

DOI: 10.7652/xjtub201807017

两种水煤比控制策略下调峰机组的能耗特性

王朝阳¹, 常仁杰², 朱庆玉², 刘明¹, 严俊杰¹

(1. 西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室, 710049, 西安; 2. 华能丹东电厂, 118300, 辽宁丹东)

摘要: 为研究热工控制策略对燃煤机组瞬态变负荷过程能耗特性的影响,以 660 MW 超临界机组为研究对象,建立了机组全系统动态模型,研究了煤跟水和水跟煤两种控制策略下,不同变负荷瞬态过程中燃煤机组主要参数及其能耗特性的变化规律。结果表明:变负荷瞬态过程中,采用煤跟水控制方式较水跟煤控制更有利于主汽压力的稳定,主汽压力的累计偏差较小,但主汽温度的控制效果不如水跟煤控制方式,主汽温度的累计偏差更大。煤跟水控制方式使机组在变负荷过程中更能充分利用自身的蓄热能力,相比水跟煤控制方式,机组具有更高的能量转换效率,平均发电标准煤耗率增量更小,研究范围内最大相差 $0.69 \text{ g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

关键词: 超临界机组;变负荷;控制策略;能耗

中图分类号: TK212 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2018)07-0115-08

Energy Consumption Characteristics of Power Units with Two Water-Coal Ratio Control Strategies in Transient Peak Load Regulation

WANG Chaoyang¹, CHANG Renjie², ZHU Qingyu², LIU Ming¹, YAN Junjie¹

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Huaneng Dandong Power Plant, Dandong, Liaoning 118300, China)

Abstract: To research the influence of thermal control strategy on the energy consumption characteristics of coal-fired power plants in peak load regulation process, a model of 660 MW coal-fired supercritical power unit coupled with its control system was established. The key parameters of the unit and its characteristics of energy consumption in load regulation process were calculated and analyzed under water follow coal (WFC) and coal follow water (CFW) control strategies. The results showed that CFW control strategy has advantages over WFC in live steam pressure control, the cumulative deviation of live steam pressure with CFW is less than that with WFC; but CFW does not show superiority in live temperature control, and its cumulative deviation of live steam temperature is larger than that with WFC. The supercritical unit with CFW control strategy can make full use of its energy storage in load regulation process. A supercritical power unit with CFW control strategy has a higher energy conversion efficiency than WFC control strategy in transient loading variation process, and its average standard coal consumption variation rate is smaller with a maximum deviation of $0.69 \text{ g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ in our research.

Keywords: supercritical power unit; load variation; control strategy; energy consumption

收稿日期: 2017-10-29。 作者简介: 王朝阳(1991—),男,博士生;刘明(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2015CB251504);国家自然科学基金资助项目(51436006)。

网络出版时间: 2018-04-12

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20180412.1649.008.html>

近年来,国家大力支持发展可再生能源发电,以缓解电力供应对化石能源的依赖和减轻发电行业对环境保护带来的压力,但可再生能源发电具有间歇性、周期性、随机波动性和地域局限性等特点,其并网给电网的安全稳定运行带来了新挑战^[1]。充分挖掘和利用火电机组热力系统自身的灵活运行能力是缓解新能源并网给电网带来压力的一个有效途径^[2]。超(超)临界火电机组频繁地参与电网调峰任务,机组长期处于变负荷状态,调峰瞬态已成为新的“能源形势”下的常态。研究火电机组在瞬态过程中的能耗特性,充分提高火电机组在变负荷瞬态过程中的能量转换效率显得尤为必要。

建立高精度的能量转换系统模型是研究机组在瞬态过程能耗特性的基础。Van 等建立了蒸汽动力循环系统的动态仿真模型,在此基础上研究了其动态特性^[3-4]。Alobaid 等研究了超临界机组启动和变负荷过程的动态特性^[5]。Hentschel 等对超临界燃煤机组的二次调频特性进行了研究^[6]。杨勇平等研究了燃煤机组余热充分利用及变工况高背压空冷机组的冷端优化等^[7-8]。韩小渠等对褐煤预干燥燃煤发电系统的变工况性能进行了研究,分析了预干燥程度对机组发电标准煤耗率的影响^[9]。李冰心等研究了燃煤机组采用蒸汽喷射器引入给水系统进而优化机组低负荷脱硝性能和热经济性能^[10]。综上所述,对于火电机组的瞬态过程,多数学者的研究内容为建立准确的仿真模型并依据模型研究其动态特性;一些学者对机组稳态变工况的能耗特性进行了研究,但较少涉及到瞬态过程的能耗特性及其主要的影响因素。

热工控制是机组实现变负荷过程的必要手段,水煤比控制是机组协调控制系统的核心^[11],控制效果关乎机组瞬态过程能耗特性的关键。谷俊杰等根据电厂实际运行数据研究了关联规则算法在电厂水煤比控制数据挖掘中的应用^[12]。顾德东等针对某电厂水冷壁超温等问题,将原来的煤跟水控制修改为水跟煤控制,并完成了机组协调控制系统的优化,最终提高了参数的控制品质^[13]。综上所述,关于水煤比控制策略,以往的研究主要集中在主要参数的

