

文章编号 : 0258-0926(2016)05-0051-04; doi: 10.13832/j.jnpe.2016.05.0051

# CANDU 堆区域超功率保护工况重分组设计

王文聪<sup>1</sup>, 叶国栋<sup>1</sup>, 牟小川<sup>1</sup>, 盛建新<sup>1</sup>,  
郑永祥<sup>1</sup>, Doddy Kastanya<sup>2</sup>

1. 中核核电运行管理有限公司, 浙江海盐, 314300, 2. 坎杜能源公司, 加拿大, L5K 1B1

**摘要**: CANDU 堆区域超功率保护 (ROP) 系统用于缓慢失去反应性控制事故下防止燃料包壳出现烧干。机组老化会导致 ROP 运行裕量下降。为应对秦山第 3 核电厂 CANDU 堆 ROP 裕量不足的问题, 通过对 ROP 工况分组原则、电站运行文件和运行策略、反应性控制机构设置、现有相关报警等的审查, 确定出 4 项重分组规则; 设计安装监测轴向平均区域功率偏差的报警, 将共计 270 个工况从 ROP 正常手柄位置对应的工况组移出。ROP 工况重分组方案在秦山第 3 核电厂实施后, ROP 运行裕量将恢复 3%~5%, 可显著提升机组运行的经济性和安全性。

**关键词**: CANDU; 区域超功率保护 (ROP); 工况; 重分组

**中图分类号**: TL363 **文献标志码**: A

## Design of CANDU Regional Overpower Protection Fluxshapes Reclassification Scheme

Wang Wencong<sup>1</sup>, Ye Guodong<sup>1</sup>, Mou Xiaochuan<sup>1</sup>, Sheng Jianxin<sup>1</sup>,  
Zheng Yongxiang<sup>1</sup>, Doddy Kastanya<sup>2</sup>

1. CNNP Nuclear Power Operations Management Co. Ltd, Haiyan, Zhejiang, 314300, China  
2. Candu Energy Inc., Ontario, L5K 1B1, Canada

**Abstract**: The Regional Overpower Protection (ROP) system is designed to prevent the dryout in any fuel channel of CANDU reactors during a slow loss of regulation (LOR) event. Reactor aging will lead to the reduction of ROP margin. To resolve the deficiency of ROP margin in Third Qinshan Nuclear Power Plant (TQNPP), four reclassification rules are determined based on review of original ROP fluxshapes classification principle, operational documentation and policy of TQNPP, reactivity device configuration and existing DCC alarms. ZDROPP alarm for monitoring axially averaged zone deviation is also developed and installed. Totally 270 fluxshapes are removed outside of ROP normal position HSP#1. The implementation of ROP reclassification scheme in TQNPP indicates nearly 3% to 5% ROP margin can be restored and additionally the economy and safety of reactor will be improved.

**Key words**: CANDU, Regional Overpower Protection(ROP), Fluxshapes, Reclassification

### 0 引言

秦山第 3 核电厂 CANDU 堆设计有区域超功率保护 (ROP) 系统<sup>[1]</sup>, 由 58 个水平和垂直分布在堆内的自给能铂探测器组成, 用于缓慢失去反应性控制 (SLOR) 事故下, 向 2 个停堆系统提供保护信号, 在燃料包壳开始出现间歇性烧干

(OID) 前触发停堆。

CANDU 堆运行期间, 可能因反应性控制机构正常或异常的动作、液体区域控制水位的变化、氙负荷的改变、换料等扰动而导致堆芯出现大量不同的功率分布。这里将每种功率分布称为一个工况。为确保 ROP 系统对机组运行中所有可能的

工况都提供超功率保护,设计时考虑了上千个工况,并针对每个工况分别计算了停堆整定值。这些工况被分成3组<sup>[2]</sup>。每组的停堆整定值由组内停堆整定值最小的工况(受限工况)决定。电站主控室装有3个ROP整定值选择开关,即3个手柄位置HSP#1、HSP#2、HSP#3分别与之对应。机组正常运行期间ROP整定值选择手柄置于HSP#1,只有当特定工况出现时,由主控运行人员依据操作规程切换至HSP#2或HSP#3。

