

高压加热器抽汽切除及灵活调节仿真试验研究

马良玉,赵晶璇,马 进

(华北电力大学 控制与计算机工程学院,河北 保定 071003)

摘 要:为深入了解高压加热器抽汽灵活调节辅助机组快速变负荷的潜力,利用600 MW超临界火电机组全工况仿真系统进行不同方式切除高压加热器抽汽仿真试验,总结了不同切除方式对机组关键运行参数的影响规律。进一步开展高压加热器抽汽调节参与机组快速变负荷仿真试验。结果表明:高压加热器抽汽参与机组变负荷调节可有效改善机组的负荷响应速率和调节时间,更好地满足自动发电控制(AGC)对机组快速变负荷的需求。

关 键 词:超临界机组;高压加热器;抽汽调节;负荷快速响应;仿真研究

中图分类号:TK37 文献标识码:A DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2021.08.017

[引用本文格式]马良玉,赵晶璇,马 进. 高压加热器抽汽切除及灵活调节仿真试验研究[J]. 热能动力工程,2021,36(8):114-120. MA Liang-yu, ZHAO Jing-xuan, MA Jin, et al. Simulation study on cutting-off and flexible regulation of the extraction steam to high-pressure heaters[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(8):114-120.

Simulation Study on Cutting-off and Flexible Regulation of the Extraction Steam to High-pressure Heaters

MA Liang-yu, ZHAO Jing-xuan, MA Jin

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code:071003)

Abstract: In order to deeply understand the potential of the flexible regulation for the extraction steam to the high-pressure heaters in assisting the unit changing load quickly, a full-scope simulator of a 600 MW supercritical power unit was employed to carry out simulation tests of cutting off the extraction steam to high pressure heaters in different ways. The influence rules on the key parameters of the unit were summarized. Furthermore, rapid variable load control tests with flexible regulation of extraction steam to high-pressure heaters were carried out, which show that it can effectively improve the load response rate and adjustment time, and better meet the requirements of automatic generation control (AGC) for rapid load change of the power unit.

Key words: supercritical power unit, high-pressure heaters, extraction steam regulation, fast unit load response, simulation study

引 言

600 MW以上大容量燃煤机组参与一次调频、自动发电控制(AGC)并接受“两个细则”考核已成为常态^[1]。在此背景下,采用各种新技术提高机组

的负荷响应速率,增加其运行灵活性,已成为当前电厂的迫切需求。

因此,充分利用汽轮机侧热力循环系统的潜力提高机组的负荷响应速度已成为近年的研究热点,出现了多种汽轮机侧辅助快速变负荷技术^[2-6]。其中,凝结水变流量调节应用相对较多,但该方法存在

一定的响应滞后,且会导致除氧器水位大幅波动,对机组的安全运行有一定影响^[7]。为此,研究者提出通过直接改变抽汽调节阀开度(改变回热抽汽量)实现机组负荷快速调节。该方法具有一定的可操作性,逐渐受到关注^[8-10]。

为深入了解抽汽调节快速变负荷技术的潜力,以某 600 MW 超临界机组为研究对象,利用经现场验证的火电机组仿真机,在不同组合方式下开展切除高压加热器(简称高加)抽汽对机组影响的试验研究,总结相关规律,为利用回热抽汽调节辅助机组快速变负荷方案设计奠定基础。在此基础上,进一步开展高加抽汽调节参与机组快速变负荷仿真试验,验证抽汽灵活调节对提高机组负荷响应速率以及 AGC 适应能力的有效性。

1 研究对象及仿真试验平台简介

以某 600 MW 超临界机组为研究对象,其锅炉为 DG1900/25.4-II 型一次中间再热直流锅炉,汽轮机为 N600-24.2/566/566 一次中间再热、冲动式、单轴、三缸四排汽、双背压、纯凝汽式汽轮机。其回热抽汽系统高加部分的工质流程如图 1 所示。