控制精度上,较少涉及到水煤比控制策略对变负荷控制过程中的机组能耗特性的研究。

机组的控制策略会影响整个瞬态过程的主要参数变化,进一步影响瞬态过程的能耗特性。本文以 660 MW 超临界燃煤机组为研究对象,在搭建完善的热力系统仿真模型基础上,对水煤比控制策略分别采用水跟煤(WFC)和煤跟水(CFW)的控制方式,在 50%~100%的负荷工况范围内进行升、降负荷仿真计算,获得了两种水煤控制方式下机组变负荷运行过程中主要参数的累计偏差和变负荷瞬态过程的能耗特性,对机组的实际调峰运行具有一定的借鉴意义。

1 机组模型

1.1 660 MW 超临界燃煤机组 GSE 仿真模型

图 1 为 660 MW 超临界、一次中间再热机组仿真系统模型图,机组锅炉和汽轮机的主要参数如表 1 所示,燃用煤种如表 2 所示。模型利用 GSE 仿真软件搭建,模型的稳态、瞬态精度验证已在之前的工作中完成^[14-16]。

表 1 机组的额定热力参数

参数	锅炉系统	汽轮机系统
主汽流量/ $t \cdot h^{-1}$	2 066	1 913
主汽压力/MPa	25.4	24.2
主汽温度/ $^{\circ}C$	571	566
再热蒸汽压力/MPa	4.42	4.08
再热蒸汽温度/ $^{\circ}C$	569	566
给水温度/ $^{\circ}C$	283	
凝汽器压力/kPa		4.08

1.2 变负荷过程的主要参数控制效果的计算方法

机组瞬态过程结束的标志是整个机组的总蓄热量不再发生变化,即实时蓄热量与稳态负荷下相等或者十分接近。对于特定的升负荷(降负荷)过程,机组变负荷瞬态过程的起点和终点是确定的,采用不同的控制逻辑,对机组变负荷过程主要输出参数会有较大影响。变负荷过程机组主要参数,如主汽压力、温度等与设定值之间存在差异。为了比较不

表 2 煤种的煤质分析

$w/\%$ (工业分析)				$w/\%$ (元素分析)				
M_{ar}	A_{ar}	V_{ar}	FC_{ar}	C_{ar}	H_{ar}	O_{ar}	N_{ar}	S_{ar}
16.01	17.32	37.66	29.01	52.5	3.03	9.96	0.54	0.64

