

Implementation of Regrouping Alarm Program for the ROP System of CANDU6 Full Scope Simulator

Mingliang Xie^{1*}, Zhengquan Xie¹, Jin Li¹, Bin Zeng¹, Haiping Hu², Xujie Yang², Weitong Li³, Mingrui Li³

¹China Nuclear Power Operation Technology Corporation Ltd., Wuhan Hubei

²Qinshan Nuclear Power Corporation Ltd., Jiaxing Zhejiang

³Department of Nuclear Energy Science and Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan Hubei
Email: xiemi@cnp.com.cn

Received: Oct. 2nd, 2019; accepted: Oct. 14th, 2019; published: Oct. 21st, 2019

Abstract

Based on the condition reform of ROP demand of Heavy Water Reactor (CANDU6) unit, according to the requirements of changes and the way of changes on CANDU6, considering to full scope simulator of CANDU6, and corresponding function of ZDR alarm program design implementation and combined with the particularity of ZDR program, and make changes to the simulator accordingly adjusted, and validated from multiple aspects and analysis on program after the change, the results show that: 1) The figure of panel switch is consistent with the CANDU6 unit, and the logic of ZDR program triggered normally, failure of educational control desk of ZDR program charged with functional response. 2) The relevant functional responses on DCCX and DCCY are normal; the ZDR program runs normally and can correctly alarm and reset. At the same time, the program alarm information is correct and no other abnormal alarm occurs. The correctness of the alarm program ZDR is verified, which provides a reference for the simulator implementation unit of CANDU6 change, and provider basis maintenance and use for full scope simulator of CANDU6.

Keywords

CANDU6, Full Scope Simulator, DCC, ZDR Program

CANDU6全范围模拟机ROP系统重分组报警程序设计实现

谢明亮^{1*}, 谢政权¹, 李进¹, 曾彬¹, 胡海平², 杨绪杰², 李伟通³, 李明芮³

*第一作者。

¹中核武汉核电运行技术股份有限公司, 湖北 武汉

²秦山核电有限公司运行培训处, 浙江 嘉兴

³海军工程大学, 核科学与技术学院, 湖北 武汉

Email: xiemi@cnp.com.cn

收稿日期: 2019年10月2日; 录用日期: 2019年10月14日; 发布日期: 2019年10月21日

摘要

基于CANDU6机组ROP工况重分组改造需求, 根据目前机组变更的要求和变更方式, 针对CANDU6全范围模拟机, 设计实现报警程序ZDR相应功能, 并结合机组程序ZDR程序的特殊性, 对模拟机做相应的变更调整, 并对变更后程序从多个方面进行验证及分析, 结果表明: 1) 盘台图开关及标识与实际机组保持一致, ZDR程序指示灯逻辑正常触发, ZDR程序失效教控功能正常响应。2) DCCX和DCCY上的相关功能响应正常; ZDR程序运行正常并能够正确报警和复归, 同时程序报警信息正确, 无其它异常报警出现。验证了报警程序ZDR实现的正确性, 为CANDU6机组变更在模拟机实现更新及验证过程提供参考, 为CANDU6全范围模拟机维护、使用提供依据。

关键词

CANDU6, 全范围模拟机, DCC, ZDR程序

Copyright © 2019 by author(s) 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. 前言

CANDU6 型重水反应堆, 在功能上主要由电站系统、控制中心(包括主控室和副控室)、数控计算机(DCC)以及电站显示系统(PDS)等部分组成[1]。CANDU6 全范围模拟机由加拿大 CAE 公司研制, 在出厂时只模拟了主控室、核电厂系统、DCCX 以及 PDS 计算机等系统的功能。为了提高模拟机逼真度, 扩展模拟机培训范围, 在全范围模拟机后期的升级改造过程中, 扩充了副控区的功能。同时将实物 DCC 虚拟化, 并增加 DCCY 功能的模拟, 最终采用虚拟 DCCX 和虚拟 DCCY 来代替单台实物 DCCX 计算机。由于 CANDU6 机组 ROP 工况重分组改造需求, 根据机组变更的要求和变更方式, 针对 CANDU6 全范围模拟机, 结合机组 ZDR 程序特性实现报警程序 ZDR 相应功能设计及应用。图 1 给出模拟机结构框架。