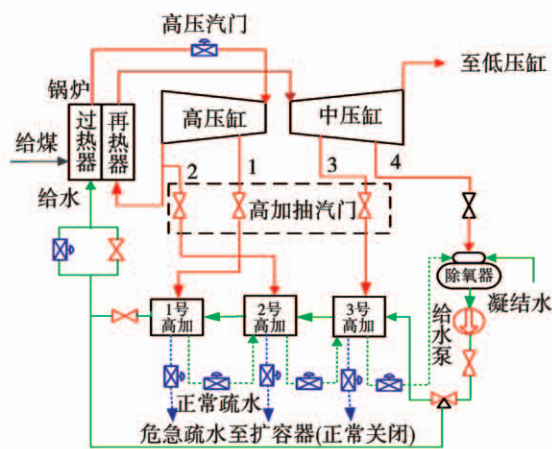


图1 高加及回热抽汽系统

Fig. 1 High-pressure heaters and steam extraction system

借助机组的全范围仿真机开展试验研究,该仿真机利用 STAR-90 图形化仿真支撑系统进行开发。经现场测试,在 50% 以上高负荷范围内,质量及能量平衡的关键参数的稳态偏差小于 $\pm 1\%$,仿真模型具有较高的静态精度和良好的动态特性,满足高加抽汽切除过程中参数变化规律研究的需要。

2 基本方式下高加抽汽切除试验

机组正常运行中各高加抽汽投入顺序为抽汽压力由低到高(3—2—1),切除顺序为抽汽压力由高到低(1—2—3)。为此,机组在锅炉主控制器、汽轮机主控制器均为手动状态,其他送引风、给水、过热汽温调节等子系统为自动状态的 600 MW 基本方式下,分别针对 1 号高加抽汽单独切除;2 号高加抽汽单独切除;3 号高加抽汽单独切除;1,2 号高加抽汽同时切除;2,3 号高加抽汽同时切除;1,2,3 号高加抽汽全部切除 6 种方式进行仿真试验,分析不同方式抽汽量变化对机组关键参数的影响。

2.1 单独切除 1 台高加抽汽

依次单独切除 1,2,3 号高加,每次试验过程时长 800 s,部分主要参数变化曲线如图 2 所示。由图 2 可知,单独切除 1,2 号高加抽汽,机组负荷最大增量分别为 22 和 20 MW,而单独切除 3 号高加抽汽最大负荷增量仅为 7 MW,对负荷增加影响最小。切除 1 号高加抽汽对给水温度影响最大,降低了 $29.5\text{ }^{\circ}\text{C}$,这是由于 1 号高加处于给水加热流程的最后一段,切除抽汽后给水温度的降低无法由其他级抽汽补偿。而切除 2 号高加抽汽后给水温度降低可由 1 号高加抽汽适度补偿,切除 3 号高加后给水温度降低可由 1 号及 2 号高加抽汽更多地补偿。因此 3 号高加抽汽切除对给水温度影响最小。但实际机组温度补偿带来的抽汽量的增加可能会引起抽汽管道振动、汽流超速等问题,应予以考虑。

由于切除不同高加抽汽对给水温度的影响不同,导致锅炉水冷壁出口过热度下降程度也不同,切除 1 号高加抽汽对过热度影响最大。3 种情况下过热度变化均在可接受范围以内,没有进入湿态的危险。过热汽温虽然受过热度影响,但过热度降低时,后续减温喷水阀会自动关小,因此过热汽温均维持在可接受范围内。由于煤量不变,过热度变化后给水自动调节水煤比,给水流量下降程度与过热度变化程度一致。相应地,主蒸汽压力下降程度也与给水流量变化程度一致。

2.2 组合切除 2~3 台高加抽汽

在 600 MW 基本方式稳态工况下,分别切除 1 号及 2 号高加抽汽、2 号及 3 号高加抽汽、所有 3 台高加抽汽。每次试验过程时长 1 200 s,主要参数变

