

超超临界机组深度调峰控制优化

庄义飞¹, 曲晓荷¹, 陈小勇², 任振华¹

(1. 中国大唐集团科学技术研究总院有限公司华东电力试验研究院, 安徽 合肥 230000;

2. 江西大唐国际抚州发电有限责任公司, 江西 抚州 344000)

摘要: 针对深度调峰过程中, 机组负荷调节能力受限、水动力安全存在隐患的问题, 以1 000 MW超超临界燃煤凝汽式发电机组为研究对象, 提出了设定值延伸、自适应变负荷速率控制器设计和低负荷煤水分级约束控制等优化策略, 实现了机组变负荷速率在安全边界范围内的自动匹配, 拓宽了给水流量、燃料量及主蒸汽压力的适用负荷段, 并进行了1 000 MW机组的深度调峰控制优化及优化后试验。试验结果表明: 上述优化策略可保障机组低负荷水动力安全, 同时提升机组在30%~50%额定负荷深度调峰区间的负荷响应能力。

关键词: 深度调峰; 超超临界; 变负荷速率控制; 煤水控制

中图分类号: TK223

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlge.2024.12.007

[引用本文格式] 庄义飞, 曲晓荷, 陈小勇, 等. 超超临界机组深度调峰控制优化[J]. 热能动力工程, 2024, 39(12): 60-66. ZHUANG Yifei, QU Xiaohe, CHEN Xiaoyong, et al. Control optimization of deep peak load regulation of ultra-supercritical unit[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(12): 60-66.

Control Optimization of Deep Peak Load Regulation of Ultra-supercritical Unit

ZHUANG Yifei¹, QU Xiaohe¹, CHEN Xiaoyong², REN Zhenhua¹

(1. East China Electric Power Test and Research Institute, China Datang Corporation Science and Technology

Research Institute Co., Ltd., Hefei, China, Post Code: 230000; 2. Jiangxi Datang International Fuzhou Power

Generation Co., Ltd., Fuzhou, China, Post Code: 344000)

Abstract: In order to solve the problems of limited load regulation ability and hidden danger of hydrodynamic safety in the process of participating in deep peak shaving operation, taking the 1 000 MW ultra-supercritical coal-fired condensing generator set as the research object, the optimization strategies such as set value extension, adaptive variable load rate controller design and low load coal water level constraint control were proposed to realize the automatic matching of variable load rate of the unit within the safe boundary range, which broadens the applicable load range of the main parameters of the unit such as feed water flow, fuel quantity and main steam pressure. The deep peak regulation control optimization and optimized test were carried out based on 1 000 MW unit. The test results show that the above-mentioned optimization scheme can improve the load response ability of the unit in the deep peak regulation range of 30%~50% rated load while ensuring the low load hydrodynamic safety of the unit.

Key words: deep peak load regulation, ultra-supercritical unit, variable load rate control, coal water control

收稿日期: 2024-02-18; 修订日期: 2024-04-24

作者简介: 庄义飞(1987-), 男, 中国大唐集团科学技术研究总院有限公司华东电力试验研究院高级工程师。

通信作者: 曲晓荷(1991-), 女, 中国大唐集团科学技术研究总院有限公司华东电力试验研究院高级工程师。

引 言

近年来,国内新能源发电机组总容量快速增加,截至 2022 年底,全国非化石能源发电装机容量占总装机容量的 49.6%。然而由于风电、光伏发电的随机性、间歇性、波动性较强,大规模并网给电网的安全稳定运行带来了负面影响。在保障电网安全、提高可再生能源消纳能力方面,传统的燃煤发电机组承担着重要作用,尤其在调节电网峰谷时更为明显,新能源机组容量占比较大的地区对超超临界机组调峰能力的要求越来越高。因此,发展灵活智能的深度调峰技术是现阶段新型电力系统建设的重要支撑,具有重要的现实意义^[1-4]。

