

350 MW 热电联产循环流化床机组负荷响应特性

王唯铎^{1,2}, 高明明^{1,2}, 王勇权^{1,2}, 张帅柠^{1,2}, 成永强²

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206; 2. 华北电力大学 控制与计算机工程学院, 北京 102206)

摘要:近年来热电联产机组在燃煤机组中的比重增加,而火力发电渐渐承担调峰重任,灵活性需求增强,提高热电联产机组的变负荷能力对于深度调峰具有重大意义。热电联产循环流化床(CFB)机组可利用锅炉汽水侧和热网蓄热提高机组快速变负荷能力,因此提出一种超临界热电联产 CFB 机组汽水侧蓄热和热网蓄热的定量计算方法。以某 350 MW 热电联产 CFB 机组为例,分析该机组汽水侧工质流程和热网抽汽及循环水分析,结合机组设计参数与历史运行数据,计算不同负荷(35%~90%)工况下锅炉汽水侧蓄热系数 C_{sw} 和热网蓄热系数 C_h ,进一步分析机组负荷响应特性及蓄热利用可持续时间。结果表明:随着机组负荷增大,汽水侧蓄热系数 C_{sw} 增大,且在机组高负荷阶段汽水工质蓄热 C_{sw} 变化较大,而热网蓄热系数 C_h 几乎不变;机组蓄热利用可持续时间与机组负荷成正比,与机组变负荷速率成反比;热网蓄热利用可持续时间大于汽水侧蓄热,且热网蓄热能力几乎不随机组负荷变化而变化;在 4%/min 变负荷速率下,热网蓄热利用可持续时间约 285 s,而汽水侧蓄热利用可持续时间 161.5~249.7 s。表明在机组参与深度调峰期间,热网蓄热可提供更稳定的变负荷能力。以上计算结果为超临界热电联产 CFB 机组深度调峰及快速变负荷运行提供理论指导。

关键词:循环流化床机组;深度调峰;汽水蓄热;热网蓄热;负荷响应

中图分类号:TQ53;TK114 文献标志码:A 文章编号:1006-6772(2024)09-0102-09

Load response characteristics of 350 MW cogeneration CFB unit

WANG Weihua^{1,2}, GAO Mingming^{1,2}, WANG Yongquan^{1,2}, ZHANG Shuaining^{1,2}, CHENG Yongqiang²

(1. State Key Laboratory of Renewable Energy Power System, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In recent years, the proportion of cogeneration units in coal-fired units has increased, and thermal power generation has gradually assumed the heavy responsibility of peak regulation, and the demand for flexibility has increased. Combined heat and power circulating fluidized bed (CFB) units can use boiler steam-water side and heat network heat storage to improve the rapid variable load capacity of the unit, so a quantitative calculation method for steam-water side heat storage and heat network heat storage of supercritical cogeneration CFB units was proposed. Taking a 350 MW cogeneration CFB unit as an example, the working fluid flow on the steam-water side of the unit and the steam extraction and circulating water of the heat network were analyzed. The heat storage coefficient C_{sw} and the heat network heat storage coefficient C_h were calculated under different load conditions (35%~90%) by combining the design parameters and historical operation data of the unit, and the load response characteristics of the unit and the sustainable time of heat storage utilization were further analyzed. The results show that with the increase of the load of the unit, the heat storage coefficient C_{sw} of the steam-water side increases, and the C_{sw} of the steam-water working fluid changes greatly in the high load stage of the unit, while the heat storage coefficient C_h of the heat network is almost unchanged. The sustainable time of heat storage utilization of the unit is directly proportional to the load of the unit and inversely proportional to the variable load rate of the unit. The sustainable time of heat storage utilization of heat network is greater than that of steam and water side, and the heat storage capacity of heat network almost does not change with random group load changes. At the variable load rate of 4%/min, the heat storage utilization of the heat network can last for about 285 s, while the heat storage utilization on the steam side can last for 161.5~249.7 s. The above calculation results can provide theoretical guidance for the deep peak regula-

收稿日期:2024-05-31;责任编辑:戴春雷 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.LHX24053101

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFB4100301)

作者简介:王唯铎(2000—),男,河北廊坊人,硕士研究生。E-mail:1244036933@qq.com

通讯作者:高明明(1979—),男,山西吕梁人,教授。E-mail:gmm1@ncepu.edu.cn

引用格式:王唯铎,高明明,王勇权,等.350 MW 热电联产循环流化床机组负荷响应特性[J].洁净煤技术,2024,30(9):102-110.

WANG Weihua, GAO Mingming, WANG Yongquan, et al. Load response characteristics of 350 MW cogeneration CFB unit [J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(9): 102-110.



移动阅读

tion and rapid variable load operation of supercritical cogeneration CFB units.

Key words: circulating fluidized bed unit; deep peak shaving; soda heat storage; heat network heat storage; load response

0 引言

近年来,风力发电、太阳能发电等新能源并网发电容量快速增长,但新能源有随机性、不稳定性,导致严重弃风、弃光。为保障电力系统稳定运行,需提高火电机组的灵活性,增强深度调峰能力^[1-3]。

循环流化床(circulating fluidized bed, CFB)机组用流态化燃烧方式,主要热量来自床料中积蓄的大量即燃碳,这使 CFB 锅炉有庞大的蓄热能力,也可实现更低负荷稳定运行^[4-6]。但因 CFB 机组特殊的燃烧方式,导致其迟延大、惯性大及有非线性特性,难满足电网对机组负荷响应速率要求^[7-9]。对于参与深度调峰的热电联产 CFB 机组,合理利用锅炉汽水侧蓄热和热网蓄热可在短时间内快速改变机组运行负荷^[10-12]。因此深入分析和研究 CFB 锅炉汽水侧蓄热能力和热网蓄热能力,对进一步提升热电联产 CFB 机组的深度调峰能力有重大意义^[13]。

