

# 超超临界机组分离器水位模糊控制仿真研究

颜 帅, 潘维加, 吴天宇, 阮 琦

(长沙理工大学 电气与信息工程学院, 长沙 410114)

**摘要:** 超超临界机组汽水分离器在机组启动及高、低负荷下的运行状态不同, 所起到的作用也不同; 在汽水分离器湿态运行模式下, 分离器内为汽水混合物, 分离器起汽水分离作用, 因此通过控制给水流量来控制分离器水位对机组的稳定运行起着重要作用; 通过设计模糊控制器来实现汽水分离器水位控制, 并采用 MATLAB 仿真软件对控制系统进行仿真, 得出相关参数和运行曲线; 结果表明, 采用模糊控制能够有效的避免或削弱 PID 控制中超调的现象, 且具有较强的鲁棒性, 有效地提高了控制品质。

**关键词:** 超超临界机组; 汽水分离器; 水位控制; 模糊控制; MATLAB 仿真

## Simulation of Fuzzy Control for Water Level of Steam Separator in Ultra Supercritical Units

Yan Shuai, Pan Weijia, Wu Tianyu, Ruan Qi

(College of Electrical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

**Abstract:** The operating status of the steam separator of ultra supercritical units is different during unit start-up and high or low load; and the role of the steam separator is also different. In the steam separator wet operating mode, steam water mixtures co-exist with superheated steam in the separator. The separator plays the role in separating superheated steam from the steam water mixtures. Thus, by controlling feedwater flow to control water level of the separator for stable operation of the unit plays an important role. In this paper, the fuzzy controller is designed to control the water level of the steam separator. And using MATLAB simulation software to control simulate the system, drawing relevant parameters and operating curve. The results show that the fuzzy control can effectively prevent or impair the overshoot of the PID controller, and has a strong robustness, this improved the quality of control effectively.

**Keywords:** ultra supercritical units; steam separator; water level control; fuzzy control; MATLAB simulation

## 0 引言

超超临界机组系统中, 汽水循环至关重要。循环水经炉水冷壁加热, 形成过热蒸汽进入汽轮机推动汽轮机转子旋转做功发电。在超超临界机组启动阶段, 由于汽水分离器的运行状态不同, 导致在湿态模式和干态模式运行及其切换时给水控制十分复杂。在启动和低负荷阶段时, 汽水分离器运行在湿态模式, 分离器起汽水分离作用, 分离器中共同存在汽水混合物, 因此维持分离器水位的稳定对机组启动及低负荷时的稳定运行起着至关重要的作用。文献 [1] 介绍了某电厂超超临界机组的给水控制系统, 作者提出了采用串级 PID 控制并运用状态反馈控制改善给水控制系统的方法。文献 [2] 提出了采用 PI 控制器及单独的控制程序分别对锅炉再循环水流量调节阀、WDC 阀和锅炉再循环泵暖管疏水排放来阀进行控制汽水分离器水位的方法, 未给出具体实现方案。文献 [3] 提出了某电厂超超临界机组采用 360 阀和 361 阀对分离器储水罐水位进行控制, 分别给出了利用 PI 控制器调节两个阀门开度的控制方案, 然而对两个阀门之间的相互切换方法并未给出。上述研究揭示了超超临界机组的动态特性, 以及汽水分离器水位调节阀

各自的调节方案, 基本都是利用了较为传统的 PID 调节器进行控制, 在分离器湿态运行下锅炉负荷上升时分离器水位调节阀之间的切换均处于手动操作, 并未实现自动切换。

本文综合考虑分离器结构特点和扰动因素的影响, 利用分离器的水质参数作为选择工质循环通道的依据并实现不同循环通道控制系统的切换, 同时采用模糊控制器对不同循环通道下的分离器水位进行控制并利用 MATLAB 仿真软件进行仿真研究。指出了该控制系统设计的主要特点, 给出了控制器最佳的整定参数和运行曲线, 与传统 PID 控制器设计的控制系统的仿真曲线进行比较, 最终得出结论。