目前,主要从机组设备改造、热电解耦技术、储能技术及提高变负荷速率调峰技术等方面对燃煤机组开展深度调峰^[5]。马达夫等人^[6]分析了锅炉在低负荷下运行时产生的若干问题,并对比了多种精细化燃烧调整、制粉系统和燃烧系统改造方案。文献^[7-9]提出了水煤复合控制、变负荷速率控制等优化调整方法,实现了深度调峰负荷区间协调控制的连续稳定投入。陈晓利等人^[10]建立了基于多种灵活性调峰模式的热力系统模型,通过汽轮机侧旁路供热及抽汽供热运行模式的改变来探索机组参与深度调峰的最优方案。文献^[6-10]均涉及到相应的改造条件,使用策略具有一定的局限性。Gao 等人^[11]对循环流化床机组的协调控制系统进行机理建模。王超等人^[12]对 660 MW 机组锅炉给水、给煤等入口参数变化时机组的动态响应进行仿真分析,通过机理建模研究机组动态响应过程。文献^[11-12]的研究为参数调整提供方向性的指导,但是无法自适应匹配机组参与深度调峰过程中的动态特性。虞国平等人^[13]开展深度调峰机组辅机跳闸工况自动控制策略研究,提出辅机跳闸后的控制策略优化措施,并通过试验验证了控制策略的必要性与正确性。上述文献主要从提高机组可靠性的角度出发,未考虑如何提升机组的负荷响应能力。

本文在考虑机组安全边界的基础上进行了设定值延伸;细化了升、降负荷过程中负荷响应速率修正规则,提出了“安全区间取大值、限制区间取小值”的控制策略,实现对变负荷速率的优化;针对煤水比的优化,设计了分级约束控制,提出常规负荷段以煤

定水控制方式调整为以水优煤方式,并反向提升了机组滑压设定的逆向设定,实现了主蒸汽压力闭环和中间点温度的解耦控制。

1 机组概况

本文以某 1 000 MW 超超临界燃煤凝汽式发电机组为研究对象,机组设备情况如表 1 所示,系统简化流程如图 1 所示。

表 1 超超临界机组设备情况

Tab. 1 Device details of ultra-supercritical unit

设备/控制系统	生产厂家	规格型号
锅炉	东方汽轮机有限公司	N1000-26.25/600/600
汽轮机	东方锅炉股份有限公司	DG3060/27.46-III
发电机	东方电机厂有限责任公司	QFSN-1000-2-27
分散控制系统	ABB	Symphony Plus

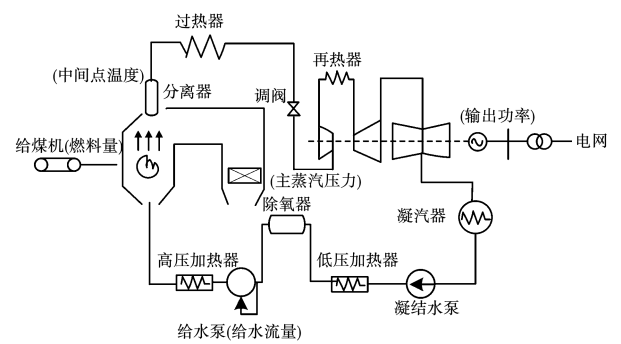


图 1 系统简化流程图

Fig. 1 Simplified system flowchart

2 协调控制系统优化

机组输出功率与负荷指令的一致性反映机组与外部电网之间能量供求的平衡关系,主蒸汽压力反映机组锅炉与汽轮机之间能量供求的平衡关系。协调控制系统兼顾汽轮机的快速特性和锅炉的慢速特性,在满足涉网调节负荷响应的同时还要保证内部运行参数的稳定,具备较快的负荷响应能力,确保主蒸汽压力偏差在允许范围。常规协调控制系统长期在 50% RP (RP 为额定负荷) 及以上工况运行,而当机组在深度调峰工况下运行时,机组的控制对象特性发生较大改变,常规协调控制回路难以满足调节快速性与安全性的需求。本文从设定值、变负荷速率及煤水比等方面开展优化研究,实现深度调峰工况下机组能量供求的平衡。

