

某压水堆核电站热停期间GCT-a阀门频繁动作原因及解决方案探究

金德升, 梁凯雯, 张薇*, 毛玉龙, 商超皓, 胡友森

中广核研究院有限公司, 广东 深圳

收稿日期: 2022年7月18日; 录用日期: 2022年10月3日; 发布日期: 2022年10月10日

摘要

某压水堆核电站在热停堆平台期间, 现场发现汽轮机旁路排大气系统(GCT-a)阀门(GCT133VV)开关频繁动作, 估计频率为10 s一次, 现场可以明显听到主阀落座的声音, 阀门出口消音器也可观察到明显的排汽变化, 即GCT-a阀门出现了较频繁的振荡现象。本文对该现象进行了原因分析, 并针对性的给出了解决方案。研究表明, GCT-a阀门采用比例积分微分(PID)控制系统进行动作控制, 其中比例系数P参数的大小表征的是阀门开启的速率, 该参数设置越大, 阀门开启越快。由于该阀门的功能是限制瞬变过程中二回路超压, 因此该参数需要保证II类瞬态中不发生二回路超压现象, 即需要找到一组P参数既能满足安全要求, 又能降低阀门振荡频率。通过P参数敏感性分析及二类瞬态超压最恶劣工况(丧失厂外电源LOOP)的安全评价, 本文给出了不同P参数的分析结果, 电厂通过优化P参数设置后, 解决了现场阀门频繁动作的问题。本文研究结果可供电厂运行参考。

关键词

GCT-a阀门, 振荡, 热停堆, PID, LOOP

Study on the Cause and Solution of Frequent Action of GCT-a Valve during Hot Shutdown Station in a PWR Plant

Desheng Jin, Kaiwen Liang, Wei Zhang*, Yulong Mao, Chao hao Shang, Yousen Hu

China Nuclear Power Technology Research Institute, Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

Received: Jul. 18th, 2022; accepted: Oct. 3rd, 2022; published: Oct. 10th, 2022

*通讯作者。

文章引用: 金德升, 梁凯雯, 张薇, 毛玉龙, 商超皓, 胡友森. 某压水堆核电站热停期间 GCT-a 阀门频繁动作原因及解决方案探究[J]. 核科学与技术, 2022, 10(4): 232-238. DOI: 10.12677/nst.2022.104025

Abstract

During the hot shutdown station of a certain PWR nuclear power plant, it was found that the GCT133VV valve was frequently switched on and off, and the estimated frequency was once switched on and off at 10 s. The sound of the main valve seated could be obviously heard on the site, and the obvious steam change could also be observed in the muffler at the valve outlet, that is, the GCT-a valve was frequently oscillated. In this paper, the causes of this phenomenon are analyzed, and targeted solutions are given. The research shows that the GCT-a valve is controlled by PID control system, and the value of the proportional coefficient P parameter represents the opening rate of the valve. The larger the parameter setting, the faster the valve opening. Because the function of the valve is to limit the overpressure in the secondary circuit during transient process, this parameter is needed to avoid the overpressure phenomenon in the secondary circuit during DBC II transient. So it is necessary to find a set of P parameters that can not only meet the safety requirements, but also reduce the oscillation frequency of the valve. Through P parameter sensitivity analysis and transient overpressure (LOOP) safety evaluation, this paper gives the analysis results of different P parameters. After optimizing P parameter setting, the plant solved the problem of frequent valve action on site. The research results of this paper can also be used as a reference for plant operation and new reactor design.

