DOI: 10.19666/j.rlfd.202605105

基于 EBSILON 的火电机组回热系统负荷响应能力的静态分析

裴丹[1]，刘韬[1]，吕泰萍[1]，李通[1]，杨明[1]，毕明德[2]
(1. 国网辽宁省电力有限公司，辽宁 沈阳 110006；
2. 国网江苏省电力有限公司，江苏 南京 210024)

［摘 要］【目的】为了挖掘汽机侧热力系统自身的蓄能潜力，开发高效的辅助调频技术，分析某亚临界 300 MW火电机组不同回热加热器抽汽调整方式下负荷响应能力的静态特性。【方法】基于 EBSILON 平台搭建了机组静态仿真模型，并验证模型精确性。在 75%THA、50%THA、40%THA 以及 30%THA 共 4 个工况下，通过调整回热加热器抽汽，对比分析了中低负荷段各种调整方案的变负荷能力及静态特性。【结果】单台高压加热器（高加）抽汽节流时，1 号高加的负荷响应能力最强，在 75%THA、50%THA、40%THA 以及 30%THA 工况下的最大变负荷量依次为 7.27、4.61、3.47、2.42 MW，同时这一调整方式对给水温度和热耗率的影响最明显；多台高加组合抽汽节流时，组合一（1+2 号高加）对负荷和给水温度的影响均大于组合二（2+3 号高加）和组合三（1+3 号高加），在 75%THA 工况下 3 种组合方式分别使机组功率提升 17、8、1.8 MW，最终给水温度对应下降约 61.7、27、9.8 ℃。通过给水大旁路同步调整 3 台高加，旁路流量越大，机组功率与给水温度的变化幅度越大，在 75%THA 工况下负荷变化率约为 0.038 MW/(t·h^{-1})。对低压加热器（低加）抽汽进行节流时，单独切除某台低加抽汽的负荷响应能力很差，受热力系统耦合的反作用，机组功率不升反降；改用凝结水节流同时调整 4 台低加抽汽后，负荷响应能力增强，在 75%THA 工况下机组负荷变化率为 0.021 MW/(t·h^{-1})。【结论】回热系统高加侧负荷响应能力远优于低加侧，且呈现梯级差异；负荷响应能力越强，给水温度的牺牲和控制难度越大；低加侧单台节流存在反效果，只有整体调节才有意义。

［关 键 词］火电机组；中低负荷；负荷响应；给水温度

［引用本文格式］（本段作者勿动）作者姓名. 中文标题[J]. 热力发电, 年, 卷(期): 起始页码-终止页码. 作者姓名. 英文标题[J]. Thermal Power Generation, 年, 卷(期): 起始页码-终止页码.

Static analysis of load response capability of regenerative system of a thermal power unit based on EBSILON

Pei Dan[1], Liu Tao[1], Lü Taiping[1], Li Tong[1], Yang Ming[1], Bi Mingde[2]
(1. State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110006, China;
2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China)

Abstract: [Objective] In order to tap the energy storage potential of the turbine-side thermal system and develop efficient auxiliary frequency modulation technology, the static characteristics of load response capability of a subcritical 300 MW thermal power unit under different regenerative heater extraction adjustment modes are analyzed. [Methods] The static simulation model of the unit was built based on the EBSILON platform, and the accuracy of the model was verified. Under the four working conditions of 75%THA, 50%THA, 40%THA and 30%THA, the variable load capacity and static characteristics of various adjustment schemes in the middle and low

收 稿 日 期：2026-05-28 修 回 日 期：2026-06-16 接 受 日 期：2026-06-22 网络首发日期：XXXX-XX-XX
基 金 项 目：国家电网有限公司总部科技项目“火电机组深调状态下涉网性能提升”(522201250016-250-YYGG)
Supported by: Science and Technology Project of State Grid Co., Ltd.: Network Performance Improvement for Thermal Power Units under the Condition of Deep Peak Shaving (522201250016-250-YYGG)
第一作者简介：裴丹（1980），男，硕士，高级工程师，主要研究方向为火电机组运行优化和性能试验分析，peidansy@sina.com。
通信作者简介：刘韬（1997），男，硕士，助理工程师，主要研究方向为火电机组热力性能试验和能耗分析，2323863818@qq.com。

load sections are compared and analyzed by adjusting the extraction steam of the regenerative heater. [Results] When a single high-pressure heater is pumped and throttled, the load response ability of No.1 high-pressure heater is the strongest. The maximum variable load under 75%THA, 50%THA, 40%THA and 30%THA conditions is 7.27 MW, 4.61 MW, 3.47 MW and 2.42 MW, respectively. In addition, this adjustment method has the most obvious influence on feed water temperature and heat consumption rate. When multiple high-pressure heaters are combined for extraction throttling, the influence of combination one on load and feed water temperature is greater than that of combination two and combination three. Under 75%THA condition, the three combinations increase the unit power by 17 MW, 8 MW and 1.8 MW respectively, and the final feed water temperature decreases by about 61.7 °C, 27 °C and 9.8 °C respectively. Through the synchronous adjustment of three high pressure heaters through the large bypass of the feed water, the greater the bypass flow, the greater the variation of the unit power and the feed water temperature, and load change rate is about 0.038 MW/(t·h^{-1}) under the 75%THA condition. When throttling the low-pressure heater extraction steam, the load response ability of cutting off a low-pressure heater extraction steam alone is very poor. Due to the reaction of the coupling of the thermal system, the unit power does not rise but falls. After switching to condensate throttling and adjusting the extraction steam of four low-pressure heaters at the same time, the load response ability is enhanced, and load change rate of the unit is 0.021 MW/(t·h^{-1}) under 75%THA condition. [Conclusion] The load response capacity of the high heating side of the regenerative system is much larger than that of the low heating side, and there is a step difference. The stronger the load response ability is, the higher the sacrifice and control difficulty of feed water temperature are. There is a reverse effect of single throttling on the low pressure side, and only the overall adjustment is meaningful.

