

文章编号: 1006-4710(2013)03-0357-05

一种超超临界二次再热发电系统及其热经济性分析

谷雅秀¹, 王生鹏²

(1. 长安大学 环境科学与工程学院, 陕西 西安 710054;

2. 西安热工研究院有限公司, 陕西 西安 710032)

摘要: 超超临界二次再热发电技术是提高电厂燃煤机组发电效率的重要技术方向。通过朗肯循环与理想再热循环循环效率的计算比较, 理想一次再热循环可比朗肯循环效率提高 1.96 个百分点, 采用理想二次再热循环可比朗肯循环效率提高 3.27 个百分点。针对一种蒸汽参数为 31MPa/600℃/620℃/620℃ 的 1000 MW 超超临界二次再热机组的热力系统方案, 进行了机组热经济性分析与计算, 并与蒸汽参数为 26.25MPa/600℃/600℃ 的一次再热机组进行了经济性计算对比。通过热平衡计算, 二次再热机组相对于一次再热的超超临界机组可降低供电煤耗率约 9.22 g/(kW·h), 热耗率降低了 3.34%, 机组净效率提高了约 1.54 个百分点。节能与环保效益显著。

关键词: 超超临界机组; 二次再热; 热耗率

中图分类号: TK212. *4, TK262

文献标志码: A

Thermal Economic Analysis of a Double Reheat Ultra Supercritical Pressure Unit

GU Yaxiu¹, WANG Shengpeng²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China;

2. Xi'an Thermal Power Research Institute Company, Xi'an 710032, China)

Abstract: Double reheat ultra supercritical power generation technology is an important technology to enhance the efficiency of electricity generation in coal-fired power plant. By comparing the cycle efficiency of ideal reheat cycle with that of Rankine Cycle, the ideal single reheat technology can increase the cycle efficiency about 1.96%, while the ideal double reheat technology can increase the cycle efficiency about 3.27%. The thermal economy of a 31MPa/600℃/620℃/620℃ 1000 MW double reheat ultra supercritical pressure unit was analyzed and calculated. Compared with a 26.25 MPa/600℃/600℃ 1000 MW ultra supercritical pressure unit with single reheat, the net coal consumption of the 1000 MW double reheat ultra supercritical pressure unit decreases 9.22 g/(kW·h), the heat rate decreases 3.34%, and the net efficiency increases 1.54%. It has promising energy-saving performance and environmental protection benefit.

Key words: ultra supercritical pressure unit; double reheat; heat rate

中国工业能源消耗在 2002 - 2010 年快速增长, 同时能源需求量和废气排放量也大幅增加, 有学者研究指出工业产出效应是导致我国能源消耗量和二氧化碳排放增长的主要因素, 而工业结构调整并未明显影响能源消耗量的变化, 因此, 节能和环保技术的应用可大大降低能源的消耗和碳排放^[1]。火力

发电是工业耗能和碳排放较大的产业, 因此, 优化产业结构、促进产业绿色发展、提高能源利用效率至关重要。同时节能和环保的二次再热发电技术也日益引起业界更为广泛的关注。

二次再热机组可在一次再热机组的主蒸汽压力、主蒸汽温度、再热蒸汽温度保持不变的基础上,

收稿日期: 2012-05-20

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51106014); 陕西省自然科学基金基础研究计划基金资助项目(2012JQ7022); 西安市建设科技计划基金资助项目(SJW201204)。

作者简介: 谷雅秀, 女, 博士, 讲师, 研究方向为动力工程及工程热物理多相流传热传质性能研究。E-mail: guyx2007@chd.edu.cn。

进一步降低汽轮机的热耗率,提高机组效率,同时二次再热还可降低低压缸排汽湿度,有利于提高汽轮机运行的安全性。本研究从理论上简要分析了一、二次再热对循环效率的影响,计算并给出了二次再热机组最佳第一次再热蒸汽压力和第二次再热蒸汽压力的范围,针对某超超临界二次再热机组计算了其热经济性,为发展二次再热发电技术提供技术参考。

1 国内外二次再热发电技术现状

目前,国外已有数十台二次再热机组的运行业绩,这些机组多在上世纪70-90年代投运,其中采用超超临界参数的有6台。国际上容量最大的二次再热机组是日本川越电厂的1、2号700 MW机组,机组参数为31MPa/566℃/566℃/566℃。1998年投运的丹麦NORDJYLLAND电厂3号410 MW机组,参数为29MPa/582℃/580℃/580℃,机组热效率高达47%。国外二次再热机组的运行业绩表明,超超临界二次再热机组运行可靠、经济性较好,是实现规模化商业应用的发电技术。

