

超临界再热型背压机运行控制及仿真

袁红蕾^{1,✉}, 刘新龙¹, 刘昕¹, 陈荣超²

(1. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 陕西 西安 710075; 2. 浙能集团甘电入浙筹建处, 甘肃 兰州 730030)

摘要: [目的]为满足我国工业飞速发展对热负荷的高参数、高品质的需求,充分利用超临界大容量机组效率高、背压式汽轮机发电机组的热能利用率高的优势,需要研制超临界再热型背压机并控制其运行。[方法]文章针对超临界背压机组,在对其热力系统形式和运行模式进行研究的基础上,提出了机组不同运行工况下的控制策略。建立了超临界再热型背压机汽轮机侧的仿真模型。[结果]通过对机组的关键控制策略进行仿真,验证了控制策略的正确性。[结论]为超临界再热型背压机技术的工程示范奠定技术基础,为现役抽凝机组的供热改造提供了借鉴。

关键词: 超临界; 再热; 背压机; 热力系统; 控制策略; 仿真

中图分类号: TM611; TK269

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)06-0078-11

开放科学(资源服务)二维码:



Operation Control and Simulation of Supercritical Reheat Back Pressure Turbine

YUAN Honglei^{1,✉}, LIU Xinlong¹, LIU Xin¹, CHEN Rongchao²

(1. Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, Shaanxi, China;
2. Preparation Office for the Entry of Gansu Electricity into Zhejiang, Zhejiang Provincial Energy Group Company Ltd., Lanzhou 730030, Gansu, China)

Abstract: [Introduction] In order to meet the needs of the rapid development of China's industry for high parameters and high-quality heat load, make full use of the advantages of the high efficiency of supercritical large-capacity units and the high thermal energy utilization rate of back pressure turbine generator units, it is necessary to develop and control the operation of supercritical reheat back pressure units. [Method] In this paper, on the basis of the research on the form and operation mode of the thermal system of the supercritical back pressure units, the control strategy under different operation conditions of the unit was proposed, and the simulation model of the turbine side of the supercritical reheat back pressure unit was established. [Result] The correctness of the control strategy is verified by the simulation of the key control strategy of the unit. [Conclusion] It lays a technical foundation for the engineering demonstration of supercritical reheat back pressure turbine technology and provides a reference for the heat supply transformation of the existing extraction-condensing units.

Key words: supercritical; reheat turbine; back pressure turbine; thermal system; control strategy; simulation

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

对于以燃煤发电为主体的我国电力行业,煤炭消费占能源消费总量的57%^[1],碳排放占据了全国碳排放总量的41%^[2]。热电联产可以同时满足社会生产生活的热电负荷需求,是燃煤发电发展的一个主要方向^[3-6]。作为热电联产项目的主要设备,背压式

汽轮机在我国发展较早,但是普遍参数较低,容量较小。发展大容量,高参数的超临界、再热型、两级调节工业抽汽背压机已成为必然趋势和选择^[7-8]。

20世纪60年代开始我国的各汽轮机制造厂就相继生产过3 MW及以上容量的各型背压机组,随着时间推移,背压机的参数和容量逐渐升高,2005年

收稿日期: 2022-12-09 修回日期: 2023-03-03

基金项目: 中国电力工程顾问集团有限公司科技项目“超(亚)临界参数再热型背压机应用研究”(GSKJ2-J03-2019)

2 超临界再热型背压机组控制策略运行模式

2.1 超临界再热型背压机组运行模式

2.1.1 超临界再热型背压机组启动模式

超临界再热型背压式汽轮机采用高中压缸联合启动方式。首先对汽轮机高压缸及阀壳预暖,完成后高压主汽调节阀和中压调节阀同时开启,高中压缸进汽;待中压排汽压力达到额定背压(0.15 MPa)后,中压排汽管阀门开启,中压缸旋转隔板全开,机组开始冲转;机组冲转到 3 000 转后,进行暖机,此时通过中压缸排汽管道上调节阀控制机组背压,当背压达到设定值时,机组开始并网带负荷,逐步升负荷至约 20% 额定负荷(暂定),全部加热器逐步投入运行后,通过高压调节阀控制主汽流量,保证中压排汽用于回收加热。

2.1.2 供汽系统运行模式

低压供汽来自汽轮机中压缸调节抽汽,供汽管道上按蒸汽流向依次设安全阀、气动止回阀、快关调节阀和隔离阀。

中压供汽来自再热器出口蒸汽,供汽管道上按蒸汽流向依次设置气动止回阀、快关调节阀和隔离阀。

机组的启动暖机升速和并网都按纯凝汽式机组进行,当达到一定负荷时,满足供汽条件时,投入工业供热系统。投入时,先投低压供汽,后投中压供汽。当低压供汽压力达标时,停止升负荷,确认低压供汽管道各阀门正常,逐步投入低压供汽;解除高调门、中调门比例联动,切换为中调门与低压供汽压力连锁控制,保证低压供汽压力及流量,低旁调节同步逐渐关小;若低旁调节阀全关时尚未满足低压供汽流量需求时,可逐渐增加高调门开度。

当中压供汽压力达标时,投入中压工业供汽。投入中压供汽后中调阀切换至与中压供汽压力连锁。低压供汽压力可通过旋转隔板进行调整。

2.2 超临界再热型背压机控制策略

超临界再热型背压机组重点在供热,锅炉侧的控制关键点是稳定的蒸汽温度和压力,同时保证背压机供汽和发电所需的蒸汽量,故一般不存在同常规火电机组一样的协调控制系统,但仍然需要设置必要的锅炉主控回路,以实现整个机组的高效稳定运行,保证供汽品质和流量。

超临界再热型背压汽轮机在机组供热投入前的主要任务是保证冲转前的转速和并网后的机组功率,确保机组自动、平稳地达到同期、并网转速,并网后自动升负荷到可投低压供热抽汽负荷;供热投入后,中压供热抽汽、低压供热抽汽、机组排汽背压按照各自回路独立调整处理,分别通过调节中压调节阀、旋转隔板以及高压调节阀进行压力控制。供热抽汽压力、背压具有较大惯性,只要控制在一定范围内都可满足外部抽汽供热需要。