目前热电联产机组蓄热特性研究主要集中在煤粉锅炉机组,在锅炉汽水侧蓄热计算与应用方面,王宏伟等^[14]通过供热机组的抽汽试验,综合考量机组特性和实际负荷数据获得锅炉汽水侧蓄热系数;GAO 等^[15]建立某 330 MW 汽包锅炉模型,通过将蓄热系数引入协调控制系统,对机组进行优化;杜鸣^[16]基于历史数据信息计算各工况下锅炉蓄热所能提供的最大电量,并对某 600 MW 超临界机组锅炉蓄热进行评估;张光明^[17]从理论分析方面构建热电联产机组的非线性系统动态模型。

在热网蓄热计算与应用方面,郭良丹等^[18]利用储热罐实现对供热抽汽和热网循环水的能量解耦,计算得出热网蓄热对于供热机组功率影响;戴冠正等^[19]根据供热负荷变化的动态特性,提出了一种基于动态权重的组合模型供热负荷预测;王冠杰等^[20]分析了仿真模型单一工况下柔性因子对控制系统性能的影响,设计了一种基于灵活性评价的热电联产机组柔性控制策略。以上研究多为建立机理模型,根据设计数据进行推算,计算过程复杂且对于不同负荷、不同类型的机组适用度不高。笔者根据机组汽水工质流程分段计算锅炉蓄热,根据热网供热抽汽情况计算热网蓄热,结合电厂设计数据和历史运行数据计算 CFB 机组可利用的汽水侧和热网蓄热,计算方法简单且适用性广。

对于 CFB 锅炉机组,由于其燃烧方式、各出口

工质参数等均不同与煤粉锅炉机组,故 CFB 机组的汽水侧蓄热和热网蓄热容量、特性也不同。目前对于循环流化床机组的蓄热研究较少。谭振坤^[21]通过计算和论证分析表明超临界 CFB 锅炉中蕴含着大量可利用蓄热;ZHANG 等^[22]根据机理分析建立了亚临界 CFB 机组机炉协调系统模型,通过对蓄热利用的分析,提高理论变负荷速度;刘吉臻等^[23]分析 CFB 锅炉燃料侧、汽水侧蓄能特性,对不同容量 CFB 机组的蓄热系数进行计算;张洪福等^[24]根据汽水工质特性,对 300 MW 亚临界 CFB 机组汽水侧蓄热定量计算;张开萍等^[25]等根据对汽轮机侧建立数学模型,计算汽轮机抽汽流量得出在变负荷中可利用的热网蓄热;杨凤玲等^[26]具体分析了亚临界 CFB 机组各有蓄热能力部分,提出了一套针对 CFB 调峰过程中蓄释热量的计算方法。而对于热电联产 CFB 机组锅炉,将汽水侧和热网蓄热结合对比计算研究较少,需进一步研究大范围变负荷中蓄热变化,结合汽水侧蓄热和热网蓄热的利用,以加强机组快速变负荷能力和变负荷稳定性。

笔者对某 350 MW 适应深度调峰的 CFB 热电联产机组分析,分别计算该机组在各负荷工况下汽水侧蓄热系数和热网蓄热系数,结合设计参数和历史运行数据计算能蓄热转化效率,进一步计算机组汽水侧和热网蓄热可利用时间,对比分析汽水侧和热网侧蓄热能力,并进一步分析机组的负荷响应特性,为超临界循环流化床供热机组快速变负荷优化提供理论指导。

1 理论介绍

循环流化床机组变工况中,一般以调节给煤速率为主,但调节给煤速率易造成负荷动作不及时,需合理利用 CFB 机组汽水侧与热网蓄热,提高机组的快速变负荷的能力,以满足深度调峰的需求。

图 1 为 CFB 供热机组汽水流程简化示意,当 CFB 机组参与深度调峰时,主汽阀门开度增加的同时汽水工质压力瞬间降低,在等焓工况下汽水工质体积增加,使进入汽轮机高压缸做功的蒸汽量增加,负荷上升;减小热网抽汽蝶阀的开度可降低供热抽汽量,减少的这部分抽汽量进入到汽轮机中压缸做功,提高机组变负荷能力。

图 2 为机组汽水侧和热网蓄热计算逻辑图。机组快速变负荷期间,主蒸汽压力变化量结合汽水工

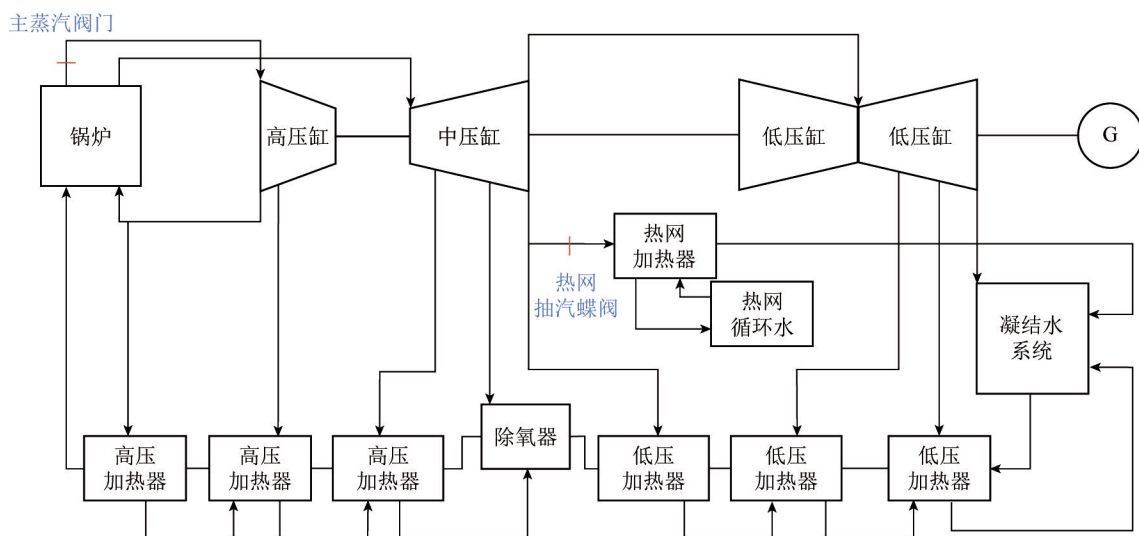


图1 CFB热电联产机组汽水流程

Fig.1 Steam and water flow diagram of CFB cogeneration unit

质体积变化量及金属管壁温度变化量可得出汽水工质蓄热系数和金属蓄热系数,得出由汽水工质蓄热量和金属蓄热量构成的汽水侧蓄热量。此外,当热网进行抽汽时,由热网循环水吸热变化量和热网循

