

# 1 GWt PB-FHR 负荷跟踪运行特性分析

张洁<sup>1,2</sup>, 阮见<sup>1,2</sup>, 何龙<sup>1,2</sup>, 李明海<sup>1</sup>, 戴叶<sup>1</sup>, 蔡翔舟<sup>1,\*</sup>

(1. 中国科学院 上海应用物理研究所, 上海 201800; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**为研究熔盐堆系统在商业应用中的价值,分析其是否满足电网负荷的变化需求和安全运行的能力,本文以1 GWt 球床式氟盐冷却高温堆(PB-FHR)为研究对象,仿真计算其在负荷跟踪模式下的瞬态行为和运行特性。以 RELAP5/MOD4.0 程序为研究工具,并植入相关的熔盐物性与计算关系式,建立氟盐冷却高温堆的热工水力系统与功率控制系统的仿真模型,对典型负荷工况参数变化情况下控制系统的响应特性进行仿真分析。结果表明:该氟盐冷却高温堆系统在设计的控制逻辑的调控下,展示出良好的负荷跟踪运行能力,堆芯功率能迅速响应负荷变化,功率超调和温度超调小,反应堆的运行参数始终处于合理的运行范围内。

**关键词:**球床式氟盐冷却高温堆;功率控制;负荷跟踪

中图分类号:TL33 文献标志码:A 文章编号:1000-6931(2019)06-1055-08

doi:10.7538/yzk.2018.youxian.0547

## Characteristic Analysis of 1 GWt PB-FHR in Load Following Operation

ZHANG Jie<sup>1,2</sup>, RUAN Jian<sup>1,2</sup>, HE Long<sup>1,2</sup>, LI Minghai<sup>1</sup>,  
DAI Ye<sup>1</sup>, CAI Xiangzhou<sup>1,\*</sup>

(1. Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to study the value of molten salt reactor system in commercial application and analyze whether it can meet the changing demand of power grid load and the ability of safe operation, the 1 GWt pebble-bed fluoride salt-cooled high temperature reactor (PB-FHR) was taken as the research object. The performance of the control system under the condition of changing the parameters of typical load following conditions was simulated and analyzed. The simulation model of thermal hydraulic system and power control system of FHR was established with RELAP5/MOD4.0 program, implanted with the properties of molten salt and calculation formulas. The performance of the control system under the condition of changing parameters of typical load following conditions was simulated and analyzed. Results from simulations show that the FHR

收稿日期:2018-08-06;修回日期:2018-12-07

基金项目:中国科学院战略性先导科技专项资助项目(XDA02010000);中国科学院前沿科学重点研究项目资助(QYZDY-SSW-JSC016)

作者简介:张洁(1982—),男,天津人,工程师,博士研究生,核能科学与工程专业

\*通信作者:蔡翔舟, E-mail: caixiangzhou@sinap.ac.cn

网络出版时间:2019-01-14;网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2044.TL.20190114.1344.006.html>

has a good load following ability. Under the designed control logic, the reactor power can respond to the load change rapidly with low power overshoot and temperature overshoot, and the operation parameters of the reactor are always within a reasonable operating range.

**Key words:** pebble-bed fluoride salt-cooled high temperature reactor; power control; load following

氟盐冷却高温堆(FHR)属于先进第四代堆型,具有很高的经济性和安全性<sup>[1]</sup>。由于该堆型为新型反应堆设计,尚无历史运行经验作为参考。因此,需根据其设计和运行特点,确定可行的运行方式与控制逻辑,为今后的实验堆运行和商业化发展提供参考和帮助。

球床式氟盐冷却高温堆(PB-FHR)在设计上与传统反应堆系统存在很大差异,其选用氟盐(如 LiF-BeF<sub>2</sub>)作为冷却剂,运行环境为高温(~700 °C)低压(~1 MPa),通过调节控制棒来改变堆运行功率。此外,PB-FHR 设计采用球形燃料,燃料球内含 TRISO 燃料颗粒,具有高燃耗和高安全裕度,在一定程度上保证了反应堆的经济性和安全性。

