

核电厂发生蒸汽锁故障的风险及对策

高品

大亚湾核电运营管理有限公司

DOI:10.12238/pe.v2i6.10420

[摘要] 蒸汽锁是一种比较少见的故障,多发生在电网线路故障跳闸等瞬态工况,且由于其对核电厂机组参数控制带来较大影响,增加了运行人员的控制难度。本文结合汽轮机调节系统的特性,介绍了蒸汽锁的形成原因,并针对汽机振动高及堆芯通量畸变等潜在风险,从电厂安全角度给出机组控制策略和方法。

[关键词] 蒸汽锁; 调节阀; 截止阀; 蒸汽需求; 先导阀

中图分类号: TP214 文献标识码: A

The Risks of Steam Lock Faults in Nuclear Power Plants and The Countermeasures

Pin Gao

DayaBay Nuclear Power Operation and Management Co.,Ltd.

[Abstract] A steam lock is a relatively uncommon malfunction, often occurring during transient conditions such as circuit breaker trips in power grid lines. It significantly impacts the control of parameters in nuclear power plant units, thereby increasing the difficulty for operators to manage the situation. This article, in conjunction with the characteristics of the turbine control system, explains the causes of steam lock formation. It addresses potential risks such as high turbine vibration and core flux distortion, providing control strategies and methods from a power plant safety perspective.

[Key words] Steam lock, Control Valve; Stop Valve; Steam Demand, Pilot Valve

引言

汽轮机作为核电厂发电的主要部件,它将蒸汽的热能转换为机械能,从而推动发电机发电,而一旦发生蒸汽锁故障,将阻止蒸汽进入汽轮机,影响核电厂的正常发电,如果不进行干预控制,不仅存在导致汽轮机损坏的风险,严重情况下会引发停机停堆,不利于堆芯的稳定运行^[1]。某核电厂分别于2005年和2008年发生蒸汽锁故障,导致机组发电功率从1000MW降至90MW甚至停机。本文将以此两次事件为背景,深入分析蒸汽锁产生的原因、对核电机组运行的影响,总结出蒸汽锁解锁的方法及机组控制的合理化建议。

1 汽轮机进汽控制

主蒸汽通过进汽环管进入汽轮机膨胀做功,每根环形管道有一个高压汽室,其内装有一个GSE(汽轮机保护系统)截止阀和一个GRE(汽轮机调节系统)调节阀。截止阀和调节阀接收来自汽机调节系统的信号,以控制进入汽轮机的蒸汽流量。目前汽机调节系统一般采用功频调节系统,即调节器分别根据汽轮发电机组的转速和功率信号与给定值的偏差按一定调节规律给出调节信号以改变汽轮机进汽阀的开度,从而实现调节目的^[2]。如图1所示。

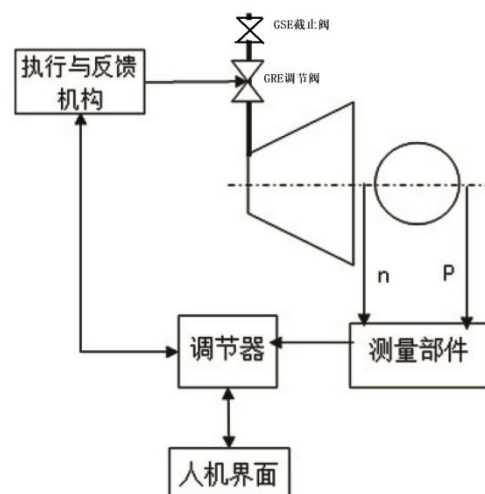


图1 汽机调节原理

压水堆核电厂采用“堆跟机”运行方式,即正常功率运行时,核反应堆功率应跟踪汽轮发电机组功率,并保持一致。因此,汽机调节系统必须把汽轮发电机组的功率需求反馈给反应堆控制系统,用来控制反应堆的输出功率与汽轮发电机组功率匹配。这