2. CANDU6 电厂系统特性

CANDU6 堆型核电厂核岛部分由反应堆本体、慢化剂系统、热传输系统、辅助系统及燃料操作系统等组成。高压的重水冷却剂经主热传输系统的主泵送入反应堆燃料通道带走裂变产生的热量, 并将热量传输给蒸汽发生器二次侧的二回路冷却剂[2]。蒸汽发生器中轻水冷却剂吸收一次侧重水携带的热量, 从而产生饱和蒸汽以驱动汽轮机发电机组, 再通过变压器升压送到枢纽变电站进入电网[3]。一次重水冷却剂和二次轻水冷却剂互相独立, 只在蒸汽发生器中存在传热边界, 其原理示意如图 2 所示。

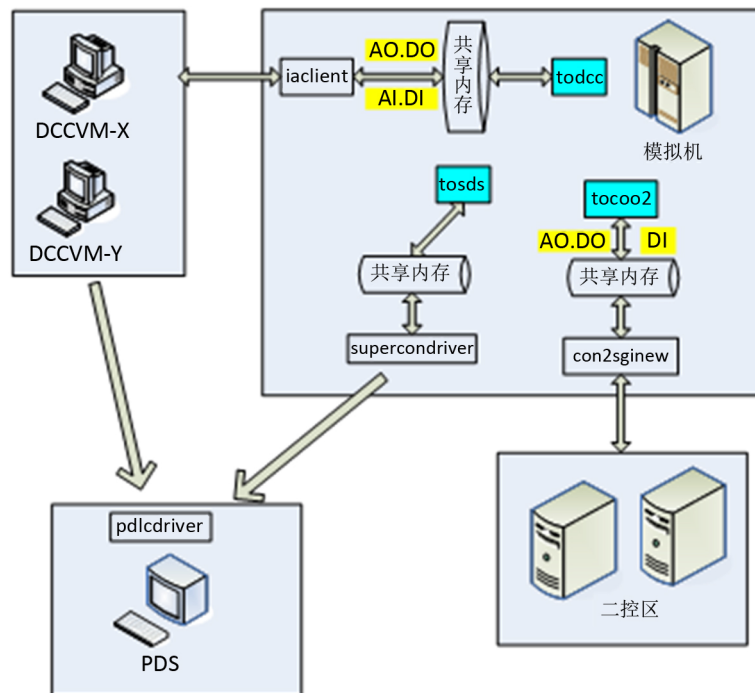


Figure 1. Simulator structure frame
图 1. 模拟机结构框架

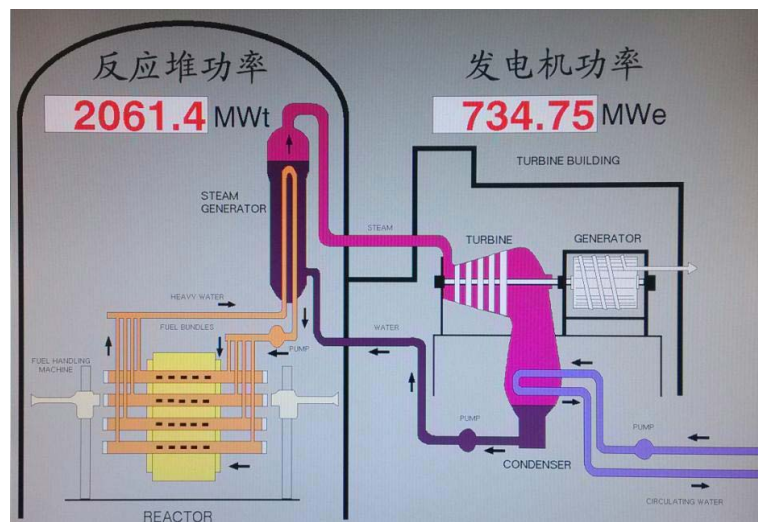


Figure 2. Schematic diagram of CANDU6 pressurized heavy water reactor
图 2. CANDU6 加压重水堆示意图