## 1 超超临界机组汽水分离器水位控制系统分析

本文以某火电厂超超临界机组为研究对象, 每台机组配置 2 台 50% BMCR (锅炉最大连续出力) 汽动给水泵及其前置泵和 1 台 35% BMCR 的电动给水泵及其前置泵; 水冷壁采用螺旋管圈; 采用带再循环泵式的内置式分离器启动系统。机组配有 2 个汽水分离器, 分开布置, 和 1 个储水罐通过连接管连接。汽水分离器和储水罐端部均采用锥形封头结构, 分离器内设置阻水装置和消旋器。汽水分离器尺寸规格为  $\Phi 1060 \times 120$ , 总高度为 4.7 m。分离器储水罐尺寸规格为  $\Phi 1102 \times 126$ , 总高度为 24 m。

为回收工作介质及能量, 超超临界机组配置了启动和低负荷阶段的分离器工质循环系统, 如图 1 所示。超超临界机组冷态启动, 汽水分离器水位控制通常分为 3 个阶段: 第一阶段为从启动到 15% 负荷, 水质参数较低, 需要大流量的供水, 分

收稿日期: 2015-08-07; 修回日期: 2015-09-07。

**作者简介:** 颜 帅 (1988-), 男, 山东济宁人, 硕士研究生, 主要从事火电厂生产过程智能控制方向的研究。

潘维加 (1959-), 男, 吉林省吉林市人, 教授, 主要从事热工自动化与火电厂过程控制方向的研究。

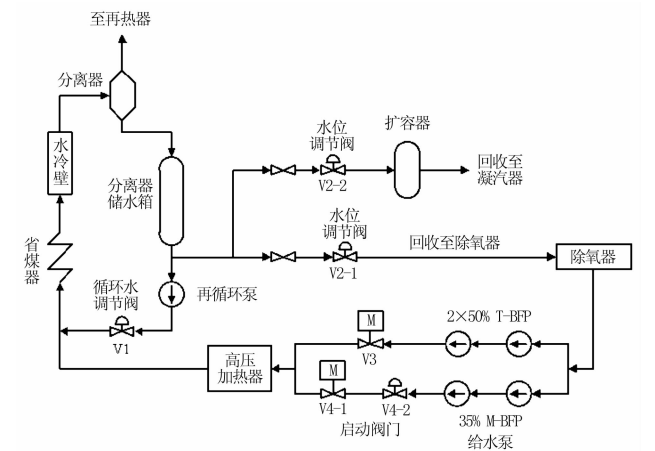


图 1 超超临界机组分离器工质循环系统

分离器水位由调节阀 (V2-2) 进行调节; 第二阶段为从 15% 到 25% 负荷, 水质参数有了提升, 分离器水位由调节阀 (V2-1) 进行调节; 第三阶段为从 25% 到 29% 负荷, 炉内水循环, 水质参数进一步提升直到干态运行, 调节阀 (V1) 控制循环水流量。

在第一第二阶段, 控制汽水分离器水位, 湿态运行下的汽水分离器与汽包锅炉类似, 其数学模型可以简化为无自衡能力的双容对象, 是一个二阶系统; 在第三阶段, 汽水分离器水位不再需要控制, 转而控制循环水流量, 被控对象为调节阀和流量管道, 其传递函数为一阶惯性环节。该电厂对 3 个阶段进行单独控制, 分别采用传统 PID 控制器调节 3 个调节阀开度, 通过操作员的观察进行人工切换循环通道。

本文利用分离器的水质参数为依据, 选择不同的循环通道, 分别对分离器水位进行控制, 并实现不同循环通道的自动切换。汽轮机对过热蒸汽的要求较高, 锅炉进入直流运行前必须要得到合格的蒸汽参数, 因此在工质进入过热系统前应保持较好的品质参数。分离器内的水质参数主要为工质的温度  $T$  和压力  $P$ , 本文通过判断工质温度和压力及机组负荷是否达到切换标准来实现循环通道的自动切换。

