

DOI: 10.19666/j.rlfed.202405106

# 适应大型燃煤机组全工况灵活性运行的快速变负荷控制策略

侯国莲<sup>1</sup>, 黄婷<sup>1</sup>, 郭志强<sup>1</sup>, 余琦<sup>1</sup>, 江浩<sup>2</sup>, 李勇<sup>3</sup>,  
周振华<sup>3</sup>, 安振一<sup>3</sup>

(1. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206;

2. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710054;

3. 国电电力大连庄河发电有限责任公司, 辽宁 大连 116431)

**[摘要]** 随着高比例可再生能源电网负荷波动问题的日益突出, 提高大型燃煤机组在全工况下的快速变负荷能力已成为维护电力系统安全稳定运行的迫切需求。为此, 提出了一种与高加旁路改造技术相结合的负荷快速调控策略以实现灵活性需求下的超临界机组全工况负荷快速爬坡。首先, 为机组的高压回热系统增加一条高加小旁路灵活改变从汽轮机抽取的高温高压蒸汽量, 以加快直流锅炉的能量供给速率; 其次, 充分考虑滑压运行模式下机炉可承受的主蒸汽压力、温度的上下限及变化速率, 同时对输出功率与主蒸汽压力进行解耦并设计一套适应机组高爬坡速率的负荷快速调控方案; 最后, 在某燃煤 600 MW 机组上进行试验验证。研究表明, 负荷爬坡速率 3%Pe/min 下机组能够实现全工况范围内的负荷快速响应, 且主蒸汽压力、汽轮机总调节阀开度等参数保持平稳变化, 并通过仿真验证了机组在负荷爬坡速率 5%Pe/min 下的负荷调节能力, 充分证实了所设计负荷快速调控策略的有效性。

**[关键词]** 燃煤机组; 负荷快速爬坡; 全工况; 灵活运行; 改进协调控制策略

[引用本文格式] 侯国莲, 黄婷, 郭志强, 等. 适应大型燃煤机组全工况灵活性运行的快速变负荷控制策略[J]. 热力发电, 2024, 53(12): 93-101. HOU Guolian, HUANG Ting, GUO Zhiqiang, et al. A rapid load varying control strategy for flexible operation of large scale coal-fired power unit under full operating conditions[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(12): 93-101.

## A rapid load varying control strategy for flexible operation of large scale coal-fired power unit under full operating conditions

HOU Guolian<sup>1</sup>, HUANG Ting<sup>1</sup>, GUO Zhiqiang<sup>1</sup>, YU Qi<sup>1</sup>, JIANG Hao<sup>2</sup>, LI Yong<sup>3</sup>,  
ZHOU Zhenhua<sup>3</sup>, AN Zhenyi<sup>3</sup>

(1. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. Xi'an Thermal Power Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710054, China;

3. GD Power Dalian Zhuanghe Power Generation Co., Ltd., Dalian 116431, China)

**Abstract:** With the increasingly prominent problem of load fluctuations in high proportion renewable energy grids, improving the fast load response ability of large-scaled thermal power units under full operating conditions has become an urgent need to maintain the safe and stable operation of the power system. Therefore, a rapid load change strategy combined with the high-pressure bypass transformation technology under the flexibility demand of supercritical power units is proposed. Firstly, the high-pressure bypass is added to the high-pressure regenerative system to flexibly change the steam extracted amount from turbine, thus to accelerate the energy supply rate of

收稿日期: 2024-05-12

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2019YFB1505400)

Supported by: National Key Research and Development Program (2019YFB1505400)

第一作者简介: 侯国莲 (1966), 女, 博士, 教授/博导, 主要研究方向为火力发电过程建模、控制与节能优化技术, hglncpu@163.com。

通信作者简介: 黄婷 (1996), 女, 博士生, 主要研究方向为大型燃煤机组灵活智能发电控制策略, huangting@ncepu.edu.cn。

once-through boiler. Secondly, to adapt to the high ramping rate, a load change scheme is designed with the limitations of main steam pressure, temperature and their change rate that boiler can withstand at sliding-pressure operation mode and the decoupling of load-main steam pressure for unit. Finally, test on a 600 MW coal-fired thermal power unit shows that, the unit can successfully achieve a high load ramping rate of 3%Pe/min under full operating conditions. Moreover, the main steam pressure, position of main steam valve and other parameters are maintained stable. In addition, the load regulation ability of the unit with load ramping rate of 5% Pe/min is verified, confirming the effectiveness of the proposed load rapid regulation strategy.

**Key words:** coal-fired units; high load ramping rate; full load condition; flexible operation; improved coordinated control strategy

为适应大规模随机性风电、光伏等可再生能源并网下电力系统的安全高效运行需求,提高大型燃煤机组的灵活运行能力使其从主体电源向稳定调节性资源转型迫在眉睫<sup>[1-2]</sup>。超临界燃煤机组因其循环热效率高、负载范围宽、调峰能力强且污染物排放少等优势已成为平抑新能源接入下电网波动的主要选择<sup>[3-4]</sup>。