注:M、A、V、FC 分别表示水分、灰分、挥发分、固定碳;下标 ar 表示收到基。

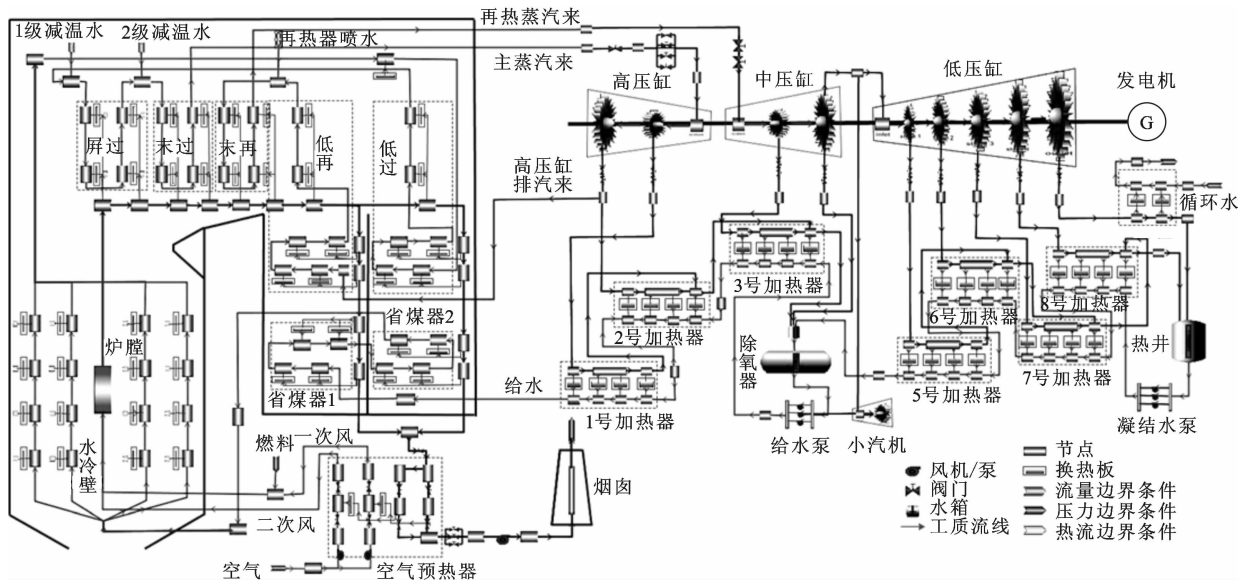


图 1 660 MW 超临界燃煤机组 GSE 仿真模型

同控制方式下机组主要参数的控制效果,以瞬态过程的参数偏差积分量作为计算基础,具体计算方法^[17]如下

$$X_p = \int_0^{\tau_0} |p_{rt}(\tau) - p_{sp}(\tau)| d\tau \tag{1}$$

$$X_t = \int_0^{\tau_0} |T_{rt}(\tau) - T_{sp}(\tau)| d\tau \tag{2}$$

式中: X_p 是机组瞬态过程压力累计偏差; $p(\tau)$ 是机组主汽压力; X_t 是机组瞬态过程主汽温度的累计偏差; $T(\tau)$ 是机组主汽温度; τ_0 是瞬态过程的总时间;下标 rt 表示实时值,sp 表示设定值。

图 2 为瞬态过程中机组蓄热率变化及 τ_0 的确定方法。对于 τ_0 的计算做出以下规定:计算不同控制策略下机组瞬态过程结束的总时间时以时间长的为准。例如,A 策略下 τ_A 为 1 ks,B 策略下 τ_B 为 2 ks,则计算时取 $\tau_0 = 2$ ks,即在比较不同控制策略的优劣时,其前提是保证瞬态过程的总时间一致。

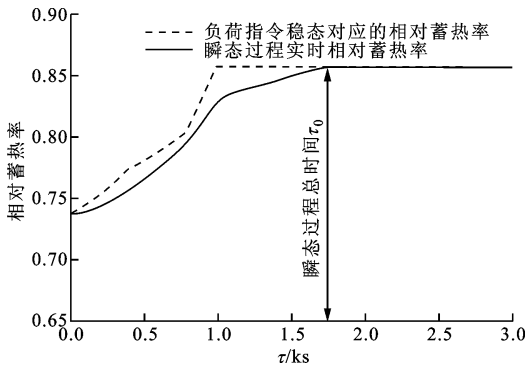


图 2 变负荷瞬态过程机组的蓄热率变化

1.3 机组变负荷过程能耗的计算方法

瞬态过程机组的主要能耗特性指标计算方法如下。

机组瞬态运行过程中的总发电量

$$W_{total} = \int_0^{\tau_0} P(\tau) d\tau \tag{3}$$

机组瞬时给煤量分为负荷指令下的稳态对应给煤量和瞬态过程的煤耗增量两部分,瞬态过程总的煤耗增量用 ΔB 表示,计算公式如下

$$\dot{B}(\tau) = \dot{B}_s(\tau) + \delta B(\tau) \tag{4}$$

$$\Delta B = \int_0^{\tau_0} \delta B(\tau) d\tau \tag{5}$$

瞬态过程总的标准煤耗率增量用 Δb_s 表示,计算公式如下

$$\Delta b_s = \frac{\Delta B}{W_{total}} \frac{Q_{LHV}}{Q_s} \tag{6}$$

式(3)~(6)中: $P(\tau)$ 是机组瞬时发电量; $\dot{B}(\tau)$ 是机组瞬时给煤速率; $\dot{B}_s(\tau)$ 是负荷指令下对应的给煤速率; $\delta B(\tau)$ 是瞬态过程中的瞬时煤耗增量; Q_{LHV} 是燃煤种的低位发热量,本文取 $19\,652\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; Q_s 是标准煤的低位发热量,取 $29\,300\text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

不同控制方式下机组在瞬态过程的煤耗率增量差 $\Delta(\Delta b_s)$ 由下式计算

$$\Delta(\Delta b_s) = \Delta b_{s,WFC} - \Delta b_{s,CFW} \tag{7}$$

2 两种典型的水煤比控制策略

变负荷过程中水煤比需根据中间点温度(或焓值)进行实时调节,在保证锅炉热负荷和机组负荷相适应的前提下,锅炉过热蒸汽温度应控制在设定值

附近^[13]。目前,应用较多的水煤比控制方式分为煤跟水和煤跟煤两种控制策略^[18]。

煤跟水的控制策略如图 3 所示,锅炉主控回路计算结果(BID)通过函数发生器形成基本给水流量指令,变负荷过程中增加前馈给水流量指令。水煤比的输出用于修正燃料指令的设定,此时燃料指令设定值主要包含 3 部分:PID 经函数转换来的基本燃料量指令,此信号是稳态时燃料指令的基础;基于变负荷前馈的燃料量指令,用来修正变负荷过程中水煤比的动态偏差;水煤比控制输出的燃料量指令,此信号用于控制汽水分离器入口的蒸汽过热器和锅炉主蒸汽温度。各个主要控制前馈量需与机组负荷指令经函数发生器形成的修正系数相乘,进而实现不同负荷率下的前馈控制。