反应堆的运行模式主要有基本负荷运行和负荷跟踪运行。基本负荷运行模式下,反应堆以额定功率对电网输出功率,具有较高的经济性;在负荷跟踪模式下,反应堆根据外部电网的需求来调节自身的功率运行水平,运行方式更加灵活<sup>[2]</sup>。参考当前的商业反应堆设计,如 AP1000、华龙一号,以及钠冷快堆和高温气冷堆等,其均提出了采用负荷跟踪的运行模式。

RELAP5 程序是由美国爱达荷国家工程实验室开发、美国核管会批准的用于工程审评的大型瞬态热工水力最佳估算程序。由于 FHR 概念较新,加上开发程序所面临的困难,很多研究机构通过植入氟盐的物性公式与热工水力计算公式的方式,将 RELAP5 程序用于 FHR 系统的运行和瞬态分析,其中西安交通大学的张大林在 RELAP5/MOD3.2 程序中增加了氟盐的液态与蒸汽物性并计算了 MK1 PB-FHR<sup>[3]</sup>;华北电力大学的郭张鹏采用 RELAP5 对 FHR 的安全特性进行了分析,并对有无保护下的失热阱事故和失流事故进行了模拟计算<sup>[4]</sup>;美国加州大学伯克利分校的 Peterson 教授课题组也采用 RELAP5 程序对 FHR 系统进

行了计算和辅助设计工作,仿真结果与实验结果符合很好<sup>[5]</sup>;中国科学院上海应用物理研究所的姜淑颖扩展了 RELAP5/MOD4.0 的氟盐物性并验证了其模拟 FHR 系统的适用性<sup>[6]</sup>,Wang 等<sup>[7]</sup>也将其应用于 FHR 的研究中。

本文以上海应用物理研究所植入了相关熔盐物性与计算关系式的 RELAP5/MOD4.0 程序为研究工具,参考其《1 000 MW 固体燃料规则球床熔盐堆初步物理设计报告》<sup>[8]</sup>,建立系统仿真模型,分析 PB-FHR 系统在负荷跟踪运行模式下的运行特点和瞬态行为特性,为今后 FHR 系统的商业化发展提供依据和参考。

## 1 系统模型简介

1 GWt PB-FHR 系统采用三回路的设计方案,并具有 2 组冷却剂环路,2 组环路运行参数完全一致。每个环路中,一回路冷却熔盐为 FLiBe,二回路冷却熔盐为 FLiNaK,三回路冷却剂为水。PB-FHR 采用规则球床排布方式,燃料组件为球形。一回路系统主要包括堆芯、熔盐泵、双熔盐换热器、稳压器;二回路系统主要包括熔盐泵、蒸汽发生器、稳压器;三回路系统主要是蒸汽发生器。除了回路中的主要设备,FHR 还包含 RVACS/DRACS、除氙系统、放化后处理系统等,由于这些结构对 FHR 的正常运行不会产生太大影响,在建模时只考虑了系统中的主要结构(图 1)。1 GWt PB-FHR

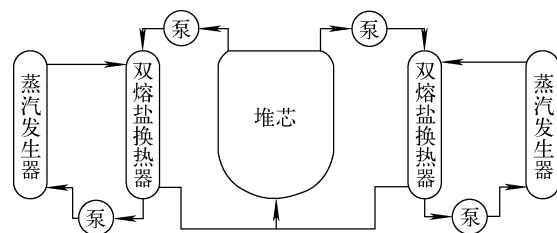


图 1 1 GWt PB-FHR 系统简图

Fig. 1 System diagram of 1 GWt PB-FHR

系统的稳态运行参数列于表 1。冷却剂所采用的物性关系式列于表 2。

PB-FHR 系统正常运行时,通过控制棒调节堆芯功率,一、二回路流量设置为恒流量运行,三

回路通过调节给水流量来改变负荷功率。通过该设计方案,可简化控制系统的复杂程度,降低参数的选取与调节难度。参照系统布置,使用 RELAP5 程序仿真的节点划分如图 2 所示。

表 1 1 GWt PB-FHR 满功率稳态运行参数  
Table 1 Full power steady state operating parameter of 1 GWt PB-FHR