因受到最低稳定燃烧速率、水动力安全边界、受热面超温和污染物排放的限制和燃料制备系统固有延迟的影响,超临界直流锅炉机组在低工况下的负荷斜坡率非常有限<sup>[5]</sup>。通过灵活性改造、负荷快速爬坡和深度调峰能力改善等均可实现燃煤机组灵活性运行能力的提高<sup>[6]</sup>。文献[7]分析了燃料反应及污染物排放等制约燃煤循环流化床机组变负荷速率的影响因素,为深入研究快速灵活的负荷调节技术提供有效参考。文献[8]建立了循环流化床机组的汽-水两相流动态模型并评估其采用锅炉跟随和恒压/滑压混合控制运行模式的机组负荷响应效果。值得注意的是,该控制策略引发了超压问题。文献[9]结合热电控制策略使热电联产机组的负荷斜坡率提高至2.9%Pe/min,但该策略在机组低负荷段的效果仍有待验证。另外,受设备安全运行限制,燃煤锅炉在设计之初就被赋予了一定的负荷爬坡速率,仅通过控制策略升级对负荷爬坡速率提升是有较大的局限,因此结合灵活性改造技术进一步改善机组全工况灵活运行能力势在必行。立足于我国火电机组的灵活性运行需求,文献[10]利用热泵及电锅炉耦合冷热水双蓄水储能技术成功使机组调峰能力提高了9%。鉴于储能系统在提高火电机组调峰深度和速度上的优势,文献[11]分析了机组耦合不同储能技术的灵活性改造特点,为机组耦合电源侧储能向电网提供优质调峰、调峰服务奠定基础。然而,储能伴随的高成本特点不利于机组的经济运行。

协调控制策略升级与高压加热器(高加)旁路改造结合对大型燃煤机组的负荷爬坡速率和深度调峰能力均具有深远影响。为提高660 MW双再热燃

煤电厂的灵活性运行能力,文献[12]提出了一种以高压抽汽节流为辅助的动态协调控制策略,使机组的负荷斜坡率提升至4.5%Pe/min且过热汽温波动小于3℃。文献[13]为改善燃煤机组的灵活性,提出了高压加热器节流优化方案及改进控制策略。文献[14]基于给水旁路节流和高加抽汽节流设计了能量多级利用方案并建立负荷协调控制策略,使机组响应负荷需求的时间缩短至125s。可见,高压抽汽改造与改进协调控制策略相结合是提升燃煤机组负荷斜坡率的有效手段。文献[15]设计了一种考虑能量需求解耦的汽包锅炉机组协调控制系统使机组能够快速跟踪负荷指令同时保持稳定运行。文献[16]基于自适应模糊有限时间积分滑模控制解决了超临界直流锅炉输入与输出变量间的干扰,在负荷斜坡率6%Pe/min下实现了对主蒸汽压力、分离器蒸汽焓和有功功率的精确调节。为获取更高的机组负荷斜坡率,文献[17]引入超临界CO<sub>2</sub>循环和改进的协调控制系统。为提高机组在全工况条件下的灵活运行能力,文献[18]基于强化学习开发了火电机组制粉系统自启停决策闭环控制系统。在某1000 MW机组常用制粉系统上的应用结果表明该系统有助于降低能耗。此外,文献[19]结合自抗扰控制器对超超临界机组的协调控制系统进行改造,在宽负荷范围内分别获得了3.3%Pe/min和5.5%Pe/min的负荷升降速率,对本文进一步研究机组全工况灵活快速变负荷控制提供了实际参考。考虑到新能源电力伴随的波动性对燃煤机组运行的干扰,文献[20]提出了卡尔曼滤波级联自抗扰控制方案,并采用强化学习算法获取控制器的最优参数。在350 MW热电联产机组上的应用结果表明,机组在30%额定工况下仍能实现2.85%Pe/min的负荷爬坡速率,但如何保证强化学习框架下闭环控制系统的安全性仍是一个亟待解决的难题。此外,上述关于负荷快速爬坡的相关成果只考虑了机组处于较高负荷段运行的情景,缺乏机组低于35%额定工况下的负荷快速响应研究。机炉耦合系统输出功率与主蒸汽压力之间

的耦合度对机组在低负荷段负荷爬坡速率的限制也未被充分考虑。

可见,提高大型燃煤机组全工况灵活运行能力是加速低碳电力系统的构建的必然选择。鉴于上述协调控制策略升级在火电机组灵活性运行上的成功应用及高加旁路改造对机组负荷爬坡速率和运行经济性的积极影响,本文提出了一种融合高压抽汽调节的新型负荷快速调控策略,以弥补超临界机组在极低负荷段下快速变负荷控制研究的空缺。首先,采用高加旁路改造技术对机组进行灵活性改造,高效利用汽轮机乏汽迅速提高锅炉给水温度,

为机组提高主蒸汽压力和温度提供热能保障;其次,在充分考虑燃煤锅炉安全稳定运行前提下设计了一套适应机组滑压运行模式下高负荷爬坡速率的负荷快速调控方案,优化锅炉和汽轮机主控指令以维持负荷变速变化期间的机炉能量供需平衡。此外,基于所提出的负荷快速调控策略,对输出功率与压力进行解耦,减少二者的相互扰动,实现机组在快速升降负荷期间主蒸汽压力、温度的平稳变化;最后,基于某超临界 600 MW 燃煤机组验证了所设计负荷快速调控策略在机组全工况运行下的快速变负荷能力。

