

# 1 000 MW 二次再热超超临界机组工程特点及运行分析

张苏闽

(国家能源集团江苏电力有限公司,江苏 南京 210036)

**摘要:**泰州电厂二期2×1 000 MW 机组是我国“十二·五”节能减排科技支撑示范项目,也是世界首台应用超临界二次再热发电技术的机组,分别于2015年9月和2016年1月投入运行。从二次再热发电技术出发,系统分析了泰州二期工程机组中锅炉钢架结构、受热面管排布置、锅炉调温以及十级抽汽回热系统等优势技术,从机组运行可靠性、环保排放指标以及经济性3个方面分析了机组3 a 来的运行情况以及与国内、外同行业相关机组指标对比。结果表明泰州电厂二期2台超超临界二次再热机组运行稳定、环保排放指标优良、经济效益指标良好。

**关键词:**超超临界二次再热机组;锅炉技术;十段抽汽;性能指标;经济技术分析

中图分类号:TM621

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)02-0159-04

## 0 引言

发展高参数、大容量先进的发电技术,从而提高发电机组的热效率是提高煤电机组能源利用效率和减少污染物排放的主要技术方向。2007年我国首批600℃超超临界机组投运至今,标志着我国一次再热超超临界发电技术的成熟。为进一步提高机组参数,我国正计划发展700℃超超临界机组,但受金属材料等关键技术的限制,此发电技术很难在短期内得到发展<sup>[1-3]</sup>。二次再热技术是在现有一次中间再热基础上通过优化二次再热郎肯热力循环为基本动力循环的发电技术<sup>[4]</sup>。1956年西德投产了国际上首台容量为88 MW的二次再热机组,设计蒸汽参数为34 MPa/610℃/570℃/570℃。随后,美国、丹麦、日本等国家先后建设多台二次再热机组。其中,1998年丹麦 Nordjylland 411 MW 和日本川越电厂700 MW 二次再热机组达到当时火电机组最高水平,其参数分别为29 MPa/582℃/580℃/580℃和31 MPa/566℃/566℃/566℃<sup>[5-10]</sup>。以上表明:国际上有成熟的二次再热发电机组建设和运行经验,但是机组的参数较低,尚未达到超超临界水平。

因此,在700℃超超临界燃煤发电技术研发成熟前,借鉴国际上先进的发电技术,建造比现有超超临界机组发电效率更高的二次再热火电机组被确定为我国“十二·五”国家节能减排科技支撑计划项目。国家能源集团泰州电厂二期工程是世界首台1 000 MW 二次再热超超临界燃煤机组,该工程2台机组自2015年9月和2016年1月投入运行至今已经平稳运行3 a,并顺利通过首次大修。机组运行

参数和大修统计数据表明机组设备状态优良、参数运行良好,实现了建设初期设定的机组运行设计目标。文中从泰州电厂二次再热机组建设出发,结合机组运行3 a 来的经济指标和检修情况,系统分析二次再热机组系统特点-建设质量风险控制-运行经济性三者之间关系,为我国电力行业全面发展百万二次再热超超临界机组技术提供借鉴经验。

## 1 二次再热超超临界机组概况

泰州电厂二期工程2台机组三大主机由上海电气(电站)集团制造,华东电力设计院负责主体设计,主蒸汽压力为31 MPa,主蒸汽温度600℃,再热温度为610℃/610℃。机组发电效率为47.92%,相比于国内常规投运一次再热发电机组的最高效率45.82%高出2.1%;设计发电煤耗为256.28 g/(kW·h),比当今世界最好水平低6 g/(kW·h),比常规百万机组降低约14 g/(kW·h),二氧化硫、氮氧化物和粉尘排放量达到超低排放水平。

对比泰州电厂一期、二期机组锅炉最大连续蒸发量(boiler maximum continuous rating, BMCR)、锅炉额定工况(boiler related load, BRL)参数可以看出在运行温度相近的情况下二次再热机组的一次再热器进、出口蒸汽压力分别提高了123%和130%,一次再热器进出蒸汽温度提高了22%,同时省煤器进口给水温度提高了14℃,见表1。

