

研究堆外电网断电试验

王明珊, 夏明, 张旻, 刘闯, 沈蜀龙, 陈玉山, 康黄刚

中国工程物理研究院核物理与化学研究所, 四川绵阳 621900

摘要 研究堆在电气系统的设计中, 针对全厂断电设计基准事故采取了相应的处理措施。研究堆在额定功率运行期间进行了外电网断电试验, 用以验证研究堆应急电力和备用电力系统的功能。结果表明在发生外电网断电的设计基准事故时, 应急电力和备用电力系统所具有的电气控制和供电功能, 可以满足应急停堆、厂房隔离、堆芯冷却、余热排出、剂量监测、控制保护、事故通风的动力要求。

关键词 研究堆; 不间断电源; 备用电源

中图分类号 TL361

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.20.010

Experiments on External Power Grid Failure of Research Reactor

WANG Mingshan, XIA Ming, ZHANG Yang, LIU Chuang, SHEN Shulong, CHEN Yushan, KANG Huanggang

Institute of Nuclear Physics & Chemistry, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan Province, China

Abstract The special process is adopted for the design basis accident of the plant power failure in the design of a research reactor. The external power grid failure test is carried out in the course of the research reactor rated power operation in order to verify the emergency and standby power supply systems. The results of the experiments show that the electrical control and the power can satisfy the requirements of the emergency shutdown, the building isolation, the core cooling, the residual removal, the dose monitoring, the control and protection and the emergency ventilation.

Keywords research reactor; uninterruptible power; standby power supply

0 引言

研究堆电力系统的设计原则是保证正常工况下全厂供电、保证预计运行事件和事故工况期间及事故工况以后, 向安全系统和其他指定的安全重要设施供电, 以保证它们能够可靠地执行其安全功能。研究堆电力系统中的应急电力和备用电力系统在电网断电时, 以其设计所具有的功能性能可靠有序地向控制保护系统、重要安全设施等提供电源, 维持反应堆停闭和后续的状态监测及应对措施, 对于确认研究堆是否安全有关。因此, 常受到设计^[1-3]、营运单位和安全监管部门的密切关注。外电网断电事故状态下, 电力安全和核安全的联系在进行理论分析的同时^[3-4], 也必须通过试验验证^[5-6]。本文进行了研究堆额定功率运行状态下外网断电试验, 同时得出了断电事故瞬态理论分析结果^[7], 为系统运行积累初始数据和经验。

1 研究堆电力系统

研究堆电力系统结构如图 1 所示, 系统由 6 个层次构成: (1) 10kV 配电站, 向厂区设施供电; (2) 10kV 配电系统, 向一、二回路主泵和 1000kVA 变压器供电; (3) 400V 动力配电, 实现 N1E 级动力设备、不间断电源、备用电力系统配电, 外电网断电时可以接入备用柴油发电机组, 实现备用电力供电; (4) 动力控制中心, 完成 N1E 级电气控制; 备用母线完成允许间断供电的电气控制; (5) 1E 级 MCC 母线, 正常时由厂外优先电源供电, 失去时由备用电力供电, 向应急电力系统提供交流电源; (6) 应急电源输出, 交流 220V 3 个独立通道, 向冗余的保护通道及仪表、报警、过程计算机等供电。交流 380V 2 个独立通道, 向冗余的一次水辅助泵及专设安全设施供电。

应急电源系统由直流和不间断电源(简称 UPS)组成。直流 3 个通道, 每通道由蓄电池组+充电器+直流配电屏组成;

