

doi: 10.7690/bgzd.2013.12.003

多堆核动力装置控制策略仿真研究

成守宇, 彭敏俊, 赵强, 邓祥鑫

(哈尔滨工程大学核安全与仿真技术国防重点学科实验室, 哈尔滨 150001)

摘要: 为保证多堆核动力装置电站系统的协调运行并且能满足方便机组负荷调整, 对多核动力装置电站运行控制问题进行仿真研究。根据多堆核动力装置运行目标, 讨论多堆核动力装置电站运行控制, 提出“平均分配负荷”和“反应堆冷却剂平均温度恒定”的控制方案, 设计相应的控制器, 建立基于机理的多堆核动力装置仿真模型。利用建立的模型对提出的多堆核动力装置控制策略进行了验证, 对电站进行快速升功率和降功率运行过程进行了模拟和测试。仿真结果表明: 该控制策略合理可行, 控制方案和控制器能满足对电站运行控制的要求。

关键词: 多堆核动力装置; 控制策略; 仿真研究

中图分类号: TJ91⁺0.2 **文献标志码:** A

Simulation Research on Control Strategy of Nuclear Power Plant With Multi-Reactors

Cheng Shouyu, Peng Minjun, Zhao Qiang, Deng Xiangxin

(National Key Subject Lab of Nuclear Safety & Simulation Technology, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: In order to ensure the coordinated operation and satisfy the convenience of load adjustment in nuclear power plant (NPP) with multi-modular reactors (MMR), the paper researched the control strategy of MRR-NPP through the simulation. According to the operation target of MMR-NPP, the paper discussed the control and operation mode, and then proposed the control strategy which is “the average distribution load in every reactors” and “keeping the average temperature of reactor inlet and outlet temperature constant”, designed the controller and developed dynamic mathematical models of NPP based on physical process. To verify and validate the designed control strategy and controller, the simulation models of MMR-NPP with designed the controllers tested and simulated the operating characteristic in cases of fast rising the load and fast falling reactor power. The operation simulation results showed that the control strategy was feasible and controller can meet the need of multi-reactor operation.

Key words: multi-reactors nuclear power plants; control strategy; simulation research

0 引言

大型核电反应堆的一次性投资成本很高, 许多发展中国家难以解决核电站建设的一次性融资问题, 但为了解决能源需求, 可以采取滚动发展、资金分阶段逐步投入的方式建设多模块化小型反应堆的核电站。多模块化式核电站具有多个反应堆, 这使得电站的运行比目前普遍采用的单堆电站模式更加复杂, 给模块式核电站的开发利用带来了很大的挑战。为保证核电站安全高效地运行, 必须采用最优和安全的控制策略。

目前关于多堆核动力装置控制方案和控制技术研究较少。文献[1]针对多模块的一体化反应堆的核电站(其蒸汽发生器采用直流式), 采用双恒定运行方案进行了多堆核动力的控制技术研究; 文献[2-3]研究的对象与文献[1]类似, 主要讨论了 Agent 控制方法在多堆多机核动力装置的应用; 文献[4-5]针对 2 个模块化高温气冷堆的运行特性和控制器设计进行了研究, 采用集总参数建模仿真了电站运行特性并设计了 1 个基于蒸汽温度的简单控制器。

关于多模块化压水反应堆且采用自然循环蒸发器的多堆核动力装置控制方案报道鲜见, 笔者研究的多堆核动力装置正是此类核蒸汽供应系统, 其运行特性与一体化反应堆装置和高温气冷堆运行特性不同, 且差异很大, 导致其控制方案和控制策略也不同, 因此开展其控制策略的研究是必要和有价值的。为了验证提出的多堆核动力装置电站运行方案和控制方案可行性, 笔者拟建立多堆核动力装置的动态模型并模拟典型的快速升降功率运行工况, 通过仿真结果评价控制方案, 从而改善电站的运行特性和保证电站运行安全。

1 多堆核动力装置的构成及运行特点

多堆核动力装置电站由 2 个反应堆模块组成, 每个模块代表 1 个核蒸汽供应系统, 由反应堆、自然循环蒸汽发生器、主泵、稳压器和相应的管道组成^[6]。2 个模块的蒸汽发生器分别产生蒸汽, 并将此蒸汽通往共同的蒸汽联箱。蒸汽在联箱中均匀混合后通往汽轮机用来发电。图 1 为多堆核动力装置电站系统流程示意图。

收稿日期: 2013-08-11; 修回日期: 2013-09-22

基金项目: 基础研究项目(多堆核动力装置匹配与运行控制技术研究, B2420110010)