Key words: thermal power unit; medium and low load; load response; feedwater temperature

能源结构的转型正以前所未有的速度在全球展开，以风能、太阳能为代表的可再生能源发电占比持续攀升[1]。然而，可再生能源固有的间歇性与波动性给电力系统的实时功率平衡与频率稳定带来了严峻挑战[2]。在此背景下，作为传统电力供应主体的燃煤火电机组，其角色正从基荷电源转向调节电源，需要承担起深度调峰与快速调频的关键任务[3]。

一次调频要求机组在电网频率发生微小偏差时，能在数秒至数十秒内快速改变出力，以抑制频率波动。传统的调频手段主要依靠汽轮机主汽调节阀[4]的节流作用，然而该方法不仅会降低机组循环效率和运行经济性，而且对目前广泛采用的超超临界直流炉机组而言，其锅炉蓄热能力本就偏小，主汽调节阀的快速负荷响应潜力受到了进一步限制[5]。因此，挖掘汽轮机侧热力系统自身的蓄能潜力，开发新型、高效的辅助调频技术，已成为提升火电机组运行灵活性[6]的研究热点。

回热抽汽系统潜在的能量储备使研究者们提出了多种技术方案，诸如凝结水节流[7]、高加抽汽节流[8]和高加给水旁路[9]等。现有研究已初步验证这些方案的可行性：史燕红等[10]对深度调峰工况下高加抽汽节流的变负荷能力进行了静态分析，指出高加给水旁路来减少高加抽汽可有效提升调频能力；马良玉等[11]通过仿真试验表明，高加抽汽调节能有效改善机组负荷响应速率；伦涛等[12][12]与赵永亮等[13]则从经济性和动态性能角度对比了多种灵活性调节方案。并且由于新能源发电、水电与核电占比持续上升，火电机组多数机组长期无法在额定负荷下运行，因此研究中低负荷段下机组回热系统的响应特性更具现实意义[14]。综上所述研究大多针对单一调节方式或额定工况的性能研究，对中低负荷区间不同回热抽汽调节方式在负荷响应能力、经济性和给水温度变化等静态特性方面，还缺乏充分的对比与量化分析。因此，本文以某 300 MW 亚临界机组为研究对象，利用 EBSILON 软件搭建 30%~75%THA 工况下的火电机组静态仿真模型，在验证模型准确性后，通过调整各回热加热器抽汽的多种方式进行功率调节，分析中低负荷段不同方式的负荷响应能力及相应静态特性，为火电机组灵活性运行提供参考。

1 研究对象及建模

1.1 机组概况

以某 300 MW 亚临界机组为研究对象，其锅炉为 HG-1035/17.5-HM35 型一次中间再热燃煤汽包炉，汽轮机为 CC250/N300-16.7/537/537 型一次中间再热、反动式、单轴双排汽、双抽可调整凝汽式汽轮机。该机组有 1 个高压缸、1 个中压缸和 2 个低压缸，回热系统为“三高四低一除氧”的配置，加热器为逐级自流的疏水方式，汽轮机的排汽压力为 4.9 kPa。

1.2 火电机组 EBSILON 建模

采用 EBSILON 软件对案例机组进行建模，如

图 1 所示，数据基础为该电厂的设计热平衡图，模型基准工况为 THA 工况。

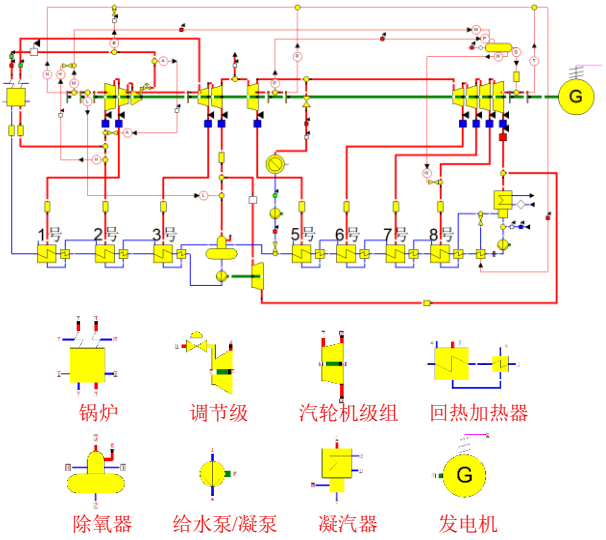


图 1 某 300 MW 亚临界机组热力系统静态模型

Fig.1 The static model of thermodynamic system of a 300 MW subcritical unit is established.

