

跳机试验中汽机排放流量偏大问题的处理

Treatment of the Problem of Large Emission Flow Rate of Steam Engine in Jumping Test

程进 肖遥 刘知博

Jin Cheng Yao Xiao Zhibo Liu

中广核惠州核电有限公司 中国·广东 惠州 516300

CGN Huizhou Nuclear Power Co., Ltd., Huizhou, Guangdong, 516300, China

摘要: A 电站机组启动期间执行跳机不跳堆试验中, R 棒下插几步后持续提升到堆顶, 表明整个瞬态过程中持续过冷, 与理论预期不符。最终核功率超出最终功率整定值的预期允许范围, 其余参数调节稳定。

Abstract: During the start-up test of the A power station unit, the R rod was continuously raised to the top of the reactor after being inserted for a few steps, indicating that the entire transient process continued to be supercooled, which was inconsistent with theoretical expectations. The final nuclear power exceeds the expected allowable range of the final power setting value, and the remaining parameters are adjusted stably.

关键词: GCT; G 模式; 甩负荷; 最终功率整定值; R 棒

Keywords: GCT; G mode; load rejection; final power setting; R rod

DOI: 10.12346/etr.v5i6.8192

1 引言

针对此次事件, 分别从试验数据分析、GCT 阀门容量分析、GCT 阀门选型分析、GCT 阀门容量偏大的瞬态模拟, 最终判断出核功率上涨的根本原因, 并提出改造方案, 给出安全评价。

2 运行方式

2.1 GCT 功能与容量要求

2.1.1 系统功能

因堆芯特性的要求, 反应堆功率不能总是随着汽轮机负荷快速地变化。在功率运行期间, 为了让机组能够适应汽轮机负荷的快速、大幅变化(如甩负荷等), 同时降低 NSSS 温度和压力的瞬变幅度, 需要提供一个“人工负荷”, 即 GCT 系统。除此之外, 在低功率工况下 GCT 系统还承担稳定二次侧压力和平和一、二回路能量的功能^[1]。

GCT 功能属于安全级, 根据安全分析的原则, DBC 和 DEC-A 事故分析不考虑其缓解作用, 仅考虑不利作用。因此, GCT 作为安全 3 级功能, 不承担严格意义上的安全功能。

依据可能减少放射性释放的原则, GCT 通过控制一回路平均温度和限制 MSH 压力, 从而降低 VDA 和 MSSV 开启的频率。

T 模式:

①使机组适应汽轮机的负荷锐减, 包括汽轮机甩负荷至厂用电, 从而避免反应堆紧急停堆和 VDA 开启。

②在汽轮机跳闸工况下避免反应堆紧急停堆和防止 VDA 的开启, 将 RCP 参数恢复至零功率或最终功率整定值对应的状态。

P 模式:

①参与反应堆从热停堆工况至汽轮机接入工况间的平均温度控制, 并实现汽轮机的热机和接入。

②参与反应堆从热停堆到余热排出系统投运工况点间的降温或升温。

中压快速冷却模式:

能实现中压快速冷却功能, 以达到一回路压力降低至允许安注泵投入的工况, 并且在此过程中防止 VDA 的开启。

【作者简介】程进(1987-), 男, 中国上海人, 本科, 工程师, 从事电厂生产计划与调试启动研究。

2.1.2 容量要求

设计容量要求:

① GCT 系统配置了 16 个调节阀, 总排放容量为额定蒸汽流量近 90%。

② 2 个规格相同的小容量阀门。

③ 14 个规格相同的大容量阀门。

最大容量要求:

单个 GCT 调节阀的意外开启将导致主蒸汽的过度排放, 在安全分析中, 考虑了该类事故的后果。建议单个 GCT 调节阀的最大排放容量不宜过大。

阀动态特性要求:

