cd} = I_{A-cd} - I_{A-cd(0)} = - j C_f U_A$$

$$I_{B-cd} = I_{B-cd} - I_{B-cd(0)} = - j C_f U_A$$

$$I_{C-cd} = I_{C-cd} - I_{C-cd(0)} = - j C_f U_A$$

可见发电机各相差动电流的工频变化量均相同。因此任意两相差动电流的工频变化量的相量差均为 0。

### 1.3 发电机定子绕组单相接地时发电机两侧各相电容电流

如图 3 所示,发电机定子绕组 A 相接地。假设接地点至中性点之间绕组的匝数占整支绕组匝数的百分比为  $a$ , 电容电流仍以指向母线为正方向。

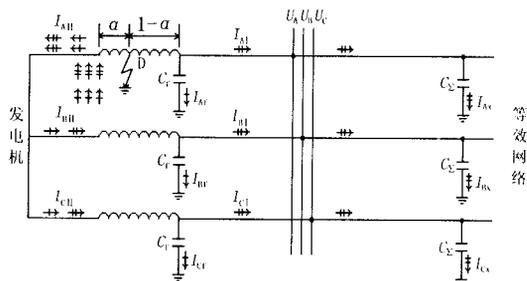


图 3 发电机定子绕组单相接地时的电容电流分布

Fig 3 Distribution of capacitive current when single phase ground fault occurs in generator stator

此时各相对地电压分别为:

$$U_{AD} = U_A - U_A, \quad U_{BD} = U_B - U_A$$

$$U_{CD} = U_C - U_A$$

出口侧各相电容电流分别为:

$$I_{A1} = I_{AX} = j C_{\Sigma} (U_A - U_A)$$

$$I_{B1} = I_{BX} = j C_{\Sigma} (U_B - U_A)$$

$$I_{C1} = I_{CX} = j C_{\Sigma} (U_C - U_A)$$

中性点侧各相电容电流分别为:

$$I_{AII} = - (I_{BX} + I_{CX} + I_{Bf} + I_{Cf}) = - j (C_{\Sigma} + C_f) \cdot (U_B + U_C - 2 U_A)$$

$$I_{BII} = I_{BX} + I_{Bf} = j (C_{\Sigma} + C_f) (U_B - U_A)$$

$$I_{CII} = I_{CX} + I_{Cf} = j (C_{\Sigma} + C_f) (U_C - U_A)$$

发电机各相两侧电容电流的相量差 (差动电流) 分别为:

$$I_{A-cd} = I_{AII} - I_{AI} = j C_f U_A + j 2 C_f U_A + j 3 C_{\Sigma} U_A$$

$$I_{B-cd} = I_{BII} - I_{BI} = j C_f (U_B - U_A)$$

$$I_{C-cd} = I_{CII} - I_{CI} = j C_f (U_C - U_A)$$

发电机各相差动电流的工频变化量 (故障后与故障前的相量差) 分别为:

$$\Delta I_{A-cd} = I_{A-cd} - I_{A-cd(0)} = j (2C_f + 3C_{\Sigma}) U_A$$

$$\Delta I_{B-cd} = I_{B-cd} - I_{B-cd(0)} = -j C_f U_A$$

$$\Delta I_{C-cd} = I_{C-cd} - I_{C-cd(0)} = -j C_f U_A$$

可见发电机故障相差动电流的工频变化量大于非故障相差动电流的工频变化量。即使在外部网络总对地电容  $C_{\Sigma}$  很小的情况下也大到 2 倍以上, 而且方向相反; 而两个非故障相的情况一样。因此, 故障相与非故障相的差动电流的工频变化量的相量差

$\Delta I_{AB-cd} = \Delta I_{A-cd} - \Delta I_{B-cd} = j (3C_{\Sigma} + 3C_f) U_A$ , 其值为非故障相差动电流的工频变化量  $\Delta I_{C-cd}$  的 3 倍以上。

## 2 仿真波形及结果分析

### 2.1 仿真模型

采用 Matlab 仿真, 仿真模型电路如图 4 所示。CT<sub>1</sub>、CT<sub>2</sub> 分别为发电机中性点侧和出口侧的电流互感器, 假设两侧电流互感器误差为 10%, 用误差模块  $K=1.1$  仿真。

