

Optimization simulation verification of average temperature control parameters for nuclear power plant

Hai Zhang

CGN Nuclear Power Operation Co., Ltd., Shenzhen, Guangdong, 518026, China

Abstract

After the eighteen-month refueling of Unit #3 at a nuclear power plant, the temperature deviation fluctuations in the important primary circuit average temperature control loop increased, and the R rod operated more frequently under automatic conditions. To eliminate this disturbance, it is necessary to optimize the parameters of the average temperature control system. Before implementation of optimization, a full-range simulation platform based on the Distributed Control System (DCS) was used to verify the parameter optimization of the primary circuit average temperature control loop. During the simulation verification, it was found that modifying the first-order inertia time constant online caused a step disturbance in the temperature deviation. A thorough analysis of this phenomenon provided strong data support and assurance for the unit's renovation.

Keywords

nuclear power plant; virtual; DCS; average temperature; simulation verification

核电厂平均温度控制参数优化仿真验证

张海

中广核核电运营有限公司, 中国 · 广东 深圳 518026

摘要

某核电厂#3机组实施十八个月换料后, 核电厂重要的一回路平均温度控制回路中的温度偏差波动有所增大, R棒在自动状态下动作次数增多, 为消除该扰动, 需要优化平均温度控制系统的参数。在实施优化前, 利用基于虚拟数字化仪控系统(DCS)的全范围模拟机验证平台, 对一回路平均温度控制回路参数优化进行仿真验证, 仿真验证过程中发现在线修改一阶惯性时间常数时温度偏差出现了阶跃扰动的现象, 并对这一现象进行了深入分析, 为机组改造提供有力数据支撑和保障。

关键词

核电厂; 虚拟; DCS; 平均温度; 仿真验证

1 引言

某核电厂#3机组实施十八个月换料低泄漏堆芯装载模式后, 用于控制R棒的一回路平均温度控制系统的温度偏差波动有所增大, R棒在自动状态下动作次数比实施十八个月换料前的动作次数增多, 为了消除该扰动偏差, 需要优化平均温度控制系统中计算温度偏差中的平均温度最大值回路的一阶惯性时间常数。在实施优化前, 利用基于虚拟DCS的全范围模拟机验证平台, 对一回路平均温度控制回路参数优化进行仿真验证, 并对现场执行R棒新参数扰动试验时的机组控制程序进行全流程验证。为机组改造提供有力数据支撑。

2 一回路平均温度控制简介

2.1 一回路平均温度控制系统原理

一回路平均温度控制系统通过测量一回路平均温度, 与平均温度整定值比较后, 经调节器产生调节信号, 驱动R棒组, 改变反应堆的反应性, 从而维持一、二回路功率的匹配, 使一回路平均温度等于其整定值^[1]。

如图1, 平均温度测量值为由一回路三个环路中选出的平均温度最大值, 经由滤波器403FI和超前滞后滤波器401MT按负极性接入加法器405ZO。极性的选择原则是增加时使执行机构向正方向运动的极性为正。设R棒提升为正, 插入为负, 平均温度增加时应插入R棒, 故取其极性为负。

平均温度整定值Tref由二回路汽机负荷与最终功率整定值中最大值P2经滤波器403FI, 再经函数发生器401GD产生, 最后经滤波器402FI后按正极性接入加法器405ZO。

一回路功率P1是四个功率量程中子通量核仪表测得的核功率中的最大值。加法器406ZO产生功率失配信号P1-P2, 经由微分器401DR产生功率失配变化率, 再经函数发

【作者简介】张海(1987-), 男, 中国湖南永州人, 本科, 工程师, 从事核电厂模拟机验证和应用技术拓展研究。

生器 403GD 产生的 K1。K1 与函数发生器 402GD 产生的 K2，经由乘法器 401MU，最后由开环通道选 / 切开关按负极性接入加法器 405ZO。