## 2 超超临界机组汽水分离器水位模糊控制设计方案

### 2.1 汽水分离器水位模糊控制系统设计

根据机组负荷  $F$  及汽水分离器内的水质参数温度  $T$  和压力  $P$  作为判断循环通道切换的标准, 存在着两个切换条件, 设置为  $T_1$ 、 $T_2$  和  $P_1$ 、 $P_2$ , 其中  $T_1 < T_2$ ,  $P_1 < P_2$ 。如图 1, 本文只考虑锅炉启动阶段, 随着水质参数逐渐上升:

1) 当机组负荷低于 15%,  $T, P$  满足  $T < T_1$  且  $P < P_1$  时, 选择回收至凝汽器循环通道, 由调节阀 (V2-2) 控制分离器水位;

2) 随着机组负荷上升, 当机组负荷大于等于 15% 且小于 25%,  $T, P$  满足  $T_1 \leq T \leq T_2$  且  $P_1 \leq P \leq P_2$  时, 切换到回收至除氧器循环通道, 由调节阀 (V2-1) 控制分离器水位, 并关闭调节阀 (V2-2);

3) 随着机组负荷进一步上升, 当机组负荷大于等于 25% 且小于 29%, 满足  $T \geq T_2$  且  $P \geq P_2$  时, 切换到再循环泵通道, 由调节阀 (V1) 控制循环水流量, 并关闭调节阀 (V2-

1)。

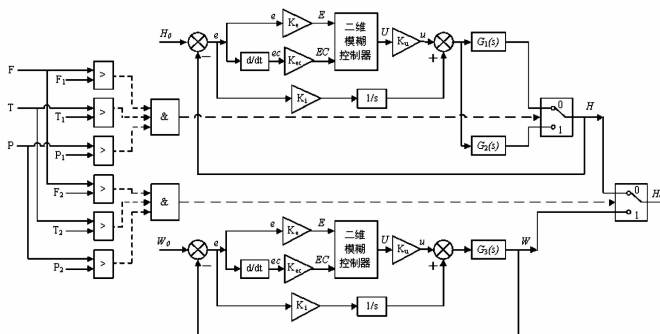


图 2 汽水分离器水位模糊控制方案原理图

汽水分离器水位模糊控制系统原理如图 2 所示, 其中  $G_1(s)$ 、 $G_2(s)$ 、 $G_3(s)$  分别为 3 个循环通道被控对象的传递函数;  $F$  为机组负荷,  $F_1 = 15\%$ ,  $F_2 = 25\%$ ,  $T$  和  $P$  分别为汽水分离器工质温度和压力的实时测量值, 在与切换条件进行比较后选择工质循环通道。由于模糊控制器在本质上为 PD 调节, 不能消除误差, 因此为了达到抗扰目的, 本文对模糊控制器并联一个积分环节。 $K_e$  为误差量化因子,  $K_{ec}$  为误差变化率量化因子,  $K_u$  为控制量化因子,  $K_i$  为并联积分环节的积分常数。

### 2.2 模糊控制器设计

在单变量模糊控制器 (SVFC) 中, 采用二维模糊控制器。

二维模糊控制器选择汽水分离器的实际水位  $H$  与水位设定  $H_0$  的偏差  $e = H_0 - H$  及其变化率  $ec$  作为输入变量, 把送入执行器的控制信号  $u$  作为输出变量。

偏差  $e$  及其变化率  $ec$  的基本论域为  $[-0.2, 0.2]$ 。控制量  $u$  的基本论域为  $[-0.2, 0.2]$ 。

为提高控制精度, 在设计模糊子集时将  $e$  和  $ec$  均分为 7 个模糊集: 负大 (NB), 负中 (NM), 负小 (NS), 零 (ZO), 正小 (PS), 正中 (PM), 正大 (PB); 将  $u$  也分为 7 个模糊集: 负大 (NB), 负中 (NM), 负小 (NS), 零 (ZO), 正小 (PS), 正中 (PM), 正大 (PB)。

在设计模糊控制器时, 模糊控制器均选择为 Mamdani 型, 输入信号和输出信号的隶属度函数均采用三角形函数。这种设计可以较好地掌握变量的变化趋势, 在适当的参数设置下达到合适的控制效果。

