

汽轮机旁路供热系统运行安全保护策略研究

王维萌¹, 何晓迪², 董伟¹, 宋亚军¹

(1. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院(华北电力科学研究院有限责任公司), 北京 100045;

2. 北京京能电力股份有限公司乌兰察布分公司, 内蒙古 乌兰察布 013700)

摘要:为提高热电联产机组在深度调峰工况下的供热稳定性及安全性, 本文以某350 MW超临界燃煤机组灵活性改造方案为例, 针对高/低压旁路供热改造对机组安全性影响开展分析, 提出了应用于热电联产机组高/低压旁路供热门组的联动控制及连锁保护策略。该策略在高/低压旁路供热门组的调节过程中实现了安全参数等级限制, 并按报警、闭锁、超驰、保护分级别连锁高/低压旁路供热门组动作, 同时还考虑了特殊工况下各调节阀的自动与手动切换条件。通过案例机组实际应用发现, 该策略有效提高了旁路供热系统的正常运行与工况切换的安全可靠性, 保证机组电负荷降至120.7 MW时供热总流量仍可维持在352.1 t/h, 增强了机组的深度调峰及热电解耦能力。

关键词: 热电联产; 深度调峰; 热电解耦; 旁路供热; 安全保护

中图分类号: TK267

文献标识码: A

DOI: 10.16146/j.cnki.rndlgc.2024.12.006

[引用本文格式] 王维萌, 何晓迪, 董伟, 等. 汽轮机旁路供热系统运行安全保护策略研究[J]. 热能动力工程, 2024, 39(12): 49-59. WANG Weimeng, HE Xiaodi, DONG Wei, et al. Study on operational safety protection strategy of a steam turbine bypass heating system [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(12): 49-59.

Study on Operational Safety Protection Strategy of a Steam Turbine Bypass Heating System

WANG Weimeng¹, HE Xiaodi², DONG Wei¹, SONG Yajun¹

(1. State Grid Jibei Electric Power Co. Ltd. Research Institute (North China Electric Power

Research Institute Co. Ltd.), Beijing, China, Post Code: 100045;

2. Ulanqab Branch of Beijing Jingneng Power Co., Ltd., Ulanqab, China, Post Code: 013700)

Abstract: In order to improve the heating stability and safety of cogeneration unit under depth peak load cycling, taking the flexibility transformation scheme of a 350 MW supercritical coal-fired unit as an example in this paper, the influence of high and low pressure bypass heating transformation on the turbine security was analyzed. On this basis, the linkage control and protection strategies applied to high and low pressure heating bypass valves of combined heat and power generation unit were proposed. The strategies can realize the level limit of security parameters in the heating adjustment process of high and low pressure bypass valve set, which can interlock high and low pressure bypass valves according to alarm, lock, overdrive and protection levels. Meanwhile, the automatic and manual switching term of each regulating valve under special working conditions was considered. Through the practical application in the case unit, it is found that the strategies effectively improve the safety and reliability of normal operation and working condition switching of the bypass heating system. When the lower limit of the unit's electrical load is reduced to 120.7 MW, the total flow rate of heat supply can still be maintained at 352.1 t/h, en-

hancing the depth peak load cycling and heat-power decoupling capacity of the unit.

Key words: combined heat and power generation, depth peak load cycling, heat-power decoupling, bypass heating, safety protection

引言

在当前国内技术发展及能源结构条件下,火电机组灵活性改造是电力保障供应和新能源消纳的重要手段,也是未来一段时间内“三改联动”工作的重点方向^[1-4]。火电机组灵活性改造从技术层面可分为深度调峰和热电解耦,其中,热电解耦主要通过通过对供热汽轮机组进行适当的技术改造,在不影响机组本身供热能力的前提下增强机组的调峰能力。热电解耦技术改造分为低压缸抽汽改造(包括低压缸微或零出力、同步自换档离合器和光轴)、余热回收改造(包括增汽机、热泵、直接空冷或湿冷双转子高背压)、电负荷下限改造(包括喷射电极锅炉、浸没电极锅炉和旁路供热)及热能存储利用改造(熔融盐、冷热水双罐和固体材料)^[5-7]。各类热电解耦技术改造成本差异明显,其中,旁路供热技术只针对机组运行模式做相应更改,除了校核后可能产生的相关旁路阀门、管道增加或更换等工程量外,并没有设备或系统级别的大规模投资需求,其技术本身也在国内诸多火电机组上获得了示范和应用^[8-9]。

文献[10-12]介绍了高/低压旁路联合供热改造具体实施方案及改造后的效果。文献[13-15]针对高/低压旁路联合供热系统控制原则及运行策略开展了相关研究。文献[16-18]计算分析了各类灵活性改造方案及热电解耦模式的差异。文献[19-21]利用EBSILON软件对高/低压旁路联合供热系统热力性能及调峰能力开展了仿真建模分析。上述研究均重点关注于旁路供热改造实施效果及改造后的指标分析,对旁路供热系统运行过程中参数变化及其对机组安全性的影响分析较少。

然而,热电联产机组调峰时原有抽凝工况与新增旁路供热工况会发生频繁切换,同时旁路供热工况下汽轮机及高/低压旁路供热运行参数大幅增加且复杂多变,一方面使高/低压旁路各阀门工作环境恶化,并导致机组轴向推力及高/中压缸末级运行工况频繁变化,若对汽轮机本体及高/低压旁路相关参数不加以控制及限制,极端情况下会损伤推力瓦及高/中压缸末级叶片,影响机组深度调峰下的供热稳定性及安全性;另一方面现有机组旁路供热系统的自动化程度不高,系统投入退出过程仍依赖于人工操作,增加了机组调峰运行的工作量和不确定性,影响机组各供热工况的平稳切换。因此,为保证旁路供热工况下汽轮机本体及高/低压旁路供热相关参数处于安全范围内,基于旁路供热系统运行特点,本文以某350 MW超临界燃煤机组灵活性改造方案为例,针对高/低压旁路供热改造对机组安全性影响开展分析,提出了应用于热电联产机组高/低压旁路供热阀组的联动控制及连锁保护策略。