2.2.1 低压供汽压力控制策略

在超临界再热型背压机负荷达到可以满足低压供热蒸汽压力时,停止升负荷,投入低压供热抽汽,此时解除高压调门、中压调门的比例联动关系,低压抽汽压力由旋转隔板控制,相应的控制方案如图 2 所示。

旋转隔板接受低压供汽压力控制回路 PID 控制器的输出指令,保证低压供汽压力在用户需求的蒸汽压力范围;低压抽汽压力设定值可设置为用户需求的压力值。

2.2.2 中压供汽压力控制策略

在机组低压供热压力回路投入之后,中压抽汽压力由中压调节阀来保证。

在机组投入中压供汽之后,当中压蒸汽压力不能满足用户用汽品质要求时,逐步关小中压调节阀。中压调节阀关小影响低压抽汽压力,故中压调节阀不能无限制关小,在控制逻辑中设计有当低压抽汽压力报警时限制中压调节阀关闭的闭锁回路,同时设计有当中压抽汽切除时的输出指令切换回路,以保证超临界再热型背压机组这一强耦合供热系统各用户蒸汽品质、设备安全以及系统的稳定性。

2.2.3 背压机蒸汽流量控制策略

机组升负荷至可投入低压抽汽供热时,高压调节阀和中压调节阀的联动关系解除,在机组低压供热压力回路投入之后,高压调节阀不再控制机组功率,改为控制整个背压机组的蒸汽流量,保证低压和中压供热蒸汽品质,其具体的控制方案如图 3 所示。

3 超临界再热型背压机关键控制回路仿真研究

超临界再热型背压机组系统复杂,为确保机组各重要控制回路的正确性,需要结合工艺系统设备

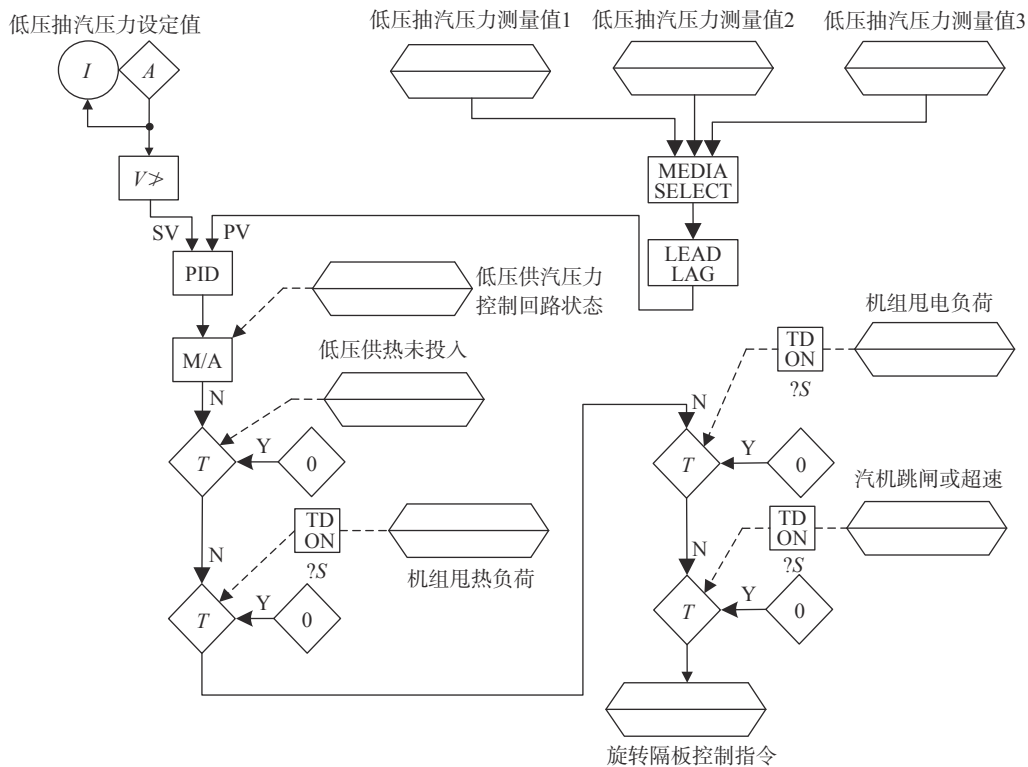


图 2 低压供汽压力控制方案

Fig. 2 Low pressure steam supply pressure control scheme

配置,对相关系统进行建模,在所建模型的基础上对相应的控制系统进行仿真验证,以保证工程应用时的合理性和高效性。采用模块化建模方法,将涉及到重要控制回路的系统分为主汽轮机系统模型、供汽抽汽及小汽轮机抽汽模型、发电系统模型等,分别进行建模,然后将各个子系统进行联调与校验。

3.1 主汽轮机模型

汽轮机模型主要包括油动机模型、汽轮机高调门模型、蒸汽容积模型、再热容积模型、转子模型等。除蒸汽容积和再热容积模型外,其他常规模型均不再详述。

高、中压缸的主要动态特性仿真采用蒸汽容积模型。蒸汽容积特性可用一阶惯性环节描述,经过公式推导及拉式变换可得到阀门开度的拉式变换值 $x_{sz}(s)$ 与机组功率 $x_p(s)$ 之间的传递函数如下:

$$\frac{x_p(s)}{x_{sz}(s)} = \frac{1}{1 + T_0 s}$$

式中:

T_0 ——容积时间常数,通常取 T_0 为 0.1~0.3 s,汽轮机蒸汽容积模型可按图 4 模型表示。

再热系统模型主要是容积效应,如图 5 所示。

再热器的实际物理位置在高排后,再热蒸汽经过中压主汽阀及中压调节阀进入中压缸,因此,再热器的积分反馈来源于中压调阀阀前压力信号,输入为中压调节阀开度。

3.2 供汽抽汽及小汽轮机抽汽模型

小机抽汽模型是主汽轮机与小汽轮机交接处,需要输出抽汽点压力进入小机模型,同时需要从小机模型接入小机抽汽量作为输入量进入主汽轮机模型,因此小机抽汽模型反映了主汽轮机与小汽轮机的耦合现象,鉴于本工程仿真的主要目标是供热抽汽系统及汽轮机自身的控制,故对于小汽轮机抽汽模型的建立,不考虑汽源切换等问题,仅将其同背压机排汽作为一个整体进行考虑。

