

基于水煤比自寻优的直流炉给水控制策略研究

张晓航, 刘永红

(中国大唐集团科学技术研究总院有限公司西北电力试验研究院, 陕西 西安 710021)

摘要: 以超临界机组直流锅炉为研究对象, 以解决配煤掺烧时因实际入炉煤与设计煤热值存在差异导致锅炉水煤比不平衡为出发点, 提出一种基于煤质变化自适应调整水煤比(Water Fuel Ratio, WFR)设定曲线的给水控制策略。利用历史运行数据建立的水煤比自寻优模型, 可根据机组实时运行工况自寻优理想的水煤比设定值, 从而实现直流锅炉水煤比的动态平衡。将提出的控制策略应用于陕西省某地区 350 MW 超临界机组, 结果表明机组中间点校水量由 200 t/h 下降至 50 t/h 以内、主汽压偏差由 2 MPa 下降至 1 MPa、蒸汽超温频次由月均 11 次下降至 2 次。

关键词: 超临界机组; 水煤比; 自寻优; 协调系统; 给水控制

中图分类号: TP273 文献标识码: A 文章编号: 1003-7241(2025)01-0024-04

Research on Feed Water Control of DC Boiler Based on Self-optimization of Water Fuel Ratio

ZHANG Xiao-hang, LIU Yong-hong

(Datang Northwest Electric Power Test & Research Institute, Xi'an 710021 China)

Abstract: The article takes the direct current boiler of supercritical thermal power unit as the research object and propose a water fuel ratio (WFR) setting curve to solve the imbalance of boiler water fuel ratio due to the difference in calorific value between the actual coal and the designed coal. The strategy uses the historical operation data and real-time load of the unit to establish a self-optimization model of water fuel ratio and dynamically calculates and obtains water fuel ratio coefficient to balance water and fuel. The strategy is applied to a 350 MW supercritical unit in Shaanxi Province, the results show that the calibration water volume at the intermediate point of the unit decreased from 200 t/h to less than 50 t/h, the main steam pressure deviation decreased from 2 MPa to 1 MPa, and the steam overtemperature frequency decreased from 11 times per month to 2 times.

Keywords: supercritical thermal power units; water fuel ratio; self-optimization; coordination control system; feed water control

0 引言

水煤比对过热度、汽温及汽压等参数具有重要影响^[1], 直流锅炉汽温控制的核心是水煤比^[2], 将水煤比控制作为粗调手段, 喷水减温作为辅助细调手段^[3-4]。若机组燃煤量和给水流量相差 10%, 过热器出口蒸汽温度偏差可达 100℃^[5]。水煤比控制包括水跟煤及煤跟水 2 种方式^[6], 水跟煤指的是燃料量指令直接响应负荷指令, 给水流量根据预设的水煤比关系形成; 煤跟水则是给水流量直接响应负荷指令, 燃料量由预设的煤水比关系形成。水跟煤可提高汽温控制水平, 但压力控制性能较差, 煤跟水有助于维持压力稳定, 但不利于汽温调节^[7]。文献[8]提出在机组动态以煤跟水为主, 稳态以水跟煤为主的控制策略, 取得较为理想的控制效果。

维持水煤动态平衡是直流锅炉控制的关键, 通常机组水煤比关系的设置参考锅炉设计煤种热值与给水量对

应关系, 为固定的折线函数, 能满足机组在设计工况下稳定运行, 但在火电企业普遍执行配煤掺烧政策的背景下, 入炉煤热值频繁变化, 固定的水煤比折线函数不再能反映真实水煤关系导致锅炉水煤比失衡严重影响机组安全、稳定运行。

为此, 本文提出基于水煤比自寻优模型的直流炉给水控制策略, 通过模型动态获取最适宜机组运行工况的寻优水煤比, 相比设置固定折线函数, 寻优水煤比能够反映实际入炉煤热值变化, 增强了给水系统的灵活性及稳定性。

1 超临界直流炉给水控制策略

1.1 常规给水控制方案

直流炉给水控制方案如图 1 所示, 锅炉主控指令(Boiler Demand, BD)经预设的固定水煤比折线函数后形成给水基准设定值; 中间点温度控制器通过校正给水量实现对分离器出口中间点蒸汽过热度的控制; 变负荷预加/减

给水在变负荷时提前动作给水量以提高变负荷能力;运行人员通过手动偏置模块干预给水设定值。PID控制器根据给水设定值与测量值偏差调整给水泵汽轮机转速实现给水量闭环控制。