① 阀门特性为线性。

② 开关时间(阀门快开、快关的时间要求包含死区时间)。

注: GCT 的控制参数设计和功能验证均是基于 GCT 设计容量, 即认为阀门达到全开应正好等于设计要求的排放容量。

2.2 三代电站 HL 或 TT 瞬态下的控制原理

2.2.1 G 模式反应堆控制中的最终功率整定值

① 在甩负荷至用电 (HL) 或汽轮机跳闸 (TT) 工况下, 通过最终功率整定值的控制实现堆机解耦, 改为由 GCT 排放与堆功率匹配的蒸汽流量^[2]。

② 最终功率整定值: GCT 处于 T 模式, 发生甩负荷至厂用电或汽轮机跳闸时, 瞬态发生前汽轮机负荷 \geq 某定值, 为一定功率; 瞬态发生前汽轮机负荷 $<$ 某定值, 取瞬态发生前的汽轮机负荷。

③ 最终功率整定值生成后, R 棒和 GCT T 模式的 TREF 均转变为基于最终功率整定值产生。

2.2.2 GCT T 模式控制原理

① 根据温差信号产生阀门开度命令, 确保机组可以应对大幅度负荷减少瞬态。

② 闭环部分: $TERROR=TAVGMAX-TREF$, $TAVGMAX$ 为冷却剂平均温度最大值, TREF 根据汽轮机负荷或最终功率整定值生成的参考平均温度。

③ 开环部分: 根据最终功率整定值和汽轮机负荷的偏差产生一个温度偏差信号, 修正用于判断阀门是否快速开启并且修正调制开启总开度的信号。

2.3 三代电站 RRC-77 跳机不跳堆瞬态试验

该试验的目的是验证机组在跳机的瞬态工况下, 控制系统将机组主要参数调整至正常运行区域的能力:

P1 平台跳机不跳堆瞬态试验。

P2 平台跳机不跳堆瞬态试验。

RRC-77 运行准则^[3]:

① 不触发反应堆紧急停堆。

② 无手动干预情况下, 电厂最终达到稳定状态; 主参数(反应堆功率, 稳压器压力, 稳压器液位, 蒸汽发生器液位, 冷却剂平均温度)最终维持在设定值附近, 其中反应堆冷却

剂平均温度在死区范围内。

P1 功率平台试验: 瞬态过程结束后, 反应堆功率稳定在最终功率设定值(跳机前一时刻功率值)附近。

P2 功率平台试验: 瞬态过程结束后, 反应堆功率稳定在最终功率设定值附近。

3 原因分析

3.1 试验数据分析

根据现场试验数据与理论计算的对比, 在汽轮机跳闸时刻, 两者中的 R 棒均快速下插, 但现场 R 棒迅速转为快速提升状态直至提到堆顶, 而理论计算的 R 棒在一定时间范围内稳定至某步数, 表明现场整个瞬态过程中持续过冷(关键现象), 与理论预期不符。

3.1.1 棒控系统异常排查

① 经核查, 现场冷却剂温度控制逻辑和控制参数与设计要求一致。

② RRC 75 冷却剂平均温度控制试验和 RRC 79 负荷阶跃变化试验结果满足验收准则, 验证了在低功率水平下的棒控系统功能和性能满足设计要求。

③ 现场瞬态中 R 棒因冷却剂平均温度偏低而持续提升是合理的控制响应。

3.1.2 GCT 控制异常排查

① 经核查, 现场 GCT 控制逻辑和控制参数与设计要求一致。对比现场试验和理论计算的 GCT 阀门开度基本一致: 前 4 个阀门全开, 第 5 个阀门开度基本一致。