为了对部分负荷工况展开热力学分析，在基准工况模型的基础上，依据汽轮机变工况特性，采用弗留格尔公式进行迭代计算：

$$\frac{D'}{D}=\sqrt{\frac{(1-\varepsilon_*)\left(p_1'^2-p_2'^2\right)-\varepsilon_*\left(p_1'-p_2'\right)^2}{(1-\varepsilon_*)\left(p_1^2-p_2^2\right)-\varepsilon_*\left(p_1-p_2\right)^2}}\sqrt{\frac{T_1}{T_1'}} \tag{1}$$

式中：D 为通过机组的蒸汽通流流量，t/h；p 为级组前后的蒸汽压力，MPa；T 为级组前的蒸汽温度，K；ε_* 为临界压比；′ 为上标，无上标“'”表示基准工况，有上标“'”表示为变工况；下标“1”表示级组前，下标“2”表示级组后。

回热加热器等换热部件的热平衡计算：

$$G\left(h_0-h_1\right)=G_w\left(h_{w1}-h_{w0}\right) \tag{2}$$

式中：h_0 为换热器进汽焓值；h_1 为换热器疏水焓值，kJ/kg；h_{w0}、h_{w1} 为流经换热器入口和出口水焓值，kJ/kg；G、G_w 分别表示蒸汽和给水流量，kg/s。

表 1 各工况下的模拟结果误差

Tab.1 The simulation results error under various working conditions

工况	功率	热耗率	主汽流量	主汽压力	主汽温度	再热蒸汽压力	再热蒸汽温度	给水温度
THA	0.03	0.04	0	0	0	0	0	0
75%THA	0	0.02	0	0	0	0	0	0
50%THA	0	0.01	0	0	0	0	0	0.02
40%THA	0	0.00	0	0	0	0	0	0.01
30%THA	0	0.01	0	0	0	0	0	-0.01

将模型基准工况及部分负荷模拟工况的结果参数与各设计工况参数进行对比验证，如表 1 所示，各工况模拟结果的最大相对误差不超过 0.4%，该模型具有较高的精度，符合后续对比分析要求。

1.3 边界条件设定

1）机组在 30%THA~75%THA 负荷区间滑压运行，考虑到汽包锅炉有较强的蓄热能力以及锅炉燃料量的跟随变化，回热系统抽汽节流过程中，认为进入汽轮机的主蒸汽参数和流量基本维持不变。

2）回热加热器抽汽量的调节存在两种基本途径：一种是在抽汽管道上增加调阀，直接对单台加热器的进汽流量进行调节；另一种是通过凝结水节流或给水旁路，实现多台加热器抽汽的同步节流。

3）搭建模型时假设 3 号高加入口给水流量和温度保持不变，循环冷却水入口温度和流量也保持恒定。

4）各段抽汽管路均存在通流上限，一段至四段抽汽管道的最大允许进汽量依次为 84.5、99、38、54.5 t/h。

5）回热加热器的抽汽节流必然会导致给水温度的变化，该温度变化值表征了锅炉为维持蒸汽参数所需补偿的附加热量。因此在满足相同变负荷需求的条件下，给水温度的变动幅度越小，对机组整体热经济性的负面影响越小。

2 结果及分析

2.1 单台高压加热器抽汽节流

当单台高压加热器抽汽节流比例为 100%时，其变负荷能力达到理论上限，并且随着机组负荷的升高，其变负荷能力是逐渐增强的。如图 2 所示，在 75%THA、50%THA、40%THA 以及 30%THA 工况下，1 号高压加热器的最大变负荷量依次为 7.27、4.61、3.47、2.42 MW，75%THA 工况下的功率增量约是 30%THA 工况下的 3 倍。但要注意，此时抽汽门全关在运行上等同于单台高压加热器解列，可能会造成机组轴向推力异常以及高压加热器隔板变形和泄漏风险。相比之下，2 号和 3 号高压加热器的变负荷能力较弱，即便抽汽完全切断，各自最大变负荷量不足 1.2 MW。

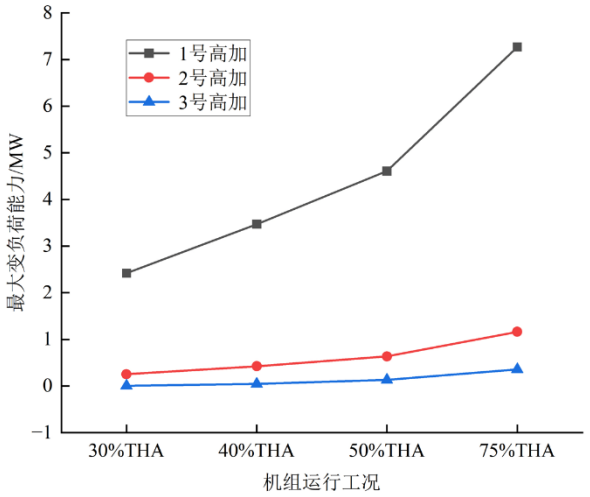


图 2 不同工况下单台高加抽汽节流的最大变负荷能力

Fig.2 The maximum variable load capacity of single high-pressure heater extraction throttling under different working conditions