## 2 超超临界二次再热机组技术特点

焓是指可以被转换功的那部分有效利用能量,目前在工程领域广泛应用焓分析法对电厂进行详细的热力循环分析,获得焓损分布规律等热力参考信息<sup>[11-15]</sup>。

表1 二次、一次再热超超临界机组 BMCR  
及 BRL 参数对比

Table 1 BMCR and BRL parameters comparison  
between ultra-supercritical unit with double-reheat  
cycle and single-reheat cycle

参数	二次再热机组		一次再热机组	
	BMCR	BRL	BMCR	BRL
过热蒸汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	2 710	2 630	2 980	2 712
过热器出口蒸汽压力/MPa	33.03	32.19	26.15	26.07
过热器出口蒸汽温度/℃	605	605	605	605
一次再热蒸汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	2 517	2 426	2 424	2 390
一次再热器进口蒸汽压力/MPa	11.39	11.00	5.11	4.93
一次再热器进口蒸汽温度/℃	429	428	353	351
一次再热器出口蒸汽压力/MPa	11.17	10.78	4.85	4.68
一次再热器出口蒸汽温度/℃	613	613	603	603
二次再热蒸汽流量/(t·h <sup>-1</sup> )	2 161	2 088		
二次再热器进口蒸汽压力/MPa	3.56	3.44		
二次再热器出口蒸汽压力/MPa	3.30	3.19		
二次再热器进口蒸汽温度/℃	432	433		
二次再热器出口蒸汽温度/℃	613	613		
省煤器进口给水温度/℃	314	314	302	300

刘翔等基于热力学第二定律法分析了泰州电厂二期二次再热超超临界机组各部件焓损失率指标,其中锅炉部件焓效率最低 55.3%,而汽轮机焓效率达到 88.1%<sup>[16]</sup>。为保证机组整体焓效率,泰州电厂二期工程在锅炉系统和汽机抽汽系统采用了很多先进技术,主要体现在以下几个方面。

### 2.1 机组参数达到超超临界水平

我国对超超临界机组的定义为主蒸汽温度超过 600 ℃、主蒸汽压力超过 30 MPa。泰州电厂二期工程机组主蒸汽压力 31 MPa,主蒸汽温度 600 ℃,一次/二次再热温度 610 ℃,达到超超临界水平。

为此,机组高温联箱和高温管道选用 A335 P92 铁素体耐热钢;锅炉高温受热面选用 HR3C 和 Super304 奥氏体耐热钢;汽轮机转子和阀门材料选用 FB2 和 CB2 新型铁素体。

### 2.2 机组锅炉优势技术

二次再热锅炉炉型采用单炉膛塔式锅炉,燃烧方式采用切圆燃烧、下部螺旋管圈+上部垂直管圈水冷壁、平衡通风、固态排渣、全钢悬吊结构、露天布置。与一次再热机组不同,二次再热机组锅炉的特点主要体现在以下几个方面:

(1) 锅炉钢架结构得到优化。不同于常规塔式锅炉钢架的筒式框架结构,二次再热机组锅炉采用桁架结构。这种钢架结构不仅能够使燃烧器的支吊受力更为合理,而且与同类型机组相比还节省了约 2 000 t 钢结构用钢。

(2) 受热面布置优化。由于二次再热的引入,过热蒸汽吸热/再热蒸汽吸热比例由一次再热的 82/18 增加到 72/18。二次再热机组不仅对受热面进行合理匹配以满足过热蒸汽和再热蒸汽吸热的变化,同时还需要满足由再热蒸汽出口温度提高而带来的安全性要求。因此,泰州二期工程机组采用组合式高温受热面布置方案,即将一、二次高温再热器冷段前移。这样不仅加强了再热器吸收辐射热的能力,同时由于低温部分前移保证了受热面的安全性,既增加再热器级数和吸热热量,又减少过热器吸热热量和降低烟气侧和蒸汽侧温压。

