

# 发电机定子接地保护动作分析及防范措施

吴建福, 周移华

(国电丰城发电有限公司, 江西 丰城 331100)

**摘要:** 介绍某电厂三起发电机定子接地保护信号报警、动作跳闸事件。重点介绍了事件处理情况, 对事件发生原因进行了分析和判断, 提出相应的防范措施。发电机出现定子接地故障报警后, 应根据现场保护及设备动作情况, 及时分析原因, 做出准确判断, 快速消除设备隐患, 保障机组和电网安全运行。

**关键词:** 定子接地; 保护; 三次谐波; 措施

## Analysis and preventive measures of generator stator ground fault protection action

WU Jian-fu, ZHOU Yi-hua

(Guodian Fengcheng Generation Ltd., Fengcheng 331100, China)

**Abstract:** This paper introduces three cases of generator stator ground fault protection signal alarm and tripping incident in a power plant. It focuses on the handling of the event, analyzes and judges the causes of the incident, and puts forward the corresponding preventive measures. When generator stator earth fault alarm occurs, it needs to accord with protection equipment operation on site and promptly analyze the causes to make accurate judgements and eliminates the fault, so as to guarantee the safety operation of the generator and power grid.

**Key words:** stator ground; protection; triple frequency; measure

中图分类号: TM732 文献标识码: B 文章编号: 1674-3415(2010)05-0111-04

## 0 引言

发电机定子接地故障是最常见的发电机故障。发电机定子接地后, 接地电流经故障点、三相对地电容、三相定子绕组而构成通路。当接地电流较大时, 能在故障点引起电弧, 造成定子绕组和定子铁芯烧伤, 甚至扩大为相间或匝间短路。当电厂发电机定子接地保护动作时, 现场运行及检修人员应及时掌握发电机一次设备及保护动作信息, 并立即进行分析、判断和处理, 确保机组安全稳定运行。

## 1 事件

事件1、2003年8月29日13时29分, #2发变组保护运行中突发“定子接地”信号光字牌, 13时31分, 发电机定子保护动作跳闸与系统解列。

事件2、2008年03月01日01时56分, #1发变组突然跳闸, 首出“定子接地”保护动作, 汽机联跳, 炉MFT动作。

事件3、2008年12月5日03时17分#1机G盘发“定子接地”报警, 检查发电机一、二次设备无明显异常, 核对发电机各一、二次电压也未发现

异常。

## 2 处理情况

### 2.1 事件1

此次发电机解列, 检查为电厂发电机定子接地基波保护动作, 这是该厂发电机定子接地保护第一次动作。电气人员在负责生产的领导现场指挥下, 检修运行人员分成两批人员, 按照发电机一、二次设备立即投入查找。继电保护人员核对、校验保护装置定值正常, 同时检查发电机定子接地二次回路也正常; 高压、运行人员对发电机本体、机端、中性点及发电机封母、PT、CT、避雷器及其附属设备外观进行了检查, 没有发现明显异常。为尽快找出设备故障原因, 确认发电机能否及时恢复运行, 电气负责人员在没有找出具体故障位置的情况下采取了以下检测方法:

利用励磁调节器(型号: SWTA, 上海华通开关厂)工频柜, 缓慢对发电机(型号: QFSN-300-2, 上海发电机厂)手动升压至5 kV, 发电机出口电压为20 kV, 分别测量发电机电压互感器(20/0.1 kV)二次电压, 在发电机低电压工况下, 查找设备故障

点。发电机各组 PT 的测量结果见表 1。

发电机出口侧 PT 开口二次电压: L622--B600=9 V; 发电机中性变压器二次电压: S601--B601=10 V。

表 1 发电机各组 PT 二次电压值

Tab.1 PT secondary voltage value of generator each group

发电机 PT	1YH	2YH	3YH	中性点 PT
A 相 (V)	14.3	11.2	11.2	/
B 相 (V)	14.3	14.3	14.3	/
C 相 (V)	14.3	18	18	/
开口 (V)	0.1	9	/	10
用途	发电机匝间保护专用	发电机保护及测量	励磁专用	定子接地 (三次谐波)