作者简介: 成守宇(1979—), 男, 重庆人, 博士研究生, 助理研究员, 从事核能科学与工程。

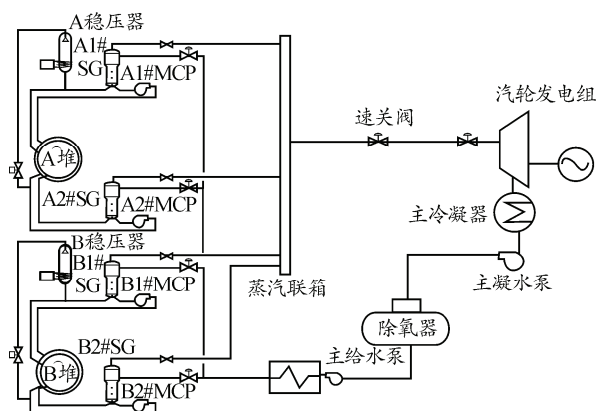


图 1 多堆核动力装置电站系统示意图

多堆核动力装置电站运行有几个典型特点：1) 电站出力由反应堆、蒸汽发生器和汽轮机等共同决定，汽轮机出力由各模块反应堆共同承担，即等于各核蒸汽供应系统负荷之和；2) 每个模块化反应堆出力可存在出力相等或不相等；3) 多台自然循环蒸汽发生器产生蒸汽，蒸汽进入蒸汽联箱，而控制策略必须保证进入联箱蒸汽压力相等或接近，若压力相差较大，长期运行造成系统不稳定和不安全；4) 电站功率调节装置方便负荷调整，提供调峰能力。

2 多堆核动力装置仿真数学模型

为了能够准确反映多堆核动力装置运行特性和研究其控制方案，笔者建立了多堆核动力装置仿真模型，主要包括反应堆堆芯物理模型、反应堆及主冷却剂热工水力模型和二回路系统模型。

反应堆堆芯物理模型采用带有 6 组缓发中子的三维两群中子扩散方程模型，可精确地反应出中子的时间和空间动态过程并计算出反应性的反馈^[7-9]。反应堆及主冷却剂热工水力模型程序采用 Theatre 热工水力仿真程序，仿真模型程序计算采用了由 5 个基本守恒方程组成的两相、双组分公式^[10]。二回路系统模型包括主蒸汽系统、汽轮机、冷凝器和给水系统等模型，采用 GSE 公司的 JTopmeret 建立流体网络模型。JTopmeret 应用了两相流(气、液)、多组分(N_2 , O_2 , H_2 等)、非热平衡的模型，基于质量、动量、能量守恒等基本原理，使用模块化方式来搭建仿真模型^[11-12]。

通过上述方法建模并进行了相应验证，然后把模型应用到多堆核动力装置电站系统中。笔者将某一模块反应堆及主冷却剂系统划分成 65 个控制体，其节点划分图如图 2。文中二回路模型通过 Jtopmeret 建立模型，主要考虑蒸汽联箱、汽轮机、冷凝器和给水总管等设备，划分为 20 个节点，如图 3 所示。整个系统模型考虑了堆芯物理、反应堆热