CANDU6 反应堆为一卧式结构，由燃料棒束、压力管组件、端部组件、排管、排管容器及端部屏蔽、反应性控制设备以及排管容器间等组成[4]。排管容器为一圆桶体，两端连接端部屏蔽。排管容器中布置了 380 根排管，每根排管内同心布置了一根压力管[5]。压力管两端和布置在端部屏蔽的端部组件相连接，构成燃料通道。每个燃料通道依次装有 12 个串接的燃料棒束，380 根装有燃料棒束的燃料通道以正方形的栅格排列成一横置的圆柱体结构，构成反应堆堆芯[6]。高压的冷却剂重水在压力管内流动，带走燃料组件产生的裂变能量[7]。低压的重水慢化剂盛装在由排管容器和排管所组成的筒体内，重水用于慢化裂变中产生的快中子[8]。

3. 数控计算机(DCC)系统

CANDU6 电厂采用集中式计算机控制系统，DCC 系统的主要具备以下功能：

- 1) 机组功率控制：通过对电厂各工艺系统的控制，将机组功率维持在设定值；
- 2) 报警指示：通过文本信息或声响的方法，对电厂系统或设备的异常情况进行报警；
- 3) 数据显示：在 CRT 彩色显示屏幕上，以图形、棒状图或趋势图等形象表达的形式，显示系统或工艺过程的状态；
- 4) 数据采集：实时采集电厂系统或设备的运行数据，供操纵人员查看或查询。

电厂 DCC 系统由两台数控计算机 DCCX 和 DCCY 实现电厂的主要控制功能，包括：慢化剂温度控制、反应堆功率调节、主系统压力和装量控制、蒸发器压力控制、蒸发器水位控制以及汽轮机功率控制。正常运行时电厂由 DCCX 进行控制，当 DCCX 出现异常时，部分或全部控制功能可以转移到 DCCY。CANDU6 电厂主控室的 DCC 人机界面如下图 3 所示。



Figure 3. DCC man-machine interface
图 3. DCC 人机界面

DCC 将电站系统中采集到的模拟信号和数字信号作为输入(AI 和 DI)，经过计算后输出模拟信号和数字信号(AO 和 DO)来实现对电厂系统的控制，或输出 CI 信号到主控室来实现报警功能。此外，DCC 也可以接收来自自主控室小键盘的输入信号，这为操纵员对电站系统的控制和监视提供了一个有效手段。CANDU6 全范围模拟机分别采用硬件或软件的方式，实现对电厂功能的模拟[9]。

全范围模拟机出厂时，采用 stimulation 方式，即用和电厂 DCC 一样的硬件和软件进行模拟。全范围模拟机改造后，采用 emulation 方式，用虚拟 DCC 软件来模拟电厂 DCC 的硬件功能，但采用和电厂 DCC 一样的在线操作系统和控制程序[10] [11]。

4. 两停堆系统 ROP 工况重分组报警程序仿真实现

完整的 DCC 虚拟机软件系统主要由如下几个程序组成：虚拟机核心程序 dccvm；人机界面模拟程序 hmisim；虚拟机网关程序 dccgw；IO 数据模拟程序 iosim。

对于虚拟机核心程序 dccvm，用于实现对 DCC 系统的完整模拟，主要包括对指令集的模拟和主要外

部设备的模拟两大部分, 该程序是整个虚拟机系统的核心, 所有实际现场 DCC 的程序均加载到 dccvm 上运行, 对于人机界面模拟程序 hmisim, 该程序用于实现 DCC 系统中的人机界面, 主要包括 CRT 显示模拟和 DCC 键盘模拟两大部分。对于虚拟机网关程序 dccgw, 该程序为 DCC 虚拟机核心程序 dccvm 与外部 IO 接口模拟程序(包括 IO 数据模拟程序 iosim 和 Desktop 模拟机程序)之间的通信网关, 该程序通过网络通信(socket)方式与外部 IO 模拟程序进行通信, 并通过共享内存将数据传送到 dccvm 中。对于 IO 数据模拟程序 iosim; 该程序实现对 IO 数据(包括模拟量、开关量、触点扫描等)的模拟, 并将 IO 数据值通过虚拟机网关程序 dccgw 程序传送到虚拟机核心程序 dccvm 中, 从而为 dccvm 提供正确的 IO 数据。同时 iosim 程序还包括对 IO 数据手动修改等功能。iosim 程序主要用于在没有 Desktop 模拟机系统的情况下对整个虚拟机系统进行联合运行和调试。图 4 给出整个系统的组成结构图。

