

Analysis and Solution of the Problem That Pressurizer Spray Valves Frequently Hit against the Mechanical Stop during NPP Homogenization Operation

Kai Wang, Wei Zhang, Yousen Hu

China General Nuclear Power Technology Research Institute, Shenzhen Guangdong
Email: wangkai8554@163.com

Received: Jul. 7th, 2018; accepted: Jul. 19th, 2018; published: Jul. 26th, 2018

Abstract

The problem that pressurizer spray valves frequently hit against the mechanical stop during homogenization operation of nuclear power plant is discussed in this paper. Through the introduction to pressurizer pressure control function and the analysis of the current methods, two different improved solutions are evaluated. Both solutions are able to effectively solve the problem without modifying control channel parameters.

Keywords

Hit against the Mechanical Stop, Spray Valve, Homogenization Operation

核电厂极化运行期间稳压器喷淋阀频繁撞击机械挡块的原因分析及解决方案

王 凯, 张 薇, 胡友森

中广核研究院有限公司, 广东 深圳
Email: wangkai8554@163.com

收稿日期: 2018年7月7日; 录用日期: 2018年7月19日; 发布日期: 2018年7月26日

文章引用: 王凯, 张薇, 胡友森. 核电厂极化运行期间稳压器喷淋阀频繁撞击机械挡块的原因分析及解决方案[J]. 核科学与技术, 2018, 6(3): 69-77. DOI: 10.12677/nst.2018.63009

摘要

本文对某核电厂在机组极化运行期间,大流量稀释一回路硼浓度时,喷淋阀频繁撞击机械挡块的问题及原因进行讨论。通过对稳压器压力控制方式和现有方案的分析评估,给出了两种改进型的极化运行方案。通过论证,两种改进型方案均可在不修改控制通道参数的情况下,保证一定的喷淋阀开度,有效解决极化运行中喷淋阀频繁撞击机械挡块的问题。

关键词

撞击机械挡块,喷淋阀,极化运行

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着经济增长和电力需求增长的放缓,局部地区核电消纳问题愈加突显。由于部分时段存在电力供应过剩的问题,核电厂应电网要求停运或降功率运行成为新常态。核电长期低功率运行和频繁的升降负荷会导致核燃料可靠性降低、关键设备疲劳磨损并且增加放射性废水的产生。

极化运行模式是指电厂功率运行期间通过开大电加热器功率,使稳压器产生一个比连续喷淋流量更大的喷淋流量,从而完成稳压器和一回路之间的硼浓度搅混。

某在运核电厂(CPR1000 型机组)从低功率工况升功率到满功率工况期间,通过极化运行大流量调整一回路硼浓度过程中,稳压器喷淋阀频繁触发 SM5 信号(阀门关限位),出现阀门频繁撞击机械限位挡块的现象。频繁撞击机械限位挡块可导致挡块松动,长期将造成设备损坏。本文对该问题的成因进行分析,并提出解决方案。

2. CPR1000 机组稳压器压力控制功能描述

稳压器压力控制系统的功能主要是在稳态运行时维持一回路压力为其整定值,在正常运行瞬态(包括电厂启动和停运工况)中将一回路压力控制在允许的变化范围内,避免反应堆紧急停堆和稳压器安全阀动作[1]。其执行机构为电加热器和喷淋阀。2 列主喷淋阀 RCP001/002VP 设有下机械挡块,当它们处于关闭位置,下机械挡块使阀门微开,作为连续喷淋流道,从而限制主喷淋突然开启时产生较大热冲击,以及使一回路和稳压器内水的硼浓度和水温一致。

稳压器压力控制系统根据稳压器压力测量值和整定值的差值 ΔP 进行控制,采用 PID 控制器计算得到补偿压差 $\Delta P_{补}$,该补偿压差经过函数发生器运算得到喷淋阀的阀门开度和电加热器的功率百分比,见图 1。

稳压器电加热器共有 60 根,单根功率 24 kW,可分为 6 组:

