

CPR1000型核电厂汽轮机旁路系统甩负荷控制器的性能研究

周洛稼, 王 凯, 张 薇, 朱建敏, 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30日; 录用日期: 2022年9月23日; 发布日期: 2022年9月30日

摘 要

CPR1000型核电厂汽轮机旁路排放系统(GCTc)在高功率下使用温度控制模式(T模式), 使机组能够适应汽轮机负荷快速且大幅的变化, 而不引起反应堆紧急停堆。但由于堆芯中子学参数的变化, 通常在寿期末, 机组应对汽轮机大幅甩负荷工况的能力会相对降低。本文基于GCTc的T模式通过新增甩负荷控制器, 以提高应对甩负荷工况的性能, 并利用系统分析程序GINKGO对其控制性能进行了数值模拟与分析。研究表明: 新增甩负荷控制器后, GCTc控制性能得到了优化, 有利于提高CPR1000型核电厂应对甩负荷工况的能力, 降低触发紧急停堆风险。

关键词

CPR1000, GCTc, 甩负荷控制器, 控制性能, 控制优化

Research on the Load Rejection Controller Performance of Turbine Bypass System in CPR1000 Nuclear Power Plant

Mingjia Zhou, Kai Wang, Wei Zhang, Jianmin Zhu, Yousen Hu

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

Received: Jul. 30th, 2022; accepted: Sep. 23rd, 2022; published: Sep. 30th, 2022

Abstract

The GCTc in CPR1000 nuclear power plant uses temperature control mode (mode T) under high power, which enables nuclear power plant to adapt to rapid and large change of steam turbine

文章引用: 周洛稼, 王凯, 张薇, 朱建敏, 胡友森. CPR1000 型核电厂汽轮机旁路系统甩负荷控制器的性能研究[J]. 核科学与技术, 2022, 10(4): 212-218. DOI: 10.12677/nst.2022.104022

load (load rejection condition). However, due to the change of neutronics parameters in the core, usually the capacity of the unit to deal with load rejection at the end of life period decreases. In this paper, a new load rejection control unit is added to improve the capability of load rejection, and its control capability is numerically simulated and analyzed by using the system analysis program GINKGO. The research result shows that the control capability is optimized after adding load rejection control unit, which is beneficial to improve the capacity of CPR1000 nuclear power plant against load rejection and reduce the risk of reactor trip.

Keywords

CPR1000, GCTc, Load Rejection Controller, Control Performance, Optimization

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. 引言

核电厂受堆芯特性的限制, 反应堆功率不能总是随着汽轮机负荷快速地变化。汽轮机旁路排放系统(GCTc)可作为一个“人工负荷”, 通过向冷凝器排放蒸汽的方式解决核电厂一、二回路间功率不平衡的问题。

CPR1000 型核电厂在高功率运行期间, 主要使用温度控制模式(T 模式)应对甩负荷到厂用电、汽轮机跳闸等大幅、快速变化的瞬态[1]。在国内的在运核电厂中, 华龙一号、AP1000 和 CPR1000 类似, GCTc 在高功率下使用 T 模式[2] [3] [4]。根据 CPR1000 运行经验反馈, T 模式在寿期初应对大幅甩负荷的能力较强, 但是在寿期末由于堆芯中子学参数发生变化, 其能力有所下降, 甚至有触发反应堆紧急停堆的风险。此外, GCTc 控制系统性能提升相关的研究相对较少[5] [6], 故从提高运行安全可靠角度出发, 有必要设计一套应对甩负荷工况的控制器, 以提高 GCTc 的控制性能。

2. 系统建模

使用中广核研究院有限公司自主研发的非破口类(Non LOCA)热工水力系统分析程序 GINKGO 对 CPR1000 的核蒸汽供应系统(NSSS)以及控制系统进行了建模, GINKGO 程序具有完全自主知识产权, 并经过模型测试和验证, 采用点堆模型、单相流模型以及两相流平衡态和/或非平衡态模型、控制系统模型等模拟压水堆的正常运行瞬态过程, 具有准确模拟 NSSS、堆芯保护与反应堆控制系统等热工水力现象和控制特性的能力[7]。

2.1. 反应堆热工水力模型

NSSS 模型主要包括: 反应堆堆芯、压力容器、主泵、稳压器、一回路管道(包括上充和下泄)、蒸汽发生器(SG)、主蒸汽管道、汽轮机旁排阀(GCTc 配置了总共 4 组阀门, 排放容量为额定蒸汽流量的 85% 左右, 控制阀通常具有调制和快速两种开启方式[1])等。