环水温度变化量可计算热网蓄热系数,得出热网蓄热量。蓄热转化为发电量的过程中存在转化效率,汽水侧蓄热可转化电量加上热网蓄热可转化电量即为机组总可利用蓄热转化电量。

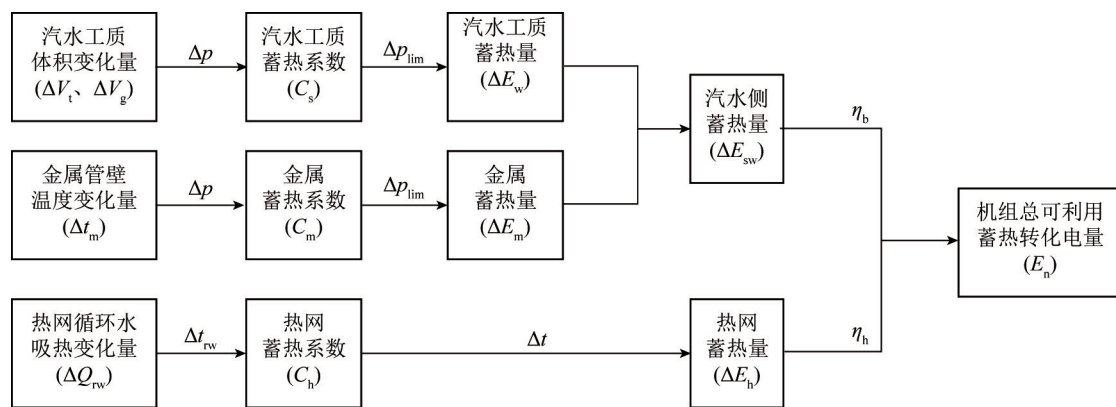


图2 机组汽水侧和热网蓄热计算逻辑图

Fig.2 Logic diagram of steam water side and heat storage calculation for the heating network of the unit

1.1 汽水侧蓄热

汽水侧蓄热包括汽水工质蓄热和金属蓄热。当CFB机组参与深度调峰时,主汽阀门开度增加使进入汽轮机做功的蒸汽增加,同时汽水工质压力瞬间降低,在等焓工况下汽水工质体积增加、温度降低,使进入汽轮机做功的蒸汽量增加,增加机组负荷。其中引起汽轮机做功变化的汽水工质体积变化量的能量即为汽水工质蓄热量;汽水工质温度变化导致的金属管壁热量变化量即为金属蓄热量。

1.1.1 汽水工质蓄热

在循环流化床机组的汽水流程中,工质不同阶段有不同状态,各阶段的工质参数有一定差异,需分别计算各阶段的汽水工质蓄热量。

在该350 MW热电联产的CFB机组中,工质在

给水泵压力的作用下,依次经省煤器、水冷壁、汽水分离器和过热器后进入到汽轮机做功。在流动中工质可根据热力学特性分为过冷水、饱和水、饱和蒸汽和过热蒸汽。在压力变化导致工质体积变化时,饱和水和饱和蒸汽会发生相变,而过冷水和过热蒸汽不发生相变,由能量守恒、质量守恒定律与工质的热力学特性可计算各段工质变化体积。

对于有相变的工质,当压力变化时,在水冷壁的汽水混合段,部分饱和水转化成为饱和蒸汽,根据能量和质量守恒定律可得:

$$\frac{V_{w0}}{v_w} + \frac{V_{s0}}{v_s} = \frac{V_{w1}}{v_w} + \frac{V_{s1}}{v_s}, \quad (1)$$

$$\frac{V_{w0}}{v_w} h_{w0} + \frac{V_{s0}}{v_s} h_{s0} = \frac{V_{w1}}{v_w} h_{w1} + \frac{V_{s1}}{v_s} h_{s1}, \quad (2)$$

式中, V_{w0} 、 V_{s0} 分别为饱和水、饱和蒸汽在压力变化前的工质体积, m^3 ; V_{w1} 、 V_{s1} 分别为压力变化后的工质体积, m^3 ; v_w 、 v_s 分别为饱和水和饱和蒸汽的比体积, m^3/kg ; h_{w0} 、 h_{s0} 分别为饱和水、饱和蒸汽在压力变化前的工质比焓, kJ/kg ; h_{w1} 、 h_{s1} 分别为饱和水、饱和蒸汽在压力变化后工况的工质比焓, kJ/kg 。

根据压力变化前、后运行状态, 结合工质的热力特性可知饱和水、饱和蒸汽压力变化前、后比体积和比焓, 相变工质体积变化为

$$\Delta V_t = V_{w1} + V_{s1} - V_{w0} - V_{s0} \quad (3)$$

对于过冷水和过热蒸汽, 当压力变化时, 工质不发生相变, 由质量守恒定律得:

$$\frac{V_{g0}}{v_g(p_0, h_0)} = \frac{V_{g1}}{v_g(p_1, h_0)} \quad (4)$$

式中, V_{g0} 、 V_{g1} 分别为工质在压力变化前、后的体积, m^3 ; $v_g(p_0, h_0)$ 、 $v_g(p_1, h_0)$ 分别为工质在压力变化前、后的比体积, m^3/kg ; p_0 、 p_1 分别为变化前、后的工质压力, MPa ; h_0 为工质比焓, kJ/kg 。

根据压力变化前、后工况条件的变化, 结合工质的热力性质, 即可计算无相变工质体积变化 ΔV_g 为

$$\Delta V_g = V_{g1} - V_{g0} \quad (5)$$

在工质压力变化后, 膨胀的工质体积会影响主蒸汽体积, 影响机组汽轮机的做功, 过热蒸汽所含能量增量 ΔE_w 与压力变化量 Δp 之比即循环流化床机组汽水工质的蓄热系数 C_s :

$$C_s = \frac{\Delta E_w}{\Delta p} = 0.001(\Delta V_g + \Delta V_t) \frac{h_s}{v_s \Delta p} \quad (6)$$