(3) 调温方式优化。泰州二期工程机组的调温方式为水煤比+两级喷水(过热系统)、燃烧器摆动+烟气挡板(再热系统)。通过煤水比调节和两级喷水控制过热器汽温,利用燃烧器的摆动来调节燃烧中心高度,改变炉膛出口的烟气温度,从而调节再热蒸汽出口温度。由于一、二次高温再热器都设置了部分吸收辐射热的受热面,可以通过火焰中心变化保证一、二次再热器在较大负荷范围内通过燃烧器的摆动达到额定汽温。同时为了平衡低负荷时一、二次再热出口汽温,在设计中引入了烟气挡板,通过烟气挡板的调节改变进入分隔烟道前后烟道的烟气量,从而改变一、二次再热器间的吸热分配比例来达到调节一、二次再热器出口温度平衡的目的。

### 2.3 机组汽机十级抽汽回热系统

泰州电厂二期汽机为五缸串联布置十级抽汽系统,比常规超超临界一次再热机组增加了 1 个超高压缸和二级抽汽回热系统。由于二次再热提高了高压缸和中压缸第一级抽汽过热度,会增加与之对应的加热器换热温差,从而造成不可逆损失。为降低加热器换热温差,泰州二期工程机组的回热系统采用二级外置式蒸汽冷却器,布置在 1 号高加出口,提高给水温度 10 ℃,从而进一步提高机组热效率。

## 3 机组运行性能指标分析

发电技术的先进性一般体现在机组运行可靠性指标、环保指标和技术经济分析 3 个方面,据中国电力联合会公布数据,泰州电厂二期工程获得 2017 年全国火电机组能效水平对标第一名<sup>[17]</sup>。

### 3.1 机组运行可靠性指标

泰州二期机组投入运行已经 3 a 多,至今一直保持安全平稳运行,未发生泄露、爆管等生产事故。运行统计数据表明:在热耗保证(THA)工况下,3

号、4号锅炉效率分别为94.78%和95.12%，优于设计值94.65%；3号、4号汽轮机考核热耗率分别为7 064.87 kJ/(kW·h)，7 069.35 kJ/(kW·h)，优于设计值7 070 kJ/(kW·h)；厂用电率分别为3.63%，3.62%，优于设计值3.7%；发电煤耗分别为256.91 g/(kW·h)，256.15 g/(kW·h)，发电效率分别为47.81%，47.95%，均优于设计指标。2017年3月，泰州电厂二期3号机组顺利完成首次C级检修；2018年4月，泰州电厂二期4号机组顺利完成首次A级检修，对设备进行的各项检查未见异常和超标缺陷。

运行数据统计以及检修期间设备检验结果说明泰州二期工程2台机组达到了超超临界二次再热百万机组设计要求，运行各项指标平稳，安装质量优良。

### 3.2 机组运行环保指标

综合2018年统计指标，泰州电厂二次再热机组年排放指标和国家限值见表2。

表2 机组排放指标对照

Table 2 Emission indicators contrast of units

名称	年累计排放量/t	排放质量浓度/(mg·m <sup>-3</sup> )		降低幅度/%
		实际值	国际限值	
SO <sub>2</sub>	634.65	15	35	57.14
NO <sub>x</sub>	3 820.08	36.6	50	26.8
烟尘	96.09	2.35	10	76.5

由表2数据可知，泰州二次再热超超临界机组实际运行各项排放指标均远远优于国家限值。据测算，机组全年减排SO<sub>2</sub>1 480.75 t、NO<sub>x</sub>4 535.63 t、烟尘408.89 t。

### 3.3 机组运行技术经济分析

#### 3.3.1 成本分析

电厂技术经济分析的主要评价指标为发电成本 $C_{COE}$ ，主要由总投资折旧成本 $C_D$ 、燃料成本 $C_F$ 和运维成本构成 $C_M$ <sup>[18]</sup>。