化曲线如图 3 所示,试验现象对比如表 1 所示。

同时切除 3 台高加抽汽相当于将其全部解列,对机组负荷影响最大。给水温度降低约 100 ℃,如果调节不合理,存在中间点转湿态的风险,对锅炉机组安全影响较大,应慎重使用。

同时切除 1,2 号高加抽汽比同时切除 2,3 号高加抽汽在初始阶段对负荷的影响大一些,前者对给

水温度、中间点温度、主汽压的影响也比后者大。此外应注意,由于正常工况下,高加疏水逐级自流,当 2 号及 3 号高加抽汽同时切除后,对应其汽侧压力降低,正常疏水无法排放,对其水位影响较大,应确保各级危急疏水调节正常,防止水位超限。而按先后顺序或同时切除 1,2 号高加抽汽,或者单独切除 1 号则不存在疏水不畅问题。

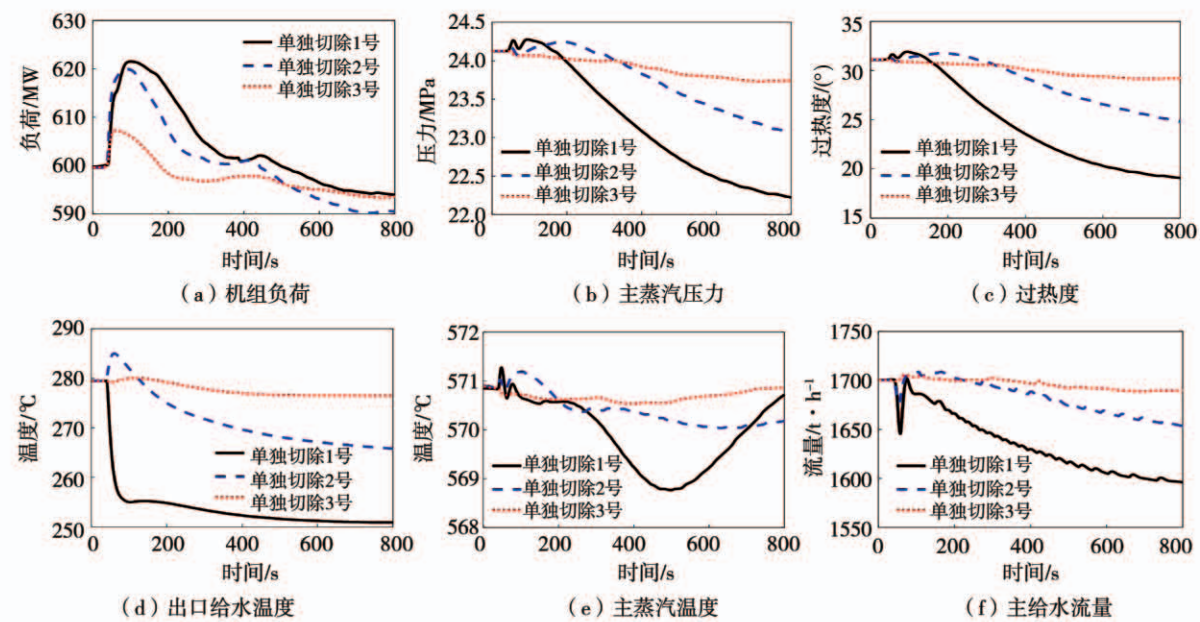


图 2 单独切除 1 台高加主要参数变化曲线(基本模式)

Fig.2 The change curves of main parameters when cutting off one heater was excised separately (basic mode)

