

# 高效新型 220 MW 亚临界汽轮机优化选型分析

刘浩

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** 以越南某 2×220 MW 火力发电厂工程的设计、采购、施工(EPC)合同要求为出发点,从技术、能耗方面进行分析,根据国内 200 MW 等级超高压汽轮机和 300 MW 等级亚临界汽轮机的特点,通过分析比较两者的差别,提出了 220 MW 等级汽轮机可采用亚临界参数方案,通过优化叶片型式,减少轴封漏气,提高汽轮机汽缸效率,汽轮机热耗降低至 8 026 kJ/kWh,并最终在工程中顺利实施。机组投运后,每年可节约 10 161.5 t 标煤,提高了机组的经济性,创造了较大的经济效益,可为后续同类项目的汽轮机选型提供参考。

**关键词:** 220 MW; 亚临界机组; 超高压机组; 汽轮机; 优化选型

中图分类号: TM621

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)03-0108-04

## Analysis and Optimization on Configuration Scheme of New High Efficient 220 MW Subcritical Turbine

LIU Hao

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

**Abstract:** Based on the demand of EPC contract for MAO KHE 2×220 MW thermal power plant project in VIETNAM, after analyzing the technology and economy in detail, comparing with the different characters between 200 MW superhigh pressure turbine and 300 MW subcritical turbine, the subcritical parameters were introduced in the 220 MW turbine. By Optimizing blade type, reducing seal leakage and improving the efficiency of the turbine cylinder, the heat consumption rate decreased to 8 026 kJ/kWh. After the turbine operating successfully, each unit can save standard coal equivalent 10 161.5 ton per year. Therefore, it will improve the economy of power plant and create a greater economic benefits. Furthermore, it can provide a good reference for choosing high efficient turbine in the same class power unit.

**Key words:** 220 MW; subcritical unit; super high pressure unit; turbine; optimization

在火力发电工程的设计中,机组类型和参数的选择是最为关键的要素,直接影响到机组的经济性。本文以越南某 2×220 MW 火力发电厂工程的设计、采购、施工(EPC)合同要求为出发点,从技术、能耗方面进行分析,提出 220 MW 等级汽轮机可采用亚临界参数方案,并最终在工程中顺利实施,既能很好的满足合同要求,又极大地提高机组的经济性,创造了较大的经济效益,为后续同类项目的汽轮机选型提供参考。

### 1 国内发展现状

对于火力发电机组参数的选择,国内一般按照《大中型火力发电厂设计规范》GB 50660—2011 中“5.1.2 机组新蒸汽参数系列宜符合现行国家标准《发电用汽轮机参数系列》GB/T 754—2007 的有关规定”<sup>[1]</sup>。而在《发电用汽轮机参数系列》GB/T 754—2007“表 2 再热式汽轮机新蒸汽参数及再热温度系列”对各等级汽轮机采用的参数进行详细的要求<sup>[2]</sup>。根据上述规范的要求,200 MW 等级汽轮机为超高压机组,新蒸汽压力为 12.7/13.2 MPa,新蒸汽温度/再热蒸汽温度为 535 ~ 540℃/535 ~ 540℃。因此,国内投产的 200 MW 等级的汽轮机均为超高压汽轮机。

## 1.1 国内200 MW等级超高压机组特点

200 MW等级汽轮机在国内是非常成熟的产品,各大汽轮机制造厂商均有大量的制造业绩。200 MW汽轮机均为超高压机组,参数一般为12.75~13.2 MPa/535℃/535℃,机组型式为单轴、两缸两排汽或三缸双排汽、一次中间再热式、超高压凝汽机组,高压缸为双层缸结构,高压缸配有法兰螺栓加热装置、夹层加热装置等。抽汽回热的级数为7级(即2个高加,1个除氧器,4个低加),或者八级回热抽汽(即3个高加,1个除氧器,4个低加)。由于国内200 MW等级汽轮机通流部份设计较为落后,蒸汽流动效率较低,故其高、中、低压缸效率也较低,在额定工况下其热耗一般不低于8 200 kJ/kW·h。根据有关统计资料显示,200 MW超高压汽轮机高、中、低压缸效率如表1所示。

