

红沿河核电厂 1 号机组热态调试期间稳压器 压力控制回路扰动试验分析研究

刘道光, 刘双金, 栾振华, 仇少帅, 冯光宇

中广核工程有限公司调试中心, 广东深圳, 518124

摘要: 详细分析热态调试期间稳压器压力闭环控制回路扰动试验结果。针对 -0.1、+0.5、-0.5 MPa 扰动试验过程中出现的不符合验收准则的问题, 通过调节比例-积分-微分 (PID) 微分参数、通断加热器回差等手段优化压力控制回路, 最终保证试验结果满足验收准则的要求。试验完成后, 将红沿河核电厂 1 号机组试验结果与宁德核电厂、岭澳核电站机组试验结果进行比较。热态调试期间进行的稳压器压力闭环控制回路扰动试验, 对后续临界前试验以及装料后至商业运行前的瞬态试验有着十分重要的意义。

关键词: 热态调试; 稳压器; 压力控制; PID 优化

中图分类号: TP391.9 **文献标志码:** A

0 引言

红沿河核电厂 1 号机组采用中国改进型百万千瓦级压水堆核电技术, 稳压器压力控制系统基于非安全级数字化集散控制系统平台 (HOLLIAS-MACS) 实现。热态调试期间稳压器压力控制回路扰动试验为反应堆控制系统试验的一部分, 在此之前需完成反应堆控制系统静态功能测试。扰动试验的目的主要是验证压力控制系统的稳定性、逻辑组态的正确性、比例-积分-微分 (PID) 控制器各项参数的合理性, 并对控制系统进行优化。

1 稳压器压力控制原理

稳压器压力控制系统控制通道包括 PID 调节器。调节器对压力偏差 $P - P_{ref}$ (P 为稳压器实际压力; P_{ref} 为整定值, 15.4 MPa) 进行 PID 运算, 用来对喷淋阀、比例电加热器、通断电加热器进行控制, 维持稳压器压力为其整定值^[1]。当压力升高时, 控制系统将增加喷淋阀的开度, 较多的来自冷管段的水喷到稳压器内, 使蒸汽冷凝, 降低压力; 压力降低时, 控制系统将增加电加热器的功率, 使热稳压器内水更多地汽化, 以升高压力。

2 扰动试验过程分析

红沿河核电厂 1 号机组热态调试期间稳压器

闭环控制回路扰动试验, 是在岭澳核电站 3、4 号机组以及宁德核电厂 1 号机组的试验基础上, 借鉴以往机组的经验完成的, 主要包括 +0.1、-0.1、+0.5、-0.5 MPa 扰动试验。试验通过操作员手动强制补偿压差, 使稳压器压力偏离设定值, 达到预期目标值后, 切换至自动模式, 以验收准则为标准来验证稳压器压力控制系统的性能。

2.1 +0.1 MPa 扰动试验

手动设定手操器输出为 -0.08 (比例加热器输出为 90%), 经过一段时间后稳压器压力上升至 15.5 MPa, 手操器切换至自动模式, 在补偿压差作用下, 比例加热器开度瞬间降至 0 附近; 随着稳压器压力逐渐降低, PID 输出逐渐变小并趋近于 0, 比例加热器功率在 50% 左右波动, 最终稳压器压力稳定在 15.4 MPa。试验过程中无喷淋阀动作; 无通断加热器动作; 压力回到设定值, 衰减率约为 1/10, 其他各项参数均正常。

2.2 -0.1 MPa 扰动试验

手动设定手操器输出为 +0.08 (比例加热器输出为 10%), 经过一段时间后稳压器压力降低至 15.3 MPa, 手操器切换至自动模式。比例加热器瞬间功率达到 100%, 通断加热器启动一次。分析发现, 手操器切换至自动模式, 由于设定值由 15.3 MPa 瞬间切至 15.4 MPa, 而不是以定速率变

化,补偿压差瞬间输出低于-0.17,导致通断加热器启动。调整偏差变化速率,将切换速率控制模块切换速率由 1 改为 0.01;再次进行试验,试验过程中通断加热器未启动,无喷淋阀动作,稳压器压力最终稳定在 15.4 MPa。