收稿日期: 2012-05-26; 修回日期: 2012-06-21

作者简介: 王明珊, 副研究员, 研究方向为反应堆控制, 电子邮箱: wangmingshan001@yahoo.com

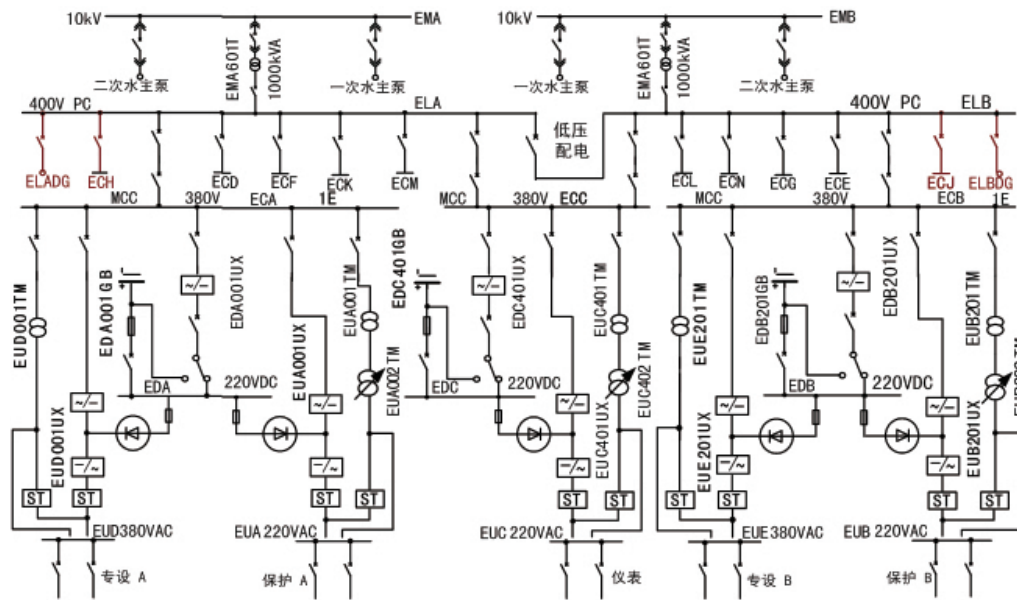


图1 研究堆电力系统单线图

Fig. 1 Single line diagram of research reactor electrical power system

UPS单元由主机+旁路构成,接入交流380V和直流220V电源,正常时由交流1E级MCC380V母线经UPS整流逆变后供电,失去交流380V电源时由直流220V电源供电逆变后输出(切换时间约5ms)。

应急电力系统供给不允许停电的重要负荷,控制保护系统、热工仪表、一回路辅助泵、1E级电动阀和电机、剂量监测、事故照明、事故通风系统等,在外电网断电时与保护系统有确保快速停堆的逻辑连锁。外电网断电-失去交流10kV供电,将造成正常运行的一、二回路主循环泵停车(由惰转渐进到停车),顺序给出主泵断电信号和流量低于85%的事故信号,通过保护系统发出紧急停堆信号-触发停堆断路器释放,所有控制棒在小于1s时间内,快速动作,实现紧急停堆,其他的工艺系统、仪器设备同时做出反应,确保研究堆安全。

备用电力由两套250kW柴油发电机组构成,可分别连接到ELA/B动力配电母线上。供给可间断供电的负荷,电气厂房通风系统、二回路辅助泵、厂内外通信系统等,确保事故发生后工作有效。

2 试验目的和方法

2.1 目的

试验验证研究堆外电网断电时,应急电力系统和备用电力系统能否适时投入保证安全重要设备电力供给(负荷能力和电气控制有效(与保护系统、信号报警系统的逻辑连锁);研究堆的控制保护系统是否准确发出事故停堆信号,控制棒自动快速下落实现紧急停堆;一回路余热排出系统运行状况、停堆辅助手段(可应对特殊事故)的重水泄放阀门工作

是否正常;辐射监测、事故通风系统是否正常;研究堆停电事故瞬态热工参数能否可接受;启动柴油发电机联网后充电器向蓄电池组充电、电气厂房通风系统及场内外通信系统可正常运行保障应对事故工况的各种工作有效。

2.2 方法

试验分为3个阶段。

(1) 做好研究堆运行前的准备工作。应急电力系统蓄电池组,UPS的整流器、逆变器、旁路单元正常,备用电力系统经过例行运行检查;完成了控制保护系统、过程测量系统、电气控制系统、工艺回路、剂量监测系统的例行检查;进入外电网断电试验前阶段,对N1E级可以断电的系统设备进行确认。

(2) 研究堆在额定功率状态下运行,要求必须同步运行的主要设备有:安全控制棒提升到上限;一回路两台主泵和两台辅助泵运行;二回路两台主泵投入运行;重水氦气系统中的重水泵运行、保护系统设置一次水流量为额定值。反应堆额定功率稳定运行大于30min。

(3) 断开外电网电源(N1E设备自动断电),操作内容详见表1。10kV配电和主变压器400V配电系统模拟外电网断电操作,并为接入柴油发电机组电源做好准备,做到不反馈、不干扰运行中的近距离相关电网。