以 75%THA 工况下对单台高压加热器抽汽节流为例，可以直观地看到各台高加抽汽节流对机组参数的影响。从图 3 和图 4 可以看出，单台高压加热器抽汽节流程度越大，对机组功率和给水温度的影响越深：当 1 号高压加热器抽汽量减至零后，机组功率大约增加 7.3 MW，给水温度下降约 24℃；2 号高压加热器抽汽量为零时，机组功率增加了约 1.2 MW，给水温度下降约 17℃；3 号高压加热器抽汽完全节流时，机组功率仅增加了 0.4 MW，给水温度也只下降了 1 ℃左右。

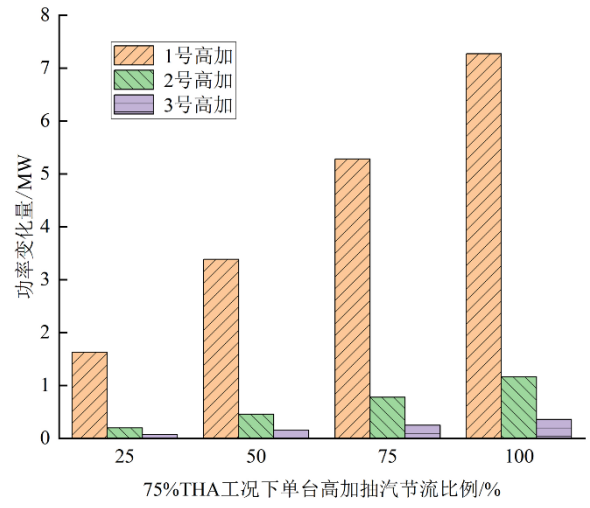


图 3 单台高加抽汽节流对机组功率的影响

Fig.3 The influence of single high-pressure heater extraction throttling on unit power

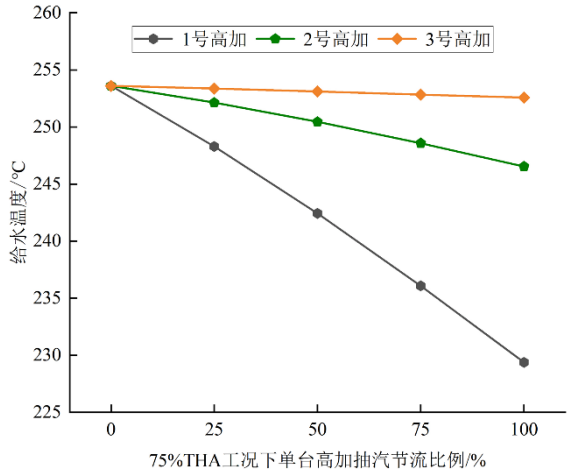


图 4 单台高加抽汽节流对给水温度的影响

Fig.4 The influence of extraction steam throttling of single high pressure heater on feed water temperature

这是因为各级高加抽汽的品位和热力参数不同，1 号高加为末级高压加热器，其抽汽的压力和温度最高，单位质量流量的抽汽节流带来的瞬时功率增量最大，但由此造成的给水温度降幅也最明显，对锅炉侧的扰动最剧烈。而 2 号和 3 号高压加热器的抽汽品位逐级降低，单独节流时会使其下一级加热器的入口水温显著降低，该级换热温差的增加导致下一级抽汽流量上升，进入汽轮机做功的蒸汽增量十分有限，因此单独对 2 号或 3 号高压加热器抽汽节流时，变负荷能力远弱于 1 号高压加热器，对给水温度的整体影响也相对较小。

表 2 汇总了单独切除一台高加时各级高加抽汽流量的变化。从表中可以看出，单独切除 1 号高加时，其余两台高加的抽汽流量都有小幅度的增加，这是因为在切除了 1 号高加后，给水温度的骤降不仅会给机组带来扰动危险，还会增加机组热耗，其余高压加热器为了抑制给水温度的降低会增加抽汽量。当单独切除 2 号高加时，给水由于缺少这一级的加热使得 1 号高加入口水温明显偏低，为了补偿这部分温降，1 号高加抽汽流量从正常运行时的 39.03 t/h 上升到 76.04 t/h。类似地，单独切除 3 号高加抽汽时，2 号高加抽汽流量增加了 16.63 t/h，1 号高加抽汽流量也小幅增加了 2.16 t/h，共同缓解给水温度的下跌。

表 2 切除单台高加的流量变化

Tab.2 The flow change of single high-pressure heater is cut off

参数	正常运行	单独切除 1 号高加	单独切除 2 号高加	单独切除 3 号高加

1 号高加抽汽量 /(t • h^{-1})	39.03	0	76.04	41.19
2 号高加抽汽量 /(t·h^{-1})	49.51	54.08	0	66.14
3 号高加抽汽量 /(t·h^{-1})	17.58	19.11	18.11	0
高加疏水流量 /(t·h^{-1})	106.12	73.19	94.15	107.34
汽轮机热耗 /(kJ·(kW·h)$^{-1}$)	7 932.69	7 997.18	7 986.91	7 933.70