根据控制经验, 建立模糊规则表:

表 1 模糊规则表

U	E						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
EC	NB	NB	NB	NM	NM	ZO	ZO
	NM	NB	NB	NM	NS	ZO	ZO
	NS	NM	NM	NS	ZO	PS	PS
	ZO	NM	NS	ZO	PS	PS	PM
	PS	NS	NS	ZO	PS	PM	PM
	PM	ZO	ZO	PS	PM	PB	PB
	PB	ZO	ZO	PS	PM	PB	PB

模糊规则如表 1 所示, 为了获得较为准确的控制量, 要求能够很好地表达输出隶属度函数的计算结果, 采用重心法进行反模糊化。

### 3 超超临界机组汽水分离器水位控制仿真与比较

#### 3.1 汽水分离器水位模糊控制系统仿真

本文通过 MATLAB 仿真软件对控制系统进行仿真, 根据文献 [8] 可以将 3 个工质循环通道被控对象的传递函数近似为:

$$G_1(s) = \frac{0.032}{30s^2 + s} \quad (1)$$

$$G_2(s) = \frac{0.035}{22s^2 + s} \quad (2)$$

$$G_3(s) = \frac{1}{15s + 1} \quad (3)$$

其中:  $G_1(s)$  和  $G_2(s)$  为同一被控对象的变参数传递函数。

利用 Simulink 构建汽水分离器水位模糊控制系统仿真模型, 如图 3 所示。在仿真过程中,  $F, T, P$  为汽水分离器工质温度和压力的实时测量值。在 Simulink 仿真过程中, 采用直接给定  $F, T$  和  $P$  的值的方法, 以便得出不同通道的控制结果。 $H_0$  为分离器水位给定值,  $W_0$  为流量给定值;  $\Delta W_1$  和  $\Delta W_2$  为给水扰动, 即内扰。Switch1 和 Switch2 为切换选择开关, 通过逻辑判断实现通道选择: 若逻辑输入为 1 选择下通道; 否则选择上通道。

#### 3.2 汽水分离器水位控制系统模糊控制与传统 PID 控制比较

利用 Simulink 构建汽水分离器水位系统 PID 控制仿真模型, 其仿真与图 3 类似, 将图 3 中的模糊控制器替换为 PID 控制器即可, 其他参数不变。

