

超临界 CFB 机组储水罐水位控制优化

王 琦,胡 磊,侯鹏飞,杨超杰

(山西大学 自动化与软件学院,山西 太原 030013)

摘 要:以山西某电厂 350 MW 超临界 CFB 机组为研究对象,对其储水罐水位控制系统进行了研究和优化。针对储水罐内部水位波动幅度大的缺陷,设计了前馈串级复合控制系统对原有储水罐水位控制系统进行了改进,并进行扰动仿真实验。仿真结果表明,在遇到扰动时改进后的控制系统相比原有控制系统超调量降至 3.2%,调节时间降至 12 min,表现出很强的抗扰能力。

关 键 词:超临界 CFB 机组;储水罐水位控制;前馈串级复合控制系统

中图分类号:TK221

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.08.023

[引用本文格式]王 琦,胡 磊,侯鹏飞,等.超临界 CFB 机组储水罐水位控制优化[J].热能动力工程,2021,36(8):158-166. WANG Qi, HU Lei, HOU Peng-fei, et al. Optimization on water level control of water storage tank of supercritical CFB unit[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(8):158-166.

Optimization on Water Level Control of Water Storage Tank of Supercritical CFB Unit

WANG Qi, HU Lei, HOU Peng-fei, YANG Chao-jie

(School of Automation and Software, Shanxi University, Taiyuan, China, Post Code:030013)

Abstract: Taking a 350 MW supercritical CFB unit in a power plant in Shanxi as the research object, the water level control system of its water storage tank was studied and optimized. Aiming at the defect of large fluctuation range of water level inside water storage tank, a feedforward cascade composite control system was designed to improve the original water level control system of water storage tank, and the disturbance simulation experiment was carried out. The simulation results show that compared with the original control system, the improved control system can reduce the overshoot to 3.2% and the adjustment time to 12 min in case of disturbance, showing a strong anti-disturbance ability.

Key words: supercritical CFB unit, water level control of water storage tanks, feed-forward cascade composite control system

引 言

超临界火电机组不同于亚临界机组,代替汽包采用带有旁路启动系统的直流锅炉完成汽水分离。直流锅炉在启机期间,比较难以实现稳定控制,需要

依赖于锅炉旁路启动系统辅助运行。而在锅炉启动旁路系统的控制中,汽水分离器储水罐水位的控制最为关键^[1-3]。本文以山西某电厂 350 MW 超临界 CFB 机组为例,对直流锅炉储水罐水位控制策略进行了介绍和分析,并且针对现有控制策略的控制品质上的不足,对其控制系统进行了优化与改进。

收稿日期:2020-11-12; 修订日期:2021-07-25

基金项目:国家自然科学基金(U1610116)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China(U1610116)

作者简介:王 琦(1973-),女,河北定州人,山西大学教授。

通讯作者:胡 磊(1997-),男,安徽池州人,山西大学硕士研究生。

1 直流锅炉启动旁路系统

山西某电厂 350 MW 超临界 CFB 机组的直流锅炉启动系统流程如图 1 所示。

直流锅炉启动旁路系统包括给水泵、省煤器、汽水分离器、除氧器、分离器储水罐、储水罐水位调节阀(361 阀)、暖管回路、凝汽器、低压加热器、高压加

热器、水冷壁、凝结水泵以及各部分之间的连接管道等^[4]。

直流锅炉启动旁路系统是为了保证给汽轮机输送的是合格工质,主要过程是进行锅炉的冷态清洗和热态清洗。冷态清洗包括冷态开式清洗和冷态循环清洗,主要是为了清洗沉积在受热面上的杂质、盐分和因腐蚀生成的氧化铁等^[5]。

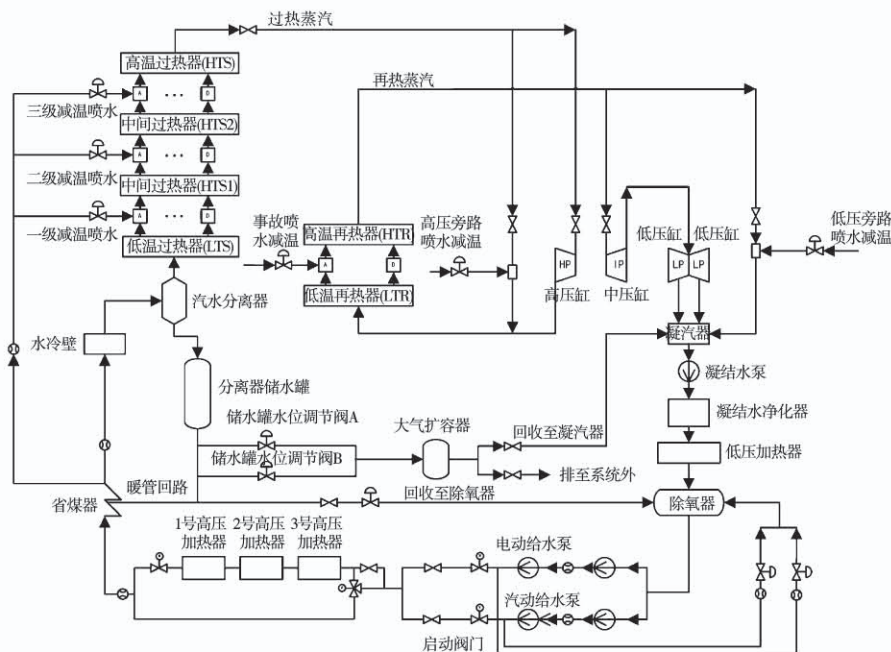


图 1 直流锅炉启动系统流程图

Fig. 1 Flow chart of dc boiler starting system

热态清洗是指在锅炉点火以后当汽水分离器入口温度达到 $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右时,停止锅炉升温升压,通过控制燃料量和储水罐水位调节阀开度维持汽水分离器入口温度稳定,并将清洗水全部排至凝汽器的冲洗过程。至储水罐出口水质合格,热态清洗结束,锅炉才允许继续升温升压,升温速度控制在 $2\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$,直至汽轮机冲转。在直流锅炉的冷热态清洗阶段,储水罐内部一直有积水存在并且调节 361 阀来保证储水罐液位稳定,并防止溢流现象发生^[6-8]。