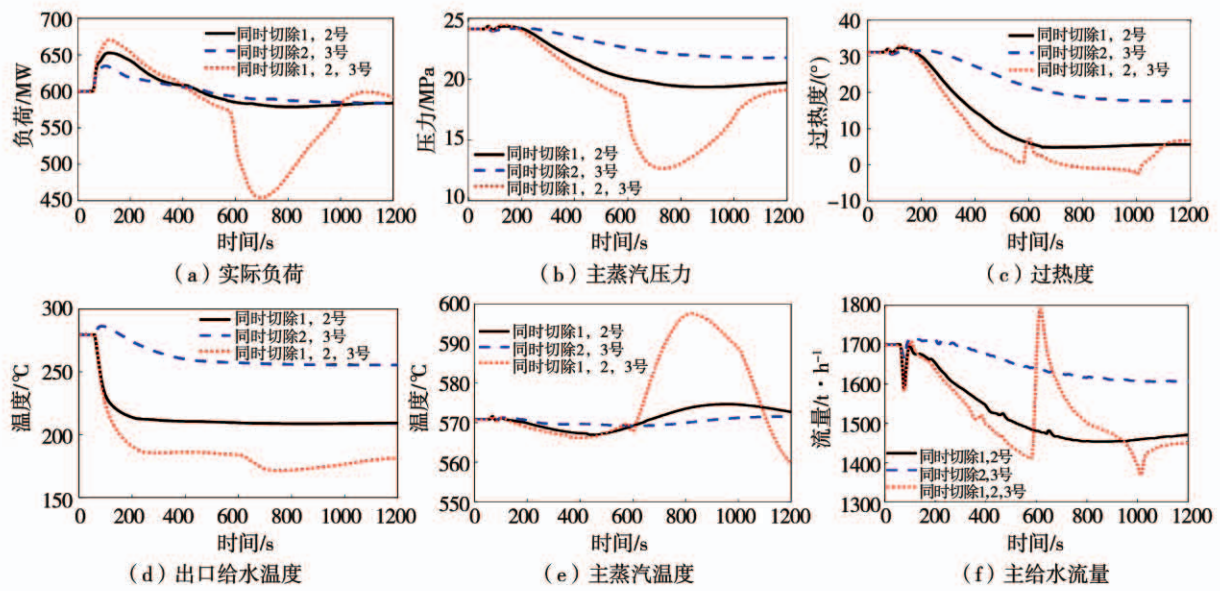


图 3 同时切除多台高加抽汽主要参数变化(基本模式)

Fig.3 The change curves of main parameters when cutting off multiple heaters at the same time (basic mode)

表 1 600 MW 负荷下同时切除多台高加参数变化对比(基本模式)

Tab.1 Comparison of main parameters when cutting off multiple heaters under 600 MW load(basic mode)

抽汽切除方式	负荷/MW	出口给水温度/℃	过热度/℃	主蒸汽压力/MPa	主给水流量/t·h ⁻¹	主蒸汽温度/℃
基准工况参数 稳态值	600.39	279.50	31.16	24.12	1 700.7	570.69
同时切除 1,2 号高加抽汽	最大上升至 652 MW, 之后开始下降,最终稳 定在 580 MW	最 终 稳 定 在 208 ℃	下降至 5 ℃	下降至 19.4 MPa	下降至 1 470 t/h	维 持 在 567 ~ 575 ℃之间
同时切除 2,3 号高加抽汽	最大上升至 635 MW, 之后开始下降,最终稳 定在 580 MW	最 终 稳 定 在 255 ℃	下降至 18 ℃	下降至 22 MPa	下降至 1 618 t/h	维 持 在 569 ~ 571.5 ℃之间
同时切除 1,2, 3 号高加抽汽	最大上升至 670 MW 然后下降,在 600 s 后 由于中间点过热度下 降到零,负荷异常突降 至 450 MW,然后缓慢 回升至 590 MW	最 终 稳 定 在 180 ℃	过热度在 600 s 内下 降至 5 ℃后,降至 0 ℃ 以下持续约 360 s,然 后逐渐回升至 5 ℃	在 600 s 内降至 18 MPa 后由于过热度下 降到零,异常突降至 12.6 MPa 后缓慢回升 至 19 MPa	600 s 内下降至 1 400 t/h,600 s 时由于主汽 压力突降,异常上升至 1 800 t/h,之后下降至 1 370 t/h	在 600 s 内,维持 在 570 ℃,600 s 之后,急剧上升至 600 ℃