② 试验前, 安全分析专业的 25%FP TT 瞬态模拟、仪控专业工程仿真机和全范围仿真机采用现有控制参数均满足运行准则。

3.1.3 其他耗汽系统排查

① 经专业核查, 现场主蒸汽流量增加包含了 ADG 主汽用量的增加, 查阅现场数据 ADG 流量增加。

② 实测 VVP 蒸汽流量明显大于设计预期, 总蒸汽流量偏大。

3.2 对瞬态试验影响

根据模拟机验证, 如果 50%FP 平台触发意外跳机瞬态, 在不干预的情况下核功率预期会上涨至 40% 左右, 导致产生 P16+C8+GCT 不可用(T 模式下 $Tavg-Tref < X^{\circ}C$) 信号触发自动跳堆的风险; 50%FP 平台的甩空载、甩厂用电瞬态, 核功率最高上涨 38%FP 以下, 未触发保护动作; 50%FP 平台跳堆工况, VVP 压力低于“某定值 1MPa.g+P11 非”后触发 F3VVP 隔离阀关闭, 隔离 GCT, 稳压器压力低某定值 2 后开始回升, 不会触发安注, 不会重返临界。

3.3 GCT 阀门容量偏大的瞬态模拟

阀门流量理论估算方法原理:

$$Q_v = A \cdot C_v \times \sqrt{\Delta P / \rho}$$

基于现场实际数据, 结合厂家理论 C_v 曲线进行估算,

在参考压力下，大阀容量、小阀容量均有所增大。

基于设计程序 MANTA 模型的对比分析，计算结果如下：

① GCT 为原始设计容量 + 未考虑 ADG：核功率最终稳定在 P2 左右，R 棒最终棒位 B1 步左右。

② GCT 为原始设计容量 + 基于现场数据的 ADG 流量增加：核功率最终稳定在 P3 左右，R 棒最终棒位 B2 左右。

③ GCT 为增大设计容量 + 基于现场数据的 ADG 流量增加：核功率最终稳定在 P4 左右，R 棒最终棒位不到 B3 步。

因此，仅根据专业提供的大阀和小阀全开容量估算修改模型，重新开展跳机的仿真。结果表明，在增大 GCT 阀门容量后，反应堆功率最终稳定在 P1 左右。

3.4 GCT 阀门选型分析

技术规格书要求大阀额定流量为一个排放合理值 1，小阀额定流量为排放合理值 1，与其他 CPR 项目选型原则一致，并与中核项目选型原则一致。

经核查，该机组 GCT 额定流量对应的 Cv 值比故障全开小，其他参考电站额定流量及故障全开对应的 Cv 均约为相同值。

3.5 根本原因

综合上述分析，最终判断最终核功率达到 1/3 左右的根本原因为：按照 GCT 阀门的理论曲线，设计流量应该对应于将近 90% 的开度，阀门全开时的流量大于设计流量，瞬态过程中一回路温度过冷，控制棒进行调节引起一回路功率升高。

4 改造方案

对 GCT 阀门进行改造以保证实际排放流量与设计要求保持一致，阀门容量改造方案有两种，改造方案对比见表 1。

表 1 阀门容量改造方案对比

方案	具体措施	优缺点
电子限位	通过阀门定位器调节全开的位置，大阀调整至额定流量对应的开度大约 90%，小阀调至 60% 左右	<p>◇可解决 GCT 阀门调制开启模式下容量过大问题，但快开模式下不经过定位器，阀门仍会全开。</p> <p>◇无法解决 GCT 快开模式下容量过大问题，将对 FSAR 第 5 章、第 19 章的超压分析和 DEC 事故分析产生不利影响。尽管定量计算表明 FSAR 的结论不受影响，但将影响 FSAR 定量计算的结果</p>
机械限位	增设机械限位卡块，设置位置与电子限位所述一致	◇可彻底解决阀门容量过大问题，但需要在阀芯或活塞执行器内进行机械改造，需具备改造的窗口条件

针对电子限位方案，因快开模式下阀门依然会全开，且 GCT 容量偏大对 FSAR 超压和 DEC 事故分析存在不利影响，建议机械限位为最终方案。

联合国产化供货商重庆川仪对美国 CCI 供货的三种类型 16 台 GCT 调节阀的限位装置安装空间尺寸进行了现场测绘、并完成了力学分析计算和详细的机械限位装置的零部件设计工作。