中压抽汽与低压抽汽会减小抽汽点后汽轮机级组的流量,对主汽轮机的影响规律与小机抽汽一致,仿真模型也基本一致。同时中压抽汽的压力与中压调节阀及主汽阀的阀门开度存在函数关系,低压抽汽的压力与中压调节阀及旋转隔板的开度存在函数关系。供汽抽汽仿真模型如图 6 所示。

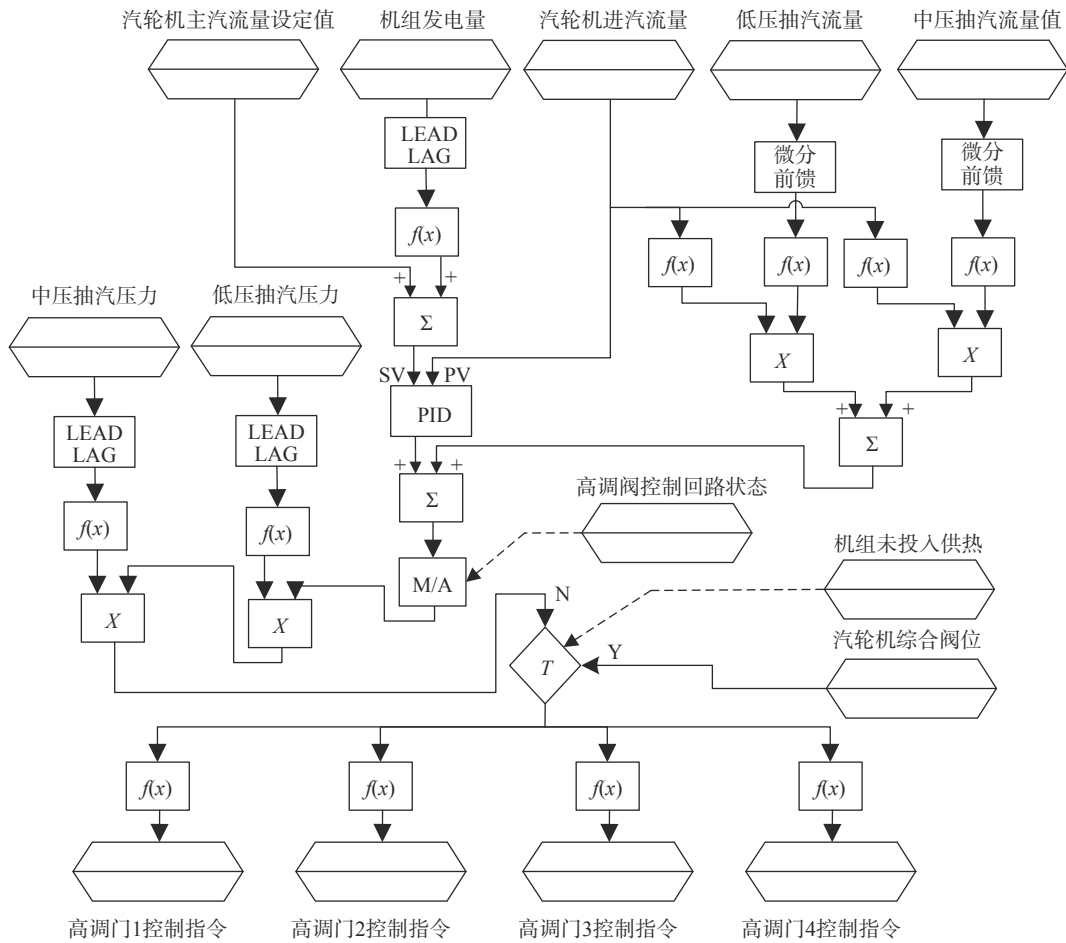


图 3 超临界再热型背压机组蒸汽流量调节框图

Fig. 3 Block diagram of steam flow regulation of supercritical reheat back pressure unit

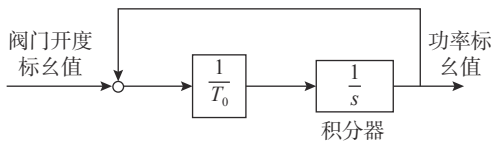


图 4 蒸汽容积效应仿真模型

Fig. 4 Steam volume effect simulation model

3.3 发电功率计算模型

本次仿真试验主要论证抽汽量变化对机组的影响,而背压变化对机组高压缸、旋转隔板前中压缸做功几乎没有影响,对机组功率的影响主要集中在中压缸后半部分:背压变化会引起中压缸后半部分有效焓降变化,从而影响中压缸后半部分做功功率。

经过理论分析及归一化处理,机组的发电功率计算仿真模型如图 7 所示。由于本研究主要关注的是机组模型对仿真的影响,因此电网模型采用无穷大电网模型进行仿真,忽略发电机组受电网频率和

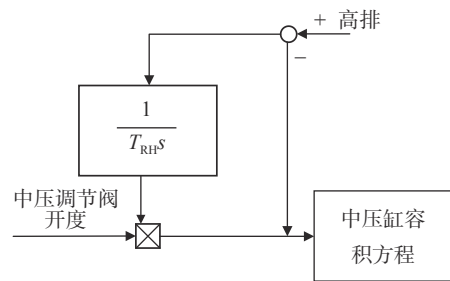


图 5 再热容积效应仿真模型

Fig. 5 Reheat volume effect simulation model

电压等方面的影响。

4 超临界再热型背压机仿真

4.1 超临界再热型背压机仿真模型搭建

超临界再热型背压机工艺系统特殊,供热抽汽压力、背压具有大惯性、非线性、强耦合等特点。其主要任务是提供给热用户合格的蒸汽,机组长期

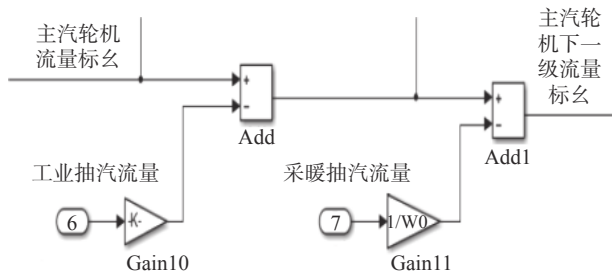


图 6 中压(工业)抽汽与低压(采暖)抽汽仿真模型

Fig. 6 Middle pressure (industrial) and low pressure (heating) extraction simulation model