Keywords

GCT-a Valve, Oscillation, Hot Shutdown Station, PID, LOOP

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

反应堆功率要跟随汽轮机负荷变化,当汽轮机负荷锐减(如甩负荷、汽轮机脱扣)时,由于反应堆的功率控制相比汽机负荷变化要慢,会瞬时出现堆功率与汽轮机负荷不一致的情况。这时,汽轮机旁路排放系统投入,维持一回路和二回路的功率平衡。因此汽轮机旁路排放系统的功能是:当反应堆功率与汽轮机负荷不一致时,汽轮机旁路排放系统把多余的蒸汽排向冷凝器、除氧器和大气为反应堆提供一个“外加”的负荷,避免核蒸汽供应系统(Nuclear Steam Supply System, NSSS)中温度和压力超过保护阈值,确保电站的安全[1]。

汽轮机旁路排放系统中 GCT-a 系统是通过 GCT-a 阀门的开启向大气排放剩余蒸汽来完成堆机之间的负荷平衡功能[2],该系统属于安全级系统。GCT-a 阀门的动作采用 PID (P 是比例环节, I 是积分环节, D 是微分环节)调节器来完成[3],PID 调节器中比例系数的设置会影响 GCT-a 阀门的开启特性,从而影响机组瞬变过程中的瞬变进程和瞬变后果。

某压水堆核电厂 X 机组处于标准热停工况时,现场发现 GCT-a 阀门(GCT133VV)开关频繁,估计频率约为 10 s 开关一次,现场可以明显听到主阀落座的声音,阀门出口消音器也可观察到明显的排汽变化,这表明 GCT-a 阀门出现了较频繁的振荡现象。GCT-a 阀门动作受 PID 控制参数的影响较大,其中的 P 参数直接影响阀门开启特性,设置合理的 P 参数才能保障 GCT-a 阀门正常开启。

2. 原因分析

正常运行时，GCT-a 排放阀是常闭的。当凝汽器蒸汽排放不能使用时，替代“反应堆冷却阀”，提供“外加”的负荷。通过蒸汽排放，使余热排出系统达到可投运程度，使得在反应堆冷却剂系统中蓄存的能量和余热能够排出，最终控制蒸汽发生器的压力为零负荷值、并维持反应堆平均温度接近其热停堆值[4] [5]。

GCT-a 蒸汽排放采用压力控制器控制，正常运行控制器的设定值为 7.85 MPa，比凝汽器蒸汽排放的最高压力整定值高，压力控制原理图如图 1 所示。压力控制器为比例-积分(PI)控制器，传递函数为 $K(1+1/\tau s)$ ，其中 K 为比例系数， τ 为积分系数。

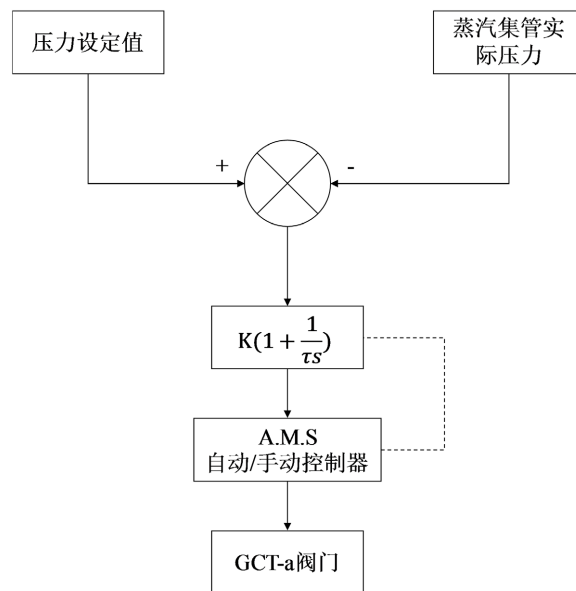


Figure 1. GCT-a logical diagram of pressure control
图 1. GCT-a 控制原理图

从控制逻辑及传递函数可知，比例系数 K 直接影响阀门的开启特性， K 设置越大，则阀门开启越频繁； K 设置越小，则阀门开启较慢，在事故瞬态下可能存在二回路超压风险。因此，合理的比例系数设置，才能保障 GCT-a 阀门的正常开启。

检查 X 机组 GCT-a 阀门控制的比例-积分环节，发现 X 机组中 P 参数设置为 526%/MPa，此时在热停期间阀门动作频繁。根据图 1 的控制逻辑， P 参数设置过大是 GCT-a 阀门频繁动作的直接原因。

