

文章编号 : 0258-0926(2015)02-0101-04; doi: 10. 13832/j. jnpe. 2015. 02. 0101

MSHIM 运行模式在 M310 机组的初步应用研究

王静卉, 王金雨, 王 丹

中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室, 成都, 610041

摘要 :以大亚湾核电站 1 号机组为研究对象, 尝试将机械补偿控制策略 (MSHIM) 运行模式应用于 M310 核电厂。分析表明, M310 核电厂具有基负荷的 MSHIM 运行能力, 具备一定的不调硼负荷跟踪能力, 但 G1、G2、G3 棒组和 R 棒组存在控制能力不足的问题。在现有控制棒数量及布置前提下, 通过重新分组并定义控制棒组, 有可能在 M310 机组上实现 MSHIM 运行与控制策略。

关键词 :反应堆; MSHIM 运行模式; M310 机组

中图分类号 : TL38⁺2 **文献标志码 :** A

Preliminary Study on MSHIM Strategy in M310 Unit NPP

Wang Jinghui, Wang Jinyu, Wang Dan

Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610041, China

Abstract: Taking the Daya Bay nuclear power plant as a research target, this paper applies the MSHIM strategy on the M310 unit. M310 unit could operate with MSHIM strategy under various modes of operation, including base load and load follow. But the ability of banks of G1, G2, G3 and R is insufficient during load follow. After the redesign of the rod cluster control assembly pattern, the analysis indicates that it is possible to implement the MSHIM strategy on M310 unit with the current placement of control rods.

Key words: Reactor, MSHIM strategy, M310 unit

0 引言

为了满足先进轻水堆用户文件 (URD) 的要求, 西屋提出了机械补偿控制策略 (MSHIM), 以提高负荷跟踪运行能力和减少废水产生量^[1]。

MSHIM 策略通过高、低价值控制棒的组合对反应性进行机械控制。设计低价值控制棒 (灰棒) 来取代部分可溶硼对反应性的均匀控制, 并使其对功率分布的影响最小; 设计高价值控制棒 (黑棒) 来控制堆芯的轴向功率分布。在反应堆正常运行时, 通过电厂控制系统 (PLS) 移动控制棒, 可有效控制反应堆冷却剂温度和反应堆轴向功率分布。

目前国内已运行的核电机组的反应堆大部分

为二代改进型, 采用负荷跟踪模式 (G 模式) 运行, 在基负荷运行时只有温度调节棒组插入堆芯调节反应堆轴向功率形状并补偿小的反应性变化, 燃料和毒物导致的反应性变化主要靠每天若干次的调硼补偿。在负荷跟踪时, 功率补偿棒组按预设刻度棒位插入堆芯, 而氙导致的反应性变化仍主要通过调硼补偿, 这种运行方式会产生大量废水, 对系统设计的要求也较高。

如在 M310 机组上实现 MSHIM 运行与控制策略, 在基负荷运行中, 可溶硼浓度改变的频度可从每天若干次降低至一到三周一次, 也具有能力进行若干天的不调硼负荷跟踪, 超出灰棒组调节能力的更大负荷改变操作, 也可使所需的硼浓

度改变量最小化,使整个运行循环内的废水总量显著降低。

本文以大亚湾核电站 1 号机组为研究对象,将对 MSHIM 运行与控制策略应用于 M310 核电站进行初步研究。由于篇幅所限,本文仅从基负荷运行及不调硼负荷跟踪的角度进行分析。对于采用 MSHIM 运行与控制策略后反应堆的安全分析、详细的核设计及热工水力设计,将另行撰文分析。

1 MSHIM 运行研究

1.1 研究对象

以大亚湾核电站 1 号机组第 13 循环^[2]为研究对象。该循环已进入 18 个月长循环燃料管理的平衡循环,堆芯内全部为 ^{235}U 富集度 4.45% 的 AFA3G 组件,其包括 72 个新燃料组件,循环长度至燃料燃耗为 20347 MW·d/t(U)。

