

基于一次风流量动态补偿的协调控制系统优化

孙赫宇, 季宝伟, 魏雨珊, 房威翰, 王阳阳

(天津电气科学研究院有限公司, 天津 300180)

摘要:针对火电机组协调控制系统中主蒸汽压力响应速度较慢的问题,通过将制粉系统中的部分存粉吹出来改善协调控制系统的控制效果。在传统制粉系统模型基础上考虑一次风流量的影响,建立了基于一次风流量的制粉系统模型,经验证,此模型可以很好地反映一次风流量对于制粉系统的动态特性;在制粉系统改进模型的基础上,设计了一次风流量动态补偿系统,与机组原协调控制系统相结合,构成了基于一次风流量动态补偿的协调控制系统,实现了对于磨煤机内部存粉的利用。仿真结果表明,所设计的系统通过改变一次风流量有效地利用了磨煤机内的存粉,在保证快速响应负荷变化的前提下,对于主蒸汽压力有良好的控制效果,提高了主蒸汽压力的响应速度,改善了协调控制系统的控制品质。

关键词:考虑一次风流量的制粉系统建模;一次风流量动态补偿;协调控制系统优化

中图分类号:TK83 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed25365

Optimization of Coordinated Control System Based on Primary Air Flow Dynamic Compensation

SUN Heyu, JI Baowei, WEI Yushan, FANG Weihang, WANG Yangyang

(Tianjin Research Institute of Electric Science Co., Ltd., Tianjin 300180, China)

Abstract: In response to the problem of slow response speed of main steam pressure in the coordinated control system of thermal power units, the control effect of the coordinated control system was improved by blowing out some of the stored powder in the pulverizing system. Based on the traditional milling system model, considering the influence of primary air flow, a milling system model based on primary air flow was established, which has been verified to reflect the dynamic characteristics of primary air flow on the milling system. On the basis of the improved model of milling system, a primary air flow dynamic compensation system was designed, which combined with the original coordinated control system of the unit to form a coordinated control system based on the primary air flow dynamic compensation, which realized the utilization of powder storage inside the coal mill. The simulation results show that the designed system effectively utilizes the stored powder in the coal mill by changing the primary air flow rate. On the premise of ensuring rapid response to load changes, it has a good control effect on the main steam pressure, improves the response speed of the main steam pressure, and improves the control quality of the coordinated control system.

Key words: modeling of milling systems considering primary air flow; dynamic compensation of primary air flow; coordinate control system optimization

在我国传统能源电力中,火电机组的装机容量较大,具有很强的可控性,且其自身内部存在多种可以深度挖掘利用的蓄能,因此在传统能源电力中提升灵活性的潜力最大^[1]。而协调控制系统作为我国火电机组最基本、最核心的控制方式,其良好的控制品质是提升机组灵活性的重要基础^[2]。因此,优化火电机组协调控制系统有着

重要意义。

对于协调控制系统的优化分为建模和控制两部分。在控制系统的建模方面,曾德良等^[3]分析了汽包炉协调控制系统的非线性动态特性,建立了某机组协调控制系统的非线性模型。高杉等^[4]在文献[3]模型的基础上,利用历史数据结合遗传算法对磨煤机进行了进一步的建模。在协

作者简介:孙赫宇(1997—),男,硕士,工程师,主要研究方向为控制系统优化设计及火电机组蓄能综合利用,

Email: 1836708078@qq.com

调控制系统的控制方面,罗玮等^[5]使用阶梯式广义预测控制方式对机组协调控制系统进行控制,提升了系统主汽压调节的快速性和平稳性。孙宇贞等^[6]利用混合蛙跳算法对PID控制器进行优化,提升了系统的响应速度。但是阶梯式广义预测控制、神经网络控制等较为复杂的控制方式均无法轻易在实际现场中实现,常规机组仍然采用PID的控制方案,而单一的PID控制逻辑很难对协调控制起到良好的控制效果。

若在利用PID控制的基础上对协调控制系统进行优化,则需要充分利用系统自身内部蓄能。通过对制粉系统进行分析,发现一次风对制粉系统动态特性影响较大,突然增大一次风量可以吹出磨煤机中的部分存粉,一定程度上改善了机组协调控制系统的控制效果^[7-8]。虽然可以利用磨煤机中的存粉对协调控制系统进行优化,但是如何设计合理的存粉利用方案仍是一个急需解决的问题。