(1) 总投资折旧成本 $C_D$ 。此项成本为一次性投入，并在 $n$ 年内每年以等额的折旧成本回收，可采用等额支付法计算一二期的折旧成本差额：

$$C_D = PI(1+a) \quad (1)$$

式中： $C_D$ 为年费用； $P$ 为电厂折旧率； $I$ 为电厂初始投资； $a$ 为建设期利息。

(2) 燃料成本 $C_F$ 。

$$C_F = mcN \quad (2)$$

式中： $m$ 为单位燃煤消耗量，g/(kW·h)； $c$ 为燃料价格，按照目前市面价格800元/t计算； $N$ 为平均年发电量，按照单台机组年发电5 500 h计算年发电量为55亿kW·h。

(3) 运行维护成本 $C_M$ 。运行维护成本按照维修系数 $\delta$ (取1%)乘以总投资费用得出：

$$C_M = \delta I \quad (3)$$

综合以上三项得出电厂发电成本：

$$C_{COE} = C_D + C_F + C_M \quad (4)$$

泰州电厂二期实际投资76.5亿元，建设期利息4.9%，电厂折旧率按照5%。据2018年全年统计，泰州电厂二期单台机组发电平均煤耗为265.23 g/(kW·h)。将以上数据代入式(1)一式(4)，可得单台机组投资年折旧成本2.006亿元、年均燃料成本11.670亿元、年运行维护成本0.378亿元和年发电成本14.054亿元。

#### 3.3.2 投资回报率分析

考虑到生产中异常非停 $C_1$ 、设备超标缺陷返修 $C_2$ 、系统改造成本 $C_3$ ，电厂实际运行成本 $C = C_{COE} + C_1 + C_2 + C_3$ 。由于泰州电厂二期未发生异常非停、设备返修和系统改造，所以实际运行成本 $C = C_{COE} = 14.054$ 亿元。

按照目前平均上网电价0.4元/(kW·h)计算，电厂单台机组年发电收入22亿元。

综上，泰州电厂二期单台机组年利润为7.946亿元，2台机组为15.892亿元，投资的收益率为20.77%，回收年限为4.81 a。

#### 3.3.3 技术指标比较

与一次再热百万超超临界机组比较，泰州电厂一期2×1 000 MW超超临界机组建设期投资72亿元，建设期利息4.9%，电厂折旧率按照5%。据2018年全年统计，泰州电厂一期单台机组的发电平均煤耗为287.87 g/(kW·h)。将以上数据代入式(1)一式(4)可得单台机组年发电成本14.914亿元。与同期比较，不考虑机组的 $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ ，泰州电厂一期单台机组年利润为7.086亿元，2台机组为14.172亿元。由此可计算得出泰州电厂一期工程收益率为19.68%，投资回报年限为5.08 a。

比较两项指标，二期工程优于一期工程。

## 4 结语

二次再热发电技术不仅具有热效率高、排放低等优点，同时也具有系统复杂、设备制造和安装难度大、机组运行调试技术要求高等技术难点。该二期工程采用组合式高温受热面布置方案、燃烧器摆动调温方式以及十段抽汽回热系统等技术，不仅能够保证二次再热超超临界机组安全运行，而且在环保排放指标和运行经济性等方面均体现出较明显优势。由于目前我国建设的二次再热机组在国内

外均处于首次,在参数、热力系统以及运行经验等方面有待进一步优化,因此,要在生产中勇于实践,在保证机组安全情况下充分论证、科学设计不断优化机组系统,提高我国二次再热超超临界发电技术水平。