参数	数值	参数	数值
反应堆热功率, MW	1 000	冷却剂反应性温度系数, pcm/°C	-0.32
堆芯熔盐进/出口温度, °C	600.0/700.0	反射层反应性温度系数, pcm/°C	-0.09
堆芯熔盐流量, kg/s	4 191.2	慢化剂反应性温度系数, pcm/°C	-1.99
燃料元件总数 $n$	588 071	双熔盐换热器换热管内/外径, mm	12.0/14.0
燃料元件直径, cm	6.0	双熔盐换热器冷侧熔盐进/出口温度, °C	531.0/577.0
燃料反应性温度系数, pcm/°C	-3.52	双熔盐换热器冷侧熔盐流量, kg/s	5 985.0

表 2 冷却剂物性参数  
Table 2 Physical parameter of coolant

物性	FLiBe	FLiNaK
密度, kg/m <sup>3</sup>	$\rho = -0.4884(T - 273.15) + 2279.7$	$\rho = -0.73(T - 273.15) + 2530$
热容, J/(kg · K)	$c_p = 2386$	$c_p = 1884$
黏度, Pa · s	$\mu = 0.000116 \exp(3755/T)$	$\mu = 0.00004 \exp(4170/T)$
导热系数, W/(m · K)	$k = 0.0005T + 0.629697$	$k = 0.00056T + 0.36$

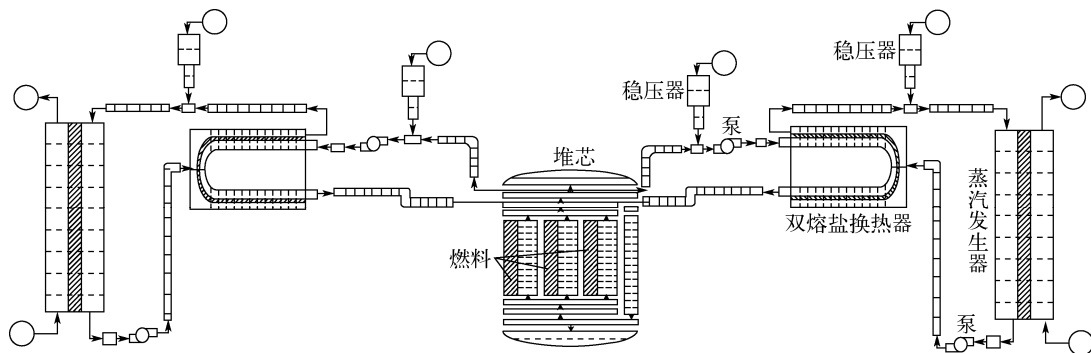


图 2 PB-FHR 系统的 RELAP5 节点划分

Fig. 2 Nodalization diagram of PB-FHR with RELAP5 code

## 2 控制系统设计

### 2.1 稳态运行方案选择

本研究中, PB-FHR 系统采用冷却剂平均温度恒定的稳态运行方案。当一回路冷却剂流量保持一定时,冷却剂的平均温度将不随核电厂负荷的变化而改变。该方案对具有负温度系数的核反应堆来说是较好的选择,能

使反应堆具有较好的自稳自调特性,这也将一回路冷却剂体积控制在一定范围内,从而在一定程度上减少氟盐的用量,节约建设成本,同时也有利于一回路中设备的正常运行。由于目前 PB-FHR 系统仍处于概念设计阶段,暂时考虑采用该稳态运行方案来分析系统的负荷跟踪特性。

## 2.2 控制目标参数设定

目前 PB-FHR 系统控制目标参数设计尚无现成的经验,上海应用物理研究所发布的《TMSR-SF1 控制策略初步研究报告》<sup>[9]</sup>中提到 FHR 系统的负荷跟踪区间为 10%FP~100%FP,负荷变化率<5%FP/min,负荷阶跃变化<10%FP。但这也是从其他堆型的设计经

验中获取的理论参考。本文参考其他堆型的运行控制参数对仿真系统进行初步设计,检验该设计下 FHR 系统的负荷跟踪能力,在后续工作中再进行全面的参数敏感性分析,以确定安全合理的 FHR 负荷跟踪模式下的运行区间和控制参数集。一些典型商用反应堆运行调控与运行参数列于表 3。