工水力和二回路系统等模型的接口数据传递。

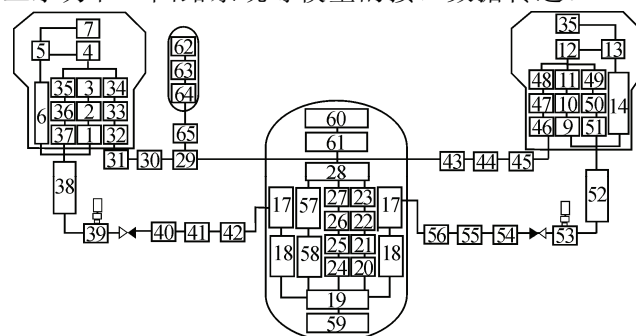


图 2 反应堆及主冷却剂系统节点划分

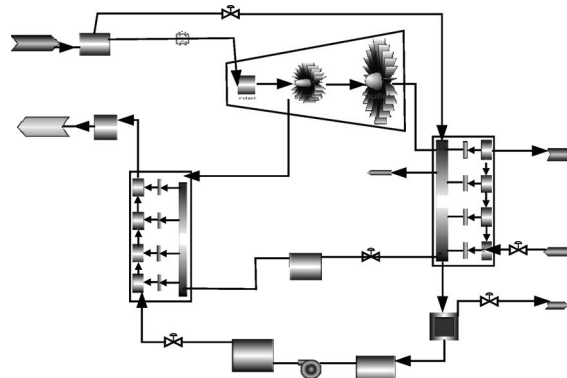


图 3 二回路系统节点划分

3 多堆核动力装置控制策略与控制器设计

3.1 多堆核动力装置控制策略的确定

根据多堆核动力电站的运行特点，为了方便负荷调整，简化控制器且易于控制，保证反应堆的安全，笔者采用“平均分配负荷”和“反应堆冷却剂平均温度恒定”的控制策略。对于“平均分配负荷”原则，即无论是总的负荷还是总的功率输出，都平均分摊到每一个反应堆中去。平均分配原则的好处体现在，控制器功率运行所有的设备损耗是同步的，这有利于多堆系统对设备的统一维修和换料。对于“反应堆冷却剂平均温度恒定”原则，对于每一反应堆采用冷却剂进出口平均温度(T_{av})保持不变，即保持 T_{av} 恒定。该方案有利于一回路的设计与运行，反应堆在没有外部控制时，反应堆冷却剂能够自己稳定在某一平均温度，并可自动适应功率的需要，使设计的稳压器尺寸最小，由于 T_{av} 恒定，一回路冷却剂体积随负荷的波动最小。另外，该方案使装置中热应力也较小，负荷响应快^[13]。另外，还可使多堆核动力装置蒸汽发生器产生蒸汽压力基本接近或相等，若采用负荷非平均分配方案，反应堆进出口温度的平均值的设计值不是定值，而是需要随功率变化而变化，一旦遇到电力系统需要调峰或负荷需求较大，反应堆调节控制就变得十分复杂，另外

若操纵员进行人工干预，容易造成误操作，存在一定运行风险。

3.2 多堆核动力装置功率调节器的设计

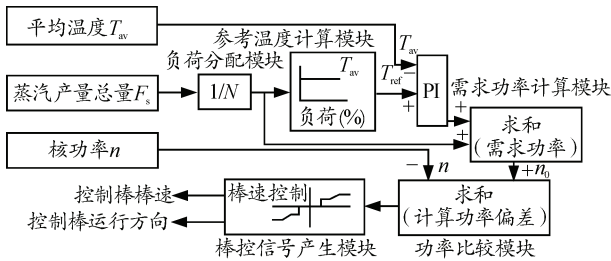


图 4 多堆核动力装置反应堆功率调节器控制原理

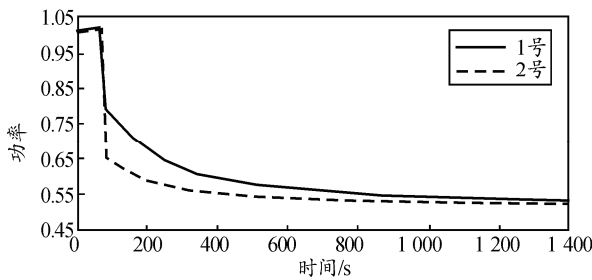
笔者设计的多堆核动力装置功率调节器(某一个反应堆的调节器)如图 4 所示,功率调节器主要由负荷分配模块、参考温度计算模块、需求功率计算模块、功率比较模块和棒控制信号产生模块等组成。功率调节器通过核动力测量系统提供反应堆进出口平均温度、蒸汽产量、核功率等参数,通过分配给某反应堆的负荷指令与平均温度控制算法一起形成需求功率指令,需求功率与实测核功率一起运行形成控制棒驱动机构动作信号,通过功率调节器的控制,从而保证反应堆平均温度恒定,同时还能保证反应堆提供给二回路需要热负荷。功率调节器以冷却剂平均温度偏差作为主控信号,以蒸汽流量作为辅控信号。由于反应堆热功率与蒸汽发生器蒸汽产量成正比,在反应堆功率调节器中考虑蒸汽流量的变化,可以立即改变功率需求值,使反应堆功率能够迅速跟踪二回路负荷的变化,实现快速负荷跟踪

能力并保证一定的调峰能力。

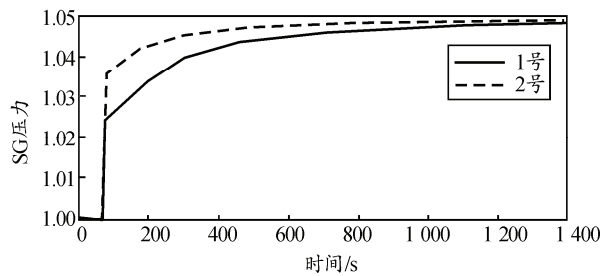
4 仿真结果与分析

为了验证方案的可行性,笔者对多堆核动力装置“平均分配负荷”和“平均温度恒定”运行方案下稳态功率变化的瞬态特性计算。为方便起见,笔者只进行二回路负荷从 100%FP 到 50%FP 快速降负荷和 50%FP 到 10%FP 快速升负荷 2 种工况的计算。

