

某核电机组堆外核功率测量偏差特点及原因分析

唐炼, 周晓明

台山核电合营有限公司, 广东 江门 529228

摘 要 : 某新一代压水堆核电机组的堆外核功率测量与国内其他主流二代压水堆机组有较大区别, 在稳定功率运行期间其核功率测量值与热功率有较大偏差, 大修下行机组到达次临界之后, 其功率量程核功率仍有较高的显示, 与国内其他主流二代机的核热功率偏差较小以及次临界后功率量程核功率几乎为0相比差别较大。本文针对该情况进行分析并提出相应的解决建议。

关 键 词 : 压水堆; 堆外核功率测量; 功率量程; 校刻系数

Characteristics and Cause Analysis of Nuclear Power Measurement Deviation in a NPP

Tang Lian, Zhou Xiaoming

Taishan Nuclear Power Joint Venture Co., Ltd., Guangdong, Jiangmen 529228

Abstract : The nuclear power measurement of a new generation PWR nuclear power unit is quite different from other domestic mainstream second generation PWR units, there is a large deviation between the measured value of nuclear power and thermal power during stable power operation, and the nuclear power of the power range still has a high value after the shutdown of the unit even when the reactor reaches subcritical, compared with other domestic mainstream second generation PWR units, the nuclear thermal power deviation is smaller and the power range's value of the subcritical reactor is almost 0. This paper analyzes the causes and puts forward corresponding solutions.

Keywords : PWR(Pressurized Water Reactor); ex-core nuclear power measurement; power range; calibration coefficient

一、引言

核电机组均会有反应堆功率测量, 其中核功率测量是最重要的功率测量, 核功率测量中又分为堆内和堆外两种测量。对于压水堆核电机组来说, 核功率测量是必须的, 通过核功率连续在线测量来实现反应堆功率的测量、控制、保护, 是直接监测反应堆功率水平、堆芯链式裂变反应是否可控的最重要仪表。国内某新一代压水堆核电机组(以下简称“新机组”)的堆外核功率测量与国内其他主流二代压水堆机组(以下简称“二代机”)从测量原理、堆外布置情况等方面来看, 是一脉相承基本一致的, 但是该新机组的堆外核功率测量功率量程的特性与二代机有很大区别, 一是稳定功率运行期间, 该机组功率量程所测得的核功率与热平衡精确计算得出的热功率有比较大的数值差别; 二是该机组大修下行到达次临界之后, 其功率量程显示仍有1~1.5%的核功率显示, 与二代机相比明显偏大^[1]。

二、典型的压水堆机组堆外核功率测量系统

为了保持对反应堆核功率水平即中子通量的全量程有效监控, 压水堆核电机组的堆外核功率测量一般分为三组, 即源量程、中间量程、功率量程^[2]。

以该新机组为例, 其堆外中子通量测量系统由3个源量程探测器、4个中间量程探测器和4个功率量程探测器组成。源量程探测器为涂硼正比计数管, 其应该正对中子源组件。中间量程和功率量程装在一根套管里, 均由电离室组成。因中间量程测量范围所跨越的中子通量水平区间很宽, 采用 γ 补偿电离室以去除堆芯非中子通量所带来的电离电流影响。中间量程探测器通道被放置在其对中子通量轴向分布次敏感的区域, 即堆芯轴向中心(见图-1)^{[3][4]}。

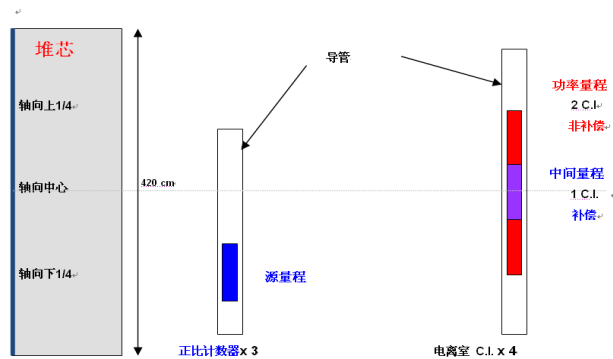


图-1: 新一代压水堆堆外核功率测量系统仪表位置侧视图

功率量程探测器为长电离室, 有上下两个电离室, 位于堆芯轴向上1/4和下1/4处(见图-1)。当中子通量足够大时, γ 射线产生的电流可忽略不计, 可以认为测量电阻上只流过与堆芯中子

