

EPR 一回路水压试验超压保护系统设计及应用

武江 潘国军 沈超 王燕 郭伟

中广核研究院有限公司

DOI:10.12238/pe.v3i2.12432

[摘要] 本文对EPR核电机组冷态功能试验过程中的超压保护逻辑组态及设计方案进行了深入探讨,并结合CPR1000机组一回路水压试验的实践经验,对超压保护装置的動作逻辑进行了优化改进。最终,确定了EPR首堆机组在役一回路水压试验的超压保护逻辑及动作方案。该方案在台山核电厂两台EPR机组首次十年大修期间成功应用,有效解决了EPR核电机组在役一回路水压试验中超压保护系统方案的设计难题,并为同类型机组在该试验中的超压保护方案提供了宝贵的设计思路。

[关键词] EPR; 一回路水压试验; 核电厂; 超压保护; 逻辑设计

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Design and Application of Overpressure Protection System for EPR Primary Circuit Hydrostatic Test

Jiang Wu Guojun Pan Chao Shen Yan Wang Wei Guo

China Nuclear Power Technology Research Institute Co.,Ltd.

[Abstract] This paper has conducted an in-depth investigation into the configuration and design of the overpressure protection logic during the cold functional test of the EPR (European Pressurized Reactor) nuclear power unit. By integrating the practical experience from the primary circuit hydraulic test of the CPR1000 unit, the action logic of the overpressure protection device has been optimized and improved. Ultimately, the overpressure protection logic and action plan for the in-service primary circuit hydraulic test of the EPR first-of-a-kind unit have been established. The successful application of this plan during the first ten-year major overhaul of the two units at Taishan Nuclear Power Plant effectively resolved the design challenges of the overpressure protection system for the in-service primary circuit hydraulic test of EPR nuclear power units and provided valuable design insights for similar units undergoing this test.

[Key words] EPR; Primary Circuit Hydraulic Test; Nuclear Power Plant; Overpressure Protection; Logic Design

引言

核电厂一回路水压试验旨在通过使一回路系统承受高于正常运行压力的适当水压试验压力,来验证从本次试验结束到下次试验期间,反应堆及一回路系统在正常运行和设计的各种事故工况下的安全性能符合核安全法规的要求。依据RSE-M2010的相关规定,首次装料完成后30个月内必须进行一回路水压试验,且每次试验的间隔不应超过10年。商运后的EPR核电机组需要进行首次在役期间的一回路水压试验,尽管在冷态功能试验期间已经进行过该试验,但在机组商运后首次进行一回路水压试验时,仍面临诸多重要的技术问题。例如,超压保护方案、水压试验泵切换方案、反应堆保护系统状态设置、超压保护预试验方案以及下行阶段一回路启停组控配置方案等,这些问题都亟待解决,其中许多方案在压水堆核电机组的一回路水压试验

中尚属首次应用。

1 EPR一回路水压试验简介

1.1 一回路水压试验要求

1.1.1 试验压力

根据RSE-M B2000中相关规定,一回路水压试验压力值应至少等于一回路设计压力的1.2倍或一回路设备的承压部分的设计压力中的最高压力^[1]。台山EPR机组RPV设计压力为175bar.g,因此一回路水压试验压力取210bar.g。在试验过程中,因为一回路主系统为单相水实体,升降压的压力梯度必须控制在4 bar/min以下。

1.1.2 试验温度

根据RSE-M2010规范要求,试验用水温度至少等于下列值中的最大值:

(1)第一次水压试验(役前检查, VCI)规定的温度;

(2)在根据由辐照引起的变化所修正的反应堆压力容器材料(筒体和焊缝)最大的RTNDT(金属韧脆转变温度)值上增加;

(a) 12℃(对于按设计压力的1.2倍的水压试验是12℃);

(b) 18℃(对于按设计压力的1.33倍的水压试验是18℃);

(3) 60℃(考虑设备结构安全所采用的最低温度);

因此一回路水压试验金属温度下限值为60℃, 这一温度与冷试期间金属温度下限保持一致; 同时为防止试验回路温度过高而造成检查人员烫伤, 规定金属温度上限为80℃, 因此一回路水压试验金属温度控制范围如下:

60℃<RPV(压力容器)下封头金属温度<80℃。

考虑到设备保温层隔热以及主泵停运时一回路约-1.5℃/h的自然散热率, 一回路水温应该低于100℃以限制蒸汽发生器传热管束过度变形; 结合CPR机组一回路水压试验的经验数据, 水温维持在91℃左右时, 可满足在整个试验期间金属温度不超出80℃且不低于60℃的要求; 因此EPR一回路水压试验的水温控制在91±2℃。

