文章编号:1673-0062(2017)03-0013-08

多堆多机核动力装置控制方案建模及仿真研究

肖 凯,廖龙涛,周 科,陈 智

(核反应堆系统设计技术重点实验室,成都 610213)

摘 要:为满足多堆多机核动力装置灵活快速的负荷跟踪及特殊情况下的稳定安全运行,核动力装置控制系统除了需要满足典型运行工况(如:快速升降负荷、甩负荷工况等)控制要求,还应满足在特殊工况下(如单堆多机、单多堆单机等)核动力装置能够平稳安全运行,使多堆多机核动力装置更加灵活的跟踪负荷变化.根据多堆多机核动力装置系统,建立了多堆多机核动力装置控制方案动态仿真模型,包括控制对象和控制方案模型,并对多堆多机核动力装置特殊工况下的瞬态控制过程进行了仿真分析.仿真分析结果表明,控制方案能够实现核动力装置在特殊情况下的工况转换,满足核动力装置稳定运行需求,维持船用负荷和动力的平稳.

关键词:多堆多机;自动控制;控制建模;仿真

中图分类号:TL413^{+}. 31;U674. 921 **文献标志码**:B

The Modeling and Simulation Research on Control Scheme of Multi-reactor and Multi-turbine Nuclear Power Plant

XIAO Kai, LIAO Long-tao, ZHOU Ke, CHEN Zhi

(Key Laboratory of Reactor System Design Technology, Chengdu 610213, China)

Abstract: To make sure the quick load tracking and stable operation in particular cases, the control system of nuclear power plant demands not only the control of typical working condition(such as: fast power increase/reduction, load dump), but also stable operation of nuclear power plant in special working condition(such as single-reactor and Multi-turbine, Multi-reactor and single-turbine), to improve the ability of quick load tracking of Multi-reactor and Multi-turbine Nuclear Power Plant (MM-NPP). In this paper, as the system of MM-NPP, the simulation models of nuclear power plant are established, which include the models of controlled member and control system. And its dynamic characteristic of MM-NNP in special working condition is simulated. The simulation and research results show that the control system can meet the need of condition transformation in special working condition and MM-NNP stable operation, keep the marine load and power smooth and steady.

收稿日期:2017-05-03

作者简介:肖 凯(1987-),男,硕士,工程师,从事反应堆控制系统研究与设计等方面的研究. E-mail:xiaokai.sky@163.com

key words: Multi-reactor and Multi-turbine; automatic control; control scheme model; simulation

0 引 言

船用核动力装置为了得到较大功率,一般采用多反应堆和多主汽轮机布置.例如法国的"戴高乐"航母[1],采用两座一体化压水堆,两台主汽轮机,双轴双桨.美国的"尼米兹"号核动力航空母舰[2],采用两座压水堆和四台汽轮机.反应堆热效率达 25.6%,每座反应堆产生的蒸汽驱动两台主汽轮机,总功率高达 191.1 MW、航速 30 kn 以上、续航力约 10^6 n mi.由此可见,多堆多机核动力装置可以为舰船长时间高航行提供足够动力,从而大大提高机动性.

然而多堆多机核动力装置相对单堆单机,系统更加复杂,负荷变化大,不仅要求灵活快速的负荷跟踪特性,而且要求高度可靠.这就需要通过合理的建立近似的核动力装置瞬态仿真模型,对其控制运行瞬态过程展开控制仿真研究,掌握其瞬态控制特性.

另外,哈尔滨工程大学李玉杰于 2007 年针对船用多堆多机核动力装置建模及控制方法进行了研究[3],其主要是通过守恒方程和集总参数方式建立核动力系统的主要设备(反应堆、直流蒸汽发生器、汽轮机和蒸汽母管)的数学模型,然后通过蒸汽母管的压力控制进行了多堆多机的升降负荷控制仿真.其与本文研究方向及建模方法存在较大差异.

根据多堆多机核动力装置系统运行特性,利用 RELAP5(reactor excursion and leak analysis program)程序及 3KEYMASTER 平台建立了多堆多机核动力装置瞬态控制仿真模型,包括反应堆、冷却剂系统、净化系统、压力系统、蒸汽系统、蒸汽排放系统、凝水—给水系统等.仿真模型形成了完整的一、二回路闭环模型.把一回路的辅助系统如:补水系统、设备冷却水系统的入口以及压力安全系统蒸汽排放出口作为边界条件,以及二回路辅助系统如:乏汽系统等耗气量小的系统作为蒸汽边界处理.这样使整个一、二回路主要工艺系统及设备均在本文所建立的仿真模型范围内,能更好对反应核动力装置的瞬态特性进行仿真.此外,本文针对特殊工况下多堆多机非独立运行方式,即单堆多机和多堆单机转换工况,展开多堆多机联合运行控制仿真分析.仿真分析表明,在满足一定的条件下,可以实现典型工况与单堆多机或多堆单机特殊工况的转换,并保持在整个控制过程中船用负荷的平稳.

