

某核电机组寿期末防误稀释信号工况初步分析

周晓明 唐炼

台山核电合营有限公司

DOI:10.12238/pe.v2i4.8366

[摘要] 核电机组设置防误稀释信号在机组不同阶段带来的效果并不完全一样,针对寿期末本身一回路硼浓度比较低的情况,防误稀释信号设计有可能达不到最初的设计要求,并且给机组控制带来更大的难度。本文针对该情况从信号产生、基本事故假设叠加工况情形下的设备动作逻辑及顺序以及带来的影响等情况进行分析,通过对实际逻辑设置分析以及结合模拟验证的方式进行初步探讨,甄别其中可能存在的问题并提出相应的解决建议。

[关键词] 核电; 寿期末; 防误稀释

中图分类号: TM623 文献标识码: A

Preliminary analysis of misdilution signal at the end of life of a nuclear power unit

Xiaoming Zhou Lian Tang

Taishan Nuclear Power Joint Venture Co., LTD

[Abstract] The effect of anti-error dilution signal in nuclear power units in different stages of the unit is not exactly the same. For the low concentration of the primary boron at the end of the life, the design of anti-error dilution signal may not meet the initial design requirements, and bring greater difficulty to the control of the unit. In this paper to the situation from the signal, the basic accident assumption superposition condition of the equipment action logic and sequence and the influence of the analysis, through the analysis of the actual logic setting and combined with the way of simulation verification preliminary discussion, identify the possible problems and put forward the corresponding solutions.

[Key words] nuclear power; the end of life; prevent misdilution

引言

部分核电机组在ADP保护设计有控制棒位置控制和监测系统限制和反应堆保护系统保护两种信号,目的是当一回路硼浓度过低时启动相应的保护动作。但核电机组在寿期末硼浓度较低时,反应堆保护系统/控制棒位置控制和监测系统保护中迭代计算硼浓度为偏低。而此时标准停堆工况下的防误稀释保护阈值远高于机组实际迭代计算硼浓度。在寿期末简单停堆工况下,必然会同时触发防误稀释保护(以下简称ADP)信号,为事故工况处理带来一定的难度。

1 ADP信号简介

ADP保护设置了反应堆保护系统ADP保护,控制棒位置控制和监测系统ADP限制以及多样化ADP信号^[1]。由于本文只讨论机组简单停堆工况叠加ADP信号触发,故对于其它几种工况信号不再介绍。

反应堆保护系统中的ADP保护信号的硼浓度是经过迭代的计算方法得出的,控制棒位置控制和监测系统标准停堆工况下的一回路硼浓度也是采用反应堆保护系统的迭代计算值。

迭代计算原理如下:假设一回路上一采样周期(25ms)的硼浓度为 $BC(n-1)$,当前硼浓度为 $BC(n)$,一回路总质量为 M ,上充流量为 Q_{inj} ,上充管线上的硼浓度为 $Binj$,则根据总硼守恒,得出以下公式:

$$BC(n) = \frac{Q_{inj} \times \Delta T (Binj - BC(n-1))}{M} + BC(n-1)$$

迭代计算的数值可以在反应堆保护系统中查看。

ADP保护定值(LBCP)与燃耗相关,随着燃耗的加深而降低,进行30满功率日周期物理试验时会进行定值调整;ADP保护限制和控制棒位置控制和监测系统ADP阈值也与燃耗相关,燃耗越深,定值越低,同时也随着冷段宽量程温度而变化,温度越低,定值越高^[2]。

控制棒位置控制和监测系统ADP信号,触发的动作相同,均为:

(1) 闭锁稀释: 停止并隔离反应堆硼水补给系统除盐水注入列。

(2)最大流量硼化:启动反应堆硼水补给系统大流量硼化。

在标准停堆工况下,ADP的主要动作有:

- 化学与容积控制系统切至反应堆换料水箱取水
- 关闭化学与容积控制系统正常取水阀门
- 化学与容积控制系统高压下泄管线隔离
- 启动应急硼化系统以及相关燃料厂房通风
- 隔离蒸汽发生器给水

2 事故走向分析

在寿期末简单停堆工况下,除一般的停堆动作之外,ADP信号触发时将会产生如下可能影响机组状态的动作:

(1)化学与容积控制系统切至反应堆换料水箱取水。该动作将阻断反应堆硼水补给系统硼化注入,同时隔离上充管线。此时下泄处于最小流量控制模式,此时高压减压站通过脉冲或持续动作的方式将稳压器液位控制在整定值一定范围以内。同时,因为上充管线已隔离,下泄管线温度会上升,该情况同样也会限制下泄流量,使其低于最小下泄流量。

