

# 纵向零序电压发电机匝间保护若干问题研究

杨敏<sup>1,2</sup>, 徐习东<sup>1</sup>

(1. 浙江大学, 浙江 杭州 310027; 2. 浙江萧山发电厂, 浙江 杭州 311251)

**摘要:** 详述了一次区外接地故障引起发电机匝间保护动作的过程, 介绍了匝间保护装置的動作原理及各項定值的計算整定; 通过对保护实际動作情况、故障录波数据的分析, 重点研究了区外接地故障情况下, 纵向零序电压中基波及三次谐波分量的变化规律, 结合保护装置的原理、定值设置, 指出了用定子绕组三次谐波的变化量去制动基波的变化量的保护原理值得进一步探讨, 同时分析了目前保护存在的几个问题; 通过计算分析, 得到了区外接地故障发生前后负序功率的变化曲线, 提出了定子匝间保护的改进建议。

**关键词:** 发电机匝间保护; 纵向零序电压; 接地故障

## Study on voltage-type longitudinal zero-sequence inter-turn protection for generator

YANG Min<sup>1,2</sup>, XU Xi-dong<sup>1</sup>

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Zhejiang Xiaoshan Power Plant, Hangzhou 311251, China)

**Abstract:** This paper details how the inter-turn protections of the generator is actuated due to a grounding failure outside the primary power area, introduces the operation theories of the protections and the ways to calculate and set the ratings. It focuses on performing research on the variation discipline of the basic wave and the third harmonic component in the longitudinal zero-sequence voltage under condition of grounding failure outside the area through analysis of the actual operation conditions and on the basis of the failure waveform recorder data. It points out the theory that supports to use the variation of the stator windings' third harmonic wave to brake the variation of the basic wave needs further discussion in accordance with the theories and rating settings of the protections, analyzes some problems existing currently in the protections, works out the negative-sequence power variation curve before and after the occurrence of grounding failure outside the area and finally presents some suggestion about improvement of the stator inter-turn protections.

**Key words:** generator interturn protection; longitudinal zero-sequence voltage; ground fault

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)16-0011-04

## 0 引言

对中性点仅引出3个接线端子的发电机, 有2种原理的定子匝间保护装置可以采用: ①基于纵向零序电压的定子匝间保护; ②基于转子二次谐波电流的定子匝间保护<sup>[1]</sup>。虽然零序电压的定子匝间保护正确动作率不高<sup>[2]</sup>, 但仍然得到广泛应用<sup>[1~5]</sup>。文献表明, 研究开发人员也在不停对基于纵向零序电压的定子匝间保护进行改进。

本文通过分析一次匝间保护动作情况, 发现了一些新的情况, 并提出了几点完善措施, 以减少死区和避免误动作。

## 1 故障经过及保护动作情况

2006年2月8日13点41分, 电厂集控事故喇叭响, #2发电机开关跳闸, 但主汽门、灭磁开关均

未跳, 随后运行人员手动紧急停机。CRT上出现“#2发电机开关跳闸”, “#2机匝间灵敏段动作”, “#2故障录波器动作”光字亮, #2发电机保护装置CPU3上“匝间灵敏”, “热工t1”, “热工t0”红灯亮, 出口跳闸模块1上I、II、III红灯亮, 出口跳闸模块2上I、II、III红灯亮。

在#2发电机开关跳闸稍前, 发电厂110kV升压站一条110kV出线开关跳闸。该线路保护装置事故报告显示在2006-2-8 13:41:14时刻, 该110kV出线距离II段、零序II段动作出口, 接着重合闸动作出口, 重合成功后距离II段加速出口跳闸, 显示故障类型为C相接地故障, 故障距离7.91公里。

从110kV线路故障录波器的事故报告看, 该110kV出线开关的跳闸时间为13:41:14, 重合闸时间为13:41:17; 分析#2机组故障录波器的事故报告, 机端电流B相突变量启动, #2发电机开关跳闸