在锅炉负荷达到 30% 锅炉最大连续蒸发量 (BMCR)、蒸汽压力达到 8.73 MPa 时,锅炉处于干湿态转换过程,没有水进入汽水分离器储水罐内部,随着储水罐液位的降低,361 阀由自动切换为手动,开度逐渐降为零,锅炉最终转变为直流运行模式。

此时,通过控制燃料量和给水量维持一定的水煤比,控制汽水分离器出口蒸汽过热度 ($5\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$),防止干湿态转换反复进行造成汽水分离器和储水罐应力损害。当 361 阀全部关闭以后,关闭储水罐疏水至凝汽器的管道门,投入启动暖管回路,维持暖阀流量^[9]。

其中,储水罐作为直流锅炉启动旁路系统中关键的一个环节,其内部水位控制在锅炉清洗流程中和低负荷运行时具有十分重要的作用。但储水罐水位控制逻辑比较简单,遇到一些扰动时立即切换为手动控制,控制系统存在不足之处。因此,对储水罐水位控制系统直接影响着锅炉的安全启动和低负荷运行^[10-15],其研究和优化具有重要的意义。

2 储水罐水位控制系统

2.1 水位的监测与控制

储水罐水位的控制主要是靠调节两个 361 阀门的开度来实现。直流锅炉的汽水分离器储水罐筒体较长(约 20 m 左右),但是,储水罐内部为防止溢流会设定高、低水位报警,当储水罐水位超出高、低水位限定范围时,运行人员会将 361 阀从自动切为手动控制。高、低水位报警值取决于储水罐的具体结构和安装位置,高水位报警一般情况下设定在离储水罐本体上面入水口下方约 6 m 处(不可低于 1 m),而低水位报警一般在储水罐下部基准面上方 1.5 m 处。储水罐水位的变化主要表现在锅炉上水、冷热态清洗和机组起停阶段,而且与直流锅炉的负荷变化紧密相关,各定值如图 2 所示^[16-17]。

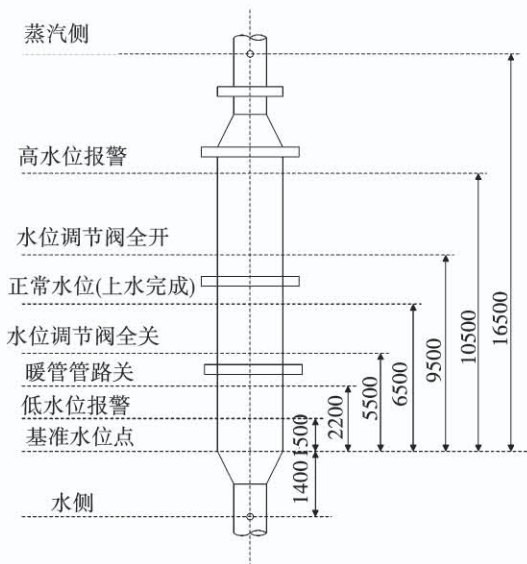


图 2 储水罐各定值对应位置图 (mm)

Fig. 2 Location map of each fixed value of water storage tank (mm)

2.2 水位测量信号的修正

汽水分离器储水罐经过三个变送器传递的液位信号,需要经过汽水分离器储水罐压力修正以后取平均值作为储水罐水位。测量系统如图 3 所示。

2.3 361 阀的开度控制

控制 361 阀开度的函数模块有 F3、F4 和 F5。主蒸汽流量经过折算后进入函数模块 F3,函数模块的输出值作为主蒸汽流量的水位修正信号。储水罐

水位经过主蒸汽流量修正以后经过一阶惯性环节滤波后进入两个函数模块 F4 和 F5,输出值分别对应两个并联的储水罐水位调节阀 A 和 B 的阀门开度。当修正后储水罐水位高于 8 500 mm 并且水位下降速率大于 0.02 时,偏置 -3% 会被加到 A 阀和 B 阀的阀门开度,当修正后储水罐水位低于 8 400 mm 并且水位上升速率大于 0.02 时,负偏置则被复位,当 MFT 动作或主蒸汽流量大于 25% BMCR 时,强制复位负偏置。