加法器 405ZO 产生温度偏差信号 e，经阈值继电器 407XU1 和 407XU2 产生插棒或提棒信号，经函数发生器 403GD 产生棒速信号。当偏差为正时，说明平均温度偏低，偏差增加到 0.83℃时，R 棒开始以 8 步 /min 提升，偏差在 1.73 ~ 2.8℃之间，棒速在 8 步 /min 到 72 步 /min 之内变化。当偏差降到 0.56℃时，R 棒停止提升。相反地，偏差为负时，说明平均温度偏高。± 0.56℃的偏差范围称为死区，- 0.56 ~ -0.83℃及 0.56 ~ 0.83℃的偏差范围均称为回环。死区和回环有助于防止控制棒的频繁移动。棒速信号和棒向信号均输出至 R 棒控制逻辑，产生移棒脉冲，再转给 R 棒驱动机构电源设备，后者产生 R 棒移动的时序电流信号，移动 R 棒束，使平均温度为整定值。

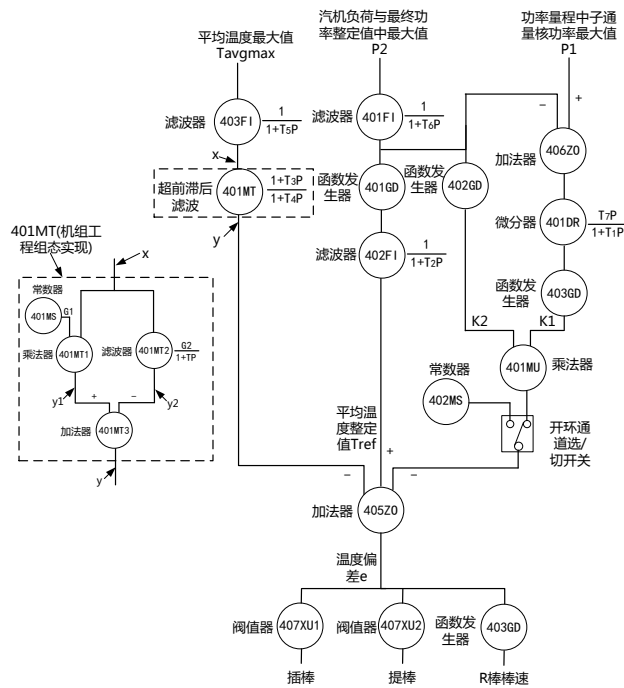


图 1 一回路平均温度控制原理图

2.2 一回路平均温度控制回路参数优化

通过上述一回路温度控制原理图可知，影响温度偏差的因素有三个，包括平均温度最大值，二回路汽轮机负荷和一回路的核功率，经过分析，在 # 3 机组实施十八个月换料低泄漏堆芯装载模式后，堆芯组件径向功率分布不均匀度加大，冷却剂在上腔室搅混不够均匀，导致热管段冷却剂层化现象加剧，测量得到堆芯平均温度波动增大，导致用于控制 R 棒的一回路平均温度控制系统的温度偏差波动有所增大，R 棒在自动状态下动作次数比实施十八个月换料前的动作次数增多，其波动主要由平均温度最大值波动所致，需要对平均温度最大值控制回路进行参数优化，滤波器 403FI 和超前滞后滤波器 401MT 的一阶惯性时间参数优化见表 1 所示。修

改上述参数前需要在全范围模拟机验证平台进行参数优化修改仿真验证。

3 控制参数优化仿真验证

3.1 机组实际控制组态实现

查询 #3 机组核岛控制系统 (CCS) 软件组态，发现由于其没有超前滞后算法模块，它将 401MT 改由与常数器相乘的乘法器和滤波器相减实现。具体实现逻辑图见图 1 虚线框所示。对于实际机组组态的控制参数 G1, G2, T 三个参数与模拟机图中的超前滞后模块的 T3、T4 参数之间关系需要进行推导换算。

3.2 机组实际控制组态参数换算

模拟图上平均温度最大值回路的超前滞后模块 401MT 的传递函数见公式 1:

$$G(P) = \frac{1+T_3P}{1+T_4P} \quad \text{--- 式 (1)}$$

实际机组上平均温度最大值回路的超前滞后模块 401MT 由图 2 虚线框所示，其传递函数见公式 2:

$$G(P) = G_1 - \frac{G_2}{1+TP} \quad \text{--- 式 (2)}$$

式 (2) 右边通分得式 (3):

$$G(P) = \frac{(G_1 - G_2) + (G_1 \cdot T)P}{1+TP} \quad \text{--- 式 (3)}$$

式 (1)、(3) 等价，得方程组式 (4):

$$\begin{cases} G_1 - G_2 = 1 \\ G_1 \cdot T = T_3 \\ T = T_4 \end{cases} \quad \text{--- 式 (4)}$$