2.1 设定值延伸

图 2 为关键参数边界非线性延伸。由于常规协调控制长期在 50% *RP* 及以上工况运行,如图 2 优化前曲线所示,在 50% *RP* (500 MW) 以下工况负荷指令-给煤量/给水流量存在控制死区,在深度调峰工况下,燃烧稳定性、锅炉的水动力特性均面临较大的考验。

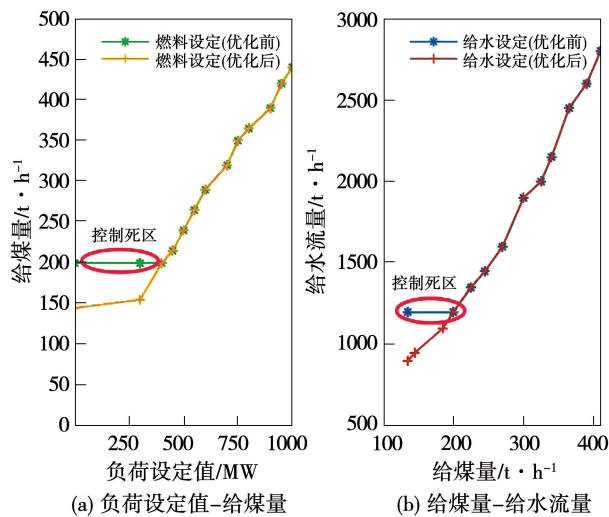


图 2 关键参数边界非线性延伸

Fig. 2 Nonlinear extensions of key parameter boundary

机组参与深度调峰运行时,因大量设备运行工况接近安全极限,导致无法对机组主要参数的异常波动投入协调,进而引发自动发电控制、一次调频等

功能无法投入的问题^[14]。此外,在深度调峰工况下,机组给煤量、给水流量、蒸汽流量等参数大幅偏离设计稳定运行区间,容易引起汽温降低,管壁金属超温,给水泵、风机和汽轮机高压调门等辅机设备运行状态接近安全稳定边界。调节裕量受限引起的安全边界缩减问题会增加运行操作人员的手动干预频次,甚至会频繁发生机组负荷增减闭锁现象,导致单次深度调峰时间长、操作量大,调整过程的安全风险大幅增加。

基于规程规范的要求,对 30% *RP* ~ 50% *RP* 工况下机组对关键参数的设定值边界进行延伸,如图 2 优化后曲线所示,作为后续自适应变负荷速率控制器设计及煤水控制优化的设定基础值。

2.2 自适应变负荷速率控制器设计

当机组处于深度调峰阶段时,面临锅炉燃烧、水动力不稳定等问题,在深度调峰工况下机组负荷响应速率难以达到 50% *RP* 及以上常规负荷段负荷响应水平。为均衡考虑机组深度调峰阶段负荷调节能力和能量供求安全性,本文基于机组负荷、主蒸汽压力等特征参数设计了自适应变负荷速率控制器,对变负荷速率进行实时修正,使之转变为机组安全运行能够接受的最佳速率,自适应变负荷速率控制器实现方案如图 3 所示。其中, $U_u(G)$ 、 $U_u(p)$ 为升负荷对应的修正系数, $U_d(G)$ 、 $U_d(p)$ 为降负荷对应的修正系数。