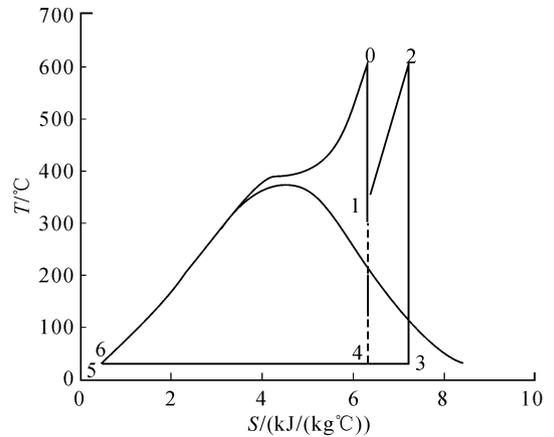
我国目前尚无二次再热机组的运行业绩。国内的三大主机厂、部分高校和科研院所正在进行二次再热技术研发。部分学者对二次再热机组热经济性分析方法进行了研究^[2-6]。我国目前正在研究的超超临界二次再热发电机组蒸汽参数为31MPa/600℃/620℃/620℃。根据我国现有技术储备,有能力解决超超临界二次再热机组的关键技术问题,实现自主设计和国产化。

2 超超临界二次再热发电机组热力系统方案

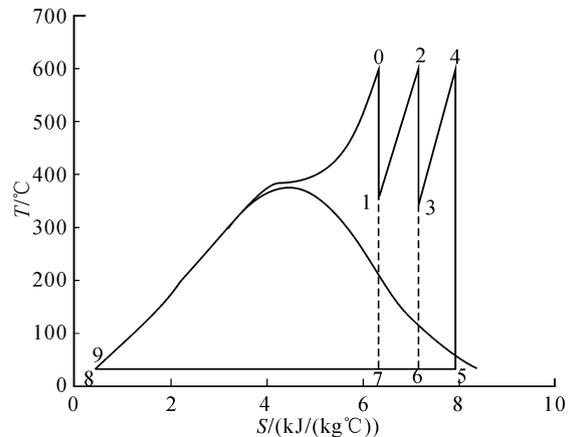
图1(a)为理想超临界参数一次再热蒸汽动力循环的温熵图。图1(a)中过程0-1-4-5-6-0为朗肯循环。过程0-1-2-3-5-6-0为一次再热循环,一次再热循环可认为是在朗肯循环基础上附加了循环1-2-3-4-1。在主蒸汽压力、温度和再热蒸汽温度不变时,随着再热蒸汽压力的提高,附加循环1-2-3-4-1的效率提高,但作功增量和再热吸热量在整个再热循环0-1-2-3-5-6-0中所占比重逐渐减小,即对整个再热循环效率提升的影响逐渐减弱;随着再热蒸汽压力的降低,附加循环1-2-3-4-1引起的作功增量和再热吸热量在整个再热循环0-1-2-3-5-6-0中所占比重逐渐增加,但附加循环1-2-3-4-1的效率降低,对整个再热循环效率提升的影响也将逐渐减弱;

如再热蒸汽压力继续降低,将使整个再热循环0-1-2-3-5-6-0的效率降低。因此,存在一个最佳的再热蒸汽压力,使得整个再热循环的效率达到最大。该结论对二次再热循环同样适用。

图1(b)为理想超临界参数二次再热蒸汽动力循环的温熵图。过程0-1-2-3-4-5-8-9-0为二次再热循环,二次再热循环可认为是在朗肯循环基础上附加了循环1-2-6-7-1和循环3-4-5-6-3。



(a) 一次再热循环温熵图



(b) 二次再热循环温熵图

图1 理想超临界一次再热与二次再热蒸汽动力循环系统温熵图

Fig.1 The tephigram of ideal single reheat & double reheat supercritical steam power cycle

理想一次再热循环或二次再热循环的最佳再热蒸汽压力的求取可以循环净效率 η_c 为目标函数,即:

$$\eta_c = (W - W_p) / Q_c \quad (1)$$

式中, W 为汽轮机轴功率, W_p 为给水泵功率, Q_c 为循环吸热量。

(1)式中,分子与分母均是再热前、后蒸汽焓的函数,而再热前、后蒸汽的焓又由水蒸汽物性和循环中蒸汽的膨胀过程线所决定。理论上可对(1)式通

过求导数的方式来求得 η_c 的极大值,但由于水蒸汽的物性是以高阶分段函数给出的,通常通过软件计算或查表获得,求导数的方法难以简便的求出最佳再热蒸汽压力。本研究通过编制软件,利用数值计算方法求出最佳再热蒸汽压力。