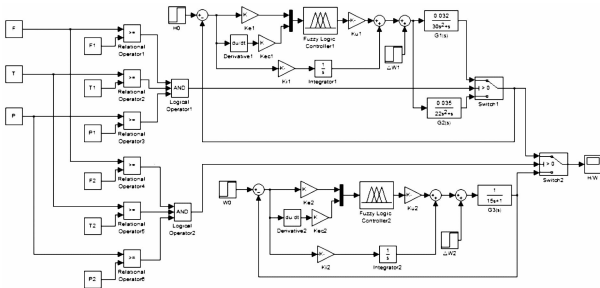


图 3 汽水分离器水位模糊控制系统仿真图

1) 设置汽水分离器水位给定值  $H_0 = 0.2$ , 循环水流量给定值  $W_0 = 0.2$ ; 仿真时间为 600 s。通过给定  $F, T$  和  $P$  的值, 并运行仿真, 可以得到如下结果: 当负荷  $F$  小于 15%, 给定的  $T$  和  $P$  满足  $T < T_1$  且  $P < P_1$  时, 切换器 1 (Switch1) 逻辑输出为 0, 系统选择  $G_1(s)$  回路, 由调节阀 (V2-2) 调节分离器水位, 此时得到的仿真曲线如图 4 (a) 所示; 当负荷  $F$  大于等于 15%, 小于 25%, 给定的  $T$  和  $P$  满足  $T_1 \leq T \leq T_2$  且  $P_1 \leq P \leq P_2$  时, 切换器 1 (Switch1) 逻辑输出为 1, 切换器 2 (Switch2) 逻辑输出为 0, 系统选择  $G_2(s)$  回路, 由调节阀 (V2-1) 调节分离器水位, 此时得到的仿真曲线如图 4 (b) 所示; 当负荷  $F$  大于 25%, 给定的  $T$  和  $P$  满足  $T \geq T_2$  且  $P \geq P_2$  时, 切换器 2 (Switch2) 逻辑输出为 1, 系统选择  $G_3(s)$  回路, 由调节阀 (V1) 调节循环水流量, 此时得到的仿真曲线如图 4 (c) 所示。图中, 实线为模糊控制曲线, 虚线为 PID 控制曲线。此时, 分离器水位 PI 控制器的最优参数为  $K_p = 0.95, K_i = 0.001$ , 模糊控制器的最优参数为  $K_e = 2, K_{ec} = 2, K_u = 0.4$ , 并联的积分最优参数为  $K_i = 0.001$ ; 循环水流量 PI 控制器的最优参数为  $K_p = 1.2, K_i = 0.1$ , 模糊控制器的最优

参数为  $K_e = 2, K_{ec} = 2, K_u = 0.4$ , 并联的积分最优参数为  $K_i = 0.05$ 。

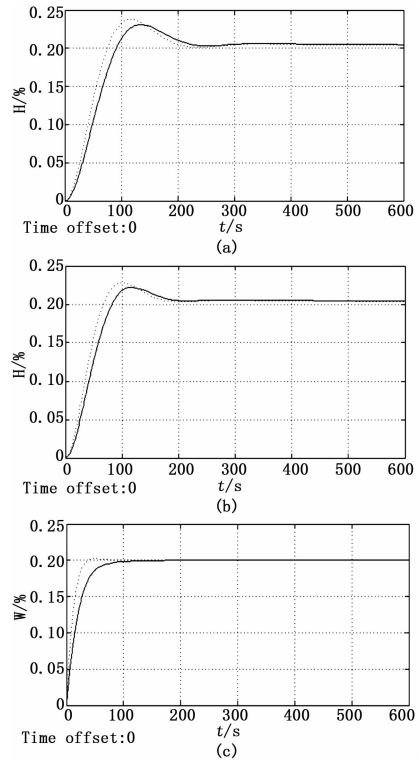


图 4 给定值为 20% 时的仿真曲线图

从图中可以看出: 两种控制系统的分离器水位超调量均低于 20%, 且模糊控制比 PID 控制超调略小。系统稳定时间基本相同, 图 4 (a) 中约为 230 s, 图 4 (b) 中约为 200 s。循环水流量 PID 控制略有超调, 模糊控制无超调, 稳定时间均约为 100 s。由此可知模糊控制具有较好的抗超调能力。

2) 设置分离器水位和循环水流量均加 10% 的给水扰动, 即  $\Delta W_1 = \Delta W_2 = 0.1$ ; 仿真时间为 2000 s。运行仿真, 3 个通道的内扰响应曲线如图 5 所示。其中, 为便于观察, 循环水流量的仿真时间改为 300 s。

从图中可以看出: 加入 10% 的给水扰动时, PID 控制与模糊控制系统均能够恢复到 0, 且本文设计的模糊控制能够较 PID 控制略快的恢复稳定, 具有较好的抗内扰能力。其中, 从图 4 (c) 中可以看出, 系统在短时间内就能恢复稳定, 说明无论是 PID 控制, 还是本文设计模糊控制对于一阶惯性环节都具有非常好的抗内扰性能。

### 4 结论

本文提出采用模糊控制器实现超超临界机组汽水分离器水位控制, 并利用机组负荷及汽水分离器水质参数作为切换条件标准来实现 3 个工质循环通道的切换, 从而建立控制方案。仿真结果表明该方案能够准确的根据逻辑判断有效地切换循环通道切换以实现对汽水分离器水位的控制, 相对于传统 PID 控制系统, 本文设计的模糊控制系统具有较强的抗超调能力, 且在抗内扰过程中能够较快的恢复稳定, 由此可知本设计方案具有较强的鲁棒性和较高的控制品质。