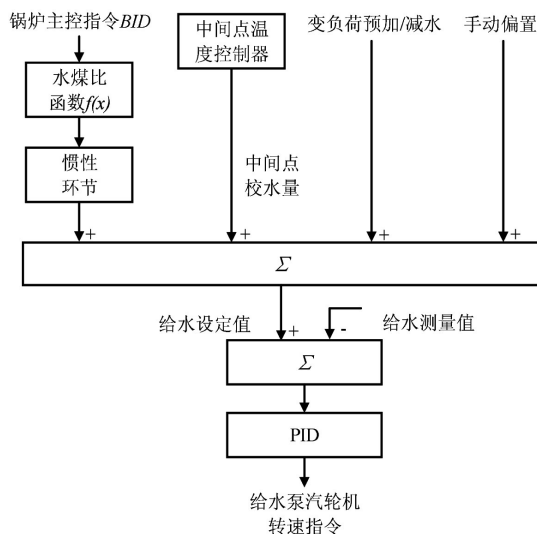


图1 直流锅炉给水控制方案

1.2 水煤比失衡对机组运行影响分析

直流炉过热蒸汽焓值直接受水煤比影响,锅炉一次工质稳定工况下热平衡方程式如下:

$$h_{gr} = h_{gs} + \frac{Q_{r1}}{W} \quad (1)$$

式中, h_{gr} 为过热蒸汽焓值; h_{gs} 为给水焓值; Q_{r1} 为工质有效吸热量; W 为给水流量。假定 Q_{r1} 占锅炉内工质的有效吸热量份额为 φ_1 , 则:

$$Q_{r1} = MQ_{ar}\eta\varphi_1 \quad (2)$$

式中, M 为燃料量; Q_{ar} 为燃料应用基的低位发热量; η 为锅炉热效率。由以上公式计算得:

$$h_{gr} = h_{gs} + \frac{M}{W} Q_{ar}\eta\varphi_1 \quad (3)$$

锅炉正常运行时, η 和 φ_1 近似为常数, 燃料量增加则过热蒸汽焓值也增加, 若蒸汽压力不变则由焓熵图可知, 过热汽温也随之升高。反之, 若给水流量增加, 则过热蒸汽焓值减小, 过热汽温随之下降。因此要保证机组过热汽温保持在额定值, 调节的基本手段是让燃料量和给水量保持在相应比例。

本文研究机组为350 MW超临界机组, 其给水控制系统预设的固定水煤比折线函数 $f(x)$ 如表1所示。

表1 预设水煤比折线函数

燃料量/t/h	0	76	143	163	173	200	220
给水量/t/h	388	453	874	1010	1080	1260	1386
水煤比	/	5.96	6.11	6.20	6.24	6.30	6.30

该机组执行配煤掺烧后, 负荷由175 MW升至350 MW过程曲线如图2所示。

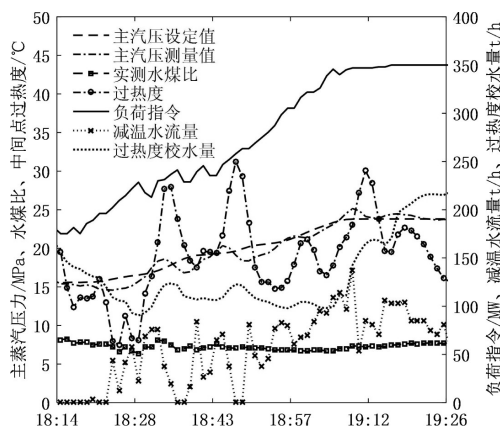


图2 水煤比设置不当机组变负荷过程

机组升负荷过程中, 实际水煤比在8-8.3之间, 而表1预设固定水煤比最大值是6.3, 预设水煤比与锅炉实际水煤比最大偏差为2。机组满负荷时燃料量为180 t/h, 因水煤比设置不当导致的给水流量缺口达360 t/h, 为弥补水量不足, 中间点校水量持续增加最高达297.2 t/h, 因中间点过热度控制不直接参与协调变负荷过程, 校水量占比过大必然对协调系统的稳定性造成影响, 该机组变负荷过程运行参数波动较大, 过热度最高46.3°C, 减温水流量峰值158.9 t/h, 主蒸汽压力偏差最大为1.8 MPa。