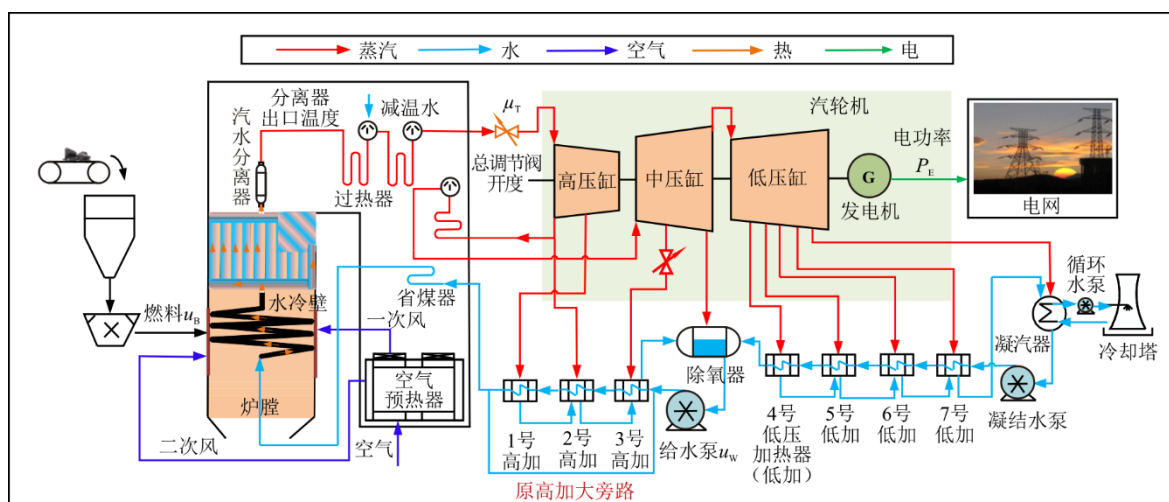


图 1 600 MW 燃煤机组工作流程

Fig.1 Working flow of a 600 MW coal-fired unit

## 1 高负荷爬坡速率下的燃煤机组机炉协调控制需求

由图 1 表征的超临界燃煤机组工作流程可知,直流锅炉内工质具有多相流、大迟延、非线性、多变量强耦合的复杂动态特性,给机组负荷快速调控策略的选择带来一定挑战<sup>[21]</sup>。维持合适的燃水比对机组的运行稳定性及效率均具有重要影响。滑压运行模式下,为实现机组负荷快速爬坡而加快炉膛内煤粉燃烧速率会引发管内工质压力和温度攀升,危及机组的安全稳定运行。此外,出于运行安全的考虑,直流锅炉在设计时都被赋予了最小循环流量限制。未经灵活性改造的锅炉在极低工况下负荷爬坡速率通常为  $1.5\%P_e/\text{min}$ ,过高的负荷爬坡速率可能会造成超温爆管和低温选择性催化还原技术(SCR)装置脱除等事故<sup>[22]</sup>。磨煤机制粉系统固有延迟造成煤粉供给不及时,进而使锅炉难以快速提供负荷响应所需热量。加之污染物排放的限制,在极低工况

下使机组实现  $3\%P_e/\text{min}$  以上的高负荷爬坡速率极为困难。

## 2 负荷快速调控策略

为提升大型燃煤机组全工况运行条件下的负荷快速响应能力,本文结合高加旁路灵活改造技术和适应机组高负荷爬坡速率的负荷控制策略构建了一套具有较高工程实用性的机组快速负荷响应方案。结合该方案改造的燃煤机组具有迅速改变中压缸抽汽量迅速参与电网调峰及负荷精确调节的优势。

### 2.1 高加旁路改造技术

传统火电机组的回热系统一般为“三高四低一除氧”的结构,即原高压给水系统具有 1 号、2 号和 3 号高加。高压给水通过给水泵升压后依次通过 3 号、2 号和 1 号高加,加热后的给水紧接着经给水操作台送入锅炉省煤器,最后进入锅炉。3 台高加设置大旁路,在 3 号高加入口管道上设置有电动

三通阀，三通阀一侧出口接 3 号高加入口，另一侧接至 1 号高加给水出口管道。正常运行时，三通阀通向 1 号高加给水出口侧关闭，高加事故时，三通阀通向 3 号高加入口侧关闭，大旁路投入运行。

为使某超临界 600 MW 燃煤机组具备负荷灵活快速变化的系统条件，为机组搭建一套汽水流程控制支撑平台，即增设高加小旁路改造技术，具体如图 2 所示。

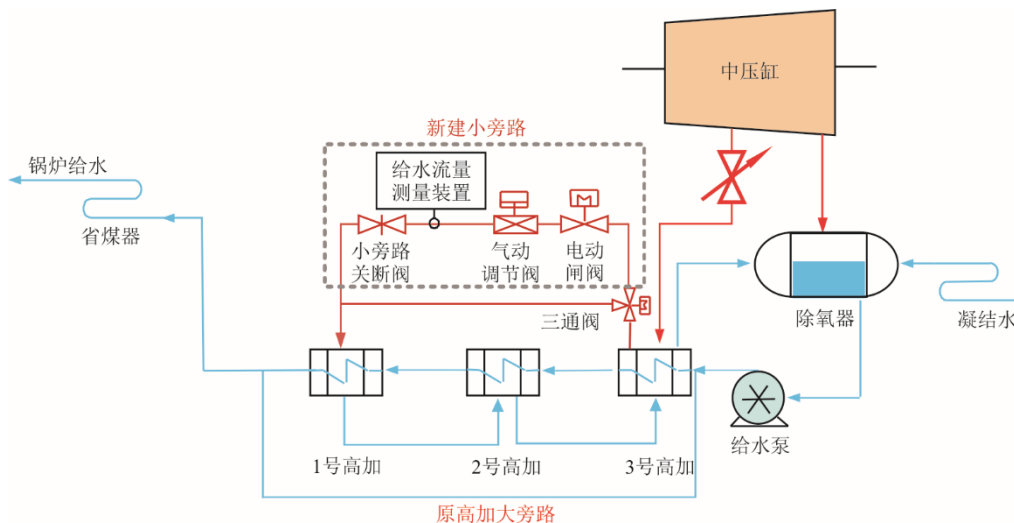


图 2 高加小旁路灵活性改造技术

Fig.2 Flexible transformation with high-pressure heater bypass technology

将原三通阀的进口和通向 1 号高加给水出口侧联通依次设置一台电动闸阀、一台气动调节阀，一台流量测量装置。正常运行时，三通阀通向 1 号高加给水出口侧关闭，旁路阀开启，通过调节阀可以控制旁路给水流量，达到控制高加的给水流量的目的；高加事故时，三通阀通向 3 号高加入口侧关闭，新建小旁路关断阀关闭，大旁路投入运行。通过调节汽轮机中压缸与 3 号高加之间的抽汽调节阀开度可改变高温高压蒸汽的抽取量为锅炉快速灵活变负荷提供有利硬件支撑<sup>[23]</sup>。为使燃煤机组高效参与电网调峰，随后为其增设一套压力-负荷解耦的负荷快速控制方案。