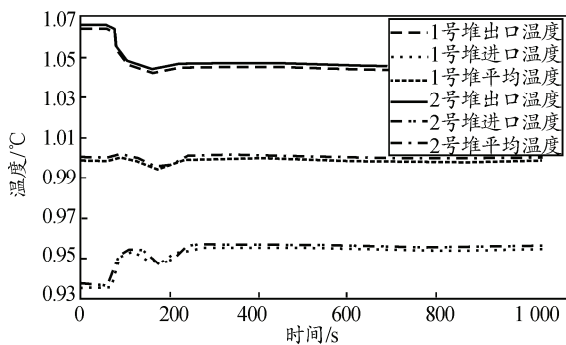
测试数据结果如图 5、图 6,图中对系统各参数做了归一化处理。从图 5 可看出,当装置汽轮机快速降负荷时,蒸汽流量减小且核功率也同时跟着降低,二回路蒸汽压力迅速升高,给水饱和温度升高,冷却剂出口温度降低,冷却剂进口温度升高,冷却剂平均温度也升高(由于反应堆存在较大热容)。但随着反应堆自身调整和功率调节器的控制,冷却剂平均温度恢复到设定值水平且保持恒定,整个过程中没有造成蒸汽旁放。从图 6 可看出,当汽轮机快速升负荷时,蒸汽流量变大且核功率也同时升高,二回路蒸汽压力反滑下降,冷却剂出口温度升高,冷却剂进口温度降低,冷却剂平均温度在反应堆功率改变后有一个短时间的微小降低接着随着功率的升高。当蒸汽流量达到 100%FP 时,功率继续升高,冷却剂平均温度开始下降,但仍大于设定值,控制系统继续引入负的反应性,使总的反应性减小,功率降低,平均温度跟着降低,通过反应堆和控制系统的不断调整,核功率和平均温度达到额定值并稳定,整个过程中反应堆出口温度没有出现超温。