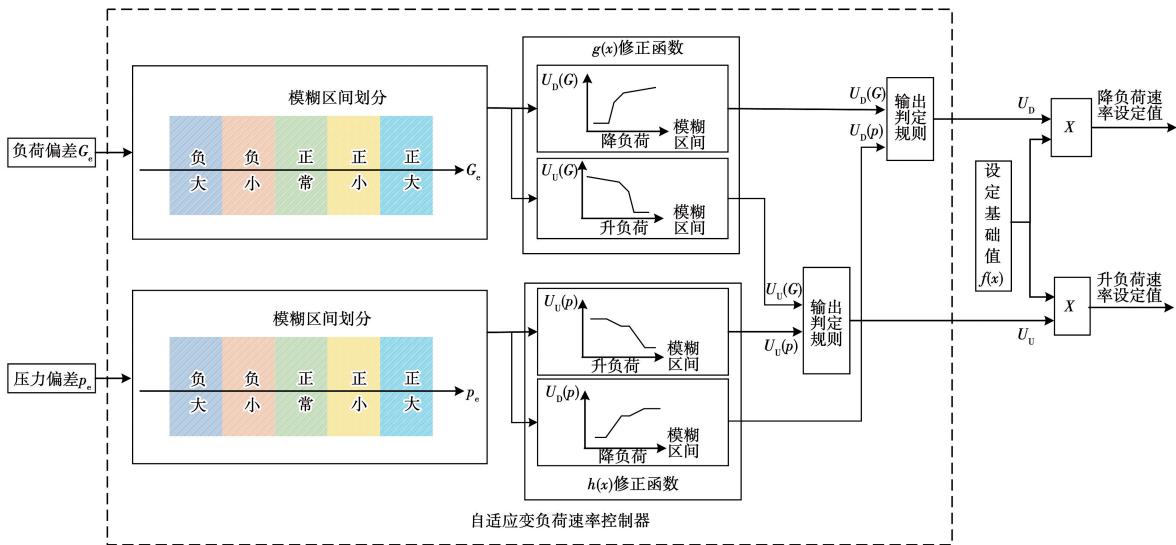


图 3 自适应变负荷速率控制器实现方案

Fig. 3 Implementation scheme of adaptive variable load rate controller

2.2.1 确定输入参考变量

机组在变负荷过程中,由于锅炉侧大惯性和大滞后特性与汽轮机侧负荷响应快速性之间的矛盾关系,导致最明显的调节结果是产生负荷偏差和主蒸汽压力控制偏差,机组负荷偏差和主蒸汽压力偏差是反映汽轮机和锅炉之间能量平衡程度的关键参数,偏差量的大小和方向是反映机组响应能力的重要指标。以升负荷工况为例,如果机组实际负荷和主蒸汽压力实际值明显高于对应的设定值,则可判断锅炉蓄热超过当前机组出力需求,可适当增大升负荷速率以提高负荷响应能力,且有助于释放锅炉蓄热,维持锅炉和汽轮机之间的能量平衡。因此,选取偏差值作为输入参考变量。

$$G_e = G_s - G_0 \tag{1}$$
$$p_e = p_s - p_t \tag{2}$$

式中: G_e —负荷偏差, MW; G_s —负荷设定值, MW; G_0 —实际负荷, MW; p_e —压力偏差, MPa; p_s —压力设定值, MPa; p_t —实际压力, MPa。

2.2.2 控制规则

在工程实施过程中,需要利用分散控制系统(DCS)插值函数功能模块实现自适应变负荷速率算法,因此本文将 G_e 、 p_e 分别划分为负大、负小、正常、正小和正大 5 个模糊子区间。参照规程规范要求及机组特性进行区间化,将大于自动切除的偏差设置为负大和正大区间,将规程规范要求的动态偏差允许值设置为正常,介于二者之间的偏差设置为正小和负小区间。

负荷偏差和压力偏差修正负荷速率模糊规则如表 2、表 3 所示,分别按照升、降负荷两种工况细化了修正设置。

表 2 负荷偏差修正负荷速率模糊规则表

Tab.2 Fuzzy control rules of load deviation

correction load rate

G_e 模糊区间	$U_U(G)$	$U_D(G)$
负大	1.2	0.5
负小	1.1	0.8
正常	1.0	1.0
正小	0.8	1.1
正大	0.5	1.2

表 3 压力偏差修正负荷速率模糊规则表

Tab.3 Fuzzy control rules of pressure deviation

correction load rate

p_e 模糊区间	$U_U(p)$	$U_D(p)$
负大	1.10	0.50
负小	1.05	0.80
正常	1.00	1.00
正小	0.80	1.05
正大	0.50	1.10

修正系数由偏差量的大小、方向以及机组自身负荷响应能力极限确定,直接反映机组在当前工况的可调节能力,实现对基础负荷设定值的调整。修正系数越大,加速幅度越大,反之则加剧减速。在 50% RP 及以下深度调峰工况,为避免降负荷过程中燃料量、给水流量减少过量而造成燃烧不稳或水动力紊乱的问题,采取减小降负荷速率的措施。反之,升负荷过程中,可配合锅炉动态前馈的调整,快速增加锅炉燃料量,提高升负荷速率,使机组尽快运行至更安全的中/高负荷段。