## 2.2 适应机组高负荷爬坡速率的负荷控制方案

在较低负荷爬坡速率下，现役大型火电机组通常采用恒压运行模式，通过调整汽轮机总调节阀开度改变汽轮机进汽量来响应外界负荷需求。恒压运行模式下，同时将输出功率和主蒸汽压力作为机组协调控制系统的主要控制目标<sup>[24]</sup>。而输出功率与主蒸汽压力之间存在着深度耦合特性，负荷的快速大范围变化会引起压力的剧烈波动难以控制，这不仅危及机组的安全稳定运行，还会造成汽轮机叶片等设备的疲劳损伤降低运行经济性。为满足“双碳”战略需求，大型火电机组必须提高其在全工况下的负荷快速爬坡能力<sup>[25]</sup>。

为提高超临界机组的负荷变化速率，尤其是低负荷下的负荷爬坡速率，本文在兼顾机组主要设备性能特性和锅炉安全运行的主蒸汽压力、温度边界前提下，提出了一套适应机组高爬坡速率的协调负荷控制方案。即为了减少负荷快速变化期间汽轮机汽缸及转子的热应力，机组在滑压模式下运行。同时，将原火电机组采用的具有深度耦合特性的输出功率、主蒸汽压力双输入双输出的机炉协调控制方式简化为仅以负荷为控制目标的单输入单输出的控制方式，具体如图 3 所示。当电网负荷需求指令或深度调峰指令下达时，通过改造的高加小旁路快速抽取部分汽轮机中高压缸乏汽提高锅炉给水温度，为改善锅炉负荷爬坡速率提供支撑。以最小化负荷跟踪偏差、汽轮机总调节阀偏差为目的，结合快速变负荷协调控制策略得到当前最优锅炉主控指令  $M_B$  和汽轮机主控指令  $M_T$  指导运行人员及时调整锅炉燃料量、给水量、风煤比及汽轮机进汽量，进而满足机组全工况灵活运行需求。此外，将汽轮机总调节阀维持在相对稳定且节流损失较小的开度，在设备可承受的主蒸汽压力、温度范围及变化速率下通过快速改变主蒸汽压力使机组迅速高效响应负荷需求。这不仅能够实现负荷与压力的解耦，还能减少二者的相互扰动，进而保证机组在全工况范围内快速升降负荷期间的高参数平稳变化。直流锅炉-汽轮机单元的控制信号处理过程如下。

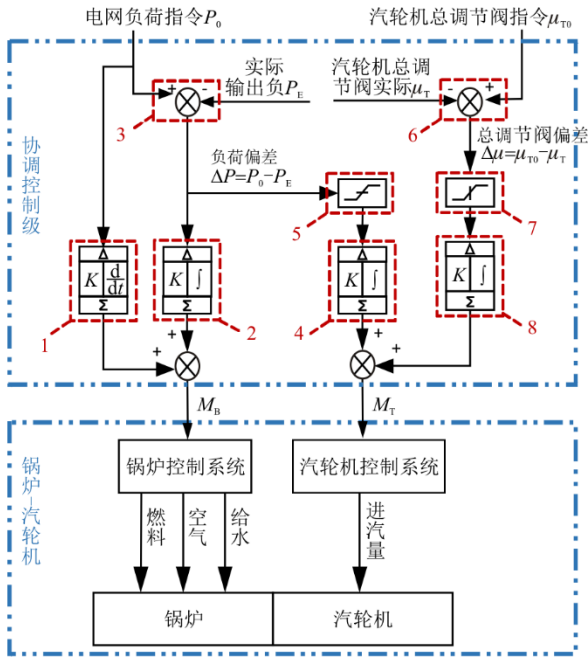


图 3 仅以负荷控制为目标的负荷快速调控策略

Fig.3 Fast load regulation strategy with only load control as the goal

1) 将电网负荷指令  $P_0$  通过比例微分控制器 1 直接作用于锅炉主控指令  $M_B$  形成前馈控制, 使负荷与锅炉主控指令保持一致。前馈控制器采用微分控制作用以加快锅炉供给能量的速率以响应负荷需求。

2) 计算负荷指令  $P_0$  与机组实际功率输出值  $P_E$  的偏差并传递到锅炉侧的比例积分控制器 2 进而改变锅炉控制指令。采用上述负荷控制方式时, 机组的负荷实际上主要由锅炉控制。因此, 考虑到锅炉固有延迟对负荷响应速度的不利影响, 再结合汽轮机来提升负荷的响应速度和一次调频能力。即当负荷跟踪误差  $\Delta P$  较小时, 利用机组的系统蓄热来提升机组的快速变负荷能力。将负荷跟踪偏差信号  $\Delta P$  同时传递到非线性环节 5, 再经过具有比例和积分 ( $K + [c(t)dt]$ ) 作用的汽轮机反馈控制器 4 达到直接改变汽轮机主控指令  $M_T$  的目的。当负荷偏差指令  $\Delta P$  小于机组蓄热可提供的负荷补偿能力时, 该环节按规定曲线输出信号, 当超出其补偿能力范围时, 输出信号维持不变, 不再增加。

