

# 零序方向元件选择性定子接地保护的分析

谈涛,陈俊,王翔,徐金

(南京南瑞继保电气有限公司,江苏南京,211100)

**摘要:**针对目前中小水电机组多采用扩大单元接线方式,定子接地保护不能正确分辨故障机组,导致单元全停,扩大故障范围。文中计算分析了一种基于零序方向元件的选择性定子接地保护,通过现场试验数据,论证了该原理的正确性与可行性。

**关键词:**选择性保护;扩大单元机组;定子接地故障;零序方向;发电机

**中图分类号:**TM77

**文献标志码:**B

**文章编号:**1009-0665(2010)05-0040-04

随着水电技术的日益发展,很多单机容量小的机组采取扩大单元接线方式,以降低建设成本。扩大单元接线方式中,发电机中性点经配电变压器接地,任一台发电机发生定子接地故障,会导致并列运行的多台发电机同时跳闸<sup>[1]</sup>,影响了机组的安全高效运行,所以必须寻找一种能够正确区分机组区内、区外故障的定子接地保护。现有的定子接地保护一般采用基波零序电流、基波零序电压、三次谐波和低频注入信号等方法,虽然这些方法能有效地保护100%定子接地,但是用于扩大单元接线机组上依然不能区分区内和区外故障。业内提出过一种基于行波方向的定子接地保护,原理上能正确区分故障范围,但是由于行波只在故障瞬时0.2~0.3 ms时间出现,现有的保护很难捕捉,目前尚处于理论研究阶段<sup>[1]</sup>。

## 1 理论分析

### 1.1 以三机一变扩大单元接线方式为分析模型

三机一变扩大单元接线方式如图1所示。为了计算方便,假设同一个单元机组的容量、定子绕组对地电容、机端出线电缆对地电容、变压器低压侧母排对地电容、接地变以及二次负载的参数均相同。图1对应的零序等值电路如图2所示。

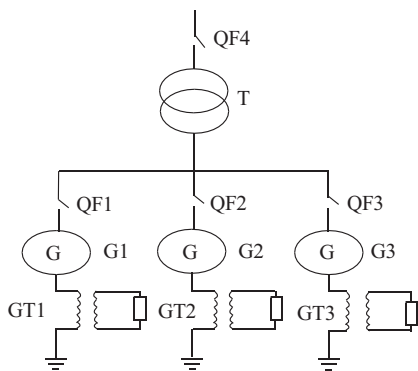


图1 扩大单元接线方式

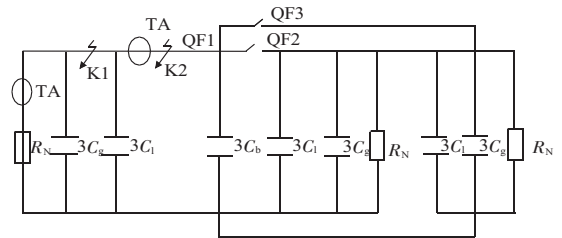


图2 零序等效网络图

### 1.2 相关理论计算和数据分析

(1)单台机组区外故障理论计算。假设在发电机出口开关下端发生单相金属性接地,零序网络图如图3所示,不考虑接地变压器漏阻抗和接地变压器励磁绕组的影响。

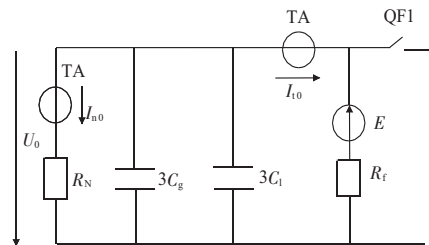


图3 单台机组区外故障

$$\dot{I}_{n0} = \frac{\dot{U}_0}{R_N} \quad (1)$$

$$3\dot{I}_{t0} = -\frac{\dot{U}_0}{R_N} - 3j\omega(C_g + C_1) \times \dot{U}_0 \quad (2)$$