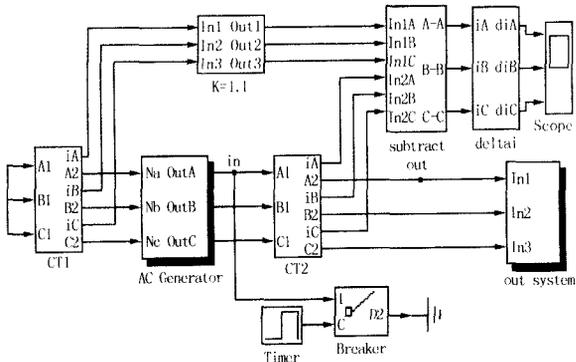


图 4 仿真模型图

Fig 4 Diagram of simulation model

交流发电机集成仿真模型 AC Generator 的参数为: 单相电压幅值  $U_m = 8573$  V (即线电压有效值为 10.5 kV), 单相等效内阻抗  $R_f + jX_f = 0.1 + j1.26$ , 单相等效对地电容  $C_f = 0.3 \mu F$ 。

外部系统集成仿真模型 out system 的内部结构

如图 5 所示。长度为 10 km 的 10 kV 线路 line1 参数为  $r=0.132$  /km,  $l=1.254$  mH/km,  $c=0.00974$   $\mu F$ /km。变压器 T<sub>2</sub> 单相等效对地电容  $C_f=0.01$   $\mu F$ 。负载 load1 和 load2 的参数皆为  $P=2.5$  MW,  $Q=1.5$  Mvar, 总负荷电流为 320 A。

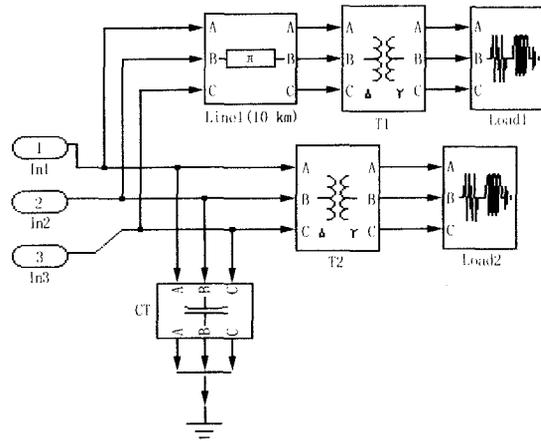


图 5 外部系统仿真模块内部结构

Fig 5 Inner part of simulation module of outside system

### 2.2 仿真波形及结果分析

假定在发电机内部点 in 及外部点 out 分别发生 A 相接地故障, 发电机出口与中性点两侧各相差动电流的工频变化量  $d_iA$ 、 $d_iB$ 、 $d_iC$  的波形如图 6 所示。

由仿真波形图可见: 在发电机正常负荷电流为 320 A 的条件下, 当发电机内部 A 相单相接地故障时, 两个非故障相的差动电流的工频变化量  $d_iB$ 、 $d_iC$  的稳态值基本一致, 幅值为 0.77 A 左右, 而故障相的差动电流的工频变化量  $d_iA$  的稳态值的幅值为 2.23 A 左右, 其值大于非故障相的  $d_iB$  和  $d_iC$ , 且相位与非故障相的刚好相反; 当发电机外部单相接地故障时, 故障相及非故障相的差动电流的工频变化量  $d_iA$ 、 $d_iB$ 、 $d_iC$  的稳态值的大小及相位皆基本一致 (幅值为 0.77 A 左右)。该仿真结果与理论分析相符。