①类型一：对于 DN150 调节阀，采用可调机械限位装置；可调行程范围在 65% 左右。

②类型二：对于 DN300 调节阀，由于安装空间较小，无法采用可调限位装置，拟采用固定机械限位装置 1，将阀门限位在 90% 左右开度。

③类型三：对于 DN300 开关阀，由于安装空间也较小，也无法采用可调限位装置，拟采用固定机械限位装置 2，将阀门限位在 90% 左右开度。

5 评估

5.1 运行评估

①对 SG 水位控制的影响分析：SG 水位控制系统中采用 GCT 开度指令信号参与汽机参考负荷计算，本次 GCT 阀门容量改造（电子限位或机械限位）均不影响 GCT 阀门开度信号，因此对 SG 水位控制系统无影响。

②安装误差按改造后行程的设计精度考虑，专业评估对每个大阀影响 1kg/s 左右，对每个小阀影响不到 0.5kg/s。专业基于上述 GCT 阀门容量受安全误差，考虑负向偏差对二类超压力瞬态 LOOP 开展定量分析，计算结果表明对一回路压力峰值的影响在小数点第四位，影响可以忽略。

③对 GCT 执行正常运行控制功能的影响：改造后恢复了原有设计要求，包括 GCT 容量和阀门性能都不受影响，因此 GCT 执行设计的正常运行控制功能不受影响。

5.2 安全评估

在功率运行时的二类与四类超压瞬态分析中考虑了 GCT 阀门开启：

① FSAR 二类超压瞬态：对于二类反应堆冷却剂系统超压工况——短时间丧失了外电（LOOP），由于 GCT 排放对瞬态超压起缓解作用，当前现场 GCT 容量偏大，对超压缓解更为有利，因此 FSAR 分析结论不受影响。

② FSAR 四类超压瞬态：对于四类反应堆冷却剂系统超压工况——失去正常给水的 ATWS，由于 GCT 容量增大，将导致 GCT 投运时二次侧排量更大，更早触发 MSIV 隔离阀关闭，GCT 会提前被隔离，从而导致一回路温度升高更早，稳压器排水状态下将导致更快更高的稳压器压力和一回路压力上升，从而对一回路压力峰值有不利影响。基于 CJ 专业评估的 GCT 阀门容量增大程度，经过计算分析，目前 GCT 容量增大会引起超压瞬态的裕量降低，但仍然满足验收准则，FSAR 分析结论不受影响。

在 15 章中的事故分析中，GCT 通流能力偏大主要涉及 SG 二次侧流量过度增加：

①蒸汽发生器（SG）二次侧蒸汽流量过度增加事故分

析中,假设蒸汽流量从名义蒸汽流量阶跃增加至110%名义蒸汽流量,可用于包络单个GCT阀门误开造成的后果。

②结合现场数据分析,单个GCT大阀在100%FP下阀门全开的排放流量低于安全分析中假定的增幅10%名义蒸汽流量。安分分析中考虑的蒸汽流量增加幅度依然可以用于包络单个GCT阀门误开造成的后果,因此FSAR分析结论不受影响。

6 结语

在机组投入商业运行前,需要对系统及设备进行运行考验,暴露并消除缺陷提高整个机组在运行工况下安全运行可靠性。

GCT实际排放流量偏大处理正是在调试窗口下发现并处理,论文通过对是阀门全开时的流量大于设计流量,使得瞬态过程中一回路温度过冷,控制棒进行调节引起一回路功率升高现象进行详细分析,形成较为可靠的修改方案。类似此类事件在机组调试过程中多有发生,我们需秉持“严、慎、细、实”的工作作风,通过对调试过程中所暴露出的缺陷深挖细究,积极消除隐患,为三代核电机组商运后的高质量发展添砖加瓦,贡献绵薄之力。

参考文献

- [1] 陈常平,陈立营.核电机组运行与控制[M].大亚湾核电,2020.
- [2] 李靖.HPR1000融合版系统与设备高级运行[M].2022.
- [3] 陈开林.防城港核电站二期调试启动试验报告[R].2022.