由式(1)、式(2)得:

$$\dot{I} = 3\dot{I}_{t0} + \dot{I}_{n0} = -3j\omega(C_g + C_1) \times \dot{U}_0 \quad (3)$$

由式(3)得合成零序电流 $I_0$ 滞后机端零序电压 $U_0$  90°。

(2)单台机组试验数据分析。以某电站5号机组试验数据为计算模型,该机组具体技术参数为:发电机额定容量为42 MW,发电机额定功率因数为0.92,机端额定电压为13.8 kV,机端电压互感器(TV)变比为7.97 kV/57.74 V/33.33 V,中性点接地变变比为13.8

kV/230 V(173 V),机端零序电流互感器(TA)变比为 20 A/2 A,中性点接地变二次负载为  $R=0.24 \Omega$ ,中性点零序 TA 变比为 600 A/1 A。在发电机开关柜机端断路器下端口用铜辫子线设置短路点,手动增加励磁,使机端电压达到 0.75 kV。计算发电机机端电压二次值:

$$\dot{U}_{10} = \frac{0.75}{7.97} \times 57.74 = 5.43 \text{ V}$$

中性点零序电压二次值:

$$\dot{U}_{n0} = \left( \frac{750}{\sqrt{3}} \times \frac{13800}{230} \right) \times \frac{173}{230} = 5.43 \text{ V}$$

计算中性点零序电流:

$$i_{n0} = \frac{(5.43 \times \frac{230}{173})}{\frac{0.24}{600}} = 51.17 \text{ mA}$$

由式(2)计算机端零序电流:

$$3\dot{I}_{10} = \frac{\frac{750}{1.732}}{0.24 \times \left( \frac{13800}{230} \right)^2} - \frac{20}{2}$$

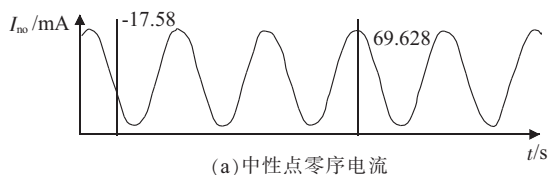
$$3 \times 2 \times 50 \times 3.14 \times (0.791 + 0.1088) \times 10^{-6} \times \frac{750}{\sqrt{3}} = \frac{20}{2}$$

$$62.08 \angle 216^\circ \text{ mA}$$

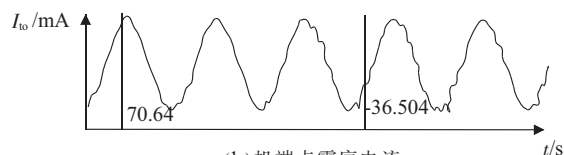
计算出合成零序电流:

$$\dot{I}_0 = 3\dot{I}_{10} + \dot{I}_{n0} = 62.08 \angle 216^\circ + 51.17 = 36.65 \angle -88.52^\circ \text{ mA}$$

由此可见,合成零序电流滞后机端零序电压  $88.52^\circ$ ,和式(3)分析结果基本一致。计算结果与试验录波图(瞬时值录波)数据基本一致,如图4所示。



(a)中性点零序电流



(b)机端点零序电流

图4 单机区外故障录波

### 1.3 单台机组区内故障理论计算

假设在发电机机端汇流母排发生单相金属性接地,零序网络图如图5所示。计算时不考虑接地变

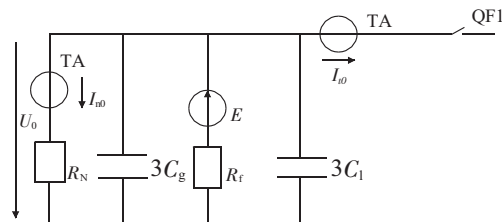


图5 单台机组区内故障

器漏阻抗和接地变压器励磁绕组的影响。

$$\dot{I}_{n0} = \frac{\dot{U}_0}{R_N}$$

$$3\dot{I}_{10} = 0$$

$$\dot{I}_0 = 3\dot{I}_{10} + \dot{I}_{n0} \quad (5)$$

由式(5)可得,在忽略一切感抗、容抗的影响下,中性点零序电流滞后零序电压  $0^\circ$ 。

以某电站5号机组试验数据为计算模型,计算分析试验数据。在发电机出口汇流母排用铜辫子线设短路点,手动增加励磁使机端电压达到 0.75 kV。发电机中性点零序电压二次值为:

$$\dot{U}_{n0} = \frac{750}{\sqrt{3}} \times \frac{173}{230} = 5.43 \text{ V}$$

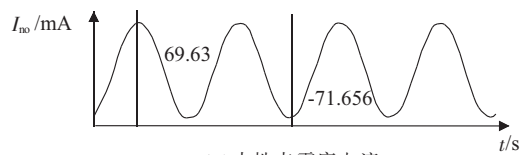
中性点零序电流:

$$i_{n0} = \frac{(5.43 \times \frac{230}{173})}{\frac{0.24}{600}} = 50.13 \text{ mA}$$

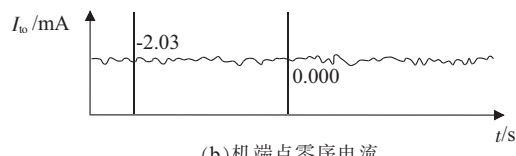
合成零序电流:

$$\dot{I}_0 = 3\dot{I}_{10} + \dot{I}_{n0} = 50.13 \angle 0^\circ \text{ mA}$$

由此可见,计算结果与试验所录采样数据基本一致。试验录波数据(瞬时值录波)如图6所示。



(a)中性点零序电流



(b)机端点零序电流

图6 单机区内故障保护录波

### 1.4 零序方向元件的整定

(1)单台机组区内故障: QF1 合位, QF2, QF3 分位, K1 点发生单相金属性故障(以图2计算)。

$$\frac{\dot{I}_0}{\dot{U}_0} = \sqrt{\left( \frac{1}{R_N} \right)^2 + (3\omega C_b)^2} \arctan\left( \frac{C_b}{C_g + C_1 + C_b} \right) \quad (6)$$

2 台机组区内故障:QF1,QF2 合位,QF3 分位,K1 点发生单相金属性故障。

$$\frac{\dot{I}_0}{\dot{U}_0} = \sqrt{\left(\frac{2}{R_N}\right)^2 + [3\omega \times (C_g + C_1 + C_b)]^2}$$

$$\arctan \left[ \frac{(C_g + C_1 + C_b)}{2(C_g + C_1 + C_b)} \right] \quad (7)$$

3 台机组区内故障:QF1,QF2,QF3 合位,K1 点发生单相金属性故障。

$$\frac{\dot{I}_0}{\dot{U}_0} = \sqrt{\left(\frac{3}{R_N}\right)^2 + [3\omega \times (2C_g + 2C_1 + 2C_b)]^2}$$

$$\arctan \left[ \frac{(C_g + 2C_1 + 3C_b)}{3(C_g + C_1 + C_b)} \right] \quad (8)$$

式(6—8)计算时都遵循:

$$R_N = \frac{1}{3\omega \times (C_g + C_1 + C_b)} \quad (9)$$

由式(6—8)分别得出零序电流超前零序电压  $45^\circ$ 、 $26.6^\circ$ 、 $33.7^\circ$ 。

(2)按照图 2 分析,单机、2 台、3 台机组区外母线上单相接地机端零序电流的表达式均相同:

$$3\dot{I}_{i0} = -\dot{U}_0 \times \left[ \frac{1}{R_N} + 3j\omega \times (C_g + C_1) \right]$$

机端零序电流和中性点零序电流之和为合成零序电流:

$$\dot{I}_0 = 3\dot{I}_{i0} + \dot{I}_{n0} = -3j\omega \times (C_g + C_1) \times \dot{U}_0$$