1 机组及改造方案概况

1.1 汽轮机及旁路供热参数

高/低压旁路联合供热系统如图1所示。旁路供热模式下,原汽轮机旁路系统增设了新低压旁路(阀门11~15及附属管道)用于对外供热。在非旁路供热状态下,原高压旁路(阀门1~4及附属管道)和原启停低压旁路仍处于热态备用状态用于机组启停,新增低压旁路保持关闭。机组转入旁路供热状态后,原高压旁路和新增低压旁路相关阀门开启,锅炉主蒸汽依次通过阀门1~2、再热器、阀门11~12、阀门15,进入热网加热器供热,其余主蒸汽进入汽轮发电机做功并由中压缸排汽供热。

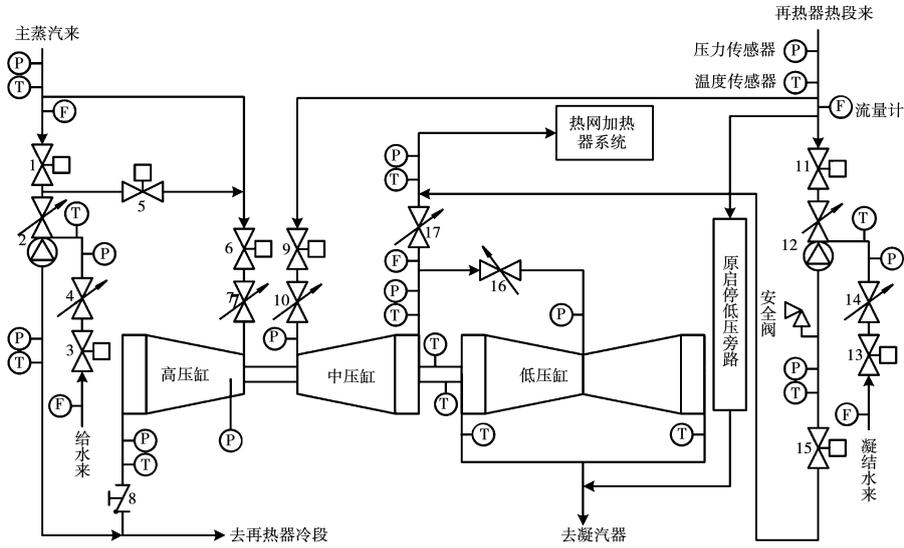


图 1 高/低压旁路联合供热系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of HP/LP bypass combined heating systems

注:1. 高压旁路阀前隔离阀;2. 高压旁路阀;3. 高压旁路减温水隔离阀;4. 高压旁路减温水调节阀;5. 高压旁路预暖隔离阀;6. 高压主蒸汽隔离阀;7. 高压主蒸汽调节阀;8. 高压缸排气逆止阀;9. 中压主蒸汽隔离阀;10. 中压主蒸汽调节阀;11. 低压旁路供热阀前隔离阀;12. 低压旁路供热阀;13. 低压旁路供热减温水隔离阀;14. 低压旁路供热减温水调节阀;15. 低压旁路供热阀后隔离阀;16. 中/低压缸连通管调节阀;17. 中压缸排气去热网调节阀

案例机组为东方汽轮机厂生产的 350 MW 超临界、一次再热、双缸双排汽、抽凝式间接空冷汽轮机,单台汽轮机配置两台并联热网加热器,并与邻机共用 4 台热网循环泵。机组原启停用旁路为 45% 锅炉最大连续蒸发量 (Boiler Maximum Continue Rate, BMCR) 高/低压二级串联配置。汽轮机组及高/低压旁路供热具体性能参数如表 1、表 2 所示。

表 1 汽轮机性能参数

Tab. 1 Performance parameters of steam turbine

参数	数值
额定功率/MW	350
额定主蒸汽压力/MPa	24.2
额定主蒸汽温度/℃	566
额定主蒸汽流量/t·h ⁻¹	1 078.9
额定再热蒸汽压力/MPa	4.743
额定再热蒸汽温度/℃	566
额定供热抽汽压力/MPa	0.45
额定供热抽汽流量/t·h ⁻¹	550
额定设计背压/kPa	10
旁路通流量/% BMCR	45

表 2 高/低压旁路供热性能参数

Tab. 2 HP/LP bypass heating performance parameters

参数	74% 额定	30% 额定
	电负荷	电负荷
高压旁路进口蒸汽压力/MPa	24.2	18.81
高压旁路进口蒸汽温度/℃	566	566
高压旁路进口蒸汽流量/t·h ⁻¹	34.3	277.3
高压旁路出口蒸汽压力/MPa	5.275	1.971
高压旁路出口蒸汽温度/℃	340.6	305.8
高压旁路减温水压力/MPa	10 ~ 38	10 ~ 38
高压旁路减温水温度/℃	134.3 ~ 178.8	134.3 ~ 178.8
高压旁路减温水流量/t·h ⁻¹	5.0	46.3
低压旁路进口蒸汽压力/MPa	4.747	1.774
低压旁路进口蒸汽温度/℃	566	566
低压旁路进口蒸汽流量/t·h ⁻¹	39.3	324.0
低压旁路出口蒸汽压力/MPa	0.45	0.45 ~ 0.22
低压旁路出口蒸汽温度/℃	200	200
低压旁路减温水压力/MPa	1.2 ~ 4.2	1.2 ~ 4.2
低压旁路减温水温度/℃	38	38
低压旁路减温水流量/t·h ⁻¹	10.7	91.0

1.2 旁路供热改造原则

改造前案例机组在抽凝工况下若要满足 500 t/h

的中压缸排汽供热量,电负荷不应低于 233 MW。根据电网灵活性改造相关需求,同时考虑深度调峰电负荷下限对中压缸排汽供热量上限的影响,案例机组以供热总蒸汽量 500 t/h(根据近两年供热季实际数据,案例机组中压缸排汽及高/低压旁路抽汽供热总蒸汽量达到约 400 t/h 即可满足热网最大需求)、中压缸排汽温度小于 300 ℃及电负荷下限达到 30% 汽轮机热耗率验收工况(Turbine Heat Acceptance, THA)作为改造指标,在供热期采用中压缸排汽及高/低压旁路抽汽联合供热方式,经计算,此时锅炉蒸发量为 56% BMCR,远大于锅炉不投油稳燃工况对应的 30% BMCR 蒸发量下限。在这种联合供热模式下,当电负荷下限对应的中压缸排汽供热量上限不满足热网负荷需求时,高压旁路与新增低压旁路应配合投运,使锅炉主蒸汽降温降压后与中压缸排汽汇合,并共同调节对外供热蒸汽量,其技术难点在于高压旁路与低压旁路介质流量的平衡。