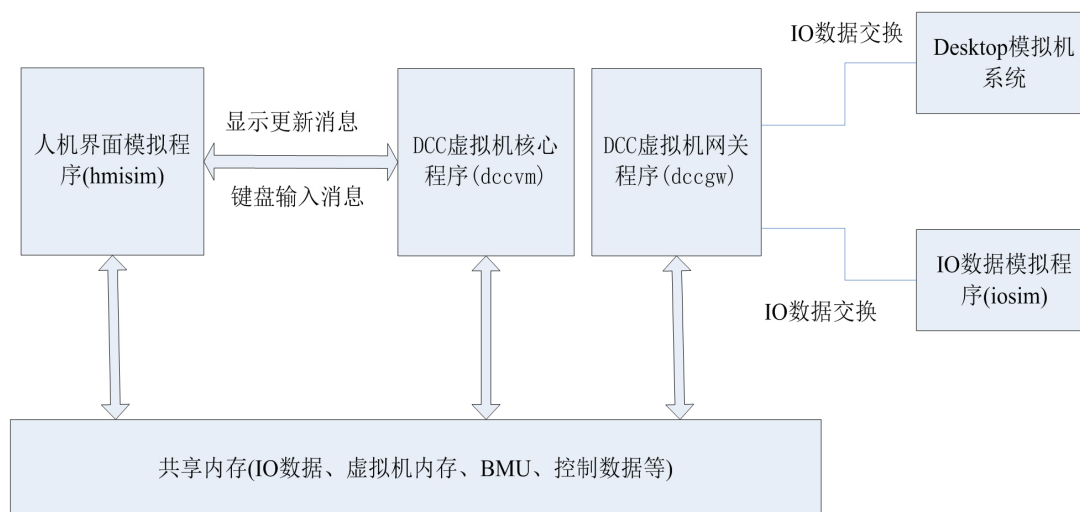


Figure 4. Composition of the DCC system
图 4. DCC 系统的组成结构图

DCC 的程序均加载在 dccvm 上运行, 实物 DCC 虚拟化后, 采用虚拟 DCCX 和虚拟 DCCY 来代替单台实物 DCCX 计算机, 再机组上做出的机组变更, 需要相应地在虚拟 DCCX 和虚拟 DCCY 上实现, 对于机组上的 ROP 工况重分组报警程序变更, 在原 ROP 设计中, 各工况都分配到 ROP 整定值, 并给各个工况提供保护。ROP 重分组是在 ROP 原设计基础上, 按照合适的规则对原来提供保护的部分工况进行调整, 进而提高保护功能。

第一, ROP 工况重分组规则如下: 规则一: 排除电站现场不可能出现的工况; 规则二: 借助在现场安装并应用轴向区域功率偏差(ZDAA)报警, 将保护的部分工况进行转移; 规则三: 在电站运行文件中规定“禁止短停堆后启堆”; 规则四: 借助现有报警 RRS 332, 转移调节棒移动顺序异常的工况。

第二, ZDAA 报警为满足 ROP 工况重分组规则二的要求, 需要在电站控制计算机上增加 ZDAA 报警。ZDAA 报警是通过在电站控制计算机上加装软件来实现的。该软件计算出 ZDAA 报警参数 ZDROP 的值, 并与设定的参数报警值进行比较。当堆芯实际 ZDROP 大于等于 12%时会出发报警信号, 运行人员根据报警响应规程设置 ROP 整定值。

第三, 现场文件修改为配合重分组规则的应用, 需要对受规则影响的部分电站规程文件进行修改。

按照以上的规则, 结合模拟机跟踪实施仿真需求, 需要做如下变更修改:

1) 在虚拟 DCCX 和 DCCY 中增加 ZDR 报警程序以及相关的其它程序, ZDR 报警程序可以采用电厂的 DCC COR 文件, 但模拟机 DCC 程序与电厂机组实际 DCC 运行文件, 不能直接导入模拟机使用, 需