由此可见,合成零序电流滞后零序电压固定为  $90^\circ$ 。以式(6—8)计算出的最小角度和最大角度的中间线作为区内保护动作的最灵敏线,最灵敏线逆时针、顺时针各偏一个角度  $\theta$ ,  $\theta > \frac{\theta_{大} - \theta_{小}}{2}$ ,并且边界  $1 > 270^\circ$ 。边界 1 逆时针转到边界 2 为保护动作区,如图 7 所示。

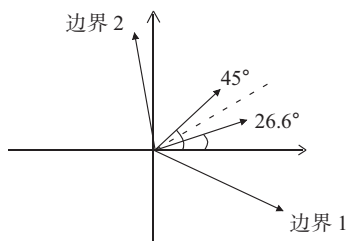


图 7 动作边界

### 1.5 现场保护正确闭锁区外故障录波

2009 年 1 月 10 日 17 时 43 分 06 秒,国内某电站 4 号机组扩大单元运行,10 号、12 号机组运行,11 号机组检修。10 号机组机端开关发生单相接地故障,12 号机组(已进行过选择性定子接地保护改造)判为区外故障成功闭锁定子接地保护,见图 8。

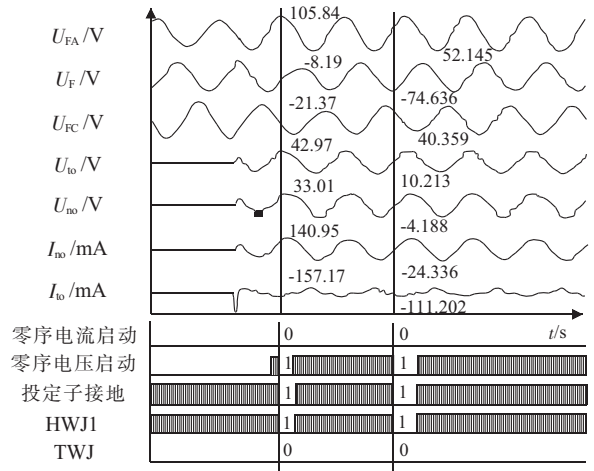


图 8 12 号机组区外成功闭锁录波

4.5 s 后保护装置没有出口,成功闭锁。

## 2 调试中存在的问题以及解决方法

### 2.1 不平衡电流的消除

试验过程中发现,正常情况下机端不平衡零序电流大于一定的数值后,保护装置不能正确地判断方向,因此怎样将正常运行时候不平衡零序电流降到技术要求的范围(10 mA)内是该保护能不能正常运行的关键。根据工程实践中摸索的经验,可从以下几个方面采取措施。

- (1) 发电机出口电缆严格按照空间磁平衡方式排布;
- (2) 电缆必须垂直正交从 TA 的正中心穿过;
- (3) 电缆与桥架底层间用绝缘垫隔离,电缆屏蔽层完好;
- (4) 零序 TA 1.5 m 空间范围内不能布置大功率动力电缆;
- (5) 机端三相电流的屏蔽层接地点应该在发电机机端侧;
- (6) 二次零序电流回路的屏蔽层严格单端一点接地;
- (7) 二次零序电流回路周围没有强电电缆;
- (8) 为工程调试方便,零序 TA 的支撑架设计安装成能调节的。

### 2.2 保护死区问题

由于该保护在原理上属于零序电压型保护,所以在靠近发电机中性点侧故障时保护存在死区。假设在距离中性点  $\alpha$  处发生 A 相金属性故障,则故障点零序电压  $\dot{U}_{n0} = \frac{1}{3}(\dot{U}_{AD} + \dot{U}_{BD} + \dot{U}_{CD}) = -\alpha E_A$  [3],通过对发电机机端 TV 各相对地电压的分析可以得到机端零序电压  $\dot{U}_{i0} = -\alpha E_A = \dot{U}_{n0}$  [4]。当  $\alpha$  接近 0 时发电机中性点和机端 TV 开口将感测不到零序电

压,导致方向元件失效,并且取自中性点TV的动作元件也将失效,该选择性定子接地保护只能在发电机定子的95%范围内实现选择性保护,另外5%通过常规的三次谐波电压保护来实现无选择性保护。

### 3 结束语

通过对国内某工程三机一变接线方式的贯流式机组选择性定子接地保护的安装调试,积累了丰富的经验。通过现场试验数据的分析计算,验证了该保护原理的正确性和实用性。

#### 参考文献:

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用(第2版)[M]. 北京:中国电力出版社,2002.  
[2] 陈俊,沈全荣. 扩大单元接线发电机定子接地保护方案

[J]. 电力系统自动化,2007,31(24):86-89.