2.3 +0.5 MPa 扰动试验

手动设定手操器输出为-0.17(启动通断加热器)经过一段时间后稳压器压力上升至 15.9 MPa,手操器切换至自动模式,在补偿压差的作用下,比例加热器、通断加热器瞬间全关,喷淋阀启动,随着补偿压差的逐渐降低,喷淋阀关闭。而后补偿压差又重新大于 0.17,喷淋阀再次启动。

分析发现,微分时间为 6.67 s,衰减太快。增大微分时间为 30 s,同时将微分增益由 1.67 改为 1.5,重新试验。手操器切换至自动模式,喷淋阀启动 1 次,随着稳压器压力的不断变化,开度最终稳定在 50%左右,通断加热器未动作,稳压器压力最终稳定在 15.4 MPa。

2.4 -0.5 MPa 扰动试验

手动设定手操器输出为 0.4(为保证降压速度为 0.015 MPa/s,根据喷淋效率计算所得),在喷淋阀的作用下,稳压器压力迅速下降至 14.9 MPa,手操器切换至自动模式,补偿压差的输出小于-0.17,通断加热器启动,比例加热器全开,随后通断加热器再次启动。

由于第一次通断加热器动作时间较短,对稳压器压力升高贡献较小,将回差由 0.14 修改为 0.21,再次试验,通断加热器仍动作 2 次,第 2 次试验结果不合格。经分析,其原因是:在微分时间为 30 s 时衰减速率仍较快,修改微分时间为 40 s,同时减弱微分增益,将微分增益由 1.5 改为 1;再次试验,通断加热器动作 1 次,喷淋阀动作,稳压器压力最终稳定在 15.4 MPa。

3 与参考电站对比分析

HOLLIAS-MACS 系统的闭环控制系统采用增量式 PID 设计。与参考电站岭澳核电站二期西门子非安全级 DCS 控制系统(TXP)组态相比较,红沿河核电厂 1 号机组的组态采用 EP 参数控制,在控制器饱和时能够停止比例运算,在手动切自动时不停止微分单元;采用 SFT 模块对偏差闭环率进行限定以实现无扰切换。上述差异导致红沿河核电厂 1 号机组的试验结果与参考机组差异较大。

3.1 EP 参数、SFT 模块

PID 中 EP 参数的意义为:当输出达到上限/下限时,是否忽略偏差的变化。EP=0 时,忽略偏差;EP=1 时不忽略。EP 参数对控制器的抗积分饱和无影响,作用在于:大的负向偏差导致控制器输出达到下限;当该偏差变大(绝对值变小)且 EP=0 时,则输出无变化;如果 EP=1,则输出先增大后减小(先因为比例增加的原因,输出增大,后因为负偏差的积分效果输出减小到下限)。

SFT 模块的功能是对两路输入进行切换,两路输入切换的变化率由参数 RT 决定,该值为每个运算周期的变化量。参数 RT 的作用是配合 PID 模块完成无扰切换。目前宁德核电厂已删除该模块,相当于切换速率为 ∞ ;而红沿河核电厂保留了该模块,初始值为 1,即每个运算周期变化 1,每秒钟变化 20。

3.2 热态调试期间稳压器压力控制试验结果分析

3.2.1 -0.1 MPa 扰动试验 第一次试验出现 0.5 s 的通断式加热器启动指令。经计算,控制器输出的最低值为-0.19 MPa,达到通断加热器启动阈值。由于控制器存在微分环节,强的微分作用叠加比例作用导致修改控制器输出瞬间达到-0.19 MPa,短时间内启动加热器。为削弱微分作用的影响,将偏差的变化率由 1 改为 0.01。