另外，从表 2 还可以看出，采用高加抽汽节流进行负荷响应会牺牲机组的热经济性，分别单独切除三台高加抽汽后，汽轮机热耗最高上升了 64.41 kJ/kWh。不过这类负荷响应过程持续时间很短，对机组长期平均热经济性的影响不大。

2.2 多台高加组合抽汽节流

在 75%THA 工况下，保持 1 台高压加热器正常运行，对另外 2 台高压加热器进行组合式抽汽节流，分别命名为组合一（1 号+2 号高加同时节流）、组合二（1 号+3 号高加同时节流）和组合三（2 号+3 号高加同时节流）。抽汽管道的调阀开度越小，代表抽汽节流程度越大，观察不同节流程度下机组负荷和给水温度的变化量，结果如图 5—图 10 所示。

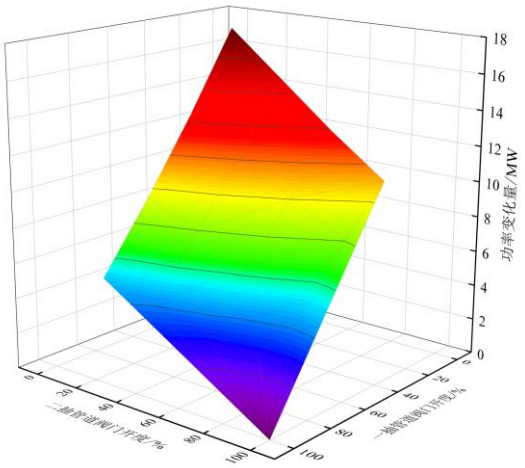


图 5 组合一抽汽节流对机组功率的影响
Fig.5 The influence of combined first extraction steam throttling on unit power

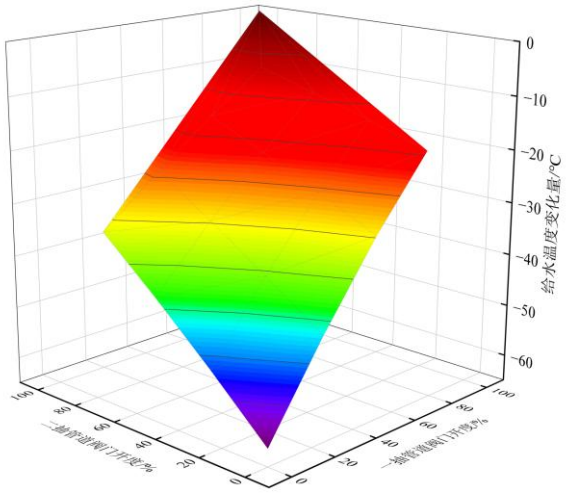


图 6 组合一抽汽节流对给水温度的影响
Fig.6 The influence of combined first extraction steam throttling on feed water temperature

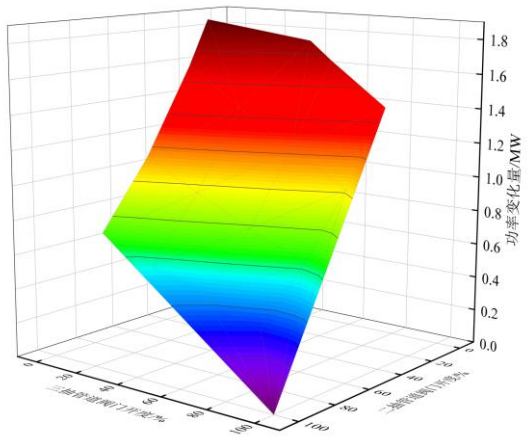


图 7 组合二抽汽节流对机组功率的影响
Fig.7 The influence of combined second extraction steam throttling on unit power

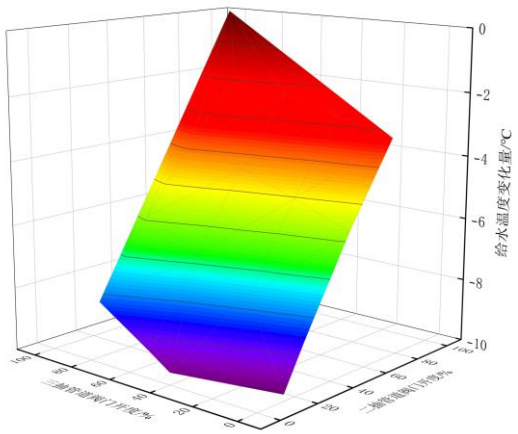


图 8 组合二抽汽节流对给水温度的影响
Fig.8 The influence of combined second extraction steam throttling on feed water temperature