时间 13:41:15 (以上所标时间为标准时间)。

事后检查, 发电机无故障, 显然这又是一起区外不对称故障引起的匝间保护误动。

## 2 匝间保护动作原因分析

### 2.1 发电机匝间保护装置及定值整定情况介绍

发电厂#2 发电机采用 WFBZ-01 型发电机微机保护装置, 定子匝间保护反应发电机纵向零序电压的基波分量。其中“零序”电压取自匝间保护专用电压互感器二次开口三角形绕组, 其中性点与发电机中性点通过高压电缆相联。“零序”电压中三次谐波不平衡量由数字傅氏滤波器滤除。匝间保护出口逻辑如图 1 所示。

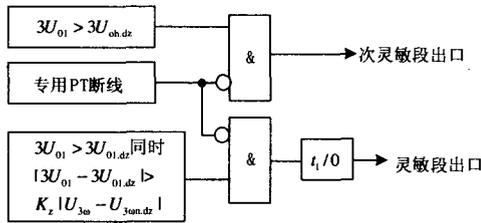


图 1 匝间保护逻辑框图

Fig.1 Block diagram of generator interturn protection

1) 次灵敏段基波“零序”电压分量定值  $U_h$  按躲过任何外部故障时可能出现的基波不平衡电压整定 (整定范围 1~10 V):

$$U_h = K_{rel} \times U_{0.bp.max}$$

式中:  $K_{rel}$  为可靠系数, 取 2~2.5;  $U_{0.bp.max}$  为外部短路故障时可能出现的“零序”电压最大基波不平衡量,

故:  $U_h = K_{rel} \times U_{0.bp.max} = 2.5 \times 2\% U_{fe} / n_Y = 5 \text{ V}$

2) 灵敏段基波“零序”电压分量定值 ( $U_{i.dz}$ )  $U_i$  按可靠躲过正常运行时出现的最大基波不平衡电压整定 (整定范围 0.1~5 V):

$$U_i = K_{rel} \times U_{0.bp.n}$$

式中:  $K_{rel}$  为可靠系数, 取 1.5~2;  $U_{0.bp.n}$  为额定负荷下固有“零序”电压基波不平衡量, 由实测得到,

故:  $U_i = K_{rel} \times U_{0.bp.n} = 1.5 \times 0.43 = 0.7 \text{ V}$ , 整定 2.5 V。

3) 额定负荷下“零序”电压三次谐波不平衡量定值  $U_{3wn.dz}$  整定范围 1~10 V, 开始可整定 4 V, 开机后由实测得到的准确值整定。

经过实际测试, #2 发电机  $U_{3wn.dz} = 3.6 \text{ V}$ , 整定 4 V。

4) 灵敏段三次谐波增量制动系数  $K_z$  整定范围 0~0.9, 由经验决定, 一般取 0.3~0.5。

取:  $K_z = 0.4$

5) 灵敏段延时  $T_{sj}$  为增加此段可靠性而设, 一般取 0.1~0.2 s。

取:  $T_1 = 0.2 \text{ s}$

### 2.2 发电机匝间保护动作分析

从故障录波器上摘录的发电机 B 相电流、纵向零序电压及匝间保护灵敏段动作信号如图 2 所示。

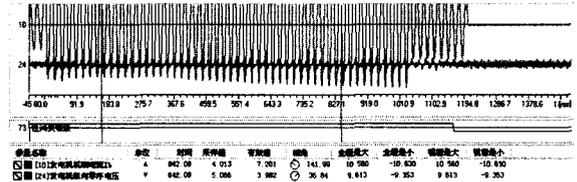


图 2 B 相电流、纵向零序电压录波图

Fig.2 Oscillogram of phase B current and the longitudinal zero-sequence voltage

发电机录波器由机端 B 相电流突变量启动, 此时刻为录波图 0 ms 时刻, 这也是 110 kV 出线 C 相接地时刻。从 0 ms 至 1038 ms 时刻, 发电机定子电流增大, 1038 ms 时刻, 萧城 1103 线开关跳, 接地故障第一次切除, 发电机定子电流减小, 1163 ms 时刻发电机匝间保护动作, 1208 ms 时刻发电机开关跳闸。