式中, h_s 为主蒸汽比焓, kJ/kg 。

1.1.2 金属蓄热

CFB 机组快速变负荷运行中, 工质压力变化使各截面汽水工质温度变化, 继而使金属管壁温度变化, 该部分温度变化而导致热量变化即为金属蓄热量。

因金属管壁温度能在极短时间内达热平衡状态, 故各截面金属管壁温度变化与各截面汽水工质温度变化大致相同, 各段金属管壁的温度变化量 Δt_m 可近似表达为各段汽水工质的温度变化量 Δt_s :

$$\Delta t_m = \Delta t_s = t_{s0} - t(p_1, h_0) \quad (7)$$

式中, t_{s0} 为压力变化前工质的温度, $^{\circ}\text{C}$; $t(p_1, h_0)$ 为工质温度与工质压力的函数关系。

根据金属蓄热变化量 ΔE_m 和压力变化量 Δp 之比, 可得循环流化床锅炉的金属蓄热系数 C_m :

$$C_m = \frac{\Delta E_m}{\Delta p} = \frac{0.001 c_m m_m \Delta t_m}{\Delta p} \quad (8)$$

式中, C_m 为管壁比热容, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$; m_m 为金属管壁的质量, kg 。

综上, CFB 锅炉汽水侧的蓄热系数 C_{sw} 可表示为

$$C_{sw} = C_s + C_m \quad (9)$$

1.2 热网蓄热

CFB 机组在深度调峰期间, 除了利用汽水侧蓄热来提升变负荷的能力, 热网循环中也蕴含着大量能量, 在不影响用户供热的前提下, 也可用来提升机组变负荷的能力。

在 CFB 机组中, 供热方式通过从中压缸抽汽与热网循环水进行换热, 热网循环水吸收热量, 温度升高, 通过供热管道供给用户取暖。热网循环水的吸热量 ΔQ_{rw} 可表示为:

$$\Delta Q_{rw} = D_{rw} (h_{rw1} - h_{rw}) \quad (10)$$

式中, D_{rw} 为热网循环水流量, t/h ; h_{rw1} 、 h_{rw} 分别为热网循环水加热前后比焓, kJ/kg 。

在理想状态下, 根据能量守恒定律, 热网循环水的吸热量 ΔQ_{rw} 等于抽汽的放热量 Q_{gr} , 抽汽供热热量 Q_{gr} 可表示为:

$$Q_{gr} = D_{gr} (h_{gr1} - h_{gr}) \quad (11)$$

式中, D_{gr} 为供热抽汽流量, t/h ; h_{gr1} 、 h_{gr} 分别为供热蒸汽供热前、后比焓, kJ/kg 。

在机组变负荷时, 利用热网蓄热使部分热网抽汽回到汽轮机中压缸做功, 导致热网供热量减小, 调峰期间循环水温度会有所下降, 但热网循环水总量大, 变负荷时间短, 对热网供热影响小, 不影响用户取暖体验。热网蓄热系数 C_h 可由热网循环水吸热量 ΔQ_{rw} 和热网循环水的温度变化量 Δt_{rw} 之比求得:

$$C_h = \frac{\Delta Q_{rw}}{\Delta t_{rw}} = \frac{D_{gr} (h_{gr1} - h_{gr})}{\Delta t_{rw}} \quad (12)$$

式中, Δt_{rw} 为供热管网平均降低温度, $^{\circ}\text{C}$

2 机组负荷响应模型

在保证 CFB 机组正常运行的情况下, 调峰期间, 调节主蒸汽阀门导致主蒸汽压力变化 Δp_{lim} 时, 汽水侧蓄热变化总量 ΔE_{sw} 为汽水工质蓄热变化量 ΔE_w 与金属蓄热变化量 ΔE_m 的总和

$$\Delta E_{sw} = \Delta E_w + \Delta E_m \quad (13)$$

但在主蒸汽膨胀体积进入汽轮机做功的过程中存在着能量转化问题。转化效率 η_b 会根据负荷工况不同而存在差异, 可近似表示为

$$\eta_b = \frac{1000 N_e}{q_{m,s} h_s} \quad (14)$$

式中, N_e 为机组负荷, MW ; $q_{m,s}$ 为主蒸汽质量流

量, kg/s。

因此机组汽水侧的蓄热量实际上提升的有效负荷量 $E_{\Delta p}$ 为

$$E_{\Delta p} = \eta_b \Delta E_{sw} \quad (15)$$

工程实际运行中, 压力波动过大会影响机组稳定运行, 因此机组不同负荷工况下主蒸汽压力波动临界值不同, 通常随着负荷升高而增大。在 CFB 锅炉压力波动内, 单位压力波动下锅炉汽水侧蓄热的利用量与压力波动值成正比, 那么不同负荷工况下锅炉汽水侧蓄热可转化的电量 E_{n1} 可表示为^[5]:

$$E_{n1} = \frac{\Delta p_{\text{limit}}(N_{e,0})}{\Delta p_{\text{lim}}} E_{\Delta p} \quad (16)$$

式中, $\Delta p_{\text{limit}}(N_{e,0})$ 为额定负荷工况下压力波动临界值, MPa; Δp_{lim} 为额定负荷工况下单位压力波动, MPa。