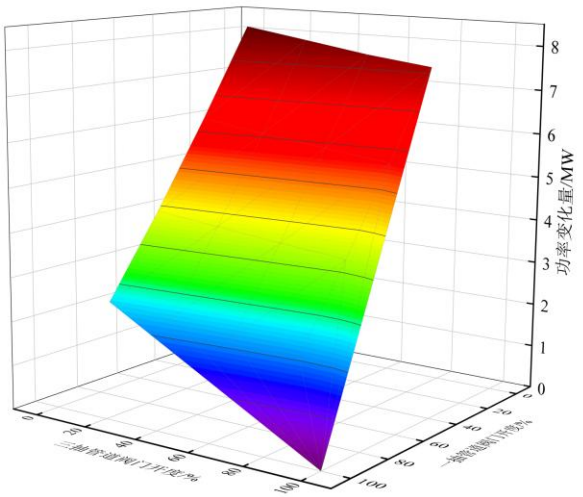


图 9 组合三抽汽节流对机组功率的影响
Fig.9 The influence of combined third extraction steam throttling on unit power

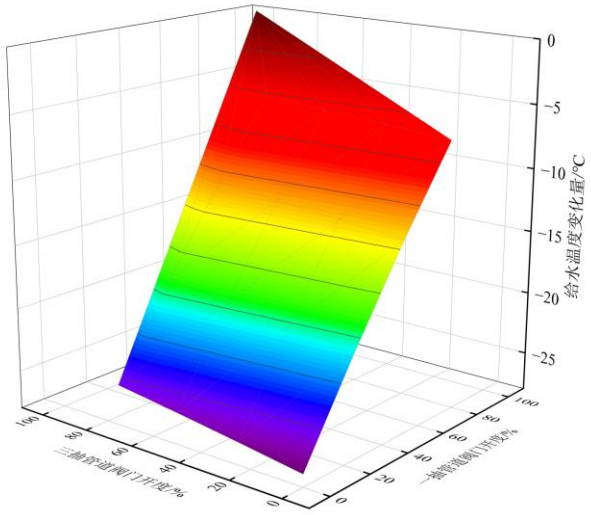


图 10 组合三抽汽节流对给水温度的影响
Fig.10 The influence of combined third extraction steam throttling on feed water temperature

从图 5—图 10 可以看出，组合一的变负荷能力最显著，当 2 台高加完全切断时达到其最大负荷量，可增加约 17 MW；组合二的的最大变负荷量为 8 MW；组合三效果极其有限，最大负荷变化量还不到 2 MW。造成这种差异的根本原因是抽汽流量的调整使回热系统内压力和流量重新分配，组合一节流的是品位最高的两级抽汽，将这部分高品质蒸汽更多释放到汽轮机本体做功，对功率有显著的正向增益。而组合二中，为了维持给水温度，二抽抽汽量会增加，另外三抽的蒸汽品质低于二抽蒸汽，二抽流量被迫增加，导致该组合的最大负荷变化量仅为组合一的一半左右。至于组合三中二抽和三抽蒸汽流量的减少引起一抽蒸汽量大幅提升，很大程度上抵消了节流所释放的做功能力，所以负荷响应十分微弱。

另外，变负荷能力越强的组合，给水温度的牺牲也就越大。在组合一方式下最终给水温度下降约 61.7 ℃，组合二方式下降约 27 ℃，而组合三方式只下降约 9.8 ℃。

为了挖掘高加抽汽节流的极限变负荷潜力，在 75%THA 工况下采用给水大旁路的方式调整高加抽汽流量。该方法在 3 台高加的公共旁路上增设调节阀，通过改变阀门开度调整旁路流量，进而同步控制三台高加的抽汽量，实现机组的负荷响应。

如表 3 所示，给水旁路流量从 0 增至 300 t/h 时，机组负荷提升约 11.7 MW，给水温度降低约 35 ℃，即调整给水旁路流量对应的负荷变化率为 0.038 MW/(t·h^{-1})。继续增大旁路流量，功率还会继续上升，但给水温度也会随之走低，理论上当达到 3 台高加全切的极限状态时，机组负荷上升约 35.8 MW，给水温度降低约 79 ℃。当温度远低于设计值的给水进入汽包，可能造成汽包壁局部热应力增大、中间点转湿态等风险，主汽温会有强烈的下降趋势，它的调节空间受限于锅炉能承受的热冲击极限。

表 3 75%THA 工况下给水旁路流量的影响结果
Tab.3 The influence of feedwater bypass flow under 75 % THA condition is analyzed

给水旁路流量/(t·h-1)	功率/MW	给水温度/℃
0	225.012	253.6
50	226.91	248.07
100	228.831	242.42
150	230.774	236.65
200	232.736	230.76
250	234.717	224.78
300	236.713	218.69

2.3 三种高加抽汽节流方式的对比

表 4 对比了 75%THA 工况下，通过 3 种高加抽汽的调整方式来达到相同功率增量 7 MW 的部分参数变化。方式一：单独节流 1 号高加抽汽；方式二：1 号+2 号高加抽汽组合节流（且节流程度保持一致）；方式三：高加给水大旁路。从给水温度下降程度来看，方式一最小，方式三最大，但总体而言，3 种方式在提供约 7 MW 负荷响应时，给水温度和热耗率的差距很小。从调整程度和功率提升而言，方式一实现最简单，但功率提升空间有限，适