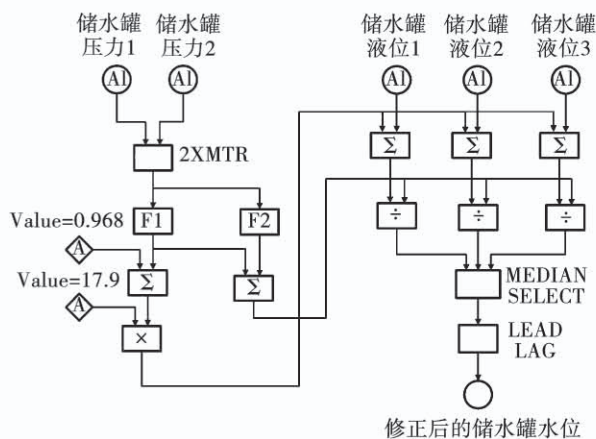


图 3 储水罐水位测量

Fig. 3 Measurement of water level in water storage tank

因为储水罐液位的波动比较大,会对 361 阀进行高频次数的小开度控制,可能造成阀门的损耗。因此,当 A 阀开度指令从小开度到大开度且增加至 10% 时,偏置 0 会被加到 A 阀开度,并且跟踪实际开度指令;当 A 阀开度指令从大开度到小开度且减小至 5% 时,偏置 -10% 会被加到 A 阀开度,并且跟踪实际开度指令。A、B 两个阀门的开度在经过限速以后进入手自动切换站,当分离器出口压力大于 30 MPa 或储水罐水位值坏值时,将储水罐水位控制切换为手动模式。在手动模式下,当修正后的储水罐水位低于 5 500 mm 时,阀门延时全关;当修正后的储水罐水位高于正常水位 9 500 mm 时,阀门延时全开。在自动模式下,输出上述算法计算出来的阀门开度分别作为 A、B 两个阀门的开度^[18-21]。DCS 控制组态如图 4 所示。