因此,针对上述问题,本文首先将受一次风流量变化影响较大的制粉系统循环倍率与传统静态制粉系统相结合,构建了以一次风流量和给煤量为输入、磨出口煤粉流量为输出的制粉系统两输入一输出非线性动态模型,体现了一次风流量的变化对于磨出口煤粉流量的影响;在制粉系统动态模型的基础上,设计了一次风流量动态补偿系统,通过在一定时间内使一次风流量过调从而吹出更多的煤粉,设计出了磨煤机内存粉的合理利用方案;同时为更好地对整体系统进行控制,基于传统PID控制器设计了一种新型协调控制逻辑;最终,将上述策略与协调控制系统相结合,设计了基于一次风流量动态补偿的协调控制系统,实现了利用磨煤机内部的存粉对机组协调控制系统的优化。

1 机组协调控制系统简化模型

火电机组协调控制系统通常可以由输入为给煤量和主汽门开度、输出为主蒸汽压力和机组负荷的两输入两输出的非线性多变量模型简化,例如汽包炉火电机组协调控制系统简化模型,如图1所示,系统中包含磨煤机及水冷壁模型、锅炉核心模型以及汽轮机模型^[8]。

磨煤机及水冷壁模型传递函数可以表示为

$$G_b(s) = \frac{Q_{\text{net,ar}}}{(T_{\text{mill}}s + 1)(T_{\text{heat}}s + 1)} e^{-\tau s} \quad (1)$$

式中: T_{mill} 为制粉系统惯性时间,s; T_{heat} 为水冷壁吸热惯性时间,s; $Q_{\text{net,ar}}$ 为设计煤种收到低位发热值,MJ/kg; τ 为制粉系统的延迟时间,s。

锅炉核心模型可以表示为

$$\begin{cases} c_1 \dot{p}_b = D_q - k_1(p_b - p_t)^{0.5} \\ c_2 \dot{p}_t = k_1(p_b - p_t)^{0.5} - k_2 p_t u_t \\ D_t = k_3 p_t u_t \end{cases} \quad (2)$$

式中: D_q 为锅炉有效吸热量,MJ/kg; p_b 为汽包压力,MPa; p_t 为主蒸汽压力,MPa; c_1 为汽包蓄能系数,MJ/MPa; c_2 为主蒸汽管道蓄能系数,MJ/MPa; u_t 为汽轮机主汽门开度,%; D_t 为主蒸汽流量,t/h; $k_1 \sim k_3$ 为比例系数。

汽轮机模型的传递函数可以表示为

$$G_t(s) = \frac{k_4}{(T_{\text{HPC}}s + 1)(T_{\text{IPC}}s + 1)(T_{\text{LPC}}s + 1)} \quad (3)$$

式中: T_{HPC} , T_{IPC} , T_{LPC} 分别为高压缸、中压缸、低压缸惯性时间,s; k_4 为比例系数。

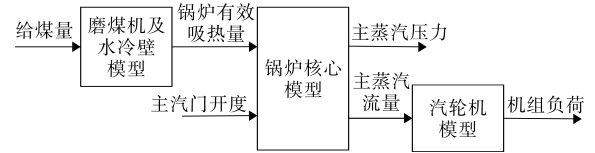


图1 协调控制系统简化模型

Fig.1 Coordinated control system simplified model

2 考虑一次风量的制粉系统模型

2.1 制粉系统简化模型

传统的制粉系统简化模型如图2所示,为一个单输入单输出模型,其模型主要包含给煤机传送、磨煤机碾磨两个过程。

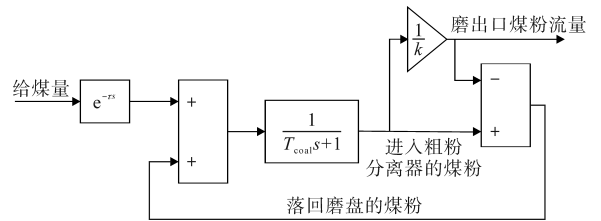


图2 制粉系统简化模型

Fig.2 Simplified model of milling system

给煤机传送过程一般由一个纯延迟环节简化,而磨煤机碾磨过程由图2可知,原煤经给煤机传送和磨煤机碾磨后进入到粗粉分离器。磨煤机碾磨过程经推导转化,结合给煤机传送过程,制粉系统简化模型可以表示为^[8]

$$\frac{W_{\text{pf}}(s)}{W_c(s)} = \frac{1}{kT_{\text{coal}}s + 1} e^{-\tau s} \quad (4)$$