3) 为保证汽轮机总调门能够始终处于运行经济性最佳的设定阀位附近, 将总调节阀实际阀位反馈信号与给定阀位进行比较并将结果经比例积分控制器后作用于汽轮机主控指令。为防止阀门频繁动作造成高参数的波动, 在控制器前设置一非线性环节。即通过比较器 6 计算汽轮机总调节阀指令设

定值  $\mu_{T0}$  与实际阀位信号  $\mu_T$  的偏差信号  $\Delta\mu = \mu_{T0} - \mu_T$  并传递到非线性环节 7, 随后经阀位反馈控制器 8 作用于汽轮机主控指令。非线性环节 7 具有如下函数功能: 当  $\Delta\mu$  较小时, 其输出 ( $f(x)$ ) 保持原状态不变; 当  $\Delta\mu$  较大时, 才拥有有效输出, 这样能避免调门的频繁动作造成的负荷及主蒸汽压力波动。

在燃煤锅炉稳定运行前提下, 当汽轮机总调节阀阀位不变时, 机组输出功率与主蒸汽压力 (即进入汽轮机的蒸汽流量) 呈单值关系, 因此只要负荷变化平稳, 那么主蒸汽压力也能够保持平稳波动。由此可见, 机组基于所提的负荷快速调控方案不仅简化了协调控制逻辑, 且无需设置主蒸汽压力给定值。此外, 该负荷快速调控方案较传统的负荷-压力双输入双输出的协调控制方法不仅具有更高的控制精度及更小的主蒸汽压力、温度波动, 还能改善机组安全经济运行能力。

### 3 算例分析

为证实所设计负荷快速调控策略的有效性, 在某经高加旁路改造的超临界 600 MW 机组上开展了试验与仿真测试。结合机组在 30%~90% 额定负荷全工况范围内的实际运行数据分别开展了负荷快速爬坡速率 3%Pe/min 和 5%Pe/min 的试验。机组采用滑压运行模式, 且在各工况运行时主蒸汽压力、温度及汽轮机总调节阀开度、高加小旁路抽汽量均保持在满足机组稳定经济运行需求的范围内。首先, 基于机组在 30%、50%、70%、80%、90% 额定负荷工况下的 8 000 组实际运行数据辨识得到机组的传递函数模型; 然后, 对机组结合高加旁路改造技术的负荷快速调控策略和未经改造的传统协调控制方法下的负荷响应效果进行对比, 验证机组应用所设计算法在全负荷工况下的灵活快速变负荷能力。

#### 3.1 负荷爬坡速率 3%Pe/min 下负荷响应能力试验

在负荷爬坡速率 3% Pe/min 的负荷爬坡试验中, 要求机组的输出功率在 167 s 内上升 50 MW。由不同负荷控制策略调节的机组在 30%、50%、70% 和 90% 额定负荷工况下的负荷响应结果分别如图 4—图 7 所示。评估负荷跟踪快速性及精度的调节时间  $t_s$  和跟踪误差  $e$  记录在表 1 中。调节时间  $t_s$  指机组收到负荷需求指令后其输出功率从原稳态值进入到新的稳态值 ( $\pm 2\%$ ) 范围且不再越出时为止所经历的最短时间。负荷跟踪误差  $e$  指机组实际输出功率与负荷需求指令之间的差值, 计算公式为:

$$e = |P_E - P_0| \quad (1)$$

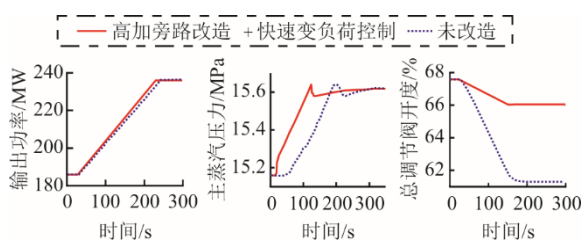


图4 负荷爬坡速率3%Pe/min下机组在30%额定负荷工况的响应结果

Fig.4 Responses of the unit at 30% rated load with load ramping rate of 3%Pe/min

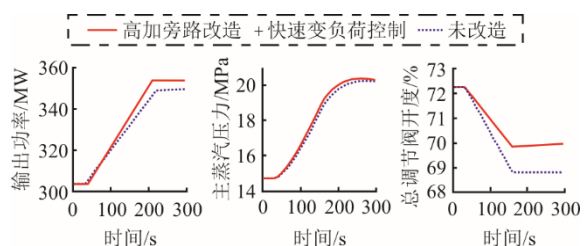


图5 负荷爬坡速率3%Pe/min下机组在50%额定负荷工况的响应结果

Fig.5 Responses of the unit at 50% rated load with load ramping rate of 3%Pe/min

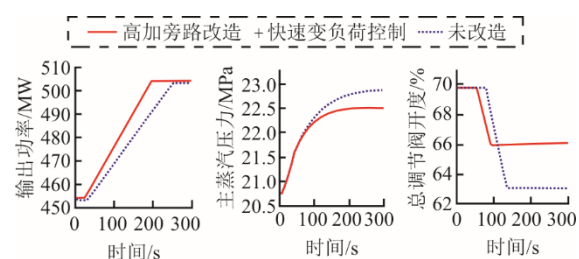


图6 负荷爬坡速率3%Pe/min下机组在70%额定负荷工况的响应结果

Fig.6 Responses of the unit at 70% rated load with load ramping rate of 3%Pe/min

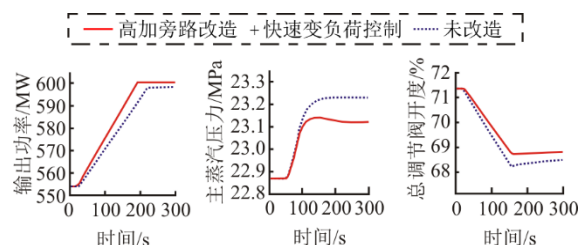


图7 负荷爬坡速率3%Pe/min下机组在90%额定负荷工况的响应结果

Fig.7 Responses of the unit at 90% rated load with load ramping rate of 3%Pe/min

图4中的红色实线代表机组基于所提负荷快速调控策略的负荷响应结果,蓝色虚线为负荷与压力耦合的传统协调控制方法。图4的负荷调节对比结

果可知,得益于高加旁路改造技术抽取汽轮机乏汽提高锅炉给水温度与滑压运行模式下稳定升高的主蒸汽压力,超临界机组在30%额定负荷工况能够以负荷爬坡速率3%Pe/min快速响应负荷需求。此外,结合高加小旁路灵活性改造技术与快速变负荷控制策略的机组在负荷响应过程中,主蒸汽压力迅速变化并稳定,且汽轮机总调节阀开度增量较小,这可减小节流损失、延长阀门寿命,很大程度上有效提高了机组的运行经济性及安全性。

图5表明,高效的负荷快速调控策略显著提高了机组的负荷爬坡速率。此外,表1中记录的性能指标显示:50%额定负荷工况下,由改进负荷快速调控策略调节的机组负荷响应时间仅为176s,负荷跟踪误差减小了4.24MW;70%和90%额定负荷工况下,机组同样也能实现负荷快速响应。图6、图7中的负荷需求响应结果显示,在70%及90%额定负荷工况下,改造后的机组负荷爬坡速率均有所提高,与负荷解耦后的主蒸汽压力调节速度快且波动较小,汽轮机总调节阀也相对稳定。因此,高加旁路灵活性改造技术与快速变负荷控制相结合是一项能够切实提高燃煤机组灵活性运行能力的策略。

表1 3%Pe/min 负荷爬坡速率下机组负荷响应能力评估  
Tab.1 Load response ability evaluations for the unit with load ramping rate of 3%Pe/min

负荷爬坡速率	运行工况	控制策略	负荷跟踪性能	
			$t/s$	$e/MW$
3% $P_e/min$	30%	传统协调控制方法	188	0
		改进负荷快速调控策略	169	0.50
	50%	传统协调控制方法	186	4.45
		改进型负荷快速调控策略	176	0.21
70%	传统协调控制方法	225	1.43	
	改进型负荷快速调控策略	171	0.37	
90%	传统协调控制方法	200	6.00	
	改进型负荷快速调控策略	174	3.70	

### 3.2 负荷爬坡速率5%Pe/min下负荷响应能力测试

为充分验证机组应用高加旁路改造技术和负荷快速调控策略后的全负荷工况灵活运行能力,在本测试中将负荷爬坡速率设置为5%Pe/min,即要求机组负荷在200s内上升100MW。机组在30%~97%额定负荷工况内的连续升降负荷效果分别如图8—图11所示,全负荷工况快速变负荷能力评估结果见表2。

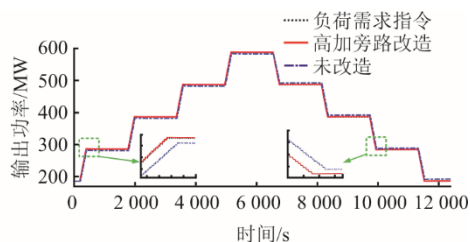


图 8 负荷爬坡速率 5%Pe/min 下机组全负荷工况负荷响应结果

Fig.8 Load responses of the unit under full operating conditions with load ramping rate of 5%Pe/min

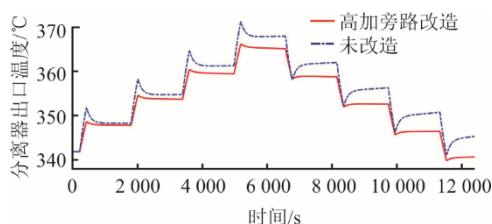


图 9 负荷爬坡速率 5%Pe/min 下机组全负荷工况负荷调节的分离器出口温度响应结果

Fig.9 Temperature responses of the unit under full operating conditions with load ramping rate of 5%Pe/min

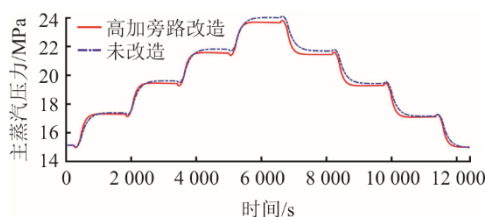


图 10 负荷爬坡速率 5%Pe/min 下机组全负荷工况负荷调节的主蒸汽压力响应结果

Fig.10 Pressure responses of the unit under full operating conditions with load ramping rate of 5%Pe/min

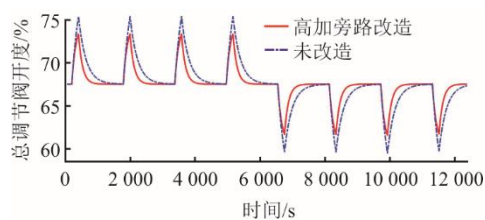


图 11 负荷爬坡速率 5%Pe/min 下机组全负荷工况负荷调节的总调节阀开度响应结果

Fig.11 Valve responses of the unit at 80% rated load at 5%Pe/min

图 8 分别绘制了采用所提快速负荷控制策略与未改造的机组在全工况运行条件下的负荷响应效果,改造后的机组升降负荷速率均达到了 5%Pe/min,未改造的机组则小于 5%Pe/min。同时,由图 9 可知:经灵活性改造后的机组在快速升降负荷期间能将其分离器出口温度维持在微小范围内波动且很快