另外, 加入误差模块 (考虑互感器误差) 与取消误差模块 (不考虑互感器误差) 的仿真波形完全一致。这说明互感器误差不会影响差动电流的工频变化量。

## 3 相间工频变化量保护的基本构成原理及可行性分析

### 3.1 基本构成原理

利用零序电压作为接地故障的启动判断元件, 从而保证在系统正常运行时定子接地保护被闭锁。

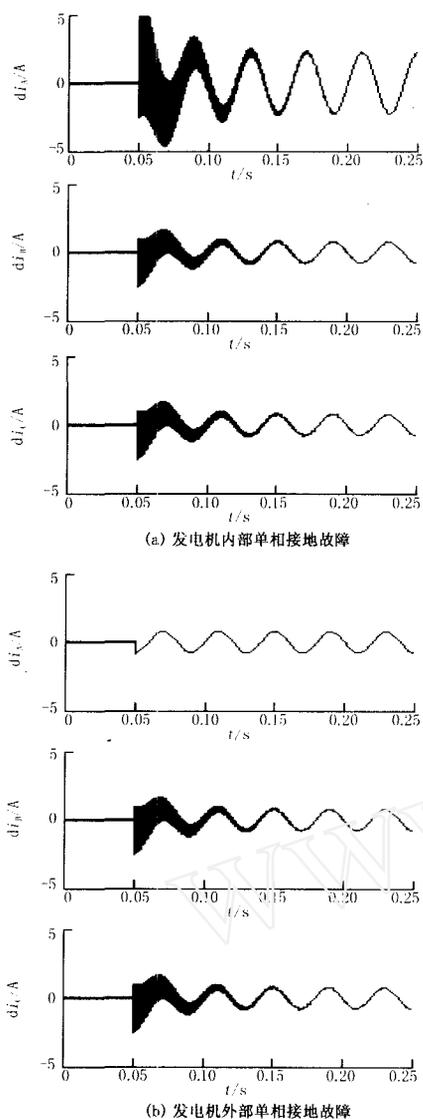


图 6 单相接地故障时的仿真波形图

Fig 6 Simulation waveforms of single phase ground fault

在获取发电机中性点侧与出口侧的差动电流时,可先将发电机两侧 CT 的二次侧接成差动回路,形成差动电流后再送入保护装置;也可将发电机两侧 CT 的二次电流直接送入保护装置,由保护装置内对两侧采样值进行相减而获得差动电流。获得差动电流后,再提取出各相差动电流的工频变化量  $\dot{i}_{A-cd}$ 、 $\dot{i}_{B-cd}$ 、 $\dot{i}_{C-cd}$ , 然后两两相差构成相间工频变化量  $\dot{i}_{AB-cd}$ 、 $\dot{i}_{BC-cd}$ 、 $\dot{i}_{CA-cd}$ , 将某两相相间工频变化量 (例如  $\dot{i}_{AB-cd}$ ) 的模值与另外一相的工频变化量 (例如  $\dot{i}_{C-cd}$ ) 模值的  $m$  倍进行比较,其中  $m$  为小于 1 的一个设定系数 (例如取  $m=0.5$ )。当发电机定子绕组内部单相接地故障时,故障相与两个非故障相的相间工频变化量较大,且一定大于非故障相的工

频变化量,若  $|\dot{i}_{AB-cd}| > m \cdot |\dot{i}_{C-cd}|$  且  $|\dot{i}_{CA-cd}| > m \cdot |\dot{i}_{B-cd}|$ , 则判为定子 A 相接地,若  $|\dot{i}_{AB-cd}| > m \cdot |\dot{i}_{C-cd}|$  且  $|\dot{i}_{BC-cd}| > m \cdot |\dot{i}_{A-cd}|$ , 则判为定子 B 相接地,若  $|\dot{i}_{BC-cd}| > m \cdot |\dot{i}_{A-cd}|$  且  $|\dot{i}_{CA-cd}| > m \cdot |\dot{i}_{B-cd}|$ , 则判为定子 C 相接地;当发电机外部网络单相接地故障时,三个相间工频变化量均为零,均小于对应的另外一相的工频变化量模值的  $m$  倍,则保护不动作。

### 3.2 可行性理论分析

虽然各相电流中除了电容电流以外还都包含有幅值较大的负荷电流以及存在各种因素产生的电流误差,但由于本保护原理采用的是发电机两侧差动电流的工频变化量,即差动电流本时刻的采样值与其前一个周波 (或几个周波) 的相应时刻的采样值的差,而各相负荷电流以及电流误差在发生单相接地故障前后几个周波的短时间内的相应时刻并不会发生变化,因此各相差动电流的工频变化量基本上就是各相电容电流变化量。另外,由于单相接地故障前后的电流变化不大,电流互感器一直工作在磁饱和曲线的线性区,故电流互感器误差为线性误差,所以各相差动电流的工频变化量基本不受负荷电流及电流误差的影响。