控制器输出判定充分考虑机组安全边界,采用“安全区间取大值、限制区间取小值”的控制策略,根据 $U_U(G)$ 、 $U_U(p)$ 、 $U_D(G)$ 和 $U_D(p)$ 的值计算最终的升负荷速率修正系数 U_U 及降负荷速率修正系数 U_D 。具体规则如下:

若 $U(G) \geq 1$ 和 $U(p) \geq 1$,则当前状态 = “安全区间”;

若 $U(G) < 1$ 或 $U(p) < 1$,则当前状态 = “限制区间”。

依此计算得到自适应变负荷速率控制器的输入-输出规则,如表 4、表 5 所示。用设定基础值 $f(x)$ 乘以自适应变负荷速率控制器输出值,即可得到最终的负荷速率设定值 V_s ,表达式为:

$$V_s = \begin{cases} \max[U(G), U(p)] \cdot f(x), & g(x) \in [1, \infty], \\ h(x) \in [1, \infty] \text{ 或 } g(x) \in [0, 1], h(x) \in [0, 1] \\ g(x) \cdot f(x), & g(x) \in [0, 1], h(x) \in [1, \infty] \\ h(x) \cdot f(x), & g(x) \in [1, \infty], h(x) \in [0, 1] \end{cases} \tag{3}$$

式中: $g(x)$ —负荷偏差对应的修正函数; $h(x)$ —压力偏差对应的修正函数。

表 4 负荷 – 压力偏差升负荷速率修正系数 U_0 模糊规则表

Tab. 4 Fuzzy control rules of load – pressure deviation
load increase rate correction coefficient U_0

p_e	G_e				
	负大	负小	正常	正小	正大
负大	1.2	1.1	1.10	0.8	0.5
负小	1.2	1.1	1.05	0.8	0.5
正常	1.2	1.1	1.00	0.8	0.5
正小	0.8	0.8	0.80	0.8	0.5
正大	0.5	0.5	0.50	0.5	0.5

表 5 负荷 – 压力偏差降负荷速率修正系数 U_D 模糊规则表

Tab. 5 Fuzzy control rules of load – pressure deviation
load reduction rate correction coefficient U_D

p_e	G_e				
	负大	负小	正常	正小	正大
负大	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
负小	0.5	0.8	0.8	0.8	0.8
正常	0.5	0.8	1.0	1.1	1.2
正小	0.5	0.8	1.05	1.1	1.2
正大	0.5	0.8	1.1	1.1	1.2

2.3 煤水分级约束控制

深度调峰阶段给水流量控制是确保机组安全运行的重要环节,直流锅炉以给水泵为动力强制炉水流动、冷却锅炉受热面并提供做功蒸汽流量。为保

证锅炉水动力安全和水冷壁冷却,超超临界机组均设置了最低给水流量保护,即实际给水流量不能过低。反之,机组处于深度调峰工况时,锅炉面临汽水分离器干湿态转换的问题,给水流量偏高导致由干态向湿态的转换提前,干湿态转换时,机组控制信号在干态时的汽温控制与湿态时的液位控制之间来回转换^[15],增加了机组协调控制的复杂性和机组运行风险。因此,合理控制煤水比是机组安全运行的重点。

机组常规负荷段协调控制主要是通过中间点温度偏差动态修正给水流量,以达到调整煤水比的目的。在深度调峰工况下,随着负荷不断降低,需要相应减少燃料量,但为了保证锅炉机组的水动力安全,机组给水流量必须维持最小流量且保证一定可调裕量。因煤质变化及机组动态调整过程中其他扰动引起煤水比失调,导致中间点温度降低、主蒸汽压力波动甚至转态,为此,在保证水动力安全的前提下,优化方案应充分考虑给水流量、燃料量及主蒸汽压力等机组主参数之间的关联特性。