图2显示了主蒸汽压力 26 MPa、温度 600℃、背压 4.9 kPa 的理想再热循环的再热蒸汽压力对循环效率的影响。当再热蒸汽压力与主蒸汽压力的比值为 0.214 时,再热循环效率与朗肯循环效率的比值达到最大,约为 1.043。

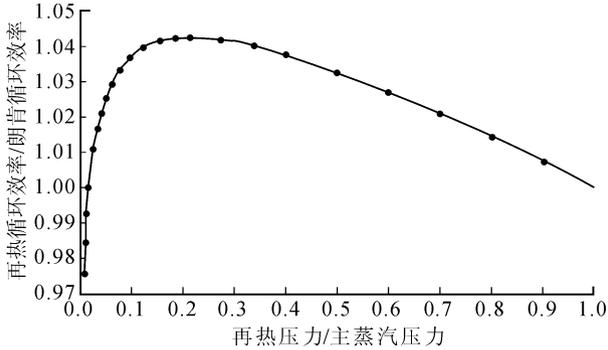


图2 理想一次再热循环的再热压力对再热循环效率的影响

Fig.2 The influence of reheat pressure to unit efficiency of ideal single reheat steam power cycle

在实际循环中最佳再热蒸汽压力还与汽轮机相对内效率、给水回热系统、再热器及管道压损等因素有关,实际再热压力可比无回热的理想再热循环的理论最佳再热压力值略高。对于主蒸汽压力为 24 ~ 32 MPa 的二次再热机组,最佳的第一次再热蒸汽压力可取为主蒸汽压力的 25% ~ 30%,最佳的第二

次再热蒸汽压力可取为主蒸汽压力的 5% ~ 10%。

表1给出了主蒸汽压力为 26 MPa、主蒸汽温度为 600℃ 的朗肯循环效率与再热蒸汽温度为 600℃ 的理想一次再热和理想二次再热循环效率的计算结果。表1中的再热压力为经优化计算所得的最佳值。由表1可看出,在该热源参数和冷源参数之间的理想一次再热循环效率相对朗肯循环提高了1.96个百分点,而采用理想二次再热循环后,循环效率可再提高 1.31 个百分点。

表1 朗肯循环与理想再热循环的循环效率比较

Tab.1 The comparison of the cycle efficiency between the Rankin cycle and ideal reheat cycles

参数	朗肯循环	一次再热	二次再热
主蒸汽压力/ MPa	26	26	26
主蒸汽温度/℃	600	600	600
一次再热蒸汽压力/ MPa	/	5.553	6.307
一次再热蒸汽温度/℃	/	600	600
二次再热蒸汽压力/ MPa	/	/	1.24
二次再热蒸汽温度/℃	/	/	600
排气压力/ kPa	4.9	4.9	4.9
排气温度/℃	32.5	32.5	32.5
循环效率/%	46.03	47.99	49.3

理论分析表明^[7],对再热循环采用回热后还可提高循环效率,但再热降低了回热对提高循环效率的影响。因此,对于带回热的二次再热系统方案,需对再热蒸汽压力和回热系统进行综合优化设计才能获得最佳的循环效率。

