

深度调峰工况电锅炉与旁路供热方案的可行性对比分析

文/李成虎
国能广投柳州发电有限公司

摘要：针对电锅炉和旁路供热改造方案，以某350 MW机组改造案例为基础，分别从技术特点和经济性等方面进行了分析比较。通过对比分析得出旁路供热方案较电锅炉供热方案的投资收益比更高，其热经济性的差异主要是因为电锅炉方案增加了一级能量转换，导致热能利用率降低，另外旁路供热改造时必须要考虑低压缸的低负荷运行安全性，防止末级叶片水蚀和鼓风对低压缸带来的危害。

关键词：深度调峰；电锅炉；旁路供热；改造方案；低负荷运行安全性

近年来，随着新能源发电装机容量的持续快速增长，其发电出力的随机性和不稳定性要求电力系统亟需提高其调峰能力。从我国当前的能源结构分析，煤电机组依然是当下的主力电源，因此只有增加煤电机组的调峰能力，才能从根本上提高电力系统的调峰能力，满足消纳新能源电量的需求。

煤电机组的调峰能力主要受到锅炉低负荷稳燃和脱硝、汽轮机低压缸低负荷的安全性、工业或采暖热负荷三个因素限制。一般情况下，纯凝机组深度调峰至30%负荷以下才需要对锅炉和汽轮机本体进行改造，而对于有稳定热负荷的机组，通过电锅炉供热改造或旁路供热改造可以使得锅炉蒸发量高于30%，从而避免低负荷稳燃和脱硝等问题，进而减少设备改造投资。本文以某350 MW机组为例，通过对比电锅炉和旁路工业供热改造方案，分别从技术特点及经济性等方面进行分析比较，指出了两种方案各自的优缺点。

供热原理及特点分析

1. 电锅炉供热技术

电锅炉供热技术主要分为电极式锅炉和固体蓄

热式电锅炉，其原理是通过消纳机组多余发电量，将水加热至饱和蒸汽，然后通过电过热器产生满足温度及压力需求的工业蒸汽，从而满足机组的深度调峰要求。相对于传统的燃煤锅炉，电锅炉具有以下优点：①占地面积小，节能环保，零排放，辅机总功耗小；②启动速度快，冷态启动仅需20~30 min即可达到满载运行；③可实现5%~100%负荷的无极调节，系统相对简单，自动化程度高，运行维护成本低。

图1为电锅炉供热系统示意图。

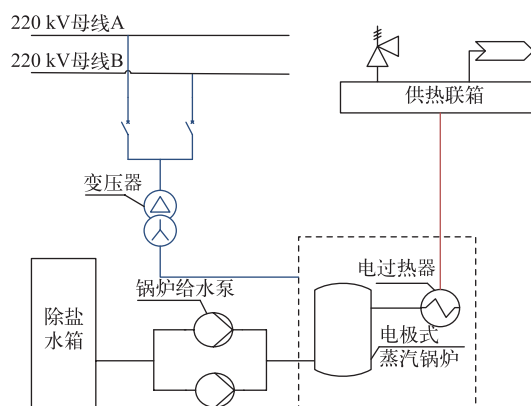


图1 电锅炉供热系统示意图

2. 旁路供热技术

旁路供热技术是将多余部分主蒸汽通过高旁输送至高压缸排汽，该部分蒸汽经锅炉再热器后作为供热汽源，多余蒸汽经低旁减温减压后进入凝汽器，在实现热电解耦的同时，满足对外工业供热的需求。

为保证高低旁路在纯凝工况运行时的正常使用，改造后高低旁路进出口设计蒸汽参数与改造前保持一致，其中高旁蒸汽流量与低旁蒸汽流量的匹配方式是影响机组供热运行的关键因素，只有高旁蒸汽流量与低旁蒸汽流量适当匹配，才能保证机组的运行经济性和安全性。该技术最大的优点是防止锅炉再热器温度超限和汽轮机轴向推力超限的发生。图2为旁路供热系统示意图。