工作在供热工况,发电则是在保证供热各项控制回路之后系统自动平衡的结果。结合前述章节控制方案和各模块仿真模型,超临界再热型背压机控制方案仿真系统如图 8 所示。

模型搭建过程中考虑了各级回热抽汽量对机组对外供热抽汽量以及抽汽压力的影响。因仿真重点是供热抽汽相关控制回路,对于背压机排汽及发电功率等的仿真则属于相对次要的要求,建模时将中压缸旋转隔板后的部分做了简化,背压机排汽焓的计算仅采用排汽压力对应的饱和蒸汽焓(结合汽机各工况下的热平衡图,低压缸在不同工况下的设计效率变化在 2% 之内,不影响本研究控制方案的论述)。

分别搭建了汽轮机高压主汽阀、中压调节阀、旋转隔板的控制方案回路,其中高压主汽阀的控制回路中设计有中压和低压供热抽汽流量的微分前馈。

理想微分 PID 算法的微分作用仅局限于一个采样周期有大幅度输出,实际使用时会产出 2 方面的问题:(1)控制输出可能超过执行机构或 D/A 转换的上下限;(2)执行机构的响应速度可能无法在短时间内跟踪这种较大的微分输出。而实际微分 PID 算法由于惯性滤波的存在,微分作用可持续多个采样周期,有效避免了上述问题的产生。因此相关的仿真前馈采用具有更好控制性能的实际微分前馈模型来设计。

4.2 控制方案仿真

针对上节所建模型及控制方案,结合设计典型工况热平衡图内容和机组基本参数,本节重点对超临界再热型背压机各级供热抽汽流量阶跃扰动下的动态特性以及各控制系统控制方案的控制效果进行仿真验证。

4.2.1 低压抽汽压力控制回路仿真

图 9 和图 10 为分别对低压抽汽流量阶跃扰动 4% 和 10%,且旋转隔板控制回路投入自动状态下的响应曲线,图中绘制了中压抽汽压力和低压抽汽压力两条曲线。

由图 9、图 10 可知,当低压抽汽流量在第 500 s 发生阶跃扰动时,阶跃量较大的工况(10%,图 10)已经超出了旋转隔板调节的最大裕度,故最终的低压抽汽压力值未能恢复至需求值;因其余相关的各被控对象未做调整,故背压机主蒸汽流量、中压缸进汽