些代表汽轮发电机组功率需求及汽机运行方式的信号称为G模式接口信号, 比如汽机运行模式(自动/手动)、汽机运行方式(限荷/非限荷)、负荷速降、功率需求、负荷参考值、频率控制、开度参考值、频率贡献、蒸汽流量限值、高压缸入口压力限值等等, 这些信号将综合生成一个反应堆控制棒整定棒位, 从而控制反应堆功率能够时刻跟随汽轮发电机组功率。

2 蒸汽锁的形成原理

汽轮机进汽先后经过截止阀和调节阀, 阀门布置如图2所示, 截止阀由主阀和先导阀组成, 当截止阀先导阀全开时, 阀门具有的最大打开力为76000N(油动机力-弹簧力)。如果GRE调节阀开度足够小, 使得截止阀两侧压力小于7bar时, 截止阀可以在76000N力作用下打开。反之如果GRE调节阀开度比截止阀开度大很多时, 会造成截止阀背压很低, 其两侧压差大于7bar, 截止阀在先导阀全开后不能继续开启。

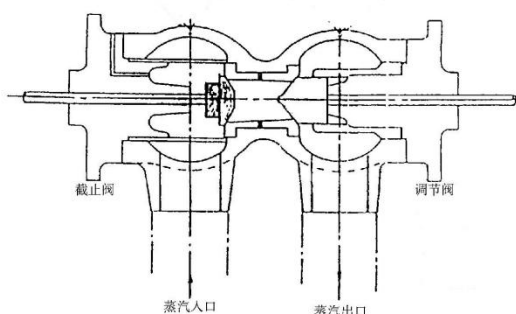


图2 汽机进汽路径

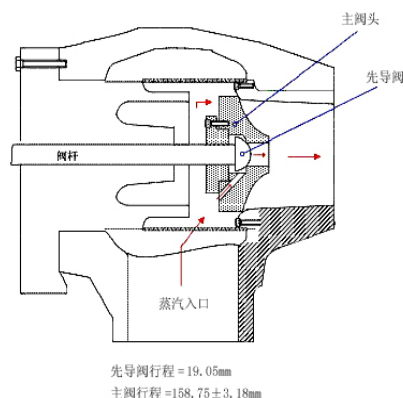


图3 截止阀

从截止阀的动作特性得知, 在0%—11%开度内, 先导阀开启, 超过11%后, 先导阀带动主阀开启。如图3所示, 先导阀的作用是平衡主阀前后差压, 由于其阀瓣面积小, 蒸汽差压作用在其上的压力较小, 故可自由开关。截止阀在11%行程后, 油动机还可提供7000N的阀门开启力(向左), 用于克服蒸汽差压作用在主阀上的压力(向右), 开启主阀。如果截止阀前后蒸汽差压过大(大于7bar), 油动机无法克服主阀前后压差, 即产生蒸汽锁。根据发电机的基本工作原理得知: 发电机正常运行时, 原动机的阻力矩克服阻力矩处于平衡状态保持转速不变, 把机械能转化为电能。这个阻力矩的大小与有功电流大小有关, 有功电流越大,

阻力矩越大, 因此要保证转速不变, 汽轮机输出的阻力矩就要增大, 这就需要调大进汽量, 反之, 如果有功电流越小, 那么阻力矩也越小, 要保证转速不变, 汽轮机输出的阻力矩就要减小, 就需要减小进汽量。当电网发生诸如线路跳闸等故障, 发电机输出的有功功率迅速降低, 流过定子铁芯的有功电流也迅速减小, 阻力矩变得很小, 而此时汽轮机的进汽门还没来得及关闭, 导致阻力矩远大于阻力矩, 汽轮机的转速势必加速上升, 此时汽轮机调节系统的超速限制和超加速度限制功能投入, 产生蒸汽负荷需求限制, 使GSE/GRE阀门迅速关小, GSE阀门关到约8%开度, GRE阀门关到约4%开度。随后又在自动负荷控制作用下开启, 由于调节阀开启速度比截止阀快10倍以上, 导致截止阀还处于先导阀开启阶段时, 调节阀已达到很大开度, 很可能使截止阀前后差压过大无法开启, 从而产生蒸汽锁。