一回路冷却剂从堆芯带出热量, 流出压力容器经热管段进入 SG, 充分换热后回到冷管段由主泵带入堆芯; 给水在 SG 中被加热为饱和蒸汽汇集于主蒸汽母管, 再流入汽轮机或由 GCTc 进入冷凝器, 其中汽轮机和冷凝器设置为边界条件。具体的建模节点如图 1 所示。

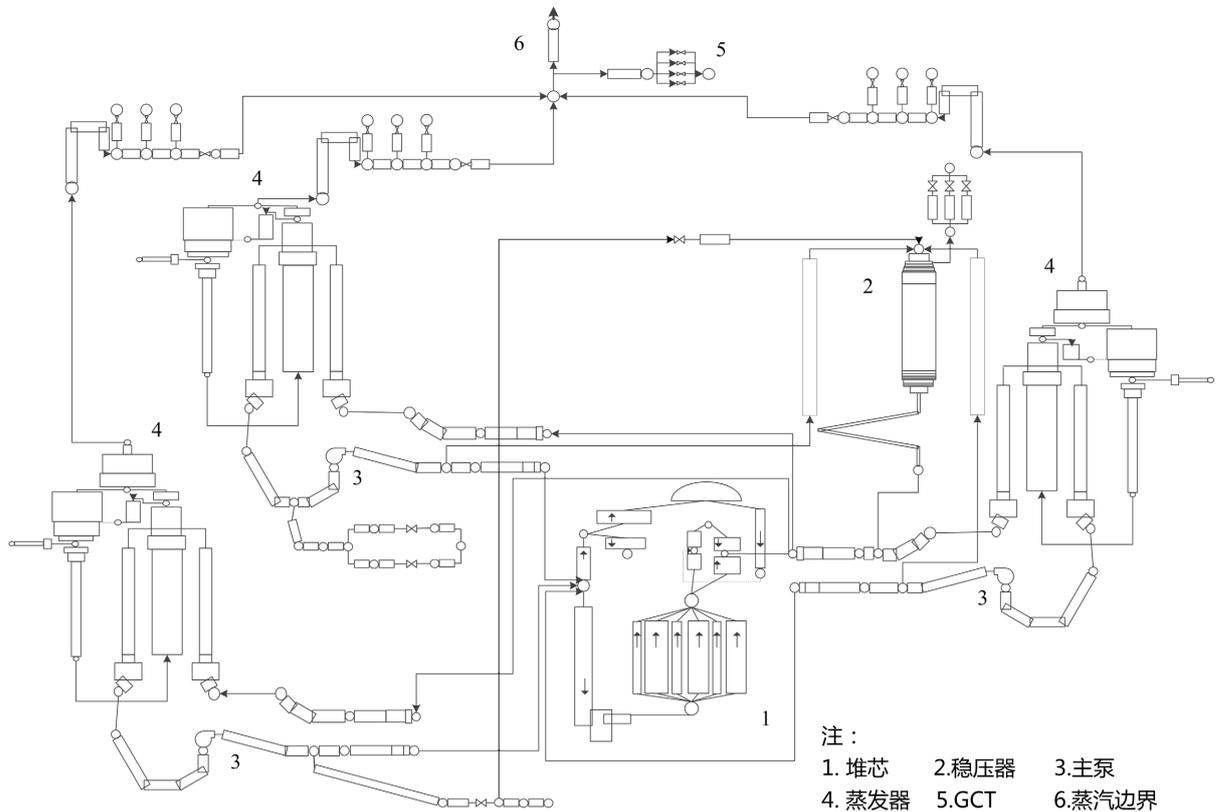


Figure 1. Diagram of the NSSS
图 1. 核蒸汽供应系统模型示意图

2.2. 反应堆控制系统模型

反应堆控制系统模型主要包括：堆芯功率与平均温度控制、稳压器压力与水位控制、蒸汽发生器(SG)水位控制以及 GCTc 控制系统，其能够使核电厂应对基本的运行瞬态，而不发生紧急停堆事件。

为了研究与分析 GCTc 的控制特性，需要筛选包络事件工况进行研究(如额定满功率工况下甩负荷至厂用电)，同时为了模拟变负荷过程中复杂的热工水力现象和控制过程特性，需要使用上述控制系统模型。由于本文研究重点为 GCTc 控制系统，因此仅对 GCTc 控制系统进行控制原理分析，其余控制系统模型(堆芯功率与平均温度控制、稳压器压力与水位控制、SG 水位控制)详见文献 8 [8]。