2 水煤比优化控制方案

2.1 水煤比自寻优策略

针对固定水煤比折线与实际入炉煤热值不匹配引起机组运行不稳定等问题, 常规解决方案是由热工人员根据实际入炉煤与设计煤热值差异确定机组新的水煤比折线函数并更新热工逻辑, 优点是数据较为精确, 但因入炉煤变化频繁, 靠热工人员手动修改和下装逻辑工作量较大, 且存在安全风险。

本文提出水煤比自寻优模型无需人工干预, 可根据机组历史数据及实时运行负荷自动寻找机组最佳水煤比。主要包括以下功能模块:

(1) 稳态判定

稳态判定策略如图3所示, LINE为模拟量延迟输出模块, 延迟时间为1 min。TON为开关量延迟输出模块, 延迟时间为5 min。判定逻辑是: 主蒸汽压力设定值 Y_{sp} 与测量值 Y_{pv} 偏差小于 ε_1 (0.3 MPa)、主蒸汽温度设定值 W_{sp} 与测量值 W_{pv} 偏差小于 ε_2 (1°C)、负荷指令 AGC 与其1 min延迟值偏差小于 ε_3 (2 MW), 且减温水流量 DHF 小于 ε_4 (5 t/h) 同时成立并延迟5 min, 则判定机组处于稳态。

(2) 水煤比寻优

机组稳态时锅炉水煤比能反映入炉煤热值与给水量实际对应关系, 水煤比计算公式如下:

$$\frac{W}{M} = \frac{Q_{ar}\eta\varphi_1}{h_{gr} - h_{gs}} \quad (4)$$

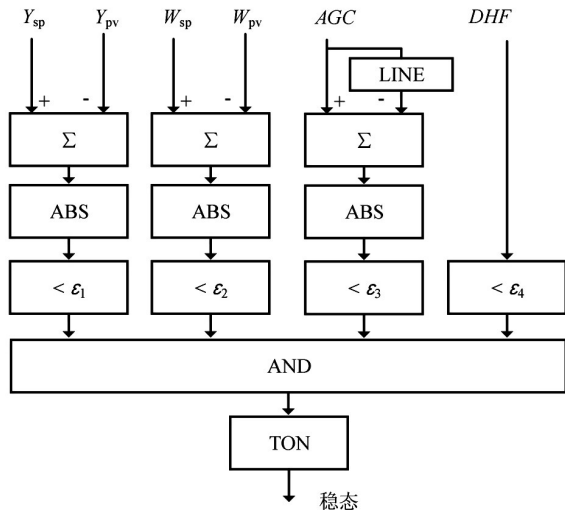


图3 稳态判定逻辑

升负荷时, 锅炉效率 η 、给水焓值 h_{gs} 上升, 水煤比也上升。采集运行机组实际水煤比与负荷进行数据拟合, 发现水煤比与负荷近似一阶线性函数关系, 则可通过建立负荷—水煤比函数获取机组不同负荷对应的水煤比。分别定义机组低负荷稳态(150~180 MW)和高负荷稳态(300~350 MW)以及低负荷水煤比 WFR_L 及高负荷水煤比 WFR_H , 提出寻优水煤比计算公式如下:

$$WFR = \frac{LD - LD_L}{LD_H - LD_L} (WFR_H - WFR_L) + WFR_L \quad (5)$$

式中, LD 为机组负荷指令; LD_L 为负荷下限175 MW; LD_H 为负荷上限350 MW。

WFR_L 计算步骤为: 判定机组处于低负荷稳态, 每间隔2 min将机组实际水煤比进行累加运算, 直至低负荷稳态结束, 然后计算该次低负荷稳态水煤比均值, 并存入寄存器。寄存器设计可存储5个低负荷稳态区间的水煤比系数, 为“队列”结构, 存取方式如图4所示, 水煤比依次从队列后部递进输入, 首位水煤比则不断被末位水煤比挤出队列, 以实现寄存水煤比不断更新迭代; 将寄存器存储的5个水煤比取均值后得到 WFR_L 。