1.3 旁路供热参数核算及方案选择

改造后的高/低压旁路既要保留机组启停功能,又要保证深度调峰供热能力。综合考量热网内蒸汽潜热的换热能力以及低压旁路供热管道出口参数,仅以通流能力来看,原启停高/低压旁路就能满足调峰供热需求。但考虑到机组启停阶段只需旁路阀短期动作,而深度调峰供热阶段则需旁路阀长期频繁动作,这种工况不仅考验旁路阀长期安全稳定运行的能力,还对其控制特性及阀体、阀芯结构有较高要求,因此需要将原启停高/低压旁路阀更换为高/低压旁路供热阀或新增高/低压旁路用于供热。另外,通过进一步对管道参数进行核算,在最大供热流量下原启停低压旁路管道进/出口蒸汽速度已超过标准推荐范围^[22-23],因此应新增加一条低压旁路专用于供热工况,同时保留原启停高/低压旁路功能。

图 2 提供了两种具体改造方案。方案 1 原启停高压旁路将高压旁路阀更换为高压旁路供热阀并在上游新增配套的隔离阀及预暖阀,从而使高压旁路在保留启停功能的同时还具备供热功能,原启停低压旁路在功能及位置不变的基础上并联一路新增的低压旁路用于供热;方案 2 原启停高/低压旁路在功能及位置不变的基础上均并联一路新增的高/低压

旁路用于供热。两种方案系统设置及管道布置均可行,但方案 1 比方案 2 初投资较小,因此现阶段采用方案 1 进行机组旁路供热改造。改造后,在 30% THA 旁路供热工况下,高压旁路供热管道进/出口额定流量分别为 277 和 325 t/h;低压旁路供热管道进/出口额定流量分别为 325 和 415 t/h。

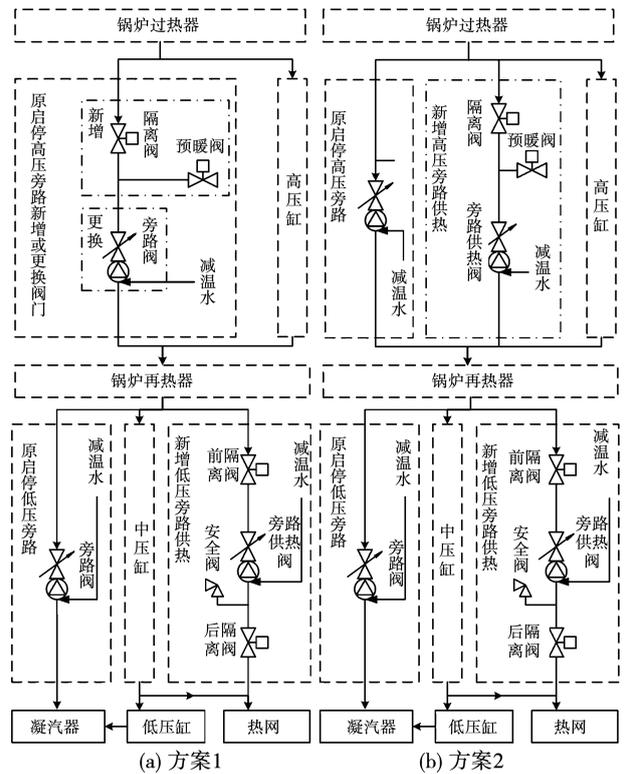


图 2 旁路供热改造方案对比

Fig. 2 Comparison of schemes for bypass heating transformation

1.4 设备更换需求分析

根据方案 1,原启停高压旁路更换高压旁路阀杆、阀芯及阀座,并在高压旁路阀上游增加一道在运行工况下保持常开状态的隔离阀,高压旁路阀发生故障时关闭该隔离阀,高压旁路预暖管道增加预暖阀。新增低压旁路从原启停低压旁路阀上游引出,并在低压旁路供热阀上/下游分别布置前、后隔离阀,运行工况下两阀保持常开状态,低压旁路供热阀发生故障时两阀关闭。为实现高/低压旁路流量自动控制,在新增高压旁路阀隔离阀前、高压旁路减温水隔离阀前、新增和原启停低压旁路母管及低压旁路供热减温水隔离阀前各增加一套孔板差压流量计。

1.5 改造后旁路功能分析

非旁路供热工况下,低压旁路供热阀及其前隔离阀关闭以隔绝新增低压旁路进汽,高压旁路阀及原启停低压旁路阀仍执行机组启停或正常运行的相关功能;旁路供热工况下,原启停低压旁路阀关闭,主蒸汽依次经高压旁路阀及低压旁路供热阀降温降压后补充中压缸排汽供热量的缺口,其中高压旁路阀控制阀前蒸汽流量,高压旁路减温水调节阀控制高压旁路出口蒸汽温度,低压旁路供热阀控制阀前蒸汽流量(或阀后压力),低压旁路供热减温水调节阀控制新增低压旁路出口蒸汽温度。通过上述阀门的自动调节使高/低压旁路供热蒸汽参数分别与高压缸排汽和中压缸排汽参数协调一致。热网事故工况下,低压旁路供热阀及其前隔离阀关闭,若再热蒸汽压力高于保护值则应快开原启停低压旁路阀,若低压旁路供热阀后压力高于保护值则安全阀自动开启。

1.6 改造后经济效益分析

根据《京津唐电网火电机组调节能力提升奖励办法(试行)》^[22],火电机组灵活性改造并认定合格后,电厂向华北电网公司提出机组调节能力提升改

造奖励申请,测算确定的奖励电量。根据案例机组灵活性改造设计数据计算,在保持供热量 500 t/h 不变的前提下,当采用旁路供热模式使机组调峰深度达到 30% THA 时,供热季可获得奖励优先发电量约 60 342.9 MW·h,按奖励电价 0.16 元/(kW·h) 计算,旁路供热改造后售电收入增加 965 万元。在旁路供热模式下机组发电煤耗率相比改造前相同供热量的抽凝工况上涨了 32.07 g/(kW·h),按供热季调峰期 60 d×10 h 统计,在调峰期内机组发电标准煤耗量上涨约 2 020.18 t,按标准煤价 700 元/t 计算,旁路供热改造后煤耗成本增加约 141.4 万元。因此,实施高/低压旁路联合供热改造后,机组供热季因调节能力提升获得净奖励电量收益约为 824.1 万元,经济效益显著提升。