式中: W_{pf} 为磨出口煤粉流量,kg/s; W_c 为给煤量,

kg/s; T_{coal} 为磨煤机碾磨惯性时间, s; k 为初始工况下循环倍率。

2.2 考虑一次风量的制粉系统简化模型

从静态的角度看, 改变一次风流量并不会使机组控制效果发生变化。然而从动态的角度看, 一次风量的突然增加可以吹出磨煤机内的部分存粉, 优化协调控制系统的主蒸汽压力响应速度。制粉系统的惯性时间除了受到磨煤机的碾磨时间影响, 还与粗粉分离器的循环倍率有关。在实际过程中, 一次风量对制粉系统的影响正是通过使粗粉分离器循环倍率发生改变体现的。

图3为典型中速磨煤机制粉系统中一次风速与粗粉分离器循环倍率的关系曲线^[9], 经拟合, 可以表示为

$$k = 0.0029v_{\text{air}}^2 - 0.00008v_{\text{air}} + 3.562 \quad (5)$$

式中: v_{air} 为一次风速, m/s。

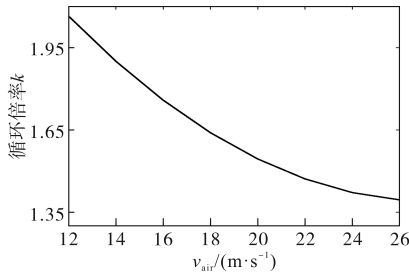


图3 一次风速与粗粉分离器循环倍率关系曲线

Fig.3 Relationship curve between primary wind speed and coarse powder separator cycle rate

由图3结合式(5)可以看出, 随着一次风速的增加, 制粉系统中更多的粗粉被带出, 循环倍率因此随之降低。但是由于一次风速测量难度较大, 因此需要将一次风速与循环倍率的关系转化为一次风流量与循环倍率之间的关系, 一次风速与一次风流量之间的关系可以转换为

$$W_{\text{air}} = \rho_{\text{air}} v_{\text{air}} A_{\text{air}} \quad (6)$$

式中: W_{air} 为一次风流量, kg/s; ρ_{air} 为一次风密度, kg/m³; A_{air} 为一次风管道入口横截面积, m²。其中, 一次风密度按照国标公式可以表示为

$$\rho_{\text{air}} = 2.694 \rho_{\text{air,st}} \frac{p_{\text{st}} + p_{\text{air}}}{273 + T_{\text{air}}} \quad (7)$$

式中: $\rho_{\text{air,st}}$ 为标准状态下的空气密度, kg/m³; p_{st} 为标准大气压力, Pa; p_{air} 为一次风压力, Pa; T_{air} 为一次风温度, °C。

本文选用的模型中, 中速磨煤机一次风管道入口设计尺寸为 2 450 mm×1 050 mm, 标准状态下的空气密度为 1.293 kg/m³, 标准大气压力为

101 325 Pa, 典型一次风压力为 10 000 Pa, 典型一次风温度为 285 °C^[9]。将上述参数代入到式(5)~式(7)中, 可以得到一次风流量与粗粉分离器循环倍率之间的关系为

$$k = 0.0009W_{\text{air}}^2 - 0.0879W_{\text{air}} + 3.562 \quad (8)$$

本文制粉系统相关参数^[8]为: $\tau=55.170$ s, $T_{\text{mill}}=81.203$ 4 s, $\omega_{\text{air},0}=23.309$ kg/s。其中, $\omega_{\text{air},0}$ 为初始一次风流量。

因此, 结合式(1)、式(4)、式(8)以及制粉系统相关参数, 考虑一次风流量的制粉系统传递函数可以表示为

$$G_m(s) = \frac{1}{41.095ks + 1} e^{-55.17s} \quad (9)$$

如图4所示, 考虑一次风流量的制粉系统简化模型与原制粉系统相比, 虽然表面上仍是一个含有纯迟延环节的一阶惯性传递函数, 但实际上由于此时的制粉系统循环倍率 k 与一次风流量呈现二次函数关系, 因此考虑一次风流量的制粉系统简化模型已经变为两输入一输出的非线性动态模型。