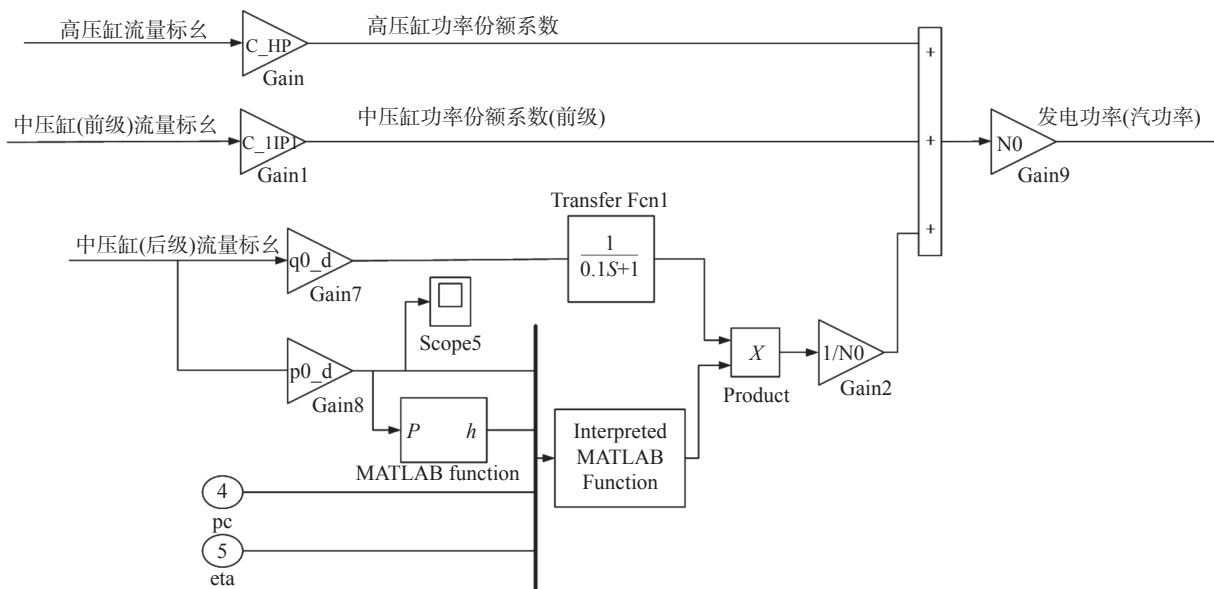


图 7 发电功率仿真模型

Fig. 7 Generation power simulation model

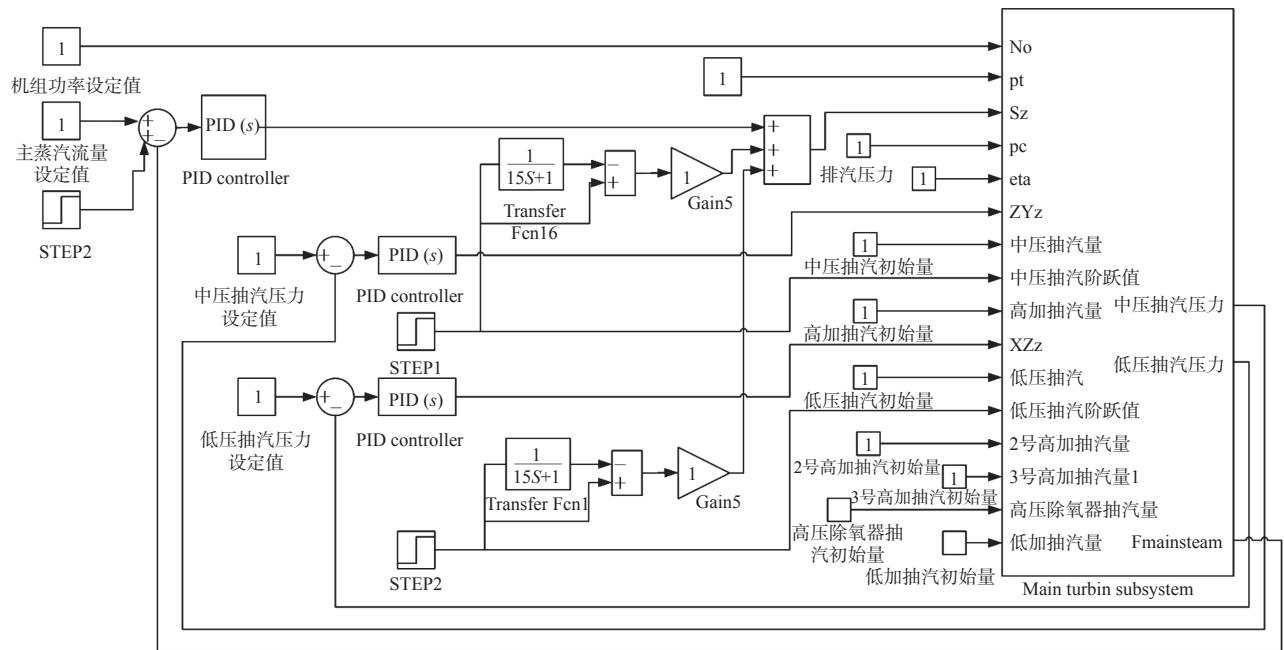


图 8 超临界再热型背压机控制方案仿真框图

Fig. 8 Block diagram of control strategy simulation of supercritical reheat back pressure unit

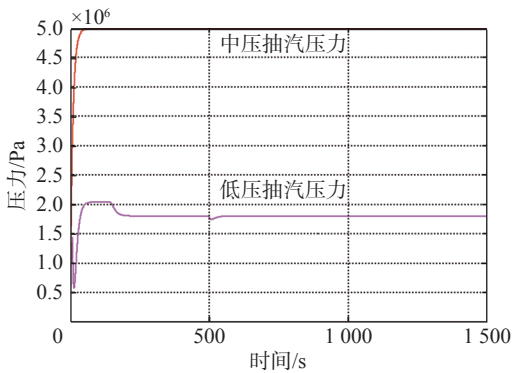


图 9 典型工况下低压抽汽量 4% 扰动时低压抽汽控制回路响应曲线

Fig. 9 Response curve of the low-pressure extraction control loop when the low-pressure extraction steam volume is disturbed by 4% under typical operating condition

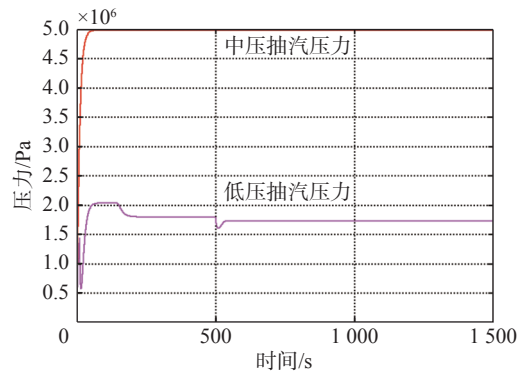


图 10 典型工况下低压抽汽量 10% 扰动时低压抽汽控制回路响应曲线

Fig. 10 Response curve of the low-pressure extraction control loop when the low-pressure extraction steam volume is disturbed by 10% under typical operating condition

流量等数值均未发生变化;结合低压抽汽压力控制回路仿真曲线,低压抽汽系统压力控制回路基本可以满足工程应用。

4.2.2 中压抽汽压力控制回路仿真

图 11 为中压抽汽流量阶跃扰动 10%,且背压机中压调节阀和旋转隔板控制回路均投入自动状态下的响应曲线。

由图 11 可知,当中压抽汽流量在第 500 s 的时间发生阶跃扰动后,中压抽汽压力调节回路和低压抽汽压力调节回路均可以保证相应的抽汽压力快速

调整至用户所需压力,中压抽汽系统和低压抽汽系统的两个压力控制回路基本可以满足工程应用。

4.2.3 机组主蒸汽流量控制回路仿真

图 12 为主蒸汽流量阶跃扰动 10%,机组主蒸汽流量调节回路投入自动,且背压机中压调节阀和旋转隔板控制回路均未投入自动状态下的响应曲线。

由仿真曲线可以看出,当主蒸汽流量阶跃扰动后,因其他被控对象均未做调整,故中压抽汽压力和低压抽汽压力均阶跃上升;结合之前的抽汽流量响

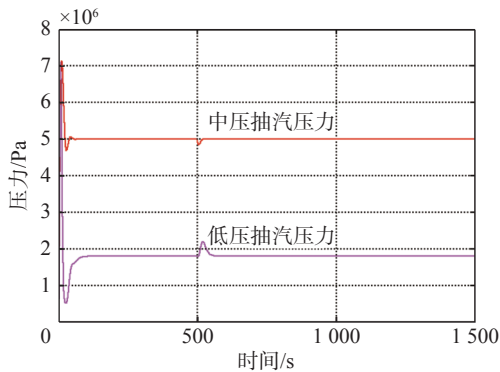


图 11 典型工况下中压抽汽量 10% 扰动时抽汽压力控制回路响应曲线

Fig. 11 Response curve of the extraction steam pressure control loop when the medium pressure extraction steam volume is disturbed by 10% under typical condition