要根据相应地址偏移及功能实现检查修改，确认修改后方可导入运行的 DCC 程序使用。

2) 在模拟机硬件盘台 PL7B 中增加 ZDR 程序的硬件开关及标识，该标识需要参考机组采用已有的冗余开关，模拟机上可采用相同位置的开关。参考机组 ZDR 程序手柄位置及标签，并在模拟机虚拟盘台图中增加 ZDR 程序手柄功能及标识，如图 5 所示。

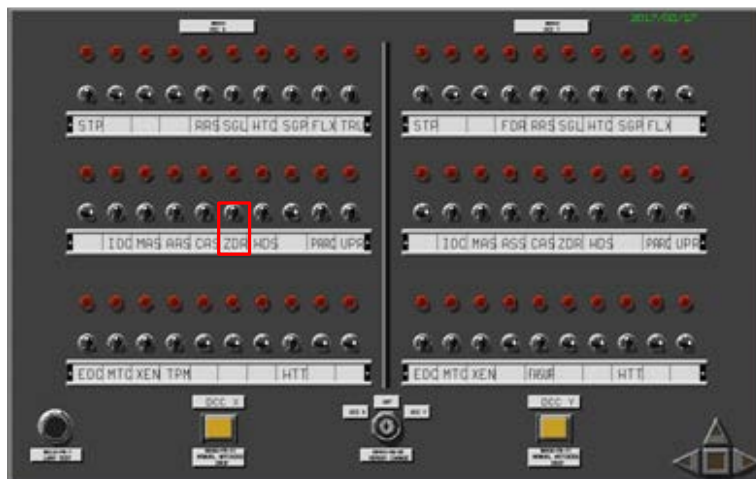


Figure 5 Simulator virtual disk platform PL7B
图 5. 模拟机虚拟盘台 PL7B

3) 在模拟机模型软件中，增加 ZDR 程序指示灯运行逻辑、以及 ZDR 程序失效等相关故障功能。ZDR 程序指示灯闪烁的频率表征程序调度运行的频率，如果指示灯保持亮状态表征模拟机已经冻结或者程序已经 fail，在控制台增加 ZDR 程序失效逻辑，可以供培训教员超控程序运行状态，如图 6 所示。

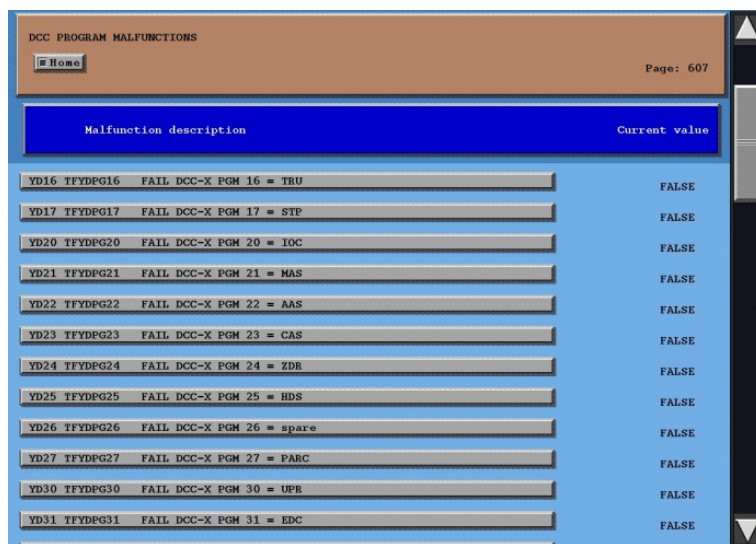


Figure 6. ZDR teaching and control super control interface
图 6. ZDR 教控超控界面

4) 增加 ZDR 报警程序后，由于模拟机堆芯功率分布不平衡等原因导致 ZDR 报警异常出现，需根据机组堆芯参数，将模拟机堆芯功率初值按照机组堆芯功率调试，以保证正常运行工况，如稳态 100% FP 功率下，无异常报警及相关程序失效等情况，如图 7 所示。