(2)大流量硼化启动。由于化学与容积控制系统已切至反应堆换料水箱取水,大流量硼化实际并不会注入到一回路。容控箱会在很短的时间内灌满。

(3)进入事故规程后,机组停堆的工况下需要将一回路硼化到热/冷停堆硼浓度。由于上充已隔离,因而只能依靠应急硼化系统注入硼酸。在稳压器水位调节受限制的情况下,一回路水位将不受控上涨,最终可能导致一回路满水并超压。同时,由于下泄流量限制的原因,在此种工况下,优选高压减压站会频繁动作以调整稳压器液位。

鉴于上述分析,本文重点解决三个方面的问题:

(1)控制机组尽量避免状态进一步恶化(一回路满水,超压后导致安全阀动作)。

(2)避免机组不必要的后撤。

(3)控制一回路硼浓度,避免一回路硼化不足或过度硼化。

3 两种简单停堆工况机组走向分析及控制策略

机组中简单停堆大致可分为以下两种情况:

(1)因蒸汽发生器液位高、反应堆保护系统停堆信号误触发等原因导致跳堆(以下简称正常简单停堆)。该情况下仅触发正常停堆动作:停堆断路器断开、控制棒掉落、汽机跳闸等等。机组状态参数均能保持稳定在正常运行范围内。

(2)极端情况下(比如厂辅切换)的简单停堆(以下简称厂辅切换简单停堆)。此时四列柴油机启动,四台主泵跳闸,二回路丧失正常给水。此时需利用一些专项安全设施,比如应急给水系统/蒸汽大气排放系统等维持机组状态。为了保证机组强迫循环,还需在辅变供电的情况下重新启动一台主泵。

上述两种工况在事故过程中走向有区别,叠加ADP信号后产生的影响也不一样。下面就这两种情况逐一分析并探讨具体控制策略。

3.1 正常简单停堆叠加ADP信号触发工况分析

正常简单停堆工况,事故处理的方法是尽快隔离一切稀释

源并硼化至安全的硼浓度^[3]。如上文分析,在此期间由于下泄并未隔离(处于最小流量控制模式),因而稳压器水位呈锯齿状稳定在整定液位附近。因化学与容积控制系统已切至反应堆换料水箱取水,一回路硼浓度逐渐上涨。

在一回路硼化的过程中,由于稳压器液位正常,会同时启动两台应急硼化系统泵。当两台应急硼化系统泵启动后,由于其注入流量高于一回路下泄排出流量,一回路水位会上涨。当稳压器液位过高时,系统判断一回路满水,两台上充泵自动跳闸,下泄有可能会自动隔离。此工况下,下泄能力受限的主要原因是上充已被隔离。故而在不作任何干预的情况下,稳压器液位将逐渐上涨并最终可能将一回路灌满超压。

由于化学与容积控制系统切至反应堆换料水箱取水,反应堆换料水箱水位持续下降。若反应堆换料水箱水位过低,则怀疑化学与容积控制系统可能存在泄漏,为保证反应堆换料水箱水量要求隔离上充下泄。

综上所述,在正常简单停堆工况下叠加ADP信号触发时,可能会存在以下几个问题:

(1)由于化学与容积控制系统切至反应堆换料水箱取水,上充隔离,下泄流量受限制。事故初期稳压器水位可以维持在整定值附近,但在启动两台应急硼化系统泵后,稳压器液位将快速上升,有一回路灌满超压的风险。

(2)注入时间过长将导致反应堆换料水箱液位降低,有可能要求手动隔离化学与容积控制系统下泄,给一回路水位/压力控制增加了难度。

(3)若需停止硼酸注入,或将化学与容积控制系统切回至容控箱取水,则需保证一回路硼浓度已高于ADP阈值或事故分析中要求对应的硼浓度。

下面就上述三个问题作简单定量分析后,得出结论如下:

(1)应急硼化系统启动后,保守估计从应急硼化系统启动到一回路灌满所需时间约2.3h。

(2)反应堆换料水箱实际可供注入时间为7.5h。

(3)若仅靠反应堆换料水箱取水,拟合计算一回路硼浓度抬升到ADP阈值以上所需时间约为2.95h。

应急硼化系统启动后将一回路硼化到热停堆所需时间约为0.97h。

上述分析可见,简单停堆叠加ADP信号触发的情况下:

(1)事故后7h之内需将化学与容积控制系统切回至容控箱取水,否则会因反应堆换料水箱水位过低而要求隔离高压下泄,应急硼化系统启动期间一回路水位将快速上升,超压风险增大。需要注意的是在事故程序中并没有直接导向将化学与容积控制系统切回至容控箱取水,需SS/STA在机组状态稳定后再做决策。

(2)当一回路硼浓度高于热停堆硼浓度后(应急硼化系统启动后约1h),尽快将应急硼化系统停运,避免一回路液位过度上涨导致超压(BOR中一回路硼浓度满足要求后导向STAB,在STAB程序中停运两列应急硼化系统泵)。