解方程组 (4) 得式 (5):

$$\begin{cases} G_2 = \frac{T_3}{T_4} - 1 \\ G_1 = \frac{T_3}{T_4} \\ T = T_4 \end{cases} \quad \text{--- 式 (5)}$$

通过式 (5) 计算得出实际机组需要优化的控制参数 (G1、G2、T) 值如下表 1 所示:

表 1 机组平均温度最大值参数优化表

参数	初始设计值	预计优化值
T ₃	50	50
T ₄	6.67	11
T ₅	1	2
G1	7.5	4.546
G2	6.5	3.546
T	6.67	11

3.3 控制参数优化仿真验证

梳理上述参数优化值后，在全范围仿真验证平台上装载 30%FP 功率温度工况，将 R 棒置手动控制，温度偏差稳定在死区范围内，其它系统和设备参数稳定，执行参数优化脚本，将优化后的 T3、G1、G2 和 T 参数注入到仿真系统中，

监视温度偏差 e, 401MT 输出 y, 401FI 输出 x, 401MT1 输出 y1, 401MT2 输出 y2 的变化, 见下图 2 所示, 观察发现优化参数注入瞬间, 温度偏差 e 由 0.3℃ 瞬间阶跃至 874.87℃。

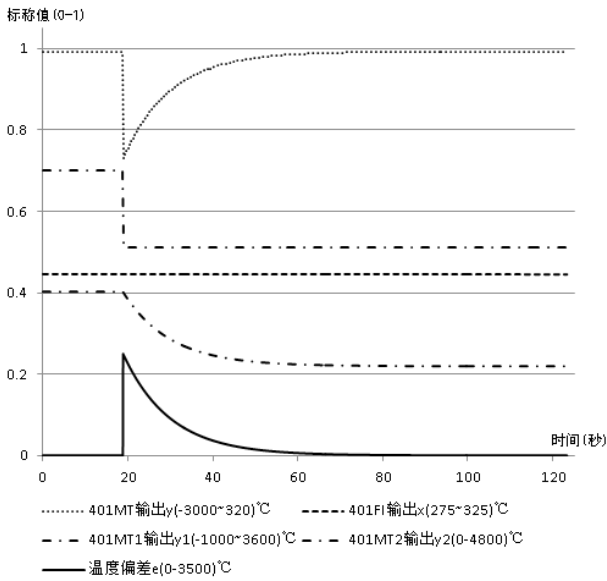


图 2 平均温度参数优化仿真验证曲线

对于一阶惯性的传递函数, 理论上分析, 修改其惯性时间常数时, 在输入输出稳定的情况下, 改变时间常数时, 输出不会出现阶跃变化。本次仿真验证涉及优化的 T_4 和 T_5 都为惯性时间常数, 在线修改参数过程中出现温度偏差 e 阶跃变化, 对该阶跃变化产生的原因进行分析。

式 (1) 的微分方程如下式 (6):

$$y(t) + T_4 \cdot y'(t) = x(t) + T_3 \cdot x'(t) \quad \text{---(6)}$$

令 $y1(P) = G1$, $y2(P) = \frac{G2}{1+TP}$, 式 (2) 的微分方程如下式 (7):

$$\begin{cases} y1(t) = G1 \cdot x(t) \\ y2(t) + T \cdot y2'(t) = G2 \cdot x(t) \\ y(t) = y1(t) - y2(t) \end{cases} \quad \text{---(7)}$$

将式 (6)、式 (7) 微分方程离散得到差分方程^[2], 式 (6) 差分方程见下式 (8):

$$y(t) = \frac{T_4 y(t') + x(t) \cdot dt + T_3 (x(t) - x(t'))}{dt + T_4} \quad \text{---(8)}$$

