

核电厂棒控系统控制棒失步诊断及改进

Diagnosis and Improvement of Control Rod Misalignment in Nuclear Power Plant Rod Control System

封文刚 景泉 沙洪伟

Wengang Feng Quan Jing Hongwei Sha

大亚湾核电运营管理有限公司 中国·广东 深圳 518000

Daya Bay Nuclear Power Operation and Management Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518000, China

摘要: 某核电厂运行期间, 提插控制棒时, 数次出现控制棒传递线圈电流报警。通过对报警时刻线圈电流波形的判断, 结合控制棒驱动机构的动作时序, 对控制棒失步的原因进行分析归纳。论文通过对控制棒失步现象的分析及诊断, 总结了如何判断控制棒失步的方法, 并提出了优化控制棒失步的策略及方法, 提升了棒控系统运行的稳定性

Abstract: During the operation of a nuclear power plant, the control rod transmission coil Current alarms appear several times when the control rod is lifted or inserted. By judging the Current waveform of the coil at the alarm time and combining with the action time sequence of CRDM, the reasons for the out-of-step of the control rod are analyzed and summarized. Through the analysis and diagnosis of control rod out-of-step phenomenon, this paper summarizes the method of how to judge the control rod out-of-step, and puts forward the strategy and method of optimizing the control rod out-of-step, which improves the stability of the rod control system.

关键词: 控制棒; 失步; 提插; 驱动机构

Keywords: control rod; out-of-step; lifting and inserting; driving mechanism

DOI: 10.12346/peti.v6i1.9080

1 引言

核电站棒控系统在电站的控制系统中有着非常重要的地位, 核电站通过控制棒的提插实现反应堆功率的调节, 在控制棒的提插过程中可能遇到异常报警的发生, 比如提插棒期间产生控制棒失步现象, 失步将导致棒控系统发出异常报警, 论文将针对控制棒失步的现象及原因分析与改进方向进行详细介绍。

2 H2 棒束失步情况介绍

南方某核电厂 1 号机组棒控系统 (RGL 系统) 的温度调节棒组 (R 棒组) 的编号 H2 的棒束在某轮次机组大修后出现了数次异常报警, 均出现在手动或自动提插棒时, 机柜的故障代码为 3.7 (传递线圈电流异常报警)。具体情况如下:

2021 年 10 月 1 日, 1 号机组降功率期间, 手动下插 R 棒组到 212 步及自动下插 R 棒至 199 步时, 主控室均出现

RGL 系统异常报警, H2 棒束所在机柜故障代码 3.7, 均为 H2 棒束动棒电流波形异常, 且异常波形一致。

2022 年 2 月 9 日, 1 号机稳定功率运行期间, 手动提升 R 棒组至 213 步时, 主控室出现 RGL 系统异常报警, 现象同上。

另外, 在 2017 年 11 月 16 日某轮次小修时, 机组下行 R 棒组下插至 197 步时, 也出现了同样的现象, H2 棒束失步一步。

以上现象出现时, R 棒组的 H2 棒束均由于故障报警而失步 1 步, 维修人员判断仪控系统无故障后复位报警并校正棒位。

3 控制棒电流控制原理

该电站的棒控系统 (RGL 系统) 的电流控制原理采用了可控硅三相半波可控整流原理, 控制夹持线圈 (SG)、传递线圈 (MG) 和提升线圈 (LC) 的电流输出。通过控制

【作者简介】封文刚 (1982-), 男, 中国广东深圳人, 本科, 工程师, 从事核电仪控研究。

各线圈的电流大小和时序来使控制棒按要求动作，其中的线圈电流大小和电流时序由可控硅控制角和导通角来使各线圈流过符合不同要求的时序电流，通过让三个线圈以一定时序通电、失电进而控制驱动机构的销爪的动作顺序，实现控制棒的提升或插入。线圈电流定值有“零电流”“半电流”“全电流”三种，其中“半电流”是为了防止驱动机构线圈过热而设置的^[1]。

具体原理简图如图 1 所示，系统通过 1 拖 4 进行控制，4 束控制棒的 SG/MG/LC 控制线圈均通过并联连接。图 1 中的线圈 1 可以是第一束棒的 SG/MG/LC 线圈中的任一线圈。回路中通过可控硅三相半波整流后输出对应时序的电流同时控制 4 束控制棒的控制线圈。

