

跨代升级改造关键技术在大唐洛河600 MW等级超临界燃煤发电机组上的应用

文/金 安 朱如义 李 勇 张 芳 张日旭

1. 大唐安徽发电有限公司; 2. 安徽淮南洛能发电有限责任公司; 3. 中国电力工程顾问集团华东电力设计院有限公司

摘要: 针对早期投运、运行水平不佳的超临界机组, 采用综合性跨代升级改造技术, 集成双升主再热汽温为主的升参数技术、基于宽负荷节能和整体优化的设计优化技术和基于QPSO-ADRC算法的智能控制技术等先进技术, 实现了全国首台超临界600 MW等级机组综合升级改造为超超临界机组, 并成功应用于大唐洛河机组。

关键词: 节能; 超临界; 燃煤发电机组; 升参数; 跨代升级改造

目前, 我国的发电技术已经达到超超临界水平, 新建湿冷机组供电煤耗达到低于255g/(kW·h)水平。但对于早期投运的国产超临界机组, 由于设计和制造年代较早、工艺落后、本身运行参数低、机组老化等原因, 这些机组的平均供电煤耗一般较高, 而且热耗衰减快, 与新建机组的差距很大。根据中电联公布的2020年度电力行业火电机组数据, 我国600 MW等级超临界机组平均供电煤耗约305 g/(kW·h)。因此, 对于早期投运且运行水平不佳的超临界机组, 有必要采用综合性、系统性的节能改造措施, 从整体热力系统的层次分析问题, 充分发挥各项节能技术的优势, 充分挖掘节能改造潜力, 有效降低机组煤耗水平, 减小污染物排放量, 实现“1+1>2”的效果。从而为我国早日实现碳达峰和能源绿色低碳转型, 推动经济高质量发展做出贡献。

问题的提出

(1) 机组煤耗水平落后

大唐洛河5#机组由于受当时国内制造加工工

艺和设备安装水平的制约等因素影响, 使得机组能耗水平较设计值有一定的差距。2017年11月, 委托大唐集团科学技术研究院对机组进行了热力性能试验, 试验结果如下: 经参数修正后, 机组在100%THA负荷工况下热耗率为7 769 kJ/(kW·h), 75%THA负荷工况下热耗率为7 914 kJ/(kW·h), 50%THA负荷工况下热耗率为8 208 kJ/(kW·h), 已明显高于同类型机组的平均热耗水平。另外由于该机组在检修后性能衰减较快, 2018年7月又对机组75%THA的工况点进行了热力性能试验, 试验结果如下: 经二类修正后的热耗率为8 010 kJ/(kW·h), 比9个月前的热耗率又增加了高达96 kJ/(kW·h), 供电煤耗为319.43 g/(kW·h), 煤耗水平明显落后。

(2) 国家政策要求

2021年10月29日, 国家发展改革委、国家能源局下发文件《关于开展全国煤电机组改造升级的通知》(简称《通知》), 《通知》中指出, 到2025年全国火电平均供电煤耗降至300 g/(kW·h)以下。同年11月, 安徽省能源局下发文件《关于报送

煤电机组改造升级方案的通知》，该文件中提到，对煤耗不符合标准的煤电机组，要尽快制定节能改造方案。

(3) 增强市场竞争力

在安徽省区域内，很多现役600 MW级机组已完成或已开始进行升级改造，例如华润阜阳电厂的升参数改造、国电投田集电厂的通流增容和低温省煤器综合改造等。另外，今后区域内还将继续建设一些新的大容量高效燃煤发电机组。因此，随着其他现役机组的改造完成和新机组的投产，大唐洛河5#机组的煤耗水平将更加落后，市场化竞争压力也会更大。

大唐洛河改造技术方案创新设计

1. 超临界机组以双升主再热汽温为主的升参数关键技术

(1) 综合升级改造技术路线研究

对现役超临界机组进行综合升级改造的技术路线通常有三种：一是汽轮机通流改造，在设备参数不变的条件下，通过采用先进的优化技术，提高机组效率；二是汽轮机通流+增容改造，在设备参数不变的条件下，通过增加进汽流量，同时采用先进的优化技术提高机组效率，从而提升机组出力；三是升参数改造，提高机组参数，显著降低机组热耗水平。