表 3 典型商业反应堆系统调控运行参数设定<sup>[10-12]</sup>

Table 3 Setting of operating and regulating parameters of typical commercial reactor system<sup>[10-12]</sup>

参数	数值				
	PWR	BWR	SFR	HTGR	FHR
冷却剂类型	水	水	钠	氦气	熔盐
运行温度,℃	~300	~280	400~500	300~1 000	600~700
运行压力,MPa	~15	~7	~1	~5	~1
负荷跟踪区间,%FP	30~100	50~100	10~100	30~100	10~100
最大负荷阶跃变化,%FP	±10	/	/	/	±10
负荷变化率,%FP/min	5	~60	/	5	5
功率调节超调量	<3%	/	<3%	<5%	<3%

注:/表示未获得明确参数

本文建模仿真时参考了表 3 中 4 种反应堆的运行控制参数。FHR 系统冷却剂与传统反应堆冷却剂存在较大差异。熔盐堆功率调节无法使用硼酸溶液,而采用控制棒调节功率,功率变化响应迅速,功率超调量的设置参考钠冷快堆,设置为<3%;由于熔盐密度高,比热容大,在瞬态过程中温度变化缓慢,系统瞬态过程时间很长,因此考虑设置系统稳态运行功率偏差<1.0%FP,稳态运行温度偏差<2.0℃。此外,熔盐堆运行压力较低,在正常运行时考虑将运行压力作为监测量,将功率和温度作为主要调节量<sup>[13-14]</sup>。

## 2.3 功率控制模型与温度控制模型

在负荷跟踪模式下,负荷功率根据负荷工质流量调节而变化,堆芯功率的目标值需根据负荷的变化状况和当前堆芯处冷却剂平均温度的变化状况进行设置。当负荷侧工质流量改变时,堆芯冷却剂温度会发生变化,堆芯功率受冷却剂温度变化的影响也会偏离稳定状态。在程序中设置功率控制模型与温度控制模型来调节控制棒,进而实现堆芯功率和冷却剂温度的调节。

功率控制模型以核功率与负荷功率的偏差

作为主调节量,当两者出现不匹配时,控制模型将偏差传递给信号处理装置,信号处理装置通过比例调节单元将功率偏差转换为控制棒的运动信息,调节控制棒运动。

温度控制模型的逻辑流程图示于图 3。温度控制模型以温度偏差作为主调节量,同时考虑功率变化对运行温度的影响。当温度控制模型收到负荷功率调节的信号时,会根据当前的核功率与负荷功率偏差变化率和冷却剂平均温度偏差来计算冷却剂综合平均温度偏差,并将该值传递给信号处理装置。信号处理装置将输入的温差信号转换为控制棒的运动信号;控制棒驱动机构在该信号作用下,驱动控制棒在堆芯内运动。综合温度偏差计算模型的拉氏变换如下:

$$T_s(s) = \frac{T_{av,0}(s)}{1 + \tau_2 s} - \frac{1 + \tau_3 s}{(1 + \tau_4 s)(1 + \tau_5 s)} \cdot T_{av}(s) - \frac{K_1 K_2 \tau_7 s}{1 + \tau_1 s} \left( P_1(s) - \frac{P_2(s)}{1 + \tau_6 s} \right) \quad (1)$$

式中: $T_s$ 为综合温度偏差; $T_{av,0}$ 为设定的堆芯冷却剂平均温度; $T_{av}$ 为瞬态过程中堆芯冷却剂平均温度; $P_1$ 为堆芯功率; $P_2$ 为负荷功率;