1 多堆多机核动力装置控制对象建模

多堆多机核动力装置主要有核反应堆、蒸汽发生器、主蒸汽母管、汽轮机、冷凝器、给水泵、除氧器、螺旋桨等装置组成.一回路蒸汽发生器和二回路汽轮机都与母管相连,蒸汽发生器产生的蒸汽都进入主蒸汽母管,与此同时,汽轮机进汽及其它用汽设备也都来自主蒸汽母管.多堆多机核动力装置结构简图(以两堆四机为例)如图 1 所示[4].由于本文建立了反应堆及一、二回路的主要工艺系统及设备,系统和设备涉及繁多,限于篇幅,便只对核动力装置中主要设备的建模进行简要说明.

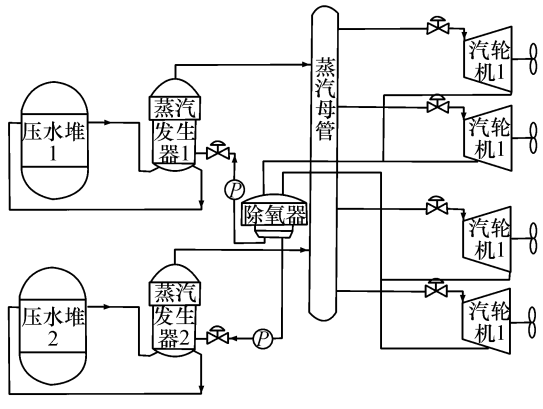


图 1 多堆多机核动力装置结构简图

Fig.1 Simple structure graph of multi-reactor and multi-turbine nuclear power plant

1.1 反应堆及冷却剂系统模型

反应堆及一回路建模主要是通过利用 RELAP5-3D 程序进行各主要设备及管道的建模.

RELAP 程序是一个典型的轻水堆热工水力分析程序,可进行核动力系统瞬态过程的计算分析.反应堆堆芯型采用带有六组缓发中子的点堆中子动力学模型,可反应出中子的时间动态过程,并计算出反应性的反馈[5].反应堆及冷却剂等热工水力模型计算程序采用了由六个基本守恒方程组成的两流体不平衡模型[6].

反应堆建模中,由于本文不需要对堆芯的热工安全特性进行分析,只需要知悉反应堆堆芯的

整个平均特性,因此本课题采用一个平均通道即可满足分析需要[7].反应堆及冷却剂系统单环路控制体划分如图 2 所示(其它环路划分相似).