注: A、B、C 单相电压均为对相应绕组 N600 测量值

从测量结果, 可以初步判断一次设备经过渡电阻接地。重新对所有发电机一次相关设备进行复查, 在检查发电机 PT 发现 A 相三组 PT (在一个柜内) 时, PT 柜内存在异味, 用测温仪测量 A 相 3YH PT 线圈外壳及铁芯, 温度明显比 1YH、2YH 高出 10℃ 左右。高压电气设备内部热故障主要原因包括: 设备发热时间长而且较稳定, 与故障点周围导体或绝缘材料发生热量传递, 使局部温度升高, 破坏了密封的绝缘材料或金属外壳。通过检测其周围材料的温升来判别高压电气设备的内部故障, 故初步认为发电机 A 相 3YH (励磁专用) 存在绝缘损坏故障。

将故障 PT 拖出柜外后, 再用励磁调节器的手动调节方式缓慢升压到 5 kV, 测量其余各组 PT 二次电压正常, 并检查发电机一次设备无异常后, 将发电机电压升至额定值 20 kV, 于 15 时 37 分将 #2 机与系统并网。从发电机因保护跳闸到恢复并网整个处理过程约 2 个小时。

### 2.2 事件 2

发电机保护动作时间在凌晨, 时间较为特殊。电气值班人员接到电话后, 首先检查发变组及录波器的报告, 并立即派人检查发电机本体、发电机机端、中性点、封母附近设备, 测量发电机对地绝缘为 0, 最终发现在发电机机端出线处, 励端定子冷却水回水信号管法兰面滴水, 落在发电机出线盒上并渗入出线盒内部, 导致发电机 A 相出线绝缘波纹板对地放电击穿。

发现故障点后, 电气专业立即组织人员对绝缘受损部位进行处理, 并联系汽机专业对励端定子冷却水回水信号管法兰面进行紧固、消漏。用绝缘橡皮垫在法兰下部, 避免出现再次漏水影响。待运行做好安全措施后, 打开发电机出线盒盖板, 用干抹

布清除积水, 并用酒精清理 A 相出线绝缘波纹板的电弧灼伤部位, 清除灼伤部位碳化物, 并涂刷绝缘清漆以填平灼伤部位。处理完毕后, 摇测对地绝缘值由处理前的零升至 20 GΩ, 绝缘合格后, 恢复发电机出线盒盖板、拆除安全措施。发电机转热备后, 利用励磁调节器 C 柜 (型号: GEC-1, 北京吉思电气有限公司) 缓慢升到发电机电压到 5 kV 后, 测量发电机 PT 二次电压正常, 并检查发电机一次设备无异常后, 将发电机电压升至 20 kV, 再次确认机组各参数正确无误, 各组 PT 开口 3U<sub>0</sub> 正常, 现场无放电声音及冒火等异常后, 按照正常并网步序将发电机并入系统。

### 2.3 事件 3

#1 机 G 屏突发“发电机定子接地”光字牌, 检查发变组保护 A、B 屏“定子接地 3ω”信号报警灯均亮 (定子接地三次谐波保护出口方式投信号)。检修人员随后对一二次设备进行了相关检查未发现异常。由于一时未找到故障原因, 发电机一直在运行, 只能暂时加强对发电机机端、中性点等设备的巡视, 加强对发电机电压特别是零序电压的监视。

继电保护人员随后对所有运行机组的发电机机端零序电压 (含三次谐波)、中性点开口电压进行了测量和分析, 具体数据见表 2。通过比较得出, #1 发电机中性点的三次谐波电压 S601 对地有 3 V 左右, 但与 B601 之间电压却只有 0.1 V 左右。

表 2 发电机机端、中性点零序电压

Tab.2 Generator machine end, neutral point zero sequence voltage

机组	机端零序基波电压 /V	机端零序三次谐波电压 /V	中性点开口三次谐波电压 /V	负荷 /MW
#1 机	0.54	1.92	0.12	260
#2 机	0.29	1.77	3.05	220
#3 机	0.35	1.84	3.12	210
#4 机	0.29	1.89	3.15	220