假设故障后采样时刻中性点侧某相负荷电流及对地电容电流分别为  $\dot{i}_{h1}$  及  $\dot{i}_{c1}$ , 电流互感器  $CT_1$  变比为  $n_1$ , 激磁电流为  $\dot{i}_{l1}$ ; 出口侧该相负荷电流及对地电容电流分别为  $\dot{i}_{h2}$  及  $\dot{i}_{c2}$ , 电流互感器  $CT_2$  变比为  $n_2$ , 激磁电流为  $\dot{i}_{l2}$ 。

$$\text{则 } CT_1 \text{ 二次侧电流为: } \frac{\dot{i}_{h1} + \dot{i}_{c1}}{n_1} - \dot{i}_{l1},$$

$$CT_2 \text{ 二次侧电流为: } \frac{\dot{i}_{h2} + \dot{i}_{c2}}{n_2} - \dot{i}_{l2},$$

两侧差动电流为:

$$\dot{i}_{cd} = \left( \frac{\dot{i}_{h1}}{n_1} - \frac{\dot{i}_{h2}}{n_2} \right) + \left( \frac{\dot{i}_{c1}}{n_1} - \frac{\dot{i}_{c2}}{n_2} \right) - (\dot{i}_{l1} - \dot{i}_{l2})$$

以下标  $[0]$  代表故障前相应采样时刻,则差动电流的工频变化量:

$$\dot{i}_{cd} = \left( \frac{\dot{i}_{h1}}{n_1} - \frac{\dot{i}_{h2}}{n_2} \right) + \left( \frac{\dot{i}_{c1}}{n_1} - \frac{\dot{i}_{c2}}{n_2} \right) - (\dot{i}_{l1} - \dot{i}_{l2}) - \left( \frac{\dot{i}_{h1[0]}}{n_1[0]} - \frac{\dot{i}_{h2[0]}}{n_2[0]} \right) + \left( \frac{\dot{i}_{c1[0]}}{n_1[0]} - \frac{\dot{i}_{c2[0]}}{n_2[0]} \right) - (\dot{i}_{l1[0]} - \dot{i}_{l2[0]})$$

由于故障前后极短时间 (几个周波) 内相应时刻的负荷电流、CT 的变比以及激磁电流不会发生变化,即  $\dot{i}_{h1[0]}$ 、 $\dot{i}_{h2[0]}$ 、 $n_1[0]$ 、 $n_2[0]$ 、 $\dot{i}_{l1[0]}$ 、 $\dot{i}_{l2[0]}$  与相应的  $\dot{i}_{h1}$ 、 $\dot{i}_{h2}$ 、 $n_1$ 、 $n_2$ 、 $\dot{i}_{l1}$ 、 $\dot{i}_{l2}$  相等,则差动电流的工频变化

量  $i_{cd} = (\frac{i_{c1} - i_{c1/0.1}}{n_1} - \frac{i_{c2} - i_{c2/0.1}}{n_2})$ 。可见尽管差动电流  $i_{cd}$  受到负荷电流以及 CT 误差的影响,但是差动电流的工频变化量  $i_{cd}$  却基本不受其影响,而只反映出故障前后电容电流的变化量。

尽管单相接地故障时电容电流值相对较小,相间工频变化量保护方式对数据采集系统的分辨率要求相对较高,但目前微机数据采集系统的分辨率是可以满足要求的。以前面仿真模型的参数为例,发电机负荷电流有效值为 320 A,相应的幅值为 452 A,发电机内部单相接地时,故障相差动电流工频变化量幅值为 2.23 A,非故障相差动电流工频变化量幅值为 0.77 A。目前微机保护中普遍采用的 VFC110 的分辨率达到甚至超过 14 位,高速高精度的 ADC 也不鲜见,如 ADC1140 的分辨率为 16 位。假设以 500 A 为满刻度,14 位的分辨率可达到 0.0305 A,可以满足相间工频变化量保护进行故障判断的要求。