- 比例式加热器 RCP003/004RS,功率为 432 kW (216 kW/组),功率连续可调,正常情况处于常开状态,开度为 50%,补偿正常运行时散热和连续喷淋引起的热损;
- 通断式加热器 RCP001/002RS,功率为 432 kW (216 kW/组),功率不可调,正常情况处于关闭状态,

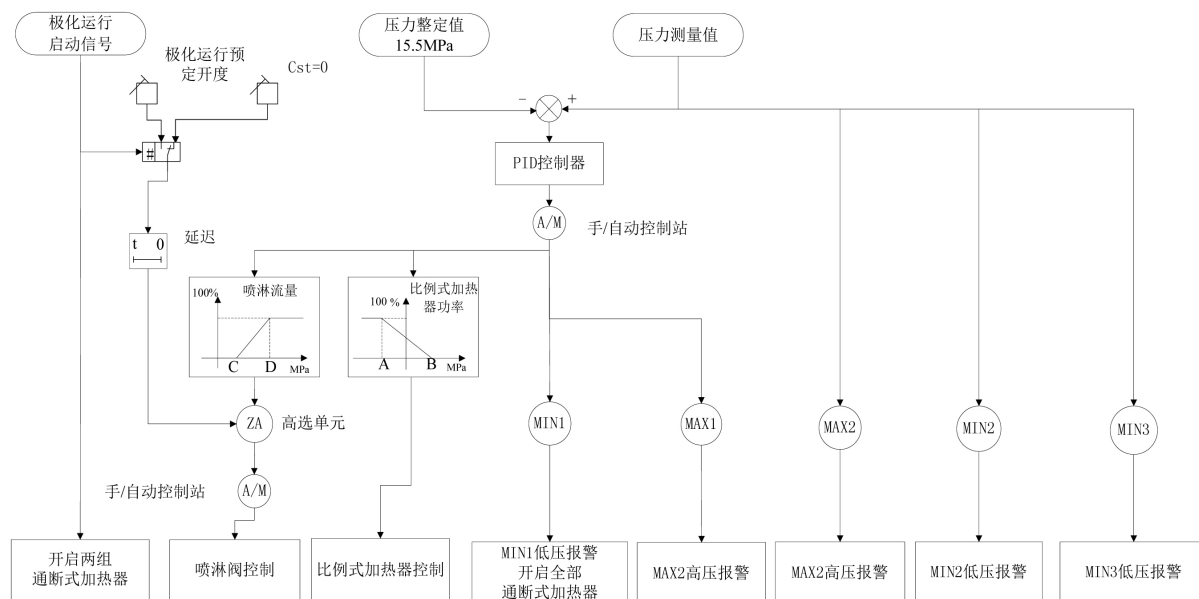


Figure 1. Pressurizer pressure control function diagram of CPR1000

图 1. CPR1000 机组稳压器压力控制功能图

由非应急电源供电。在压力过低或者水位过高时投入，以恢复压力或者加热较冷的水。极化运行时两组同时开启；

- 通断式加热器 RCP005/006RS，功率为 576 kW (288 kW/组)，功率不可调，正常情况处于关闭状态，由应急电源供电。在压力过低或者水位过高时投入，以恢复压力或者加热较冷的水。同时可以在失去厂外电源事故(LOOP)发生后，一段时间内恢复稳压器压力。

CPR1000 机组稳压器压力控制具备极化运行功能，用于完成一回路硼浓度和化学成分的搅混。启动极化运行自动模式后，两组通断式加热器 RCP001/002RS 自动开启，然后延迟一段时间，喷淋阀 RCP001/002VP 自动开启到预定开度，补偿来自电加热器产生的热量。极化运行启动条件为稳压器压力和水位正常，即：

- 稳压器压力高于低压力阈值；
- 稳压器补偿压差在允许运行压力范围内；
- 稳压器水位高于低低水位阈值；
- 手/自动控制器开关均处于自动位置；
- 通断式加热器 RCP001/002RS 处于自动控制模式。