应曲线, 当抽汽流量变化时, 对主蒸汽调整回路做前馈, 且同时对应调整主蒸汽流量, 非常有利于机组供热抽汽压力的稳定, 也从侧面反映出本研究课题所提控制方案的合理性。

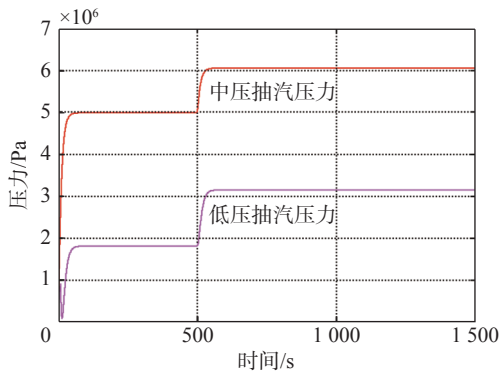


图 12 典型工况下主蒸汽流量 10% 扰动时的供热抽汽压力响应曲线

Fig. 12 Response curve of heating extraction steam pressure when the main steam flow is disturbed by 10% under typical condition

图 13 为对主蒸汽流量阶跃扰动 2% (考虑到依托工程为循环流化床锅炉响应速度较缓的特点和电网公司对机组一次调频的基本要求, 机组响应一次调频波动的主蒸汽流量波动也小于 2%, 故此处对主蒸汽流量的阶跃量做适当的缩小), 机组主蒸汽流量调节回路投入自动, 且背压机中压调节阀和旋转隔板控制回路均同时投入自动, 由曲线可知, 中压抽汽压力和低压抽汽压力经过各自的控制回路调整后, 可以满足用户对蒸汽品质的要求。

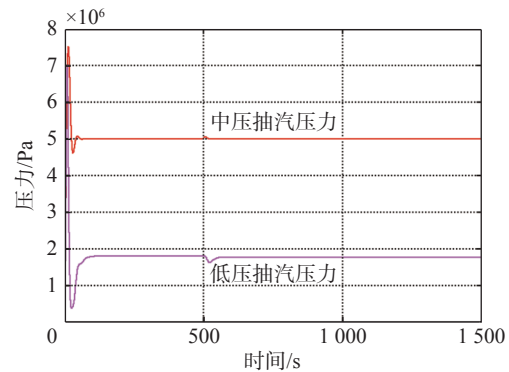


图 13 典型工况下主蒸汽流量 2% 扰动时的抽汽压力响应曲线

Fig. 13 Response curve of extraction steam pressure when the main steam flow is disturbed by 2% under typical condition

图 14 为对中压抽汽流量和低压抽汽流量同时做阶跃扰动 5%, 机组主蒸汽流量调节回路投入自动, 且背压机中压调节阀和旋转隔板控制回路均同时投入自动时中压和低压抽汽压力的响应曲线。由曲线可知, 中压抽汽压力和低压抽汽压力经过各自的控制回路调整后, 可以满足用户对蒸汽品质的要求。

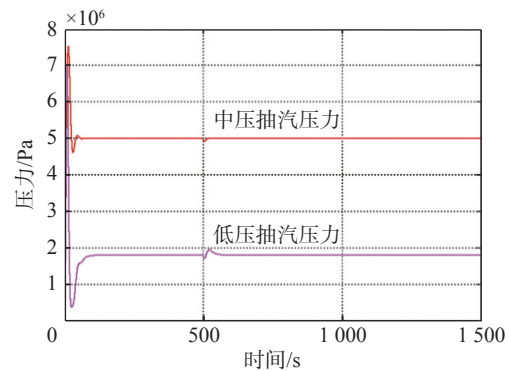


图 14 典型工况下中压和低压蒸汽流量同时做 5% 扰动时的抽汽压力响应曲线

Fig. 14 Response curve of extraction steam pressure when both medium pressure and low pressure steam flow are simultaneously disturbed by 5% under typical condition

5 结论

本课题结合超临界再热型背压机组的工艺系统及设备状况, 对超临界再热型背压机组的工艺系统进行简要介绍, 结合超临界再热型背压机组的运行模式, 提出了超临界再热型背压机组在投入供热前和投入供热后的相关控制策略, 主要包括:

1) 在机组投入供热前, 机组的控制方案主要是

保证冲转前的转速、并网后的机组功率,其控制方案同常规火电机组类似,只是结合超临界机组的对象特性对相关的控制参数进行调整优化即可。

2)在机组投入供热之后,机组不存在同常规火电机组一样的协调控制系统,其锅炉侧的控制以保证供热蒸汽品质为主,汽机侧的控制则以主蒸汽压力调节为根本,以此控制回路作为汽机侧各子系统控制的最高主控回路,最终保证机组的可靠高效运行。

3)建模仿真结果表明,主蒸汽和抽汽流量扰动量在可调范围之内时,本文提出的控制方案均能够保证中压和低压抽汽压力快速恢复。本文调节方案未投入,或扰动较大超出调节裕度时,被调参数无法恢复至用户需求值。

通过建模仿真,验证了所提控制方案的正确性,为超临界再热型背压机技术的工程示范奠定技术基础。可以指导和引领工业热负荷需要量大、供热参数合适的化工项目或工业园区热电项目采用超临界再热型背压机控制方案设计及工程应用,同时对现役抽凝机组的供热改造提供借鉴。

参考文献:

- [1] 国家统计局. 中国统计年鉴 [M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.
National Bureau of Statistics. China statistical yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [2] 中国电力企业联合会. 电力行业碳达峰碳中和发展路径研究 [R/OL]. (2021-12-27) [2022-09-04]. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-305168>.
China Electricity Council. Research on the development path of carbon peaking and carbon neutrality in the power industry [R/OL]. (2021-12-27) [2022-09-04]. <https://cec.org.cn/detail/index.html?3-305168>.
- [3] 陆树银, 刘浩晨, 顾煜炯, 等. 大型热电联产机组供热改造分析 [J]. 工程热物理学报, 2022, 43(5): 1182-1189.
LU S Y, LIU H C, GU Y J, et al. Thermodynamic analysis of heating reformation of large-scale CHP [J]. Journal of engineering thermophysics, 2022, 43(5): 1182-1189.
- [4] 魏海蛟, 鹿院卫, 张灿灿, 等. 燃煤机组灵活性调节技术研究现状及展望 [J]. 华电技术, 2020, 42(4): 57-63. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2020.04.009.
WEI H J, LU Y W, ZHANG C C, et al. Status and prospect of flexibility regulation technology for coal-fired power plants [J]. Huadian technology, 2020, 42(4): 57-63. DOI: 10.3969/j.issn.1674-1951.2020.04.009.
- [5] 张文祥, 宋放放, 谢林贵, 等. 新型热电联产汽轮机系统研究 [J]. 东方汽轮机, 2021(3): 23-28. DOI: 10.13808/j.cnki.issn1674-9987.2021.03.006.
ZHANG W X, SONG F F, XIE L G, et al. Study on new steam turbine system for cogeneration [J]. Dongfang turbine, 2021(3): 23-28. DOI: 10.13808/j.cnki.issn1674-9987.2021.03.006.
- [6] 张知足, 张卫义, 刘阿珍, 等. 热电联产应用技术国内外研究现状 [J]. 北京石油化工学院学报, 2020, 28(2): 29-39. DOI: 10.19770/j.cnki.issn.1008-2565.2020.02.004.
ZHANG Z Z, ZHANG W Y, LIU A Z, et al. The research status of cogeneration application technology at home and abroad [J]. Journal of Beijing institute of petrochemical technology, 2020, 28(2): 29-39. DOI: 10.19770/j.cnki.issn.1008-2565.2020.02.004.
- [7] 邹罗明. 超超临界机组邻炉蒸汽加热系统优化研究 [J]. 南方能源建设, 2016, 3(2): 127-130,20. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.02.024.
ZOU L M. Optimization research on adjacent boiler heating system of ultra supercritical unit [J]. Southern energy construction, 2016, 3(2): 127-130,20. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2016.02.024.
- [8] 王东雷, 张鹏, 霍沛强. 采用再热温度630℃的1000 MW新一代超超临界二次再热机组可行性研究 [J]. 南方能源建设, 2018, 5(3): 33-41. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.03.005.
WANG D L, ZHANG P, HUO P Q. Feasibility study on 1000 MW new generation ultra-supercritical unit with double reheating cycles at 630℃ [J]. Southern energy construction, 2018, 5(3): 33-41. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2018.03.005.
- [9] 朱晓群. 吸收式热泵在火电厂循环水余热利用中的应用 [J]. 宁夏电力, 2014(3): 56-59. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3643.2014.03.013.
ZHU X Q. Application of the pump for absorption heat of circulation water residual heat utilization system in coal-fired power plant [J]. Ningxia electric power, 2014(3): 56-59. DOI: 10.3969/j.issn.1672-3643.2014.03.013.
- [10] 鲁旭东. 呼热350 MW机组热泵供热技术实践 [D]. 保定: 华北电力大学, 2016. DOI: 10.7666/d.D01072252.
LU X D. Heating technology practice of heat pump in 350 MW unit for hohhot thermal power plant [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2016. DOI: 10.7666/d.D01072252.
- [11] 张虎男. 350 MW超临界机组高背压供热改造研究及性能分