该试验结果与岭澳核电站二期明显不同。在岭澳核电站二期,手操器切换至自动模式,由于微分作用瞬间不起作用,控制器的输出呈线性下降(图 1)。

3.2.2 +0.5 MPa 扰动试验 第一次试验喷淋阀动作 2 次,而宁德核电厂取 EP=1、RT=1(每秒钟变化 20),试验结果满足要求。2 种参数设置的

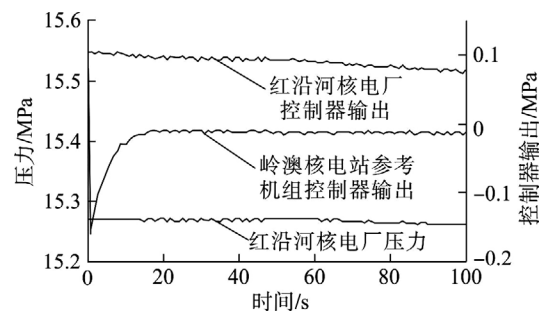


图 1 红沿河核电厂、岭澳核电站二期扰动试验结果对比
Fig. 1 Comparison of +0.5 MPa Test Results in Hongyanhe and Ling'ao Unit

区别为：宁德核电厂参数设置中偏差变化无速率限值，其正向饱和时比例输出为 0.50，而红沿河核电厂由于偏差输出速率限值为每 20 ms 变化 0.01，当正向饱和时，其比例为 0.44，导致其输出小于宁德核电厂组态 0.06，当宁德核电厂喷淋阀继续小幅度喷淋时，红沿河核电厂喷淋阈值已经降到喷淋开度之下，由于喷淋提前结束，压力下降速率变换，在积分作用下，导致再次喷淋，如图 2 所示。

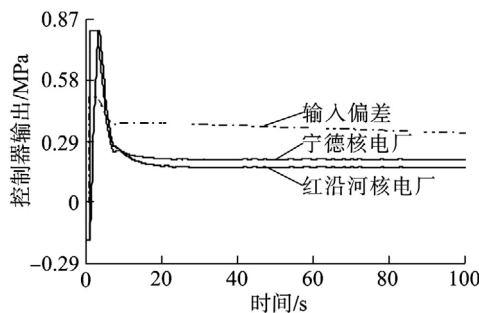


图 2 红沿河核电厂、宁德核电厂+0.5 MPa 扰动试验参数控制效果对比

Fig. 2 Effect Comparison of +0.5 MPa Test in Ningde and Hongyanhe Unit

为保证 -0.1 MPa 扰动试验的结果不受影响，将控制器的参数优化为微分时间 T_d 为 30，比例增益 K_d 为 1.5，试验结果合格。其原因为：通过降低微分衰减的速率，增加了喷淋的时间，使压力下降得足够低。但是无论参数是否修改，该结果与岭澳核电站二期的试验结果不同：岭澳核电站二期项目中压力下降速率慢，喷淋流量低，喷淋时间长，达到稳定状态时间短，如图 3 所示。

3.2.3 -0.5 MPa 扰动试验

采用与+0.5 MPa 扰动试验相同的参数， T_d 为 30， K_d 为 1.5，根据岭澳核电站二期及宁德核电厂的经验反馈，将通断加热器启动阈值回差修改为 0.14 MPa 加热器动作 2 次，试验结果不合格。分析认为，由于微分迅速衰减，通断加热器只动作 24 s。由于通断加热器加热时间短，加热效果低，导致加热器二次启动。

将参数设置为设计参数 ($T_d = 6.67, K_d = 1.67$)，结果通断加热器启动两次，第二次试验结果仍不满足验收准则的要求。分析认为，由于参数修改的方向为微分衰减更快，微分增益更大，导致通断加热器停止的时间更早，实际作用时间只有

10 s，加热器加热效果更低，导致加热器二次启动。

根据 2 次的试验情况，认为不合格的原因是微分衰减太快，所以应优化参数使衰减速率减小，适当降低微分增益。将 T_d 由 30 改为 40， K_d 由 1.5 改为 1，同时将通断加热器回差调整为 0.21。由于降低微分增益减小了其衰减率，同时提高了停止通断加热器的压力限值，通断加热器实际动作 46 s，压力回调非常快，超调低，效果优于参考机组，试验结果令人满意，如图 4 所示。