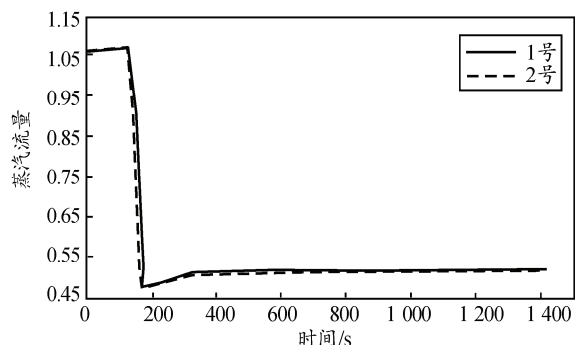
(a) 1, 2号堆核功率瞬态过程曲线



(b) 1, 2号堆蒸汽发生器压力瞬态过程曲线



(c) 1, 2号堆主冷却剂进出及平均温度瞬态过程曲线



(d) 1, 2号堆蒸汽发生器蒸汽流量瞬态过程曲线

图5 二回路负荷 100%~50%变化的各参数随时间变化趋势

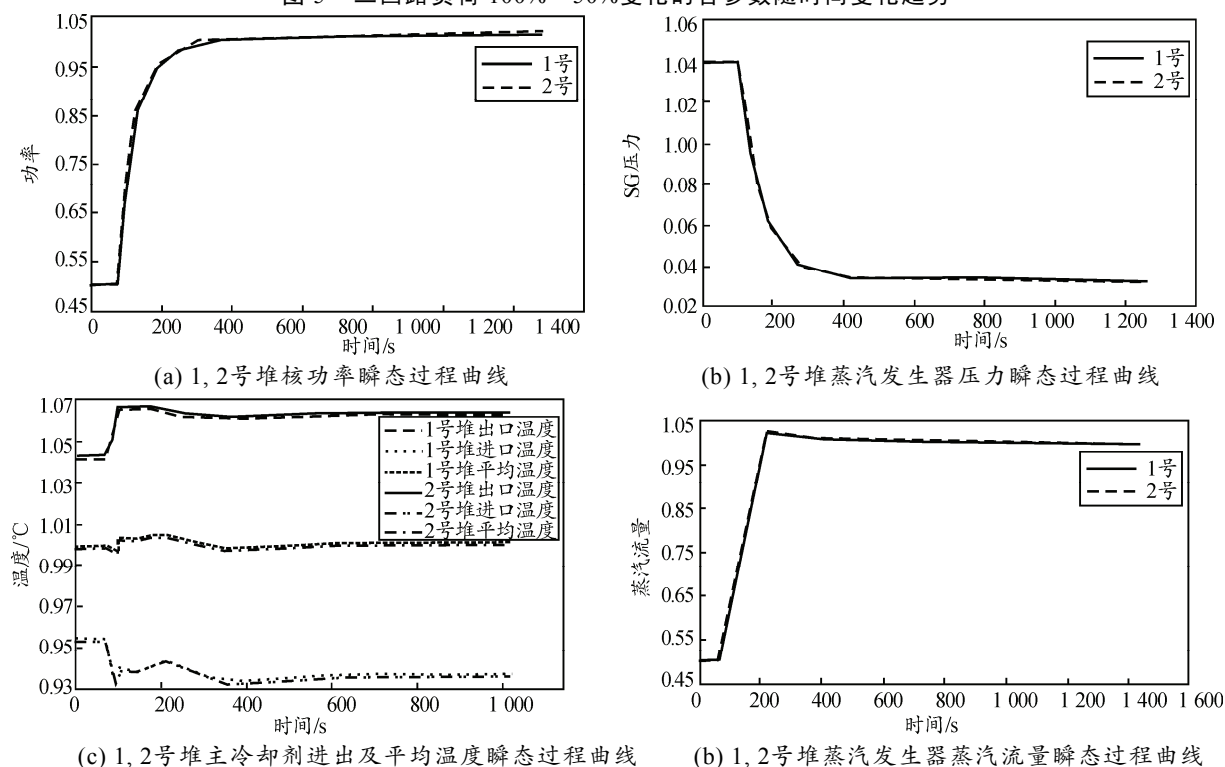


图6 二回路负荷 100%~50%变化的各参数随时间变化趋势

从图5、图6可看出，采用对多堆核动力装置“平均分配负荷”和“平均温度”运行方案以及“堆跟机”的运行模式，可以实现2个反应堆的核蒸汽供应系统产生相同压力的蒸汽，两反应堆核功率和蒸汽产量跟踪配合较为匹配，通过功率调节器可以基本实现多个模块的核功率平均分配，以及实现多堆核动力装置的堆机协同运行。

5 结论

笔者针对多堆核动力装置电站的特殊构成和运行特点，讨论了多核动力装置电站运行控制问题。仿真结果表明：该控制策略合理可行，设计的控制器也能很好地控制电站参数的变化过程。

参考文献：

- [1] Sergio Ricardo Pereira Perillo. Multi-Modular Integral Pressurized Water Reactor Control and Operational Reconfiguration for a Flow Control Loop[D]. Ph.D. Dissertation, Knoxville: University of Tennessee-Knoxville, DEC, 2010: 1-200.
- [2] 李玉杰. 船用多堆多机核动力装置建模及控制方法研究[D]. 哈尔滨工程大学硕士学位论文, 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2007: 1-92.
- [3] 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.
- [4] 李海鹏, 黄晓津, 张良驹. 模块式高温气冷堆核电站的运行特性研究[J]. 原子能科学技术, 2009, 43(8): 720-723.
- [5] Li Haipeng, Huang Xiaojin, Zhang Liangju. Operation and control simulation of a module high temperature gas cooled reactor nuclear power plant[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science(USA), 2008, 55(4): 2357-2365.
- [6] 解明辉, 李文元, 李少根. 一种基于核方法的LMF自适应多用户检测器[J]. 兵工自动化, 2012, 31(3): 61-63.
- [7] Samuel Glasstone, Alexander Sesonske. Nuclear Reactor Engineering (Reactor Systems Engineering Fourth Edition Volume Two)[M]. USA: CHAPMAN&HALL, 1994: 487-620.
- [8] 谢仲生. 核反应堆物理分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004: 62-138.
- [9] GSE. REMARK Modeling Techniques Handbook[M]. USA: GSE Power Systems, Inc., 2005: 1-30.
- [10] GSE. GSE Power Systems, Inc., THEATRE Modeling Techniques Handbook[M]. USA: GSE Power Systems, Inc., 2005: 1-45.
- [11] GSE. GSE systems, Inc., Jtopmeret Model Maintenance Guide[M]. USA: GSE Power Systems, Inc., 2006: 4-32.
- [12] GSE. GSE systems, Inc., Jtopmeret User Guide[M]. USA: GSE Power Systems, Inc., 2006: 1-80.
- [13] 彭敏俊. 船舶核动力装置[M]. 北京: 原子能出版社, 2009: 272-274.