水跟煤的控制策略如图 4 所示,BID 指令通过函数发生器形成燃料指令,变负荷过程中增加前馈燃料指令。水煤比的输出用于修正给水流量指令的

设定,此时给水流量指令设定值主要包含 3 部分:PID 经函数转换来的基本给水流量指令,此信号是稳态水煤比的基础;基于变负荷前馈的给水流量指令,用来修正变负荷过程中水煤比的动态偏差;水煤比控制输出的给水流量指令,此信号用于控制汽水分离器入口的蒸汽过热器和锅炉主蒸汽温度。水煤比控制中,过热器调节器输出作为其主要部分,末级过热蒸汽温度偏差以及各初级过热蒸汽温度偏差之和作为其前馈信号。

3 计算结果及讨论

实时负荷、主汽温度、主汽压力和发电功率是机组的主要输出参数, X_p 、 X_t 反映机组瞬态运行的灵活、跟随性,瞬态过程中 $\Delta(\Delta b_e)$ 是能耗特性指标。图 5~图 10 是机组变负荷瞬态过程的主要指标,计算过程中变负荷范围为 50%~100%,变负荷速率 V_e 为 6、10、14 和 18 MW·min⁻¹。

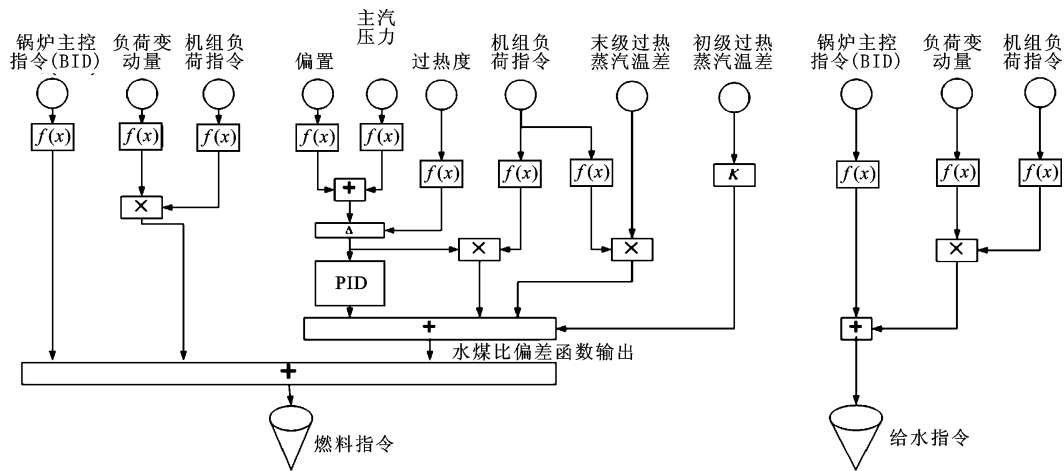


图 3 煤跟水控制逻辑

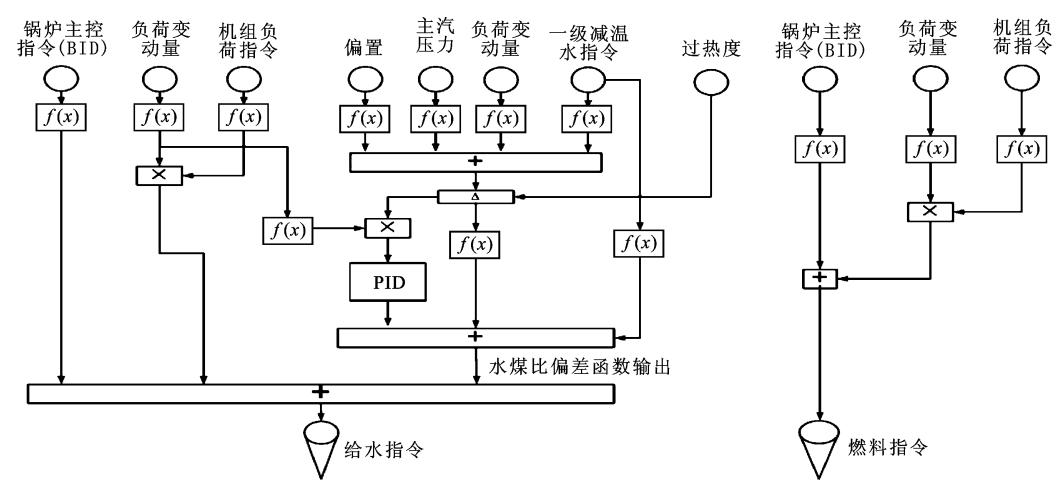


图 4 水跟煤控制逻辑

3.1 实时负荷变化

调峰过程中机组以变负荷速率 $6\text{ MW}\cdot\text{min}^{-1}$ 升、降负荷时的负荷指令和实时负荷率的变化趋势如图 5 所示。对比 CFW 和 WFC 两种控制方式可知,CFW 的负荷跟随性较好。