反之当上述条件不满足时，极化运行自动停止，见图 2。

在反应堆功率运行模式下，电厂升降功率期间，为了保证硼浓度成分均匀，必须开启极化运行模式完成稳压器和一回路之间的搅混。但由于极化运行自动模式开启过程对机组造成较大的压力扰动，易投运失败。另外，喷淋阀预定开度(由 RCP401MS 控制器设置)容易发生漂移，需要在大修后重新标定，增加了关键路径的检修。因此，大部分机组采用手动投运两组通断式加热器 RCP001/002RS 进行极化运行(不闭锁稳压器压力控制系统)，代替自动模式来实现搅混功能。

3. 问题描述及原因分析

某核电厂根据电网要求，从 80%功率降至 55%功率。停留一段时间后，通过稀释一回路硼浓度[2]，

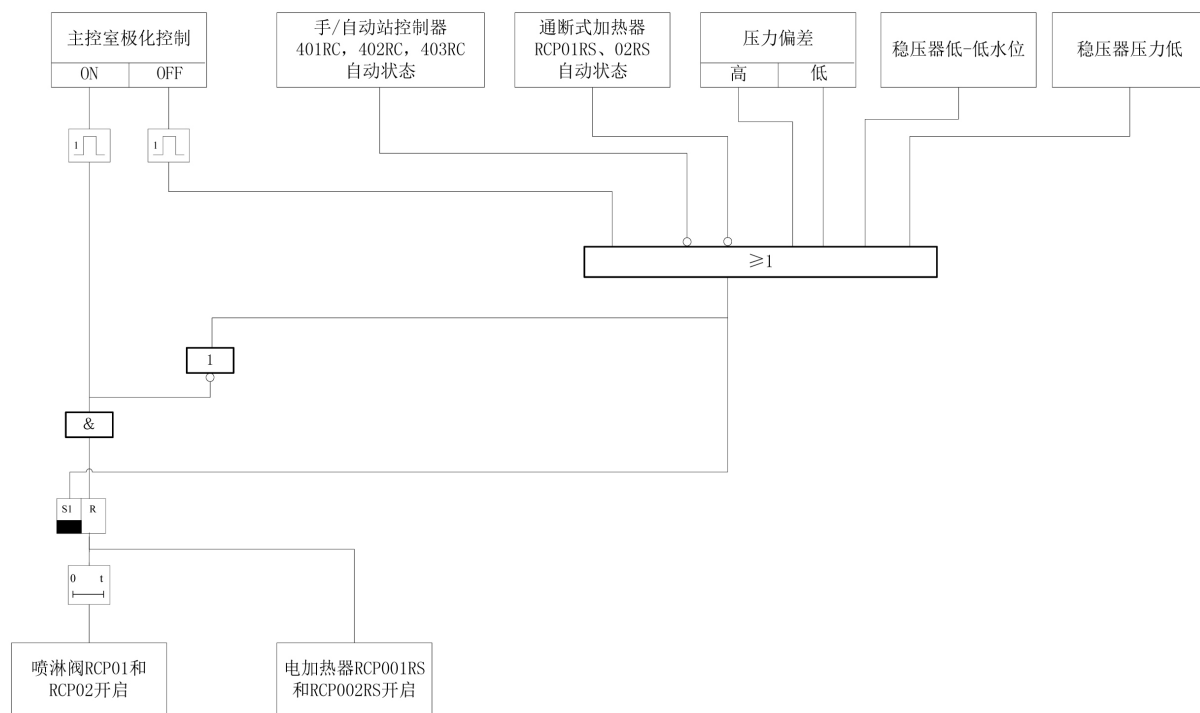


Figure 2. Pressurizer spray valve homogenization operation control function diagram of CRP1000