3. P 参数调整论证

3.1. 分析工况

GCT-a 阀门的功能是限制瞬变过程中二回路超压，因此 P 参数的设置需要保证 II 类瞬态中不发生二回路超压现象。

本文所述的分析考虑两种工况：

工况 A：堆功率低于 2%FP，GCT-c 系统未投运，二回路压力由 GCT-a 阀门控制；

工况 B：堆功率大于 2%FP，GCT-c 系统已投运，二回路压力由 GCT-a 阀门限制。

对工况 A，GCT-a 阀门承担二回路压力保护和控制的双重功能，较小的比例系数 P 参数可使得阀门

在瞬变过程中开关较为缓慢，压力控制较为平稳，从而较好地执行控制功能。

对工况 B，GCT-c 阀门承担二回路压力控制的功能，GCT-a 阀门承担限制二回路压力的功能，较大的 P 参数可使得 GCT-a 阀门在瞬变过程中开启较为快速，起到有效限制二回路系统压力的功能，因此 P 参数的设置需要满足工况 B 中最恶劣的瞬态不发生超压现象。

二类瞬态中最恶劣的超压瞬态为满功率下丧失厂外电(LOOP)瞬态，且从安全分析的角度而言，工况 B 可以包络工况 A。因此，本文基于 LOOP 事故对 GCT-a 阀门控制 P 参数进行论证，确保事故进程中二回路不会出现超压风险。

3.2. LOOP 分析假设

在 LOOP 瞬态开始 0.3s 内蒸汽流量丧失，给水流量在 1 s 内丧失。失去厂外电源同时也会导致冷凝器真空度逐步丧失，因此在分析中考虑蒸汽往冷凝器排放短期是可行的。用于该瞬态分析的主要假设如下：

- 反应堆初始功率为名义功率加不确定性；
- 初始反应堆冷却剂平均温度为名义值加不确定性；
- 初始稳压器压力为名义值减不确定性；
- 初始稳压器液位为名义液位减不确定性；
- 初始反应堆冷却剂流量为机械设计流量；
- 一次侧到二次侧的传热最大(SG 传热管不考虑堵管，且均为净管)；
- 慢化剂密度系数为零；
- 汽轮机蒸汽流量在瞬态开始 0.3 s 内丧失；
- 正常给水在瞬态开始 1 s 内丧失；
- 反应堆冷却剂主泵低-低转速触发停堆，考虑延迟时间；
- 一回路压力限制，考虑稳压器安全阀的数量、容量、整定值、阀门死区及全开时间；
- 二回路压力限制：一方面通过汽轮机旁路排放系统排冷凝器(GCT-c)，另一方面通过汽轮机旁路排放系统排大气(GCT-a)，并考虑 GCT 系统的容量和定值的不确定性。

3.3. 限值准则

为了确保二回路系统的完整性，二回路的最大压力必须限制在设计压力以内。最严重的 II 类瞬态(失去厂外电源)工况下，二回路的最大压力必须小于其设计限值 8.6 MPa。

3.4. 论证结果

根据以上假设模拟 LOOP 瞬态，针对 X 机组主要参数和换料模式，计算不同的 P 参数设置下，系统的瞬态响应。得到 P 参数为 130%/MPa、156%/MPa 和 188%/MPa 时失去厂外电源瞬态的主要参数响应如图 2~4 所示。

由模拟结果可知，在所选择的三个 P 参数下，二次侧最大压力均低于设计限值准则，最大压力为 8.58 MPa，低于设计限值 8.6 MPa。

进一步通过更小的 P 参数设置进行敏感性分析，得到不同 P 参数的二次侧最大压力变化如图 5 所示。分析可以发现：

1) 随着 P 参数增大，LOOP 瞬态的二次侧压力最大值逐渐减小。从定性上，P 参数设置越大，GCT-a 阀门动作响应越快，压力释放能够得到及时控制，有助于降低二次侧压力。