堆芯共布置 61 束控制棒(图 1),包括功率补偿棒组(G1、G2、N1、N2)、温度调节棒组(R,黑棒组,共计 8 束)、停堆棒组(SA、SB、SC、SD)。功率补偿棒组中,G1、G2 为灰棒(含 8 根银铟铬吸收体),共计 12 束;N1、N2 为黑棒组,共计 16 束。

由于银铟铬吸收体在堆芯中长期辐照会导致反应性下降,因此本文分析中将 G1、G2 控制棒组件更换为与美国先进非能动压水堆(AP1000)

相同的含 24 根钨吸收体棒的控制棒组件,其他黑棒组保持不变。

此外,对控制棒功能进行重新定义:将位于堆芯 F04、M06、K12 和 D10 位置处的 G2 控制棒定义为 G3 棒组(原有 G2 棒组共 8 根灰棒组,同时插入堆芯时对轴向功率偏差扰动较大)。使用 G1、G2、G3、N1、N2 用于 MSHIM 运行时的反应性控制;R 棒组主要用于轴向功率偏移控制;SA、SB、SC、SD 棒组主要用于提供足够的停堆裕量(SDM)。

在 G1、G2、G3、N1、N2 连续插入堆芯时,需考虑各棒组间重叠一定步数,本文初步设定的重叠步参考了 AP1000 设计,为 83、83、12、12。

G1 棒组提出限暂定为 150 提出步,R 棒组插入限暂定为 150 提出步。

1.2 基负荷运行

基负荷运行时,将 G1、G2、G3、N1、N2 按重叠步顺序插入堆芯到一定位置,同时将堆芯硼浓度稀释至临界,依靠控制棒补偿一段时间内由燃料和毒物燃耗带来的反应性变化。当控制棒移动到预先定义的边界时,进行硼化或稀释,以便将控制棒赶回原有位置。定期交换 G1、G2、G3 棒组的插入顺序。在运行期间使用 R 棒组维持堆芯轴向功率偏差在目标值附近。

使用该控制方式对大亚湾核电站 1 号机组第 13 循环进行 MSHIM 燃耗计算,从 150 MW·d/t(U)时刻开始,G1 棒组的初始棒位为 90 提出步。

先导棒位与临界硼浓度随循环燃耗变化见图 2。图 2 中硼浓度的微小斜率是程序模拟日常运行注铟导致的轻微硼稀释。

R 棒组棒位与堆芯轴向功率偏差随循环燃耗变化如图 3 所示。R 棒组较好地将堆芯轴向功率

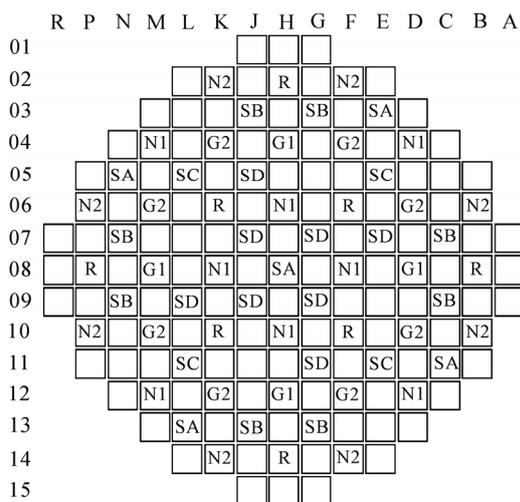


图 1 大亚湾核电站初始控制棒布置图

Fig. 1 Initial Rod Cluster Control Assembly Pattern of Daya Bay Nuclear Power Plant

功率补偿棒组(G1、G2、N1、N2,其中G1、G2为灰棒;N1、N2为黑棒);停堆棒组(SA、SB、SC、SD)