表1 国内200 MW等级超高压汽轮机汽缸效率表

Table 1 Cylinder Efficiency of 200 MW Turbine in China

项目	高压缸效率	中压缸效率	低压缸效率
200 MW超高压机组	80%~82%	90%~90.8%	78.5%~81.5%

## 1.2 国内300 MW等级亚临界机组特点

国内早期投产的300 MW等级机组均为亚临界机组,在早期作为国内主力发电机型,投运的机组数量众多,也是非常成熟的定型产品。汽轮机参数一般为16.7 MPa/537℃/537℃,机组型式为亚临界、一次中间再热,单轴、高中压合缸、双缸双排汽(或三缸双排汽)、凝汽式,机组的启动方式可以选择高中压缸联合启动及中压缸启动方式<sup>[3]</sup>。有关统计资料显示<sup>[4~7]</sup>,300 MW亚临界汽轮机高、中、低压缸效率如表2所示。

表2 国内300 MW等级亚临界汽轮机汽缸效率表

Table 2 Cylinder Efficiency of 300 MW Turbine in China

项目	高压缸效率	中压缸效率	低压缸效率
300 MW亚临界机组	~87.3%	~92.1%	~89.8%

## 2 高效新型220 MW汽轮机方案优化研究

从上述对国产200 MW等级的超高压汽轮机和国产300 MW等级的亚临界汽轮机热耗水平、机组结构、使用材料等方面的对比分析可以看出<sup>[6]</sup>,国产200 MW等级的超高压汽轮机热耗在8 200

kJ/kWh以上,而国产300 MW等级的亚临界汽轮机其热耗可以降低至8 000 kJ/kWh左右,两者热耗相差约200 kJ/kWh。引起热耗差别大的最主要原因就是主蒸汽参数的不同和各个汽缸的效率差异。

在国产成熟200 MW等级超高压机组和国产300 MW等级亚临界机组基础上,采用高效新型的220 MW亚临界汽轮机,将使其热耗降低至300 MW等级亚临界汽轮机的水平。

因此,高效新型220 MW机组必须具备下列要求:

- 1) 汽轮机的额定参数为16.7 MPa/538℃/538℃,达到亚临界参数。
- 2) 为提高机组的经济性,给水回热级数按8级考虑,即3高加+1除氧+4低加。
- 3) 机组的额定功率在220 MW左右。
- 4) 机组的热耗水平与300 MW亚临界机组相当。

通过与常规超高压200 MW等级汽轮机和亚临界300 MW汽轮机的研究和对比,根据模块化设计理念,对高效新型220 MW汽轮机可以做出下列分析判断:

1) 主蒸汽参数从超高压的12.75 MPa提高至亚临界16.7 MPa以后,在汽轮机相同发电能力的基础上,主蒸汽的流量将会比200 MW等级超高压汽轮机略微减少。

2) 由于常规200 MW超高压汽轮机的主蒸汽流量与高效新型220 MW亚临界汽轮机相差不大,其各个汽缸的通流可在原来常规200 MW超高压汽轮机的基础上进行调整。