* 作者简介: 唐炼(1983年4月-)男, 汉族, 四川省达州市, 中广核集团台山核电合营有限公司, 工程师, 大学本科, 核电运行

通量水平成正比的中子电流 I_0 。

该新机组的堆外功率量程探测器测量的测量范围是 2.5×10^6 n/($\text{m}^2 \cdot \text{s}$) 到 5×10^9 n/($\text{m}^2 \cdot \text{s}$)，对应新一代反应堆约 0.5%NP 到 200%NP 的核功率水平。

二代机的堆外核功率测量仪表由 2 个源量程探测器、2 个中间量程探测器和 4 个功率量程探测器组成，其源量程和中间量程探测器布置在同一个通道里（见图 -2），每一个功率量程探测器分为堆芯上下部各 3 个一共 6 个敏感段。二代机的功率量程探测器测量范围是 5×10^2 n/($\text{m}^2 \cdot \text{s}$) 到 5×10^{10} n/($\text{m}^2 \cdot \text{s}$)。

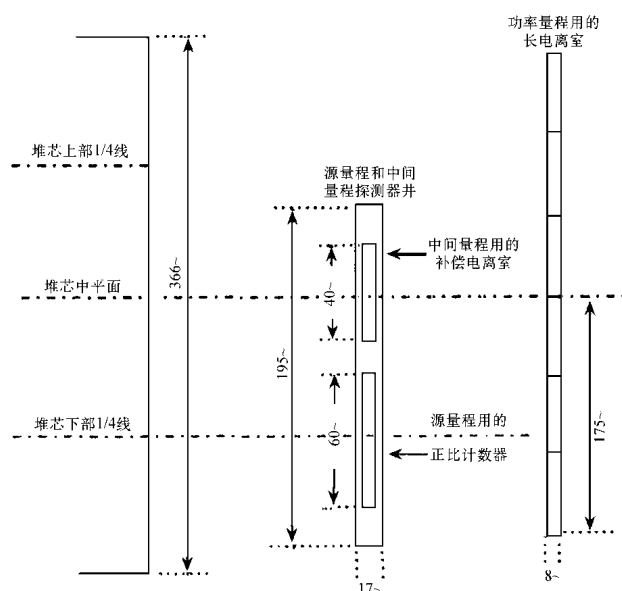


图 -2：二代压水堆堆外核功率测量系统仪表位置侧视图

三、两代压水堆机组功率量程测量特性的区别

该新机组功率量程需要定期由堆芯热功率对其进行校验，通过测量对应分区上下部探头电流的数值，乘以相应的转换系数后转换成模拟量信号，用于显示、控制和保护。二代机功率量程定期校验方法基本一致^{[5][6]}。

理论上，通过定期的核热功率平衡校验，堆芯核热功率偏差可以控制在很小的范围内。但实际上，该新机组在满功率稳定运行时功率量程所测得的均值核功率会比热功率偏高约 1.8%，在 90% 功率平台也比热功率偏高约 1.7%。反观二代机，这一对应的功率偏差为不超过 0.5%。

该新机组在机组下行过渡到次临界源量程已经投运、中间量程显示实际核功率水平约为 0.002% 时，功率量程仍会有 1~1.5% 的明显虚假核功率显示，与二代机仅 0.01~0.1% 的几乎可忽略不计的数值相比，明显偏大。

四、新一代压水堆功率量程测量偏差的原因分析

（一）功率量程的作用及安全重要性不同

该新机组功率量程测量信号主要用于中子通量变化率高、核功率高停堆保护以及其他相关允许信号、控制棒保护信号的产

生，也参与一回路平均温度 T_{avg} /中子通量 NF 控制。二代机的功率量程测量信号主要用于中子通量变化率高、核功率高停堆保护以及其他相关允许信号、闭锁信号、控制棒保护、汽轮发电机功率限制信号的产生^{[7][8]}。