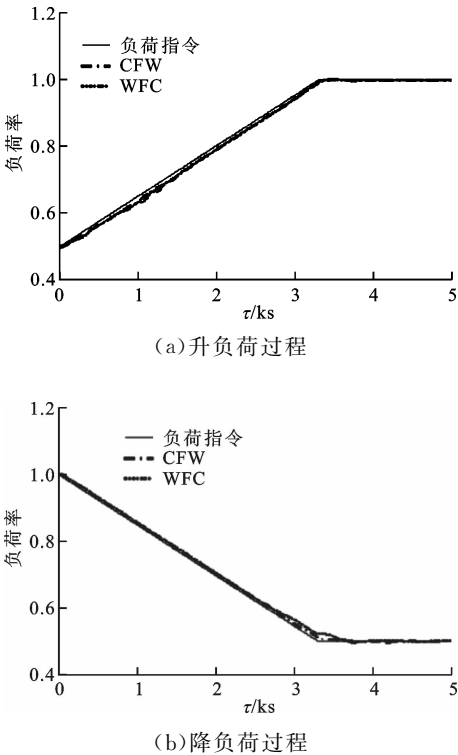


图 5 变负荷过程中负荷率的变化趋势

3.2 主汽压力累计偏差

图 6 给出了机组主汽压力的变化趋势,主汽压力设定值由机组滑压运行曲线得到。从图 6a 可知,升负荷过程中,在两种水煤控制方式下,机组的实时主汽压力都低于设定值。比较 WFC 和 CFW 控制方式下的主汽压力变化趋势,可知后者相对波动小。从图 6b 可知,降负荷过程中,实时主汽压力高于设定值,CFW 控制方式下,其最大超调量更小。总之,在变负荷过程中,CFW 控制方式下机组的主汽压力控制效果更佳,且两种控制方式之间的控制效果差异较为明显。其原因如下:对于 WFC 控制逻辑,给煤速率主要随负荷变化,通过调整给水流量来控制蒸汽参数等,而对于 CFW 控制逻辑,给水流量跟随负荷平稳上升,汽水侧压力更容易控制,通过调整给煤速率来控制蒸汽参数,可见前者给水流量微调时汽水侧的压力更容易波动。另外,在 $1\sim1.5\text{ ks}$ 之间,水蒸气在临界点附近,其物性对外界扰动比较敏感,蒸汽压力也更容易波动。