图 2. CPR1000 喷淋阀极化控制功能图

电厂将功率从 55%功率升至 80%功率, 如图 3。当升至 80%功率后期, 手动开启通断式加热器 RCP001/002RS 进行极化运行操作。运行人员先手动开启通断式加热器, 比例式加热器 RCP003/004RS 根据一回路压力变化自动调节到关闭状态。此时两列喷淋阀 RCP001/002VP 频发触发 SM5 阀门关限位信号, 即阀门频繁撞击机械限位挡块, 最大频度为约 140 次/h, 如图 4 所示。

图 5 为稳压器压力控制程序。由比例式加热器关闭和喷淋阀频繁开启可以判断, 目前补偿压差 $\Delta P_{补}$ (经过 PID 补偿计算后的压差) 应处于喷淋阀开启定值 0.17 MPa 附近。这表明在 80%FP 功率平台, 手动投运通断式加热器 RCP001/002RS 产生的热量不足, 补偿压差无法使喷淋阀远离开启定值而处于常开状态。当喷淋阀开启时, 稳压器压力下降, 导致喷淋阀关闭; 喷淋阀关闭后, 通断式加热器热量使稳压器压力升高, 超过喷淋阀开启定值, 触发其再次开启。稳压器压力往复波动导致喷淋阀频繁撞击下限位机械挡块, 引起设备开启异常。

如果采用极化运行自动模式,由于设置高选单元,喷淋阀的最终开度为正常压力控制通道调制开度和极化运行下预定开度之间的较大者。当调节通道要求的开度比预定开度大,则喷淋阀的开度由调节通道决定。当调节通道要求的开度比预定开度小,则喷淋阀的开度由预定开度决定。这样即使调节通道中补偿压差小于喷淋阀开启定值时,喷淋阀依然可以保证一定开度,使搅混能够正常进行。

4. 现有极化运行方式存在的问题

4.1. 手动开启通断式加热器进行极化运行的问题

采用手动投运两组通断式加热器 RCP001/002RS，不闭锁比例式加热器，代替极化运行自动模式，原理是固定稳压器电加热器热量，调节喷淋阀流量来匹配电加热器释热，维持稳压器内的压力平衡和热量平衡。这种方式存在如下问题：

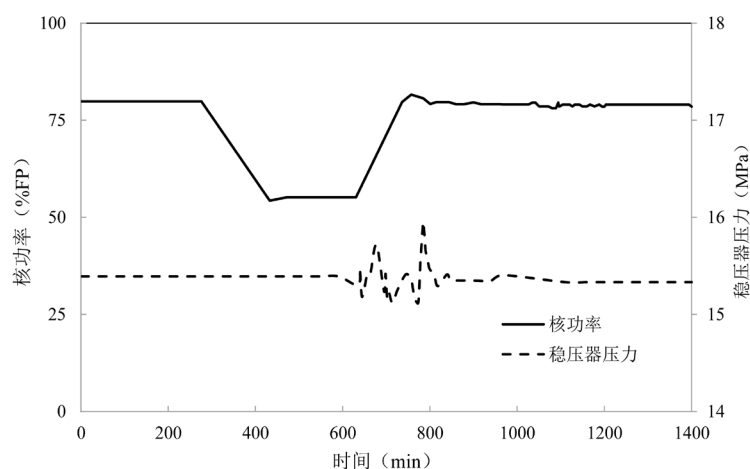


Figure 3. The variation of nuclear power and pressurizer pressure during unit lifts power