当发电机定子靠近中性点附近发生单相接地时(即趋近于零时),由于差动电流的相间工频变化量小到难以测量的程度以及零序电压启动元件也因零序电压过小而不能启动,因此该保护在靠近定子中性点附近存在死区。然而对于中小型水电站的发电机来说,由于定子接地保护的保护范围一般并不要求达到定子的 100%,因此可以直接采用该保护方式。如果有必要的话,该保护方式也可以和三次谐波保护等共同配合实现有选择性的 100% 的定子接地保护。

### 3.3 “相间工频变化量比较法”保护原理在实验室物理模拟系统上的测试结果及说明

由于实验室的物模发电机组不具备三相中性点引出线,难以对实际发电机进行实验测试,但通过在实验室物理模拟系统中小电流接地系统的 35 kV 线路上进行单相接地故障测试,可从侧面验证“相间工频变化量比较法”原理应用于中小型水电站发电机定子接地保护时,提取单相接地故障的接地电容电流的可行性。

实验测试以实验室物理模拟系统中变电站的 35 kV 小电流接地系统作为对象,单相接线图如图 7 所示。用容量 5 kVA 模拟 7500 MVA,功率模拟比为 150000,35 kV 用 220 V 电压模拟,电压模拟比 159.1,电流模拟比 942.8,阻抗模拟比 0.1688。

变电站两台变压器 T1、T2 原型参数为:

2 × SFPS3 - 120000/220,  $S_c: 2 \times (120/120/60)$  MVA,  $U_c: 220 \pm 2 \times 5\% / 121/38.5$  kV,

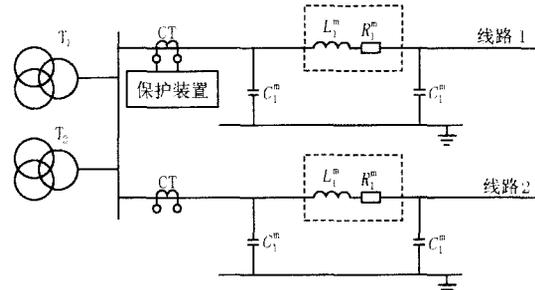


图 7 实验测试模型单相接线图

Fig 7 Single-phase configuration of test model

$Y_N, y_{n0}, d_{11}, U_{k1-2}\% = 14.5, U_{k1-3}\% = 23,$   
 $U_{k2-3}\% = 8.1, P_0 = 163$  kW,  $P_{k1-2} = 477$  kW,  
 $P_{k1-3} = 150$  kW,  $P_{k2-3} = 102$  kW。

模型参数为:

2 × SGS - 0.8/380 V,  $S_c: 2 \times (0.8/0.8/0.4)$  kVA,  $U_c: 380 \pm 2 \times 5\% / 242/242$  V,  
 $Y_N, y_{n0}, d_{11}, U_{k1-2}\% = 14.5, U_{k1-3}\% = 23,$   
 $U_{k2-3}\% = 8.1, P_0 = 1.08$  W,  $P_{k1-2} = 3.18$  W,  
 $P_{k1-3} = 1$  W,  $P_{k2-3} = 0.68$  W。

两条 35 kV 线路的原型参数为: 20 km/条,导线型号 LGJ - 240,水平布置,相间距 3 m,  $r_1 = 0.132$  /km,  $x_1 = 0.394$  /km,  $c_1 = 0.0092$   $\mu$ F/km

模型参数为: 每条 20 km 线路用一个  $\pi$  型等值电路表示,各元件参数为:  $L_1^m = 0.1487$  H,  $R_1^m = 15.63$   $\Omega$ ,  $I_N = 2$  A, 20 A 电流不饱和;  $C_1^m = 0.031$   $\mu$ F,  $U_N = 1000$  V。

小电流接地选线保护实验研究装置采用通用 80C196 单片机实验系统,利用 SUPER 系列的 ICE - 16 单片机仿真器配合系统计算机进行调试仿真,“相间工频变化量比较法”选线保护程序在系统计算机上编写调试好后通过仿真器下载到单片机实验系统上运行,CT 采用星格牌的 5/5 小型电流变换器,三相输入电流的 A/D 转换利用 80C196 芯片中的 3 路 10 位分辨率的 A/D 通道 ACH. 4, ACH. 5, ACH. 6。