1.2 一回路水压试验验收准则

一回路水压试验是否合格取决于24.5bar.g、109bar.g(视需要)和154bar.g压力平台下三次泄漏率计算的结果以及在试验最高压力210bar.g(PPHT)平台对一回路水压试验边界的所有焊缝的目视检查结果, 用来评估构成水压试验回路的一回路焊缝和试验回路密封性是否满足试验要求。

2 EPR一回路水压试验超压保护分析

2.1 超压保护装置

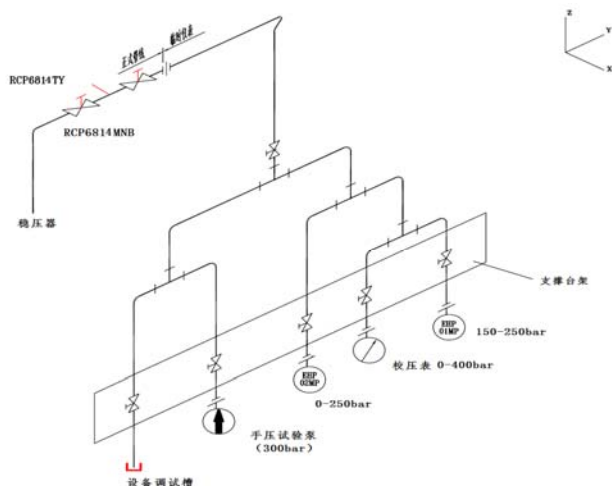


图1 EPR机组一回路水压试验台架示意图

一回路水压试验期间, 稳压器的安全阀因为设定值与水压试验压力不匹配, 如果改变设定值后将其作为试验安全阀, 在其动作时存在降压速率不可控制的问题, 所以须对安全阀进行有效隔离。在24.5bar.g平台之前, 按照设计要求使用机械闭锁钥匙进行状态设置以保证压力边界的完整性。在24.5bar.g及以下压力平台, RIS-RHR(余热排出系统)处于投运状态, 一回路的超

压保护将通过RIS-RHR系统的安全阀来实现, 动作定值55bar.g。在RIS-RHR系统隔离后, 其安全阀无法继续提供一回路超压保护, 在24.5bar.g至165bar.g之间, 一回路超压保护只能由水压试验压力保护装置提供, 水压试验保护装置如图1所示:

一回路水压试验台架从稳压器水位计RCP6814MN一次侧接入临时管道引出, 包含两块不同量程的压力变送器、一块标准压力表和一块校压表。由两块压力变送器测量压力信号送至DCS系统参与逻辑运算, 通过在DCS页面中对EHP0001CC、EHP0002CC和EHP0003CC状态设置, 来实现不同压力平台下保护功能的生效以及保护动作的切换。

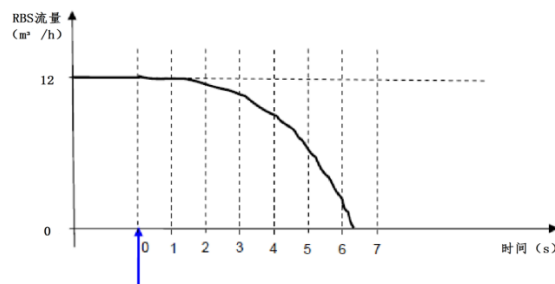
2.2 瞬态工况下的失压保护分析

当一回路水压试验处于水压试验泵注入阶段时, 最恶劣的工况是水压试验泵意外跳闸后且高压下泄阀门全开, 虽然已通过逻辑闭锁, 但仍存在人为的错误或设备意外动作导致高压下泄阀门被全开的可能。RBS水压试验泵正常设计流量为12m³/h, 若一回路压力达到水压试验额定压力平台, 单列高压下泄阀门全开状态下, 下泄流量最大可达到200m³/h, 在这种工况下, RBS水压试验泵运行与否对于缓解一回路压力下降所产生的影响微乎其微。经计算, 在233bar.g, RCV1314VP从正常位置全开/全关的压力梯度为-188bar/min和+10.4bar/min; 在160bar, 上充泵停运时下泄阀门开度21.5%, 压力梯度为-10.2bar/min; 最恶劣的情况在233bar.g, RBS泵停运, 下泄阀门全开时压力梯度可达到-198.4bar/min。

为应对这一瞬态工况, 通过设置机械挡块将高压下泄阀门RCV1314VP最大开度限制为30%, RCV1324VP固定在20%开度作为超压保护泄压通道。这一限制可将一回路压降速率控制在不超过10bar/min的可接受范围内; 同时允许压力缓慢降低至满足RBS/RCV泵切换的压力平台, 通过启动RCV上充泵来缓解一回路压力下降程度, 并调节高压下泄阀门尽快使压力保持稳定。

