

发电机出口断路器非全相保护误动作分析与解决措施

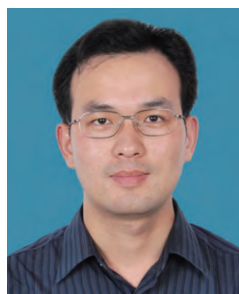
针对一起发电机非全相保护动作引起的650 MW发电机组分闸停机事件进行了详细分析,提出了可行的处理、改造方案,该方案对发电机出口断路器维护、发电机非全相保护配置具有一定的参考借鉴意义。

邱立伟 吴玉鹏 冒 杰 张乐安/中核核电运行管理有限公司

事件概述

秦山第二核电厂2台650 MW机组以发电机—变压器组方式接入秦山500 kV联合开关站。发电机与变压器之间安装ALSTOM公司的PKG-ZV型断路器,断路器的操作通过1个三相气动控制阀来完成。

故障前,1#主变压器通过500 kV开关站倒送电,发电机大修后准备冲转并网。在首次执行并网操作时,发电机出口断路器合闸后瞬时分闸停机,发电机保护屏显示“发电机断路器非全相”动作。根据录波文件分析,三相电流基本平衡,负序电流非常小,发电机主回路工作正常,此次为保护误动作。主接线如图1所示。



邱立伟/工程师

关键词/Keywords

发电机出口断路器·
核电·
非全相保护·
误动作·
负序电流·

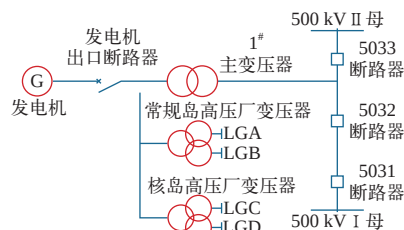


图1 电气主接线

非全相及其危害

发电机断路器非全相是指发电机出

口断路器由于误操作或者机械方面的原因,在发电机并网操作时有一相或两相关闭合不上,在发电机解列时有一相或两相分断不开,或者在正常运行时发生一相或两相分闸(即偷跳)。发生非全相时,正序电流分量产生的正序旋转磁场与转子同速度,不切割转子;而负序电流产生的负序旋转磁场以2倍的同步转速切割转子。负序磁场扫过表面转子会使转子铁心表面、转子线圈、阻尼线圈以及转子的其他金属结构部件感应出2倍工频的电流,这个高频的电流在转子的表面流通,电流的大部分通过转子本体,还通过套箍甚至中心环。这些电流将造成转子表面过热,并产生局部高温。当负序电流过大、通过时间过长时,将烧坏发电机转子。此外,负序电流产生的负序旋转磁场在转子上产生2倍频率的脉动转矩,使发电机组产生振动,机组运行的噪声增加,可能引起金属疲劳和机械损坏。对于汽轮发电机来说,转子发热是主要的,为防止烧坏转子,一般不允许发电机非全相运行,且必须配置非全相保护。图2为发电机断路器非全相保护原理。

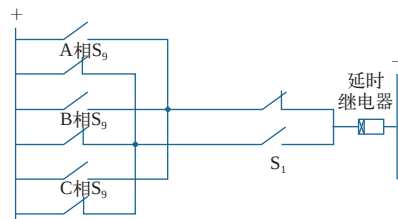


图2 发电机断路器非全相保护原理

S_9 —断路器辅助触头 S_1 —起动作控制单元

另外, 如果因操作机构故障非全相保护动作后仍不能断开其他健全相, 则还应动作于失灵保护, 切断与本断路器有关的其他有源回路。非全相起动失灵保护逻辑如图3所示。

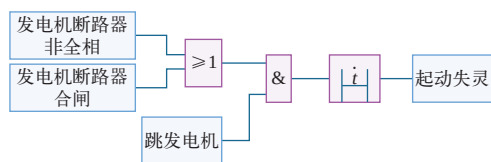


图3 断路器非全相起动失灵逻辑

故障处理及原因分析

1. 故障处理

秦山第二核电厂1#发电机非全相保护分闸后, 现场检查各报警: 光窗显示“发电机断路器非全相”, 同时KIT出现“发电机断路器非全相”动作, 发电机保护A、B柜“非全相”保护均动作, 分闸指示灯亮。分析波形文件, 发电机三相电流同时出现, 分闸后又同时消失, 其幅值和相位均没有发现异常, 由此可推断主回路工作正常, 非全相保护动作应属控制回路故障。

从非全相保护的逻辑图分析, 非全相动作的原因在断路器的辅助触头 S_9 和发电机断路器起动联动触头 S_1 上。发电机出口断路器非全相保护是利用三相分合闸辅助开关 S_9 及气动控制单元辅助开关 S_1 的辅助触头组成非全相检测回路。正常情况下, 无论断路器是分闸还是合闸状态, 该检测回路均为开路。如果断路器发生非全相, 该回路通过故障相的分合闸辅助触头导通, 再经延时继电器延时后自动触发保护分闸。