3 协调方式高加抽汽切除及调节试验

3.1 协调方式高加抽汽切除试验

在基本方式下进行上述高加抽汽切除试验,目的在于深入了解排除炉侧燃料量和汽轮机侧调门开度扰动的前提下,各种抽汽切除方式对关键参数的影响以及最大负荷调节潜力。正常情况下,机组参与一次调频和 AGC 时运行于协调控制方式(锅炉主

控和汽轮机主控均为自动)。在协调模式 600 MW 负荷下稳态工况再次对上述 6 种不同切除方式进行试验,进一步了解协调方式运行时切除高加抽汽对负荷及其他参数的实际影响。

单独切除 1 台高加抽汽时,主要参数变化曲线如图 4 所示。组合切除 2 台以上高加抽汽仿真试验,主要参数变化对比如表 2 所示。

表 2 600 MW 负荷下同时切除多台高加参数变化对比(协调模式)

Tab.2 Comparison of main parameters when cutting off multiple heaters under 600 MW load(coordination mode)

抽汽切除方式	负荷/MW	出口给水温度/℃	过热度/℃	主蒸汽压力/MPa	主给水流量/t·h ⁻¹	主蒸汽温度/℃
同时切除 1,2 号高加抽汽	最大上升 约 44 MW	最终稳定 在 210 ℃	最大降至 21 ℃	在 23 ~24.6 MPa 之间	迅速下降至 1 548 t/h,之后上升至1 640 t/h	维持在 559 ~ 581 ℃之间
同时切除 2,3 号高加抽汽	最大上升 27 MW	最终稳定 在 255 ℃	最大降至 27 ℃	在 23.6 ~ 24.4 MPa 之间	迅速下降至 1 625 t/h 左右,之后上升至 1 670 t/h	维持在 566 ~ 576 ℃之间
同时切除 1,2,3 号高加抽汽	最大上升 60 MW	最终稳定 在 160 ℃	600 s 内下降至 0 ℃, 600 s 后下降至 0 ℃ 以下,最终回升至 0 ℃	600 s 内降到 25 MPa, 600 s 后过热度至零, 导致主汽压异常跌至 10 MPa	600 s 内下降至 1 420 t/h,600 s 时上升至 2 029.9 t/h	600 s 内维持 在 560 ~ 580 ℃之间

由图 4 可知,协调方式下单独切除 1 台高加抽汽时,由于锅炉主控和汽轮机主控均为自动状态,燃料和汽轮机调门根据负荷与主汽压力的偏差进行自动调节,抵消一部分高加抽汽切除带来的影响,各参

数的变化范围均小于基本方式。单独切除 1,2 号高加抽汽,负荷分别最大上升 14 和 15 MW,而单独切除 3 号高加仅上升 6 MW。切除 1 号高加抽汽时过