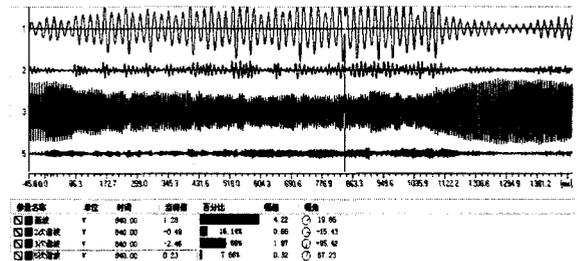


图 3 纵向零序电压各次谐波

Fig.3 Oscillogram of the harmonics of the longitudinal zero-sequence voltage

显然, 纵向零序电压匝间保护在区外不对称故障切除后动作, 这是一个新情况。为分析这个情况, 我们对#2 发电机纵向零序电压的变化进行了分析, #2 发电机纵向零序电压在此期间, 1、2、3、5 次谐波变化情况如图 3 所示。

图中显示, #2 发电机纵向零序电压基波分量在外部故障期间明显增大, 最大幅值达 4.22 V, 在区外接地故障切除后并没有立刻减小; 三次谐波电压分量在正常及外部短路时, 其幅值在 1.2 V~3.7 V 之间, 且在整个外部故障过程中, 三次谐波电压分量基本稳定在 1.8 V 左右, 比正常情况下的三次谐波略有减小。因此, 按照装置灵敏段动作判据:  $3U_{01} > 3U_{01.dz}$  同时  $|3U_{01} - 3U_{01.dz}| > K_z |U_{3w} - U_{3wn.dz}|$ , 保护在本次线路故障过程中多次满足动作条件, 匝间保护

在这些时段内应该动作。

值得注意的是该动作判据是否合理,因为在本次区外接地故障过程中(0~1038 ms),纵向零序电压基波分量是增大的,而三次谐波电压分量是略有减小的,这两者之间存在的量的关系值得进一步研究。

### 3 匝间保护动作存在的问题

除了上述三次谐波分量的制动作用值得研究外,这次保护装置动作还存在其它一些问题。

#### 3.1 匝间保护灵敏段的延时环节没有起到应有的作用

通过录波器的分析软件,对纵向零序电压基波分量进行观测,如果将基波幅值大于 2.5 V 的时刻置为 1,小于 2.5 V 的时刻置为 0,可得到图 4 中的曲线 4。

显然,自 754 ms 至 1115 ms 时间段内基波分量幅值是波动的,虽然多次超过 2.5 V 整定值,但是仍然存在幅值未到 2.5 V 整定值的时间段。

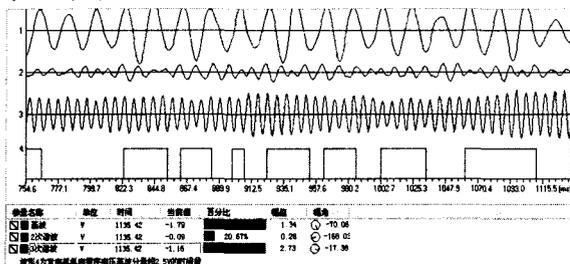


图 4 接地故障期间纵向零序电压图

Fig.4 Oscillogram of the longitudinal zero-sequence voltage during the ground fault

根据厂家提供的动作逻辑(图 1),及整定值  $t_1=0.2$  s,保护动作的必要条件是纵向零序电压基波分量连续超过整定值达到 200 ms,而图 4 显示,超过 2.5 V 的时段没有一段达 200 ms,显然,  $3U_{01} > 3U_{01.02}$  判据动作后,没有及时返回,导致 200 ms 延时(装置的最大延时)形同虚设、错误出口。