图 3. 某电厂升降功率期间核功率和稳压器压力变化

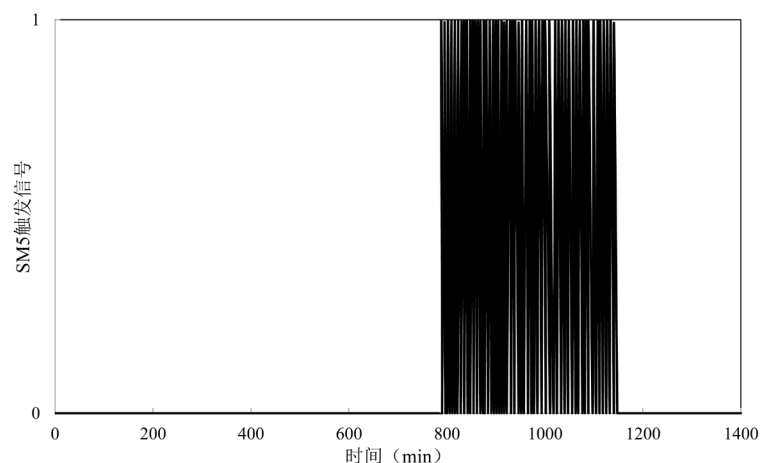


Figure 4. Diagram of pressurizer spray valve frequently hitting against the mechanical stop

图 4. 喷淋阀频繁撞击限位挡块指示图

1) 喷淋流量不足

手动方式只开启通断式加热器 RCP001/002RS, 而达到极化运行时的喷淋流量, 还需考虑比例式加热器 RCP003/004RS 运行在 50%功率。由于没有设置喷淋阀开度高选单元, 当稳压器压力偏差使比例式加热器处于调制关闭状态, 而电加热器 RCP001/002RS 热量又不足以完全顶开喷淋阀, 将导致喷淋阀处于最小流量开度状态, 引起极化喷淋流量不足。由于电加热器 RCP001/002RS 和 RCP003/004RS 功率相同, 若比例式加热器处于关闭状态, 估算实际极化喷淋流量比设计值约少 50%左右。

另外, 当稳压器压力处于喷淋阀开启定值附近, 压力波动容易引起喷淋阀处于时开时关状态, 导致喷淋不能连续进行。若比例式加热器无法保持 50%左右功率运行, 或直接处于关闭状态, 将弱化或失去其对压力波动的调节能力, 进而影响机组在极化运行期间的稳定性。

2) 仪控设备磨损加大

手动投运两组通断式加热器 RCP001/002RS 产生的热量可能不足以完全顶开喷淋阀, 若稳压器压力

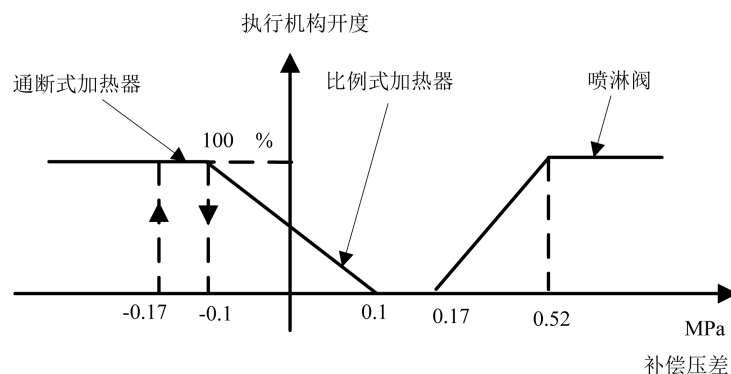


Figure 5. Pressurizer pressure control function
图 5. 稳压器压力控制程序

状态处于喷淋阀开启定值附近，容易造成喷淋阀频繁开关，频繁撞击机械限位挡块，最终导致机械挡块损坏失效。另外，喷淋阀频繁动作，易造成气动阀定位器等调节部件磨损过度，进而导致阀门调节异常和部件失效。

4.2. 采用极化运行自动模式的问题

采用极化运行自动模式的原理是，通过固定稳压器喷淋阀开度产生恒定的喷淋流量，让电加热器自动匹配热量，维持稳压器内的压力平衡和热量平衡。在开启通断式加热器 RCP001/002RS 后，一回路压力由比例式加热器 RCP003/004RS 调节。这种方式存在如下问题：