注: 式中 $y(t)$ - 前一时刻 y 值; $y(t)$ - 当前时刻 y 值; $x(t')$ - 前一时刻 x 值; $x(t)$ - 当前时刻 x 值, dt - 步长
式 (7) 差分方程见下式 (9)

$$\begin{cases} y2(t) = \frac{T y2(t') + G2 \cdot x(t)}{1 + \frac{T}{dt}} \\ y1(t) = G1 \cdot x(t) \\ y(t) = y1(t) - y2(t) \end{cases} \quad \text{---(9)}$$

获取参数修改前一周期稳态参数下, 式 (9) 中各参数数值: $y=297.3, e=0.3, x=297.3, y2=1932.45, y1=2229.75$ 。对修改参数后第一周期运算进行验算, 验算时假设参考温度 T_{ref} 为 297.6℃ 不变, 二回路最大值与核功率偏差为 0。修改参数后第 1 周期运行参数通过式 (9) 差分方程计算如下, 假设

输入 x 的值不变, 计算周期 $dt=0.05$ 秒:

$$\begin{aligned} y2(t) &= (11/0.05 * 1932.45 + 3.546 * 297.3) / (1 + 11/0.05) = 1928.476; \\ y1(t) &= 4.546 * 297.3 = 1351.53; \\ y(t) &= 1351.53 - 1928.476 = -576.95; \end{aligned}$$

温度偏差 $e=297.6 - (-576.95) = 874.55$ ℃, 与全范围仿真验证平台验证的结果一致。

对于采用超前和滞后模块, 验算改变传递函数惯性时间常数 T_4 后其输出变化。假设输入平均温度最大值为 297.3℃, 温度工况下输出 y 等于输入 $x=297.3$ ℃, 将 T_4 由 6.67 修改为 11 的第一个周期代入式 (8) 运算得到:

$$y(t) = (11 * 297.3 + 297.3 * 0.05 + 50 * (297.3 - 297.3)) / (0.05 + 11) = 297.3$$

上述结果表明采用与设计的模拟图一致的超前滞后模块传递函数实现方式, 在稳定工况下修改惯性时间, 其输出是不变化的。

某核电厂 #1 机组模拟仪控系统数字化改造升级, 对原有模拟调节回路实现的一回路温度控制系统参数进行优化, 为适应数字化仪控系统 (DCS) 的调节特性, 其优化前后参数值与表 1 一致。它在 DCS 组态中实现方式与模拟图一致, 它使用 DCS 平台中的超前滞后模块 LDLG 实现 401MT。LDLG 模块的传递函数^[1]如下式 (10):

$$G(P) = KG \cdot \frac{1+LT1 \cdot P}{1+LT2 \cdot P} \quad \text{--- 式 (10)}$$

注: 式中 KG - 比例增益, $LT1$ - 超前时间, $LT2$ - 滞后时间

式 (10) 与式 1 等效, 则参数对应关系为 $KG=1, LT1=T3, LT2=T4$ 。在基于虚拟 DCS 的 #1 机全范围模拟机上进行参数优化修改仿真验证, 在稳定工况下, 在 DCS 工程师站上将 401MT 模块的 $LT2$ 参数由 6.67 直接修改为 11, 观察其温度偏差没有出现阶跃变化。

4 结语

综上对于不同机组不同 DCS 控制系统, 在一回路温度控制系统参数优化仿真验证中发现修改相同的超前滞后模块的惯性时间时, 其温度偏差输出是不一样的。

通过对两种不同实现方式的差分方程求解验算, 发现使用一阶惯性, 乘法块和加法块搭建的超前滞后模块, 虽然实现了超前滞后同等调节功能, 但由于减法块的输入正的比例环节和负的滤波环节, 在参数优化注入瞬间, 比例环节快速响应, 而滤波环节有滞后, 导致输出阶跃变化。

为机组改造提供有力数据支撑和保障。

参考文献

- [1] 广东核电培训中心. 900MW压水堆核电厂系统与设备[M]. 北京: 原子能出版社, 2005.
- [2] 薛弘晖, 刘原, 马永. 计算机控制技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2003.
- [3] 北京广利核系统工程有限公司. 某电厂DCS改造内部计算算法需求规格说明书[Z]. 2024.