国内外CANDU堆运行经验表明,长期高功率运行使机组老化的因素有:中子辐照后压力管径向蠕变;冷却剂回路热传输支管内壁及孔板结垢;蒸汽发生器传热管一次侧结垢,将会导致ROP停堆整定值下降,进而带来ROP运行裕量的降低,当机组运行一定年限后将因ROP裕量不足而被迫降功率运行。

因此,需要将ROP工况重分组项目,将HSP#1下停堆整定值较低的工况移出,从而提升机组正常运行期间的ROP运行裕量。为此设计了一套ROP工况重分组方案。

## 1 ROP工况分组原则

审查原始的ROP工况分组情况发现,与单泵运行相关的工况均放在HSP#3对应的工况下。HSP#2对应的工况则是功率分布较为异常且停堆整定值较低的工况,这些工况一旦出现,主控运行人员借助现场报警等手段能轻易识别,或者是这些工况本身出现的概率非常低。在确定了HSP#3和HSP#2的工况后,余下的工况则为HSP#1对应的工况,包括机组正常运行包络范围内的工况以及由反应性控制机构异常动作引起但没有明显指示或报警信号的工况。

从上述审查结论出发,为保证ROP系统应有的设计安全功能,在设计ROP工况重分组方案时遵循以下原则:应提供清晰的信息以保证主控运行人员能够识别出需要由HSP#2或HSP#3提供保护的ROP工况并能及时做出响应;将停堆整定值较低、机组正常运行期间出现频率很低的工况放在HSP#2或HSP#3提供的保护下。

## 2 ROP工况重分组方案

### 2.1 ROP工况重分组规则

在审查秦山第3核电厂运行规程<sup>[3]</sup>、堆芯反应

性控制机构设置、是否有可用于监测特定运行工况的报警等基础上,确定了4项ROP工况重分组规则:从HSP#1工况组移出基于当前设计不可能出现的工况;借助现有报警,将调节棒移动顺序异常的工况移出HSP#1工况组;调整电站运行策略,禁止机组短停堆后(停堆时间小于40 min)在HSP#1位置启动;增加新的报警,在电站数字控制计算机(DCC)上安装监测轴向平均区域功率偏差的ZDROP报警。

### 2.2 用于ROP的区域功率偏差( $Z_{\text{DROP}}$ )报警

CANDU堆功率控制方式为目标区域功率控制。如前所述,机组运行期间,可能因反应性控制机构正常或异常动作、液体区域控制水位变化、氙负荷改变等扰动而导致堆芯出现各种不同的功率分布;这些功率分布与额定功率分布之间均存在或大或小的区域功率偏差。

分析发现,当逐步提高HSP#1的停堆整定值时,对于轴向平均区域功率偏差(中心轴向区域对4-11除外)较大的工况,ROP系统的设计安全功能将无法保证。也就是说,SLOR事故下燃料包壳出现OID前两个停堆系统触发的概率将低于98%。这样一来,一旦设法将此类工况移到HSP#2下,就能获得较高的HSP#1停堆整定值。因此,在DCC上设计安装了ZDROP报警,用于监测堆芯任意一对轴向平均区域功率(中心轴向区域对4-11除外)偏离额定功率的程度。一旦 $Z_{\text{DROP}}$ 值大于报警限值,将向主控运行人员提供清晰的报警信号。

ZDROP报警参数的计算过程如下。

(1) 计算区域功率相对偏差( $D_i$ )。

$$D_i = \frac{1}{P_r} \left\{ \frac{P_i}{P_{i-\text{nom}}} - P_r \right\}_{i=1..14} \quad (1)$$

式中, $P_i$ 为实时测量的区域*i*的功率,MW; $P_{i-\text{nom}}$ 为区域*i*的额定功率,MW; $P_r$ 为反应堆相对功率(FFP)。

(2) 计算 $Z_{\text{DROP}}$ 值( $E_{\text{ZDR}}$ )

$$E_{\text{ZDR}} = \text{MAX}_{i=1,2,3,5,6,7} \left\{ \frac{D_i + D_{i+7}}{2} \right\} \quad (2)$$