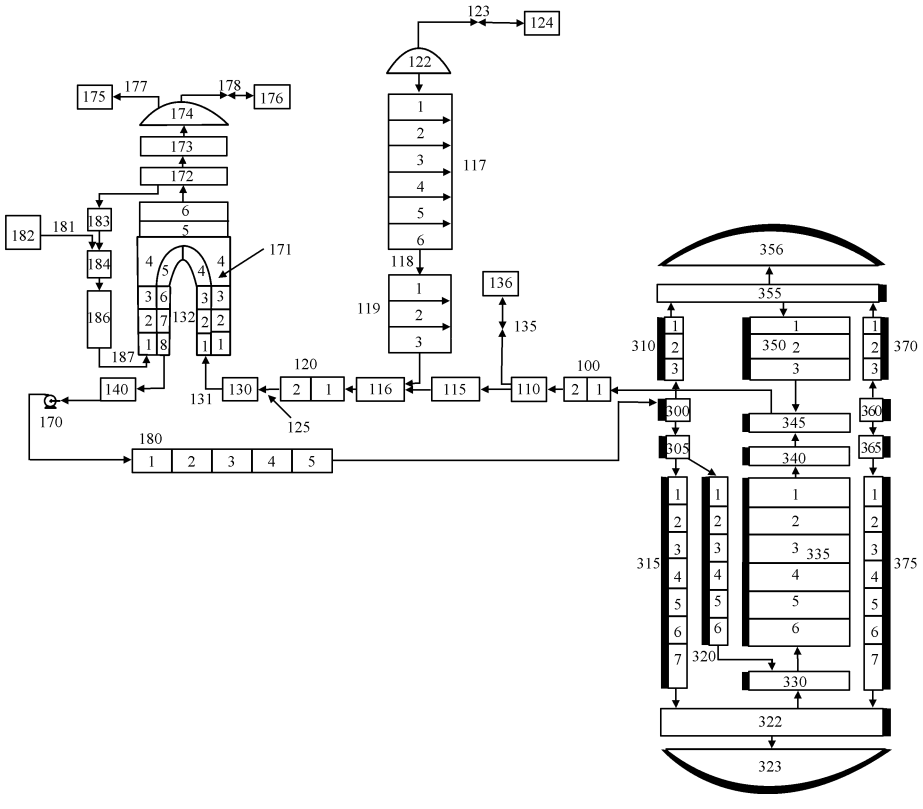


图 2　反应堆及冷却剂系统单环路控制体划分

Fig.2　Control volume partition of the reactor and coolant system with single loop

1.2　二回路主要系统设备模型

二回路系统模型主要包括主蒸汽系统、辅蒸汽系统、循环水系统、凝水系统、给水系统、主辅汽轮机、冷凝器、除氧器、给水泵等等模型.二回路系统模型采用 3KEYMASTER 程序建立,其通过图形模块化方式建立各个设备及管件的仿真模型,每个模块填入相应的必要参数通过后台 VC++程序进行计算,其热工水力计算程序也采用两相流质量、动量和能力守恒方程进行计算.其中主汽轮机模型如图 3 所示.

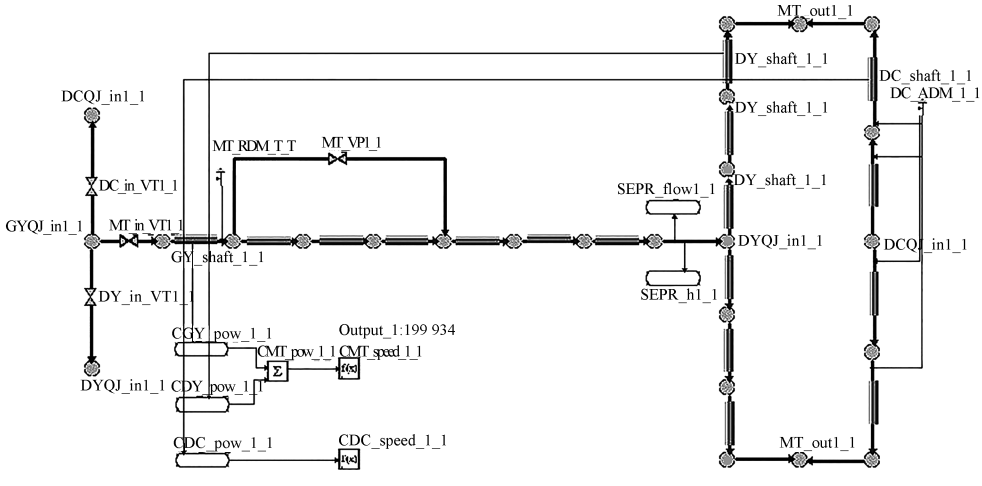


图 3　主汽轮机模型

Fig.3　Model of main steam turbine

每个反应堆及冷却剂系统产生的蒸汽均汇入到相应的蒸汽母管中,二回路两动力单元的主汽轮机及其它用汽设备均与蒸汽母管相连.同理给水母管结构相似.两蒸汽母管及给水母管分别由连接管连接,并由隔离阀隔离.正常运行情况下,两蒸汽母管及给水母管处于独立状态,没联通.如果要进行特殊工况转换时,即多堆多机联合运行工况时,打开母管连接管隔离阀,可进行联合运行工况供汽.

2 多堆多机核动力装置控制方案建模

本文研究的多堆多机核动力装置控制方案主要包括:反应堆功率控制、稳压器压力、水位控制、蒸汽发生器水位控制、蒸汽排放控制.

在 MATLAB/Simulink 平台上建立控制方案模型,Simulink 是 MATLAB 提供的实现动态系统建模仿真的一个软件包,它是 MATLAB 的重要组成部分,而且具有相对独立的功能和使用方法.它支持线性和非线性、连续时间系统、离散时间系统、连续和离散混合系统建模,且系统可以是多进程的[8].

并利用 RELAP5 建立的对象模型与 Simulink 建立的控制方案模型的数据实时同步交互实现控制方案的仿真[9].