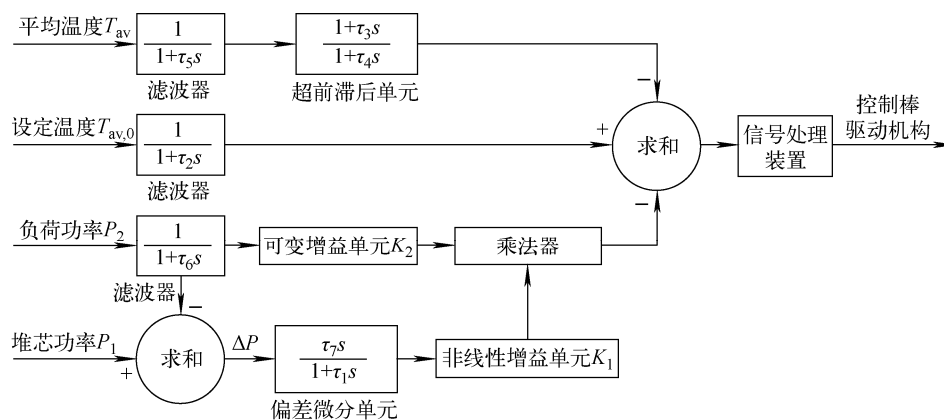


图3 温度控制逻辑

Fig. 3 Diagram of temperature control logic

$\tau_1 \sim \tau_7$  为滤波器和超前滞后单元的调控系数;  $K_1$  与  $K_2$  为功率计算增益单元;  $s$  为拉普拉斯变换中的复变量。

在仿真前,需对系统的控制逻辑进行验证,并调节各控制参数以达到较好的控制效果。在仿真计算时,已对控制参数进行了优化,可满足2.2节提到的控制过程中的超调量、稳态误差、响应时间等运行控制参数的要求。其中,设置控制棒的最大运动速度为2 cm/s,控制棒的微分价值为1.3 pcm/cm。

2.4 典型负荷跟踪运行工况

基于压水堆核电厂的运行经验<sup>[2]</sup>以及AP1000商业反应堆的设计要求<sup>[15]</sup>,功率控制系统需有响应10%FP阶跃负荷变化与5%FP/min线性负荷变化的能力,以及执行日负荷跟踪、电网频率响应等工况。UCB大学发布的FHR研究白皮书也提出,FHR功率水平调节工况包括阶跃升降负荷10%FP,线性调节负荷功率5%FP/min。12-3-6-3方案作为典型的核电厂负荷跟踪方案,其根据居民用电高峰-低谷的情况,设置了100%FP运行状态、50%FP运行状态以及二者之间的状态。其中,12 h运行于100%FP状态。之后,功率线性下降,并于3 h后达到50%FP状态;以该状态运行6 h后,开始升功率,并于3 h后达到100%FP状态<sup>[16]</sup>。由于氟盐冷却高温堆尚无堆运行经验,只能在仿真计算时参考这些典型的负荷跟踪运行工况,以在理论上分析和制定合理的FHR负荷跟踪模式下的运行区间和控制参数集,为今后的商业化提供参考。

在设计运行模式时,参考商业反应堆的设计经验,当负荷功率水平<15%FP时,采用手动控制方式;负荷功率水平在15%FP~100%FP范围内时采用自动控制方式。由于自动控制方式在高功率水平下的控制性能和低功率水平下的控制性能可能会存在较大差异,在本文研究中设置了一组高功率水平和低功率水平升降负荷功率的仿真工况来分析控制系统的性能。表4列出了本文选择的变负荷瞬态工况。

表4 仿真选择的变负荷瞬态工况

Table 4 Simulation selection of variable load transient condition

组别	工况
1	10%FP阶跃升降负荷(高功率水平)
2	10%FP阶跃升降负荷(低功率水平)
3	±5%FP/min线性升降负荷
4	12-3-6-3日负荷跟踪

3 仿真计算

3.1 10%FP阶跃升降负荷(高功率水平)