热度变化最大,也仅仅下降 5 ℃。主汽压力则在设定值附近波动,偏差超过 0.5 MPa,过热汽温也在允许偏差范围内。

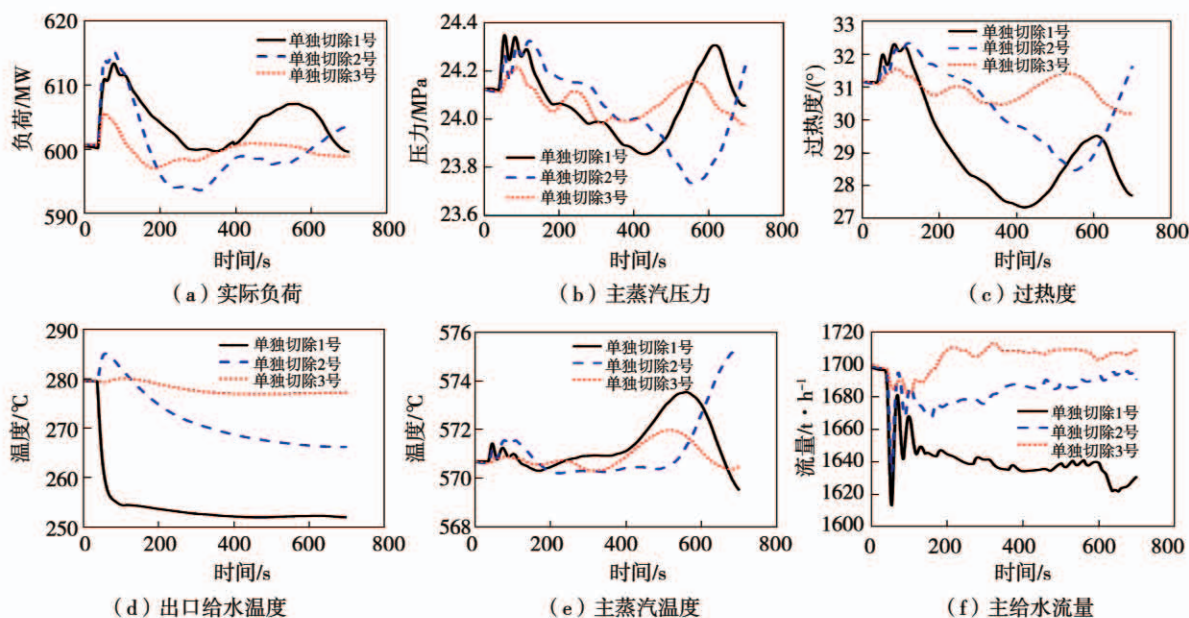


图 4 切除 1 台高加主要参数变化曲线(协调模式)

Fig. 4 The change curves of main parameters when cutting off one heater separately (coordination mode)

由表 2 可知,协调方式下组合切除 1,2 号高加抽汽后,给水温度、过热度下降均比同时切除 2,3 号高加抽汽大。过热汽温有超温现象,必要时应手动干预,但总体来说锅炉运行是安全的。同时切除所有 3 台高加抽汽时,由于给水温度降低 100 ℃ 以上,随着运行时间的增加,依然存在过热度接近 0 ℃ 而进入湿蒸汽区的可能性,导致主汽压力、过热汽温大幅波动,超过安全限值,必须及时人为干预,确保机组运行安全。

3.2 高加抽汽调节参与机组快速变负荷试验

由于 AGC 负荷指令变化频繁,可短至 5 ~ 10 min 一次,且负荷指令是双向变化的,所以需要使高加抽汽具有双向连续调节能力。应用抽汽灵活调节辅助 AGC 快速变负荷时,需将抽汽电动阀门改造为调节阀,且根据不同调节方案(顺序开关或并列开关)在抽汽调节投入前预置合适的阀门开度。

根据试验结果,考虑到机组运行安全且抽汽调节具有较宽的负荷调节范围,将仿真机中的 1,2 号高加抽汽电动门修改为调节阀,并增加对应的控制

逻辑,在负荷实际值与设定值产生偏差时,对 1,2 号抽汽调门加以调节,进行 AGC 快速变负荷试验。

机组协调方式稳定在 540 MW 负荷时,选择 1,2 号高加抽汽并列调节方式,先将抽汽调阀平稳预关至 15%。待工况稳定后,投入抽汽调节,模拟 AGC 负荷指令以每 5 min 变化一次,机组以 12 MW/min 的变负荷率完成快速变负荷的过程。观察机组负荷、主汽压力、过热汽温、抽汽阀开度等参数的变化,并与未投入灵活抽汽调节的负荷控制效果进行对比,结果如图 5 所示。