随后, 用高压验电笔测量出中性点接地变压器 (变压器变比为 20/0.23 kV) 引出线有电, 显示值约为 700 V, 即二次电压应为 3 V 左右。因此怀疑 #1 机发电机中性点接地变压器或电阻可能出现故障。断开中性点隔离刀闸, 确认定子接地三次谐波压板退出, 做好相应的安全隔离措施, 发出《#1 机发电机中性点接地变压器及回路检查》电二种票。电气检查人员对接地变压器及并联电阻进行检查, 未发现异常。进一步检查发现接地变压器二次线到接地电阻经隔板固定的接头处有生锈松动现象 (见故障

点3), 紧固连接螺栓后, 将接地变压器投入运行, 测量中性点开口三次谐波电压(S601对B601)有3V左右, 此时发变组保护A、B屏定子接地三次谐波报警信号已消失。

### 3 分析

事件 1: 发电机机端 A 相经过渡电阻  $R_f$  发生接地故障。

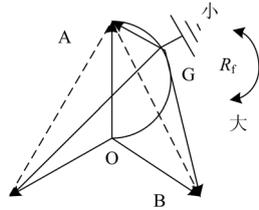


图 1 发电机端侧经过渡电阻接地

Fig.1 Generator machine end side after transition resistance earth

(1) 当  $R_f = \infty$ , 没有发生接地故障时, 发电机中性点 O 即为地电位 (见图 1),  $3U_0$  为发电机正常运行情况下的基波零序电压值, 接近于 0。

(2) 当  $R_f = 0$  时, A 相发生金属性接地故障时, 地电位即为 A 相机端, 此时  $3U_0 = -\alpha E_A = E_A$ ;

式中  $E_A$  为发电机 A 相电动势,  $\alpha$  为故障点距中性点的距离 (全绕组为 100%) 百分数, 因为机端金属性接地故障点, 故  $\alpha = 1$ 。

(3) 当  $0 < R_f < \infty$  时, 地电位 G 为 AO 为直径的半圆上,  $R_f$  减小, G 点沿圆弧逆时针旋转;  $R_f$  增大, G 点沿圆弧顺时针旋转  $3U_0 = 1/3(U_A + U_B + U_C) = 1/3(A_G + B_G + C_G)$ 。

该厂发电机定子接地保护零序电压取自机端三相电压互感器的开口三角形绕组。正常运行时, 机端开口三角不平衡电压有基波和三次谐波, 其中以三次谐波为主 (可参考表 2 数据)。当高压侧发生接地故障时, 高压系统中的零序电压通过变压器高、低绕组间的电容耦合传给发电机, 可能超过定子接地保护的定值。发电机定子接地基波零序电压保护定值为 15 V (发电机母线接地时 PT 开口三角电压为 100 V), 本例中发电机 A 相 PT 由于某种原因 (如受潮、受热) 绝缘损坏, 引起发电机一次 A 相不完全非金属性接地 (故障点 1) 时,  $3U_0$  达到发电机定子接地基波动作定值, 保护延时跳闸解列发电机。

发电机 PT 第一个绕组 1YH 为发电机匝间保护专用 PT, 该 PT 一次中性点并没有接地, 而是与发电机中性点直接连接 (见图 2)。本次发电机 A 相 3YH PT 定子不完全接地故障时, 相当于一次系统出现了

地零序电压  $3U_0$ , 发电机中性点电位相应升高到  $3U_0$ , 因此 1YH 开口三角形绕组输出应仍为 0 (即发电机匝间保护不会启动), 发电机各相电压对本绕组 N600 的电压也维持对称, 即 1YH 测量 A、B、C 三相对本身绕组的 N600 电压幅值相等。