3) 由于上述两种汽轮机的中压缸排汽压力及流量差别不大,低压缸可采用常规200 MW超高压汽轮机的低压缸模块。

4) 由于主蒸汽、高温再热蒸汽温度基本一致,常规200 MW超高压汽轮机使用的材料基本满足使用要求。

5) 鉴于高、中压缸进汽压力的提高,对高、中压缸的进行优化设计,满足压力提高的要求。

6) 优化叶形状,提高叶片效率,减少叶顶漏气。

7) 轴封系统的工作情况会影响到滑油中水分含量、凝汽器真空,从而对机组热经济性和安全性

产生很大影响<sup>[8]</sup>。因此,优化轴封型式,采用新型轴封,减少轴封漏气量。

8)对关键部件的结构强度采用当代最先进的有限元进行计算校核,使机组具有最高的可靠性,确保机组能长期安全、可靠运行<sup>[9]</sup>。

通过与汽轮机制造厂商的密切配合,220 MW等级汽轮机采用亚临界参数的方案具有可实施性,通过综合原来积累的200 MW等级超高压汽轮机和300 MW等级亚临界汽轮机技术,可以开发出符合上述要求的高效新型220 MW汽轮机。

### 3 高效新型220 MW汽轮机特点

高效新型的220 MW亚临界汽轮机主要特点如下:

1)汽轮机采用亚临界参数,主蒸汽压力为16.7 MPa,主蒸汽温度538℃,再热蒸汽温度538℃,220 MW等级汽轮机采用亚临界参数为全国首创。

2)汽轮机为三缸两排汽、单轴布置的冲动式凝汽式机组,高、中压部分为分缸结构,具有独立的高压缸和中压缸,低压部分为双流、双排汽的低压缸。因进汽参数较高,为减小汽缸应力,增加机组启停及变负荷的灵活性,高压部分设计为双层缸。低压缸为对称分流式,为三层缸结构。为简化汽缸结构和减小热应力,高压和中压阀门与汽缸之间都是通过管道联接。高压阀悬挂在汽机前运行层下面,中压阀置于中压缸两侧。机组总长约20 m。

高压缸为双层缸,高压通流部分为反向流动,内有1个单列调节级,11个压力级,第9级后有一抽汽口,将第一段抽汽送往8号高压加热器,由高压缸排出的蒸汽由二个排汽口引至再热器,其中一部分抽汽作为第二段抽汽送至7号高压加热器。

再热蒸汽通过2根热段再热汽管进入中压联合汽阀,再经2根 $\Phi 610\text{ mm} \times 55\text{ mm}$ 中压主汽管从中压外缸前部下半两侧进入中压通流部分。

中压缸全部采用隔板套结构,中压缸内有10个压力级,在中压第3级后设有第三段抽汽口,将抽汽送入6号高压加热器。在中压第6级后设有第四段抽汽口,将抽汽送入除氧器(DTR)。在中压第8级后设有第五段抽汽口,将抽汽送入4号低压加热器。中压排汽一部分从上半的两个 $\Phi 1\ 100\text{ mm}$ 中压排汽口进入连通管通向低压缸,另一部分抽汽由从中压外缸下半的六段抽汽口送至3号低压加热

器。

低压部分为对称分流三层缸结构。蒸汽由低压缸中部进入通流部分,分别向前后两个方向流动,经 $2 \times 5$ 个压力级做功后向下排入凝汽器。在低压第1和3级后分别设有第七段和第八段抽汽口,分别供2个低压加热器。

3)汽轮机总内效率为89.23%,其中高压缸效率83.75%,中压缸效率为92.1%,低压缸效率为86.92%,均比200 MW超高压汽轮机各效率高。

4)启动方式:机组采用高、中压缸联合启动方式。

5)机组运行可以按定压和定-滑-定两种方式。调峰运行时宜采用定-滑-定运行方式。机组在90% ECR负荷以上时采用定压运行,在40%~90% ECR负荷时采用滑压运行,在40% ECR以下负荷时采用定压运行。

6)机组在运行中可以进行两种方式的无扰切换。两种控制方式对应两种不同的进汽方式,其中顺序阀方式可以实现机组的喷嘴调节运行;单阀方式可以实现机组的节流调节运行。为减小启动过程中的热冲击,以单阀方式启动即采用节流配汽(全周进汽方式),避免汽缸及转子应力过大,保证机组顺利启动,在达到目标负荷且温度场趋于稳定后可切换到顺序阀方式即喷嘴配汽,保证较好的经济性。