2.3 ANT/AST切换时的压力保护分析

在高压平台下RCV上充泵或RBS水压试验泵注入阶段, 突然失去电源将导致水压试验压力源丧失, 为防止一回路压力瞬降产生压力瞬变统计计数, 在发生失去ANT(厂用变压器)时迅速切至由AST(辅助变压器)供电, GPA系统延时1.2秒, COD装置延时0.5s, 根据500kV厂外电源失去的不同工况考虑0.3s到1.3s的裕度, 确保RBS水压试验泵在失电后尽可能短(约2~3s)的时间内重新启动。RBS泵启动与停运时间如图2所示:



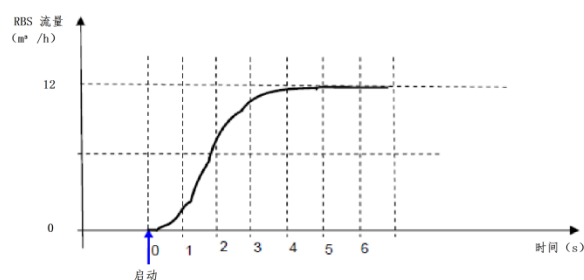


图2 EPR水压试验泵停运/启动至建立全流量所需时间对比

此外,根据设计要求,在发生失电时RBS泵在260bar.a压力下停运后流量降至零所需时间3s,在1bar.a压力下停运所需时间41s^[2],冷试时在235bar.a压力下停运所需时间6.5s,由此分析得出,RBS泵在一回路水压试验压力210bar.g以下停运时所需时间约11s,而RBS泵从启动到建立全流量12m³/h还需要约5s时间,如图3所示:

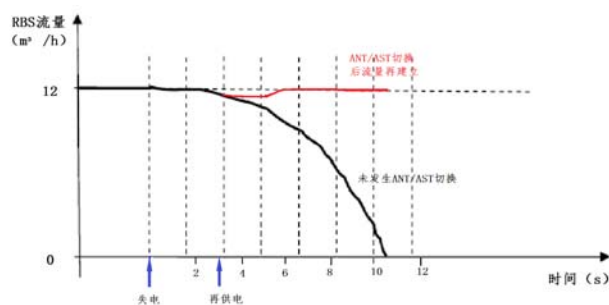


图3 EPR水压试验泵再供电后建立全流量所需时间

设计要求一回路压力下降速率不超过4bar/min,对应3秒内注入流量降至约8m³/h。RBS水压试验泵在失电后,经过最长时间3s后重新启动,注入流量下降至约10m³/h,压力下降速率未超出4bar/min,满足设计的压降要求。综上分析,可以确保通过RBS管道注入一回路的水不会发生断流,从而缓解由失电造成失去压力源对一回路压力的影响。

在发生失电时通过自动关闭RCV1314VP以缓解压降速率,确保压降速率最大不超过10bar/min。主要考虑以下三种工况^[3]:

(1)失去ANT且AST切换失败;

(2)在水压试验泵注入阶段,RBS4220P0发生未失电情况下的非预期跳闸;

(3)在上充泵注入阶段,RCV泵故障导致不可用。

3 超压保护方案设计

3.1 超压保护动作设计

经过分析冷试时压力保护系统的阈值设置及动作,结合冷试期间一回路水压试验超压保护系统相关的实践经验,最终确定EPR一回路水压试验最高压力平台(PPHT)超压保护系统的三级动作策略。

一级:压力达到PPHT+3bar时触发高压报警和就地声光报警;

二级:压力达到PPHT+5bar自动停运水压试验泵,若自动停运失败则须手动停运;

三级:HP1参与压力调节时,压力达到PPHT+7bar时自动开启电动阀RCV1325VP和RCV1511VP,HP2提前设置在20%开度以限制阀门开启后的一回路压力下降速率,防止降压速率超过4bar/min。

在165bar.g前原一级保护预报警基础上,增加一级主动泄压保护动作,即压力达到172bar.g时,触发主控及就地声响报警,压力达到175bar.g时,自动开启电动阀RCV1325VP和RCV1511VP,通过HP2(RCV高压减压站2)将一回路水排往RPE系统实现泄压。本次一回路水压试验期间,在24.5~210bar.g范围全程使用RCV1314VP手动控制升降压,RCV1324VP预先设置在20%开度并断开电源,仅作为超压保护的泄压通道使用。

3.2 超压保护逻辑设计

3.2.1 超压保护传感器逻辑设计

(1)EHP0001MP传感器逻辑设计。EHP0001MP传感器逻辑量程为150~250bar.g,设置3级阈值:

阈值1:213bar.g,产生高压报警EHP0001KA;

阈值2:215bar.g,水压试验泵自动跳闸;

阈值3:217bar.g,自动开启电动阀RCV1325VP和RCV1511VP,通过HP2(RCV高压减压站2)将一回路水排往RPE系统实现泄压,同时HP2预先设置在20%开度以限制阀门开启后的一回路压力下降速率。