2.1 反应堆功率控制方案模型

反应堆功率控制方案主要实现反应堆功率跟随二回路负荷变化,匹配二回路负荷的控制,同时控制反应堆冷却剂平均温度在设定值.这里将反应堆平均温度和核功率与二回路负荷的功率偏差信号作为调节参数,并通过两个闭式反馈控制环路同时实现了反应堆功率与反应堆平均温度的控制[10].反应堆功率控制方案模型如图 4 所示.

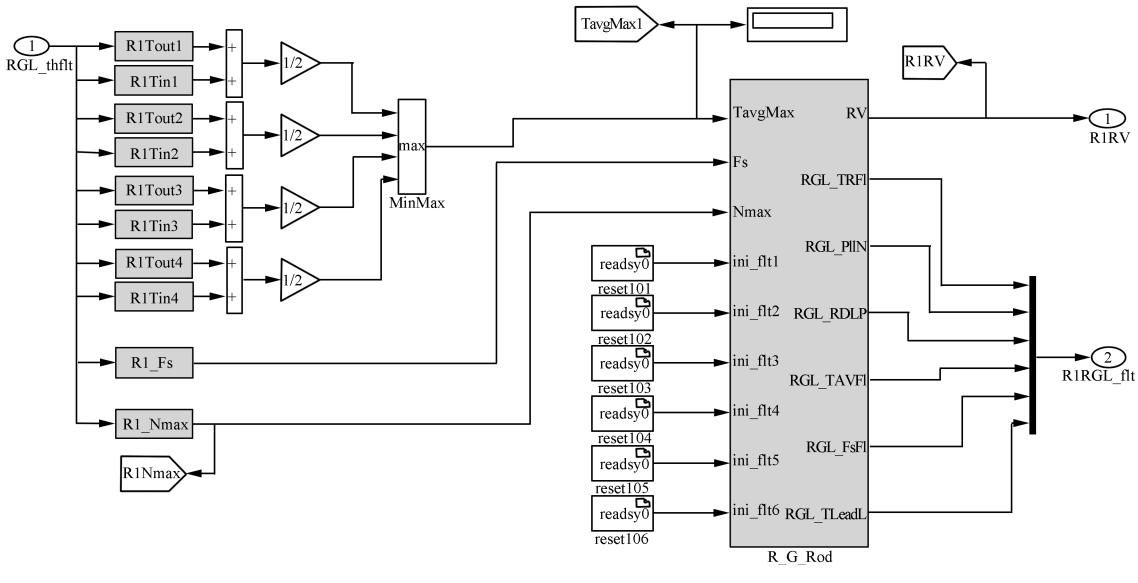


图 4 反应堆功率控制方案模型

Fig.4 Model of reactor power control plan

2.2 稳压器压力水位控制方案模型

稳压器压力控制主要是根据稳压器压力定值比较,产生控制信号,通过调节电加热器的功率以及投切释放阀、安全阀等方法来实现控制稳压器压力的目的,使反应堆在运行过程中稳压器压力保持在正常范围内.稳压器压力控制方案模型如图 5 所示.

稳压器水位控制是通过实际水位值与设定值比较的差值信号,控制补水泵及电加热器的投切来实现控制的,其控制模型如图 5 所示.

2.3 蒸汽发生器水位控制方案模型

蒸汽发生器水位控制主要通过蒸汽流量、水位偏差和给水流量三冲量控制方法,水位偏差为主控制通道,蒸汽流量和给水流量偏差为辅控制通道,并利用 PID 控制器对控制偏差进行计算,产生控制信号调节给水阀开度,控制蒸汽发生器水位保持在正常水位[11].蒸汽发生器水位控方案模型如图 6 所示.