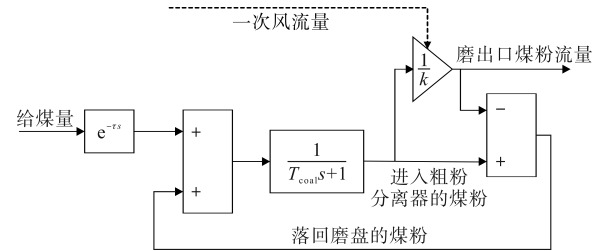


图4 改进的制粉系统简化模型

Fig.4 Simplified model of improved milling system

2.3 模型动态特性验证

为了验证本文设计的考虑一次风流量的制粉系统简化模型的动态特性, 在给煤量由 10 kg/s 阶跃至 15 kg/s 的同时, 对此模型进行了一次风流量不变和一次风流量成比例增加的仿真实验, 仿真结果如图5所示。

由图5可见, 当给煤量发生变化、一次风流量不变时, 由于循环倍率没有发生改变, 因此磨出口煤粉流量需要经过较长的惯性时间和迟延时间才能达到稳定状态; 而当一次风流量随着给煤量的阶跃由当前的 25 kg/s 成比例增加至 30 kg/s 时, 制粉系统的循环倍率同样由 1.9 降至 1.7 附近, 正是由于制粉系统循环倍率的降低, 磨出口煤粉流量的惯性和迟延时间也有所减小, 使系统更快地达到新稳态。

综上所述, 考虑一次风流量的制粉系统简化

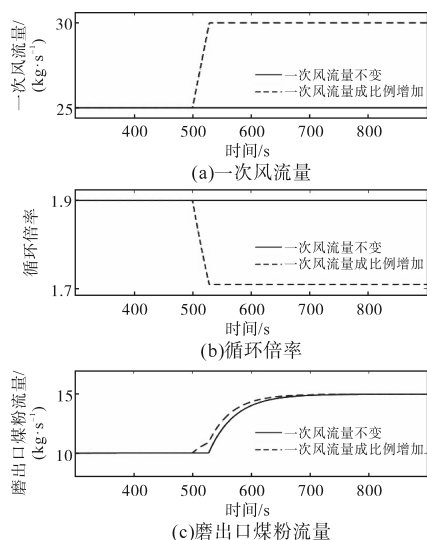


图5 制粉系统动态特性仿真图

Fig.5 Dynamic characteristics simulation diagram of milling system
模型可以很好地反映一次风流量对于制粉系统的影响。

3 基于一次风流量动态补偿的协调控制系统

3.1 一次风流量的动态补偿

由前文内容可知,通过增加一次风流量的方式可以降低制粉系统的循环倍率,使得更多的煤粉从磨煤机中被吹出,减小制粉系统的惯性及延迟时间,从而改善系统的控制效果。

但是由图3结合式(5)~式(7)可以发现,当一次风流量达到一定数值后,改变一次风流量所引起的制粉系统循环倍率的变化较小,此时若一味地盲目增大一次风流量则会造成机组经济型的损失。因此为了更合理地利用一次风量,本文提出一种根据给煤量与当前磨出口煤粉流量预估值之间的偏差对一次风流量进行动态修正的方式,其原理框图如图6所示。

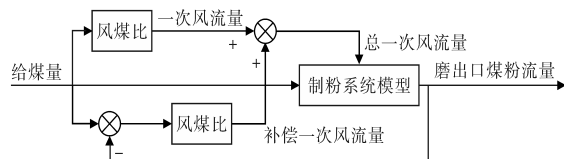


图6 一次风流量动态补偿原理框图

Fig.6 Block diagram of dynamic compensation of primary wind flow
图6所示系统中,总一次风流量为

$$W_{\text{air,tot}}(s) = W_{\text{air,ori}}(s) + W_{\text{air,comp}}(s) \quad (10)$$

式中: $W_{\text{air,tot}}$ 为总一次风流量, kg/s; $W_{\text{air,ori}}$ 为原一次风流量, kg/s; $W_{\text{air,comp}}$ 为补偿一次风流量, kg/s。