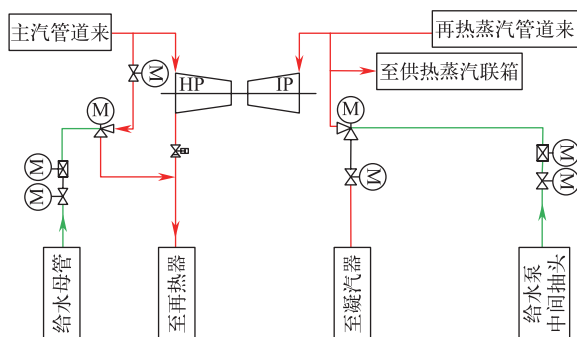


图2 旁路供热系统示意图

供热改造方案

某电厂为两台350 MW超临界机组，30%额定负荷及以上可通过再热段抽汽供热，满足热用户需求。为响应国家及区域电网关于煤电机组深度调峰的政策，计划实施机组灵活性改造，使得机组深度调峰至20%额定负荷时，仍然能够满足供热蒸汽温度350~380℃，压力1.2~1.5 MPa，最小供热蒸汽流量60 t/h的工业供汽要求，考虑到厂区周边工业热负荷较为稳定，要求锅炉侧不进行改造。下面主要对电极式锅炉改造方案和旁路供热改造方案进行对比分析。

1. 电极式锅炉供热改造方案

方案中拟设置两台30 t/h的电极式蒸汽锅炉及相匹配的电过热器，负荷可以在5%~100%的出力范围内无极调节，电源从220 kV母线接出，经降压后提供6 kV的电源。改造后，当两台机组需要深度调峰至20%额定负荷时，可以保持机组实际负荷30%以上，通过电锅炉消纳机组多余发电量，实现机组

的深度调峰要求。

(1) 电极锅炉方案设备选型

设计蒸汽量：60 t/h；设计蒸汽压力为1.5 MPa，设计蒸汽温度为380℃。

1) 设备所需功率计算。系统设计的电热转换效率按照99%计算，电极式蒸汽锅炉将60 t/h的除盐水由15℃升温至198℃的饱和蒸汽，然后由电过热器将饱和蒸汽升温至380℃的过热蒸汽，并供入蒸汽联箱。

电极式蒸汽锅炉所需功率为

$$Q=60 \div 3.6 \times (2791 - 64.7) \div 0.99=45.9 \text{ (MW)}$$

电过热器所需功率为

$$Q=60 \div 3.6 \times (3213 - 2791) \div 0.99=7.11 \text{ (MW)}$$

设备总功率为电极式蒸汽锅炉所需功率与电过热器所需功率之和，设备总功率为53 MW。

2) 设备容量配置。考虑到两台机组各需消纳35 MW的电负荷用于调峰，因此电锅炉功率配置为70 MW，变压器配置80 MV·A的容量。整套系统的实际供热能力能够达到约80 t/h。

(2) 工程投资预估

采用该方案后，1#、2#机组的热电解耦供热改造项目工程静态总投资约4 464万元，主要由电极式热水锅炉、热水除氧器、电加热过热器、控制系统、电气接入系统、土建等费用构成。

2. 旁路供热改造方案

方案中拟采用旁路供汽方式，锅炉维持30%额定蒸发量，通过高旁减温减压将10%主蒸汽旁路至高压缸排汽，该部分蒸汽经锅炉再热器后对外供热，多余蒸汽经低旁减温减压后进入凝汽器。汽轮机负荷可以从30%降至20%额定负荷，同时满足最低供热60 t/h的需求。

(1) 旁路供热能力及系统安全性校核

根据高低旁原设计流速核算20%THA工况下的供热抽汽能力，核算结果是该工况下高低旁串联，热再抽汽60 t/h时，高低旁阀前阀后的蒸汽流速均不超出设计值，能够达到改造后供热工况的要求，因此不需要对原高低旁进行扩容改造。

改造后汽轮机的轴向推力、高排温度、高压缸末级叶片、主辅机等设备均能满足安全需求。但是汽轮机在20%额定负荷运行时，需要对末两级叶片喷涂处理，对喷水系统进行优化改造，防止水蚀和鼓风，并加装低压缸叶片振动监测系统，保证低压

缸的安全。而在实现汽轮机高旁蒸汽流量与低旁蒸汽流量的精确匹配的条件下，本改造方案对锅炉运行安全性的影响很小。

(2) 工程投资预估

该方案主要是更换原有的高旁阀和低旁阀，提升其调节特性，并在高旁阀前和低旁阀后各增加电动截止阀。由于该方案可以利用原有的热再抽汽管道，因此不需要单独增加热再抽汽管道。