基于问题研究和分析需要，根据 GINKGO 程序建模方法，在 GINKGO 程序中建立了上述各个控制系统的模型。以下对 GCTc 甩负荷控制器的设计和控制性能进行了研究。

3. GCTc 控制原理分析

3.1. T 模式控制

T 模式应对甩负荷工况的控制原理是：由于汽轮机负荷突降进汽阀门关小，使二回路传热恶化，导致一回路冷却剂平均温度升高。冷却剂实测平均温度与通过汽轮机负荷表征的冷却剂参考平均温度存在偏差(相对于反应堆功率，汽轮机负荷变化速度更快)，其反映了一、二回路功率的失配程度，即 T 模式利用实测与参考平均温度的偏差进行控制。可以发现：在甩负荷瞬态中，冷却剂平均温度是一个应变量，其在一、二回路功率失配的响应有物理参数变化过程的延迟。

T 模式控制过程如图 2 所示。

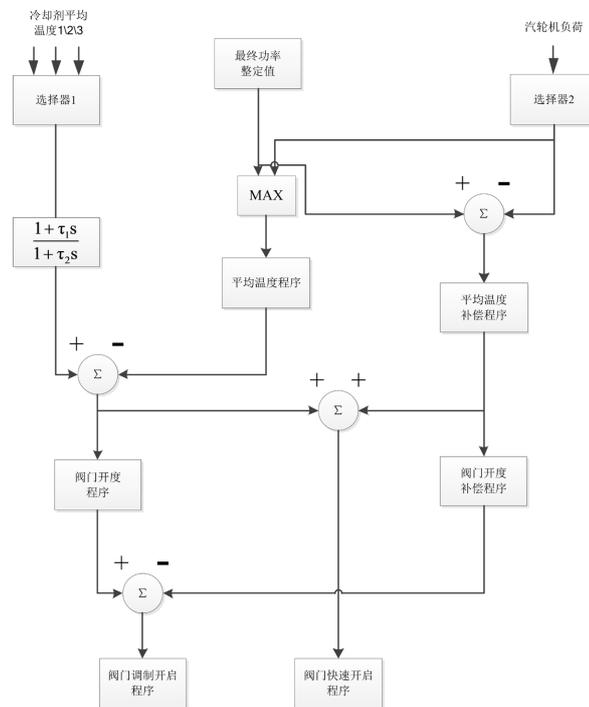


Figure 2. Diagram of mode T
图 2. T 模式控制示意图

3.2. 甩负荷控制器

甩负荷控制器在堆芯功率与平均温度控制系统输出的功率整定值大于零时生效(辅助识别甩负荷工况), 使用汽轮机第一级压力额定值与实测值的偏差作为控制信号, 通过函数发生器直接生成阀门开度。可以发现: 在发生甩负荷工况时, 汽轮机第一级压力紧随汽轮机进汽阀动作, 由于压力是一个快速响应参数, 预计其对一、二回路功率失配的响应比 T 模式延迟低, 可在一定程度上优化控制系统响应。

甩负荷控制器控制过程见图 3 所示。

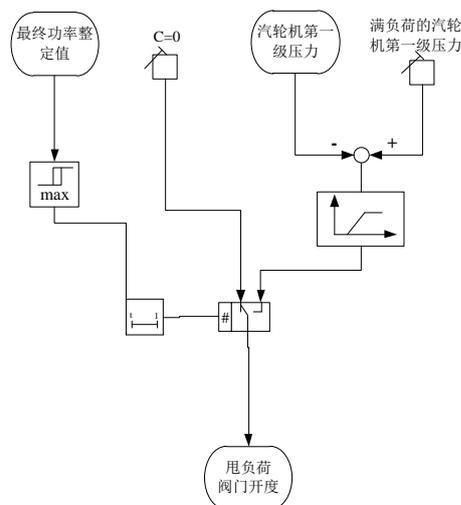


Figure 3. Diagram of load rejection controller
图 3. 甩负荷控制器控制示意图

4. 控制性能研究与分析

使用需要 GCTc 应对的最恶劣的甩负荷工况，满功率下甩负荷到厂用电，对 T 模式和加入甩负荷控制器的控制性能进行了数值模拟和结果分析，评价标准主要是功率量程中子高变化率停堆(DFDT)裕量、超温\超功率停堆(OT/OPAT)裕量，其次是 GCTc 调节阀的响应时间。

4.1. 甩负荷至厂用电瞬态

首先，NSSS 系统在满功率额定工况运行 50 s，50 s 后触发甩负荷瞬态过程，寿期初(BOL) T 模式下相关参数的数值模拟曲线见图 4~7，对数据结果进行了归一化处理。