- 析 [D]. 大连: 大连理工大学, 2017.
- ZHANG H N. Research and performance analysis of high-back-pressure heating reformation of 350 MW supercritical unit [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2017.
- [12] 靖长财, 王凤池. 660 MW超临界空冷机组提升供热经济性与灵活性研究 [J]. 能源科技, 2021, 19(1): 46-49.
- JING C C, WANG F C. Research on improving heating economy and flexibility of 660 MW supercritical air-cooled unit [J]. Energy science and technology, 2021, 19(1): 46-49.
- [13] 董昊炯, 何新有. 背压式热电联产汽轮机启动运行特点分析 [J]. 热力透平, 2020, 49(4): 252-256. DOI: 10.13707/j.cnki.31-1922/th.2020.04.002.
- DONG H J, HE X Y. Analysis on start-up and operation characteristics of back pressure combined heat and power steam turbine [J]. Thermal turbine, 2020, 49(4): 252-256. DOI: 10.13707/j.cnki.31-1922/th.2020.04.002.
- [14] 刘立华, 魏湘, 杨铁峰, 等. 超临界600 MW直接空冷机组双背压供热改造技术 [J]. 热力发电, 2018, 47(12): 87-92. DOI: 10.19666/j.rfd.201808166.
- LIU L H, WEI X, YANG T F, et al. Double-backpressure heating flexible reformation technology for a supercritical 600 MW direct air cooling unit [J]. Thermal power generation, 2018, 47(12): 87-92. DOI: 10.19666/j.rfd.201808166.
- [15] 车洵, 朱旻昊, 曹勤, 等. 新型节能背压式汽轮机研究 [J]. 热力透平, 2016, 45(1): 33-36. DOI: 10.13707/j.cnki.31-1922/th.2016.01.007.
- CHE X, ZHU M H, CAO Q, et al. Research on new type of energy-saving steam turbine with back pressure [J]. Thermal turbine, 2016, 45(1): 33-36. DOI: 10.13707/j.cnki.31-1922/th.2016.01.007.
- [16] 刘强, 段远源. 背压式汽轮机组与有机朗肯循环耦合的热电联产系统 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(23): 29-36. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2013.23.014.
- LIU Q, DUAN Y Y. Cogeneration system comprising back-pressure steam turbine generating unit coupled with organic rankine cycle [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(23): 29-36. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2013.23.014.
- [17] 胡中强. 背压式汽轮机组与有机朗肯循环耦合的热电联产系统分析及应用 [J]. 上海节能, 2020(11): 1265-1268. DOI: 10.13770/j.cnki.issn2095-705x.2020.11.005.
- HU Z Q. Analysis and application of cogeneration system with back pressure turbine unit and organic rankine cycle coupling [J]. Shanghai energy conservation, 2020(11): 1265-1268. DOI: 10.13770/j.cnki.issn2095-705x.2020.11.005.
- [18] 陈先锋. 背压式汽轮机的启动方式分析 [J]. 热力透平, 2018, 47(3): 182-185. DOI: 10.13707/j.cnki.31-1922/th.2018.03.004.
- CHEN X F. Analysis of start-up mode of back pressure turbine [J]. Thermal turbine, 2018, 47(3): 182-185. DOI: 10.13707/j.cnki.31-1922/th.2018.03.004.
- [19] 费卓, 范圣波, 朱文凯. 50 MW背压式汽轮机降背压运行实践研究 [J]. 东北电力技术, 2020, 41(3): 53-55,62. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7913.2020.03.015.
- FEI Z, FAN S B, ZHU W K. Research on practice of 50 MW back pressure turbine in back pressure reducing [J]. Northeast electric power technology, 2020, 41(3): 53-55,62. DOI: 10.3969/j.issn.1004-7913.2020.03.015.
- [20] 陆群. 大型汽轮机抽汽采用背压式汽轮机供热技术经济效益评价 [J]. 电工技术, 2021(23): 185-187. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2021.23.061.
- LU Q. Evaluation of economic benefits of back-pressure steam turbine heating technology for large steam turbine extraction steam [J]. Electric engineering, 2021(23): 185-187. DOI: 10.19768/j.cnki.dgjs.2021.23.061.
- [21] 薛朝因, 石慧, 陈霖, 等. 基于背压式汽轮机的宽负荷高效回热系统热经济性分析 [J]. 热力发电, 2018, 47(9): 103-108. DOI: 10.19666/j.rfd.201801012.
- XUE Z N, SHI H, CHEN L, et al. Thermo-economic performance analysis for wide-load and high-efficiency regenerative system based on back-pressure steam turbine [J]. Thermal power generation, 2018, 47(9): 103-108. DOI: 10.19666/j.rfd.201801012.
- [22] 郑之民. 330 MW机组不同供热方式下的经济性分析 [J]. 发电设备, 2021, 35(2): 145-148. DOI: 10.19806/j.cnki.fdsb.2021.02.013.
- ZHENG Z M. Economy analysis of a 330 MW unit with different heating modes [J]. Power equipment, 2021, 35(2): 145-148. DOI: 10.19806/j.cnki.fdsb.2021.02.013.
- [23] 宋萍, 刘晓燕, 唐丽丽, 等. 超临界再热型两级调节工业抽汽背压式汽轮机供热方案研究 [J]. 东方汽轮机, 2020(3): 5-9. DOI: 10.13808/j.cnki.issn1674-9987.2020.03.002.
- SONG P, LIU X Y, TANG L L, et al. Heating scheme introduction of supercritical two-stage back pressure reheating and coaxial layout steam turbine [J]. Dongfang turbine, 2020(3): 5-9. DOI: 10.13808/j.cnki.issn1674-9987.2020.03.002.
- [24] 王勇, 马聪, 魏光, 等. 超临界再热型双抽背压式汽轮机高压缸夹层加热系统优化研究 [J]. 东北电力技术, 2021, 42(9): 37-

39. DOI: [10.3969/j.issn.1004-7913.2021.09.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7913.2021.09.008).

WANG Y, MA C, WEI G, et al. Research on high pressure cylinder interlayer heating system optimization for supercritical reheat double suction back pressure steam turbine [J]. *Northeast electric power technology*, 2021, 42(9): 37-39. DOI: [10.3969/j.issn.1004-7913.2021.09.008](https://doi.org/10.3969/j.issn.1004-7913.2021.09.008).

- [25] 罗方, 宋风强, 侯明军, 等. 超临界再热型双抽背压式汽轮机运行策略 [J]. *东方电气评论*, 2021, 35(1): 40-44. DOI: [10.3969/j.issn.1001-9006.2021.01.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-9006.2021.01.012).

LUO F, SONG F Q, HOU M J, et al. The operation strategy of supercritical reheating double extracting back-pressure turbine [J]. *Dongfang electric review*, 2021, 35(1): 40-44. DOI: [10.3969/j.issn.1001-9006.2021.01.012](https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-9006.2021.01.012).

作者简介:



袁红蕾

刘新龙

1984-, 男, 高级工程师, 热能工程硕士, 主要从事发电厂仪表与

袁红蕾 (第一作者, 通信作者)

1972-, 女, 高级工程师, 仪器仪表与检测技术专业学士, 主要从事电力工程设计及控制系统优化研究工作 (e-mail) yuanhonglei@nwepdi.com。

控制系统研究及设计工作 (e-mail) liuxinlong@nwepdi.com。

刘昕

1988-, 男, 工程师, 热能工程博士, 主要从事电力工程自动化设计工作 (e-mail) liuxinc@nwepdi.com。

陈荣超

1972-, 男, 高级工程师, 电气工程硕士, 主要从事新能源项目开发 and 储能技术应用研究工作 (e-mail) crczj@163.com。

项目简介:

项目名称 超(亚)临界参数再热型背压机应用研究(GSKJ2-J03-2019)

承担单位 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司

项目概述 以某工程为依托, 对国内首台超临界背压双抽机组的控制策略进行研究与探索, 形成成熟、可靠的控制方案, 掌握超临界背压机组电、热负荷自动协调控制等关键技术。研究内容主要包括超临界背压机组电、热负荷协调控制, 中、低压调整抽汽控制及背压调节控制策略, 热负荷变化大、甩热负荷、甩电负荷等工况下的控制方式。控制策略研究通过仿真加以验证。

主要创新点 (1)针对依托项目工艺系统结构及设备特点, 对超临界背压双抽机组的启动过程、不供热时的运行模式及供热时的运行模式等多种运行模式进行了分析研究; (2)研究了以热定电、调整抽汽、抽汽切除、甩热负荷、甩电负荷等工况下的控制方式和控制策略, 确定了与汽机 DEH 控制的协调和分工; (3)提出机组不同运行模式下的基本控制流程及方案, 通过仿真验证对控制策略进行了验证, 并通过在工程实施阶段密切跟踪调试和运行状况, 对控制策略进行修正。

(编辑 赵琪)