原一次风流量由给煤量按照风煤比计算得出,可

以表示为

$$W_{\text{air,ori}}(s) = k_{\text{coal-air}} W_c(s) \quad (11)$$

式中: $k_{\text{coal-air}}$ 为风煤比,本文中风煤比取 $2^{[8]}$ 。

由于制粉系统存在一定的惯性时间和延迟时间,因此给煤量与经制粉系统模型预估的磨出口煤粉流量之间会形成一个偏差信号,将此偏差用于计算补偿一次风流量 $W_{\text{air,comp}}$, 可以表示为

$$W_{\text{air,comp}}(s) = k_{\text{coal-air}} [W_c(s) - W_{\text{pf}}(s)] \quad (12)$$

一次风流量动态补偿的原理为:由于制粉系统自身的特性,其在给煤量发生变化的初期响应速度较慢,给煤量与经制粉系统模型预估的磨出口煤粉流量之间的偏差信号增大,补偿一次风流量 $W_{\text{air,comp}}$ 同样增加,更多的煤粉被吹出至系统的下一个环节;随着制粉系统模型输出的磨出口煤粉流量逐渐增加,其与给煤量的偏差也逐渐减小直至为0,因此补偿一次风流量 $W_{\text{air,comp}}$ 也逐渐减小直至降为0,此时总一次风量 $W_{\text{air,tot}}$ 等于原一次风流量 $W_{\text{air,ori}}$, 完成了一次风流量的动态补偿。

3.2 PID协调控制逻辑

为了同时兼顾到实际工程中控制器操作的简便性和控制系统的有效性,设计了如图7所示的PID协调控制逻辑。图中, r_1 为主蒸汽压力输入信号, u_1 为给煤量信号, y_1 为主蒸汽压力输出信号, r_2 为机组负荷输入信号, u_2 为汽轮机开度信号, y_2 为负荷输出信号, PID_1 和 PID_4 为主控制器, PID_2 和 PID_3 为协调控制器。

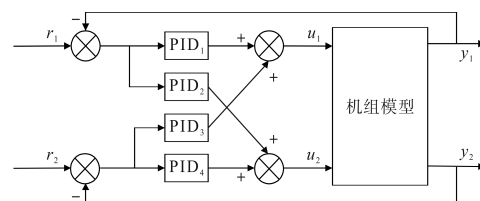


图7 PID协调控制逻辑原理框图

Fig.7 Block diagram of PID coordination control logic

处于稳态时,负荷偏差信号、主蒸汽压力偏差信号较小,此时的给煤量信号 u_1 、汽轮机开度信号 u_2 可以表示为

$$\begin{cases} u_1 = u_{\text{PID1}} \\ u_2 = u_{\text{PID4}} \end{cases} \quad (13)$$

式中: u_{PID1} , u_{PID4} 分别为主控制器 PID_1 , PID_4 的输出信号。

当目标负荷发生变化时,负荷偏差信号、主蒸汽压力偏差信号增大,单独靠主控制器的调节作用已经很难消除此误差,此时的给煤量信号 u_1 、汽轮机开度信号 u_2 可以表示为

$$\begin{cases} u_1 = u_{PID1} + u_{PID3} \\ u_2 = u_{PID2} + u_{PID4} \end{cases} \quad (14)$$

式中: u_{PID2}, u_{PID3} 分别为协调控制器 PID_2, PID_3 的输出信号。

3.3 基于一次风流量动态补偿的协调控制系统

将图 6 的一次风流量动态补偿系统与图 1 的传统协调控制系统相结合,用考虑一次风流量的制粉系统代替传统制粉系统模型,并使用图 7 中的 PID 协调控制逻辑对整个系统进行控制,设计出如图 8 所示的基于一次风流量动态补偿的协调控制系统。

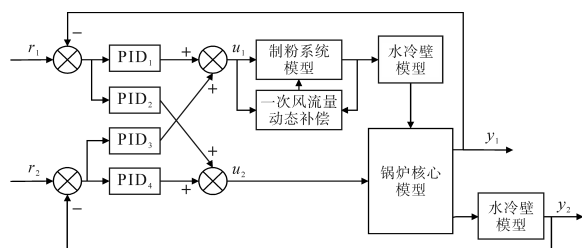


图 8 基于一次风流量动态补偿的协调控制系统

Fig.8 Coordinated control system based on dynamic compensation of primary air volume