合小幅度的变负荷需求；方式二涉及多级抽汽协调调节，控制程度最为复杂，但功率跃升幅度远超单级调节；方式三仅需控制旁路阀的开度，在控制系统上相对简单，同时具备较大的功率提升能力。

表 4 3 种高加抽汽节流方式的对比结果
Tab.4 The comparison results of three kinds of high pressure steam extraction throttling methods

参数名称（单位）	正常运行	方式一	方式二	方式三
汽轮机功率（MW）	225.012	232.274	232.226	232.388
给水温度（℃）	253.60	229.38	227.52	226.357
1 号高加抽汽量（t/h）	39.03	0	28.16	32.06
2 号高加抽汽量（t/h）	49.51	54.08	21.79	27.33
3 号高加抽汽量（t/h）	17.59	19.11	19.17	9.281
汽轮机热耗（kJ/kWh）	7932.69	7997.18	8024.10	8030.53

2.4 与低压加热器抽汽节流方式的对比

从图 11 可以看出，在各个工况下单独对某台低加抽汽进行节流时，汽轮机功率不仅没有上升，反而出现了 0~1.2 MW 的下降。这部分被截留的蒸汽虽然重新回到汽轮机中做功，但受热力系统耦合的反作用，高加和除氧器的抽汽量会有所增加，反而削弱了汽缸本体的蒸汽做功能力，甚至导致机组功率低于初始值。

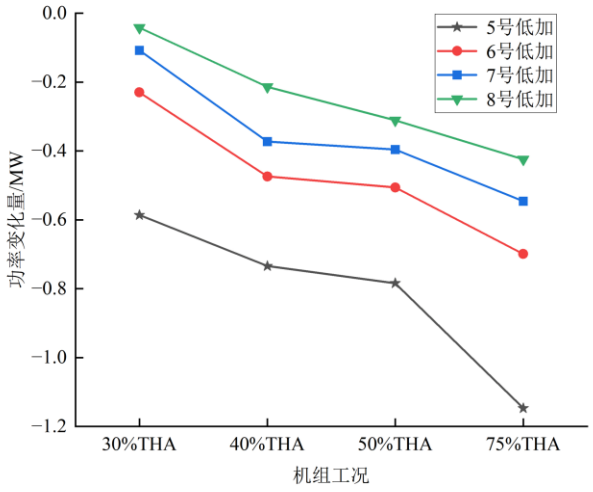


图 11 单台低加抽汽节流对机组功率的影响
Fig.11 The influence of single low-pressure heater extraction throttling on unit power

由于单台低压加热器抽汽节流的负荷响应能力有限，因此考虑通过凝结水节流的方式同步调整四台低压加热器抽汽量来改变机组功率。但凝结水流量的变化幅度同样受到除氧器和凝汽器容量、凝结水泵出力和小汽轮机安全运行等多项因素的制约[15]。以本台 300 MW 亚临界机组为例，当凝结水流量降至 206 t/h 以下时，凝结水泵再循环将开启，以此为边界条件在 75%THA 工况下进行模拟计算。结果如表所示，机组凝结水流量从正常运行的 514.579 t/h 减小到 217.307 t/h，功率从 225.012 MW 上升到 231.21 MW，对应的负荷变化率约为 0.021MW/(t·h^{-1})。相对比于单台低加抽汽节流，这一方式的功率调节能力明显增强，但仍低于给水旁路方式的变负荷水平。

表 5 75%THA 工况下凝结水节流的影响结果
Tab.5 The influence of condensate throttling under 75 % THA condition is analyzed.

凝结水流量/(t·h^{-1})	给水流量/(t·h^{-1})	功率/MW
514.579	645.050	225.012
465.141	645.050	226.004
415.559	645.050	227.011
366.103	645.050	228.059
316.357	645.050	229.063
266.925	645.050	230.148
217.307	645.050	231.210

3 结论

通过对某亚临界 300 MW 火电机组中低负荷段回热加热器不同调整方式的负荷响应能力进行静态分析，得出结论：

1）单台高压加热器抽汽节流时，1 号高加的负荷响应能力最强，在 75%THA、50%THA、40%THA 以及 30%THA 工况下的最大变负荷量依次为 7.27、4.61、3.47、2.42MW，2 号和 3 号高压加热器由于回热系统各级抽汽间的耦合作用，负荷响应能力较弱。该方式会短暂牺牲机组的热经济性，对给水温度和热耗率的影响明显，但对机组长期平均热经济性的影响不大。

2）多台高加组合抽汽节流时，组合一（1+2 号高加）对负荷和给水温度的影响最显著，在 75%THA 工况下 3 种组合方式分别使机组功率最高提升 17、8、1.8 MW，最终给水温度对应下降约 61.7、27、9.8 ℃。采用给水大旁路方式时，旁路流量越大，机组功率与给水温度的变化幅度越大，在 75%THA 工况下，负荷变化率约为 0.038 MW/(t·h^{-1})。

3）对比分析 3 种高加抽汽节流方式，单级调节经济性最优，实现最简单，但功率提升空间有限；多级协调调节控制复杂，但功率跃升幅度远超单级调节；给水旁路调节控制相对简单，且具备较大的功率提升能力。负荷响应能力的提升，会以更大的给水温度牺牲和更高的控制难度为代价。

4）对低加抽汽进行节流时，单独切除某台低加抽汽的负荷响应能力很差，受热力系统耦合的反作

用，机组功率不升反降；采用凝结水节流同时调整四台低加抽汽后，负荷响应能力增强，在 75%THA 工况下机组负荷变化率为 0.021 MW/(t·h^{-1})，但仍明显低于给水大旁路的负荷响应能力。

[参 考 文 献]

[1] 龙潇, 张晋宾, 陈令特. 未来能源技术展望[J]. 发电技术, 2025, 46(4): 651-693.
Long X, Zhang J B, Chen L T. Prospect of future energy technology[J]. Power generation technology, 2025, 46(4): 651-693.