采用喷嘴配汽(部分进汽):高压部分共有4个调节阀,对应于4组喷嘴,当I、II号调节阀阀杆开启到29.25 mm时,III号调节阀开启;当III号调节阀阀杆行程达到19.5 mm时,IV号调节阀开始开启。

采用节流配汽(全周进汽):高压部分4个调节阀根据控制系统的指令按相同的阀位开启,对应于4组喷嘴同时进汽。

7)高效新型220 MW汽轮机主要参数如下:

型号:N226-16.7/538/538

型式:亚临界、一次中间再热、单轴、三缸双排汽、凝汽式汽轮机

最大功率(VWO):236.520 MW

额定功率(TMCR):230.440 MW

能力工况出力(TCC):226.473 MW

额定转速:3 000 r/min

主蒸汽压力:16.67 MPa(a)

主蒸汽温度:538℃

再热蒸汽压力: 3.34 MPa(a)  
 再热蒸汽温度: 538℃  
 排汽压力: 8.0 kPa(a)  
 额定进汽量(TMCR 工况): 695.492 t/h  
 最大进汽量(VWO 工况): 716.357 t/h  
 省煤器入口给水温度: 269.3℃  
 回热抽汽系统: 3(高加) + 4(低加) + 1(除氧器)。  
 高效新型 220 MW 亚临界汽轮机外形图见图 1。

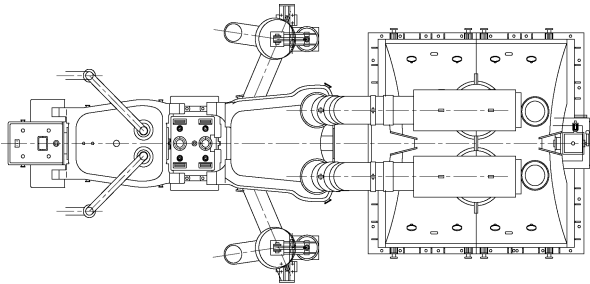


图 1 高效新型 220 MW 亚临界汽轮机外形图  
 Fig. 1 Outline Drawing of high Efficient 220 MW Subcritical Turbine

高效新型 220 MW 亚临界汽轮机相关热平衡数据见表 3。

### 4 高效新型 220 MW 汽轮机经济性

越南某 2 × 220 MW 火力发电厂工程机组主要以基本负荷运行, 年平均发电功率为 208.44 MW, 年利用小时数为 6 500 h。

根据相关设备制造厂家提供的资料, 高效新型的 220 MW 汽轮机与常规 200 MW 等级的超高压汽轮机相比, 造价增加约 10%。

该工程由于采用高效新型的 220 MW 汽轮机, 其热耗仅为 8 026 kJ/kWh, 与常规 200 MW 等级的超高压汽轮机热耗高达 8 200 kJ/kWh 相比, 发电煤耗大大降低, 机组具有较好的经济性。

- 1) 机组年利用小时数为 6 500 h。
- 2) 机组年发电量为:  $208.44 \times 6\,500 = 1\,354\,860$  MWh。
- 3) 机组每年节省标煤量:  $1\,354\,860 \times 7.5/103 = 10\,161.5$  t/a。
- 4) 越南某标煤价为 410 元/t。  
超高压 220 MW 机组与高效新型 220 MW 机组经济比较如表 4:

表 4 超高压 220 MW 机组与高效新型 220 MW 机组经济比较表

Table 4 Comparing Super high Pressure 220 MW unit with high Efficient Subcritical 220 MW unit in Economy

年利用小时数 /h	热耗差 / (kJ/kWh)		年耗标煤量差 / (t · a <sup>-1</sup> )		年燃料费差 / (万元/a)	
	A	B	A	B	A	B
6 500	基准	-174	基准	-10 161.5	基准	-416.6