Figure 7. The main interface of the teaching console
图 7. 教控制台主界面

5. 报警程序 ZDR 验证及分析

基于 ROP 工况重分组, 对报警程序 ZDR 实现进行验证分析, 对在模拟机硬件盘台 PL7B 中增加 ZDR 程序的硬件开关及标识, 增加 ZDR 程序指示灯逻辑、以及 ZDR 程序失效等相关教控功能, 确认盘台图开关及标识与实际机组保持一致, ZDR 程序指示灯逻辑正常触发, ZDR 程序失效教控功能正常响应。

对于虚拟 DCCX 和 DCCY 中增加 ZDR 报警程序, 并实现全范围模拟机需求功能, 按照以下三个基本准则进行测试: 1) ZDR 程序运行正常, 不出现异常报警; 2) ZDR 程序报警信息正确; 3) ZDR 程序正确报警和复归。

测试先决条件, 需在反应堆功率大于 15%, DCCX 和 DCCY 可用时执行 DCCX 和 DCCY 上相关逻辑的检查。复位满功率状态 IC, 监测报警 CRT, 如图 8 所示。

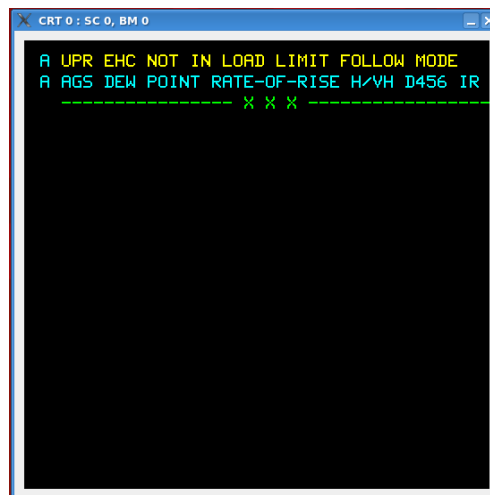


Figure 8. CRT alarm display
图 8. CRT 报警显示

首先确认 DCC 报警在 DCCX 侧, 确认 DCCX 和 DCCY 侧的 RRS 和 ZDR 程序开关打开。安装 DCCX 侧的 ZDR 程序的 MAPNEW 补丁, (Change Bulk: Bank 0, Sector 177000, Offset 43 from 0 to 125252)使发出报警。查询 DCCX 侧的报警, 确认报警 CRT 和 PDS 上显示以下信息:

```
A ZDR NOT ALL MODULES EXECUTED
A ZDR ROP FLUX DEVIATION, ZN1-8 HI
A ZDR ROP FLUX DEVIATION, ZN3-10 HI
A ZDR ROP FLUX DEVIATION, ZN5-12 HI
A ZDR ROP FLUX DEVIATION, ZN7-14 HI
A ZDR ROP FLUX DEVIATION, ZN2-9 VH
A ZDR ROP FLUX DEVIATION, ZN6-13 VH
```

并确认 DCCX 侧的打印机上出现以下信息:

```
A xxxxxx ZDR 001 NOT ALL MODULES EXECUTED
A xxxxxx ZDR 003 ROP FLUX DEVIATION, ZN1-8 D706 HI
A xxxxxx ZDR 005 ROP FLUX DEVIATION, ZN3-10 D710 HI
A xxxxxx ZDR 007 ROP FLUX DEVIATION, ZN5-12 D712 HI
A xxxxxx ZDR 011 ROP FLUX DEVIATION, ZN7-14 D714 HI
A xxxxxx ZDR 013 ROP FLUX DEVIATION, ZN2-9 D707 VH
A xxxxxx ZDR 017 ROP FLUX DEVIATION, ZN6-13 D713 VH
```