本项目对三种技术路线分别进行了研究：技术路线一是目前较为普遍采用的改造方案，可以通过先进的汽轮机本体通流改造等将机组的综合煤耗降低6~8 g/(kW·h)，经济性提升有限。技术路线二只增加机组出力，但是煤耗水平与技术路线一相同，无法体现节能改造的效果，应用场景较少；技术路线三提高机组参数，同时结合主辅机改造，可将机组的综合煤耗降低15~20 g/(kW·h)。降低数值应根据机组改造前水平和具体改造内容相关。该项技术对机组经济性提升效果较为显著。经过比选，选择升参数改造技术。

(2) 升参数改造技术路线研究

对现役机组进行升参数改造的技术路线也有三种：一是提高设备进汽压力；二是提高设备进汽温度；三是设备进汽压力和温度均提高。

经过研究得出如下结论：超临界机组主蒸

汽压力每升高1 MPa，可降低汽轮机热耗20 kJ/(kW·h)；而主蒸汽温度每升高10 ℃，可降低汽轮机热耗约50 kJ/(kW·h)。显然，主蒸汽温度提升的作用更加明显。据调研，我国煤电机组升参数改造案例不多，均采用保持主蒸汽压力、升主汽温或再热汽温的方案。改造案例见表1。

表1 我国升参数改造案例汇总

序号	改造前参数			改造后参数			应用项目
	容量/ MW	主汽参数/ (MPa/℃)	再热 温度 /℃	容量/ MW	主汽参数/ (MPa/℃)	再热 温度 /℃	
1	330	16.7/538	538	330	17.0/541	566	谏壁六期
2	300	16.7/537	537	331	16.7/565	565	安阳2#机
3	300	16.7/537	537	320	16.7/600	600	华润徐州3#机
4	600	16.56/537	537	630	16.66/537	570	国能北仑1#、2#机
5	600	16.67/538	538	600	16.67/566	566	托克托二期
6	600	16.67/538	538	660	16.97/566	566	岱海二期
7	630	16.7/538	538	630	16.7/596	596	岱海一期
8	600	24.2/538	566	650	24.2/566	566	华润常熟1~3#机
9	630	24.2/538	566	630	24.2/566	566	国信扬州3#、4#机

升参数改造主要为：单独升高主汽温；单独升高再热汽温；同时升高主、再热汽温。华润常熟、国新扬州的超临界压力机组进行升主汽温度改造，其余机组均为亚临界机组。

对于超临界机组而言，在升参数的技术路线中，优选提升主、再热蒸汽温度技术路线。本项目比较了由超临界24.2 MPa/566 ℃/566 ℃分别升至24.2 MPa/580 ℃/580 ℃、24.2 MPa/600 ℃/600 ℃和24.2 MPa/600 ℃/620 ℃三种方案。通过技术经济比较，最终优选升至24.2 MPa/600 ℃/600 ℃方案。

2. 基于宽负荷节能和整体优化的设计优化技术

(1) 新的节能技术框架研究

完整的火电机组宽负荷节能设计，一方面需要覆盖汽轮机、锅炉、热力系统和辅机，因为每项技术措施都将与周边的设备相互关联；另一方面，需要研究不同的节能技术措施在每个负荷段的节能效果，尤其需要重点研究的是一些参数的配置，仅对某个工况有较好的节能效果，对某些工况可能会增