注: 字母 A 代表超高压 220 MW 机组, 字母 B 代表高效新型 220 MW 机组。

虽然高效新型 220 MW 机组比常规 220 MW 机组设备价格增加约 10% 的投资, 但是从上表可以看出, 采用高效新型 220 MW 机组后, 相比超高压 220 MW 机组, 每台机组每年可以节约煤达 10 161.5 t/a, 每年节省燃料成本为 416.6 万元, 两台机组每年节省燃料成本为 833.2 万元, 因此, 高效新型亚临界 220 MW 机组比超高压 220 MW 机组具有较大的经济性。

### 5 结论

综上所述, 相对于原来国内投产的 200 ~ 220 MW 超高压汽轮机, 高效新型 220 MW 汽轮机采用亚临界参数, 且高、中和低压汽缸具有更高的效率, 可使热耗下降 174 kJ/kWh, 机组投产后每年可节约 10 161.5 吨标煤, 具备较大的经济性和先进性。

表 3 热平衡参数汇总表

Table 3 Parameters of HBD

项 目	发电机功率 /MW	汽轮发电机组热耗值 / (kJ/kWh)	主蒸汽压力 /MPa(a)	再热蒸汽压力 /MPa(a)	高压缸排汽压力 /MPa(a)	主蒸汽温度 /℃	再热蒸汽温度 /℃	主蒸汽流量 / (t · h <sup>-1</sup> )	再热蒸汽流量 / (t · h <sup>-1</sup> )	平均背压 /kPa(a)	补水率 /%	最终给水温度 /℃
VWO 工况	236.1	8 019	16.67	16.67	3.712	538	538	716.36	611.13	8	0	269.3
TMCR 工况	230.2	8 026	16.67	3.25	3.611	538	538	695.5	594.3	8	0	267.5
TCC 工况	226.5	8 063	16.67	3.232	3.591	538	538	695.5	591.4	10.1	3	267.3
FCB 工况	13.6	/	16.67	2.619	2.91	538	538	0	77.3	8	0	230.5

## 4 结论

为解决接地极选址困难问题, 减少接地极的环境影响范围, 推荐充分利用已有接地极, 采取共用接地极的方式。

对于已建的独立接地极, 要对其跨步电压、腐蚀寿命、最大温升、导体载流量等性能指标按共用接地极的要求进行校核。并根据性能指标校核结果, 对不满足共用接地极要求的相关部分进行改造。改造内容包括: 改变极环的外形尺寸、更换大截面的馈电棒、增大焦炭的截面积、更换大截面导流电缆或增加并联电缆根数、中心汇流装置增加构架及隔离开关操作平台等。

接地极改造后应重新评估对其周围环境的影响。主要包括: 接地极对交流电网的影响; 接地极对油气管道设施的影响; 接地极对铁路设施的影响。如不满足要求则应采取相关的抑制或防护措施。

### 参考文献:

- [1] 孙帮新, 陈辉祥. 高压直流输电共用接地极技术研究 [J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 150-153.

SUN Bangxing, CHEN Huixiang. Common Grounding Technique Used in the HVDC [J]. High Voltage Engineering, 2006, 2(12): 150-153.

- [2] 王建武, 张劲松, 李岩, 等. 广域接地极方案初步研究 [J]. 高压电器, 2010, 46(12): 25-28.  
WANG Jianwu, ZHANG Jingsong, LI Yan, et al. Primary Research on HVDC WAN Grounding Electrode [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(12): 25-28.
- [3] DL/T 437—2012, 高压直流接地极技术导则 [S].
- [4] 赵晚君. 高压直流输电工程技术 [M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [5] DL/T 5224—2014, 高压直流输电大地返回系统设计技术规范 [S].
- [6] 王建武, 杜忠东, 李家源, 等. UHVDC 垂直接地极技术经济性分析 [J]. 高电压技术, 2006, 32(9): 59-61.
- [7] 曾嵘, 张波, 赵杰, 等. HVDC 地中直流对交流系统的影响及规律分析 [J]. 高电压技术, 2009, 35(3): 678-682.
- [8] 郭剑. 直接地极对电气化铁路的电磁影响 [J]. 高电压技术, 2013, 39(1): 241-250.
- [9] 曾嵘, 赵杰, 尚春, 等. HVDC 地中直流对交流系统影响的防范措施 [J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 919-925.
- [10] GB/T 3805—2008, 特低电压(ELV)限值 [S].
- [11] GB 50991—2014, 埋地钢管管道直流干扰防护技术标准 [S].
- [12] 翁永基, 李相怡. 埋地管道阴极保护电位 IR 降评估方法的研究 [J]. 腐蚀科学与防护技术, 2004, 16(6): 360-362.