由图 5 可知,投入高加抽汽灵活调节后,在频繁连续变负荷过程中,机组负荷响应时间、调节精度、负荷变化率等性能较未投入前有明显改善,主汽压和主汽温波动与原控制相比也未明显增大。由于协调方式下高加抽汽调节仅用于弥补原协调控制不及时带来的负荷偏差,因此抽汽调节阀并没有频繁地全开全关,而是像主汽调门一样较为平稳地变化,没有出现危害高加运行安全的极端冲击情况。

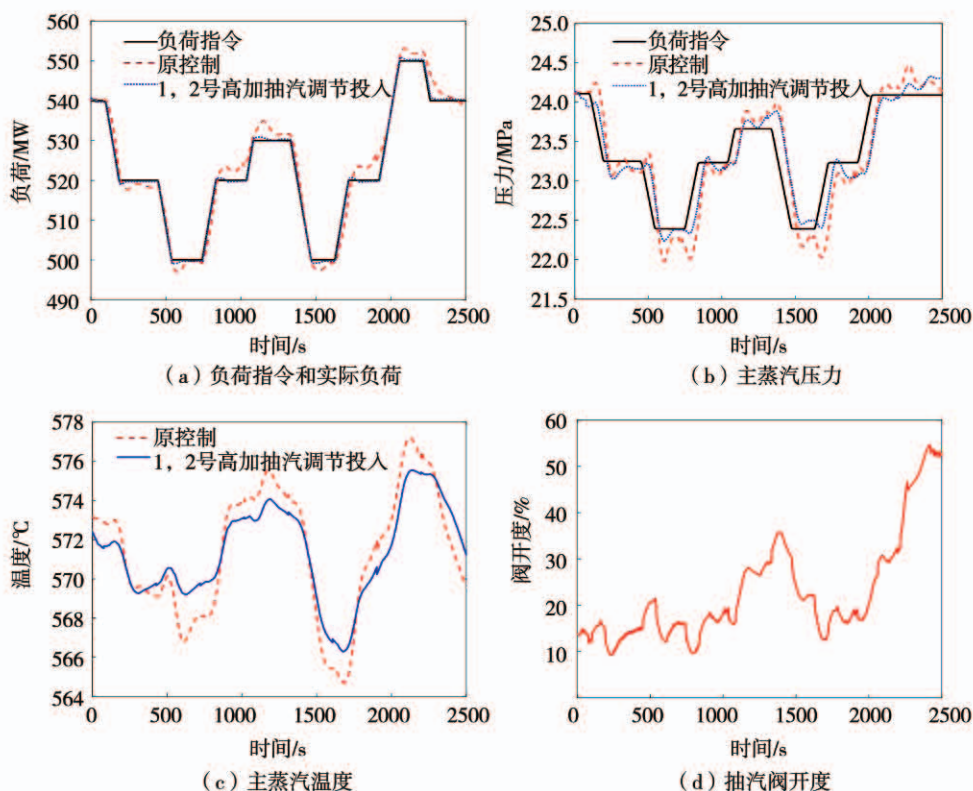


图5 AGC快速连续变负荷仿真实验结果

Fig.5 Simulation results under frequent continuous AGC load-changing process

4 结 论

以600 MW超临界机组为研究对象,利用经过现场考核验证的火电机组全仿真机,开展了不同方式切除高加抽汽及抽汽调节参与机组快速变负荷的仿真试验研究。

(1) 基本方式下单独切除1台高加抽汽时,切除1号高加抽汽对负荷、主汽压力、给水温度、中间点温度影响最大,切除3号高加抽汽的影响最小。

(2) 基本方式下同时切除1,2号高加抽汽比同时切除2,3号高加抽汽在初始阶段对负荷的影响大一些,对给水温度、中间点温度、主汽压的影响也比后者大。

(3) 若同时完全切除3台高加抽汽,相当于将其全部解列,对机组负荷影响最大,给水温度降低约100℃。若调节不合理可能导致中间点转湿态,过热汽温异常,对锅炉机组安全影响最大,应慎重使用。