查询报警 CRT 如图 9 所示。

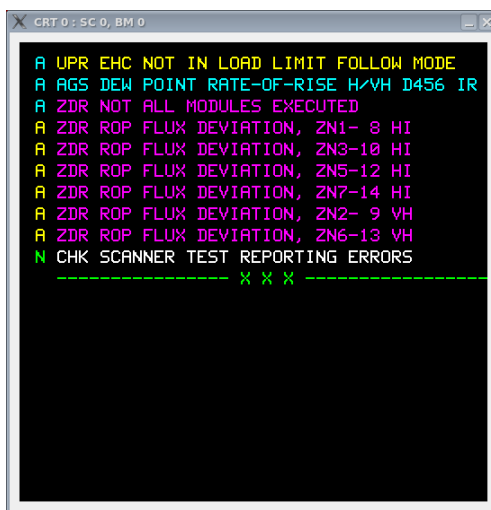


Figure 9. CRT alarm display (ZDR trigger)
图 9. CRT 报警显示(ZDR 触发)

恢复 DCCX 侧的 ZDR 程序的 MAPNEW 补丁, 确认之前的报警恢复正常。
(Change Bulk: Bank 0, Sector 177000, Offset 43 to 0)。

确认 DCCX 侧打印机出现以下报警:

```
N xxxxxx ZDR 001 NOT ALL MODULES EXECUTED
N xxxxxx ZDR 003 ROP FLUX DEVIATION, ZN1-8 D706 HI
N xxxxxx ZDR 005 ROP FLUX DEVIATION, ZN3-10 D710 HI
```


N xxxxxx ZDR 007 ROP FLUX DEVIATION, ZN5-12 D712 HI
 N xxxxxx ZDR 011 ROP FLUX DEVIATION, ZN7-14 D714 HI
 N xxxxxx ZDR 013 ROP FLUX DEVIATION, ZN2-9 D707 VH
 N xxxxxx ZDR 017 ROP FLUX DEVIATION, ZN6-13 D713 VH
 查询报警 CRT 如图 10 所示。

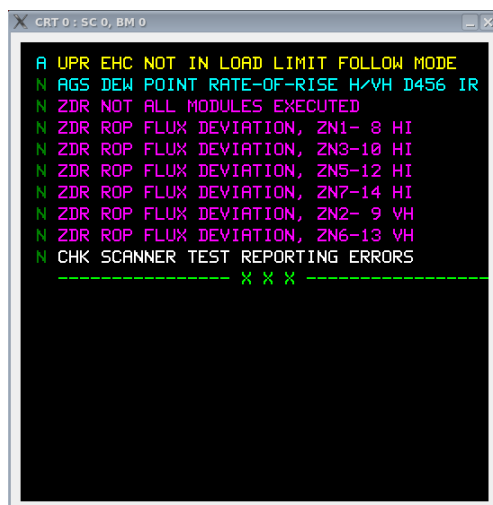


Figure 10. CRT alarm display (ZDR recovery)
 图 10. CRT 报警显示(ZDR 恢复)

类似操作，将报警开关从 DCCX 侧切换到 DCCY，查询 DCCY 侧的报警。可以确认报警 CRT 和 PDS 上显示以下信息：

```
XA ZDR NOT ALL MODULES EXECUTED
XA ZDR ROP FLUX DEVIATION, ZN1-8 HI
XA ZDR ROP FLUX DEVIATION, ZN3-10 HI
XA ZDR ROP FLUX DEVIATION, ZN5-12 HI
XA ZDR ROP FLUX DEVIATION, ZN7-14 HI
XA ZDR ROP FLUX DEVIATION, ZN2-9 VH
XA ZDR ROP FLUX DEVIATION, ZN6-13 VH;
```

确认 DCCY 侧的打印机上没有出现 ZDR 报警。安装 DCCY 侧的 ZDR 程序的 MAPNEW 补丁，使发出报警。并确认报警 CRT 和 PDS 上显示以下信息：

```
A ZDR NOT ALL MODULES EXECUTED
A ZDR ROP FLUX DEVIATION, ZN1-8 HI
A ZDR ROP FLUX DEVIATION, ZN3-10 HI
A ZDR ROP FLUX DEVIATION, ZN5-12 HI
A ZDR ROP FLUX DEVIATION, ZN7-14 HI
A ZDR ROP FLUX DEVIATION, ZN2-9 VH
A ZDR ROP FLUX DEVIATION, ZN6-13 VH
```