2.4 函数模块修正关系

函数模块修正系数曲线如图 5 所示。

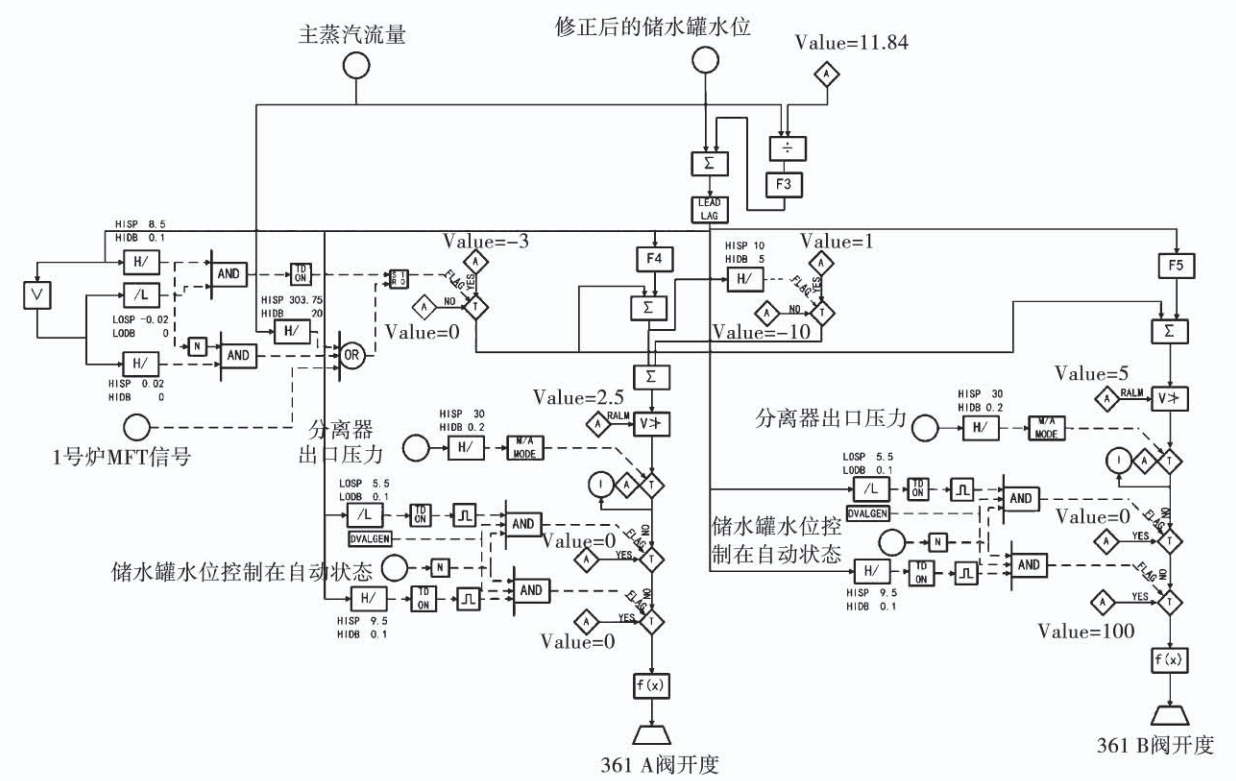


图 4 361 阀的开度控制

Fig.4 Opening control of valve 361

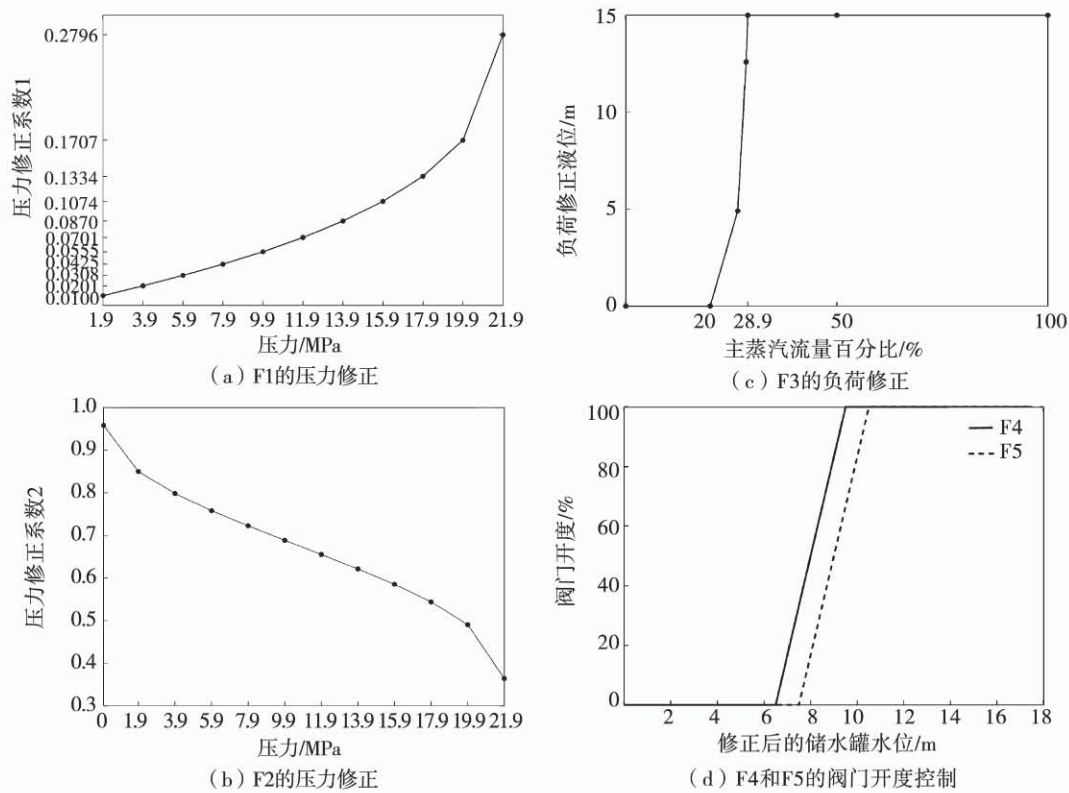


图 5 函数模块修正系数曲线图

Fig.5 Correction coefficient curves of function modules

图 5(a) 是图 3 中函数模块 F1 的压力修正曲线,目的是根据储水罐压力对应得到压力修正系数 1。图 5(b) 是图 3 中函数模块 F2 的压力修正曲线,目的是根据储水罐压力对应得到压力修正系数 2,储水罐液位的三个测点在经过压力修正系数 1 和压力修正系数 2 的一次修正以后,可以避免储水罐水位在测量时产生的“虚假”现象从而导致测量值并非储水罐真实水位的问题。图 5(c) 是函数模块 F3 的负荷修正曲线,目的是利用主蒸汽流量表征机组当前负荷来对压力修正过的储水罐水位进行二次修正,图 5(d) 中 F4 是储水罐水位调节阀 A 的水位-开度控制曲线,F5 是储水罐水位调节阀 B 的水位-开度控制曲线,两个阀门因为出厂时的各项性能指标有所差异,所以在储水罐水位超过 6.5 m 时,设定灵敏度较高的 A 阀作为先开调节阀,水位超过

7.5 m 时再打开 B 阀进行调节。

3 储水罐水位控制模型

3.1 模型的建立

根据该电厂的储水罐水位控制 DCS 组态以及电厂运行人员根据实际工况来设定的经验参数,利用 MATLAB\Simulink 平台搭建了一个基于储水罐水位控制逻辑的仿真模型,该模型主要由动压修正、负荷修正、保护分路、手动自动切换和阀门开度函数控制几部分组成,如图 6 所示。

其中, p 是指汽水分离器储水罐压力测点的历史数据输入, L_1 、 L_2 和 L_3 是指汽水分离器储水罐液位的 3 个测点的历史数据输入, L_4 是指主蒸汽流量的历史数据输入。

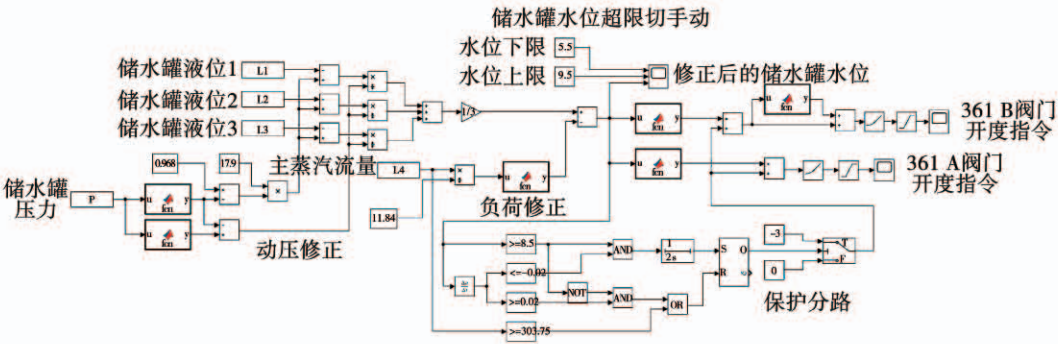


图 6 储水罐水位控制仿真模型

Fig. 6 Simulation model of water tank level control

3.2 数据的选取

通过观测该电厂 2 号机组 2020 年 9 月期间的运行参数,发现在 16 日 2 号机组有一个启机过程。由图 7 可知,机组在 16 日 17:11:00 以后负荷升至 105 MW,机组的直流锅炉处于干湿态转换过程,所以选取该时间点之前一段时间内锅炉处于湿态且 361 阀控制储水罐水位的相关数据。