2 旁路供热改造对机组安全性影响分析

机组进入旁路供热状态后,汽轮机推力瓦、高/中/低压缸、旁路供热的相关运行参数均会受到影响,如图 3 所示,为保证旁路供热工况运行稳定,需要有针对性地设计控制保护策略使机组相关参数处于安全范围内。

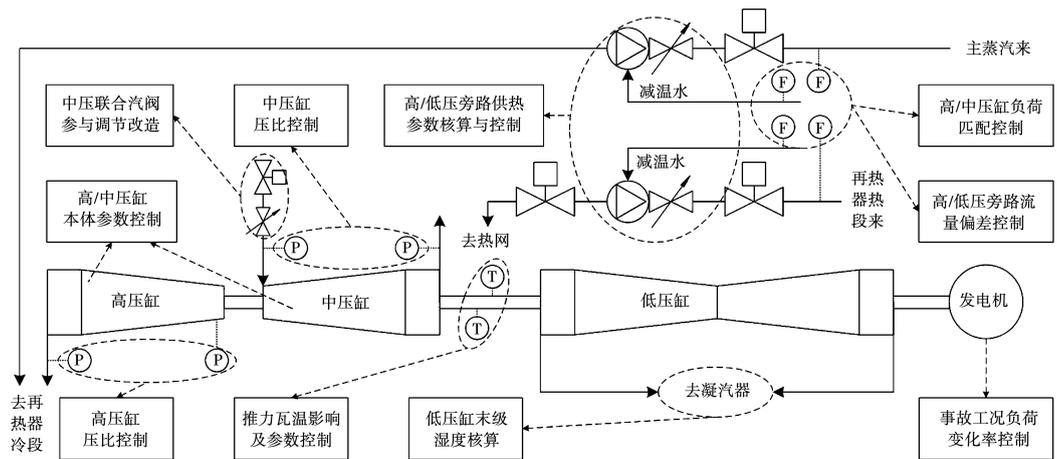


图 3 旁路供热改造安全性影响因素

Fig. 3 Factors influencing the safety of bypass heating transformation

2.1 高/中压缸本体参数及压比控制

在旁路供热工况下,高/低压旁路供热流量不匹配导致汽轮机轴向推力不平衡,还会导致或加剧高/中压缸闷缸或末级叶片超负荷,并且对主/再热蒸汽参数的调节与控制也会产生干扰。为监控高/

中压缸在旁路供热工况下负荷的偏差程度,防止出现闷缸和叶片超负荷,应针对高/低压旁路供热阀梯级设计包含高/中压缸压比、高/中压缸监视段压力差、高压缸排汽压力及温度等表征各缸做功能力参数的闭锁和超驰策略。同时,为防止主/再热蒸汽参

数异常,还应针对高/低压旁路供热阀设计包含主/再热蒸汽流速高报警、主/再热蒸汽压力实际值与设计值偏差的闭锁和超驰等策略。高/中压缸各参数安全范围如表3所示。

表3 高/中压缸参数安全范围

Tab.3 Safety range of HP/IP cylinder's parameters

参数	安全范围
高压缸压比	3.03 ~ 4.54
中压缸压比(进汽压力 1.739 MPa)	6.96 ~ 8.70
中压缸压比(进汽压力 2.128 MPa)	7.09 ~ 10.64
中压缸压比(进汽压力 2.483 MPa)	7.09 ~ 12.42
中压缸压比(进汽压力 3.187 MPa)	7.08 ~ 15.94
中压缸压比(进汽压力 5.069 MPa)	7.80 ~ 25.35
高压缸一段与二段抽汽压差/MPa	< 2.38
中压缸四段与五段抽汽压差/MPa	< 0.62
高压缸排汽温度/℃	< 420
高压缸排汽压力/MPa	< 5.5
主蒸汽流速/ $m \cdot s^{-1}$	< 75
再热蒸汽流速/ $m \cdot s^{-1}$	< 75
主蒸汽压力实际值与设计值偏差/MPa	-1.2 ~ 1.2
再热蒸汽压力实际值与设计值偏差/MPa	-0.6 ~ 0.6

注:高压缸压比 = 高压缸排汽压力/高压缸调节级后蒸汽压力;中压缸压比 = 中压缸排汽压力/中压调节阀后蒸汽压力。

2.2 中压调节阀参调再热蒸汽压力改造

因高/低压旁路供热流量不匹配导致低压旁路供热流量过大时,会出现机组高压缸一段抽汽、高压缸排汽、再热蒸汽压力以及给水温度降低,同时再热蒸汽流速升高,这不仅影响了机组的经济性,在事故工况下还会导致高压缸排汽压力及再热蒸汽流速超限,影响高压末级叶片及锅炉安全运行,因此需要中压调节阀具备参调再热蒸汽压力的功能。另外,若中压调节阀在旁路供热工况下具备参调功能,为防止再热蒸汽压力突升,还应设计相应的保护策略,但原有中压调节阀只用于机组启停,并不具备精细调节及控制保护功能。

针对旁路供热运行的特殊需求,应对中压联合汽阀的结构和功能进行相应改造,包括调节阀阀芯及型线的选用、联合汽阀执行机构及油动机的优化、调节阀参调时再热蒸汽压力闭锁及超驰策略的设计等。若因改造成本或工期限制无法更换,也应对联

合汽阀差压上限及调节阀开度下限进行校核,并在手动方式下控制调节阀参调。

2.3 低压缸末级湿度

经制造厂计算,旁路供热工况下低压缸末级排汽湿度校核结果均处于 0 ~ 7% 区间内,并在低负荷时进入过热区。为减轻过热工况下向低压缸喷水带来的水蚀损害,应对末级叶片进行喷涂处理并配套运行在线监控系统,确保低压缸末级参数在低负荷工况下安全可控。