当线路空载时,用毫安表直接测得线路上空载电容电流约为 2 mA (按模拟比相当于原型系统的 1.89 A),接上电阻负载后每条线路上负载电流皆调整为 1 A (按模拟比相当于原型系统的 943 A)。将保护装置设置在线路 1 上,实验室物理模拟测试结果如表 1。

从上面测试结果可见,“相间工频变化量比较法”可正确判断单相接地故障是本线路接地还是其他线路接地,从而说明“相间工频变化量比较法”可

表 1 实验室物理模拟测试结果表

Tab 1 Results of physical model test in lab

单相接地	线路 1			线路 2		
	故障位置	A相	B相	C相	A相	B相
保护动作信号	动作	动作	动作	不动作	不动作	不动作

从 1 A 左右的负荷电流中提取出几毫安的接地电容电流 (即相当于原型系统中从 943 A 的负荷电流中提取出 2A 左右的接地电容电流), 并正确判断。

#### 4 结论

文中提出了利用比较相与相之间发电机两侧差动电流的工频变化量而构成的相间工频变化量定子接地保护原理。理论分析和仿真结论都说明, 该保护原理能够较好地判别单相接地点是在发电机外部网络中还是在发电机内部定子绕组中, 作为有选择性的发电机定子单相接地保护原理, 其构成简单、判别能力较强。因此这种新保护原理对改善中小型水电站中发电机定子接地保护性能有着一定意义。

#### 参考文献:

- [1] 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 Principle of Protective Relaying in Electric Power System, Third Edition [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1994.
- [2] 王广延, 吕继绍. 电力系统继电保护原理与运行分析 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.  
WANG Guang-yan, L ū Ji-shao Principle and Operating Analysis of Protective Relaying in Electric Power System [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1995.
- [3] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用 (第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.  
WANG Wei-jian Electric Main Equipment Protection Their Theory and Application, Second Edition [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [4] 范锡普. 发电厂电气部分 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1987.  
FAN Xi-pu Power Generation Plant, Electric Part [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1987.
- [5] 王维俭. 发电机变压器继电保护应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.  
WANG Wei-jian Application of the Protection of Generator & Transformer [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.
- [6] 穆大庆. 消弧线圈接地电网中单相接地保护的新原理探讨 [J]. 继电器, 2001, 29 (6): 26-27.  
MU Da-qing Study on a New Principle of Single-phase Earth Protection for Arc-suppression Coil Grounded System [J]. Relay, 2001, 29 (6): 26-27.

收稿日期: 2005-03-14; 修回日期: 2005-05-14

作者简介:

穆大庆 (1964 - ), 男, 工程硕士, 副教授, 从事电力系统继电保护及自动控制技术方面的教学、研究工作; E-mail: Mudq@csust.edu.cn

尹项根 (1954 - ), 男, 教授, 博导, 从事电力系统继电保护与安全稳定控制等领域的教学、研究工作。E-mail: Xgyin@mail.hust.edu.cn

### Discussion on single-phase earth protection of generator stator in small-and-medium-sized hydropower station

MU Da-qing<sup>1</sup>, YN Xiang-gen<sup>2</sup>

(1. Changsha University of Science & Technology, Changsha 410076, China;

2. Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** This paper presents a new principle of generator stator single-phase earth protection with selectivity. This principle determines stator single-phase earth fault by comparing fundamental component mutation of differential current between phases. Theoretical analysis and MATLAB simulation result have shown that the fundamental component mutation of differential current of fault phase is the same as that of non-fault phase when single-phase earth fault is outside the stator and its value is more larger than that of non-fault phase and it is of opposite phase to non-fault phase when single-phase earth fault occurs in the stator. This principle is of simpleness and strong distinguishing capability. It is beneficial to the performance improvement of generator stator earth protection in small-and-medium-sized hydropower station.

**Key words:** small-and-medium-sized hydropower station; stator earth protection; fundamental component mutation between phases