1) 引入较大压力扰动

根据电厂运行经验，极化运行自动模式投运后喷淋阀和加热器匹配度不好，不容易达到稳定状态。另外，投运后容易引起较大的压力扰动，对系统造成冲击较大。正常运行下，喷淋阀保持最小开度，形成连续喷淋流量，从而限制主喷淋开启时对管道和阀门造成的热冲击。

CPR1000 机组的连续喷淋流量为 0.094 kg/s。根据能量守恒和质量守恒，调试后的极化运行固定开度对应的喷淋流量为：

$$Q_{\text{波动管流量}} - Q_{\text{极化喷淋}} = Q_{\text{RCP001/002RS 的 100\% 开度}} + Q_{\text{RCP003/004RS 的 50\% 开度}} - Q_{\text{散热}} - Q_{\text{连续喷淋热损}} \quad (1)$$

$$m_{\text{极化喷淋}} = m_{\text{波动管流量}} \quad (2)$$

其中 $Q_{\text{RCP001/002RS 的 100\% 开度}}$ 、 $Q_{\text{RCP003/004RS 的 50\% 开度}}$ 为加热器功率，kW；

$Q_{\text{散热}}$ 为稳压器散热量，kW；

$Q_{\text{连续喷淋热损}}$ 为连续喷淋引起的热量损失，kW；

$Q_{\text{极化喷淋}}$ 为喷淋阀预定开度下水带入热量 ($Q = m \times \Delta h$)，kW；

$Q_{\text{波动管流量}}$ 为稳压器波动管流量带走热量 ($Q = m \times \Delta h$)，kW；

Δh 为流体的焓差，kJ/kg；

$m_{\text{极化喷淋}}$ 、 $m_{\text{波动管流量}}$ 为极化运行下的喷淋流量和波动管流量，kg/s。

计算得出 $m_{\text{极化喷淋}} = 1.4 \text{ kg/s}$

正常运行时，比例加热器运行在 50% 功率 (216 kW)，当瞬间开启 RCP001/002RS 加热器，功率增大到原来的 3 倍 (648 kW)。同时，喷淋阀延迟 10 秒后直接设置为预定开度，喷淋流量由原来的 0.094 kg/s 突然增大到 1.4 kg/s，约增大 15 倍。因此极化运行自动模式的开启，对一回路系统造成较大的压力扰动，影响系统的稳定性。

2) 喷淋阀预定开度发生漂移

根据电厂运行经验, CPR1000 机组稳压器喷淋阀为气动阀, 定位器为机械结构, 控制精度不高, 阀门特性易发生漂移。这导致每次极化运行后, 比例式加热器 RCP003/004RS 的开度经常超出 $50\% \pm 5\%$ (调试大纲规定), 需要在大修中重新标定喷淋阀的预定开度 (调整 RCP401MS 定值)。调整 RCP401MS 定值需多次进行相关调试试验, 容易引起一回路压力扰动, 产生系统风险。

另外, 多次进行调试试验可能增加机械卡件故障的风险。若不调整 RCP401MS 定值, 当喷淋阀预定开度发生漂移时, 比例式加热器 RCP03/04RS 无法运行在 50% 附近, 这将缩小在极化运行时的运行范围, 减弱其调节压力波动的能力。

5. 解决方案及安全评估

根据现有控制系统和设备配置情况, 提出两种改进方案: 极化运行分阶段开启和手动多开一组通断式电加热器。

5.1. 极化运行分阶段开启

对于极化运行时喷淋阀的预定开度漂移问题, 在无法更换阀门的情况下, 只能采取在大修后重新标定阀门的预定开度。

为了缓解极化运行自动模式开启时带来的压力扰动, 建议采取极化运行分阶段开启。其原理是: 通过对加热器功率和喷淋阀流量的缓慢引入, 缓解开启过程中产生的压力扰动。具体操作如下:

1) 机组处于功率运行模式, 并处于稳定运行状态。稳压器压力控制处于自动状态。

2) 手动投运 RCP001/002RS 通断式加热器, 比例式加热器运行在 50% 功率, 稳压器输入热量变为初始热量的 3 倍。由于压力控制处于自动状态, 比例式加热器根据补偿压差自动调制关闭状态, 输入热量变为初始热量的 2 倍; 喷淋阀自动开启, 匹配稳压器的热量增加。等待喷淋阀开度和一回路压力稳定后, 根据热平衡, 此时的喷淋流量由 0.094 kg/s 增大到 0.742 kg/s 。

3) 将 RCP001/002RS 通断式加热器设置为自动模式, 开启极化运行自动模式, 喷淋阀开度置于预定开度, 此时喷淋流量由 0.742 kg/s 增大到 1.4 kg/s 。比例式加热器根据能量平衡自动调节到 50% 功率左右。

与直接启动极化运行自动模式相比, 采取分阶段开启可有效避免短时间引入较大喷淋流量, 进而缓解对系统产生的压力扰动。极化运行分阶段控制的前两个阶段相当于目前电厂采用的手动开启通断式加热器进行极化运行的方式。最后一个阶段开启自动模式, 通过设置喷淋阀开度, 解决了采用手动模式下的喷淋开度不足等问题。

对于采用极化运行分阶段开启引入的风险, 分析如下: 稳压器压力始终处于自动控制模式, 由于在第二阶段停留时间较短, 因此不会带来较大的系统风险。另外, 极化运行自身具有退出逻辑, 当不满足运行条件时, 极化运行自动退出。

5.2. 手动多开一组通断式加热器

相比于手动投运通断式加热器 RCP001/002RS, 多开一组通断式加热器 (RCP005RS 或 RCP006RS) 可以使输入稳压器的热量多增加 50%, 等效于开启 50% 功率的比例式加热器。根据之前的分析, 比例式加热器可能处于调整关闭状态。开启三组电加热器, 输入总热量可以完全顶开喷淋阀, 因此喷淋流量可以达到的预定流量。

对于采用多开一组通断式加热器进行极化运行引入的风险, 分析如下: 由于三组通断式加热器均采用手动控制模式, 没有自动退出功能。在机组发生不稳定运行工况, 比如甩负荷工况, 通断式电加热器