机组运行在额定满功率下，电网断路器打开导致汽轮发电机立即丧失电磁转矩，从而汽轮机转速上升。在此过程中，由于主泵切换为厂用电供电，将导致一回路冷却剂流量短时上升。接着汽轮机控制系统通过调节汽轮机入口阀门来调节汽轮机转速，汽轮机入口阀有一个从关闭到再次打开的过程。在此之后，汽轮机维持一定的负荷向厂内辅助系统供电。

汽轮机入口阀门的突然关闭导致蒸汽旁排阀快速打开，并通过控制棒下插使核功率降低。在汽轮机入口阀门关闭后的短时间内，二次侧蒸汽排放能力不足导致反应堆冷却剂系统升温。

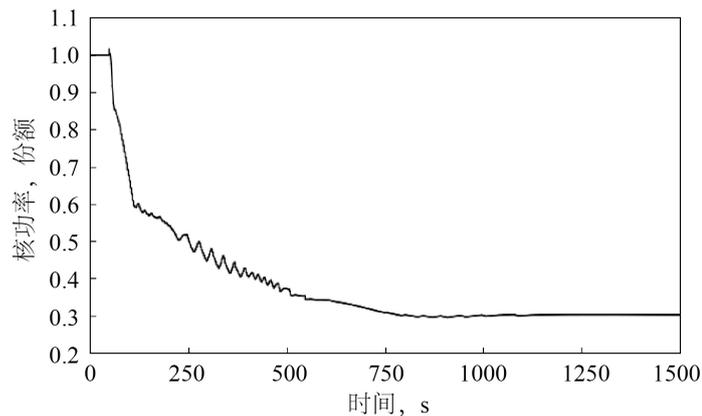


Figure 4. Diagram of nuclear power transient trend

图 4. 核功率瞬态变化趋势

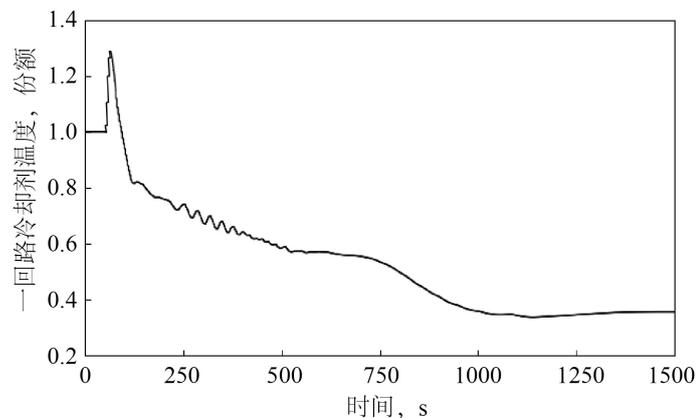


Figure 5. Diagram of coolant average temperature transient trend

图 5. 一回路冷却剂平均温度瞬态趋势

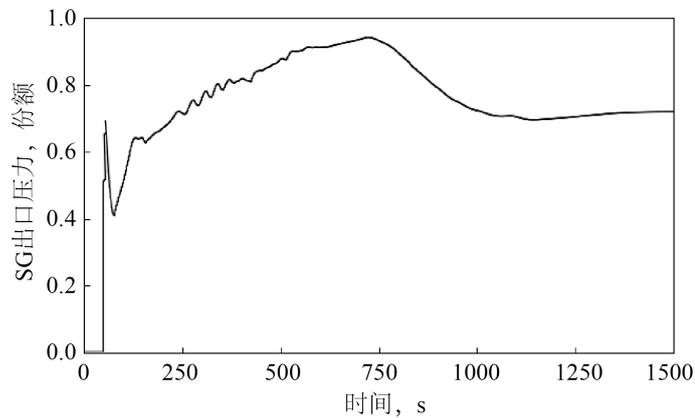


Figure 6. Diagram of SG outlet pressure

图 6. SG 出口压力瞬态趋势

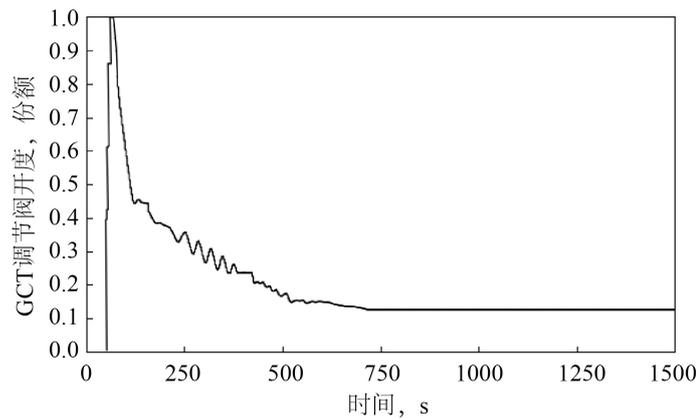


Figure 7. Diagram of GCTc opening transient trend

图 7. GCTc 调节阀开度瞬态趋势

在甩负荷至厂用电过程中，反应堆堆芯产生的大部分热量由 GCT 排放至冷凝器，随着反应堆功率的降低，GCT 调节阀开度逐渐减小，直至稳定在新的状态，与 NSSS 系统热功率相匹配。T 模式基本可以达到满功率甩负荷至厂用电瞬态的控制目标，但在冷却剂平均温度极值和 GCT 调节阀响应速度控制上有一定程度的优化空间。

4.2. 甩负荷控制器性能研究

基于 3.2 节的甩负荷控制器方案，在计算程序中建立了甩负荷控制器的控制逻辑。使用与 4.1 节相同的瞬态对其控制性能进行了模拟分析，计算结果主要参数的变化曲线与 4.1 节相似，不再单独给出，瞬态中关注的主要裕量等参数见表 1。

从结果可以发现：在瞬态开始时刻，由于堆芯功率调节的作用堆芯功率首先开始下降，在 GCTc 调节阀完全发挥功能之前，冷却剂平均温度依然上升叠加较大的慢化剂温度系数，使得寿期末的功率量程中子注量率负变化率高的停堆裕量较低。

在 T 模式的基础上增加甩负荷控制器，使其直接对汽轮机负荷变化进行响应，在一定程度上加快 GCTc 调节阀开启速率，可以获得相对较高的功率量程中子注量率负变化率高的停堆裕量。此外，也能改善 OT/OPΔT 停堆裕量。

Table 1. Comparison of main parameters**表 1.** 主要结果对比