#### 3.2 匝间保护动作后未能可靠驱动出口继电器

匝间保护动作后,仅跳开#2 发电机开关,未跳开#2 机灭磁开关,未关主汽门,而装置的出口继电器为 3 个干簧继电器并联方式,分析这种现象,原因可能有以下方面:

1) 若 3 个干簧继电器均能同时可靠动作(事后通过试验确定继电器动作可靠),则可能存在出口继电器动作触点闭合时间过短、灭磁开关控制回路中没有跳闸自保持回路(发电机开关有跳闸自保持回路)而无法跳开;保护动作关主汽门回路的设计中,

采用保护动作触点输入机组 DEH 系统的 ETS 输入卡件,DEH 系统对开关量输入的扫描存在一定的周期,也同样存在由于出口继电器动作触点闭合时间过短而扫描不到的情况。

2) 发电机定子匝间保护动作后,可能仅仅启动了发电机开关的跳闸干簧继电器,而与之并联的另外 2 个继电器(跳发电机灭磁开关、关主汽门)均未动作出口。DEH 系统对开关量输入的扫描虽然存在一定的周期,但周期相当短(约 1 ms),因此,出口继电器没有动作的可能性较大。通过对录波图的分析也可以发现,即使匝间保护在 822 ms 时软件判断动作后不返回,则在 1 022 ms 左右驱动出口中间继电器,再加上出口干簧继电器的动作需要一定时间,就算出口继电器能驱动,时间也相当短,甚至不动作。

#### 3.3 匝间保护动作后没有跳闸报告

对此,厂家解释为保护装置只能存储最后一次动作报告,可能是保护动作后,紧接着运行人员手动紧急停机的热工开关量动作输入保护装置而将前一次报告刷新所致。

### 4 匝间保护需要改进

根据本次故障录波的波形分析,灵敏段匝间保护有几点需要改进:

1) 由于区外接地故障后,纵向零序电压基波分量是波动的,其最大值较大,若灵敏段整定值较高,则灵敏段将失去意义,整定值较低,则可能处于纵向零序电压波动范围内。文献[2]中对在匝间保护中增加一个小延时进行了讨论,本文的录波数据表明,增加一个小延时是必要的,首先,区外故障切除后,纵向零序电压基波分量并不是立即降低,其次,需要增加延时躲过纵向零序电压的波动。但增加延时后,应考虑过电压继电器应选择较小的返回系数,以便在纵向零序电压降低时及时返回,延时环节起到应有的作用。

2) 根据 DL/T 684—1999《大型发电机变压器继电保护整定计算导则》中的 4.1.7 对纵向零序过电压保护的规定:“为防止外部短路误动作,可增设负序方向继电器,后者具有动合触点,当发电机内部短路时,触点闭合。”这样,当发电机发生相间短路、匝间短路及分支开焊等不对称故障时,负序功率  $P_2$  由发电机流出;当系统发生不对称故障、非全相运行、负荷不平衡时,负序功率  $P_2$  流向发电机,因此根据机端负序功率  $P_2$  的流向可区分发电机是否发生内部不对称故障;另外,为防止由于专用 PT 三次回路多点接地或其他不明原因造成在匝间

保护输入回路中产生较大的基波电压致使保护误动,也应该增设负序功率方向元件。

我们从录波数据中提取了三相机端电流、电压,计算出二次侧负序有功功率  $P_2$  与负序无功功率  $Q_2$  如图 5、图 6 所示。在区外接地故障前与切除后,  $P_2$ 、 $Q_2$  接近 0, 在接地故障过程中,  $P_2 \approx -4 \text{ VA}$ 、 $Q_2 \approx -20 \text{ VA}$ , 显然负序功率方向元件完全能对这类故障进行可靠制动。为减小其对定子绕组匝间保护灵敏性的影响,可以采用不过零点的方向特性。