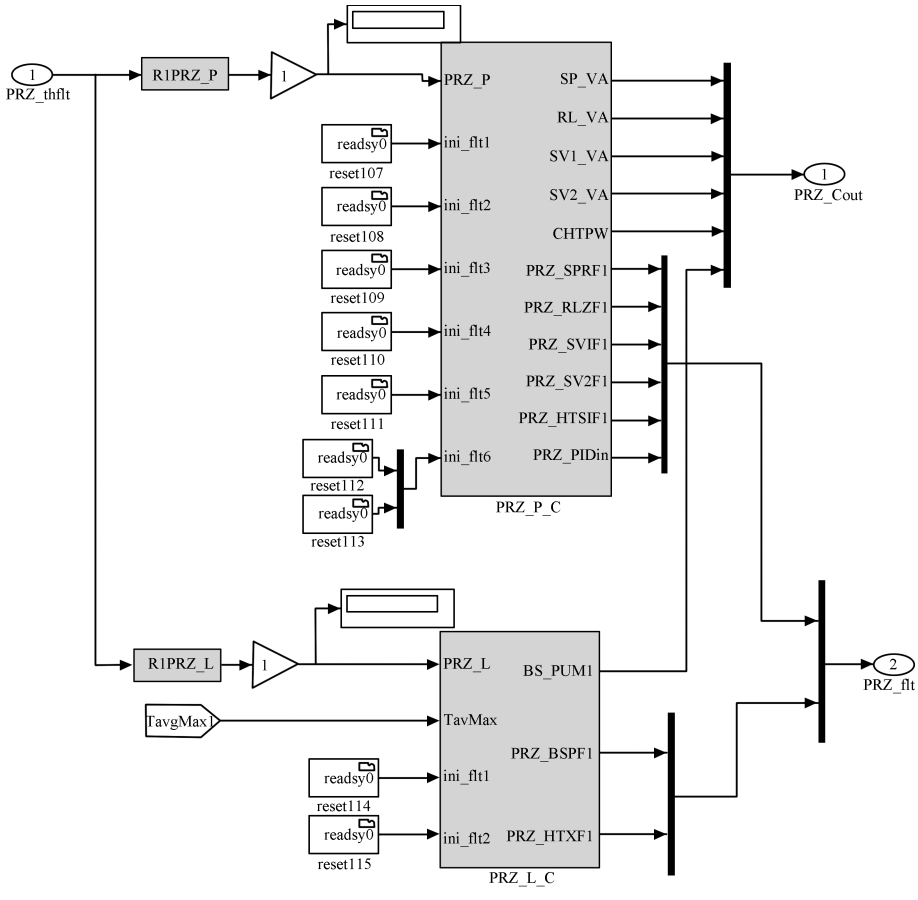


图 5　稳压器压力—水位控制方案模型

Fig.5　Model of pressurizer pressure and water-level control plan

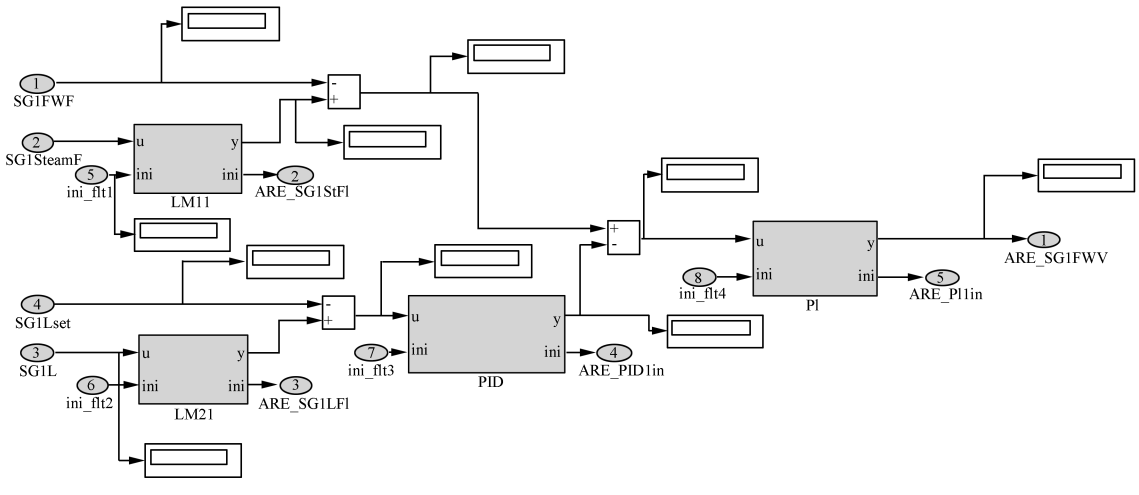


图 6　蒸汽发生器水位控制方案模型

Fig.6　Model of SG water-level control plan

3　控制仿真

控制仿真平台主要包括 RELAP5、3KEYMASTER 及 SIMULINK 程序三部分. RELAP5 和 3KEYMASTER 程序包括了核动力装置一、二回路主要系统对象模型.通过两个程序的同步数据交互,可以实现一、二回系统闭环仿真. SIMULINK 程序为控制方案模型,通过数据接口与 3KEYMASTER 进行控制系统步长的实时数据交互,传递对象物理热工参数及控制信号,实现控

制方案的闭环仿真.核动力装置仿真程序总体结构如图 7 所示.