通过动作供热抽汽蝶阀可利用热网蓄热提升机组变负荷能力。热网蓄热利用转化效率 η_h 如下:

$$\eta_h = (N_{E,\text{TMCR}} - N_{E,\text{th}}) / Q_{gr} \quad (17)$$

式中, $N_{E,\text{TMCR}}$ 、 $N_{E,\text{th}}$ 分别为 TMCR 工况发电功率和额定供热工况发电功率, MW。

在进行调峰动作时, 调节抽汽阀门使热网供热温度变化 Δt , 机组热网蓄热变化总量为 ΔE_h 。热网蓄热转为电能过程中存在转化效率限制, 故 CFB 机组热网蓄热可转化的电量 E_{n2} 可表示为:

$$E_{n2} = \eta_h \Delta E_h \quad (18)$$

CFB 机组汽水侧和热网蓄热共可转化电量为:

$$E_n = E_{n1} + E_{n2} \quad (19)$$

CFB 机组参与深度调峰期间, 假定机组以固定速率进行变负荷, 变负荷速率 r_s 可近似表示为:

$$r_s = \frac{\Delta N_e / \Delta T}{N_{e,0}} \quad (20)$$

式中, ΔN_e 为负荷变化量, MW; ΔT 为变负荷时间, min; $N_{e,0}$ 为额定工况下负荷, MW。

根据变负荷速率和可利用蓄热转化电量的关系, 可得机组在该变负荷速率下机组总蓄热可支持变负荷的时间 t_s 为:

$$t_s = \sqrt{2E_n \frac{60}{r_s}} \quad (21)$$

3 模型计算与分析

选取某 350 MW CFB 供热机组为研究对象, 该机组锅炉配置为 SG-1204/25.4-M4601 超临界循环流化床锅炉, 汽轮机型号为 CZK350/295-24.2/0.4/566/566、一次中间再热、单抽供热式汽轮机。

3.1 汽水侧蓄热特性

该机组汽水系统部件包括省煤器、水冷壁、启动分离器、低温过热器、屏式过热器、高温过热器和再热器。启动分离器和再热器中工质在主蒸汽阀门动作后短时间内无明显变化^[12], 因此根据锅炉汽水工质特性及压力变换前后汽水工质是否发生相变, 将汽水工质分为省煤器段、水冷壁水段、水冷壁共存段、水冷壁蒸汽段和过热器段。在超临界锅炉中, 水冷壁中包括复杂的汽水共存段, 根据文献[11]分析, 假设水冷壁吸热均匀, 则各段体积可近似计算:

$$V_{ww} = \frac{h_2 - h_1}{h_4 - h_1} V_{wew} \quad (22)$$

$$V_{wm} = \frac{h_3 - h_2}{h_4 - h_1} V_{wew} \quad (23)$$

$$V_{ws} = \frac{h_4 - h_3}{h_4 - h_1} V_{wew} \quad (24)$$

式中, V_{ww} 、 V_{wm} 、 V_{ws} 分别为水冷壁水段, 水冷壁混合段, 水冷壁蒸汽段体积, m^3 ; h_1 、 h_2 、 h_3 、 h_4 分别为水冷壁入口、汽水共存段入口、汽水共存段出口、水冷壁出口的比焓, kJ/kg ; V_{wew} 为水冷壁体积, m^3 。

根据该 CFB 机组历史运行数据, 选取该机组在运行中 6 个典型工况分析, 分别为 120、175、205、225、265、305 MW, 计算时压力变化暂取 0.3 MPa, 汽水工质参数均取自电厂历史运行数据, 结合锅炉主要部件容积参数(表 1), 计算各段汽水工质体积变化(表 2)。利用式(6), 求出 CFB 锅炉在各负荷条件下汽水侧工质蓄热系数(表 3)。

表 1 350 MW CFB 锅炉主要部件容积

Table 1 Volume of main components of 350 MW CFB boiler

部件	容积/ m^3
省煤器	53.75
水冷壁	127.10
过热器	102.70

该机组金属壁在典型工况下平均比热容为 0.46 $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot \text{K})$, 根据电厂设计数据, 水冷壁段质量 739.6 t, 过热器低温段质量 553.76 t, 由式(8)可计算 CFB 锅炉在各工况下金属蓄热系数, 见表 4。

图 3 为 CFB 机组中不同负荷工况下工质蓄热系数、金属蓄热系数和锅炉总蓄热系数的对比。可知机组的金属蓄热系数随着负荷增加逐渐减小, 而汽水工质的蓄热系数随着负荷增加逐渐增大。此外, 随着负荷增加, 汽水工质蓄热系数差异逐渐增大, 在 35%~60% 负荷增加量仅 346.7 MJ/MPa , 而

表 2 各段汽水工质体积变化

Table 2 Volume change of soda working fluid in each section

机组负荷/MW	容积变化/m ³				
	省煤器	水冷壁水段	水冷壁共存段	水冷壁蒸汽段	过热器
305	0.025 3	0.005 7	1.397 7	0.448 6	1.900 5
265	0.023 5	0.003 1	1.387 4	0.396 7	2.045 4
225	0.022 3	0.002 0	1.185 4	0.390 0	2.234 0
205	0.020 5	0.001 5	0.917 8	0.374 1	2.342 3
175	0.019 7	0.001 4	0.669 7	0.617 7	2.623 0
120	0.017 4	0.001 0	0.581 3	0.691 7	2.927 0

表 3 汽水工质蓄热系数

Table 3 Thermal storage coefficient of soda working fluid

机组负荷/ MW	主蒸汽比焓/ (kJ · kg ⁻¹)	工质蓄热系数/ (MJ · MPa ⁻¹)
305	3 412.53	2 855.9
265	3 432.40	2 660.9
225	3 454.36	2 364.2
205	3 466.98	2 138.0
175	3 496.11	2 023.0
120	3 493.07	2 017.5

表 4 金属蓄热系数

Table 4 Heat storage coefficient of metals

机组负荷/ MW	各段金属蓄热系数/(MJ · MPa ⁻¹)		金属蓄热系数/ (MJ · MPa ⁻¹)
	水冷壁段	过热器低温段	
305	1 765.1	938.65	2 703.7
265	1 900.7	941.81	2 842.5
225	2 061.1	956.02	3 017.1
205	2 159.2	961.73	3 121.0
175	2 253.5	992.34	3 245.9
120	2 302.9	1005.9	3 308.8

在 60%~90% 负荷增加 491.7 MJ/MPa, 原因是随着锅炉负荷增加, 汽水工质由亚临界状态转为超临界状态, 汽水工质性质发生变化。总体来看, 随着负荷增加, 锅炉汽水侧蓄热系数增加。