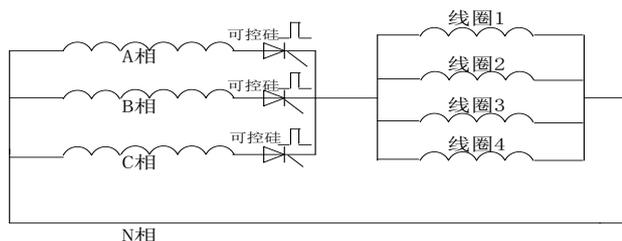


图 1 控制原理简图

线圈通电时序由下位机的逻辑控制单元发出，对应三种电流定值，当控制棒处于静止状态时，夹持线圈（SG）通有半电流，传递线圈（MG）和提升线圈（LC）为零电流。

正常提升包含六个动作：MG 销爪抓入、SG 销爪退出、LC 线圈通电（MG 带棒上升）、SG 销爪抓入、MG 销爪退出、LC 断电释放（MG 不带棒下降）。

正常下降也包含六个动作：LC 线圈通电（MG 不带棒上升）、MG 销爪抓入、SG 销爪退出、LC 断电释放（MG 带棒下降）、SG 销爪抓入、MG 销爪退出。

4 电流监测原理说明

在控制棒的提插过程中，系统通过实时监测电流的建立时间及电流值的大小，当超过相应的阈值时则触发报警。以 MG 线圈为例，具体的电流监测故障代码如下：

Fault code 3.7 (current progression) : The currents (I zero I reduced and I max.) are compared to min. and max. thresholds. The fault is displayed if there is a discrepancy with the set-point diagrams. Establishment times of coil currents are taken into account.

在单束控制棒 MG 线圈电流建立的过程中，通过对电流建立时间的监测，对电流建立后的零电流 / 半电流 / 全电流进行监测，比如 MG 线圈的全电流，当其全电流小于最小阈值（6.29A），则触发 3.7 故障代码。其余包括对 MG 的最大零电流，最小半电流 / 最大半电流均进行监测，超过对

应阈值则触发 3.7 故障代码。

5 H2 失步原因分析

该电站的控制棒驱动机构主要由提升、保持、传递衔铁，提升、固定磁极、销爪、销爪连接柄、缓冲轴、套管轴、支承筒、弹簧等组成。当线圈正常通电时，磁轭线圈壳体内的电磁工作线圈产生磁场，磁极产生磁力吸动相应的衔铁，使衔铁内的销爪（销爪）交替啮合在驱动杆的环槽之中，促使环形传动杆（驱动杆）上、下运动，带动控制棒组件在反应堆堆芯内运动^[2]。

以 2021 年 10 月 1 日 H2 棒束的失步电流波形为例（注：其余几次提棒或插棒时 H2 失步情况原理完全一致）。

图 2 中包含了两步插棒波形。在前一步为正常的插棒波形中，四束控制棒的 MG 线圈均产生由于 MG 磁极正常吸合（销爪正常抓入）正常的电流凹坑。MG 线圈电流上升时，当控制棒驱动机构内的 MG 磁极吸合（MG 销爪抓入）时，由于磁通的闭合使得 MG 线圈电流会存在一个明显的凹坑，SG 线圈同样如此，虽然该凹坑电流小于 MG 线圈的全电流最小阈值 6.29A，但是由于此时 MG 电流建立过程中，系统对建立时间内的电流不做监测，故不会产生 MG 电流 3.7 故障，此后电流继续上升达到标准的 MG 全电流^[3]。

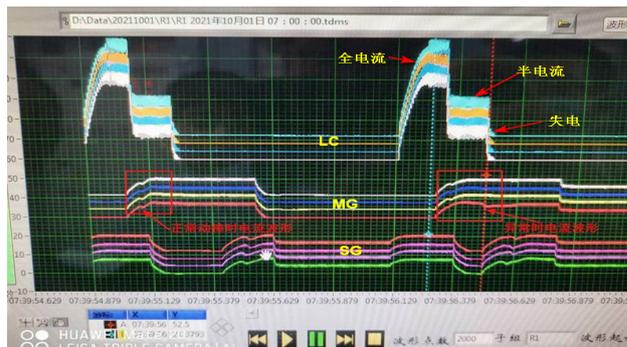


图 2 H2 棒束失步前后的插棒波形

在后一步的动棒波形性，在 R1 棒组四束控制棒 MG 线圈电流上升过程中，四束控制棒的电流实际均是正常的，只是由于 H2 棒束的 MG 磁极未吸合（MG 销爪未抓入到驱动杆凹槽内），此时 H2 棒束的 MG 电流曲线等同于模拟负载的电流上升曲线。当 LC 提升线圈从半电流下降至零电流的过程中，通过实际电流波形及控制棒驱动机构的动作情况，LC 提升衔铁的动作导致 MG 磁极正常吸合（MG 销爪正常抓入），MG 电流下降产生电流凹坑，此刻的 MG 全电流数值小于电流建立后的全电流最小阈值，触发 MG 线圈 3.7 故障，产生 RGL 故障报警。