(责任编辑 郑文棠)

(上接第 111 页 Continued from Page 111)

自从该工程在 2012 年 9 月通过 720 h 试运行投产至今, 机组运行稳定, 汽轮机各项指标满足要求。该工程汽轮机选型方案的顺利实施为后续 200 MW 等级汽轮机的选型多提供了一种方案选择, 也为后续同类项目的实施提供了参考。

### 参考文献:

- [1] GB 50660—2011, 大中型火力发电厂设计规范 [S].
- [2] GB/T 754—2007, 发电用汽轮机参数系列 [S].
- [3] 周菁, 段学友. 汽轮机启动方式特点研究与探讨 [J]. 电站系统工程, 2008, 25(6): 34-36.  
ZHOU Jing, DUAN Xueyou. Research and Discussion on Turbine unit Start-up mode and Characteristics [J]. Power System Engineering, 2008, 25(6): 34-36.
- [4] 李跃奇, 杨剑永. 国产亚临界 350 MW 汽轮机经济性分析 [J]. 东北电力技术, 2008(6): 20-22.  
LI Yueqi, YANG Jianyong. Economic Analysis on Home-made Subcritical 350 MW Steam Turbine [J]. Northeast Electric Power Technology, 2008(6): 20-22.
- [5] 陈显辉, 李曦滨, 吴其林, 等. 东方第八代 300 MW 汽轮机通流改造及性能评价 [J]. 东方汽轮机, 2010(3): 11-14.  
CHEN Xianhui, LI Xibin, Wu Qilin, et al. The Reform of

Steam Path and Rating of Merit for Dongfang VIII 300 MW Steam Turbine [J]. Dong Fang Turbine, 2010(3): 11-14.

- [6] 胡光明, 徐仿优, 刘光耀, 等. 沙角 A 电厂 300 MW 机组节能诊断分析 [J]. 热力发电, 2010, 39(6): 5-10.  
HU Guangming, XU Fangyou, LIU Guangyao, et al. Diagnosis and Analysis of Energy Saving for 300 MW unit in Shao Jiao A Power Plant [J]. Thermal Power Generation, 2010, 39(6): 5-10.
- [7] 邵峰, 周胜男. 典型热力系统节能诊断分析 [J]. 热力发电, 2011, 40(7): 59-61.  
SHAO Feng, ZHOU Shengnan. Diagnosis and Analysis of Energy Saving in Typical Thermodynamic System [J]. Thermal Power Generation, 2010, 40(7): 59-61.
- [8] 缪国钧, 葛晓霞. 典汽轮机轴封系统漏汽对机组经济性的影响 [J]. 汽轮机技术, 2007, 49(4): 305-307.  
MIAO Guojun, GE Xiaoxia. Steam Turbine Shaft Gland System Leakage Steam Effect on unit Economic [J]. Turbine Technology, 2007, 49(4): 305-307.
- [9] 查冰峰. 200 MW 汽轮机通流部分改造及效果分析 [J]. 华中电力, 2008, 21(5): 40-43.  
ZHA Bingfeng. The Reconstruction of the 200 MW Turbine flow Section and its Effect [J]. Central China Electric Power, 2008, 21(5): 40-43.

(责任编辑 林希平)