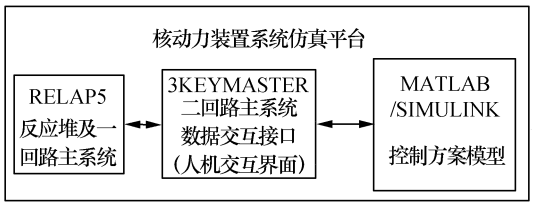


图 7 核动力装置仿真程序结构

Fig.7 Structure of simulated program of nuclear power plant

3.1 单堆多机工况瞬态控制仿真分析

该工况假设一个动力单元的反应堆无法正常运行,但该单元的用汽设备需保持原来负荷不变.此时打开单元蒸汽母管连接管和给水母管连接管的隔离阀,由另一动力单元的一回路对该动力单元供汽,该动力单元负荷保持不变,即将所需的功率转移并叠加到另一动力单元的反应堆的需求功率上,用一个反应堆为全船总负荷提供能量,维持二回路负荷不变.

仿真工况转换过程如下:初始状态一、二号动力单元稳态运行(50%额定功率),打开单元蒸汽母管连接管和给水母管连接管上的隔离阀,切换二号动力单元的给水泵转速控制信号为一号动力单元的给水泵转速控制信号,令二号动力单元对应的反应堆停堆,此后二号动力单元的用汽负荷会转移至一号动力单元的反应堆,该反应堆提升功率以满足两个动力单元的蒸汽负荷,保持两个动力单元原负荷不变.控制仿真结果如图 8 所示.