图 7a 是机组以不同变负荷速率升负荷的过程。

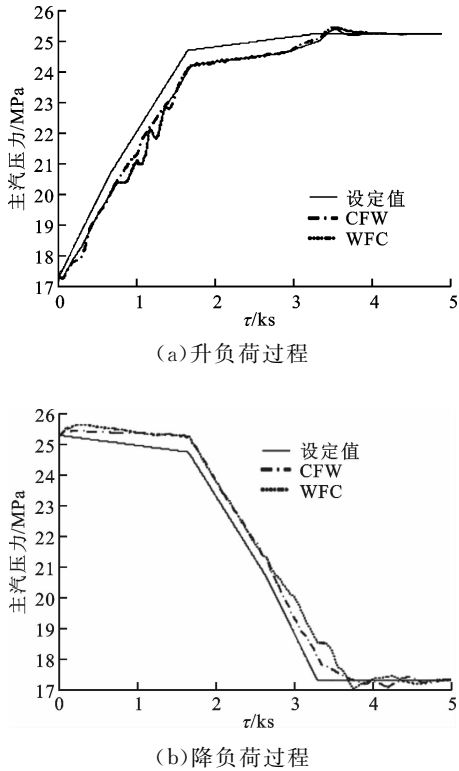


图 6 变负荷过程中主汽压力的变化趋势

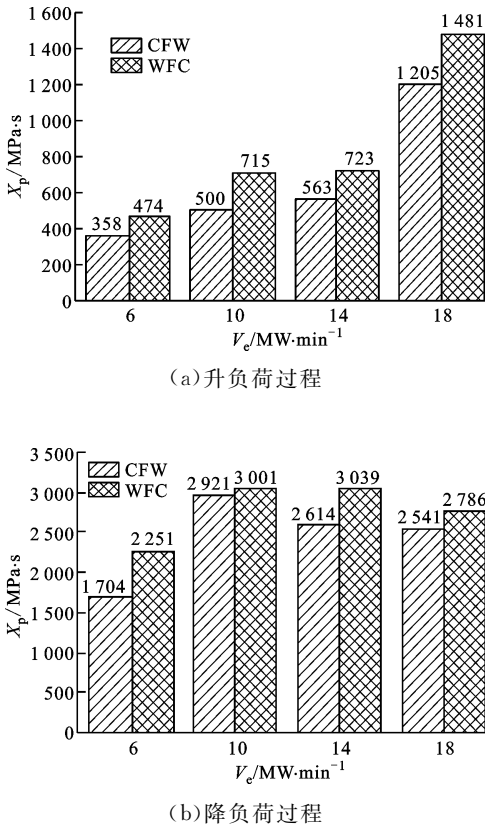


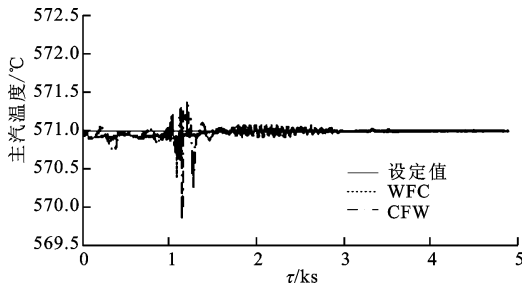
图 7 变负荷过程中的主汽压力累计偏差

随着变负荷速率的增加, X_p 呈现逐渐增大的趋势。对比两种控制策略,发现 WFC 控制策略主汽压力

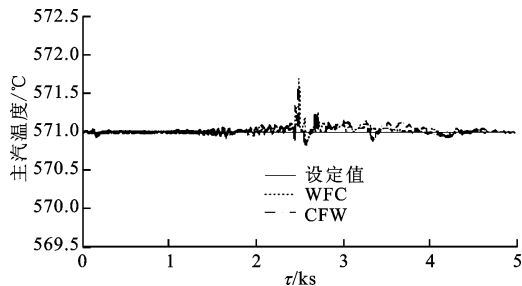
的累计偏差较大。图 7b 是机组以不同变负荷速率降负荷的过程。对比图 7a、7b 可知,降负荷过程的压力累计偏差更大,即降负荷过程的主汽压力更难控制。

3.3 主汽温度累计偏差

图 8 是机组变负荷过程中主汽温度的变化趋势,采用 CFW 和 WFC 两种控制方式都能保证主汽温度在较小的范围内变化。



(a) 升负荷过程



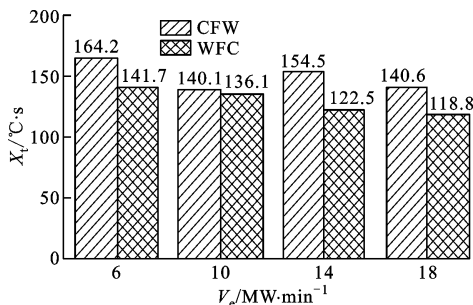
(b) 降负荷过程

图 8 变负荷过程中主汽温度的变化趋势

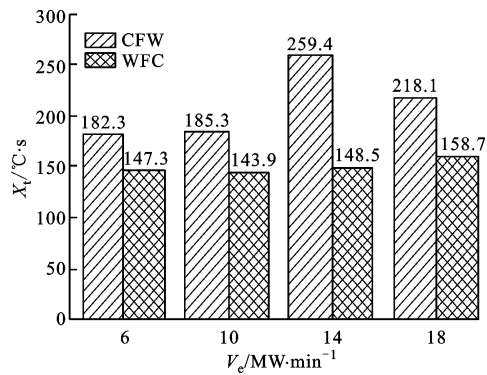
图 9a 是机组以不同的变负荷速率升负荷的过程。随着变负荷速率的增加, X_t 的值基本不变, CFW 控制策略主汽温度的累计偏差略大。图 9b 是机组以不同的变负荷速率降负荷的过程。对比图 9a、9b 可知,不同的变负荷速率下锅炉主汽温度均得到了较好的控制。

3.4 变负荷过程能耗特性

为研究瞬态过程机组的能耗特性,需对整个变



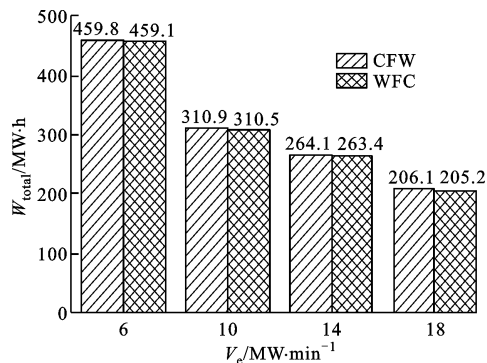
(a) 升负荷过程



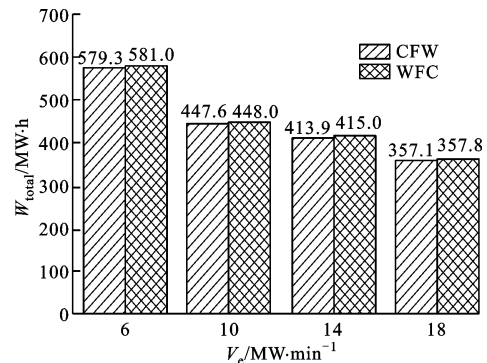
(b) 降负荷过程

图 9 变负荷过程中的主汽温度累计偏差

负荷瞬态过程中给煤速率、输出功率等主要参数进行积分求和并求其平均值,进而得到瞬态过程中平均标准发电煤耗率。机组在变负荷过程中的总发电量如图 10 所示。随着变负荷速率的增加,机组更快地从一个负荷变化到另一个负荷,瞬态过程持续的时间会越短,机组在瞬态过程的总发电量会越少。相同变负荷速率下,升负荷过程中 CFW 控制方式下机组的总发电量较 WFC 略多,当 V_e 从 $6 \text{ MW} \cdot \text{min}^{-1}$ 增大到 $18 \text{ MW} \cdot \text{min}^{-1}$ 时, W_{total} 差值从 $0.3 \text{ MW} \cdot \text{h}$ 增加到 $0.9 \text{ MW} \cdot \text{h}$ 。降负荷过程中,机组