从图中可以看出，MG 销爪未抓入期间有一段时间内 SG 线圈电流为零，SG/MG 销爪同时未抓入导致控制棒出现滑步（同时未抓入的时间近似 70ms），以控制棒在高位

下落时初始加速度近似 6m/s^2 ，根据换算后控制棒下落距离约 15mm ，与控制棒动作一步的距离 15.875mm 基本一致，即 H2 棒束产生一步失步。机组出现该缺陷后，仪表检查控制板件无异常并复位报警后，提插控制棒确认 H2 棒实际失步一步，与理论分析吻合，通过校正 H2 控制棒使得与其余三束控制棒实际棒位达到一致。

提棒过程中产生的 RGL 故障报警，其 H2 棒束失步一步原理与以上过程一致，只是提棒与插棒的区别。H2 棒束插棒和提棒时失步一步的动作机理如图 3 所示。

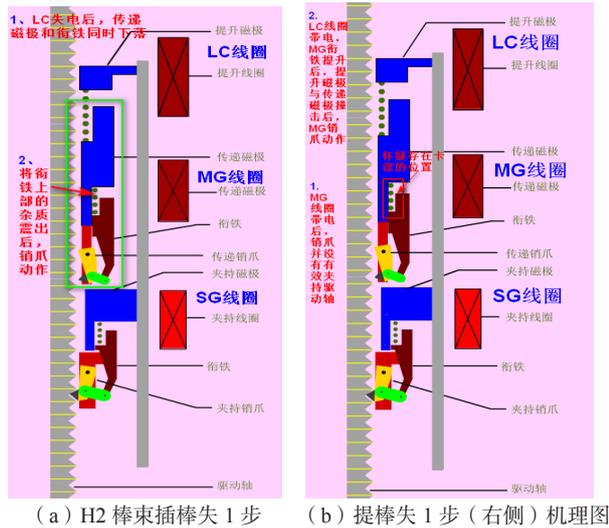


图 3 H2 棒束插棒和提棒时失步一步的动作机理

综合以上原因分析，首先排除控制机架及板卡的问题，控制机架采用 1 拖 4 控制，若控制机架出现故障，则所有控制棒的电流均将异常，若出现失步则四束控制棒一起失步；而实际电流曲线为正常曲线，只是由于 MG 销爪延迟抓入产生电流凹坑而产生报警。同时也排除线圈回路接触不良的问题，原因是线圈回路接触不良往往导致棒束落到堆底而非失步，且事件后提插棒检查电流波形无异常，以及连续性电阻历史趋势无异常。

H2 棒束失步的可能原因如下：腐蚀产物积存在传递销爪衔铁与磁极间造成 MG 销爪动作异常。

6 历史内外经验反馈

电厂历史上也多次发生过类似故障，后经复位报警或重新提插控制棒后故障消除，中国其余电厂也出现过类似控制棒失步问题。

电厂咨询其他国家同类型机组，答复其也有类似反馈，可能的原因是：机械装置中杂质的存在致使移动销爪闭合时间增加甚至无法闭合。同时在堆启动过程中由于温度增加导致不同的热膨胀也会使销爪动作异常。

综合中国和其他国家电厂的经验反馈也发生过控制棒失步事件，通常认为是控制棒驱动机构销爪机械装置异物堆积，导致销爪动作滞后在行业内普遍存在。建议在每次换料大修后落棒试验前，多次全行程提插控制棒以清除控制棒驱动机构中可能存在的异物。

7 结语

通过对控制棒失步的现象及原因进行分析，控制棒失步主要是由于一回路水质中的腐蚀产物导致控制棒驱动机构动作偶发异常，故可以通过以下三点来有效减少控制棒失步的现象。当前以下三条均已落实到机组大修期间。

①在机组换料大修期间，严格控制机组一回路水质，加强水质净化，尽可能减少腐蚀产物对控制棒驱动机构的影响。②根据控制棒实际失步的情况，在机组大修下行热停窗口和大修结束后上行窗口，对所有控制棒进行全行程提插 6 遍以上，通过此方式的实施，有效减少了控制棒失步的概率。③对机组正常运行期间失步的控制棒束，通过在大修期间外加噪声探头，通过噪声监测控制棒销爪的动作情况，并与驱动电流动作时序进行对比参考，辅助判断控制棒驱动机构动作是否正常。

参考文献

- [1] 孙长生. 压水堆核电站过程控制系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [2] 郑杲, 黄可东, 余海涛, 等. 基于 IGBT 的反应堆控制棒驱动机构电源控制装置[J]. 核动力工程, 2014, 35(1): 138-141.
- [3] 路燕, 王庆, 马若群, 等. CRDM 移动衔铁释放临界电流超差处理方法研究[J]. 机电信息, 2014(24): 178-180.