加能耗。因此,要兼顾50%~100%负荷范围内的节能,达到最优的平均能耗,必须完成某种取舍和优化。最后,为了保证实现宽负荷节能,性能考核方法需要有相应的改变。

宽负荷节能技术,应在技术经济性比较的框架下实施。宽负荷节能设计中,理论上需要对电量进行积分,并对加权平均煤耗进行优化。在工程实际中的做法是针对以下的加权平均煤耗进行优化

$$B_{\min}=b_{100}E_{100}+b_{75}E_{75}+b_{50}E_{50} \quad (1)$$

式中,下标代表负荷率,比如75代表75%负荷对应的数值, $E_{100}+E_{75}+E_{50}=100\%$ 。

(2) 宽负荷节能技术分类研究

火电机组节能设计大致可分为三类情形:第一类宽负荷节能设计是对所有工况都有节能效果的设计,而且不同负荷、工况下,节能量差别不大,比如提高主汽温度和再热汽温、采用新型高效汽封等,国内目前的节能设计以及相关研究主要针对这种情形;第二类宽负荷节能设计是指对不同负荷节能量明显不同的设计,甚至只对一些工况有节能效果,参数优选时必须有所取舍的设计,比如汽轮机排汽面积优选,这类是宽负荷节能设计需要重点解决的问题,解决这类问题时,预测的平均负荷率等边界条件必须可靠;宽负荷节能第三类情形是中间负荷段节能,而在两端增加能耗,或者反过来,两端节能而中间段增加能耗,使得总体上具有节能效果。这种情形的设计优化和节能量评估相对更复杂一些。

宽负荷节能设计中,需要重视不同负荷下节能量不同,尤其是仅在一部分工况下有利,因而必须对第二类情形和第三类情形有所取舍、优化选择。

对于第二类情形,可以针对平均负荷进行优化设计和性能考核。对于第三类情形,必须综合考虑100%、75%和50%负荷工况,针对加权平均能耗进行优化与性能考核。

(3) 宽负荷节能设计——汽轮机本体

提出新的汽轮机冷端节能设计方案和流程如下:

1) 设计院获得机组的容量、初参数、汽轮机厂家和可靠的环境数据等。

2) 电厂根据新建机组的预期平均负荷率,提出汽轮机热力性能考核指标。

3) 依据大冷端的技术思想,电力设计院、汽轮机厂家以及发电厂共同配合,完成冷端设计优化计算,根据综合成本最低的原则,优选冷端设备参数和汽轮机排汽面积。汽轮机厂家应提供不同排汽面积下的热耗-背压特性曲线和热耗-负荷特性曲线;为充分实现节能设计,设计院选择冷端设备的范围应有所增加。

4) 审核主要约束条件,比如:汽轮机排汽面积和平均排汽容积流量是否属于最佳匹配;是否需要基建阶段就增加机组铭牌;汽轮机膨胀极限背压数值;对采用开式循环水系统的机组,循环泵前池水位的变化规律及影响,凝汽器管束内流速限制;对于全年循环水温的变化幅度,确定循环水系统配置及循环水调度方式。针对这些约束条件,对设计进行局部改进。

5) 国内发电厂需考虑循环水泵调度问题,因此,国内大机组设计时,汽轮机排汽面积应相对国外设计(如德国)小一档。当额定背压为4.5 kPa及以上时,汽轮机的满负荷膨胀极限背压会较高,大致在4 kPa或以上。循环水优化调度问题应当在设计阶段就加以考虑。这样得出的额定背压可靠,设计深度更好,节能效果也更好。

(4) 宽负荷节能设计——热力系统

1) 提高给水温度。给水回热系统优化就是在一定的给水温度下,根据汽轮机结构条件,合理确定回热级数,尽量使各级加热器温升相同,从而使循环热效率最高。对于改造机组来讲,受现场基础条件影响,大范围增加回热级数的改造难度较大,一般沿用原来的回热级数。但对于不同的改造方案可进行优化,如哈汽在超临界600 MW机组改造中,由于级数的调整抽汽口的变化,4抽位置前移,中压排汽位置可多出一级抽汽,可在4~5抽之间增加一级回热加热器,提高回热循环效率。如果给水温度升高而锅炉不改变设计,则锅炉空气预热器进口烟温相应升高,因此汽轮机节能而锅炉效率降低,两者几乎抵消。如果仅仅通过增加空预器容量降低排烟温度,则属于宽负荷节能1类情形。