#### 参考文献:

- [1] 张方炜,刘原一,谭厚章,等.超临界火力发电机组二次再热技术研究[J].电力勘测设计,2013(2):34-39.  
ZHANG Fangwei, LIU Yuanyi, TAN Houzhang, et al. Study of secondly reheat technique of supercritical fire power generators [J]. Electric Power Survey & Design, 2013(2):34-39.
- [2] 徐通模,袁益超,陈干锦,等.超大容量超超临界锅炉的发展趋势[J].动力工程,2003,23(3):2363-2369.  
XUTongmo, YUAN Yichao, CHEN Ganjin, et al. Development trend of large capacity ultra-supercritical boilers[J]. Power Engineering, 2003, 23(3):2363-2369.
- [3] 高昊天,范浩杰,董建聪,等.超超临界二次再热机组的发展[J].锅炉技术,2014,45(4):1-3.  
GAO Haotian, FAN Haojie, DONG Jiancong, et al. Development of double reheat ultra-supercritical unit [J]. Boiler Technology, 2014, 45(4):1-3.
- [4] 赵家毅,李千军,杨涛,等.二次再热机组加热锅炉二次风的抽汽过热度利用系统[J].广东电力,2018,31(1):11-16.  
ZHAO Jiayi, LI Qianjun, YANG Tao, et al. Steam extraction superheat degree utilization system of secondary air of heating boiler of secondary reheat unit[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(1):11-16.
- [5] UST Y, GONCA G, KAYADELEN H K. Determination of optimum reheat pressures for single and double reheat irreversible rankine cycle[J]. Journal of the Energy Institute, 2011, 84(4):215-219.
- [6] BLUM R, BUGGER J, KJAER S. AD700 innovations pave the way for 53 percent efficiency[J]. Modern Power Systems, 2008, 8(11):15-19.
- [7] 谷雅秀,王生鹏.一种超超临界二次再热发电系统及其热经济性分析[J].西安理工大学学报,2013,29(3):357-361.  
GUYaxiu, WANG Shengpeng. Thermal economic analysis of a double reheat ultra supercritical pressure unit [J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2013, 29(3):357-361.
- [8] 王月明,牟春华,姚明宇,等.二次再热技术发展与应用现状[J].热力发电,2017,46(8):1-10,15.  
WANG Yue ming, MOU Chunhua, YAO Mingyu, et al. Development and expectation of application of ultra-supercritical double-reheat steam turbines [J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(8):1-10, 15.
- [9] 尹亚宁.二次再热超超临界机组应用现状及发展[J].电站系统工程,2013,29(2):37-38.  
YIN Yaning. Application status and development of USC unit with double reheat cycles [J]. Power System Engineering, 2013, 29(2):37-38.
- [10] FUSHIMI T. 川越火电厂的运行经验[J].国际电力,1997(4):35-40.  
FUSHIMI T. Operation experience of Sichuan yue thermal power plant [J]. International Electric Power for China, 1997(4):35-40.
- [11] 朱明善.能量系统的焓分析[M].北京:清华大学出版社,1988.  
ZHU Mingshan. Analysis of energy system [M]. Beijing: Tsinghua university press, 1998.
- [12] 杨冬,徐鸿,陈海平.引进型300 MW循环流化床锅炉焓效率分析[J].动力工程学报,2010,30(3):180-183.  
YANG Dong, XU Hong, CHENHaiping. Analysis of exergy efficiency of imported 300 MW circulating fluidized bed boiler [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2010, 30(3):180-183.
- [13] 张晓晖,杨荣,卢玫,等.火力电厂热力系统焓分析计算研究[J].动力工程,2004,24(5):703-706.  
ZHANG Xiaohui, YANG Mo, LU Mei, et al. Research on exergy analysis computation of coal-fired unit thermal system [J]. Power Engineering, 2004, 24(5):703-706.
- [14] 陆万鹏,孙奉仲,史月涛.电站锅炉排烟预热能级提升系统焓分析[J].中国电机工程学报,2012,32(23):9-14.  
LU Wanpeng, SUN Fengzhong, SHI Yuetao. Exergy analysis of advanced boiler flue gas heat recovery system in power plant [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(23):9-14.
- [15] 刘强,段远源.超临界600 MW火电机组热力系统的焓分析[J].中国电机工程学报,2010,30(32):8-12.  
LIU Qiang, DUAN Yuanyuan. Exergy analysis for thermal power system of a 600 MW supercritical power unit [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(32):8-12.
- [16] 刘翔,方曹明,范浩杰,等.二次再热超超临界机组焓分析[J].锅炉技术,2016,47(3):1-5.  
LIU Xiang, FANG Caoming, FAN Haojie, et al. Exergy analysis on ultra supercritical power unit with double reheat [J]. Boiler Technology, 2016, 47(3):1-5.
- [17] 中国电力企业联合会.中电联关于公布2017年度全国火电机组能效水平对标结果的通知[Z].北京:中电联理事会办公厅,2018.  
China Electric Power Enterprise Federation. Notice of ITU on announcing the results of national energy efficiency standards for thermal power units in 2017 [Z]. Beijing: General Office of ITU Council, 2018.
- [18] 傅家骥,全允桓.工业技术经济学[M].北京:清华大学出版社,1996.  
FU Jiaji, TONG Yunheng. Industrial technology economics [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1996.