仿真开始时,反应堆处于满功率稳态运行状态(表1)。在该工况下,负荷阶跃下降10%FP,运行一段时间后,再阶跃上升10%FP,仿真结果示于图4。

从图4可看出,当负荷功率阶跃下降至90%FP时,在控制棒的调节下,堆芯功率跟随负荷迅速下降。在温度控制器的作用下,冷却剂的平均温度未出现明显变化,由于负荷下降,

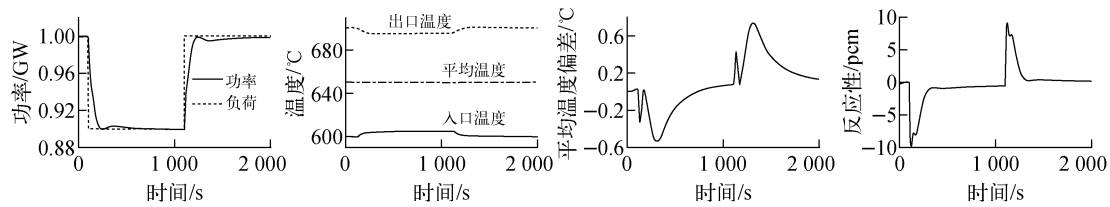


图4 高功率水平下10%FP阶跃升降负荷工况参数变化

Fig. 4 Parameter variation of 10%FP step-up and step-down load at high power level

导致堆芯入口冷却剂温度上升,堆芯出口冷却剂温度下降。对于高功率水平下10%FP阶跃升降负荷工况,功率跟随负荷变化达到目标值的时间约为131 s,功率调节超调量为0.067%,稳态功率偏差为0.078%,稳态冷却剂平均温度偏差为0.74 °C,调节过程中温差始终小于2.0 °C。负荷功率上升的系统状态变化与功率下降过程正好相反。

由于熔盐热容较大,在功率调节过程中,熔盐温度变化缓慢,调节前后温度变化范围较小。这种特点虽不会导致系统参数发生剧烈变化,但增加了系统调节的时间。因此,熔盐堆系统中温度的精确测量对于系统安全运行是十分重要的。

### 3.2 10%FP阶跃升降负荷(低功率水平)

该工况模拟了负荷在低功率水平阶跃变化时,控制系统对负荷的跟踪性能。该工况开始时,反应堆在30%FP下稳态运行。负荷以5%FP/min的速度从30%FP上升到40%FP,之后再线性下降至30%FP状态,结果示于图5。

从图5可看出,当负荷功率阶跃上升至40%FP时,堆芯功率在控制棒的作用下迅速跟随负荷变化。在温度控制器的作用下,冷却剂的平均温度未出现明显变化。负荷功率上升,导致堆芯入口冷却剂温度下降,堆芯出口冷却剂温度上升。低功率水平下10%FP阶跃升负

荷工况,功率跟随负荷变化达到目标值的时间约为93 s,功率调节超调量为1.5%,稳态功率偏差为0.825%,稳态冷却剂平均温度偏差为0.35 °C,调节过程中温差始终小于2.0 °C。负荷功率下降的系统状态变化与功率上升过程正好相反。

在高功率与低功率水平的负荷阶跃变化工况的仿真中,控制系统采用的是相同的控制参数,这说明目前控制系统适用性较强,虽然低功率水平功率的超调较高功率水平的高,但在容许范围内,对今后开展控制系统性能优化的研究也提供了帮助。

### 3.3 5%FP/min线性升降负荷

该工况模拟了在负荷线性变化时,堆功率对于负荷功率的跟踪性能。该工况开始时,反应堆处于满功率稳态运行状态。负荷以5%FP/min的速度从100%FP下降到50%FP,之后再线性上升至满功率状态,结果示于图6。

从图6可看出,当负荷功率采用线性变化方式时,堆芯功率在控制棒的作用下能迅速跟随负荷变化,堆芯功率变化曲线更加平滑。在温度控制器的作用下,冷却剂的平均温度出现细小波动但很快恢复目标值。负荷功率下降,导致堆芯入口冷却剂温度上升,堆芯出口冷却剂温度下降。当负荷达到目标功率时,堆芯功率达到目标值的时间约为79 s,功率调节超调

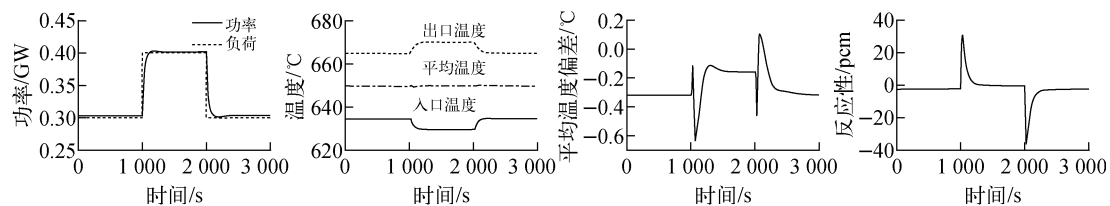


图5 低功率水平下10%FP阶跃升降负荷工况参数变化

Fig. 5 Parameter variation of 10%FP step-up and step-down load at low power level