(2)EHP0002MP传感器逻辑设计。EHP0002MP传感器逻辑量程为0~250bar.g,设置2级阈值:

阈值1:172bar.g,当EHP0002CC选在ON位置时,在PICS产生高压报警EHP0002KA;同时在地水压试验台架附近产生声光报警。

阈值2:175bar.g,自动开启电动阀RCV1325VP和RCV1511VP,通过HP2(被限制为20%开度)将一回路水排往RPE系统实现可控卸压。

3.2.2 超压保护系统组控逻辑设计

(1)EHP0001CC:①水压试验开始阶段,两列高压减压站同时投运时,EHP0001CC切换至ON位置,允许自动隔离高压下泄阀门RCV1314VP和RCV1324VP;②压力高于24.5bar.g平台且仅HP1高压减压站投运时,自动隔离高压下泄阀门RCV1314VP;

(2)EHP0002CC:①正常升压时允许手动闭锁压力高于172bar.g时在DCS中产生EHP0002KA和就地声光报警;②正常升压时允许手动闭锁压力高于175bar.g时自动开启电动阀RCV1325VP和RCV1511VP;

(3)EHP0003CC:①当处于OFF位置时,RBS泵启动前如果上充泵出口压力低于160barg(延时4s),自动隔离高压下泄阀门RCV1314VP;②RBS泵启动后,将EHP0003CC切换至ON位置,厂辅变切换失败或LJI母线电压低于0.8Un延时3s或RBS泵意外跳闸,自动隔离高压下泄阀门RCV1314VP,且将下泄隔离信号设置为100秒脉冲信号,在保护动作完成后,保留主控操纵员可手动干预的功能;

(4)EHP0004CC:EPR机组原设计仅RBS第4列执行一回路水压试验功能,为使RBS第1列在超压保护逻辑上满足作为备用水压试验泵的要求,新增EHP0004CC,当切换至ON位置时,超压保护逻辑作用于RBS4220P0;当发生RBS4220P0故障不可用且短时无法修复情况时,允许将EHP0004CC切换至OFF位置,将超压保护逻辑执行机构切换至RBS1220P0,从而在逻辑上保证RBS第1列具备作为备用水压试验泵的能力。

3.2.3超压保护逻辑的投运与退出

下表1展示了4个组控CC在一回路水压试验期间投入与退出的时机:

表1 超压保护组控在各压力平台的设置状态

CC 压力	0	24.5	154	165	$P_{RBS\ Limit}$	210
EHP0001CC	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF
EHP0002CC	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF
EHP0003CC	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	ON
EHP0004CC	ON	ON	ON	ON	ON	ON

4 超压保护系统逻辑验证

在一回路处于低低水位工况时,一回路水压试验相关逻辑组态下装,通过将RCV上充泵和RBS水压试验泵供电断路器置于试验位,模拟各级保护信号触发,验证水压试验各压力阶段超压保护功能及动作正常触发,试验结果表明各压力平台超压保护逻辑设定正确。同时,通过临时控制变更(TCA)强制模拟触发ANT切换至AST失败导致RBS泵卸载信号,试验结果表明ANT/AST切换时压力保护动作正常。

5 结论

本文结合EPR核电机组一回路水压试验超压保护的特点,从超压保护和失电保护两方面对试验过程中各压力平台下的保护功能设置进行了深入分析,结合冷试期间经验反馈及首次在役一回路水压试验的设备特性,对超压保护动作和逻辑进行改进优化并试验论证,最终确定EPR核电机组在役一回路水压试验的超压保护动作方案,成功解决了EPR核电机组首次在役一回路水压试验中超压保护系统方案的设计问题。通过台山EPR机组首次十年大修窗口,EPR机组一回路水压试验超压保护系统在两台机组上进行了成功实践。本文所述超压保护系统的设计及应用为EPR三代核电机组在役一回路水压试验开创了先河,并可以推广应用到其他同类型的压水堆核电机组一回路水压试验的压力保护设计中。为后续“华龙一号”核电机组的一回路水压试验积累了宝贵经验,并为其开展一回路水压试验提供压力保护相关问题的设计思路及参考方案。

[参考文献]

[1]压水堆核电厂核岛机械设备在役检查规范(RSE-M)[M].2010.

[2]余维铭.EPR机组一回路水压试验压力控制策略探讨[J].中国高新技术企业,2015,(35):73-75.

[3]柳文斌.数字化环境下大修一回路水压试验及其经验反馈[J].大亚湾核电,2012,(4):13-16.

作者简介:

武江(1992—),男,汉族,广东省深圳市人,本科,工程师,研究方向:反应堆控制室及人因工程设计。