本研究提出一种 1000 MW 超超临界二次再热系统,如图3所示。

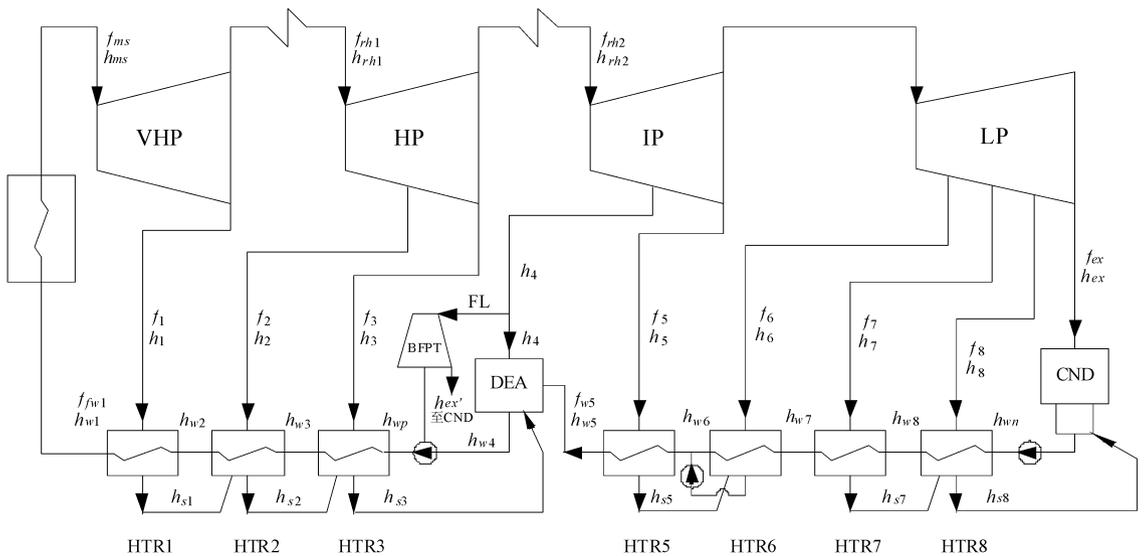


图3 1000 MW 超超临界二次再热机组热力系统

Fig.3 The thermodynamic system of a 1000 MW double reheat ultra supercritical pressure unit

汽轮机比一次再热机组增加一个超高压缸(VHP),超高压缸排汽经第一次再热后进入高压缸(HP),高压缸排汽经第二次再热后进入中压缸(IP);回热系统采用8级回热,超高压缸排汽供1号加热器(HTR1);高压缸(HP)有2段抽汽,分别供2号、3号加热器(HTR2、HTR3);中压缸(IP)有2段抽汽,分别供除氧器(DEA)和5号加热器(HTR5);低压缸(LP)有3段抽汽,分别供6号至8号加热器(HTR6~HTR8);驱动给水泵的小汽轮机(BFPT)采用第4段抽汽供汽。

3 超超临界二次再热发电的热经济性计算分析

机组电功率 PT (单位为MW)、汽轮机热耗率 HR (单位为 $\text{kJ}/(\text{kW}\cdot\text{h})$)、发电煤耗率 CR 、供电煤耗率 CRS (单位均为 $\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$)和净效率 η 的计算公式如式(2)~(6)所示。其中, W_T 为汽轮机功率(单位为MW); M_L 为机械损失(单位为MW); Q 为锅炉吸热量(单位为MW); η_e 为发电机效率(单位为%); η_B 为锅炉效率(单位为%); η_P 为管道效率(单位为%); r_e 为厂用电率,(单位为%)。

$$P_T = (W_T - M_L)\eta_e \quad (2)$$

$$HR = 3600Q/P_T \quad (3)$$

$$CR = HR/(7 \times 4.1868 \times \eta_B \times \eta_P) \quad (4)$$

$$CRS = CR/(1 - r_e) \quad (5)$$

$$\eta = 3600/(7 \times 4.1868 \times CRS) \quad (6)$$

对某电厂现役参数为26.25MPa/600℃/600℃的1000MW超超临界一次再热机组^[8]和如图3所示的31MPa/600℃/620℃/620℃1000MW超超临界二次再热机组进行了热平衡计算与比较,主要计算结果见表2。

对31MPa/600℃/620℃/620℃的1000MW超超临界二次再热机组,计算取汽轮机超高压缸(VHP)效率为90%、高压缸(HP)效率为91.5%、中压缸(IP)效率为92%、低压缸(LP)效率为92.4%、一次再热和二次再热蒸汽压损均为10%、低压缸排汽压力为4.9kPa、锅炉效率为94.5%、管道效率为99.2%、厂用电率为3.5%。各级抽汽压损、加热器端差、轴封漏气量等参考某1000MW超超临界机组运行参数进行取值。采用前文所述的数值计算方法,编制软件,对一次再热蒸汽压力和二次再热蒸汽压力进行优化计算,求出最佳的一次再热蒸汽压力约为9.559MPa、最佳的二次再热蒸汽压力约为2.873MPa,同时采用该软件继续对各级加热器抽汽压力进行优化计算。一段抽汽来自超高压缸排汽,

可使给水温度提高为315℃。

表2 1000MW超超临界机组一次再热与二次再热的对比
Tab.2 The comparison between single reheat and double reheat for a 1000 MW ultra supercritical pressure unit

参数	一次再热	二次再热
主蒸汽压力/MPa	26.25	31
主蒸汽温度/℃	600	600
一次再热蒸汽压力/MPa	5.350	9.559
一次再热蒸汽温度/℃	600	620
二次再热蒸汽压力/MPa	/	2.873
二次再热蒸汽温度/℃	/	620
背压/kPa	4.9	4.9
给水温度/℃	292.5	315
给水流量/kg/s	698.6	759.2
汽轮机热耗率/(kJ/(kW·h))	7316	7071.6
锅炉效率/%	94.5	94.5
管道效率/%	99.2	99.2
厂用电率/%	3.5	3.5
发电煤耗率/(g/(kW·h))	266.29	257.39
供电煤耗率/(g/(kW·h))	275.95	266.73
净效率/%	44.51	46.05