恢复到新的稳定状态,有利于机组的安全稳定运行;而未改造的机组在负荷调节过程中分离器出口温度波动较为明显。

图 10 的仿真结果表明,经灵活性技术改造后的机组在连续变负荷期间其主蒸汽压力响应速度快且波动较小,这揭示了高加旁路改造和负荷快速调控技术在提高机组负荷快速爬坡和深度调峰能力上的突出优势。此外,由图 11 可知,汽轮机总调节阀开度在机组每一次升降负荷期间均能保持相对稳定且快速恢复到初始值,不仅降低了节流损失还避免了阀门频繁开关造成的寿命损失,对提高机组的运行经济性具有积极影响。

表 2 负荷爬坡速率 5%Pe/min 下机组全负荷工况快速变负荷能力评估

Tab.2 Load response ability evaluations for the unit under load ramping rate of 5%Pe/min

负荷变化/ MW	运行 策略	调节时 间/s	调节误 差/MW	温度变 化/°C	压力变 化/MPa
185.93~285.93	高加旁路	205	0.11	5.99	2.18
	未改造	226	4.85	6.43	2.26
285.93~385.93	高加旁路	211	0.92	5.88	2.14
	未改造	229	5.41	6.45	2.24
385.93~485.93	高加旁路	214	0.90	5.76	2.13
	未改造	228	5.24	6.52	2.22
485.93~585.93	高加旁路	204	0.93	5.69	2.12
	未改造	218	5.17	6.64	2.31
585.93~485.93	高加旁路	220	0.90	6.36	2.24
	未改造	238	4.91	6.44	2.33
485.93~385.93	高加旁路	217	0.87	6.22	2.17
	未改造	223	5.58	6.18	2.27
385.93~285.93	高加旁路	215	2.88	6.16	2.19
	未改造	229	4.47	5.96	2.29
285.93~185.93	高加旁路	204	0.95	6.22	2.26
	未改造	222	5.66	9.44	2.18

基于所设计快速变负荷控制策略的机组以负荷爬坡速率 5%Pe/min 大范围提升/降低负荷的平均跟踪误差仅为 1.30 MW,分离器出口温度波动 6.0 °C,主蒸汽压力波动 2.18 MPa,与未改造的机组相比分别降低了 3.89 MW、0.50 °C 和 0.09 MPa,充分证实了机组在全负荷工况下的灵活运行能力。特别地,结合高加旁路技术改造后的机组,在 30%额定负荷工况下仍能达到 5%Pe/min 的负荷爬坡速率,且分离器出口温度和主蒸汽压力等高参数平稳变化满足了实际发电过程的控制需求,这极大程度上提升了机组的深度调峰能力,为更大规模新能源电力并网提供裕量。

## 4 结 论

为平抑随机性可再生能源电力并网带来的波动,本文提出了与高加旁路改造技术结合的负荷快速调控策略以提高超临界机的快速变负荷能力,并在某 600 MW 燃煤机组上得到成功验证,主要结论如下。

1) 通过高加旁路灵活性改造技术迅速抽取汽轮机乏汽提高锅炉给水温度的能力以及与主蒸汽压力解耦后的负荷快速控制方案,机组实现了全工况下的负荷快速调控且维持安全稳定运行。

2) 采用所设计负荷快速调控策略和滑压运行模式的机组在高爬坡速率下,其汽轮机总调节阀开度变化较小,尤其在 5%Pe/min 下总调节阀开度先开大提高进汽量随后快速稳定在初始值,这在很大程度上能够减小节流损失提高机组运行效率。

3) 与传统协调控制策略相比,基于所提负荷快速调控策略的机组输出功率与主蒸汽压力调节得以解耦,机组在 30%~90% 额定负荷工况下均获得了快速精确的负荷响应,调节时间与跟踪误差均有所下降。因此,结合负荷快速调控策略可有效提高机组在全工况下的快速变负荷能力,进而为更大规模化可再生能源电力的消纳提供基础。