本文对常规以煤控水、以中间点温度修正给水设定的控制策略进行优化,设计最低给水流量闭锁控制回路,增加反向以水优煤、压力设定修正等回路,实现分级约束控制,拓宽机组给水流量、燃料量及主蒸汽压力等机组主参数的适用负荷段,提高机组负荷调整能力。深度调峰工况下煤水解耦优化控制方案如图 4 所示,主要分为两级约束控制。

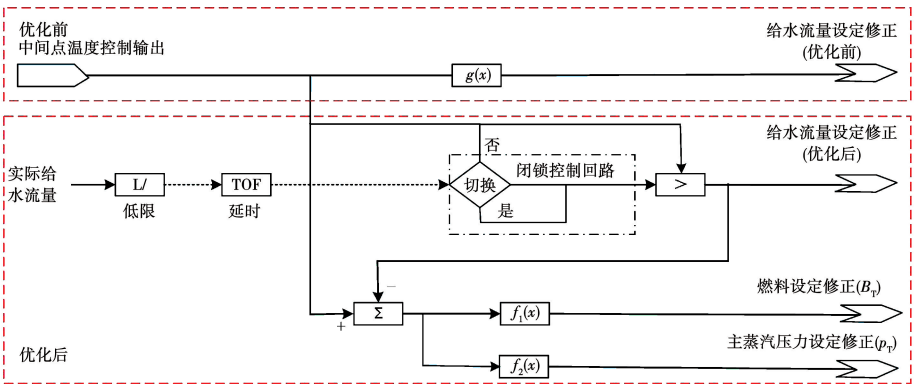


图 4 深度调峰工况下煤水解耦优化控制方案

Fig.4 Optimization control scheme for coal water decoupling under deep peak regulation condition

分级约束一:机组进入深度调峰阶段,但机组水动力安全及各主参数仍有调整裕量,此时机组中间

点温度控制输出通过取大值选择器修正机组给水流量设定。

分级约束二:机组负荷继续降低,随之减少给水流量与燃料量,当实际给水流量达到锅炉干态最低给水流量时,闭锁逻辑屏蔽中间点温度控制输出,此时保持给水流量设定修正不再减小。

当给水流量接近最低值时,中间点温度会因为煤水比失调而继续降低,此时通过给水修正和中间点温度控制之间的偏差经 $f_1(x)$ 函数增加燃料设定修正 B_T ,反向以水优煤,适当提高中间点温度,保障煤水比在合理范围内。

根据直流炉机组的运行特性,若汽轮机高压调节汽门保持开度不变,当增加煤量维持过热度在干态工况时,机组实际主蒸汽压力升高,为此需要增加压力设定修正回路。通过 $f_2(x)$ 函数适当增加主蒸汽压力设定修正 p_T ,避免主蒸汽压力闭环控制和中间点温度控制互扰,同时提高了给水泵汽轮机运行转速,对于配置了双给水泵汽轮机的机组,可有效增加其在低负荷工况下的给水调节裕量。

3 试验验证

依据控制器模糊区间划分规则, G_e 的模糊子集依次选为 $G_e \leq -20$, $-20 < G_e \leq -10$, $-10 < G_e < 10$, $10 \leq G_e < 20$ 和 $G_e \geq 20$; p_e 的模糊子集依次选为 $p_e \leq -1.5$, $-1.5 < p_e \leq -0.5$, $-0.5 < p_e < 0.5$, $0.5 \leq p_e < 1.5$ 和 $p_e \geq 1.5$ 。当机组协调控制投入稳定后,分别选择 50% RP, 40% RP, 30% RP 负荷工况进行负荷变动试验,设定负荷变化率不低于当地深度调峰验收技术规范等相关文件的规定要求,记录试验过程中机组负荷及各参数变化数据。

50% RP ~ 30% RP 升/降负荷变动试验过程中主要过程参数最大波动实测值如表 6 所示。可以看出,系统在 30% RP ~ 50% RP 深度调峰区间的负荷变化速率高于相关规程规范的参考值,机组的负荷响应能力得到提升,同时机组主蒸汽压力、过热汽温度、再热汽温度等主要运行参数偏差均在安全裕度内,机组的水动力安全性能得到保障。