外电网断电后应急系统(转入电池组供电)状态;1E级设备连续运行状态和系统响应,保护系统给出“一回路主泵断电”“一回路流量低”的紧急停堆信号、控制棒快速动作、控制台上操控重水排放阀开关有效、事故通风系统的运行状况(模拟放射性监测高和高高)可否更换?外电网断电设备运行状态如表2和表3所示。

表 1 10kV 配电系统和主变压器模拟外电网断电操作记录

Table 1 Operating records of the external power grid cut-off simulated by 10kV electric distribution system and main transformer

序号	操作内容	停电/送电	备注
1	先摇出中压动力配电 1/3 号进线电源 1151/1152 断路器	停电	试验前
2	断开中压动力配电 2/4 号进线电源 1153/1150 断路器	停电	试验时
3	断开工艺楼 1/2 号变压器进线 1155/1154 断路器	停电	试验时
4	摇出 400V 配电变压器出线 ELA/B 601AT 断路器,并检验核实(进一步证实出线不带电,否则会产生变压器倒送电的危险)	停电	试验时
5	断开 ELA/B 母线中 UPS 和备用母线以外的出线开关	停电	试验时

表 2 外电网断电 1E 设备运行状态

Table 2 Operating status of the 1E equipment with the external power grid cut-off

序号	项目名称	状态	合格与否
1	一回路辅泵运行流量值是否为额定值 270m ³ /h	正常	合格
2	保护系统发出“主冷却剂流量低、主泵断电信号”吗	发出	合格
3	运行的过程测量系统,还在运行吗	运行	合格
4	控制棒插入堆芯了吗	插入	合格
5	报警屏显示“一回路冷却剂流量低、一回路泵断电”	运行	合格
6	事故排风系统可以运行吗	可以	合格
7	剂量监测系统在持续运行吗	持续	合格
8	HWS-V02A/B 重水排放阀门能打开吗	可以	合格

表 3 外电网断电后 UPS 系统供电状态

Table 3 Power supplying status of UPS with the external power grid cut-off

设备名称	蓄电池		UPS 运行状态参数											
			断电 10min				断电 30min				断电 180min			
	正常	否	电压 /V	电流 /A	频率 /Hz	功率 因素	电压 /V	电流 /A	频率 /Hz	功率 因素	电压 /V	电流 /A	频率 /Hz	功率 因素
220V EUA 通道	正常		220	8	50	0.94	220	8	50	0.94	220	8	50	0.94
380V EUD通道	正常		380	10	50	0.68	380	10	50	0.68	380	10	50	0.68
220V EUB通道	正常		220	6	50	0.96	220	6	50	0.96	220	6	50	0.96
380V EUE通道	正常		380	12	50	0.72	380	12	50	0.72	380	12	50	0.72
220V EUC通道	正常		220	13	50	0.91	220	13	50	0.91	220	13	50	0.91

3 试验结果和余热排出分析

额定功率运行状态下切断外电网供电,应急电力系统自动投入可连续运行 3h 以上;启动柴油发电机组-备用电力,可向备用母线的负荷供电。试验证实该系统功能和技术参数满足要求,可保证研究堆外电网断电状态的电力供应和停堆安全。

3.1 外电网断电试验结果

按照外电网断电试验程序要求,研究堆额定功率运行 45min。外网断电后 UPS 连续运行 3h 以上,单相输出 (220±2.2)V,单台额定功率 40kW,实际使用功率≤15kW;三相输出

(380±3.8)V,单台额定功率 130kW,实际使用功率≤30kW;切换时间≤5ms。外网断电后研究堆的安全相关状态:(1) 一回路辅助泵由 3t/h 上升到额定流量运行稳定;(2) 保护系统接到断电信号后分别发出“一回路泵断电”和“一回路冷却剂流量低”的紧急停堆信号;(3) 功率控制系统接到紧急停运信号后执行了安全棒快速插入指令;(4) 重水排放阀门可开关,维持辅助停堆系统运行有效;(5) 光子牌报警屏顺序显示预报、状态报警、事故信号;(6) 剂量监测系统、全厂警报系统继续运行。柴油发电机分别经 ELA/B601DG 供电,充电器 EDA/B/C 向电池组充电维持 UPS 运行;备用母线 ECH/J 上的 MVA-