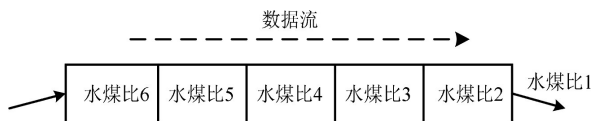


图4 寄存器存储水煤比

WFR_H 做法与 WFR_L 相似, 不再赘述。水煤比获取流程如图5所示。

(3) 寻优水煤比动态调节

寻优水煤比 WFR 随机组运行负荷工况变化自动调整, 但在机组正常运行时, 可能出现非高低负荷段煤质发生变化的情况。为增强寻优模型在不同负荷段的适应性, 引入调节因子, 计算公式如下:

$$\varepsilon = \frac{WFR_R}{WFR_P} \quad (6)$$

式中, WFR_R 为负荷为P MW且处于稳态时机组的实际水煤比。 WFR_P 为按式(5)计算的理论寻优水煤比。例如, 机组在220 MW, 实际水煤比6.5, 理论水煤比为6.2, 则等于1.05。

修正后最终寻优水煤比如下所示:

$$WFR_f = WFR * \varepsilon \quad (7)$$

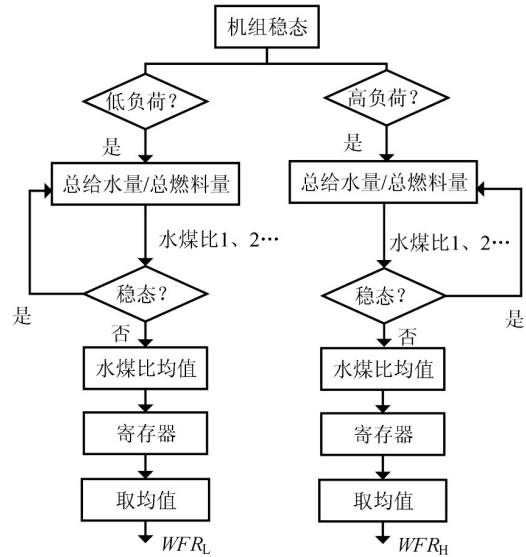


图5 水煤比获取流程

2.2 基于寻优水煤比的超临界机组给水控制策略

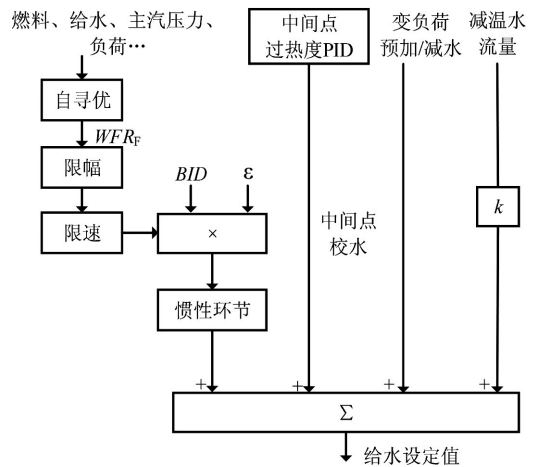


图6 给水控制策略

综上, 本文提出基于水煤比自寻优的直流炉给水控制策略如图6所示, 自寻优模块计算并更新水煤比系数 WFR_f , 经限幅及限速模块后与锅炉主控指令 BID 及调节因子 ε 相乘得到给水基准设定值。限幅模块将水煤比输出限制在5.5~8.5之间; 限速模块参数设置参考实际机组升负荷时水煤比变化速率, 按变负荷速率6 MW/min计算, 机组从175 MW升至350 MW耗时约29.17 min, 以水煤比变动上限为2计算, 可设置变化率上限为0.068/min。

3 工程应用

陕西省某地区350 MW超临界机组,锅炉设备采用哈锅厂HG-1125/25.4-YM1型超临界参数直流锅炉,原给水控制基于固定水煤比折线函数的水跟煤控制策略,随着配煤掺烧政策实行,机组主蒸汽压力波动较大,汽温超温次数频繁、运行人员操作量大,如图2所示。