3 机组现象及风险

现象: 机组大幅快速甩负荷到90MW左右, 远小于目标负荷, 但汽机未跳闸; G棒不会自动下插, 堆芯变热, GCT-c开启, R棒下插; 未出现负荷速降信号; 汽轮机进汽截止阀开度极小, 约为9%左右; 而调节阀开度要大得多。

风险: GRE仍然保持在自动状态, 因此G棒将仍不会随实际负荷下降而下插, 由R棒和GCT-c共同调节一回路温度, R棒插到低低棒位, 将造成堆芯功率畸变, 被迫手动停堆; 一回路过热将导致GCT-a开启或稳压器水位高高跳堆; 除氧器液位大幅波动, 如果不及干预, ADG003VV瞬间开启过大, 有可能导致蒸汽发生器虚假水位高而停堆; 汽机振动恶化, 如果较长时间停留在低功率的话, 汽机的运行条件很差, 振动较大, 汽轮机有损坏风险, 需要按照程序手动打闸^[3]。

4 机组控制策略

首先稳定NSSS参数, 防止跳机跳堆。检查GCT-c响应、ADG/SG水位正常, 必要时手动干预, 检查汽机各项参数正常; G棒不跟随下插, 一回路过热, R棒自动下插。R棒辅助下插期间不能马上将R棒放手发动, 防止一回路过热导致GCT-a开启或稳压器水位高高跳堆, 可根据当前功率对应的G棒参考位手动下插G棒, 使R棒自动上提, 控制 ΔI ; 蒸汽锁形成后, 汽轮发电机组的功率被限制在较小的水平而无法上升, 如果长时间低功率运行可能使机组的振动上升, 因此要尽快消除蒸汽锁; 控制一回路参数, 防止跳堆, 不违反技术规格书要求: ①根据规程中的稀释硼化策略控制 ΔI , 避免运行点超出 ΔI 运行区; ②机组稳定后, 考虑硼化, 将G棒提出堆芯; 尽快解锁蒸汽锁升功率, 以免长时间低功率运行导致汽机振动上升, 若预期无法在短期内顺利解锁, 可选择将汽机手动打闸, 待反应堆参数稳定后重新冲转并网。

5 蒸汽锁解锁方法

5.1 手动降负荷关小调节阀解锁

在GRE操纵员控制屏上, 同时手动按下“PERMIT”和“LOWER”按钮, 观察ACTUAL SD值随手动操作开始降低, 且GRE进入MANUAL LOAD CONTROL状态。在SD下降至20%左右时需缓慢点动操作LOWER按钮, 并在操作过程中时刻注意汽机实际功率和ACTUAL

SD的对应关系、GRE调节阀和GSE截止阀阀位的关系。当汽机功率开始随ACTUAL SD下降时,停止手动降负荷。将目标负荷设置为当前负荷值,并将GRE切至自动控制状态。将SD LIMIT设置比当前ACTUAL SD大25%。将目标负荷设置为60MW,并将降负荷速率改为5MW/min。继续观察GRE调节阀和GSE截止阀阀位,如果出现最终所有GSE截止阀突然开大,并大于GRE调节阀20%以上,则证明阀门已经被解锁。等待汽机功率稳定后,根据程序进行正常升功率。如果降负荷至60MW,截止阀仍没有全部解锁,则不再降负荷,采用方法2“ON LOAD TEST方式”进行操作进行解锁。