S21/22 电气厂房通风系统维持主控制室可居留,启动二次水辅助泵运行-补充事故停堆余热排出;通信系统供电维持全场通信报警系统运行。

3.2 外电网断电事故瞬态分析

在零时刻发生全厂断电事故,2台一回路主泵开始在飞轮的带动下惯性惰转。由于冷却剂流量的减少,堆芯燃料和冷却剂温度开始上升,堆内最小泡核沸腾比(MDNBR)下降,而堆芯功率由于反馈的作用而有所降低。约在2.4s时流量下降到初始流量的82.5%,发出紧急停堆信号。保护系统+电磁铁磁滞延迟1.37s,控制棒开始落入堆芯,实现紧急停堆。堆芯功率急剧降低,使燃料温度和冷却剂温度迅速下降,MDNBR回升,大约5.27s时控制棒下落到底,裂变功率降到额定功率的10%。这时堆芯功率主要以裂变产物的剩余发热为主缓慢下降,此时热流密度由160W/cm²下降到20W/cm²;燃料中心最高温度由149℃下降到60℃。回路和堆芯流量下降速度仍然很快,所以燃料温度和冷却剂温度再降到一个最低值后又逐步回升,堆芯最小MDNBR也在上升至一个最高点后缓慢下降。瞬态过程运行40s后,主泵惰转基本结束,与主泵并联的辅助泵提供的驱动逐渐起决定作用。至此主回路保持一个稳定的流量,燃料和冷却剂温度在达到第二个峰值后开始不断下降,堆芯最小MDNBR也随功率的不断降低而连续上升,反应堆进入安全状态。针对研究堆的水温物性参数,经改进和偏保守的限制设置,采用美国EPRI资助开发的用于压水堆的热工水力最佳估算分析程序RETRAN-02分析计算了额定功率下发生断电事故最小偏差MNDBR为1.84,燃料中心温度也远小于安全限值。

4 结论

本文通过外电网断电试验验证和对堆芯余热排出分析得出如下结论。

(1) 研究堆在额定功率运行时外电网断电,应急电力系统和备用电力系统所具有的电气控制和负载能力,满足研究

堆紧急停堆、厂房隔离、堆芯冷却、余热排出、剂量监测、控制保护系统的逻辑连锁和动力要求。

(2) 外网断电后1h打开自然循环阀,约1.1h辅助泵停车,冷却剂由向下强迫流动换为向上对流,由于发热功率很低燃料中心最高温度几乎与板壁最高温度一样。理论分析也表明事故过程中的MNDBR和燃料中心最高温度远低于安全限值,满足安全准则要求。

参考文献 (References)

- [1] 王明珊,朱世雷,刘闯,等. 研究堆电力系统设计[J]. 核动力工程,2007,28(2): 66-68.
Wang Mingshan, Zhu Shilei, Liu Chuang, et al. Nuclear Power Engineering, 2007, 28(2): 66-68.
- [2] 刘肇旭,徐征雄,王德生,等. 大亚湾核电站的外电网可靠性评价[J]. 中国电力,1994,27(11):2-4,23.
Liu Zhaoxu, Xu Zhenxiong, Wang Desheng, et al. Electric Power, 1994, 27(11): 2-4, 23.
- [3] 宋云婷,郭永基,鲁宗相,等. 田湾核电站失去外电源的概率风险评估[J]. 核动力工程,2003,24(5): 478-481.
Song Yunting, Guo Yongji, Lu Zongxiang, et al. Nuclear Power Engineering, 2003, 24(5): 478-481.
- [4] 田文喜,秋穗正,苏光辉,等. 中国先进堆未能停堆的全厂断电事故分析[J]. 核动力工程,2008,29(3): 59-63.
Tian Wenxi, Qiu Suizheng, Su Guanghui, et al. Nuclear Power Engineering, 2008, 29(3): 59-63.
- [5] 孙卫东,贾立新,周世新,等. HTR-10全厂断电试验[J]. 核动力工程,2001,22(6): 513-515.
Sun Weidong, Jia Lixin, Zhou Shixin, et al. Nuclear Power Engineering, 2001, 22(6): 513-515.
- [6] 王家丰,陈文德,陈家海,等. HFETR全厂断电试验及结果分析[J]. 核动力工程,1985,6(6): 533-540.
Wang Jiafeng, Chen Wende, Chen Jiahai, et al. Nuclear Power Engineering, 1985, 6(6): 533-540.
- [7] Yukio S, Hiroei A, Hiromasa I, et al. Core thermo-hydraulic design with 20% LEU fuel for upgraded research reactor JRR-3 [J]. Journal of Nuclear Science and Technology, 1985, 22(7): 551-564.

(责任编辑 刘志远)

《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映我国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域我国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。