从电厂厂级信息监控系统(SIS)中,以 1 min 为采样间隔导出该电厂在 9 月 16 日某段时间内锅炉清洗和启机时的汽水分离器储水罐压力、液位、主蒸汽流量以及两个 361 阀门开度的现场历史数据以后,输入进搭建好的模型进行验证和分析。

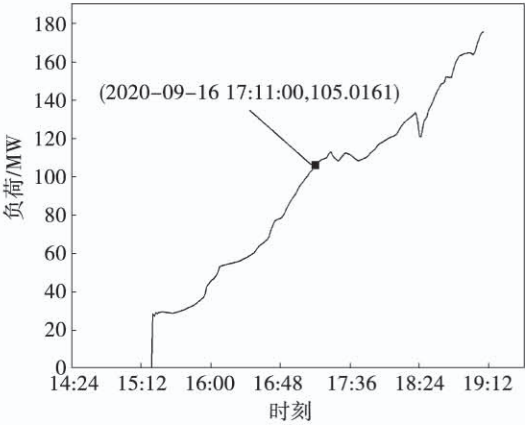


图 7 该电厂 2 号机组负荷曲线

Fig. 7 Load curve of unit No. 2 of the power plant

3.3 模型的验证和分析

当修正后的储水罐水位处于 5.5 ~ 9.5 m 之间时,两个 361 阀门的开度在 0 ~ 100% 之间变化且投入自动运行状态,超出这个水位范围阀门开度为 0 或 100%。选取这个时间段内的数据并观察修正后的储水罐水位变化情况,同时将仿真模型输出的两个 361 阀即 A 阀和 B 阀的开度控制指令与现场导出的两个 361 阀门的实际开度进行对比,如图 8 所示。

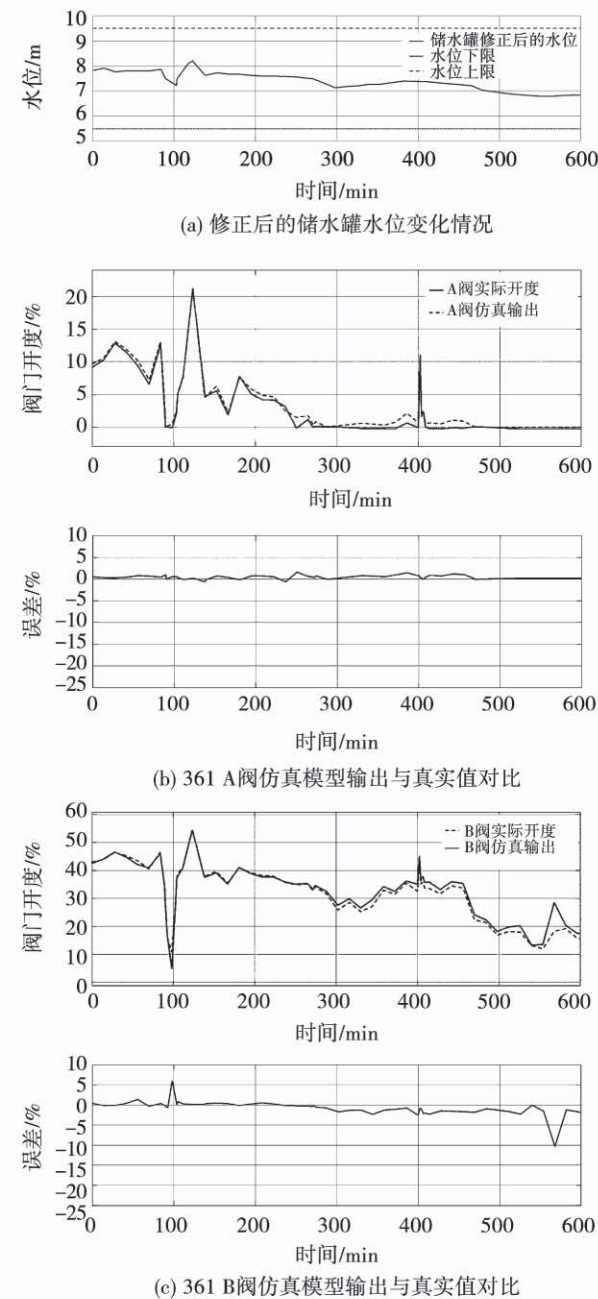


图 8 模型的输出

Fig.8 Output of the models

由图 8 可知,两个 361 阀门的仿真模型输出很好地跟踪了实际开度,变化趋势一致,误差较小,基本上达到了重合的效果。

由图 8(b)可知,361 A 阀的仿真模型输出与实际开度的误差曲线在 -0.64 ~ 1.63 之间上下波动,模型拟合效果极好。

由图 8(c)可知,361 B 阀的仿真模型输出与实际开度的误差曲线基本上都收敛于零,但是在 100 和 550 min 这两个时刻阀门调节的超调量比较大,调节误差最高时达到了 6% 和 10%,调节精度低。

由图 8(a)可知,储水罐水位在 100 min 附近时段内的波动幅度大,控制液位稳定效果差,超调量达到了 5.1%,这是因为储水罐水位控制是通过基于专家经验的预制函数来控制阀门开度,属于开环控制,没有构建基于水位偏差的反馈控制,控制系统抗扰动性能较差,一旦遇到扰动,储水罐液位控制效果差。

4 储水罐水位控制系统设计

对现有储水罐水位控制系统进行了改进,建立带有 PID 控制器的前馈串级储水罐水位控制系统,如图 9 所示。

为验证控制系统对储水罐水位在主蒸汽流量、给水流量各扰动单独或同时作用下的自适应抑制调节能力,在 MATLAB/Simulink 平台上对此控制系统进行扰动仿真测试。