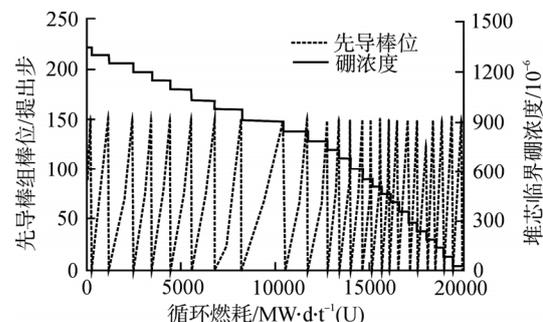


图 2 先导棒位与临界硼浓度随燃耗变化

Fig. 2 Lead Bank Position and Critical Soluble

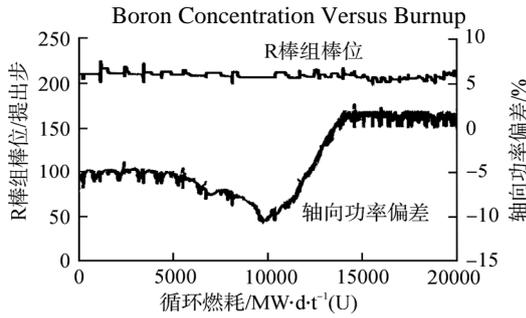


图3 R 棒组棒位与堆芯轴向功率偏差随燃耗变化
Fig. 3 R Bank Position and Axial Offset Versus Burnup

偏差控制在目标值±1%以内。

全寿期的核焓升因子 ($F_{\Delta H}$)和热流密度峰因子 (F_Q)随燃耗变化见图 4。全寿期内 $F_{\Delta H}$ 最大值为 1.502，考虑 8% 的计算不确定性后仍满足 1.65 的限值要求。

由图 2~图 4 可见，在不对控制棒位置及反应堆其他运行参数进行大的改动情况下，M310 核电厂具有基负荷的 MSHIM 运行能力。基负荷运行期间，轴向功率偏差可以得到较好的控制，G1、G2、G3 棒组的插入对功率峰因子没有显著影响。

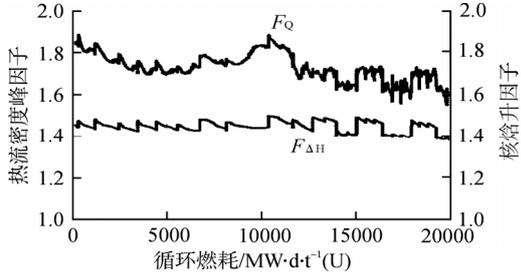


图 4 核焓升因子与热流密度峰因子随燃耗变化
Fig. 4 $F_{\Delta H}$ and F_Q Versus Burnup

1.3 不调硼负荷跟踪

MSHIM 不调硼负荷跟踪运行时，灰棒组所需的初始棒位比正常基负荷运行时的棒位要低。因此在进行负荷跟踪前，需要进行硼稀释以插入灰棒组来过渡到负荷跟踪。灰棒组就位后，可进行若干天的不调硼负荷跟踪，再进行硼稀释以补偿燃料燃耗效应。由于正常运行期间同样需要进行硼稀释，因此负荷跟踪期间的硼稀释不会显著增加整个运行循环内的废水总量。

在大亚湾核电站 1 号机组第 13 循环燃耗为 150 MW·d/t(U)时刻，进行最低功率为 50% 满功率 (FP) 的 12-3-6-3 负荷跟踪，持续时间为 60 h。60 h 的 12-3-6-3 形的负荷跟踪区间，堆芯临界硼

浓度未发生改变。

图 5 给出负荷跟踪期间先导棒位与堆芯功率随时间变化的过程。先导棒位最正值为 79 步，最负值为 -386 步。需要注意的是在先导棒位最负时，N1 棒组实际上已插入堆芯 31 步，对堆芯轴向功率偏差产生了一定影响。

图 6 给出负荷跟踪期间堆芯轴向功率偏差与 R 棒组棒位随时间变化过程。

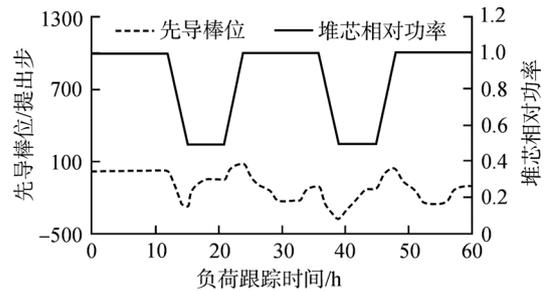


图 5 负荷跟踪期间的先导棒位与堆芯功率
Fig. 5 Lead Bank Position and Power Level during Load Follow