采用该方案后，1[#]、2[#]机组的热电解耦供热改造项目工程静态总投资约3 655万元，主要由高旁阀、低旁阀及相关隔离阀、低压缸安全性改造费用、热工控制系统优化及系统调试等构成。

经济效益分析

1. 预期收益

预期收益主要是分析在边界参数一致的情况下，深度调峰至30%额定负荷和20%额定负荷时的收益情况。当前该电厂的供热价格为124.2元/t，上网电价为0.339 6元/(kW·h)，105 MW负荷的电价补贴按照0.15元/(kW·h)计算，70 MW负荷的电价补贴按照0.35元/(kW·h)计算。采用2019—2021年的电厂入炉煤标准煤价格平均值863.61元/t作为标准煤价格。

机组的深度调峰时间预计在每日凌晨2:00—5:00，每日时长约3 h，年度调峰小时按照1 000 h考虑。

机组年度收益=发电收益+调峰收益+供汽收益-煤耗成本-除盐水成本

经计算，深度调峰至20%额定负荷后，机组的调峰收益每年会增加2 625万元，发电收益减少1 105万元。电锅炉和旁路供热方案的年度收益较改造前分别增加1 473.7万元和1 797万元，这主要是因为提高了调峰补贴电价，所以年度收益都有较大增幅。

电锅炉供热方案的煤耗成本较旁路供热方案的煤耗成本每年增加323.33万元，直接体现了不同能量转换模式所带来的热经济性差异，电锅炉供热方式是利用主机将热能转换成电能，然后通过电锅炉将电能转换成热能的过程，相比于旁路供热方案增加了一级能量转换，因此其热经济性较差。

不同改造方案的预期收益见表1。从表1中的数据可以得出，电极式锅炉供热改造方案和旁路

供热改造方案的年度收益分别为3 208.77万元和3 532.10万元，其中旁路供热改造方案的收益较电锅炉供热改造方案每年高323.33万元。

表1 不同改造方案的预期收益

名称	改造前	电锅炉供热方案	旁路供热方案
调峰负荷比例 (%)	30.00	20.00	20.00
发电机功率/MW	105.00	70.00	70.00
锅炉效率 (%)	92.00	92.00	92.00
工业供汽蒸汽流量/ (t/h)	60.00	60.00	60.00
电锅炉功率/MW	—	52.02	—
锅炉热负荷/MW	287.08	291.04	263.14
锅炉煤耗/ (t/h)	38.52	39.05	35.31
调峰补贴/[元/ (kW·h)]	0.15	0.35	0.35
发电收益 (年度)/万元	3 316.19	2 210.80	2 210.80
调峰收益 (年度)/万元	1 050.00	3 675.00	3 675.00
供汽收益 (年度)/万元	745.20	745.20	745.20
煤耗成本 (年度)/万元	3 326.78	3 372.67	3 049.34
除盐水成本 (年度)/万元	49.56	49.56	49.56
年度收益/万元	1 735.06	3 208.77	3 532.10

2. 财务指标

项目资金来源为30%注册资本金，70%银行贷款，工程建设期6个月，投产经营期为建成后15年，经计算其主要财务指标见表2。

表2 项目财务指标一览表

序号	项目名称	电锅炉供热方案	旁路供热方案
1	工程静态总投资 (含价差)/万元	4 464	3 655
2	财务内部收益率 (%)	31.27	47.36
3	财务净现值/万元	7 186.87	10 502.5
4	投资回收期 (含建设期)/年	4.03	3.01

从表2中的数据可以得出，电锅炉供热方案的工程静态总投资较旁路供热方案高约22.1%，投资回收期增长约1.02年。

结束语

采用旁路供热方案需要考虑汽轮机在20%额定负荷运行时的低压缸安全性，并进行相应的技术改造，防止水蚀和鼓风对低压缸的危害。电锅炉供热方式相比于旁路供热方案增加了一级能量转换，因此其热经济性较差，导致其年度收益较低。通过对项目投资成本及年度收益进行分析比较可知，旁路供热改造方案优于电锅炉供热改造方案。**EA**