量为 0.86%，稳态功率偏差为 0.12%，稳态冷却剂平均温度偏差为 1.46℃，调节过程中温差始终小于 2.0℃。负荷功率上升的系统状态变化与功率下降过程正好相反。

### 3.4 12-3-6-3 日负荷跟踪

该工况模拟了 PB-FHR 系统在典型负荷变化工况下的响应特性及瞬态行为。工况开始时，反应堆处于满功率稳态运行状态。

图 7 为 24 h 内 12-3-6-3 功率温度变化曲线。由于功率线性下降速度相比 5%FP/min

更小，功率调节过程也更加平滑，冷却剂温度在控制器的作用下基本不变。当负荷达到目标功率时，堆芯功率达到目标值的时间约为 60.5 s，功率调节超调量为 0.4%，稳态功率偏差为 0.1%，稳态冷却剂平均温度偏差为 0.2℃，调节过程中温差始终小于 2.0℃。系统负荷跟踪过程中，始终采用同一套控制系统和控制参数来实现功率和温度的调节，说明此功率-温度控制器模型具有一定的通用性，对各工况的调节都反映出了较好的调节效果。

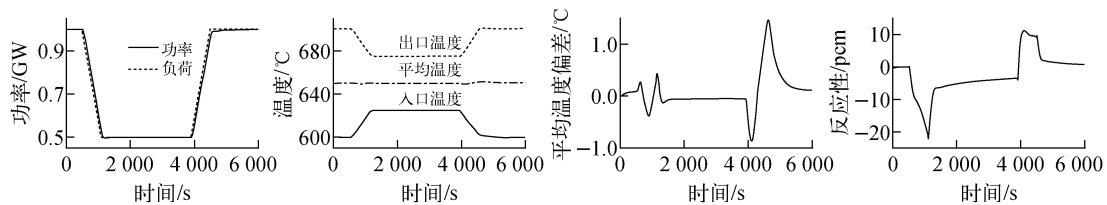


图 6 5%FP/min 线性升降负荷工况参数变化

Fig. 6 Parameter variation of 5%FP/min ramp load change

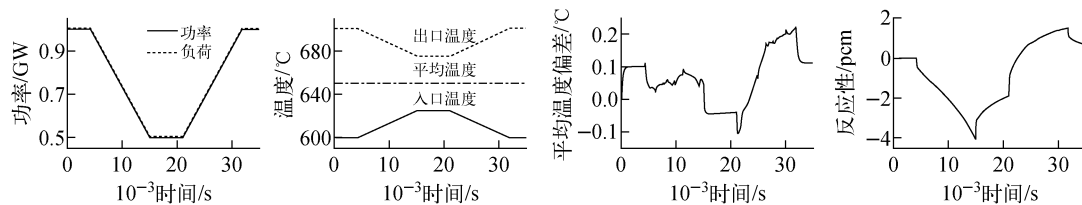


图 7 12-3-6-3 日负荷跟踪工况参数变化

Fig. 7 Parameter variation of daily load following of 12-3-6-3

## 4 结论

本文采用初步设计的氟盐冷却高温堆运行区间和控制运行参数对 1 GWt PB-FHR 系统进行了仿真分析，借助典型的负荷跟踪调节工况分析了其在负荷跟踪模式下的运行效果。通过仿真计算和参数分析，得到以下结论：

1) PB-FHR 系统在典型负荷跟踪工况的测试下，反映出较好的负荷跟踪特性，在今后的系统运行研究中，可将负荷跟踪模式作为今后商业运行模式的选择；

2) 熔盐堆系统在功率调节时，温度变化过程缓慢，温度变化范围较小，功率变化过程中系统不会出现较为剧烈的瞬态变化过程，但对于 FHR 系统的安全监测也提出了挑战；

3) 本文提出的功率-温度控制器模型在不

同负荷跟踪工况下均表现出较好的控制效果，功率超调和温度超调小，满足控制目标，在今后的工作中还需对控制器的控制参数与系统的调控运行区间等参数的设置进行优化，以获得更好的系统调节效果。