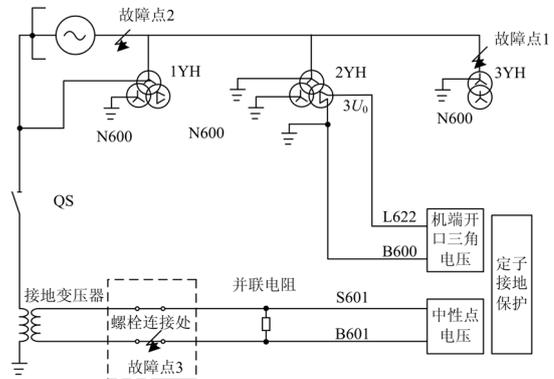


图 2 PT 接线及定子接地保护接线图

Fig.2 PT wiring and stator ground protection wiring diagram

事件 2:

发电机定子接地保护接入的基波  $3U_0$  电压, 取自机端 PT 开口三角绕组, 基波保护范围为由机端至机内 85% 左右的定子绕组单相接地故障, 与三次谐波保护合用, 组成发电机的 100% 定子接地保护。

从本次发电机定子接地保护动作报告及发变组故障录波器事故报告显示, A 相绝缘受潮损坏, 支撑绝缘波纹板绝缘瞬时击穿至零序电压突增至 26.13 V。定子接地保护动作时, 基波开口三角电压值  $3U_0$  达 52.34 V, 其零序电压远远超过定子接地保护定值  $3U_0 = 15$  V。同时表明本次发电机定子接地基本上是金属性接地。在发电机机端出线处, 励端定子冷却水回水信号管法兰面漏水, 落在发电机出线盒上并渗入出线盒内部, 造成发电机 A 相出线支撑绝缘波纹板绝缘降低对地放电击穿。因此这是一起典型的一次设备绝缘受损击穿引起保护动作事件。

事件 3:

发电机气隙磁通密度的非正弦分布和铁芯饱和的影响, 其定子绕组中的感应电动势除基波外, 还含有三、五、七次等高次谐波, 以  $E_3$  表示发电机每相绕组的三次谐波电动势。如图 3 所示, 假定发电机每相绕组对地电容  $C_g$  分成相等的两部分, 分别集中在发电机的中性点和机端侧; 将发电机端部引出线、升压变压器、厂用变压器及电压互感器等设备每相对地电容  $C_s$  也等效集中在机端。则:

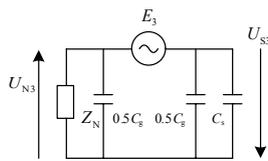


图 3 简单的发电机三次谐波等效图

Fig.3 Triple frequency equivalent chart of simple generator

(1) 发电机中性点绝缘时, 发电机正常运行时机端与中性点三次谐波电压之比为:  $U_{S3}/U_{N3}=C_g/(C_g+2C_s)<1$ ; ( $Z_N=\infty$ , 相当于断开)。

(2) 发电机经配电变压器高阻接地时,  $U_{S3}/U_{N3}=Z_{S3}/Z_{N3}=d$ ,  $Z_N$  大小不同, 则比值  $d$  也不相同, 但一般认为  $C_g$ 、 $C_s$ 、 $Z_N$  现场值是基本不变的, 则  $U_{S3}/U_{N3}$  的比值也就确定下来。

(3) 不论发电机中性点是否接有消弧线圈, 当距发电机中性点  $a$  处发生定子绕组单相接地时, 中性点  $N$  与机端  $S$  处的三次谐波电压恒为:

$$U_{N3} = a E_3, \quad U_{S3} = (1 - a) E_3$$

见图 4。

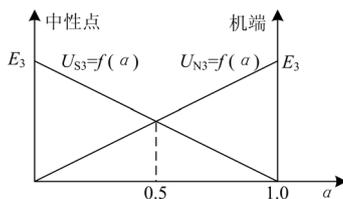


图 4  $U_{N3}$ 、 $U_{S3}$  随  $a$  的变化曲线图

Fig.4 Curves of  $U_{N3}$ ,  $U_{S3}$  along with  $a$  change

选用  $U_{S3}$  动作量,  $U_{N3}$  作为制动量, 组成发电机定子接地 100% 保护, 当发电机中性点附近发生接地时, 三次谐波保护具有较高的灵敏度。该厂 4 台 300 MW 机组发电机中性点经配电变压器接地, 并网前 (发电机空载试验) 与并网后测得的三次谐波  $U_{S3}/U_{N3}$  的比值在 0.6~0.75 范围内, 定值整定为 0.9 左右, (厂家按照 1.2 倍可靠系数进行整定调试)。从发电机正常运行时,  $U_{S3}/U_{N3}$  的比值也基本在 0.6~0.75 附近波动。本例中发电机虽没有发生中性点接地故障, 但因中性点接地变压器引出线松动, 制动电压  $U_{N3}$  为悬浮电位, 制动量电压丢失 (发变组微机保护采集的数值很小), 导致  $U_{S3}/U_{N3}$  的比值大大超过 0.9, 最终造成发电机定子接地三次谐波保护动作。

#### 4 防范措施

1) 事件 1 发生后对绝缘受损的发电机 A 相 PT (3YH) 进行倍频感应耐压等试验, 发现 PT 泄漏电

流严重超标。机组停运后, 对其它几组 PT 也进行了相应的试验测试, 发现也有不同程度的泄漏。主要原因该类 PT 为分级绝缘型, 且 PT 安装在机 0 米层, 设备绝缘极易受潮损坏。为消除设备隐患, 保障主机安全稳定运行, 结合机组检修将所有分级绝缘的 PT 更换为全绝缘型 PT。并加强发电机 PT 的巡检和定期工作, 定期测量发电机 PT 的温度、湿度等。

2) 事件 2 发生后, 各专业采取了以下措施: 电气专业完善了防止定冷水或其它水源进入隔栅通风口的措施, 针对发电机出线箱 A 相出线支撑绝缘波纹板受电弧灼伤, 在机组检修时作了进一步处理, 更换 A 相绝缘波纹板。加强其它机组该部位的重点检查, 确保回水管绝缘垫材质, 保证机组安全运行; 汽机专业全面梳理机组励端定子冷却水回水信号管法兰是否紧固, 是否存在可能漏水缺陷; 运行人员在发电机负荷变化大时控制好运行操作方式, 特别是在气温、压力急剧变化情况下注意定冷水系统的检查, 严防定冷水温度及压力的异常波动引起法兰漏水现象的再次发生。高电压规程要求发电机出线箱隔栅处设有通风口, 事件发生后, 要求设备管理人员不能生搬硬套规程规定, 而应结合现场的实际, 灵活应用落实反措, 从而最大程度保证主设备的安全运行。除采取上述措施外: 现场要求照明充足便于人员巡检, 及时发现设备缺陷, 杜绝事故隐患。

3) 事件 3 反映出定期试验及检定工作中存在一定死角。定期工作中应牢记定期试验、检定的三要素: “测绝缘、清灰、紧固端子”, 对于发电机中性点经配电变压器接地, 除按常规做定期试验检查外, 不能遗漏接地变压器及其副方并接电阻的尘土和污垢清扫及连接端子紧固等检验项目; 同时要加强对设备巡检, 如对发变组保护点检工作时, 应特别观察记录仪不同运行工况下通道参数的变化和比较, 一旦发现异常及时消除。另一方面要加强继电保护人员和运行人员综合素质, 提高设备故障时的处理能力。

#### 5 结论

发电机发生故障, 伴随保护故障报警和跳闸时, 应根据当时故障信号和保护动作情况, 灵活应用, 并指定一位熟悉电气人员统一指挥, 迅速判断设备故障是一次设备还是二次设备造成, 然后按照一、二次设备分别进行检查。及时打印保护动作、录波器报告进行分析, 逐一对发电机相关设备进行排查, 切不可慌乱。若机组故障可及时恢复, 相应保持机

(下转第 131 页 continued on page 131)

差动保护高压侧电流:  $i_A = 0.311 \angle 54^\circ$  A,  $i_B = 0.318 \angle 166^\circ$  A,  $i_C = 0.324 \angle 297^\circ$  A,  $i_N \approx 0$  A;

差动保护低压侧电流:  $i_a = 0.554 \angle 80^\circ$  A,  $i_b = 0.561 \angle 206^\circ$  A,  $i_c = 0.588 \angle 320^\circ$  A,  $i_n \approx 0$  A;