(4) 在采用不同方式切除高加抽汽时,应考虑

中间点温度限制,防止中间点转湿态。若2号或3号高加抽汽切除,由于本级加热器压力下降,正常疏水受影响,应注意危急疏水调节正常,确保各级高加水位不超限。

(5) 初步快速变负荷仿真试验表明,高加抽汽参与调节可有效改善AGC作用下机组负荷响应时间、调节精度及负荷变化率等性能指标,提高机组对AGC快速变负荷的适应能力。

参考文献:

- [1] 王立军,李晓敏.“两个细则”条件下的超临界机组AGC协调控制优化[J].现代电力,2011,28(2):84-89.
WANG Li-jun, LI Xiao-min. The optimization of coordinated control system under AGC Mode for supercritical generation unit based on Two Documents[J]. Modern Electric Power, 2011, 28(2): 84-89.
- [2] 王 玮,刘慧超,杨 巍,等.基于背压连续调节的火电机组变负荷控制[J].热力发电,2017,46(5):56-62.
WANG Wei, LIU Hui-chao, YANG Wei, et al. Load-change control for thermal power units based on continuous regulation of back pressure[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(5): 56-62.

- [3] 邓拓宇,田 亮,刘吉臻. 利用热网储能提高供热机组调频调峰能力的控制方法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14): 3626–3633.
- DENG Tuo-yu, TIAN Liang, LIU Ji-zhen. A control method of heat supply units for improving frequency control and peak load regulation ability with thermal storage in heat supply net[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(14): 3626–3633.
- [4] 刘吉臻,王耀函,曾德良,等. 基于凝结水节流的火电机组 AGC 控制优化方法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(23): 6918–6925.
- LIU Ji-zhen, WANG Yao-han, ZENG De-liang, et al. An AGC control method of thermal unit based on condensate throttling[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(23): 6918–6925.
- [5] 杨 巍,龙东腾,牛玉广. 基于凝结水节流串级控制的新型协调控制[J]. 热力发电,2017,46(4):125–131.
- YANG Wei, LONG Dong-teng, NIU Yu-guang. A novel coordinated control strategy based on condensate throttling cascade control[J]. Thermal Power Generation,2017,46(4):125–131.
- [6] 马良玉,成 蕾,彭 钢,等. 基于神经网络预测模型和凝结水节流的超超临界机组协调系统智能优化控制[J]. 动力工程学报,2017,37(8):640–648.
- MA Liang-yu, CHENG Lei, PENG Gang, et al. Intelligent control optimization for the coordinated system of an ultra-supercritical power unit based on neural network prediction models and condensate throttling[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering,2017,37(8): 640–648.
- [7] 马良玉,宁福军,宋胜男. 凝结水节流对机组负荷影响的仿真研究[J]. 热力发电,2015,44(3):109–114.
- MA Liang-yu, NING Fu-jun, SONG Sheng-nan. Influence of condensate throttling on unit load: simulation test[J]. Thermal Power Generation,2015,44(3):109–114.
- [8] ZHOU Yun-long, WANG Di. An improved coordinated control technology for coal-fired boiler-turbine plant based on flexible steam extraction system[J]. Applied Thermal Engineering,2017(125):1047–1060.
- [9] ZHAO Yong-liang, WANG Chao-yang, LIU Ming, 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.
- [10] 赵永亮,张 利,刘 明,等. 660 MW 燃煤机组热力系统构型调整对一次调频性能的影响研究[J]. 中国电机工程学报,2019,39(12):3587–3598.
- ZHAO Yong-liang, ZHANG Li, LIU Ming, et al. Effects of regulating thermal system configuration for 660 MW coal-fired power units on the performance of primary frequency control[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(12):3587–3598.

(刘 颖 编辑)