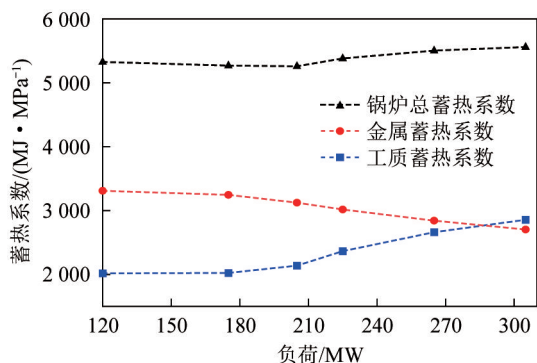


图 3 各工况汽水侧蓄热系数变化

Fig.3 Heat storage coefficient of the steam-water side varies under different working conditions

3.2 热网蓄热特性

在机组快速变负荷中, 一般通过调节热网抽汽蝶阀使热网供热抽汽量减少, 进入到中压缸做功的工质体积增多, 来利用机组的热网蓄热。根据电厂的设计数据和供热历史数据来看, 热网循环水总流量达 5 600 t/h, 电厂供热温度基本在 70~100 °C, 根据文献[14]中公式计算, 该电厂在利用热网蓄热时, 电厂一次供热温度变化为 5 °C, 二次供热温度变化仅 1.6 °C。结合文献[17]分析, 机组深度调峰期间使用热网蓄热时间短, 基本不对需热端用户产生影响。

结合电厂供热历史数据, 可计算 6 个典型工况下热网蓄热系数, 结果见表 5。

表 5 CFB 机组热网蓄热系数

Table 5 Heat storage coefficient of CFB unit heat network

机组负荷/MW	热网蓄热系数/(MJ · °C ⁻¹)
305	6 215.9
265	6 102.6
225	6 308.5
205	6 127.0
175	6 073.7
120	6 254.6

根据计算结果分析, 热网蓄热系数几乎不随着机组负荷的变化而变化, 基本维持在 6 200 MJ/°C, 原因是热电联产的 CFB 机组需保持供热端的热负荷稳定, 来满足供热端用户的需求。

将锅炉汽水侧蓄热和热网蓄热对比来看, 热网蓄热的容量要远大于汽水侧蓄热, 且较稳定, 但热网要保证用户的供热需求, 仅用部分的热网蓄热来参与深度调峰, 该部分的蓄热对于目前 CFB 机组变负荷要求有裕量。

3.3 CFB 机组负荷响应特性

对于 CFB 机组来说, 不论锅炉蓄热还是热网蓄热, 从蓄热利用到发电都存在转化效率高低的问

而锅炉蓄热是由于压力变化导致的主蒸汽增加体积从汽轮机高压缸进入做功,热网蓄热是减少热网抽汽量,增加中压缸工质做功,需分别计算2种蓄热利用的转化效率。

根据式(14)计算典型工况下锅炉蓄热转化效率,计算结果见表6。由于热网蓄热几乎不随着负荷的变化,故根据机组工况的设计数据结合式(17)计算得到该CFB机组热网蓄热转化效率为0.179。

表6 典型工况下锅炉汽水侧蓄热转化效率

Table 6 Heat storage conversion efficiency of boiler under typical working conditions

机组负荷/ MW	主蒸汽质量 流量/($\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$)	主蒸汽比焓/ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$)	能量转化 效率/%
305	266.57	3 412.53	33.53
265	231.97	3 432.40	33.28
225	197.37	3 454.36	33.00
205	180.06	3 466.98	32.84
175	154.11	3 496.11	32.48
120	106.54	3 493.07	32.25

通过调节主汽阀门利用锅炉蓄热时,需考虑压力变化的临界值。CFB锅炉不同负荷时对于压力变化的承受能力不同,为保证CFB机组稳定运行,结合现场经验和文献[20]分析,计算不同工况下单位压力波动和临界压力波动的机组锅炉蓄热的利用情况,结果如图4所示。可见在单位压力波动下,锅炉蓄热的折合电量随负荷升高而降低;在临界压力波动下,锅炉蓄热的折合电量随负荷增大而增大,说明考虑机组运行安全运行条件下,高负荷工况期间可利用的锅炉蓄热较多。

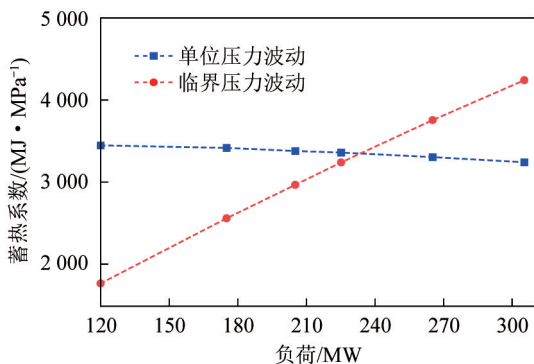


图4 不同压力下汽水侧蓄热的折合电量

Fig.4 Converted amount of heat stored on the soda side at different pressures

图5为锅炉汽水侧和热网蓄热利用后产生的折合电量,可知虽然只利用部分热网蓄热,但由于热网循环水体积庞大,储能量多,产生的折合电量是汽水侧蓄热折合电量1~2倍,尤其在机组低负荷运行

时,利用热网蓄热快速变负荷的效果更好。

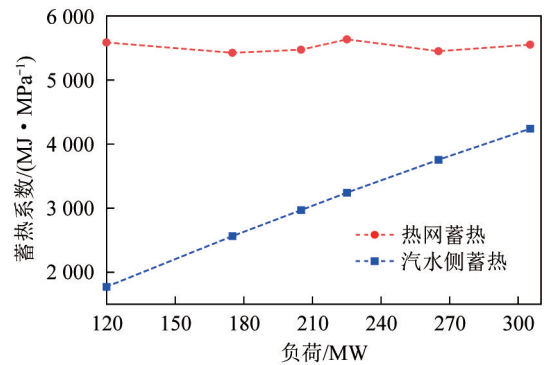


图5 锅炉汽水侧和热网蓄热折合电量对比

Fig.5 Comparison of equivalent electricity consumption between boiler steam water side and heat storage network