2.4 推力瓦影响及参数控制

旁路供热工况下,汽轮机推力轴承载荷比压校核结果均合格。为防止事故工况下轴向推力超限导致推力瓦受损,在保证推力瓦温不超过报警值的同时,还应考虑高/低压旁路的供热流量偏差不超限。经校核,当新增低压旁路隔绝进汽时,高压旁路安全进汽量上限约为 60 t/h;当供热高压旁路隔绝进汽时,新增低压旁路安全进汽量上限约为 190 t/h,正反推力瓦温上限为 100 ℃。基于上述限制,应针对高/低压旁路供热阀梯级设计包含推力瓦温与高/低压旁路供热流量差等参数的闭锁、超驰和保护关策略。

2.5 旁路供热参数及甩热负荷影响

高/低压旁路供热阀开度过大或旁路流量与旁路减温水流量不匹配时,会导致旁路阀后压力、温度及流量异常,因此应针对高/低压旁路供热阀设计包含旁路阀后压力、温度(过热度)、流量等参数的闭锁、超驰和保护关策略。

若机组发生锅炉主燃料跳闸(MFT)、汽轮机跳闸、发电机解列、热网解列、甩负荷等重大事故或旁路供热相应隔离阀误关时,高/低压旁路供热阀应立即触发保护关。同样,若任一高/低压旁路供热阀触发保护关,则另一旁路阀也连锁触发保护关。

当旁路供热量较大时,若触发高/低压旁路供热阀保护关后机组仍需保持纯凝或抽凝工况运行,则在旁路供热甩负荷这一过程中,锅炉过热器、再热器压力及汽轮机进汽量突增,这不仅会导致汽轮机轴向推力异常并干扰高压缸排汽逆止阀的正常开启,还会使机组负荷升速率超限。因此,应根据锅炉蒸发量的不同梯级限定旁路供热工况下机组的负荷升速率,高/低压旁路供热各参数安全范围如表4所示。

表 4 高/低压旁路供热参数安全范围

Tab. 4 Safety range of HP/LP bypass heating parameters

参 数	安全范围
高压旁路供热压力/MPa	<5.5
高压旁路供热温度/℃	<430
高压旁路供热流量/ $t \cdot h^{-1}$	<370
低压旁路供热压力/MPa	<0.35
低压旁路供热温度/℃	<290
低压旁路供热流量/ $t \cdot h^{-1}$	<415

3 控制保护策略

案例机组灵活性改造针对高/低压旁路供热阀组提出了在旁路供热工况下的控制保护策略,其中,高压旁路供热阀组涉及高压旁路供热阀前隔离阀、高压旁路供热阀、高压旁路供热减温水隔离阀及调节阀在旁路供热工况下的开允许、连锁、闭锁、超驰、保护及切手动等动作条件;低压旁路供热阀组涉及低压旁路供热阀前/后隔离阀、低压旁路供热阀、低压旁路供热减温水隔离阀及调节阀在旁路供热工况下的开允许、连锁、闭锁、超驰、保护及切手动等动作条件。上述条件如无特殊要求均在机组处于旁路供热工况时生效。

3.1 高压旁路供热阀组

(1) 高压旁路供热阀前隔离阀

a. 阀门开启允许条件为高压旁路供热阀阀位反馈 < 预设值;

b. 阀门连锁全开条件为锅炉过热器出口压力 \geq 预设值。

(2) 高压旁路供热阀

a. 自动状态下闭锁开条件为高压缸排汽压力或温度、高压旁路供热阀后蒸汽温度、中压缸压比、中压缸四段与五段抽汽压力差、高压旁路供热阀后蒸汽流量、高压旁路供热阀前与低压旁路供热阀前蒸汽流量差任一项 \geq 各自对应的 1 级高限制报警值,或者高压缸压比或主蒸汽压力与其设定值偏差 \leq 各自对应的 1 级低限制报警值;

b. 自动状态下闭锁关条件为高压缸压比、高压缸一段与二段抽汽压力差、主蒸汽压力与其设定值偏差任一项 \geq 各自对应的 1 级高限制报警值,或者

中压缸压比、高压旁路供热阀前与低压旁路供热阀前蒸汽流量差、高压旁路供热阀后蒸汽温度与高压缸排汽压力对应饱和温度差任一项 \leq 各自对应的 1 级低限制报警值;

c. 自动或手动状态下超驰开条件为高压缸压比或高压缸一段与二段抽汽压力差 \geq 各自对应的 2 级高限制报警值;

d. 自动或手动状态下超驰关条件为高压缸排汽压力或温度、中压缸四段与五段抽汽压力差任一项 \geq 各自对应的 2 级高限制报警值,或者高压缸压比 \leq 2 级低限制报警值;

e. 自动或手动状态下保护关条件为高压旁路供热阀后蒸汽压力或温度 \geq 各自对应的 3 级高限制报警值,或者机组辅机故障减负荷(RB)、锅炉 MFT、汽轮机跳闸、发电机解列、低压旁路供热阀保护关、高压旁路供热阀前隔离阀全关任一项信号已触发,或者高压旁路供热阀前与低压旁路供热阀前蒸汽流量差 \geq 3 级高限制报警值或 \leq 3 级低限制报警值,同时工作面或非工作面推力瓦温 \geq 3 级高限制报警值;

f. 切手动条件为高压旁路供热阀指令反馈偏差大、阀位反馈异常、保护关条件、手动状态下闭锁条件、高压旁路供热阀前蒸汽流量异常或与其设定值偏差大、人为切手动任一项信号已触发;

g. 控制对象为高压旁路供热阀前实测流量或计算流量,设定值为供热低压旁路供热阀前流量设定值 - 高压旁路供热减温水流量测量值 + 偏置。

(3) 高压旁路供热减温水隔离阀

a. 阀门开启允许条件为高压旁路供热阀阀位反馈 \geq 预设值,且高压旁路供热阀前隔离阀全开;

b. 阀门连锁全开条件为高压旁路供热阀阀位反馈 > 预设值;