可以看出，新机组其功率量程信号作用的级别有所降低，属于反应堆堆保护最高安全级别的仅变化率高自动停堆这一个，核功率高触发自动停堆的逻辑并不在最高安全级别的反应堆保护系统专用逻辑模块里，而是属于多样化停堆保护、由普通的 T2000 仪控 SAS 模块来实现。另外新机组的功率量程信号还参与反应堆调节系统的运行功能，用于一回路平均温度 T_{avg} /中子通量 NF 控制。

（二）两代压水堆堆芯结构及堆内测量设计上的不同

该新机组堆芯结构上与其他压水堆机组有着很大的区别，其在包裹堆芯燃料组件的外围环绕安装有重反射层。

重反射层的主要目的是为了降低从堆芯泄漏出的中子数量，进而可以保护反应堆压力容器免受快中子过度照射而引发的寿期和脆性断裂的危险。另一方面，重反射层也能降低从堆芯内部泄漏出去的中子量并一定程度上实现径向功率分布的展平，可以提高核燃料的利用率以增加燃料燃耗深度或者降低燃料富集度^[9]。

但重反射层的存在，无疑是降低了新机组堆外中子通量测量设备的准确性，其测量到的电流值与堆芯真实中子通量水平的关联度更低、所经历的物理过程更复杂多变^[10]。

同时，该新机组的堆内核功率即中子通量测量与二代机也有着很大的区别。二代机的堆内中子通量测量仅有非在线、非实时的指套管通道测量，该新机组则设置有堆内中子通量测量即 SPND（自给能中子探测器），能够在线且实时地探测堆芯内中子通量水平及三维分布。

该新机组的 SPND 测量值被用于实时计算堆芯线功率密度（LPD）、偏离泡核沸腾比（DNBR）等反应堆保护所需的堆芯功率值等数据，显然该保护更为直接更为关键，安全等级要求更高，能够比堆外探测器作用更快更直接，所以该新机组的堆外核功率测量在安全方面重要性有轻微降级。

（三）两代压水堆功率量程校刻系数的不同

反应堆经过一段时间运行后，核热功率之间会产生偏差，因此需要定期通过一、二回路热平衡试验对功率量程的校刻系数进行修正。试验的主要目的是根据堆芯中子通量图测量结果、理论计算模型以及热平衡计算结果修改校刻系数和燃耗相关的阈值，堆外核功率测量系统侧参数校刻系数包含：KCAL1、KCAL2、KCALN。

但以上校刻过程的前提条件为机组功率稳定 6 小时及以上，而在机组上、下行阶段，机组功率在不断变化，无法进行校刻。则高功率平台校刻系数用于低功率平台本身就会产生偏差。

以该新一代压水堆某机组某次大修下行前执行的堆芯物理试验后得到的校刻系数为例来说明：核功率 = （上部探头电流 $\times$ KCAL1 + 下部探头电流 $\times$ KCAL2） $\times$ KCALN，该功率量程仪表的电流测量范围为 10^{-7} 到 10^{-4} A，即使取保守的功率量程测量最小电流 10^{-7} A 来算，乘以相应的校刻系数，其得到的核功率计算值

也大约有1%NP，比如以电流 10^{-7} A以及相应的校刻系数带入上式可得四个象限的核功率显示值：

$$P1=(10^{-7} \times 4294013 + 10^{-7} \times 4893499) \times 1 = 0.919\% \text{NP};$$

$$P2=(10^{-7} \times 4525131 + 10^{-7} \times 5216180) \times 1 = 0.974\% \text{NP};$$

$$P3=(10^{-7} \times 4356357 + 10^{-7} \times 4947565) \times 1 = 0.930\% \text{NP};$$

$$P4=(10^{-7} \times 4803106 + 10^{-7} \times 5135734) \times 1 = 0.994\% \text{NP}。$$