## 参考文献：

- [1] ANDREADES C H. Technical description of the "Mark 1" pebble-bed fluoride-salt-cooled high-temperature reactor (PB-FHR) power plant[R]. California, USA: University of California at Berkeley, 2014.
- [2] 张建民. 核反应堆控制[M]. 北京:原子能出版社,1995.
- [3] LIU Limin, ZHANG Dalin, YAN Qiqi, et al. RELAP5 MOD3. 2 modification and application

- to the transient analysis of a fluoride-salt-cooled high-temperature reactor[J]. *Annals of Nuclear Energy*, 2017, 101: 504-515.
- [4] ZWEIBAUM N, BICKEL J E, GUO Zhang-peng, et al. Design, fabrication and startup testing in the compact integral effects test facility in support of fluoride-salt-cooled, high-temperature reactor technology [C] // NURETH-16. USA: ANS, 2015.
- [5] ZWEIBAUM N, GUO Zhangpeng, PETERSON P F. Validation of best estimate models for fluoride-salt-cooled, high-temperature reactors using data from the compact integral effects test (CIET 1.0) facility [C] // NURETH-16. USA: ANS, 2015.
- [6] 姜淑颖,程懋松,戴志敏,等. RELAP/SCDAP-SIM/MOD4.0 程序的 FHR 应用扩展及验证 [J]. *核动力工程*, 2016, 37(6): 33-36.  
JIANG Shuying, CHENG Maosong, DAI Zhimin, et al. Extension and validation of RELAP/SCDAP-SIM/MOD4.0 code on FHR [J]. *Nuclear Power Engineering*, 2016, 37(6): 33-36 (in Chinese).
- [7] WANG Kai, HE Zhaozhong, CHEN Kun. Application of RELAP5/MOD4.0 code in a fluoride salt-cooled high temperature test reactor [C] // International Topical Meeting on Advances in Thermal Hydraulics-2014 (ATH'14). USA: ANS, 2014.
- [8] 戴叶. 1 000 MW 固体燃料规则球床熔盐堆初步物理设计报告 [R]. 上海:中国科学院上海应用物理研究所, 2013.
- [9] 李明海,杨洋,邹杨. TMSR-SF1 控制策略初步研究报告 [R]. 上海:中国科学院上海应用物理研究所, 2014.
- [10] 郑福裕. 压水堆核电站运行物理导论 [M]. 北京:原子能出版社, 2009.
- [11] DOLAN T J. Molten salt reactors and thorium energy [M]. London: Woodhead Publishing, 2017.
- [12] 张玮瑛,段天英,刘勇,等. 中国实验快堆负荷跟踪能力分析 [J]. *原子能科学技术*, 2017, 51(11): 2 028-2 035.  
ZHANG Weiyang, DUAN Tianying, LIU Yong, et al. Analysis of load following ability of China Experimental Fast Reactor [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2017, 51(11): 2 028-2 035 (in Chinese).
- [13] 冯俊婷,黄晓津,张良驹,等. 核反应堆功率调节系统控制特性研究 [J]. *原子能科学技术*, 2006, 40(3): 306-310.  
FENG Junting, HUANG Xiaojin, ZHANG Liangju, et al. Study on characteristic of reactor power regulating system [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2006, 40(3): 306-310 (in Chinese).
- [14] 姚远. 中国实验快堆功率调节系统的数字化仿真研究 [D]. 北京:中国原子能科学研究院, 2007.
- [15] 孙汉虹,程平东,缪鸿兴,等. 第三代核电技术 AP1000 [M]. 北京:中国电力出版社, 2010.
- [16] 李汉辰,曹欣荣. 负荷跟踪运行下反应堆一回路控制系统仿真与验证 [J]. *核科学与工程*, 2015, 35(2): 200-206.  
LI Hanchen, CAO Xinrong. Simulation and verification of the control system of the reactor primary loop in load following operation [J]. *Nuclear Science and Engineering*, 2015, 35(2): 200-206 (in Chinese).