确认 DCCY 侧的打印机上出现以下信息：

```
A xxxxxx ZDR 001 NOT ALL MODULES EXECUTED
```

A xxxxxx ZDR 003 ROP FLUX DEVIATION, ZN1-8 D706 HI
A xxxxxx ZDR 005 ROP FLUX DEVIATION, ZN3-10 D710 HI
A xxxxxx ZDR 007 ROP FLUX DEVIATION, ZN5-12 D712 HI
A xxxxxx ZDR 011 ROP FLUX DEVIATION, ZN7-14 D714 HI
A xxxxxx ZDR 013 ROP FLUX DEVIATION, ZN2-9 D707 VH
A xxxxxx ZDR 017 ROP FLUX DEVIATION, ZN6-13 D713 VH

经过测试可以看出：DCCX 和 DCCY 上的相关功能响应正常；ZDR 程序运行正常；ZDR 程序报警信息正确；ZDR 程序正确报警和复归。

6. 结论

基于 CANDU6 机组 ROP 工况重分组需求，根据机组变更的要求和变更方式，针对 CANDU6 全范围模拟机模拟以及虚拟化 DCC，设计实现报警程序 ZDR 相应功能，并结合机组程序 ZDR 程序的特殊性，对模拟机做相应的变更调整，并对变更后的报警程序从程序开关功能响应，ZDR 程序报警信息、置位及复位等多个方面进行验证及分析，结果表明：1) 经过模拟机盘台图修改，盘台图开关及标识与实际机组保持一致，参考机组采用已有的冗余开关 ZDR 程序指示灯，模拟机硬件盘台 PL7B 中增加 ZDR 程序的硬件开关及标识，同时使得 ZDR 程序逻辑正常触发，ZDR 程序失效教控功能正常响应。2) 对于虚拟 DCCX 和 DCCY 中增加 ZDR 报警程序，DCCX 和 DCCY 上的相关功能响应正常；ZDR 程序运行正常并能够正确报警和复归，同时程序报警信息正确，无其它异常报警出现。验证了报警程序 ZDR 设计实现的正确性，为 CANDU6 机组项变更在模拟机实现过程做参考，为 CANDU6 全范围模拟机维护使用提供依据。

参考文献

- [1] 熊伟华. 秦山 CANDU 堆功率测量校正和控制改进[J]. 科学技术与工程, 2017, 37(1): 48-53.
- [2] 袁满. 重水堆核电机组反应堆功率分析及优化[J]. 仪器仪表用户, 2018, 25(12): 100-103.
- [3] 张法邦. 核反应堆运行物理[M]. 北京: 原子能出版社, 2000: 20-28.
- [4] 臧希年. 核电厂系统及设备[M]. 第二版. 北京: 清华大学出版社, 2010: 32-42.
- [5] 谢明亮, 于雷, 陈玉清. AP1000 核反应堆控制棒价值特性的 MC 模拟[J]. 兵器装备工程学报, 2016, 37(3): 121-125.
- [6] 谢明亮, 陈玉清, 于雷, 等. IFBA/WABA 可燃毒物元件的燃耗特性分析[J]. 核科学与工程, 2016, 36(3): 404-410.
- [7] Xie, M.-L., Xie, F., Shan, F.-C., *et al.* (2018) Sensitivity Analysis of Relap5 Simulation on AP1000 Nuclear Power Plant. *Journal of Donghua University*, **35**, 104-110.
- [8] 徐珍. CANDU6 慢化剂系统丧失冷却情况下的温度分析[J]. 2012, 1(1): 26-29.
- [9] 莫银良, 黄蓝. 秦山三核全范围模拟机虚拟 DCC 的虚拟实现和改进[J]. 中国核工业, 2015, 3(3): 203-208.
- [10] Dupleac, D., Mladin, M. and Prisecaru, I. (2009) Generic CANDU 6 Plant Severe Accident Analysis Employing SCAPSIM/RELAP5 Code. *Nuclear Engineering and Design*, **239**, 2093-2103. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2009.05.007>
- [11] Yoon, C., Rhee, B.W. and Min, B.-J. (2017) Development and Validation of the 3-D Computational Fluid Dynamics Model for CANDU-6 Moderator Temperature Predictions. *Nuclear Technology*, **148**, 259-267. <https://doi.org/10.13182/NT04-A3565>