5.2 ON LOAD TEST方式解锁截止阀

确认GRE处于自动负荷控制状态,等待汽机功率稳定后,以10MW/min的速率将电功率降至70 MW,使调节阀关小一些,让其具有一定程度的功率调节量,同时又不能将目标负荷降得更低,防止逆功率保护动作。再次将SD LIMIT修改至比目前ACTUAL SD大25%,等待汽机功率稳定后,使用带负荷试验程序,执行阀门组“On Load Test”试验,使调节阀关闭。这个过程中可能产生两种风险:一是调节阀关小,汽机功率下降,为了维持功率,GRE将提高ACTUAL SD来开大其他调节阀,但其他调节阀达到最大开度后也不能使汽机功率达到目标负荷,从而使ACTUAL SD达到SD LIMIT限值而进入AUTO LOAD CONTROL-OPERATOR HOLD状态,如果进入到这种状态中,则需要再次降低目标负荷,并RELEASE,解除OPERATOR HOLD状态,降低负荷存在汽机功率快速下降引发逆功跳机的风险;二是:在调节阀逐步关小的过程中,截止阀前后压差减小,在调节阀关小到一定程度时(未达到TRIP值),截止阀突然自动解锁开大,蒸汽流量突然增大,引发汽机功率的增加。但这种波动较小,不会造成一回路过冷。操纵员检查截止阀的开度是否比以前大,比如已经到达了20%以上,这说明已经解锁,可直接按“RELEASE OPEN VALVE”按钮,并按“YES”按钮确认,在显示屏上观察到调节阀状态从CLOSED变换为REMOVING DUMP/OPENING,然后变为OPEN,打开刚才关闭的调节阀。如果没有解锁,则需要继续执行OLT使截止阀关闭,当屏幕显示为HOLD:等待释放时,按“RELEASE CLOSE VALVE”按钮,并按YES确认,

释放器关闭相关GSE截止阀。观察显示屏上截止阀的状态从OPEN变换为CLOSING,再转到DUMPING然后转到CLOSED状态;截止阀关闭。当屏上显示为HOLD:等待释放时,操纵员按“RELEASE OPEN VALVE”按钮,并按“YES”按钮确认,在显示屏上观察到截止阀状态从CLOSED变换为REMOVING DUMP/OPENING,然后变为OPEN,打开截止阀。观察截止阀阀位指示到达20%以上证明已经解锁。当显示屏上显示为HOLD:等待释放时,操纵员再按“RELEASE OPEN VALVE”按钮,并按“YES”按钮确认,在显示屏上观察到调节阀状态从CLOSED变换为REMOVING DUMP/OPENING,然后变为OPEN,GRE调节阀打开。操纵员确认OLT操作结束,观察截止阀开度状态,此时截止阀的开度应该远大于调节阀。

5.3在阀门模块上关阀,由仪表专业现场打开阀门

若以上方法不成功,则通知仪表专业执行在阀门模块上关阀方案。确认汽机功率稳定,GRE处于自动负荷控制状态,目标负荷设置为70MW,升降负荷速率为2MW/min;仪表人员在15米GRE001AR上手动同时按RELEASE和TRIP按钮关闭GRE调节阀。观察GSE截止阀自动打开至20%以上开度,可以确认解锁成功;通知仪表人员按照规程执行现场部分恢复操作;操纵员执行REINSTATE命令重新打开GRE调节阀。

6 结语

压水堆核电厂均采用“堆跟机”的控制方式,在发生瞬态时,由于汽轮机调节系统的响应特点和汽机进汽阀的开启特性,导致产生蒸汽锁,需重点关注两点:一是保证反应堆R/G棒控制满足要求,避免停堆或违反规范要求;二是汽轮机长期较低功率下运行,存在振动高的风险,应尽快根据3种解锁方法解锁。

[参考文献]

- [1]杨建明.汽轮机原理[M].中国电力出版社,2018.
- [2]房德明.汽轮机调节系统[M].科学出版社,2019.
- [3]濮继龙.大亚湾核电站运行教程[M].原子能出版社,1999.

作者简介:

高品(1984—),男,汉族,湖北省鄂州市人,本科,工程师,研究方向:核电运行。