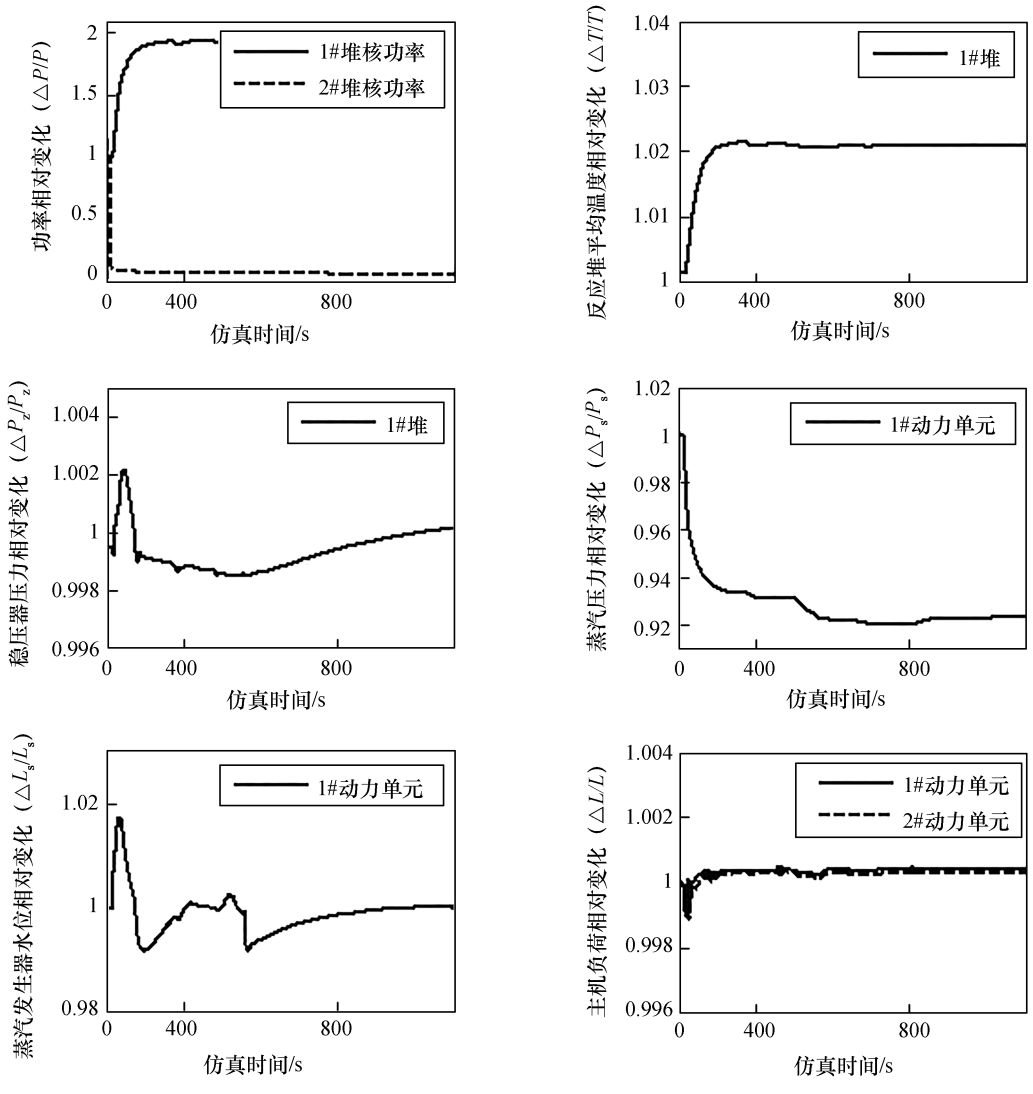


图 8 单堆多机工况主参数变化曲线

Fig.8 Changing curve of main parameters in single-reactor and multi-turbine working condition

仿真结果表明,若初始两个动力单元功率水平相同,且总负荷不超过单个反应堆额定功率时,该控制方案能够实现单堆多机工况转换,主要参数在较短时间能达到新的稳态,并保持两个动力单元负荷平稳.

另外,若两个动力单元初始功率水平不相同时,由于两蒸汽母管中的蒸汽参数不匹配,在进行工况转换时,打开单元蒸汽母管连接管的隔离阀后,会出现两动力单元相关参数大幅振荡且长时间无法稳定的情况.限于篇幅本文不具体讨论.

3.2　多堆单机工况瞬态控制仿真分析

该工况假设一个动力单元故障,其用汽设备不再工作,且两个反应堆需要保持功率运行,不停堆.此时开启单元蒸汽母管连接管和给水母管连接管上的隔离阀,为不使该动力单元对应的反应堆停堆,两反应堆同时降低功率,以匹配一个动力单元总负荷,即把失效动力单元的负荷通过同时降低两个反应堆功率,使反应堆不停堆,维持功率运行状态.

仿真工况转换过程如下:初始状态一、二号动力单元稳态运行(100%额定功率),打开单元蒸汽母管连接管和给水母管连接管上的隔离阀,并且切换二号动力单元的给水阀开度控制信号为一号动力单元的给水阀开度控制信号,同时令二号动力单元汽机停机,切除其他用汽负荷.二号动力单元对应的一回路向二号动力单元供汽,并且两动力单元一回路的供汽负荷同时下降,两反应堆功率同时下降以匹配供汽负荷,达到不停堆,保持反应堆均在功率运行状态.控制仿真结果如图 9 所示.