$\angle i_{2A} = 54^\circ$  则  $\angle i'_{2a} = \angle i_{2A} - 30^\circ = 24^\circ$

$\angle i_{2B} = 166^\circ$  则  $\angle i'_{2b} = \angle i_{2B} - 30^\circ = 136^\circ$

$\angle i_{2C} = 297^\circ$  则  $\angle i'_{2c} = \angle i_{2C} - 30^\circ = 267^\circ$

$\angle -i_{2a} = 80^\circ + 180^\circ = 260^\circ \approx \angle i''_{2c} = \angle i'_{2c} = 267^\circ$

$\angle -i_{2b} = 206^\circ + 180^\circ = 26^\circ \approx \angle i''_{2a} = \angle i'_{2a} = 24^\circ$

$\angle -i_{2c} = 320^\circ + 180^\circ = 140^\circ \approx \angle i''_{2b} = \angle i'_{2b} = 136^\circ$

我们再改变保护装置差动回路接线, 高压侧 CT 的电流  $i_{2A}$ 、 $i_{2B}$ 、 $i_{2C}$  流入保护中顺序为黄 1、绿 2、红 3, 则低压侧的中电流  $-i_{2a}$ 、 $-i_{2b}$ 、 $-i_{2c}$  流入保护中顺序为绿 1、红 2、黄 3, 符合上述公式 (3), 确凿无误后, 再带负荷检查, 保护装置中的不平衡电流显示为零。

至此, 2#变问题已全部解决。

### 3 结论及反措建议

#### 3.1 结论

此次事故发生后, 厂家和运行单位技术人员经过认真检查分析后认为: 2#变保护此次误动作主要跟以下因素有关:

(1) 全站电流系统接成负序系统, 致使回路变的很复杂而难理解, 容易出错。

(2) 高压侧电缆绝缘不好, N 回路分流。

(3) 变压器差动保护采用反极性原理, 而回路

极性接反。

正是以上几个因素的存在, 当发生区外故障时, 致使 2#变差动保护不平衡电流太大, 保护装置动作而跳闸。

同时, 检查还发现了其他一些问题。譬如: 1#变平衡系数计算有误, 2#变高后备 A 相 CT 变比有误等问题, 均一一处理。

#### 3.2 反措处理建议

通过对 2#变跳闸事故的分析 and 处理, 发现一些影响电网安全运行的缺陷和隐患, 我们采取了相应的处理措施。鉴于国家电网继电保护标准都是以正序系统为基础而应用的, 建议该站二次电气回路采用比较通行的正序系统, 这样才能保证电网的安全稳定运行。

#### 参考文献

- [1] 王梅义. 电网继电保护应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [2] 国家电力调度通信中心. 电力系统继电保护典型故障分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.
- [3] 贺家李. 电力系统继电保护原理(增订版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [4] 吴必信. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2000.

收稿日期: 2009-05-29; 修回日期: 2009-06-24

作者简介:

王光中(1971-), 男, 本科, 讲师, 从事电工电子、电力系统等专业教学工作; E-mail: wgz5653@126.com

郝建宏(1971-), 女, 本科, 工程师, 从事电力系统继电保护产品设计和调试工作;

沈鸿彦(1974-), 男, 硕士, 工程师, 从事电力系统自动化产品设计、调试及应用。

(上接第 114 页 continued from page 114)

组恒速, 以方便机组并网; 若故障一时不能排除, 机组应及时进行停运处理。电气人员应加强对发电机相关设备技术监督和定期工作, 掌握同类型机组的故障处理方法, 制定相应的防范措施, 对存在隐患的设备坚决进行整治和消除, 全面提高发电机安全运行水平。

#### 参考文献

- [1] 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. Generator and Transformer Relay Protection Application[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.

收稿日期: 2009-03-18; 修回日期: 2009-04-10

作者简介:

吴建福(1976-), 男, 本科, 工程师, 主要从事电厂电气设备管理工作。E-mail: Wujianfu126@126.com