借鉴CANDU堆的通用做法,DCC上安装的ZDROP报警的触发条件设为“ $E_{\text{ZDR}} 12\%$ ”。一旦触发该报警,要求主控运行人员将ROP停堆整定值手柄置于HSP#2。

利用式 (1) 和式 (2) 可以计算出所有ROP 工况的  $E_{ZDR}$  值, 用于确定哪些工况被分到HSP#2 的保护下。保守起见, 考虑ROP分析中功率计算 3%的不确定性后, 在ROP工况重分组时将  $E_{ZDR}$  值大于等于15%的工况放到HSP#2下。

### 2.3 ROP工况重分组效果评估

基于2.1节确定的重分组规则, 可以得到新的ROP工况分组方案。考虑到秦山第三核电厂正在开展等效天然铀 (NUE) 项目, 选择NUE项目中的ROP分析结果作为本项目的设计输入, 主要包括: 基于两群扩散理论计算的756个ROP工况;

天然铀 (NU) 堆芯和NUE堆芯下ROP停堆整定值计算结果<sup>[4]</sup>。

表1给出了重分组后被移出HSP#1的所有ROP工况的统计<sup>[5]</sup>。可以看到, 共计270个工况被移出HSP#1。针对每项规则变更的工况如下:

(1) 基于当前电站设计, 当慢化剂液位低于第一排燃料 (7550 mm) 时, 慢化剂低液位报警将触发反应堆阶跃降功率至2%满功率 (FP)。因此, ROP中所有模拟慢化剂液位低于第一排燃料的工况将不可能再出现。另外, 依据电站调节棒的控制逻辑, 利用单根调节棒而不是以棒组的形

式来启动反应堆的工况也不会出现。ROP中与之相对应的工况分别为34个和12个。

(2) 根据现有DCC报警设计, 一旦调节棒动作过程中出现移动顺序异常的情况, 会触发RRS-332报警。主控运行人员借助该报警可以轻易识别出与之对应的2个ROP工况。

(3) 所有机组短停堆后 (停堆时间小于40 min) 再启动的工况将被移出HSP#1, 其中包括短停堆再启动叠加单根调节棒卡棒的33个工况, 以及与钴调节棒辐照更换相关的66个工况, 共计151个。

(4) 所有ZDROP值大于等于15%的工况, 共71个。

表2针对NU堆芯和NUE堆芯, 分别给出了HSP#1的受限工况和ROP运行裕量的提升效果。可以看到, NU堆芯和NUE堆芯下, ROP运行裕量分别可以提升4.6%和2.8%。因ROP运行裕量与机组的出力息息相关, ROP运行裕量的提升将显著降低机组运行期间的降功率损失, 经济效益非常可观。

基于不同堆芯寿期下的ROP停堆整定值计算结果, ROP裕量提升值可能会有所不同, 但与

表1 重分组后被移出HSP#1的工况统计  
Table 1 Flux Shapes Removed outside of HSP#1

工况类别	被移出 HSP#1 的工况				
	规则 1	规则 2	规则 3	规则 4	总计
机械吸收棒插入	0	0	0	4	4
短停堆时机组启动	0	0	52	0	52
调节棒补偿运行	0	0	0	3	3
3根调节棒抽出	0	0	0	1	1
区域控制失效	0	0	0	5	5
停堆棒插入	0	0	0	1	1
停堆棒插入时机组启动	0	0	0	11	11
单根调节棒卡在堆外	0	2	33	4	39
机械吸收棒卡在堆内	0	0	0	12	12
慢化剂低液位	34	0	0	2	36
氙倾斜	0	0	0	5	5
机械吸收棒卡在堆内的瞬态	0	0	0	6	6
缓慢降功率时机械吸收棒卡棒	0	0	0	2	2
同轴两液体区域控制单元排空	0	0	0	3	3
补偿运行叠加轴向区域排空	0	0	0	2	2
利用单根调节棒的机组启动	12	0	0	0	12
机械吸收棒插入时机组启动	0	0	0	10	10
辐照后的钴调节棒堆芯	0	0	33	0	33
辐照后钴棒更换为新钴棒的堆芯	0	0	33	0	33
总计	46	2	151	71	270