表 6 负荷变动试验主要过程参数最大波动实测值

Tab. 6 Actual measurement values of maximum fluctuation of main performance parameters in load change test

变负荷工况	实测/参考值	负荷响应 时间/s	负荷变化速率/ $\text{MW} \cdot \text{min}^{-1}$	主蒸汽压力 偏差/MPa	过热汽温 偏差/℃	再热汽温 偏差/℃
50% RP 降至 40% RP	实测值	48	10.1	0.53	-1.3/5.1	-1.1/4.4
	参考值	<75	≥ 9	$\leq \pm 0.6$	$\leq \pm 10$	$\leq \pm 12$
40% RP 降至 35% RP	实测值	54	6.0	0.49	-2.3/4.4	-2.3/2.6
	参考值	<75	≥ 5	$\leq \pm 0.5$	$\leq \pm 8$	$\leq \pm 10$
35% RP 降至 30% RP	实测值	46	6.6	0.26	-7.2	-8.2
	参考值	<75	≥ 5	$\leq \pm 0.5$	$\leq \pm 8$	$\leq \pm 10$
30% RP 升至 33% RP	实测值	45	5.1	0.18	-4.9	-3.9
	参考值	<75	≥ 5	$\leq \pm 0.5$	$\leq \pm 8$	$\leq \pm 10$
35% RP 升至 40% RP	实测值	36	7.1	0.47	6.6	6.0
	参考值	<75	≥ 5	$\leq \pm 0.5$	$\leq \pm 8$	$\leq \pm 10$

注:负荷响应时间和负荷变化速率参考值为《江西省燃煤发电机组灵活性改造和深度调峰达标验收试验技术规范》中的要求,其余参考值为 DL/T1210—2013《火力发电厂自动发电控制性能测试验收规程》中的要求。

4 结 论

(1) 设定值的延伸优化了常规协调控制在 30% RP ~ 50% RP 负荷区间的控制死区,为后续的优化设计设定了基础值。

(2) 通过自适应变负荷速率控制器对变负荷速率的实时修正,实现了升/降负荷过程中变负荷速率

设定值根据机组负荷、主蒸汽压力等关键参数偏离程度进行自适应调整的功能,提高了机组的深度调峰响应能力。

(3) 煤水比分级约束控制实现了主蒸汽压力闭环和中间点温度的解耦控制,保障煤水比在合理的范围,拓宽了给水泵在深度调峰阶段的调节裕量,保障了低负荷水动力安全。

(4) 优化方案实施后,机组在 30% *RP* ~ 50% *RP* 深度调峰区间的负荷响应速率得到提升,各主要参数均在安全调节裕度内,保障了机组的低负荷水动力安全,有效提高了机组深度调峰工况调节品质。

参考文献:

[1] 刘吉臻,李云莺,宋子秋,等. 灵活智能燃煤发电技术及评价体系[J]. 动力工程学报,2022,42(11):993-1004.
LIU Jizhen,LI Yunzhi,SONG Ziqiu,et al. Flexible and intelligent coal-fired power generation technology and its evaluation system [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(11):993-1004.

[2] 帅 永,赵 斌,蒋东方,等. 中国燃煤高效清洁发电技术现状与展望[J]. 热力发电,2022,51(1):1-10.
SHUAI Yong,ZHAO Bin,JIANG Dongfang,et al. Status and prospect of coal-fired high efficiency and clean power generation technology in China [J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1):1-10.

[3] 宋 勇. 汽轮机深度调峰能力研究[J]. 科技创新与应用, 2017,29(2):189-191.
SONG Yong. Research on depth peak adjustment of turbine[J]. Technology Innovation and Application,2017,29(2):189-191.

[4] 张少强,陈 露,刘子易,等. 大型燃煤锅炉深度调峰关键问题探讨[J]. 南方能源建设,2022,9(3):16-28.
ZHANG Shaoqiang,CHEN Lu,LIU Ziyi,et al. Discussion on key problems of depth peak adjustment for large coal-fired boilers[J]. Southern Energy Construction,2022,9(3):16-28.