控制系统变负荷原理为:以升负荷过程为例,当负荷设定值 r_2 、主蒸汽压力设定值 r_1 发生变化时,所对应的偏差信号经控制器 $PID_1 \sim PID_4$ 输出给煤量信号 u_1 以及汽轮机开度信号 u_2 。在升负荷的前期,一次风量由于动态补偿系统的存在而快速增加,加速磨出口煤粉流量的产生,使得更多的煤粉被吹出,煤粉经由水冷壁模型输出锅炉有效吸热量与汽轮机开度信号 u_2 输入到锅炉核心模型中,输出主蒸汽流量与主蒸汽压力 y_1 ,最终主蒸汽流量进入到汽轮机模型中输出机组负荷 y_2 ,从而改善了机组协调控制系统前期控制效果差的问题;进入到变负荷的中后期,随着磨出口煤粉流量与给煤量的偏差逐渐减小,补偿一次风量逐渐降为 0,磨出口煤粉流量逐渐恢复正常,从而在中后期协调控制系统也恢复至标准运行方式。

3.4 控制系统仿真验证

本文选用的传统协调控制系统参数如表 1 所示^[9]。基于一次风流量动态补偿的协调控制系统除制粉系统外,其余模型与传统协调控制系统相同。

图 9 为本文所设计的基于一次风流量动态补偿的协调控制系统与仅用考虑一次风流量的制粉系统替换传统制粉系统的原协调控制系统的变负荷效果对比图。由图 9 中可以明显地看出,

表 1 协调控制系统模型参数

Tab.1 Coordinate control system model parameters

模型参数	参数值	模型参数	参数值
c_1	13 274.788 3	τ	55.170 3
c_2	4 439.862 0	T_{heat}	20.321 7
k_1	497.217 6	T_{mill}	81.203 4
k_2	0.892 8	T_{HPC}	3.570 1
k_3	0.795 0	T_{IPC}	6.017 4
k_4	0.329 0	T_{LPC}	3.780 0
Q_{near}	19.440		

机组在第 4 000 s 时接到升负荷指令后,本文设计的基于一次风流量动态补偿的协调控制系统与机组原协调控制系统均能很好地对负荷进行跟踪。但是在主蒸汽压力的控制方面,由于一次风流量动态补偿系统的存在,使得系统在一次风总量和一次风变化速度上都得到了提高。结合图 9 中的主蒸汽压力控制效果图和表 2 所示的主蒸汽压力控制效果指标可以明显发现,与传统协调控制系统相比,基于一次风流量动态补偿的协调控制系统具有更好的主蒸汽压力控制效果。

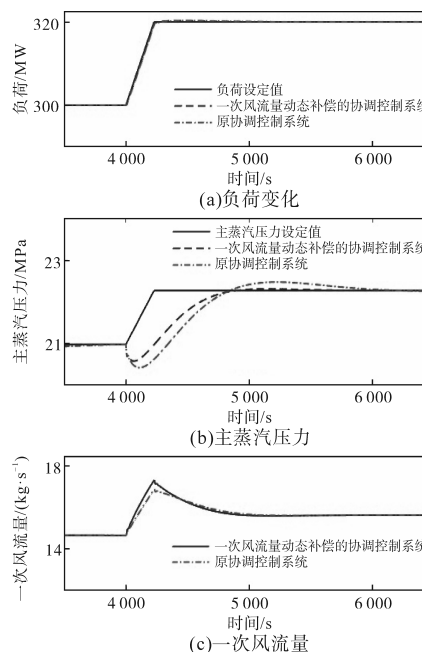


图 9 控制系统仿真效果对比图

Fig.9 Comparison chart of control system simulation effect

表 2 主蒸汽压力控制效果指标

Tab.2 Main steam pressure control effect index

	上升时间/s	超调量/%	调节时间/s
本文设计系统	836	2.36	150 9
原协调控制系统	880	15	213 2

为了更进一步地验证所设计控制系统的有效性,计算了两系统实际输出负荷和主蒸汽压力相对于其设定值的绝对误差积分准则 IAE

(integral of absolute value of error criterion)指标^[10], 计算结果如表3所示。从表3中可以看出,本文所设计的基于一次风流量动态补偿的协调控制系统的主蒸汽压力IAE指标和机组负荷IAE指标均明显优于原协调控制系统。