因此可知，即使该新机组已经达到次临界状态、一回路的硼浓度为换料硼浓度、控制棒已全插入堆底、源量程读数已经下降至很低水平，但功率量程仪表显示值还会有约1%NP左右的读数，与机组实际较吻合。

进一步分析可知，基于该新机组堆芯设计的特点，重反射层的阻隔，其满功率状态下堆外核功率测量仪表探测器所接收到的实际中子通量仅为二代机的五分之一左右，两种堆型的功率量程探测器最高探测中子通量范围更是有数量级即十倍的差别。相应地，他们的功率量程探测器长电离室产生的微电流也就有5~10倍的差距，进而相应的校刻系数也有5~10倍的差距。在次临界模式实际中子通量几乎为0情况下，假设探测器卡件本底输出4.01mA（4.00mA对应功率下限0，0.01为卡件探测显示精度），通过校刻系数的计算，则新机组的功率量程核功率计算值就会比二代机高10倍左右，与现实情况基本相符。

五、结论及建议

综上所述，新机组由于其反应堆堆内中子通量在线测量的设

置及重要性，以及该堆型设置有堆芯重反射层，导致其堆外中子通量测量的安全要求及测量精度等方面有轻微降级，叠加探测器输出电流下降导致的校刻系数较大，最终导致其堆外中子通量测量的功率量程测量值出现与热功率偏差较大、次临界之后显示明显偏大失真等现象，但当前这些偏差现象均在安全标准范围内，符合相关程序要求。

针对稳定功率运行阶段，功率量程测量值与热功率偏差较大问题，当前系统配置及仪控测量原理条件下，暂无很好的解决办法。该新机组的运行管控方面均以堆芯热功率为精确控制目标值。

针对次临界之后显示明显偏大失真问题，通过对比分析及调研，有以下几种可供选择的解决办法：

（1）将信号、逻辑处理回路的探测器卡件输出转换参数提高。比如原来是4.0~20 mA开始转换，现提高到4.02~20 mA转换，4.02 mA以下都输出为0。该方案可实现在线修改。

（2）参考国产华龙三代核电机组，直接在逻辑中增加减去本底电流的仪控环节。该方案需要修改相关反应堆控制及保护仪控系统的数据库，需要在机组大修期间具备安全条件时下装。

（3）在T2000仪控系统中增加逻辑切换环节，随机组状态改变、比如源量程已投运时自动将功率量程显示切换至0。该方案需修改T2000逻辑，同样涉及逻辑下装。

参考文献：

- [1] 卢建, 黄靖, 蔡昊廷, 等. 秦山核电二期堆外核功率测量系统探测器的设计与检修维护 [J]. 仪器仪表用户, 2019, 26(11): 48-52.
- [2] 刘勇, 段天英, 贺长兴, 等. 可移动反射层小型反应堆核功率测量补偿设计 [J]. 核电子学与探测技术, 2023, 43(04): 880-883.
- [3] 陈梅. 自动数字显示的反应堆核功率测量装置 [J]. 核电子学与探测技术, 2001(06): 487-490.
- [4] 卢建, 李嘉洲, 葛孟, 等. 核测系统技术改造项目管理与实施研究 [J]. 仪器仪表用户, 2022, 29(09): 44-48.
- [5] 谢学涛, 张卫军. 堆外核测量系统的数字化设计 [J]. 核电子学与探测技术, 2015, 35(03): 313-316.
- [6] 张天航, 杨超. 核电站状态监测规程判断图数字化设计 [J]. 中小企业管理与科技(上旬刊), 2019(02): 189-190.
- [7] 李友, 吴德成. 核电室外工程数字化设计平台建设研究 [J]. 工业建筑, 2023, 53(S1): 740-744.
- [8] 张亮. 核反应堆数字化设计全面集成模型研究 [J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(08): 111-114.
- [9] 张立群, 刘问杰, 曹偲笛. 核电厂电气系统自动建模数字化设计 [J]. 自动化仪表, 2023, 44(S1): 353-356+360.
- [10] 秦文娟, 蔡雯. 压水堆棒控系统数字化设计 [J]. 核电子学与探测技术, 2016, 36(07): 776-780.