(a) 升负荷过程



(b) 降负荷过程

图 10 变负荷过程中的总发电量

的总发电量亦随变负荷速率的增大而减少,CFW 控制方式下机组的发电量较 WFC 少。

机组在变负荷过程中,自身发生工质和热量的存储,升负荷过程中,机组蓄工质和蓄热量增大,瞬时给煤速率 $\dot{B}$ 将大于负荷指令下对应的稳态给煤速率 $\dot{B}_s$,如式(5)所示, $\Delta\dot{B}$ 为正值,总煤耗增量 ΔB 为正,平均标准煤耗率增量 Δb_s 也为正。降负荷过程中,自身蓄热量减小, $\Delta\dot{B}$ 、 ΔB 为负, Δb_s 也为负。图 11 是变负荷 WFC 和 CFW 控制方式对 Δb_s 的影响。从图中可知:升负荷过程中,WFC 控制方式较 CFW 控制方式的 Δb_s 大;降负荷过程中,WFC 控制方式较 CFW 控制方式的 Δb_s 的绝对值小。

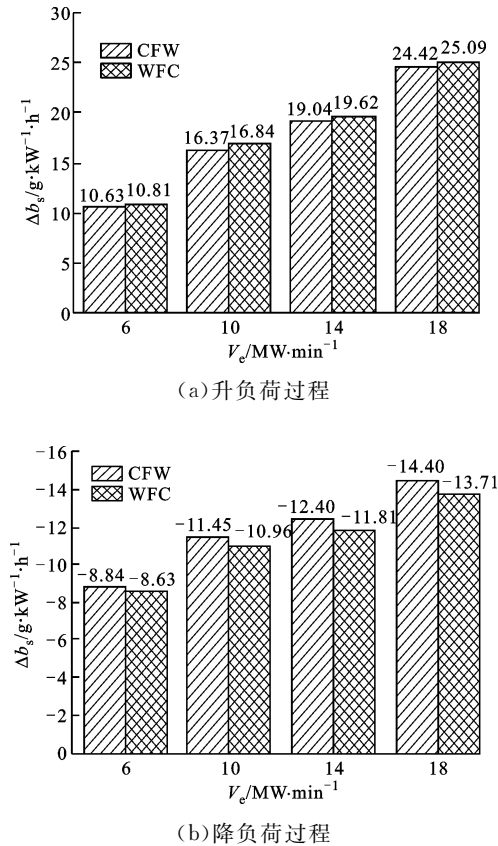


图 11 变负荷过程中的平均发电标准煤耗率增量

根据式(7),可得机组变负荷机组在 WFC 和 CFW 两种控制方式下的 $\Delta(\Delta b_s)$ 。如图 12 所示,随着变负荷速率的增大, $\Delta(\Delta b_s)$ 逐渐增大,最大值为 $0.69 \text{ g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

4 结 论

本文利用基于 GSE 仿真平台搭建的 660 MW 超临界燃煤机组动态仿真模型,研究了协调控制系统采用两种水煤比控制策略以不同的变负荷速率升、降负荷过程中,机组主要参数的累计偏差量以及

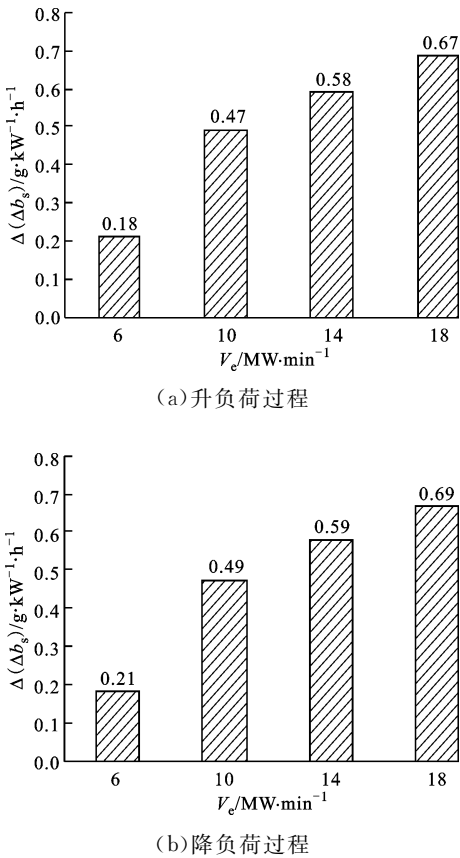


图 12 变负荷过程中的平均标准煤耗率增量差

机组瞬态过程的能耗特性,得到了以下结论。

- (1) 机组变负荷过程中,采用 CFW 控制方式较 WFC 控制方式的主汽压力累计偏差更小,主汽温度累计偏差更大。
- (2) 变负荷过程中,升负荷瞬态过程的主汽压力累计偏差较降负荷时小,主汽温度累计偏差略小。
- (3) 采用 CFW 控制方式,变负荷瞬态过程具有更高的能量转换效率。变负荷瞬态过程中,随着变负荷速率的增加,采用 WFC 控制方式较 CFW 控制方式的平均发电标准煤耗率增量最大相差 $0.69 \text{ g} \cdot \text{kW}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$ 。

参考文献:

[1] 邓拓宇,田亮,刘吉臻. 供热机组锅炉储能与热网储能空间时间多尺度分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 599-606.
DENG Tuoyu, TIAN Liang, LIU Jizhen. Spatial and temporal multiscale analysis on energy storage in heat supply units' boiler and heat supply nets[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 599-606.
[2] 刘吉臻,洪烽,高明明,等. 循环流化床机组快速变负荷运行控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(14): 4130-4137.