[2] 骆国铭, 黄小耘, 范心明. 考虑可再生能源特性的实时电力调度优化研究[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(3): 163-173.
Luo G M, Huang X Y, Fan X M. Research on real-time power dispatching optimization considering renewable energy characteristics[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(3): 163-173.

[3] 刘志强, 李建锋, 潘荔, 等. 中国煤电机组改造升级效果分析与展望[J]. 中国电力, 2024, 57(7): 1-11.
Liu Z Q, Li J F, Pan L, et al. Analysis and Prospect of Transformation and Upgrading Effect of Coal-fired Power Units in China[J]. China Electric Power, 2024, 57(7): 1-11.

[4] Wang D, Zhou Y, Zhou H. A mathematical model suitable for simulation of fast cut back of coal-fired boiler-turbine plant[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 108546-554.

[5] 黄卫剑, 张曦, 陈世和, 等. 提高火电机组一次调频响应速度[J]. 中国电力, 2011, 44(1): 73-77.
Huang W J, Zhang X, Chen S H, etc. Improve the response speed of primary frequency regulation of thermal power units [J]. China Electric Power, 2011, 44(1): 73-77.

[6] Vithayasrichareon P, Riesz J, MacGill I. Operational flexibility of future generation portfolios with high renewables[J]. Applied Energy, 2017, 20632-41.

[7] 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+7082.
Liu J Z, Wang Y H, Zeng D L, et al. AGC control optimization method of thermal power unit based on condensate throttling [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2017, 37(23): 6918-6925+7082.

[8] 祝建飞, 沈丛奇, 姚峻, 等. 汽轮机组经济运行方式下新型一次调频技术[J]. 中国电力, 2017, 50(5): 144-150.
Zhu J F, Shen C Q, Yao J, etc. New primary frequency modulation technology under economic operation mode of steam turbine unit [J]. China Electric Power, 2017, 50(5): 144-150.

[9] 陈波, 周慎学, 丁宁, 等. 超(超)临界机组高加给水旁路调节方式的一次调频控制技术研究与试验[J]. 中国电力, 2017, 50(8):32-36.
Chen B, Zhou S X, Ding N, etc. Research and Test on Primary Frequency Regulation Control Technology of High-pressure Heater Feedwater Bypass Regulation Mode for Ultra-supercritical Units [J]. China Electric Power, 2017, 50(8): 32-36.

[10] 史燕红, 梁昊, 聂雨, 等. 深度调峰超超临界机组高压加热器抽汽节流变负荷能力静态分析[J]. 热能动力工程, 2023, 38(1): 90-97.
Shi Y H, Liang H, Nie Y, et al. Static analysis of rheological load capacity of high pressure heater extraction section of deep peak-shaving ultra-supercritical unit [J]. Thermal power engineering, 2023, 38(1): 90-97.

[11] 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 L Y, Zhao J X, Ma J. Simulation test research on extraction steam removal and flexible adjustment of high pressure heater [J]. Thermal power engineering, 2021, 36(8): 114-120.

[12] 伦涛, 鄂志君, 张利, 等. 燃煤机组不同灵活性调节方案参与一次调频过程的经济性分析[J]. 中国电力, 2019, 52(8): 164-172.
Lun T, E Z J, Zhang L, et al. Economic analysis of different flexibility adjustment schemes of coal-fired units participating in primary frequency regulation process [J]. China Electric Power, 2019, 52(8): 164-172.

[13] 赵永亮, 张利, 刘明, 等. 660MW 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 Y L, Zhang L, Liu M, et al. Study on the influence of configuration adjustment of thermal system on primary frequency regulation performance of 660MW coal-fired unit [J]. Chinese Journal of Electrical Engineering, 2019, 39(12): 3587-3598.

[14] 邓山, 李健平, 吕海涛, 等. 火电机组低负荷下主要节能潜力探讨[J]. 中国电力, 2017, 50(3): 83-87.
Deng S, Li J P, Lyu H T, et al. Discussion on main energy saving potential of thermal power unit under low load [J]. China Electric Power, 2017, 50(3): 83-87.

[15] 胡尊民, 于国强, 殳建军, 等. 凝结水辅助调频控制难点分析[J]. 热能动力工程, 2020, 35(4): 293-299.
Hu Z M, Yu G Q, Shu J J, etc. China Electric Power [J]. Thermal power engineering, 2020, 35(4): 293-299.

（责任编辑 XXX）