现场检查断路器主触头三相正常动作, 而B相 S_9 辅助触头却没有正常动作。发电机出口断路器 S_9 动作是通过位于断路器主静触头上方金属销及一系列机械连杆装置来实现的, 断路器合闸时通过机械连杆传动作用在辅助开关 S_9 上并改变其辅助触头状态。打开主触头室检查, 发现绝缘支撑件开裂, 其机械连杆传动失效, 相应的 S_9 辅助触头无法正常动作而造成非全相保护误动作。对于损坏的 S_9 连杆绝缘支撑件, 现场用新备件进行了更换, 新绝缘支撑件通过改进材料加工工艺很好地解决了

该问题。绝缘支撑件如图4所示。



图4 绝缘支撑件

1—新绝缘支撑件备件 2、3—损坏开裂绝缘支撑件

2. 原因分析

(1) 绝缘支撑件设计制造缺陷

比较新备件与损坏的 S_9 连杆绝缘支撑件, 发现破裂绝缘支撑件存在设计制造缺陷。旧的支撑件材料加工时方向选取不合理, 造成其最薄弱处的受力方向刚好与环氧材料玻璃布粘接面垂直。由于环氧材料玻璃布粘接面层间很容易剥离, 使得该绝缘支撑件在动触头合闸时因猛烈撞击而裂开。新工艺加工的支撑件已经彻底解决了设计缺陷。

(2) 非全相保护配置不完善

非全相运行保护一般应由灵敏的负序电流元件和非全相判别回路组成^[1], 经短延时动作后断开其他健全相。当三相触头不同步时, 由于有延时, 在没有负序电流的情况下也不会误出口分闸, 但是, 断路器的三相辅助触头如不可靠, 则很有可能会误出口, 秦山第二核电厂非全相保护误动作就属于这种情况。在辅助触头不可靠的情况下, 非全相保护不应取消负序电流元件。

发电机非全相保护及非全相起动失灵逻辑改进

1. 发电机非全相运行分析

(1) 发电机出口断路器两相断开

在两相断线处出现的负序、零序电流与各序阻抗之和相关, 由于秦山第二核电厂发电机中性点为配电变压器接地, 零序阻抗很大, 在两相断线处出现的负序、零序电流及相电流几乎为零, 可以认为两相断线后发电机全甩负荷, 不会损害发电机的定、转子。因此, 即使出现两相断线的情况, 也可以由运行人员手动断开发电机断路

器,而不会造成重大危害。

(2) 发电机出口断路器一相断开

发电机中性点通过配电变压器高阻接地,变压器励磁阻抗很大,可近似认为开路。但单相断线后负序电流仍然存在,其幅值与断相前的负荷电流幅值成正比,负荷电流越大,断线处产生的负序电流也将越大。在刚并网或低负荷运行时,发电机出现非全相,由于负荷电流较小,发电机的负序电流也很小,大约为负荷电流的一半,因此对发电机转子的影响较小,不会引起严重的后果。但如果在满负荷运行情况下发生非全相,负序电流将达到负荷电流的一半;如果不停机,将对发电机转子造成严重的后果。

另外,核电厂发电机与火电厂的不同之处在于核电厂有孤岛运行方式,即500 kV断路器断开外电网与核电机组的联系,发电机直接带厂用电低负荷运行,此时厂用负荷一般只有发电机总负荷的6%左右。进入孤岛运行模式后一旦发生发电机出口断路器一相断开,那么高压厂变压器低压侧两相电压将会降低很多,厂用负荷电气设备不能正常运行。更严重的是,高压厂变压器中压母线上装设监视母线线电压的3个继电器同时低到70%额定电压以下时,才动作切换厂用电源。但是,当发电机出口断路器非全相运行时,中压母线总有一个线电压幅值大于70%额定电压,因而闭锁了厂用电源的切换。低电压下运行的电动机因出力下降,造成工艺系统状态紊乱,甚至导致厂用电系统的灾难性故障,影响整个机组的正常运行。

可见,发电机组处在孤岛运行情况下出现断路器一相断线时,会对厂用负荷不利,虽然这样的事故几率很小,但出现的后果会很严重。在这种情况下,为了保证厂用辅机系统的安全,应能够降低负序元件整定值以便开放保护快速动作,这也是核电厂和火电厂在发电机出口断路器非全相保护中应该有所区别对待的地方。

2. 非全相保护及起动失灵逻辑改进

为防止非全相保护因断路器辅助触头故障而误动作,将负序电流元件引入到非全相保护中^[2]。发电机断路器非全相判别回路动作且负序电流元

件也动作,判定为发电机断路器非全相,保护动作于发电机分闸;如果非全相判别回路动作但负序电流元件未动作,则非全相保护只发信号但不出分闸^[3],由运行人员根据情况及时处理。非全相保护逻辑如图5所示。