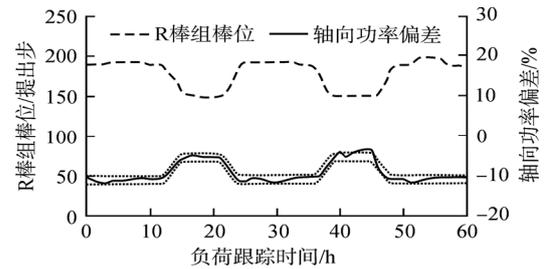


图 6 负荷跟踪期间的轴向功率偏差与 R 棒组棒位
Fig. 6 Delta I and R Bank Position during Load Follow

由图 6 可见：大部分时间内，堆芯轴向功率偏差都可控制在目标值±1%内，但负荷跟踪时间为 40 h 左右时，由于 N1 棒插入堆芯，对功率分布造成了较大扰动，R 棒组控制能力不足，一直插入到了插入限，仍无法控制轴向功率偏差在目标值±1%内。

为解决 R 棒组控制能力不足的问题，将堆芯 H08 位置处的 SA 控制棒束加入 R 棒组，这样 R 棒组共计 9 束控制棒，分别位于堆芯外部和内部。

调整 R 棒组后重新进行负荷跟踪计算，图 7 给出了负荷跟踪过程中 R 棒组棒位与轴向功率偏差的变化。所有时间内，堆芯轴向功率偏差都可控制在目标值±1%内。

上述计算表明，M310 机组具备一定的不调硼负荷跟踪能力，但 G1、G2、G3 棒组和 R 棒组

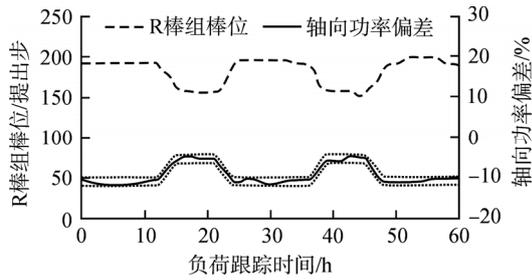


图7 调整R棒组后的轴向功率偏差与R棒组棒位
Fig. 7 Delta I and R Bank Position during Load Follow after R Bank Modified

存在控制能力不足的问题。与设置4组灰棒组的AP1000相比，M310机组缺少4束灰棒组，这样在负荷跟踪期间，可能需要黑棒组(N1)插入堆芯控制反应性，对堆芯轴向功率偏差扰动较大，对R棒组的轴向功率分布控制能力构成挑战。堆芯中原有的R棒组为8束，与AP1000相比缺少堆芯中央的黑棒束，控制能力较AP1000稍弱。但可通过将堆芯中央的SA棒组的一个棒束重新定义为R棒组来提高R棒组的控制能力，实现不调硼负荷跟踪。

2 结 论

西屋公司提出的MSHIM运行与控制策略，

可提高负荷跟踪运行能力和减少废水产生量，也可以极大减轻操控员负担。国内已运行的大量M310机组如可在无需重大改动的前提下实现MSHIM运行模式，将可提高电厂的经济性和安全性。

针对大亚湾核电站1号机组第13循环进行了MSHIM模式的基负荷运行分析和不调硼负荷跟踪分析。分析结果表明，在不对控制棒位置布置进行大的改动情况下，M310核电厂具有基负荷的MSHIM运行能力。基负荷运行期间，轴向功率偏差可以得到较好的控制，G1、G2、G3棒组的插入对功率峰因子没有显著影响。负荷跟踪期间，M310机组控制棒的控制能力较AP1000稍弱，但可通过重新定义控制棒组来满足负荷跟踪的需求。

由于篇幅所限，本文分析仅为初步研究，并不能充分证明MSHIM运行与控制策略在M310机组上是否能够进行工程应用，未来将在控制棒布置、逻辑策略、安全分析等方面进行进一步的深入研究，以满足工程应用的需求。

(责任编辑：黄可东)