从 DCS 中采集该电厂 2 号机组在 30% 额定负荷工况下运行一定时间的给水流量、储水罐水位以及主蒸汽流量数据,将其用于储水罐水位控制模型的参数辨识中。

首先按照经验分别确定给水流量与储水罐水位之间的传递函数 $G_1(s)$ 、主蒸汽流量与储水罐水位之间的传递函数 $G_2(s)$ 和进水调节阀与给水流量的传递函数 $G_3(s)$ 的表达式分别为^[22-24]：

$$G_1(s) = \frac{k_1}{s(T_1s + 1)}e^{-\tau_1s}$$

$$G_2(s) = \frac{k_2s - k_3}{s(T_2s + 1)}e^{-\tau_2s}$$

$$G_3(s) = k_4$$

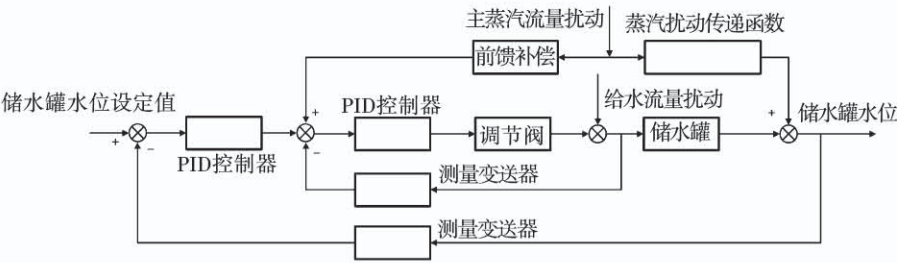


图 9 带有 PID 控制器的前馈串级储水罐水位控制系统

Fig.9 Water level control system of feedforward cascade water storage tank with PID controller

然后对现场采集数据进行数据滤波、零初始值等数据预处理后,设定认知因子 $C_1 = 2.05$,社会因子 $C_2 = 2.05$,收缩因子 $\gamma = 0.729\ 8$,利用改进 PSO 算法寻优得到系统最佳的模型参数区间^[25]:

$$k_{(1-4)} \in [-5\ -5\ -5\ 0] \sim [5\ 5\ 5\ 20]$$

$$T_{(1-2)} \in [0\ 0] \sim [50\ 50]$$

$$\tau_{(1-2)} \in [2\ 2] \sim [20\ 20]$$

筛选其中辨识最佳的一次结果作为最终确定的各传递函数:

$$G_1(s) = \frac{0.038}{31s^2 + s}e^{-6s}$$

$$G_2(s) = \frac{3.1s - 0.038}{1.686s^2 + 0.0728s}$$

$$G_3(s) = 15$$

5 抗扰动仿真分析

在 MATLAB/Simulink 平台上对改进的控制系统进行抗扰动仿真分析,该控制系统主要由主调节回路和副调节回路两部分组成。主调节回路是抑制主蒸汽流量扰动对储水罐水位进行控制,副调节回路是抑制给水流动扰动对给水流量进行控制,前馈控制器采用动态前馈,前馈补偿系数为0.15,给水流量和储水罐水位的测量变送器的系数均为 0.075。先对控制系统的副回路 PID 控制器参数进行整定,比例系数 $K_p = 0.7$,积分系数 $K_i = 0.000\ 69$ 。再对控制系统的主回路 PID 控制器参数进行整定,比例系数 $K_p = 0.007\ 4$,积分系数 $K_i = 4.09$,微分系数 $K_d = 19.03$ 。

给储水罐水位控制系统施加一个单位为 8 的阶跃信号作为水位设定值 8 m 的量化值,当水位达到 8 m 并且进入稳定状态以后,在 30 min 时施加一个单位为 1 的给水流量阶跃干扰,仿真结果如图 10 所示。

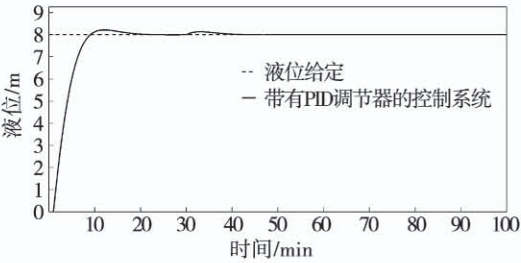


图 10 给水流量扰动下的仿真曲线

Fig.10 Simulation curve under disturbance of feed water flow

去除给水流量阶跃干扰的影响,保持控制系统其他参数不变,在 60 min 时施加一个单位为 1 的主蒸汽流量阶跃干扰,仿真结果如图 11 所示。

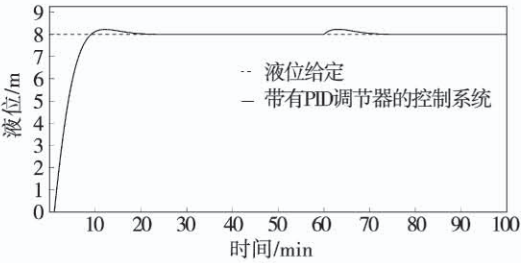


图 11 主蒸汽流量扰动下的仿真曲线

Fig.11 Simulation curve under disturbance of main steam flow

为验证控制系统在同时遇到内扰和外扰的情况下的抗扰调节能力,在 80 min 时,同时施加一个单位为 1 的主蒸汽流量阶跃干扰和一个单位为 1 的给水流量阶跃干扰,仿真结果如图 12 所示。