2) 热力系统优化。通过改变热力系统实现宽负荷节能,最典型有效的设计,就是0号高压加热器搭配低温省煤器。0号高压加热器系统有两种布置方式:方案一是指沿给水流动方向在1号高压加热

统输出、输出导数的误差，进而进行控制和扰动补偿。

传统主汽温控制系统采用串级PID控制策略，内回路PID具有快速消除内扰的特点，外回路负责稳态无差控制。因此，基于ADRC算法的主汽温控制系统仍保留原内回路PID，将原外回路的PID替换成先进的ADRC控制器，改善整体控制系统的品质，如图2所示。

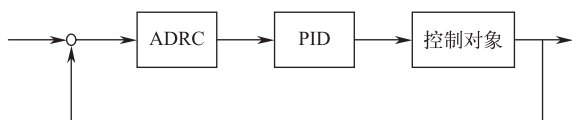


图2 新串级主汽温控制

(2) 基于QPSO-ADRC算法参数寻优

采用自抗扰技术的ADRC控制器，需要调整的参数较多，通过量子粒子群QPSO寻优ADRC控制参数。粒子群算法是基于智能群体的迭代算法，粒子在解空间对最优的粒子进行搜索，用在控制系统参数寻优，能够快速解出最佳控制参数。而量子粒子群优化算法是粒子群算法的一种改进，将量子力学与粒子群算法结合，粒子的运动中心存在某种吸引力，周围的粒子以一定的概率密度出现在空间任意点上。相较于传统粒子群算法，量子粒子群基于不同粒子满足的聚集态，搜索整个解的空间，从而简化了进化方程的形式，减少了算法的参数。

建立QPSO的寻优的ADRC目标函数，以控制系统超调量、稳态偏差、过渡过程时间构建的ADRC目标函数，通过QPSO算法寻找一组最优的ADRC控制参数，解决控制系统快速性和超调量之间的矛盾。

(3) 基于物理规则的主汽温控制

将QPSO-ADRC控制技术应用于大型燃煤机组主汽温系统，取代传统PID控制器，提升主汽温控制系统的鲁棒性和抗干扰能力。目前主汽温控制策略主要采用串级控制，控制方案中未全面考虑机组动态变化时多个关键控制变量之间的关系，主汽温度控制系统易受锅炉燃烧工况影响产生波动，通过

融合汽温智能控制规则、热力学原理，解决高参数超临界机组运行过程中被控对象在变工况时外部扰动问题，提高控制系统响应的快速性、准确性和稳定性。

应用情况

该项集成技术已整体应用于大唐洛河5#机组，经过性能考核试验，机组性能达到预期：BRL工况（不投暖风器）锅炉热效率93.90%，BRL工况（投暖风器）锅炉热效率94.08%，机组热耗7 441.8 kJ/(kW·h)，供电煤耗284.04 g/(kW·h)。相比于改造前，综合供电煤耗降低了17.2 g/(kW·h)。改造为大唐洛河创造了显著经济效益，同时也为600 MW超临界机组提供了一条适应于新型电力系统的安全、高效、节能和环保的技术方案。

推广应用前景

本项目为全国首台超临界600 MW级机组综合升级改造为超超临界机组，改造后大幅降低了供电标准煤耗，减少了煤炭消耗量和污染物排放量，在目前碳达峰、碳中和的大背景下，该成果亦可应用到其他电厂的超临界机组，市场前景广阔，社会意义重大。EA

参考文献

- [1] 国家发展改革委，国家能源局．关于开展全国煤电机组改造升级的通知 [EB/OL]．
https://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/202111/t20211103_1302856.html.
- [2] 谢大幸，石永锋，郝建刚，等．600 MW等级亚临界机组跨代升级改造技术应用研究[J]．发电与空调，2015(6)：23-26.
- [3] 蒋寻寒，田万军，阮圣奇，等．燃煤火电机组宽负荷节能技术的理论与应用[J]．热力透平，2020(6)：85-92.
- [4] 蒋寻寒，邵飞．煤电机组宽负荷运行与节能技术研究[J]．热力透平，2022(3)：147-154.