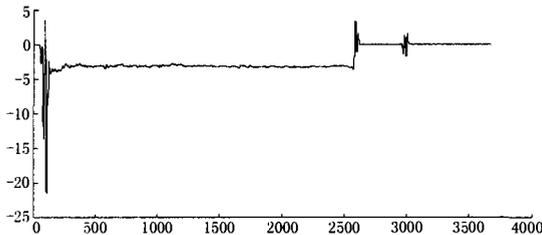


图 5 发电机输出的负序有功功率

Fig.5 Negative-sequence active power output from the generator

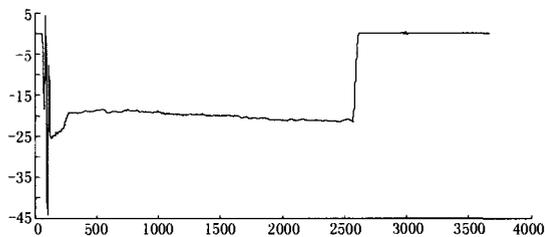


图 6 发电机输出的负序无功功率

Fig.6 Negative-sequence reactive power output from the generator

3) 外部故障切除后,纵向零序电压基波分量没有立即减小,与励磁调节有关,因此,灵敏段的延时是必要的。

4) 保护动作后,其出口继电器为瞬动方式,没有出口继电器动作后的自保持设计或动作固定时间设计也是本次仅跳发电机开关的很大原因。对于保护装置动作出口后是否要自保持,需要进一步论证。

## 5 结束语

由于外部故障导致匝间保护的動作时有发生,本次故障录波数据表明:在区外接地故障过程中,纵向零序电压基波分量是增大的,而三次谐波电压分量是减小的,用三次谐波的变化量去制动基波的

变化量值得进一步研究;在区外接地故障过程中,纵向零序电压基波分量是波动的,用定值躲过会对保护的灵敏度产生影响,用时间躲过需考虑电压继电器的返回系数不能太大;在区外接地故障过程中,指向发电机的负序有功功率与无功功率均很大,用负序方向继电器来对这种情况进行制动是非常可靠的。此外,作为微机保护,有些功能应进一步完善,充分发挥微机保护的优点。

## 参考文献

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京: 中国电力出版社,1998.  
WANG Wei-jian. Principle and Application of Electric Power Equipment Protection[M]. Beijing: China Electric Power Press,1997.
- [2] 李玉海,等.纵向零序电压型发电机匝间保护几个问题[J]. 电力自动化设备,2001,21(10):62-66.  
LI Yu-hai, et al. Problems in Voltage Type Longitudinal Zero Sequence Inter Turn Protection for Generator[J]. Electric Power Automation Equipment,2001,21(10): 62-66.
- [3] 胡嘉武. 发电机匝间保护问题探讨[J]. 武汉大学学报(工学版).2001,34(4):108-112.  
HU Jia-wu. Discussion on Turn-to-turn Protection of Generators Engineering[J]. Journal of Wuhan University, 2001,34(4):108-112.
- [4] 蔡光德. 发电机—变压器组保护整定中的若干问题[J]. 电力系统自动化,2001,25(10):34-36.  
CAI Guang-de. Some Problems of Protection setting in Generation-transformer Unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001,25(10):34-36.
- [5] 邵能灵. 大型超临界汽轮发电机匝间短路故障分析及主保护研究[J]. 电力系统自动化,2006,30(20):54-58.  
TAI Neng-ling, ZHU Jia-jie. New Protection Scheme for Asymmetrical Faults in Large Ultra-supercritical Turbo-generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(20):54-58.

收稿日期: 2007-05-08; 修回日期: 2007-07-12

作者简介:

杨敏(1971-),女,研究生,工程师,从事电力系统继电保护工作;E-mail:yiming980204@163.com

徐习东(1966-),男,副教授,从事电力系统继电保护研究工作。