参数	T 模式 (寿期初)	T 模式 (寿期末)	T 模式 + 甩负荷控制器 (寿期初)	T 模式 + 甩负荷控制器 (寿期末)
DFDT+ (裕量)	33%	36%	33%	33%
DFDT- (裕量)	55%	55%	2%	3%
OTΔT 裕量	4.59°C	5.12°C	8.78°C	9.07°C
OPΔT 裕量	2.75°C	2.70°C	2.75°C	2.71°C
GCTc 调节阀响应时间	1.10 s	0.65 s	0.90 s	0.65 s

5. 结论

本文结合 CPR1000 型核电厂甩负荷瞬态中参数变化的物理特性,研究了基于 T 模式的甩负荷控制器的性能,结果表明:基于 T 模式并增加甩负荷控制器后,机组在寿期末应对满功率甩负荷至厂用电瞬态时,GCTc 调节阀响应时间加快,功率量程中子注量率负变化率高的停堆裕量增大 50%,OT/OPΔT 裕量也得到一定程度提升。

本研究成果有助于降低 CPR1000 型机组在寿期末由于甩负荷瞬态触发反应堆紧急停堆的风险,可为 CPR1000 型机组后续的 GCTc 控制优化提供理论支持。

参考文献

- [1] 广东核电培训中心. 900MW 压水堆核电站系统与设备[M]. 北京: 原子能出版社, 2007: 346-353.
- [2] 翟树丛, 刘辰星, 张斌利. AP1000 蒸汽旁排控制分析[J]. 科技创新与应用, 2016(35): 40-41.
- [3] 朱露. M310 及国内主流堆型蒸汽旁路排放系统分析[J]. 新能源系统与设备, 2020(16): 55-56+59.
- [4] 黄镜欢. 不同堆型的核电站旁路系统设计概述[J]. 科技信息, 2011(8): 342-343.
- [5] Anderson, R.W. and van Ballegooyan, H. (2003) Steam Turbine Bypass Systems. *Combined Cycle Journal*, 4, 3-9.
- [6] Adams, R., Kaegi, U. and Sherikar, S. (2007) Getting Reliable Turbine Bypass System Performance in Cycling Power Plants. *ETD International Conference on Cyclic Operation of Power Plant*, London, UK, 27-28 September 2007.
- [7] 何青云, 罗静怡, 陈俊, 任志豪, 彭思涛, 周洲, 单建强. Non LOCA-三维物理 GINKGO/COCO 耦合程序的开发与验证[J]. 核动力工程, 2020, 41(5): 21-25.
- [8] 庞松涛. 压水堆核电站过程控制系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014: 135-165.