c. 阀门连锁全关条件为高压旁路阀阀位反馈 < 预设值。

(4) 高压旁路供热减温水调节阀

a. 阀门连锁全关条件为高压旁路供热阀阀位反馈 < 预设值,或高压旁路供热阀保护关信号已触发;

b. 切手动条件为高压旁路供热减温水调节阀指令反馈偏差大、阀位反馈异常、连锁关条件、高压

旁路供热阀后蒸汽温度异常或与其设定值偏差大、人为切手动任一项信号已触发；

c. 控制对象为高压旁路供热阀后蒸汽温度,设定值为高压缸排汽温度 + 偏置。

3.2 低压旁路供热阀组

(1) 低压旁路供热阀前隔离阀

a. 阀门开启允许条件为低压旁路供热阀阀位反馈 < 预设值,且旁路供热投入允许条件全部满足,低压旁路供热阀后隔离阀全开；

b. 阀门连锁全关条件为低压旁路供热阀保护关信号已触发。

(2) 低压旁路供热阀

a. 自动状态下闭锁开条件为高压缸压比、高压缸一段与二段抽汽压力差、低压旁路供热阀后蒸汽流量、低压旁路供热阀后蒸汽温度任一项 \geq 各自对应的 1 级高限制报警值,或者中压缸压比、再热蒸汽压力与其设定值偏差、高压旁路供热阀前与低压旁路供热阀前蒸汽流量差任一项 \leq 各自对应的 1 级低限制报警值；

b. 自动状态下闭锁关条件为高压缸排汽压力或温度、中压缸压比、中压缸四段与五段抽汽压力差、再热蒸汽压力与其设定值偏差、高压旁路供热阀前与低压旁路供热阀前蒸汽流量差任一项 \geq 各自对应的 1 级高限制报警值,高压缸压比或低压旁路供热阀后蒸汽温度与低压旁路供热阀后蒸汽压力对应饱和温度差 \leq 各自对应的 1 级低限制报警值；

c. 自动或手动状态下超驰开条件为高压缸排汽压力或温度、中压缸四段与五段抽汽压力差任一项 \geq 各自对应的 2 级高限制报警值,或者高压缸压比 \leq 2 级低限制报警值；

d. 自动或手动状态下超驰关条件为高压缸压比或高压缸一段与二段抽汽压力差 \geq 各自对应的 2 级高限制报警值；

e. 自动或手动状态下保护关条件为低压旁路供热阀后蒸汽压力或温度 \geq 各自对应的 3 级高限制报警值,或者机组 RB、锅炉 MFT、汽轮机跳闸、发电机解列、热网解列、低压旁路供热阀前/后隔离阀全关、高压旁路供热阀保护关任一项信号已触发,或者高

压旁路供热阀前与低压旁路供热阀前蒸汽流量差 \geq 3 级高限制报警值或 \leq 3 级低限制报警值,同时工作面或非工作面推力瓦温 \geq 3 级高限制报警值；

f. 切手动条件为低压旁路供热阀指令反馈偏差大、阀位反馈异常、保护关条件、手动状态下闭锁条件、低压旁路供热阀前蒸汽流量异常或与其设定值偏差大、人为切手动任一项信号已触发；

g. 控制对象为低压旁路供热阀后压力或低压旁路供热阀前流量,设定值为热网母管供热压力 + 偏置或热网供热总流量 - 中压缸排汽供热量 - 低压旁路供热减温水流量 + 偏置。

(3) 低压旁路供热减温水隔离阀

a. 阀门开启允许条件为低压旁路供热阀阀位反馈 \geq 预设值,且低压旁路供热阀前隔离阀全开,且低压旁路供热阀后隔离阀全开；

b. 阀门连锁全开条件为低压旁路供热阀阀位反馈 > 预设值；

c. 阀门连锁全关条件为低压旁路供热阀阀位反馈 < 预设值。

(4) 低压旁路供热减温水调节阀

a. 阀门连锁全关条件为低压旁路供热阀阀位反馈 < 预设值或低压旁路供热阀保护关信号已触发；

b. 切手动条件为低压旁路供热减温水调节阀指令反馈偏差大、阀位反馈异常、连锁关条件、低压旁路供热阀后蒸汽温度异常或与其设定值偏差大、人为切手动任一项信号已触发；

c. 控制对象为低压旁路供热阀后蒸汽温度,设定值为中压缸排汽温度或热网母管温度。

4 改造后效果及应用

为验证灵活性改造后旁路供热运行效果,案例机组采用高/低压旁路抽汽与中压缸排汽联合供热的方式,在供热季开展了性能验证。改造后旁路供热工况数据统计如表 5 所示。各工况下高/中压缸压比、各监视段压差、高/低压旁路供热流量差、推力瓦温、轴向位移等安全指标均在正常范围内;中压调节阀不参与调节再热蒸汽压力时,深度调峰下机组负荷最低为 109.9 MW,供热总流量仅为 237.8 t/h。

表 5 案例机组改造后旁路供热工况数据汇总

Tab. 5 Summary of data of bypass heating conditions after case unit's reconstruction