- LIU Jizhen, HONG Feng, GAO Mingming, et al. Research on the control strategy for quick load change of circulating fluidized bed boiler units [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4130-4137.
- [3] COLONNA P, VAN PUTTEN H. Dynamic modeling of steam power cycles [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(2/3): 467-480.
- [4] VAN PUTTEN H, COLONNA P. Dynamic modeling of steam power cycles; Part II Simulation of a small simple Rankine cycle system [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(14/15): 2566-2582.
- [5] ALOBAID F, STRÖHLE J, EPPLE B, et al. Dynamic simulation of a supercritical once-through heat recovery steam generator during load changes and start-up procedures [J]. Applied Energy, 2009, 86(7/8): 1274-1282.
- [6] HENTSCHEL J, ZINDLER H, SPLIETHOFF H. Modeling and transient simulation of a supercritical coal-fired power plant: dynamic response to extended secondary control power output [J]. Energy, 2017, 137: 927-940.
- [7] 韩宇, 徐钢, 杨勇平, 等. 一种燃煤电站清洁高效协同余热利用系统 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(21): 5842-5848.
- HAN Yu, XU Gang, YANG Yongping, et al. A clean and efficient waste heat utilization system in coal-fired power plants [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(21): 5842-5848.
- [8] 冯澎湃, 王宁玲, 杨志平, 等. 直接空冷高背压供热机组的梯级供热特性与冷端变工况协同优化 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(20): 5546-5554.
- FENG Pengpai, WANG Ningling, YANG Zhiping, et al. Cascade heating characteristics and off-design collaborative optimization of direct air-cooled high pressure heat supply power units [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(20): 5546-5554.
- [9] 韩小渠, 严俊杰, 穆祺伟, 等. 褐煤烟气预干燥发电系统变工况特性的仿真研究 [J]. 西安交通大学学报, 2015, 49(1): 27-33.
- HAN Xiaoqu, YAN Junjie, MU Qiwei, et al. Simulation for off-design performances of flue gas pre-dried lignite-fired power system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2015, 49(1): 27-33.
- [10] 李冰心, 张国柱, 陈伟雄, 等. 采用蒸汽喷射器的低负荷给水加热系统变工况性能研究 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(1): 65-71.
- LI Bingxin, ZHANG Guozhu, CHEN Weixiong, et al. Analysis on the performance of low-load feed water heating system with jet heat pump under variable working conditions [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(1): 65-71.
- [11] 赵志丹, 高奎, 陈志刚. 超(超)临界机组模拟量控制系统的调试及优化 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2016: 16-18.
- [12] GU J J, LIANG L B. Analysis of water-fuel ratio for supercritical boiler based on association rule[C/OL]// Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2009. [2017-10-20]. DOI: 10.1109/APPEEC.2009.4918166.
- [13] 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.
- GU Dedong, LI Enpeng. Optimization of control strategy for water coal ratio in ultra-supercritical units [J]. Thermal Power Generation, 2017(4): 115-119.
- [14] WANG C, LIU M, LI B, et al. Thermodynamic analysis on the transient cycling of coal-fired power plants: simulation study of a 660 MW supercritical unit [J]. Energy, 2017, 122: 505-527.
- [15] ZHAO Y, WANG C, LIU M, et al. Improving operational flexibility by regulating extraction steam of high-pressure heaters on a 660 MW supercritical coal-fired power plant: a dynamic simulation [J]. Applied Energy, 2018, 212: 1295-1309.
- [16] 王朝阳, 李冰心, 苗国耀, 等. 660 MW 机组不同变负荷速率下瞬态过程的能耗特性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5665-5673.
- WANG Chaoyang, LI Bingxin, MIAO Guoyao, et al. Study on energy consumption characteristics during transient processes of a 660 MW coal-fired power plant with different load-variation rates [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5665-5673.
- [17] WANG C, ZHAO Y, LIU M, et al. Peak shaving operational optimization of supercritical coal-fired power plants by revising control strategy for water-fuel ratio [J]. Applied Energy, 2018, 216: 212-223.
- [18] 赵志丹, 王海涛, 张志, 等. 超超临界 1 000 MW 二次再热机组水煤比控制及优化 [J]. 热力发电, 2017(8): 136-140.
- ZHAO Zhidan, WANG Haitao, ZHANG Zhi, et al. Control and optimization of water/coal ratio for an ultra supercritical 1 000 MW unit [J]. Thermal Power Generation, 2017(8): 136-140.

(编辑 荆树蓉)