因此,由表 1 可知,储水罐水位控制系统的水位在受到给水流量和主蒸汽流量单独或同时干扰时表现出很好的抗扰调节能力,通过闭环控制 361 阀的开度快速恢复原有的平衡状态,相比改进前的储水

罐水位控制系统具有调节速度快、超调量低和调节精度高的优点,对扰动体现了很好的抑制性能。

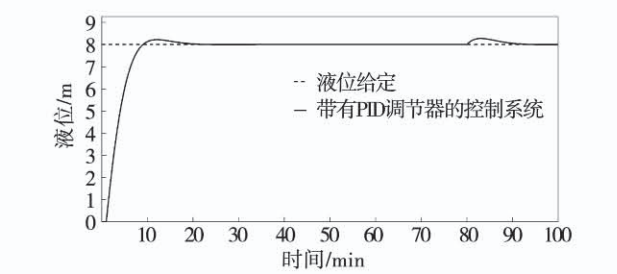


图 12 给水流量和主蒸汽流量扰动下的仿真曲线
Fig. 12 Simulation curve under disturbance of feed water flow and main steam flow

表 1 仿真结果对比表
Tab. 1 Comparison of simulation results

系统类型	扰动类型	调节时间/min	超调量/%
改进前的储水罐水位控制系统	阀门开度控制误差	80	5.1
改进后的储水罐水位控制系统	给水流量扰动	11	1.6
改进后的储水罐水位控制系统	主蒸汽流量扰动	16	2.8
改进后的储水罐水位控制系统	给水流量和主蒸汽流量同时扰动	12	3.2

6 结 论

对山西某电厂的储水罐水位控制系统的运行逻辑进行了分析,并根据其控制逻辑搭建了储水罐水位控制仿真模型。选取湿态下相关测点数据输入模型进行分析,发现了原有储水罐水位控制系统控制品质上的不足,储水罐的内部水位波动幅度大。对其控制系统进行了改进,有针对性地设计了前馈串级复合控制系统。

仿真测试结果表明,在给水流量和主蒸汽流量同时扰动的情况下,超调量达到 3.2%,调节时间是 12 min,相比原有储水罐水位控制系统在遇到扰动时超调量 5.1%、调节时间 80 min,表现出很强的抗扰性能和快速调节的能力,已经在控制品质上有了显著的提高,具有不错的动态品质。

在电厂实际运行过程中,给水流量和主蒸汽流

量变化会导致水位信号不准确,对控制品质带来不利的影响,所以该控制系统表现出的很强的抗扰能力,保证了锅炉在安全启动和低负荷运行时的安全与稳定,具有一定的实用价值和应用前景。

参考文献:

[1] 吴延宾. 1 000 MW 超超临界机组直流锅炉水位控制[J]. 热力发电, 2007(7): 52-55.
WU Yan-bin. Once-through boiler water level control of 1 000 MW ultra-supercritical unit[J]. Thermal Power Generation, 2007(7): 52-55.

[2] 中国动力工程学会. 火力发电设备技术手册第三卷自动控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000.
Chinese society of power engineering. Thermal power equipment technical manual Vol. 3 automatic control[M]. Beijing: Machinery Industry Publishing, 2000.

[3] 卢斗, 林正春, 代茂林. 超临界直流锅炉汽水分离器储水罐水位的控制[J]. 发电设备, 2006(1): 58-62.
LU Dou, LIN Zheng-chun, DAI Mao-lin. Water level control of water storage tank of supercritical once-through boiler steam-water separator[J]. Power Equipment, 2006(1): 58-62.

[4] 程蔚萍, 吴光明. 超超临界直流锅炉启动系统及储水罐水位控制[J]. 安徽电气工程职业技术学院学报, 2007(3): 77-80.
CHENG Wei-ping, WU Guang-ming. Ultra-supercritical once-through boiler start-up system and water storage tank water level control[J]. Journal of Anhui Vocational College of Electrical Engineering, 2007(3): 77-80.

[5] 韩新春. 直流锅炉汽水分离器储水罐水位异常原因分析及预控[J]. 神华科技, 2018, 16(6): 61-63.
HAN Xin-chun. Cause analysis and pre-control of abnormal water level in water storage tank of steam-water separator of once-through boiler[J]. Shenhua Science and Technology, 2018, 16(6): 61-63.

[6] 刘继则. 邹县发电厂 2 × 1 000 MW 超超临界机组锅炉启动系统给水控制系统特点分析[C]//中国超超临界火电机组协作网第二届年会, 2006.
LIU Ji-ze. Analysis of the characteristics of the feedwater control system of the boiler start-up system of 2 × 1 000 MW ultra-supercritical units in Zouxian power plant[C]//The 2nd Annual Meeting of China Ultra-Supercritical Thermal Power Unit Cooperative Network, 2006.

[7] 梁刚, 马玉疆. 超临界直流锅炉储水罐水位控制策略浅析[C]//中国超超临界火电机组协作网第二届年会, 2006.
LIANG Gang, MA Yu-jiang. Analysis of water level control strategy of supercritical once-through boiler water tank[C]//The 2nd Annual Meeting of China Ultra Supercritical Thermal Power Unit Collaboration Network, 2006.