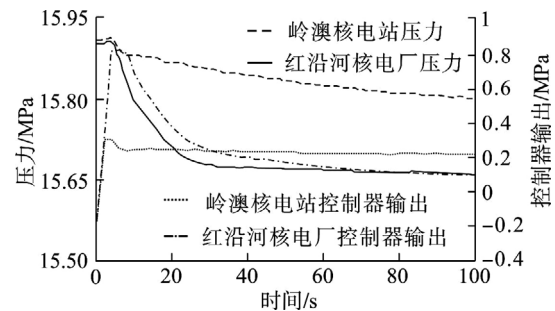


图 3 红沿河核电厂、岭澳核电站二期+0.5 MPa 扰动试验结果对比

Fig. 3 Comparison of +0.5 MPa Test Results in Hongyanhe and Ling'ao Unit

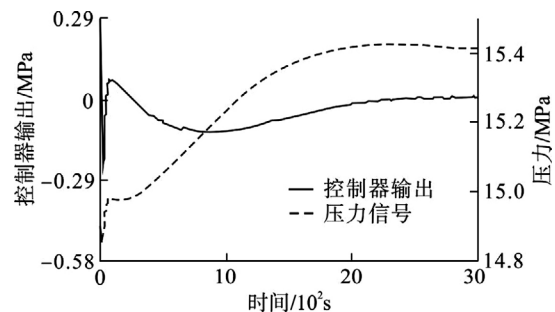


图 4 第 3 次 -0.5 MPa 扰动试验结果

Fig. 4 Test Results from the Third Test of -0.5 MPa

对于 EP 参数，当控制系统有定值模块时设置为 0，降低定值修改引发的设备误动风险；当无定值模块时设置为 1，减少输出保持在上限或下限的时间。对于 RT 参数，应当设置其为合适值，若使用默认值 20 s 或者大于 20 s，则无切换效果；若所设置值太小，则影响控制器的及时响应。对于控制器投自动瞬间的微分作用投入，应根据工艺系统情况进行设置。

4 结束语

通过对热态调试期间稳压器压力闭环控制回路扰动试验结果的分析，针对 -0.1、+0.5、-0.5 MPa

扰动试验过程中出现的不符合验收准则现象进行研究，通过调节 PID 微分参数、通断加热器回差等手段优化压力控制回路，最终保证试验结果满足验收准则的要求。通过扰动试验对稳压器压力控制系统的稳定性做出了评价分析。试验完成后，将红沿河核电厂 1 号机组试验结果与宁德核电厂、岭澳核电站二期试验结果相比较，为临界前试验和后续机组试验积累了经验。热态调试期间的稳

压器压力闭环控制回路扰动试验，对于后续临界前试验以及装料后至商运前的瞬态试验都有着十分重要的意义。

参考文献：

[1] 濮继龙. 大亚湾核电站运行教程[M]. 北京: 原子能出版社, 1999.

Analysis and Research of HONGYANHE 1# PZR Pressure's Closed-Loop Control Circuit Disturbance Test in HFT

Liu Daoguang, Liu Shuangjin, Luan Zhenhua, Qiu Shaoshuai, Feng Guangyu

Start-up Department of China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518124, China

Abstract: Analyze the regulator pressure control principle of the Hongyanhe unit 1. Analyze and study the disturbance test results of the PZR pressure closed-loop control loop in HFT, which include +0.1, -0.1, +0.5, -0.5 MPa variation. According to the phenomenon not conforming to the acceptance criteria, put forward the optimization scheme after careful analysis. Optimize the pressure control loop by adjusting the PID differential parameters and the retrace tolerance of ON/OFF heater to get satisfactory results. Compare the Hongyanhe 1# test result with the results of Ningde and Ling'ao to gain rich experience for HPT and the subsequent unit. The disturbance test on the regulator pressure closed-loop control loop is of great significance to HPT and the transient test from fuel loading to commercial operation.

Key words : HFT, PZR, Pressure control, PID optimize

作者简介：

刘道光（1984—），男，工程师。2010年毕业于华北电力大学系统工程专业，获硕士学位。现从事反应堆瞬态试验工作。

刘双金（1984—），男，工程师。2006年毕业于吉林大学计算机科学与技术专业，获得学士学位。现从事仪表控制工作。

栾振华（1983—），男，工程师。2008年毕业于浙江大学自动化专业，获硕士学位。现从事反应堆瞬态试验工作。

（责任编辑：杨洁蕾）