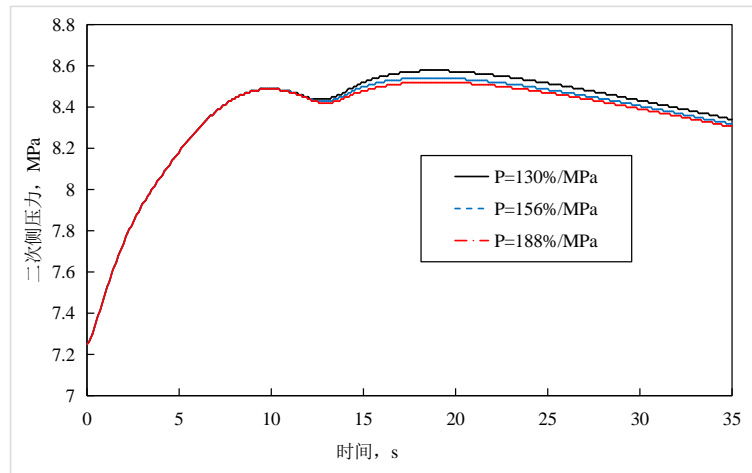


Figure 2. Secondary pressure of LOOP transient
图 2. LOOP 瞬态下二次侧压力变化

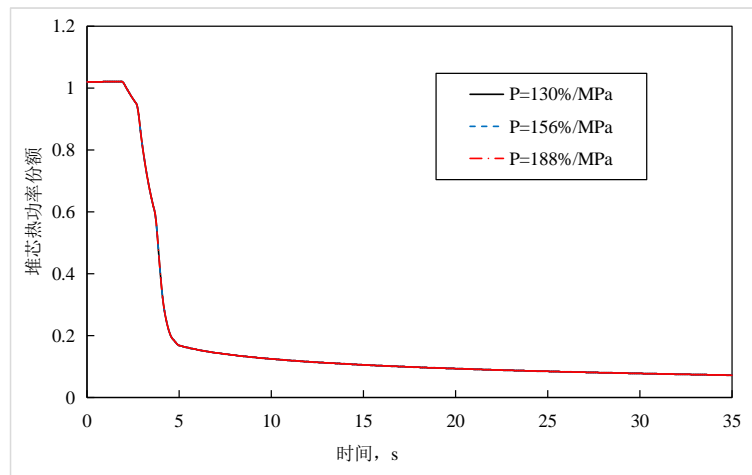


Figure 3. Reactor core thermal power of LOOP transient
图 3. LOOP 瞬态下堆芯热功率变化

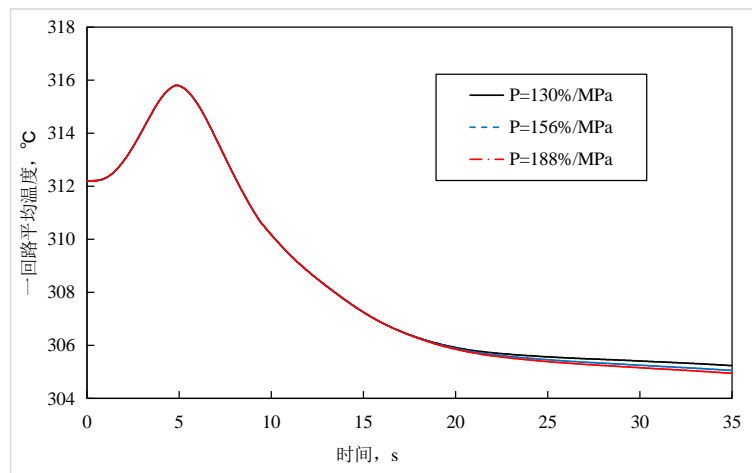


Figure 4. Average coolant temperature of LOOP transient
图 4. LOOP 瞬态下一回路平均温度变化

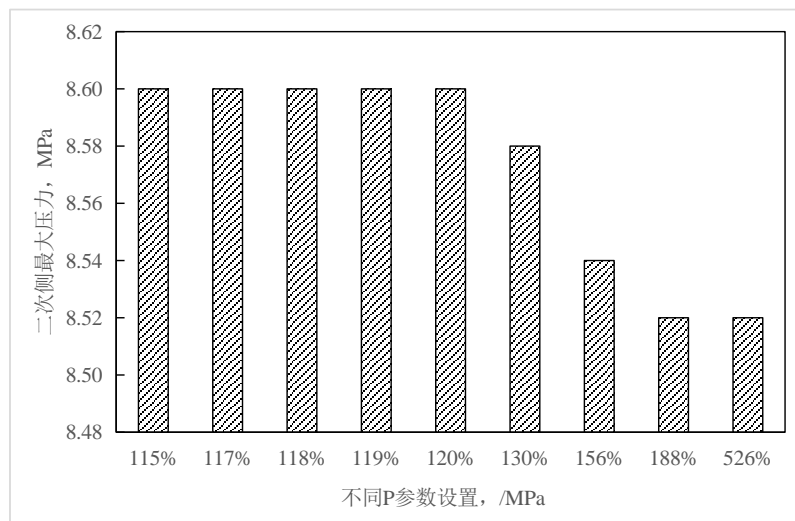


Figure 5. Sensitivity study of secondary pressure of LOOP transient under different P parameters

图 5. LOOP 瞬态不同 P 参数下二次侧最大压力变化

2) 理论上存在一个 P 参数最小值, 使得 LOOP 瞬态下二次侧压力最大值刚好为设计限值 8.6 MPa。经分析发现, 对 X 机组来说, P 参数最小值约为 120%/MPa。

3) P 参数在 52.6%/MPa 到 526%/MPa 范围内变化时, 二次侧压力变化并不特别大。敏感性分析可知, P 参数在 111%/MPa 及以下范围变化时, 二次侧最大压力超出了设计限值 8.6 MPa; 当 P 参数在 188%/MPa 到 526%/MPa 范围变化时, 二次侧最大压力保留两位小数后均为 8.52 MPa, 即当 P 参数增大到一定程度时, 阀门的机械响应特性基本固定, 再提高 P 参数已无实际意义。