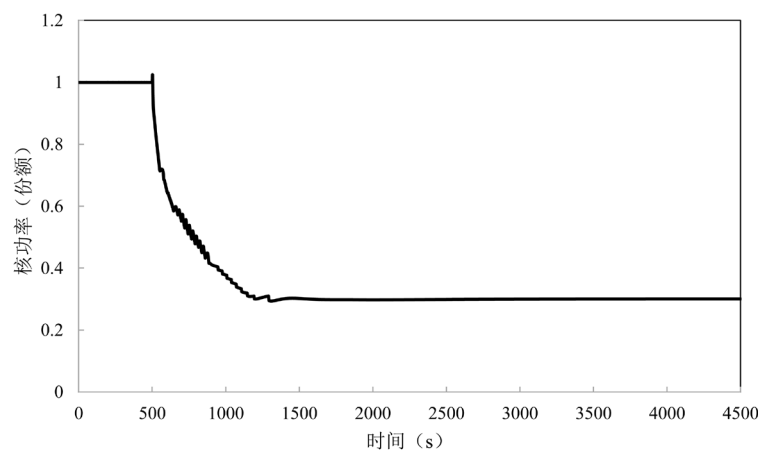


Figure 6. The variation of nuclear power during load rejection condition

图 6. 甩负荷工况核功率随时间的变化

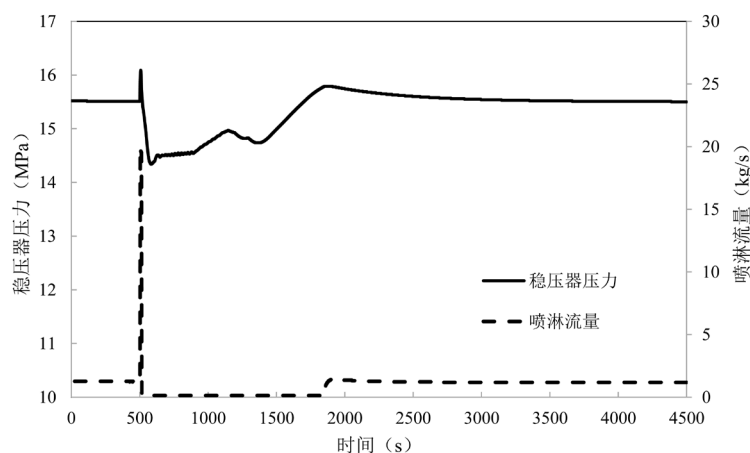


Figure 7. The variation of pressurizer pressure and spray flow rate during load rejection condition

图 7. 甩负荷工况稳压器压力和喷淋流量随时间的变化

无法自动退出，在正常运行瞬态过程中可能造成稳压器压力升高，进而引发反应堆跳堆。由于满功率甩负荷工况为正常运行瞬态中最恶劣工况，因此只需验证在该工况下手动开启三组通断式加热器进行极化运行，是否会引起反应堆跳堆。

本文采用的 CATIA2 程序版本为 v1.2。CATIA2 程序是由法玛通公司开发并经过多年实际应用逐步完善的单环路热工水力程序，用于模拟压水堆核电站正常运行瞬态和部分事故瞬态。该程序的最大特点是能够较为精细的进行压水堆核电站控制系统的模拟[3]。

机组在满功率工况手动开启通断式加热器 RCP001RS、RCP002RS 和 RCP005RS 进行极化运行，稳压器压力控制系统处于自动控制状态，此时极化喷淋流量为 1.4 kg/s。假设甩负荷瞬态发生在 500 秒(见图 6)，由于汽机入口阀门突然关闭导致二次侧蒸汽排放能不足，一回路冷却剂升温，稳压器压力迅速升高到峰值压力 16.1 MPa，喷淋流量增大到 21 kg/s (见图 7)限制压力继续上升。随后蒸汽旁排系统开启，控制棒下插导致核功率降低，一回路冷却剂平均温度降低。在 500 秒至 1800 秒，稳压器压力控制系统启动全部加热器恢复系统压力，此时喷淋处于关闭状态。当稳压器压力接近 15.5 MPa，比例式加热器关闭，喷淋阀恢复到极化运行喷淋开度，与三组手动开启的通断式加热器重新达到热平衡。瞬态中稳压器最高

压力不会达到高压停堆定值，因此手动开启三组通断式加热器进行极化运行时，发生正常运行瞬态不会引发停堆。

6. 结论

本文通过对某 CPR1000 核电厂升功率期间进行极化运行时，稳压器喷淋阀频繁撞击机械限位挡块的原因进行分析，给出了两种改进的极化运行方案，并对其进行风险评估。分析论证表明：

- 1) 两种改进方案均可满足电厂极化运行的要求，达到额定的喷淋流量，从而避免因流量不足引发的各种问题。
- 2) 两种改进方案均可满足机组正常运行的要求，不会影响机组的安全运行。
- 3) 目前在运核电厂多采用手动多开一组通断式加热器的方式解决类似问题，取得不错的极化运行效果。

参考文献

- [1] 中广核核电运营有限公司培训中心. 900MW 压水堆核电站系统与设备: 上册[M]. 北京: 原子能出版社, 2005.
- [2] 段新会, 姜萍, 佟振声. 用于压水堆负荷跟踪运行的硼浓度模糊控制系统[J]. 核动力工程, 2002, 23(1): 19-23.
- [3] 刘炯, 张帆, 张瑞, 张英. 秦山核电二期工程反应堆控制系统设计[J]. 核动力工程, 2003, 24(z1): 231-234.

知网检索的两种方式：

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2332-7111, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: nst@hanspub.org