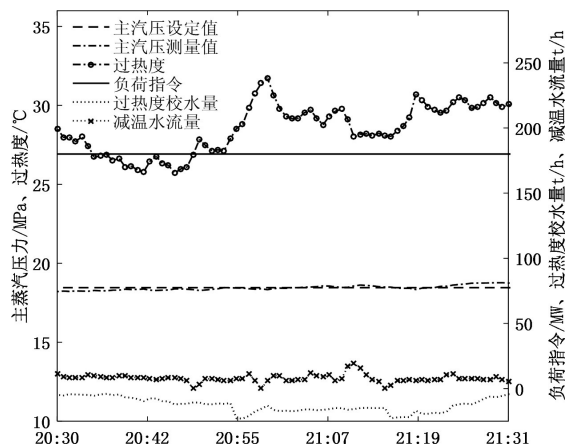


图7 稳态运行参数

将本文提出的基于水煤比自寻优的给水控制策略自2021年11月投入运行,投运后,机组稳态实际运行曲线如图7所示。

可以看到,机组稳态主蒸汽压力偏差在0.3 MPa以内,且减温水流量、中间点校水量为都维持在较小范围。此外,寻优水煤比与实际水煤比基本吻合,偏差在0.3以内。

机组变负荷过程曲线如图8所示,机组变负荷过程,中间点过热度校水量由图2接近300 t/h下降至50 t/h,过热器减温水流量大幅度减少且多数时间为0 t/h,机组主蒸汽压力偏差、中间点校水量及减温水流量均保持在较低范围。

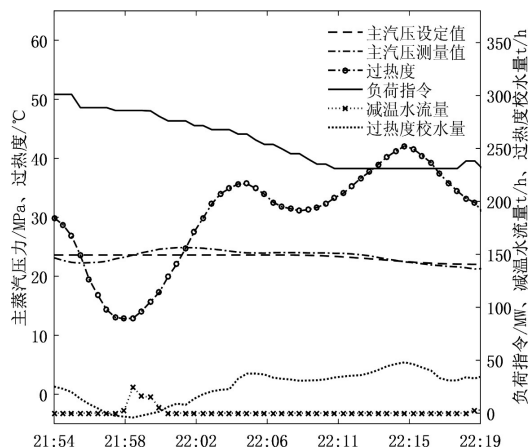


图8 变负荷运行参数

采取本文提出的优化控制方案后,机组主要运行参数如表2所示。

在机组不同运行工况,寻优水煤比与实际水煤比偏差均保持在较小范围,中间点校水量及过热器减温水流

量与优化前相比大幅减少,主汽压偏差均小于1 MPa,主再热汽温波动幅度明显下降,统计主再热蒸汽温度超温频次由月均超标11次下降至2次。这说明基于自寻优模型获取的水煤比设定曲线较为理想,给水控制粗调效果明显,实现了机组水煤动态平衡。

表2 机组运行参数统计

工况	稳态	减负荷	升负荷
主蒸汽压力偏差/MPa	0.3	0.8	0.6
主蒸汽温度高低值/°C	569~567	568~553	572~565
中间点校水量极值/t/h	11	40	37
减温水流量极值/t/h	14	29	17
水煤比偏差	0.3	0.4	0.4

4 结束语

针对直流炉给水控制策略设置固定水煤比折线函数存在的不足,提出基于水煤比自寻优模型的给水控制策略,在试验电厂取得了较为理想的应用效果,运行数据表明,机组稳态及变负荷过程中主要控制系统的调节品质有了明显改善、运行人员操作量明显下降,增强了机组变负荷能力,提升了运行的经济性。所提优化策略通用性较好,可直接在电厂DCS系统施行,无需增加额外成本,值得推广和应用。

参考文献:

- [1] 沈志超. 百万机组煤水比失调浅析[J]. 中国设备工程, 2021(22): 74-75.
- [2] 刘福国, 董续海, 吴祥涛. 超超临界直流锅炉受热面传热运行预测方法及在水煤比调整中应用[J]. 锅炉技术, 2010, 41(5): 21-25, 63.
- [3] 辛志波. 超超临界直流炉给水控制策略研究与设计[J]. 华电技术, 2019, 41(10): 39-43.
- [4] 顾德东, 李恩鹏. 超超临界机组水煤比控制策略优化[J]. 热力发电, 2017(4): 115-119.
- [5] 赵志丹, 党黎军, 刘超, 等. 超(超)临界机组的、启动运行与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012: 100-110.
- [6] 张秋生, 梁华, 胡晓花, 等. 超超临界机组的两种典型协调控制方案[J]. 中国电力, 2011, 44(10): 74-79.
- [7] 王朝阳, 常仁杰, 朱庆玉. 两种水煤比控制策略下调峰机组能耗特性[J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(7): 115-122.
- [8] 赵志丹, 王海涛, 张志, 等. 超超临界1000 MW二次再热机组水煤比控制及优化[J]. 热力发电, 2017, 46(8): 136-140.

作者简介: 张晓航(1990-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向: 火力发电自动控制及电厂智能化改造。

通信作者: 刘永红(1971-), 男, 本科, 正高级工程师, 研究方向: 火电热工控制及技术改造、调试工作。