[5] 欧阳子区,王宏帅,吕清刚,等. 煤粉锅炉发电机组深度调峰技术进展[J]. 中国电机工程学报,2023,43(22):8772-8790.
OUYANG Ziqu,WANG Hongshuai,LYU Qinggang,et al. Research progress on deep peak shaving technology of pulverized coal-fired boiler power unit [J]. Proceedings of the CSEE,2023,43(22):8772-8790.

[6] 马达夫,张守玉,何 翔,等. 煤粉锅炉超低负荷运行的技术问题和应对措施[J]. 动力工程学报,2019,39(10):784-791,803.
MA Dafu,ZHANG Shouyu,HE Xiang,et al. Technical problems occurring in ultra-low load operation of pulverized coal-fired boilers and the solutions [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2019,39(10):784-791,803.

[7] 高 奎,赵 晖,胡 罡,等. 超超临界试运机组深度调峰控制优化[J]. 热力发电,2021,50(3):158-164.
GAO Kui,ZHAO Hui,HU Gang,et al. Automatic control optimization of deep peak load regulation during trail operation of ultra supercritical units [J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(3):

158-164.

[8] 韩院臣. 660 MW 超临界机组深度调峰自动控制技术研究[J]. 电气传动自动化,2021,43(6):30-32,50.
HAN Yuanchen. Research on automatic control technology of deep peak shaving of 660 MW supercritical unit[J]. Electric Drive Automation,2021,43(6):30-32,50.

[9] 党 岳,樊小朝,王志强,等. 超临界机组灵活性调峰及低负荷运行优化技术研究[J]. 锅炉技术,2022,53(6):61-64.
DANG Yue,FAN Xiaochao,WANG Zhiqiang,et al. Research on flexibility peak shaving and low-load operation optimization technology of supercritical units[J]. Boiler Technology,2022,53(6):61-64.

[10] 陈晓利,高继录,郑 飞,等. 多种深度调峰模式对火电机组性能影响分析[J]. 热能动力工程,2020,35(12):26-30.
CHEN Xiaoli,GAO Jilu,ZHENG Fei,et al. Comparative analysis of various deep peak regulation modes for thermal power units [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2020, 35(12):26-30.

[11] GAO M,HONG F,YAN G,et al. Mechanism modelling on the coordinated control system of a coal-fired subcritical circulating fluidized bed unit [J]. Applied Thermal Engineering, 2019, 146: 548-555.

[12] 王 超,张宝瑞,刘铠瑞,等. 超临界 660 MW 机组直流锅炉动态特性仿真研究[J]. 热力发电,2024,53(1):124-133.
WANG Chao,ZHANG Baorui,LIU Kairui,et al. Simulation on dynamic characteristic of a supercritical 660 MW once-through boiler[J]. Thermal Power Generation,2024,53(1):124-133.

[13] 虞国平,张新胜,屠海彪,等. 火电机组深度调峰工况辅机安全控制技术研究[J]. 浙江电力,2021,40(2):85-90.
YU Guoping,ZHANG Xinsheng,TU Haibiao,et al. Research on auxiliary equipment control technology under operation condition of deep peak-regulation of thermal power generating units [J]. Zhejiang Electric Power,2021,40(2):85-90.

[14] 李 玲,刘鑫屏. 新能源大规模并网条件下火电机组深度调峰控制策略优化[J]. 中国电力,2020,53(1):155-161.
LI Ling,LIU Xinping. Control strategy optimization for thermal power unit adapted to deep peak shaving for large-scale new energy source integration [J]. Electric Power, 2020, 53(1): 155-161.

[15] 闫乃明,李珊珊,高志刚. 直流炉干湿态自动转换控制研究[J]. 热力发电,2013,42(7):79-82.
YAN Naiming,LI Shanshan,GAO Zhigang. Wet-dry state automation switch control for once-through boilers [J]. Thermal Power Generation,2013,42(7):79-82.

(王治红 编辑)