3.2 厂辅切换简单停堆同时叠加ADP信号触发工况分析

对于机组反应性控制,厂辅切换后将有以下两方面影响^[2]:

①触发控制棒位置控制和监测系统的ADP信号,需一回路硼化到一定硼浓度以上或启动三台主泵该信号才会消失;②因为主泵停运工况下反应堆保护系统ADP信号有一定延时,故而事故开始先触发标准停堆工况反应堆保护系统ADP信号动作,该情况下化学与容积控制系统切至反应堆换料水箱(同上述工况)。待延时之后,虽然反应堆硼水补给系统大流量硼化已被隔离,但反应堆换料水箱硼浓度高于主泵全停工况反应堆保护系统ADP阈值,故而反应堆保护系统ADP信号可能会直接消失。

当ADP信号触发后,化学与容积控制系统切至反应堆换料水箱取水,反应堆硼水补给系统大流量硼化无法注入一回路。同时由于反应堆换料水箱硼浓度偏低,不可能依靠反应堆换料水箱将一回路硼浓度提高到要求值。必须等到应急硼化系统启动后,向一回路注入足够的浓硼酸。当一回路硼浓度满足要求后,再停运两列应急硼化系统泵。需注意的是,此时一回路热停硼浓度低于控制棒位置控制和监测系统ADP阈值,而若依靠应急硼化系统将一回路硼化到要求阈值以上,则其运行时间较长,一回路有被灌满的风险。

由于化学与容积控制系统高压下泄并未隔离,因而此种情况稳压器液位同样是在整定值附近波动。重新启动主泵后,仍然进入硼化过程,其控制与正常简单停堆类似,此处不再赘述。

综上所述,在厂辅切换简单停堆工况其额外的问题主要有以下几点:

(1)由于主泵全部停运并只能恢复一台运行,故而控制棒位置控制和监测系统的ADP信号持续处于触发状态,需将一回路硼化到一定阈值以上才能够消失。而若仅靠应急硼化系统硼化一回路,一回路灌满超压风险较高;

(2)反应堆保护系统ADP信号并非一直存在,并不需要隔离所有稀释源;

(3)大流量硼化信号持续存在,在化学与容积控制系统从反应堆换料水箱切回至容控箱时需考虑设备异常动作。

针对上述问题,初步分析如下:

(1)仍采用上一节预定场景初态,应急硼化系统启动后,一回路硼浓度上涨。

应急硼化系统启动后将一回路硼化约需3.4h。根据上文推算,应急硼化系统启动后约2.3h即可将一回路灌满,故而不能依靠此种方法硼化一回路至控制棒位置控制和监测系统ADP信号消失。

(2)根据规程指引隔离所有稀释源。

(3)虽然大流量硼化信号存在,但由于容控箱中硼浓度较高,因而不会触发反应堆保护系统主泵停运工况下的ADP信号。

上述分析可见,在厂辅切换简单停堆工况下:

(1)反应堆保护系统ADP信号先触发标准停堆工况ADP信号,随后触发主泵全停工况ADP信号,当化学与容积控制系统硼浓度高于阈值后即消失,后续不再触发;

(2)控制棒位置控制和监测系统ADP信号持续触发,但仅靠应急硼化系统无法将一回路硼化到要求浓度(一回路有灌满超压风险)。因此需在一回路硼浓度高于热停硼浓度时,适时决策将化学与容积控制系统由反应堆换料水箱切回至容控箱取水,利用反应堆硼水补给系统大流量硼化继续提高一回路硼浓度,同时利用上充下泄维持稳压器液位。

4 结论及建议

(1)寿期末简单停堆叠加ADP信号触发的情况下,一回路液位能够维持在整定值附近,下泄阀门开关式控制,有可能会因为动作过于频繁而损坏,需加强监视;

(2)应急硼化系统启动后当一回路硼浓度满足热停硼浓度要求时,应尽快停运应急硼化系统泵,否则一回路有灌满并超压的风险;

(3)7h内将化学与容积控制系统切至容控箱取水,否则反应堆换料水箱液位过低将要求隔离高压下泄。

5 结语

本文通过对某机组ADP信号分析及叠加基本简单停堆或厂辅切换时系统设备动作影响,给出寿期末ADP启动后的干预建议。该分析思路及结果也为其它相同类型核电机组提供一定的借鉴意义。

[参考文献]

[1]陈良.CPR1000ADP保护逻辑实现上的改进[J].核动力工程,2013,34(S2):90-92.

[2]乐可佳.CPR1000核电站反应堆保护及控制系统的设计改进[J].仪器仪表用户,2016,23(03):8-10+7.

[3]谭正,林志亮.方家山核电机组ADP分析[J].科技视界,2018(08):124-126.

作者简介:

周晓明(1984--),男,汉族,江苏省盐城市人,大学本科,中广核集团台山核电合营有限公司,研究方向:工程师,核电运行。