在机组参与深度调峰期间,锅炉汽水侧蓄热和热网蓄热会先被消耗来加快升负荷速率,但当汽水侧蓄热和热网蓄热耗尽后得不到及时补充,会导致机炉热量不匹配,机组功率瞬间下降;同样,在降负荷中会出现相反的状况。因此结合式(21)对锅炉汽水侧和热网蓄热的折合电量支持机组快速变负荷的持续时间进行计算,结果如图6所示。可知由于随着负荷增加,蓄热利用折合电量增加,固定变负荷速率下蓄热可利用持续时间也随之增加;同时CFB机组各负荷运行条件下变负荷速率与其蓄热利用可持续时间呈反比。

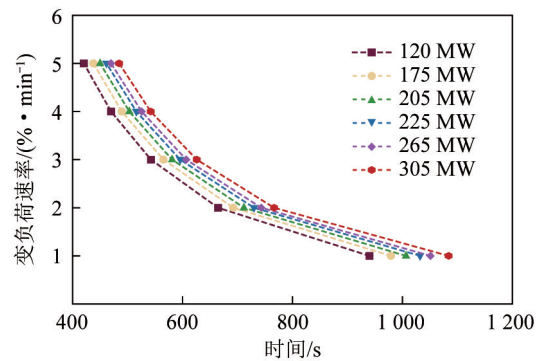


图6 机组快速变负荷的持续时间

Fig.6 Duration of rapid load change of the unit

结合图5、图6,不同机组负荷工况会影响机组汽水侧蓄热能力,导致蓄热支持变负荷时间不同,但热网可利用蓄热几乎不被机组负荷影响,且热网蓄热量远大于汽水侧蓄热量,故各工况下总蓄热利用均可观的效果。

为更好地对比锅炉汽水侧蓄热和热网蓄热,在变负荷速率设置为4%/min时,计算汽水侧的蓄热利用可持续时间和热网的蓄热利用可持续时间,计算数据如图7所示。可见,对于该CFB热电联产机组,热网蓄热利用可持续时间总大于汽水侧蓄热利

用可持续时间,且热网蓄热能力几乎不随机组负荷的变化而变化,热网蓄热利用可持续时间基本稳定在 285 s 左右,而汽水侧蓄热在 35% 负荷时可持续时间为 161.5 s,在 90% 负荷时可持续为 249.7 s,在机组参与深度调峰时,热网蓄热可提供更稳定的变负荷能力。

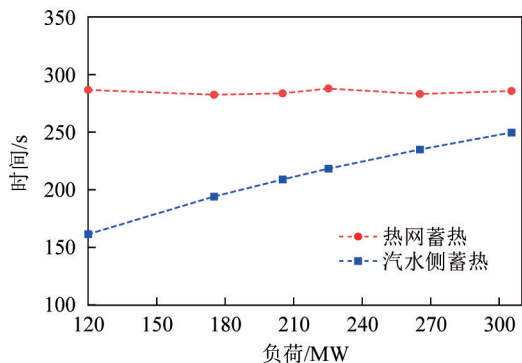


图 7 汽水侧蓄热和热网蓄热利用可持续时间对比

Fig.7 Comparison of heat storage time on the soda side and heat storage in the heat network

4 结 论

1) 对于该 350 MW 热电联产机组,在 35% ~ 90% 的运行负荷内,随着机组负荷增加,金属蓄热系数 C_m 减少,而汽水工质蓄热系数 C_s 增加,其中在高负荷时 C_s 变化的更明显,在 35% ~ 60% 负荷的增量仅 346.7 MJ/MPa,而在 60% ~ 90% 负荷的增量为 491.7 MJ/MPa。总体上,随着机组负荷增加,锅炉汽水侧蓄热系数增大。

2) 在固定变负荷速率下,随着机组负荷升高,汽水侧及热网蓄热利用可持续时间 t_s 增加;同时在多种典型工况下,变负荷速率与 t_s 呈反比。

3) 热网蓄热利用可持续时间总是大于汽水侧蓄热利用可持续时间,且热网蓄热能力几乎不随着机组负荷的变化而变化;在 4%/min 变负荷速率下,热网蓄热利用可持续时间基本在 285 s 左右,而汽水侧蓄热在 35% 负荷时可持续时间为 161.5 s,在 90% 负荷时可持续 249.7 s,在机组参与深度调峰期间,热网蓄热可提供更稳定的变负荷能力。

参考文献 (References):

[1] 牟春华,居文平,黄嘉骊,等. 火电机组灵活性运行技术综述与展望[J]. 热力发电,2018,47(5): 1-7.
MU Chunhua, JU Wenping, HUANG Jiasi, et al. Review and prospect of technologies of enhancing the flexibility of thermal power units[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 1-7.

[2] 王玮,申朋玉,李雪寒,等. 提升直流炉供热机组灵活性的电热协调控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6):

2100-2109.

WANG Wei, SHEN Pengyu, LI Xuehan, et al. Electricity-heat coordinated control strategy for improving the flexibility of a once-through CHP unit [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2100-2109.