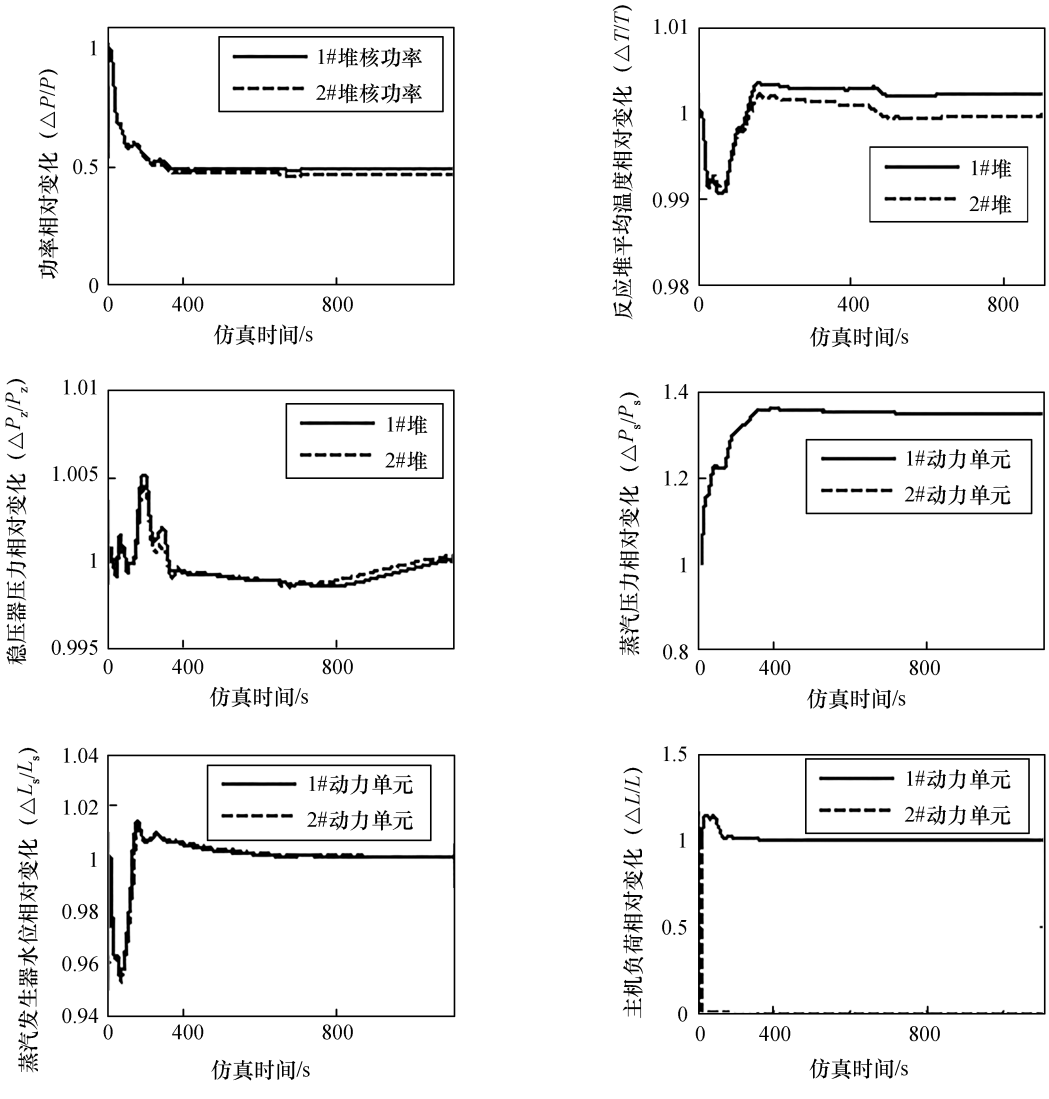


图 9　多堆单机工况主参数变化曲线

Fig.9　Changing curve of main parameters in multi-reactor and single-turbine working condition

仿真结果表明,若初始两个动力单元功率水平相同时,该控制方案能够实现多堆单机工况转换,主要参数在较短时间能达到新的稳态,并保持两个反应堆均不停堆和一个动力单元负荷平稳.

4 结 论

根据多堆多机核动力装置系统运行特性,利用不同仿真程序建立多堆多机核动力装置系统模型和控制方案模型,并通过仿真程序之间实时数据交互,实现了多堆多机核动力装置的单堆多机和多堆单机组合工况的控制方案仿真分析.结果表明,两反应堆初始功率水平满足相应的条件时,本文控制方案可以实现单堆多机和多堆单机特殊工况的转换,维持二回路负荷平稳.

参考文献:

[1] 邵开文,马运义.舰船技术与设计概论[M].2 版.北京:国防工业出版社,2014.

[2] 陈世君.国外舰船一体化压水堆技术发展趋势及其应用前景[J].国外核动力,2003(1):2-11.

[3] 李玉杰.船用多堆多机核动力装置建模及控制方法研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2007.

[4] 付锦洲,李玉杰,夏国清.多 Agent 理论在多堆多机核动力装置中的应用[J].船海工程,2010,39(5):196-200.

[5] The RELAP5-3D code development team. RELAP5-3D code manual volume Ⅰ:code structure, system models, and solution methods[M]. Iadho Falls: Iadho National Laboratory,2005.

[6] 姜夏岚,王江,秦治国.基于 RELAP5-3D 的压水堆稳压器建模与仿真[R].北京:2011 核能行业仿真技术及应用研讨会,2011.

[7] 陈振佳.基于 RELAP5-3D 的压水堆核电站模型敏感性分析[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2015.

[8] 岳晋,任光,曹辉.基于 Simulink 的船舶运动模型动态仿真研究[J].大连海事大学学报,2009,35(4):13-16.

[9] 林萌,苏云,胡锐,等.核电站工程模拟器中的 RELAP5 建模[J].原子能科学技术,2005,39(5):429-432.

[10] GLASSTONE S, SESONSKE A. Nuclear reactor engineering[M].4th ed.USA:Chapman&Hall,1994.

[11] KOTHAREM V, METTLER B, MORARI M. Level control in the steam generator of a nuclear power plant[J].IEEE transaction on control system technology, 2000, 8(1):55-68.