- [8] 杨 锐,刘海鹏. 直流锅炉带 BCP 及储水罐水位控制浅谈 [C]//中国超超临界火电机组协作网第二届年会,2006.
- YANG Rui, LIU Hai-peng. Discussion on once-through boiler with BCP and water level control of water storage tank [C]//The 2nd Annual Meeting of China Ultra-Supercritical Thermal Power Unit Cooperation Network, 2006.
- [9] 翟小俊,宋海峰,赵耀兴. 350 MW 超临界 CFB 锅炉给水运行调整控制浅析[J]. 山东工业技术, 2018(22): 157, 218.
- ZHALI Xiao-jun, Song Hai-feng, ZHAO Yao-xing. Analysis of 350 MW supercritical CFB boiler feedwater operation adjustment control[J]. Shandong Industrial Technology, 2018(22): 157, 218.
- [10] 张要朋. 一种进口锅炉水位控制的改进[J]. 现代工业经济和信
息化, 2020, 10(5): 33-34.
- ZHANG Yao-peng. Improvement of an imported boiler water level control[J]. Modern Industrial Economy and Information Technology, 2020, 10(5): 33-34.
- [11] 杨广鑫,刘占查. 循环流化床锅炉汽包水位的智能控制[J]. 氯碱工业, 2020, 56(4): 34-37, 40.
- YANG Guang-xin, LIU Zhan-cha. Intelligent control of circulating fluidized bed boiler drum water level[J]. Chlor-Alkali Industry, 2020, 56(4): 34-37, 40.
- [12] 潘曰志,潘广旭. 燃煤电厂汽包锅炉给水控制优化方案[J]. 电力设备管理, 2020(3): 87-89.
- PAN Yue-zhi, PAN Guang-xu. Optimization scheme for feedwater control of drum boiler in coal-fired power plant[J]. Power Equipment Management, 2020(3): 87-89.
- [13] 宋莉莉,马 莉,陈 莉. 粒子群算法在汽包锅炉水位控制系统中的应用研究[J]. 工业控制计算机, 2020, 33(1): 39-41.
- SONG Li-li, MA Li, CHEN Li. Application research of particle swarm optimization in water level control system of drum boiler[J]. Industrial Control Computer, 2020, 33(1): 39-41.
- [14] 刘 强. 汽包“虚假水位”的产生机理和控制策略分析[J]. 机电信息, 2019(36): 112-113.
- LIU Qiang. Analysis of the generation mechanism and control strategy of the "false water level" of the steam drum[J]. Electro-mechanical Information, 2019(36): 112-113.
- [15] 刘 涛,张 爽. 基于 DMC-PID 算法的 CFB 锅炉水位控制系统仿真研究[J]. 现代工业经济和信
息化, 2019, 9(10): 22-25.
- LIU Tao, ZHANG Shuang. Simulation research of CFB boiler water level control system based on DMC-PID algorithm[J]. Modern Industrial Economics and Information, 2019, 9(10): 22-25.
- [16] 陈 娟. 基于模糊 PID 控制的锅炉汽包水位系统研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2019.
- CHEN Juan. Research on boiler drum water level system based on fuzzy PID control[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2019.
- [17] 柳 哲. 锅炉汽包水位测量与控制[J]. 科技风, 2019(17): 174.
- LIU Zhe. Measurement and control of boiler drum water level[J]. Technology Wind, 2019(17): 174.
- [18] 冯 茜,郭卫国,袁景辉,等. 锅炉汽包水位智能控制系统仿真研究[J]. 装备维修技术, 2019(2): 16-17.
- FENG Qian, GUO Wei-guo, YUAN Jing-hui, et al. Simulation research on intelligent control system of boiler drum water level[J]. Equipment Maintenance Technology, 2019(2): 16-17.
- [19] 汪 源. 循环流化床锅炉汽包水位控制系统设计与研究[D]. 兰州:兰州理工大学, 2019.
- WANG Yuan. Design and research of circulating fluidized bed boiler drum water level control system[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2019.
- [20] 刘明华,沈小伟,周建新,等. 基于均匀设计的锅炉汽包水位控制系统参数整定[J]. 华北理工大学学报(自然科学版), 2019, 41(1): 107-111.
- LIU Ming-hua, SHEN Xiao-wei, ZHOU Jian-xin, et al. Parameter tuning of boiler drum water level control system based on uniform design[J]. Journal of North China University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 41(1): 107-111.
- [21] 刘 倩,石红瑞. 基于数据驱动的锅炉汽包水位串级控制[J]. 石油化工自动化, 2018, 54(6): 50-54.
- LIU Qian, SHI Hong-rui. Data-driven boiler drum water level cascade control[J]. Petrochemical Industry Automation, 2018, 54(6): 50-54.
- [22] 孙 明,韩 璞,张 妍,等. 600 MW 汽包炉给水系统的模型辨识[J]. 计算机仿真, 2016, 33(2): 433-437.
- SUN Ming, HAN Pu, ZHANG Yan, et al. Model identification of feed water system for 600 MW steam duster boiler[J]. Computer Simulation, 2016, 33(2): 433-437.
- [23] 靳晓慧. 600 MW 超临界发电机组给水系统的建模与优化控制[D]. 北京:华北电力大学, 2016.
- JIN Xiao-hui. Modeling and optimal control of water supply system of 600 MW supercritical generator[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [24] 毛求福. 超临界机组给水系统建模与优化控制的研究[D]. 北京:华北电力大学, 2019.
- MAO Qiu-fu. Research on modeling and optimal control of water supply system of supercritical init[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [25] 曹振乾,印 江,张津华. 基于改进粒子群算法的主蒸汽温度系统辨识[J/OL]. 系统仿真学报: 1-8 [2020-11-09]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0609>.
- CAO Zhen-qian, YIN Jiang, ZHANG Jin-hua. Identification of main steam temperature system based on improved particle swarm algorithm[J/OL]. Journal of System Simulation: 1-8 [2020-11-09]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.20-0609>.