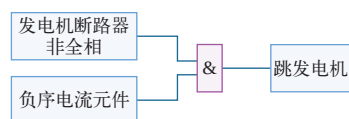


图5 改造后的非全相保护逻辑

对于非全相保护动作后仍不能断开其他健全相而需要起动失灵的情况,也加入负序电流元件作为附加判据,这主要是考虑到秦山第二核电厂在调试期间多次因为发电机出口断路器辅助触头非同期引起发电机非全相保护和起动失灵误跳500 kV开关,失去主厂外电源,反应堆停堆^[4]。这种改造经过几年的运行考验证明是成功的。非全相保护起动失灵逻辑如图6所示。

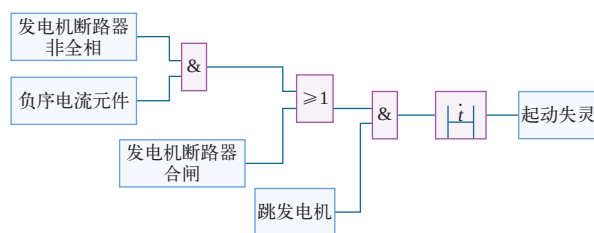


图6 改造后的非全相起动失灵逻辑

利用负序电流作为起动条件,提高了非全相判断的可靠性,但是应该指出的是即使会产生负序电流的非全相,其负序电流的大小也跟发电机所带负荷有关。总体而言,故障前所带负荷越大,故障后负序电流越高,负序元件在低负荷下可能不会起动,这时如果发生发电机出口断路器非全相,则运行人员应进行手动干预或者手动停机。

结束语

随着微机发电机—变压器组保护的技术进步及相关产品的逐渐成熟,保护本身的误动作呈下降趋势。但是,设备附件的缺陷随设备投运年限的增长而增加,对保护装置的运行是一大考验。

(下转第71页)

结束语

开关磁阻电动机在回馈制动模式下, 调节 θ_{on} 和 θ_{off} 对输出功率均有较大影响, 通过实验分析得知, 在保证输出功率最大和能量回收率最高的原则下, 得到的优化后角度如表2所示, 可见, 高转速时需要提前开通, 延迟关断控制, 用以弥补高转速带来的有效发电电流值低的问题, 进而提高输出功率和能量回收率, 为SRM的控制策略研究提供了理论依据。

表2 发电最优的开通角和关断角优化结果

转速/ (r/min)	3 500	4 000	4 500	5 000	5 500	6 000	6 500
开通角 (°)	16	15	14	13	13	13	13
关断角 (°)	28	30	30	31	31	31	31

参考文献

- [1] 何仁. 汽车制动能量再生方法的探讨 [J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2005 (6): 1-4.
- [2] 何仁, 孙龙林, 吴明. 汽车新型储能动力传动系统节能机理 [J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2002 (3): 67-71.
- [3] Rahman K M, Fahimi B, Suresh G, et al. Advantages of switched reluctance motor applications to EV and HEV: design and control issues [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2000, 36 (1): 111-121.
- [4] Takeno M, Chiba A, Hoshi N, et al. Test results and torque improvement of the 50-kW switched reluctance motor designed for hybrid electric vehicles

- [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48 (4): 1327-1334.
- [5] 曹志亮, 朱学忠, 刘迪吉. 开关磁阻电动机再生制动分析与应用 [J]. 南京航空航天大学学报, 2001 (1): 60-63.
- [6] 刘迪吉, 曲民兴, 朱学忠, 等. 开关磁阻发电机 [J]. 南京航空航天大学学报, 2003 (2): 109-115.
- [7] 吴建华. 开关磁阻电机设计与应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
- [8] 赵博, 张洪亮, 等. Ansoft 12在工程电磁场中的应用 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [9] Rafajdus P, Peniak A, Peter D, et al. Optimization of switched reluctance motor design procedure for electrical vehicles [C]. Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2014 International Conference on. IEEE, 2014: 397-404.
- [10] Takeno M, Chiba A, Hoshi N, et al. Test results and torque improvement of the 50-kW switched reluctance motor designed for hybrid electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48 (4): 1327-1334.
- [11] 宋受俊, 刘虎成. 开关磁阻电动机几何尺寸敏感性分析及优化研究 [J]. 微特电机, 2012 (12): 32-34, 45.
- [12] 宋受俊, 刘卫国. 基于磁链轨迹的开关磁阻电机能量效率仿真研究 [J]. 系统仿真学报, 2008 (21): 5970-5975, 5998.

(收稿日期: 2014-08-08) EA

(上接第61页)

作为继电保护专业人员, 应该从事故中总结经验教训, 根据主设备及其附件的实际性能改进保护配置, 以便更好地保护主设备。

参考文献

- [1] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用 [M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2001: 445.
- [2] 李德佳. 国产大型发电机-变压器组及辅助

- 变保护的调试和运行 [J]. 继电器, 2005, 33 (20): 28-32.
- [3] 涂育中. 沙角C电厂发电机出口断路器非全相保护研究 [J]. 广东电力, 2005, 18 (8): 56-61.
- [4] 王建成, 郑砚国, 刘明章, 等. 秦山第二核电厂非全相保护起动失灵动作原因的分析及解决措施 [J]. 继电器, 2006, 34 (4): 83-85.

(收稿日期: 2014-09-15) EA