#### 作者简介:



张苏闽

张苏闽(1967),男,硕士,高级工程师,从事电力工程建设管理工作(E-mail:gdtzzsm@163.com)。

(下转第168页)

判方法研究[J]. 浙江电力, 2018, 37(2): 11-15.

YUAN Dan, WANG Yi, LI Weiming, et al. Research on fault diagnosis method for distribution line based on classification model[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(2): 11-15.

[21] 电力系统继电保护产品动模试验: GB/T 26864—2011 [S]. 北京: 中国质检出版社, 2011.

Dynamic model test of power system relay protection products: GB/T 26864—2011 [S]. Beijing: China Quality Inspection Press, 2011.

作者简介:



赵青春

赵青春(1980),男,硕士,高级工程师,从事电力系统继电保护及控制系统研究(E-mail: zhaorc@nrec.com);

徐晓春(1984),男,硕士,高级工程师,从事电力系统继电保护及控制系统研究;

陆金凤(1987),女,硕士,工程师,从事电力系统继电保护及控制系统研究。

## Fault location method for transmission line based on the weighting of reliability

ZHAO Qingchun, XU Xiaochun, LU Jinfeng, CHEN Yulin, ZHU Xiaotong

(NR Electric Co., Ltd, Nanjing 210002, China)

**Abstract:** A fault location method for transmission line based on the weighting of reliability is proposed. First, reactance component is used to reduce the influence of transition resistance on single-ended impedance location algorithm. Second, using single-ended impedance location algorithm to determine the approximate range of the reflected traveling wave's arrival time and solving the problem that single-ended traveling wave location algorithm can not accurately locate the fault in the second half of the line. Third, evaluating the reliability of single-ended impedance location algorithm, double-ended impedance location algorithm, single-ended traveling wave location algorithm and double-ended traveling wave location algorithm. The reliability evaluation criteria includes channel state, transition resistance, fault location and so on. Finally, the final fault location result is obtained based on the weighting of reliability. The simulation results show that the proposed fault location method has strong robustness and high accurate. It will not be affected by the factors such as fault type and line channel status.

**Keywords:** traveling wave location algorithm; impedance location algorithm; reliability; weighting

(编辑 方晶)

(上接第 162 页)

## Engineering characteristics and service economic analysis of 1 000 MW ultra-supercritical unit with double-reheat cycle

ZHANG Sumin

(China Energy Jiangsu Power Co., Ltd., Nanjing 210036, China)

**Abstract:** The 2×1 000 MW unit of Taizhou Phase II Power Plant is a demonstration project of energy saving and emission reduction technology in China during the 12th Five-Year Plan. It is also the first unit in the world applying supercritical secondary reheat power generation technology which was put into commercial operation in September 2015 and January 2016, respectively. Starting from the secondary reheat power generation technology, this paper systematically analyses the advantages of the boiler steel frame structure, heating surface tube arrangement, boiler temperature regulation and ten-stage extraction system in the unit of Taizhou Phase II Project. It also analyses the operation of the unit in the past three years from three aspects of unit operation reliability, environmental emission index and economy, as well as the related units in domestic and foreign industries are compared. The results show that two Ultra Supercritical Secondary Reheating Units in the second phase of Taizhou Power Plant are stable in operation, excellent in environmental protection emission index and good in economic benefit index. Ultra supercritical secondary reheating power generation technology has been successfully realized in China.

**Keywords:** double-reheat ultra-supercritical unit; boiler technology; 10-stage steam extraction; performance indicators; economic and technological analysis

(编辑 钱悦)