4. 结论

本文对某压水堆核电站 GCT-a 阀门 PI 控制器中 P 参数进行了研究, 解释了某压水堆核电站 X 机组 GCT-a 阀门在热停平台频繁动作的现象, 并建立了 P 参数调整论证的方法。研究表明:

1) GCT-a 阀门 PI 控制器中 P 参数的设定将直接影响阀门的开启特性, 合理的 P 参数设置才能保障 GCT-a 阀门的正常开启;

2) 可以 LOOP 事故下二回路不出现超压风险作为判断依据, 确定 P 参数的设定范围;

3) P 参数设置越大, GCT-a 阀门响应越快, 超压风险越小。但当 P 参数超过某一数值时, 阀门机械响应特性基本固定, 二次侧压力最大值将不受影响。理论上存在一个 P 参数, 使得该瞬态下二次侧最大压力等于设计限值。

除保障机组稳定运行外, 本文研究成果亦可以作为新堆型机组设计的经验反馈。通过合理设置 P 参数, 对于控制热停期间阀门的动作、正常运行及瞬态期间的二次侧压力, 均具有重要意义。

参考文献

- [1] 广东核电培训中心. 900 MW 压水堆核电站系统与设备[M]. 北京: 原子能出版社, 2005: 346-347.
- [2] 张建民. 核反应堆控制[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2002: 196-197.
- [3] 梁玲, 王巧燕, 李静, 等. CPR1000 核电站 GCT-a 蒸汽排放控制阀积分饱和和问题优化研究[J]. 核科学与工程, 2012(s2): 64-69.

- [4] 李云臣. 低功率运行(P模式下)时 GCT121VV 开度异常的瞬态控制导则[J]. 科技视界, 2015(15): 240-241.
- [5] 赵昌兴, 许海峰, 毛耀军. GCT 系统在机组瞬态下的响应及故障处理[J]. 科技视界, 2017(1): 359-360.