参 数	中压调节阀不参与调节再热蒸汽压力			中压调节阀参与调节再热蒸汽压力		
	工况 1	工况 2	工况 3	工况 4	工况 5	工况 6
机组负荷/MW	140.00	119.30	109.90	140.80	130.70	120.70
主蒸汽温度/℃	564.50	564.90	566.20	564.80	564.80	564.70
主蒸汽压力/MPa	16.87	14.62	12.70	17.53	16.05	14.79
主蒸汽流量/t·h ⁻¹	556.10	458.50	495.50	566.30	525.80	474.90
高压旁路供热阀前蒸汽流量/t·h ⁻¹	111.50	114.00	94.10	171.30	156.50	134.50
高压旁路供热减温水流量/t·h ⁻¹	16.10	16.50	14.80	23.80	21.30	19.10
高压旁路供热阀开度/%	16.70	17.90	17.60	20.60	20.70	19.90
高压缸压比	4.12	4.05	4.20	3.85	3.88	3.97
高压缸一段与二段抽汽压差/MPa	1.20	1.00	0.90	1.17	1.07	1.01
高压缸排汽温度/℃	307.90	304.60	311.50	311.30	311.10	311.90
高压旁路阀后蒸汽温度/℃	320.50	314.80	303.90	312.00	314.00	309.30
再热蒸汽温度/℃	556.20	547.50	549.10	559.50	558.00	553.70
再热蒸汽压力/MPa	1.92	1.69	1.50	2.20	1.99	1.85
再热蒸汽流速/m·s ⁻¹	75.00	74.50	75.00	75.00	75.00	75.00
中压调节阀开度/%	100.00	100.00	100.00	42.00	42.00	42.00
低压旁路供热阀前蒸汽流量/t·h ⁻¹	148.90	131.90	126.10	202.80	194.50	174.50
低压旁路供热减温水流量/t·h ⁻¹	32.60	28.40	28.40	48.70	42.70	41.00
低压旁路供热阀开度/%	22.00	22.00	23.80	25.90	25.90	25.80
中压缸压比	7.47	7.96	6.20	7.62	8.08	7.82
中压缸四段与五段抽汽压差/MPa	0.19	0.17	0.11	0.19	0.18	0.16
高/低压旁路供热流量差/t·h ⁻¹	-37.40	-17.90	-31.90	-31.50	-38.00	-40.00
中压缸排汽供热压力/MPa	0.18	0.12	0.15	0.18	0.13	0.12
低压旁路供热阀后蒸汽温度/℃	219.20	234.60	30.60	240.20	238.00	235.80
低压旁路供热阀后蒸汽压力/MPa	0.11	0.03	0.01	0.16	0.10	0.05
旁路供热流量/t·h ⁻¹	181.50	160.30	154.50	251.50	237.20	215.50
中压缸排汽供热流量/t·h ⁻¹	141.10	138.90	83.30	154.80	127.90	136.60
中压缸排汽与旁路供热总流量/t·h ⁻¹	322.60	299.20	237.80	406.30	365.10	352.10
正向推力瓦温度/℃	66.55	66.73	63.20	66.58	65.95	64.68
反向推力瓦温度/℃	55.75	56.88	56.73	56.58	56.78	56.40
轴向位移/mm	0.23	0.22	0.12	0.22	0.21	0.21

根据设计参数,抽凝工况下机组电负荷在 30% THA 时中压缸排汽最大供热流量为 85 t/h。由表 5 可知,机组负荷降至 109.9 MW (31% THA) 时,中压缸排汽供热流量为 83.3 t/h,已接近上限,因此若要继续增大总供热量,需提升旁路供热量,但此时旁路供热量为 154.5 t/h,再热蒸汽流速已达到安全上限值 75 m/s (标准要求为 60~90 m/s^[23-24]),若想进一步提升旁路供热量,只有通过中压调节阀参调提升

再热压力,从而降低再热蒸汽流速。当中压调节阀手动关至不改造条件下的安全开度下限(42%),在工况 4 下机组电负荷为 140.8 MW 时,相比工况 1 总供热量从 322.6 t/h 提升至 406.3 t/h;在工况 6 下机组电负荷为 120.7 MW 时,相比工况 2 总供热量从 299.2 t/h 提升至 352.1 t/h。

本次案例机组旁路供热改造并未涉及中压调节阀,导致中压调节阀无法长时间频繁参调运行,后续

将进行中压调节阀改造,同时开展再热蒸汽流速安全范围研究并综合评估再热蒸汽流速超限运行对机组的影响,以进一步提高机组旁路供热的深度调峰能力。

5 结 论

(1) 通过更换高压旁路阀并新增一套独立的低压旁路即可实现中压缸排汽与高/低压旁路联合供热改造,同时满足机组深度调峰的热电负荷需求。

(2) 旁路供热运行模式对汽轮机旁路及本体相关运行参数会产生影响,应针对高/低压旁路设计单独的供热控制保护策略,使高/低压旁路供热阀组在供热调节过程中能够实现安全参数的等级限制,并按报警、闭锁、超驰、保护分级别连锁高/低压旁路供热阀动作,同时还应考虑特殊工况下各调节阀的自动与手动切换条件。

(3) 通过在案例机组的实际应用,本文提出的控制保护策略有效提高了旁路供热系统正常运行与工况切换的安全可靠性,保证机组深度调峰电负荷可降至 109.9 MW (31% THA)。

(4) 在中压调节阀未改造及再热蒸汽流速不大于 75 m/s 的前提下,中压调节阀手动参调后,电负荷为 140.8 MW (40% THA) 时总供热量为 406.3 t/h,满足 400 t/h 的热网实际需求;电负荷继续降至 120.7 MW (35% THA) 时总供热量仍可维持在 352.1 t/h。后续将开展中压调节阀改造及再热蒸汽流速安全性评估研究,以进一步增强机组旁路供热模式下的深度调峰及热电解耦能力。

参考文献:

- [1] 王相宇,任洪波,吴 琼,等.面向碳中和的多源异质全可再生能源系统优化规划方法研究[J].热能动力工程,2022,37(7):136-145.
WANG Xiangyu,REN Hongbo,WU Qiong,et al. Research on optimal planning method of multi-source heterogeneous all-renewable energy system facing carbon neutrality[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2022,37(7):136-145.
- [2] 刘 纯,屈姬贤,石文辉.基于随机生产模拟的新能源消纳能力评估方法[J].中国电机工程学报,2020,40(10):3134-3143.
LIU Chun,QU Jixian,SHI Wenhui. Evaluating method of ability of accommodating renewable energy based on probabilistic production simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10):3134-3143.
- [3] 张智刚,康重庆.碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J].中国电机工程学报,2022,42(8):2806-2818.
ZHANG Zhigang,KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a carbon neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(8):2806-2818.
- [4] 侯玉婷,李晓博,刘 畅.火电机组灵活性改造形势及技术应用[J].热力发电,2018,47(5):8-13.
HOU Yuting,LI Xiaobo,LIU Chang. Flexibility reform situation and technical application of thermal power units[J]. Thermal Power Generation,2018,47(5):8-13.
- [5] 居文平,吕 凯,马汀山,等.供热机组热电解耦技术对比[J].热力发电,2018,47(9):115-121.
JU Wenping,LYU Kai,MA Tingshan,et al. Comparison of thermo-electric decoupling techniques for heating units[J]. Thermal Power Generation,2018,47(9):115-121.
- [6] 高 宽,鲍文龙,丁阳俊.大型汽轮机深度调峰时抽汽供热的经济性分析[J].热能动力工程,2020,35(9):16-21.
GAO Kuan,BAO Wenlong,DING Yangjun. Economical analysis for a large-sized unit of steam extraction under deep regulating load[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2020,35(9):16-21.
- [7] 谭增强,王一坤,牛拥军,等.双碳目标下煤电深度调峰及调频技术研究进展[J].热能动力工程,2022,37(8):1-8.
TAN Zengqiang,WANG Yikun,NIU Yongjun,et al. Research progress of deep peak regulation and frequency modulation technology for coal-fired power plant under double-carbon targets[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2022,37(8):1-8.
- [8] 王占洲,曹丽华,司和勇.汽轮机低压缸旁路供热的电出力调节能力分析[J].汽轮机技术,2021,63(4):297-302.
WANG Zhanzhou,CAO Lihua,SI Heyong. Analysis on power output regulation ability of steam turbine of low pressure cylinder bypass heating[J]. Turbine Technology,2021,63(4):297-302.
- [9] 周国强,赵树龙.汽轮机高低压旁路联合供热应用研究[J].东北电力技术,2019,40(11):1-4.
ZHOU Guoqiang,ZHAO Shulong. Application of HP-LP bypass system combining with heating technology[J]. Northeast Electric Power Technology,2019,40(11):1-4.
- [10] 宣伟东.300 MW 机组高低旁路联合供热改造实践分析[J].节能技术,2020,38(6):561-564.
XUAN Weidong. Practical analysis of high and low bypass combined heating system for 300 MW units[J]. Energy Conservation Technology,2020,38(6):561-564.
- [11] 蒋春雷,刘永利.330 MW 汽轮机高低压旁路联合供热应用探究[J].黑龙江电力,2020,42(6):555-559.
JIANG Chunlei,LIU Yongli. Application on combined heating of HP-LP bypass in 330 MW steam turbine[J]. Heilongjiang Electric

- tric Power,2020,42(6):555-559.
- [12] 王海成. 350 MW 超临界机组高低压旁路供热技术分析[J]. 黑龙江电力,2020,42(3):256-259,263.
WANG Haicheng. Analysis of high and low pressure bypass heating technology for 350 MW supercritical unit[J]. Heilongjiang Electric Power,2020,42(3):256-259,263.
- [13] 高耀崑. 火电机组灵活运行控制关键技术研究[D]. 北京:华北电力大学,2019.
GAO Yaokui. Research on key technologies of flexible operation control of thermal power units[D]. Beijing:North China Electric Power University,2019.
- [14] 刘畅,耿林霄,王 珩,等. 高低旁路联合供热改造控制策略研究[J]. 热力发电,2020,49(11):126-132.
LIU Chang,GENG Linxiao,WANG Heng,et al. Control strategy in transformation of high and low pressure bypass combined heat supply[J]. Thermal Power Generation,2020,49(11):126-132.
- [15] 邢智炜,康静秋,刘 磊,等. 供热储能和深度调峰工况下火电机组旁路供热自动控制策略研究与应用[J]. 热力发电,2023,52(2):136-145.
XING Zhiwei,KANG Jingqiu,LIU Lei,et al. Research and application of automatic control strategy for bypass heating of thermal power units under deep peak shaving and heating storage conditions[J]. Thermal Power Generation,2023,52(2):136-145.
- [16] 薛朝囡,杨荣祖,王 汀,等. 汽轮机高低旁路联合供热在超临界 350 MW 机组上的应用[J]. 热力发电,2018,47(5):101-105.
XUE Zhaonan,YANG Rongzu,WANG Ting,et al. Application of turbine HP-LP bypass system combining with heating in supercritical 350 MW unit[J]. Thermal Power Generation,2018,47(5):101-105.
- [17] 宋 浩,陈晓利,高继录,等. 多供热机组多模式深度调峰协同运行技术路线研究[J]. 汽轮机技术,2021,63(6):448-450,457.
SONG Hao,CHEN Xiaoli,GAO Jilu,et al. Study on the technical route of multi-mode deep peak-shaving cooperative operation of multi-heating units[J]. Turbine Technology,2021,63(6):448-450,457.
- [18] 章 艳,吕 泉,李 杨,等. 四种热电厂电热解耦改造方案的运行灵活性剖析[J]. 电力系统自动化,2020,44(2):164-172.
ZHANG Yan,LYU Quan,LI Yang,et al. Analysis on operation flexibility of combined heat and power plant with four improved power-heat decoupling schemes[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(2):164-172.
- [19] 庞春风,张德利,李祥勇,等. 基于 Ebsilon 的供热机组灵活性改造研究[J]. 汽轮机技术,2023,65(2):114,127-130.
PANG Chunfeng,ZHANG Deli,LI Xiangyong,et al. Research on flexibility modification of heating unit based on Ebsilon[J]. Turbine Technology,2023,65(2):114,127-130.
- [20] 黄嘉骐,刘永林,付亦葳,等. 200 MW 机组蒸汽旁路热电解耦能力评估[J]. 热力发电,2018,47(10):90-95.
HUANG Jiasi,LIU Yonglin,FU Yiwei,et al. Thermo-electricity decoupling capacity evaluation of steam bypass for a 200 MW power unit [J]. Thermal Power Generation,2018,47(10):90-95.
- [21] 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.
- [22] 河北省发展和改革委员会. 京津唐电网火电机组调节能力提升奖励办法(试行)[EB/OL]. 2023-06-25. https://hbdrc.hebei.gov.cn/ndjh_1231/202309/t20230906_82119.html.
Hebei Development and Reform Commission. The measures for-regulatory capacity promotion incentives of thermal power unit in Beijing-Tianjin-Tangshan power grid (for trial implementation) [EB/OL]. 2023-06-25. https://hbdrc.hebei.gov.cn/ndjh_1231/202309/t20230906_82119.html.
- [23] GB 50764-2012,电厂动力管道设计规范[S].
GB 50764-2012,Design code of power piping for power plant[S].
- [24] DLT 5054-2016,火力发电厂汽水管道设计技术规定[S]. DLT 5054-2016,Code for design of steam/water piping of fossil-fired power plant[S].

(王治红 编辑)