### [参 考 文 献]

- [1] 曹鹏, 邓长虹, 张小卉, 等. 分时段变目标的火电机组实时协调优化调度策略[J/OL]. 电网技术, <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0443>. CAO Peng, DENG Changhong, ZHANG Xiaohui, et al. Real-time coordinated optimal scheduling strategy for thermal power units with adaptive time division and variable objective[J/OL]. Power System Technology, <https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.0443>.
- [2] 郑林烽, 缪源诚, 滕晓毕, 等. 考虑配储的火电机组灵活性改造模型与方法[J/OL]. 中国电机工程学报, <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231566>. ZHENG Linfeng, MIAO Yuancheng, TENG Xiaobi, et al. Model and method for flexible retrofit of thermal power units considering energy storage configuration[J/OL]. Proceedings of the CSEE, <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.231566>.
- [3] 弓林娟, 王文毓, 高耀岩, 等. 面向大规模新能源消纳的火电机组平行控制[J]. 动力工程学报, 2023, 43(2): 136-142. GONG Linjuan, WANG Wenyu, GAO Yaokui, et al. Parallel control of thermal power unit for large-scale renewable energy accommodation[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(2): 136-142.
- [4] ZHAO Y L, WANG C Y, 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.
- [5] 刘云. 我国能源电力发展及火电机组灵活性改造综述[J]. 洁净煤技术, 2023, 29(增刊 2): 319-327. LIU Yun. Overview of energy and power system development and flexible retrofit of thermal power units in China[J]. Clean Coal Technology, 2023, 29(Suppl.2): 319-327.
- [6] 弓林娟, 侯国莲, 胡博, 等. 面向低碳灵活运行的超临界机组模糊预测控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(3): 1048-1060. GONG Linjuan, HOU Guolian, HU Bo, et al. Fuzzy predictive control strategy for low-carbon and flexible operation of supercritical unit[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(3): 1048-1060.
- [7] 汤仔华, 宋国良, 宋维健, 等. 循环流化床锅炉快速变负荷调节技术研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(6): 2279-2292. TANG Zaihua, SONG Guoliang, SONG Weijian, et al. Research progress on rapid variable load regulation technology of circulating fluidized bed boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2279-2292.
- [8] GUILLERMO M, RUBÉN M, DAVID P, et al. Dynamics and control of large-scale fluidized bed plants for renewable heat and power generation[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 219: 119591.
- [9] WANG W, LIU J Z, ZENG D L, et al. Modeling and flexible load control of combined heat and power units[J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 166: 114624.
- [10] 张龙, 杨晓华, 沈超群, 等. 电力现货市场下热泵+水储能能在火电机组灵活性改造中的应用研究[J]. 热力发电, 2023, 52(2): 101-110. ZHANG Long, YANG Xiaohua, SHEN Chaoqun, et al. Research on the application of heat pump+water energy storage in the flexibility renovation of thermal generator units in the electricity spot market[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(2): 101-110.
- [11] 马汀山, 王妍, 吕凯, 等. “双碳”目标下火电机组耦合储能的灵活性改造技术研究进展[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(增刊 1): 136-148. MA Tingshan, WANG Yan, LYU Kai, et al. Research progress on flexibility transformation technology for coupled energy storage of thermal power units under the “dual-carbon” goal[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(增刊 1): 136-148.
- [12] WANG Z, LIU M, YAN H, et al. Optimization on coordinate control strategy assisted by high-pressure extraction steam throttling to achieve flexible and efficient operation of thermal power plants[J]. Energy, 2022, 244: 122676.
- [13] LIU Z F, WANG C Y, FAN J L, et al. Enhancing the flexibility and stability of coal-fired power plants by optimizing control schemes of throttling high-pressure extraction steam[J]. Energy, 2024, 288: 129756.
- [14] WANG D, LIU D Y, WANG C N, et al. Flexibility improvement method of coal-fired thermal power plant based on the multi-scale utilization of steam turbine energy storage[J]. Energy, 2022, 239: 122301.
- [15] GAO Y K, ZENG D L, PING B Y, et al. Research on coordinated control system of drum boiler units considering energy demand decoupling[J]. Control Engineering Practice, 2020, 102: 104562.
- [16] 范赫, 苏志刚, 彭献永, 等. 耦合过热汽温调节的直流炉燃煤机组抗干扰机炉协调控制系统[J/OL]. 中国电机工程学报, <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013>.

- pcsee.232312.  
FAN He, SU Zhigang, PENG Xianyong, et al. Anti-disturbance coordinated control system of once-through boiler coal fired units coupled with superheated steam temperature regulation [J/OL]. Proceedings of the CSEE, <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.232312>.
- [17] WANG D, XIE X Y, ZHOU Y L, et al. Improved coordinated control strategy of coal-fired power units with coupled heat storage based on supercritical carbon dioxide cycle[J]. Applied Thermal Engineering, 2023, 230: 120850.
- [18] 蔡佳辰, 李军, 高明, 等. 基于深度强化学习的火电机组制粉系统自启停智能决策[J]. 热力发电, 2024, 53(3): 146-152.  
CAI Jiachen, LI Jun, GAO Ming, et al. Intelligent decision-making of start-up and shutdown for coal milling system in thermal power plants based on deep reinforcement learning[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(3): 146-152.
- [19] HOU G L, HUANG T, HUANG C Z. Flexibility improvement of 1 000 MW ultra-supercritical unit under full operating conditions by error-based ADRC and fast pigeon-inspired optimizer[J]. Energy, 2023, 270: 126852.
- [20] HOU G L, HUANG T, ZHENG F M, et al. Application of multi-agent EADRC in flexible operation of combined heat and power plant considering carbon emission and economy[J]. Energy, 2023, 263: 125711.
- [21] 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 characteristics of a supercritical 660 MW once through boiler[J]. Thermal Power Generation, 2024, 53(1): 124-133.
- [22] 刘思宇, 王晗林. 一种火电机组实现 SCR 全时段脱硝的系统及方法[J]. 电气时代, 2023(增刊 2): 85-88.  
LIU Siyu, WANG Hanlin. A system and method for achieving SCR full period denitrification of thermal power units[J]. Electric Age, 2023(Suppl.2): 85-88.
- [23] 黄怡涵, 郝玲, 陈磊, 等. 适用于多种一次调频技术及工况变化的抽汽凝汽式汽轮机数学模型[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(15): 6065-6078.  
HUANG Yihan, HAO Ling, CHEN Lei, et al. Mathematical model of extraction condensing steam turbine suitable for multiple primary frequency regulation technologies and various operating conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(15): 6065-6078.
- [24] 张建华, 姚祎, 赵思, 等. 基于灵活性改造的火电机组参与快速调频的协调控制方案[J/OL]. 上海交通大学学报, <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.602>.  
ZHANG Jianhua, YAO Yi, ZHAO Si, et al. A coordinated control scheme for fast frequency regulation of thermal power units based on flexibility transformation[J/OL]. Journal of Shanghai Jiaotong University, <https://doi.org/10.16183/j.cnki.jsjtu.2023.602>.
- [25] 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.

(责任编辑 邓玲惠)