表3 负荷、主蒸汽压力IAE指标

Tab.3 Load, main steam pressure IAE index

	主蒸汽压力IAE指标	负荷IAE指标
本文设计系统	5 332.6	268.5
原协调控制系统	8 504.0	333.5

综上所述,本文所设计的基于一次风流量动态补偿的协调控制系统,可以在更好地完成机组负荷跟踪前提下,改善主蒸汽压力的控制效果。

4 结论

1)考虑一次风对于制粉系统循环倍率的影响,在传统制粉模型的基础上,结合一次风流量组成两输入一输出的制粉系统动态模型。仿真结果表明,本文构建的制粉系统动态模型与传统制粉系统相比,可以更好地反映一次风流量变化对于磨出口煤粉流量的影响;在一次风流量过调的情况下,提高了制粉系统对给煤量的响应速度,为实现制粉系统存粉的深度奠定了基础。

2)根据制粉系统的大惯性大迟延特性设计一次风流量动态补偿系统,结合本文设计的PID协调控制逻辑以及传统协调控制系统模型构成基于一次风流量动态补偿的协调控制系统。仿真结果表明,与原机组协调控制系统相比,本文所设计的控制系统大幅度提高了主蒸汽压力到新稳态时的上升时间、调节时间与超调量,缩短了调节主蒸汽压力所需的时间;基于一次风流量动态补偿的协调控制系统在使机组负荷控制评价指标得到一定提升的同时,大幅度提升了主蒸汽压力的控制评价指标,改善了传统机组协调控制系统的控制品质,为协调控制系统的优化提供了理论基础。

参考文献

- [1] 曾德良,高耀岩,胡勇,等.基于阶梯式广义预测控制的汽包炉机组协调系统优化控制[J].中国电机工程学报,2019,39(16):4819-4826,4983.
ZENG Deliang, GAO Yaokui, HU Yong, et al. Optimized control of the drum boiler power plant's coordination system based on stair-like generalized predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4819-4826, 4983.
- [2] FAN J, XU M, YANG L, et al. Benefit evaluation of investment in CCS retrofitting of coal-fired power plants and PV power plants in China based on real options[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019, 115: 1-13.
- [3] 曾德良,刘吉臻.汽包锅炉的动态模型结构与负荷/压力增量预测模型[J].中国电机工程学报,2000,20(12):75-79.
ZENG Deliang, LIU Jizhen. Drum boiler dynamic model and load/pressure increment predict model[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(12): 75-79.
- [4] 曾德良,高珊,胡勇. MPS型中速磨煤机建模与仿真[J].动力工程学报,2015,35(1):55-61.
ZENG Deliang, GAO Shan, HU Yong, et al. Modeling and simulation of mps medium speed coal mills[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(1): 55-61.
- [5] 罗玮,平博宇,崔青汝,等.基于精准能量平衡与预测控制的协调控制系统优化[J].电力科技与环保,2019,35(2):56-59.
LUO Wei, PING Boyu, CUI Qingru, et al. Optimization of coordinated control system based on precise energy balance and predictive control[J]. Electric Power Science and Engineering, 2019, 35(2): 56-59.
- [6] 孙宇贞,郭皓文,黄晓筱.基于改进混合蛙跳算法的协调控制系统优化[J].热能动力工程,2020,35(6):109-115.
SUN Yuzhen, GUO Haowen, HUANG Xiaoxiao. Optimization of coordinated control system based on improved shuffled frog leaping algorithm[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(6): 109-115.
- [7] 张锐锋,潘华,李小军,等.制粉系统动态特性对协调控制系统的影响[J].热力发电,2015,44(7):78-82.
ZHANG Ruifeng, PAN Hua, LI Xiaojun, et al. Influence of dynamic characteristics of pulverizing system on coordinated control system[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(7): 78-82.
- [8] 高耀岩.火电机组灵活运行控制关键技术研究[D].北京:华北电力大学,2019.
GAO Yaokui. Research on key technologies of flexible operation control of thermal power units[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2019.
- [9] 赵雯文.充分利用火电机组储能的高速率变负荷控制系统研究[D].北京:华北电力大学,2016.
ZHAO Wenwen. Making full use of the thermal power generating unit to the study of the high speed ratio load control system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [10] 龙东腾,王玮,刘吉臻.凝结水节流参与的1 000 MW火电机组快速变负荷调节[J].动力工程学报,2017,37(3):249-256.
LONG Dongteng, WANG Wei, LIU Jizhen. Fast load regulation of 1 000 MW thermal power unit by condensate throttling[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2017, 37(3): 249-256.

收稿日期:2023-09-07

修改稿日期:2023-11-08