表 2 所列数据基本相当。考虑安全分析中采用的 ROP 系统 HSP#1 停堆整定值, 表 2 所列 ROP 裕量提升幅度在现阶段可能并不能完全释放, 但随着机组进一步老化, 上述 ROP 裕量提升效益将得以实现。

表2 NU和NUE堆芯下ROP运行裕量的提升效果

Table 2 ROP Margin Gain for NU and NUE Core

堆芯	NU 堆芯	NUE 堆芯
重分组前 限制工况	#752 (机械吸收棒卡在堆内的瞬态)	#753(机械吸收棒卡在堆内的瞬态)
重分组后 限制工况	#567 (20号调节棒卡在堆外)	#222(调节棒和机械吸收棒置于堆外)
ROP 运行 裕量提升	4.6%	2.8%

注: 数字为 ROP 工况的顺序编号

#### 2.4 受影响运行文件的修改

因 ROP 工况重分组方案涉及电站运行策略调整和报警的响应, 为配合 ROP 工况重分组方案的实施, 完成电站受影响运行文件的审查和修改。

首先, 对于电站运行中不可能出现的工况, 将其移出 HSP#1 将不会影响现有运行文件。

其次, 利用现有和新增报警来识别的 ROP 工况, 一旦报警触发, 主控运行人员原则上并不需要清楚报警触发时的具体堆芯状态 (对应的工况), 只需在规定时间内将 ROP 停堆整定值手柄置于 HSP#2 即可。因此在 DCC 报警响应规程中增加了这类响应行动<sup>[6]</sup>。

最后, 对于短停堆再启动时 ROP 停堆整定值的手柄位置, 则是在电站综合运行规程中加以明确。虽然前文提到“禁止机组短停堆后在 HSP#1 位置启动”, 此时 ROP 停堆整定值手柄的位置仍有 2 种选择: HSP#2 或 HSP#3。考虑到现场应用时

并不改变 HSP#1、HSP#2、HSP#3 的停堆整定值, 而是通过修正通道功率峰因子的方式等比例降低堆内铂探测器实际信号, 如果此时将 ROP 停堆整定值手柄置于 HSP#2, 极个别情况下可能会降低 HSP#2 的停堆有效性。鉴于此, 规定今后碰到此类工况时将 ROP 停堆整定值手柄置于 HSP#3。

### 3 结束语

作为应对秦山第三核电厂 CANDU 堆机组老化的一项措施, ROP 工况重分组方案的设计与实施能有效缓解机组运行期间 ROP 裕量不足的问题, 在带来可观经济效益的同时, 亦能降低机组功率波动的频率和运行风险、ROP 裕量低引起的误停堆风险以及现场人员工作负荷和人因失误风险, 显著提升机组运行的安全性。此外, 本文提出的技术方案具有一定的推广应用价值。

参考文献:

- [1] Design Manual: 98-68200-DM-001 Revision 2, Shutdown System No. 1 Part 1 General Requirements and Overview, Rev.2[Z]. 2001.
- [2] Analysis Report :ROPT Setpoint and CCP Analysis, Rev. 0, 98-03500-AR-035[Z]. 2006.
- [3] Operating Manual : Reactor Physics, 98-37000-OM-001, Rev.2[Z]. 2003.
- [4] Analysis Report: NUE Full Core Implementation Regional Overpower Protection (ROP)", 98NUE- 03500-AR-001, Rev. 1[Z]. 2013.
- [5] Assessment Report : Assessment of Regional Overpower Protection (ROP) Handswitch Position Classification, 98-03500-ASD-003, Rev. 0[Z]. 2015.
- [6] Operating Manual : Overall Unit Control Part 1 of 3 Reactor Regulating System, 98-63710-OM-001, Rev.7 [Z]. 2002.

(责任编辑: 张祚豪)