- [3] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理(第3版)[M]. 北京:中国电力出版社,1994.  
[4] 李玉海,张小庆,徐敏. 关于定子接地保护的几个问题[J]. 电力系统自动化,1999,23(11):50-54.

#### 作者简介:

- 谈涛(1982-),男,助理工程师,江苏溧阳人,主要从事电气主设备微机保护的调试工作;  
陈俊(1978-),男,高级工程师,江苏姜堰人,主要从事电气主设备微机保护的研究和开发工作;  
王翔(1978-),男,高级工程师,安徽芜湖人,主要从事电气主设备微机保护的研究和管理工作;  
徐金(1979-),男,工程师,山东烟台人,主要从事电气主设备微机保护的调试工作。

## Calculation and Analysis of Selective Stator Earth Fault Protection Based on the Zero Sequence Direction Elements

TAN Tao, CHEN Jun, WANG Xiang, XU Jin

(Nanjing NARI-Relays Electric Co. Ltd, Nanjing 211100, China)

**Abstract:** At presents, medium and small hydro-power generator applies expanding unit connection mode, and stator earth fault protection cannot distinguish the failure unit, which leads to the tripping of all units and the enlarging of failure range. A novel selective stator earth fault protection based on zero-sequence direction element is calculated and analyzed. With the on-site experiment results, the validity and reliability of this principle is verified.

**Key words:** selective protection; expanding unit; stator ground fault; zero-sequence direction; generator

(上接第39页)

#### 参考文献:

- [1] 宋文南,刘宝仁. 电力系统谐波分析[M]. 北京:中国电力出版社,1995.  
[2] 张哲,陈红坤. 谐波源辨识研究的现状和发展[J]. 电力系统及其自动化学报,2005,17(5):21-25.  
[3] 李丹青,李汉青. 浅析变压器谐波的产生、危害及抑制[J]. 机电工程技术,2004,33(8):157-158.  
[4] 赵勇,沈红,李建华,等. 谐波源的识别及其与非谐波源的分离方法[J]. 中国电机工程学报,2002,22(5):84-87.

- [5] 许克明,徐云,刘付平,等. 电力系统高次谐波[M]. 重庆:重庆大学出版社,1991.  
[6] 张一中,宁元中,宋永华,等. 电力谐波[M]. 成都:成都科技大学出版社,1992.

#### 作者简介:

- 吴俊(1982-),男,江苏南京人,助理工程师,从事电力计量工作;  
谢丹(1982-),女,江苏无锡人,助理工程师,从事变电运行工作。

## Analysis of Harmonic Pollution in Wuxi Electric Power Network

WU Jun<sup>1</sup>, XIE Dan<sup>2</sup>

(1.Wuxi Power Supply Company, Wuxi 214101,China;2.Jiangyin Power Supply Company, Jiangyin 214000,China)

**Abstract:** Harmonic pollution is regarded as a serious damage to obstruct the development of power electronics. Twenty factories of Wuxi have been taken as samples to test their power harmonics and analyze the related situation. And some countermeasure to improve harmonic pollution is proposed. The study can be used for reference in controlling and preventing the power harmonic pollution of Wuxi power grid.

**Key words:** power system; harmonic pollution; harmonic detection

## 什么是电力网?

电力网是由各种不同电压等级的升压和降压变电站及输、配电线路组成,它把发电厂发出来的电能输送到用电区域,分配给用户。它由许多不同电压等级的电力线路连接而成,包括各变电站(含开关站)的开关和操作控制设备、计量设备、变电设备和调整电压等所有的电气装置。