- [3] 申朋玉. 直流炉热电联产机组电热协调控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023. DOI:10.27140/d.cnki.ghbbu.2023.000370.
- [4] 于浩洋,高明明,张曼,等. 循环流化床机组深度调峰性能分析与评价[J]. 热力发电, 2020, 49(5): 65-72.
YU Haoyang, GAO Mingming, ZHANG Man, et al. Performance analysis and evaluation of deep peak-regulating for circulating fluidized bed units [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(5): 65-72.
- [5] 李洪杰,陈亚若,陈智慧. 火电厂循环流化床锅炉超低排放技术研究[J]. 科技与创新, 2024(16): 98-100.
LI Hongjie, CHEN Yaruo, CHEN Zhihui. Research on ultra-low emission technology for circulating fluidized bed boilers in thermal power plants [J]. Science and Technology & Innovation, 2024(16): 98-100.
- [5] 张洪福. 循环流化床机组负荷响应特性与灵活运行控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- [7] 胡仙楠,邓博宇,刘欢鹏,等. 循环流化床锅炉负荷快速调节技术现状及发展趋势[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(6): 11-23.
HU Xiannan, DENG Boyu, LIU Huanpeng, et al. Status and development trend of rapid load regulation technology for circulating fluidized bed boiler [J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(6): 11-23.
- [8] 代华松,浦绍旭,柴国旭,等. 350 MW 超临界流化床机组深度调峰研究与应用[J]. 发电技术, 2024, 45(3): 401-411.
DAI Huasong, PU Shaoyu, CHAI Guoxu, et al. Research and application of deep peak shaving of 350 MW supercritical fluidized bed unit [J]. Power Generation Technology, 2024, 45(3): 401-411.
- [9] 吴茂乾,乔磊,宋明曙,等. 热网蓄热特性及其对机组调峰能力的影响研究[J]. 动力工程学报, 2024, 44(3): 475-485.
WU Maoqian, QIAO Lei, SONG Mingshu, et al. Research on heat storage characteristics of heat supply networks and its influence on peak regulation capacity of units [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2024, 44(3): 475-485.
- [10] 马博洋. 汽包锅炉蓄热系数的理论计算与分析[J]. 热力发电, 2020, 49(7): 147-152.
MA Boyang. Theoretical analysis and calculation of heat storage coefficient of drum boiler [J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(7): 147-152.
- [11] 郭徐,徐飞,陈磊,等. 适用于一次调频能力在线监测的锅炉蓄热系数计算方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(5): 1872-1881.
GUO Yue, XU Fei, CHEN Lei, et al. Identification of boiler heat storage coefficient for online monitoring of primary frequency regulation capability of steam unit [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(5): 1872-1881.
- [12] WANG Z, LIU M, YAN JJ. Flexibility and efficiency co-enhancement of thermal power plant by control strategy improvement considering time varying and detailed boiler heat storage

- characteristics[J]. *Energy*, 2021, 232: 121048.
- [13] 张思海,李超然,万广亮,等. 330 MW 循环流化床锅炉深度调峰技术[J]. *发电技术*, 2024, 45(2): 199-206.
ZHANG Sihai, LI Chaoran, WAN Guangliang, et al. Deep peak shaving technology for 330 MW circulating fluidized bed boiler[J]. *Power Generation Technology*, 2024, 45(2): 199-206.
- [14] 王宏伟,冯垚飞,冯林魁,等. 供热机组调峰性能试验[J]. *热力发电*, 2014, 43(4): 106-109.
WANG Hongwei, FENG Yaofei, FENG Linkui, et al. Experimental study on peaking capability of a heating unit[J]. *Thermal Power Generation*, 2014, 43(4): 106-109.
- [15] GAO Y K, HU Y, ZENG D L, et al. Improving the CCS performance of coal-fired drum boiler units base on PEB and DEB strategies[J]. *Control Engineering Practice*, 2021, 110: 104761.
- [16] 杜鸣. 火电机组灵活运行下的负荷频率控制优化研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.
- [17] 张光明. 热电联产机组灵活运行特性分析与控制研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2022.
- [18] 郭良丹,谭锐,林宝森,等. 提高供热机组的调峰灵活性研究[J]. *中国测试*, 2022, 48(7): 16-22.
GUO Liangdan, TAN Rui, LIN Baosen, et al. Study on improving peak-shaving flexibility of cogeneration units by using heat storage[J]. *China Measurement & Test*, 2022, 48(7): 16-22.
- [19] 戴冠正,牛玉广,丁宁,等. 基于动态权重的组合模型供热负荷预测[J]. *工业控制计算机*, 2023, 36(12): 144-146.
DAI Guanzheng, NIU Yuguang, DING Ning, et al. Combined model heating load forecasting based on dynamic weight[J]. *Industrial Control Computer*, 2023, 36(12): 144-146.
- [20] 王冠杰,田亮,邓拓宇. 热电联产机组柔性控制仿真研究[J]. *热力发电*, 2023, 52(1): 123-131.
WANG Guanjie, TIAN Liang, DENG Tuoyu. Simulation study on flexible control of cogeneration unit[J]. *Thermal Power Generation*, 2023, 52(1): 123-131.
- [21] 谭振坤. 考虑床料蓄热的超临界循环流化床锅炉蓄热能力的分析研究[J]. *电力学报*, 2023, 38(4): 309-318.
TAN Zhenkun. Analysis of heat storage capacity of supercritical circulating fluidized bed boiler considering bed material heat storage[J]. *Journal of Electric Power*, 2023, 38(4): 309-318.
- [22] ZHANG H F, GAO MM, HONG F, et al. Control-oriented modeling and investigation on quick load change control of subcritical circulating fluidized bed unit[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2019, 163: 114420.
- [23] 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, 4292.
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, 4292.
- [24] 张洪福,高明明,于浩洋,等. 300 MW 深度调峰循环流化床机组负荷响应特性研究[J]. *动力工程学报*, 2023, 43(9): 1116-1122.
ZHANG Hongfu, GAO Mingming, YU Haoyang, et al. Study on load response characteristics of a 300 MW circulating fluidized bed unit with deep peak regulation[J]. *Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2023, 43(9): 1116-1122.
- [25] 张开萍,高明明,张洪福,等. 基于凝结水节流及热网蓄能的循环流化床供热机组变负荷性能研究[J]. *热力发电*, 2022, 51(4): 47-54.
ZHANG Kaiping, GAO Mingming, ZHANG Hongfu, et al. Research on variable load performance of CFB heating unit based on condensate throttle and thermal network energy storage[J]. *Thermal Power Generation*, 2022, 51(4): 47-54.
- [26] 杨凤玲,张普森,张圆圆,等. 亚临界循环流化床机组近零深度调峰蓄释热计算及实践[J/OL]. *洁净煤技术*, 1-9[2024-04-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20240617.1615.019.html>.
YANG Fengling, ZHANG Pusen, ZHANG Yuanyuan, et al. Subcritical circulating fluidized bed unit near-zero deep peak shaving and heat storage calculation and practice[J/OL]. *Clean Coal Technology*, 1-9[2024-04-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3676.TD.20240617.1615.019.html>.