经热平衡计算得出,该超超临界二次再热机组在1000MW电功率工况下,机组给水流量为698.6kg/s,汽轮机热耗率为7071.6kJ/(kW·h),供电煤耗率为266.73g/(kW·h),机组净效率为46.05%。与表2中所列的某现役超超临界一次再热机组相比,汽轮机热耗率降低约244.4kJ/(kW·h)、降低了3.34%;供电煤耗率降低约9.22g/(kW·h),机组净效率提高约1.54个百分点。

计算分析表明,与参数为26.25MPa/600℃/600℃的一次再热机组相比,参数为31MPa/600℃/620℃/620℃的二次再热机组热经济性的提升主要得益于以下几个方面:

- 1)采用二次再热并优化两次再热蒸汽压力和回热系统,降低热耗率约1.61%;
- 2)主汽压力从26.25MPa提高至31MPa,降低热耗率约1.0%;
- 3)一次再热蒸汽温度从600℃提高至620℃,降低热耗率约0.4%;
- 4)二次再热蒸汽温度从600℃提高至620℃,降低热耗率约0.31%;
- 5)给水温度从292.5℃提高到315℃,降低热耗率约0.32%。

二次再热是提高火电机组效率的有效措施。对31MPa/600℃/620℃/620℃的1000MW超超临界二次再热机组,汽轮机热耗率可达7071.6kJ/(kW·h),供电

煤耗率可达 $266.73 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 相对于蒸汽参数为 $26.25 \text{ MPa}/600^\circ\text{C}/600^\circ\text{C}$ 的 1000 MW 一次再热超超临界机组降低供电煤耗率约 $9.22 \text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$, 按年利用 5000 小时计算, 每台机组每年可节约标准煤 4.6 万吨, 按每吨标准煤燃烧生成 2.74 吨二氧化碳计算, 可直接减排二氧化碳约 12.6 万吨, 节能与环保效益显著。

参考文献:

- [1] 孙赵勇, 史耀波, 于睿. 中国能源消耗与废气排放关系研究[J]. 西安理工大学学报, 2012, 28(4): 494-499.
Sun Zhaoyong, Shi Yaobo, Yu Rui. Research on the relationship between energy consumption and exhaust gas emission in China[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2012, 28(4): 494-499.
- [2] 严俊杰, 邵树峰, 李杨, 等. 二次再热超临界机组热力系统经济性定量分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1): 186-190.
Yan Junjie, Shao Shufeng, Li Yang, et al. A method for analysis the economics of a thermal system in a supercritical pressure power unit with double reheat cycles[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1): 186-190.
- [3] 张树芳, 冉鹏, 郭江龙. 应用扩展型能效分布矩阵分析二次再热机组的热经济性[J]. 动力工程, 2006, 26(3): 437-442.
Zhang Shufang, Ran Peng, Guo Jianglong. Thermal efficiency analysis of double reheat power generation sets with expanding type of energy efficiency distribution matrices [J]. Journal of Power Engineering, 2006, 26(3): 437-442.
- [4] 李运泽, 杨献勇, 严俊杰, 等. 二次再热超临界机组热力系统的三系数线性分析法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 132-136.
Li Yunze, Yang Xianyong, Yan Junjie, et al. Linear method for the thermal economical analysis of supercritical pressure power plant with double reheat[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 132-136.
- [5] 李建刚, 李丽萍, 阮涛, 等. 二次再热超临界机组热力系统热经济性计算模型的研究[J]. 汽轮机技术, 2005, 47(6): 425-427, 450.
Li Jiangan, Li Liping, Ruan Tao, et al. A study of heat economy calculating model for thermal system in supercritical pressure power unit with second reheat cycles[J]. Turbine Technology, 2005, 47(6): 425-427, 450.
- [6] 黄智, 万鹏, 李杨, 等. 超临界二次再热抽汽凝汽式机组热力系统的经济性诊断[J]. 热力发电, 2005, 12: 44-47.
Huang Zhi, Wan Peng, Li Yang, et al. Economic behavior diagnosis of thermodynamic system for supercritical double reheat extraction condensing unit[J]. Thermal Power Generation, 2005, 12: 44-47.
- [7] 郑体宽. 热力发电厂[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003: 68-77.
- [8] SIEMENS AG Power Generation. Huaneng Yuhuan $2 \times 1000\text{MW}$ heat flow DIAGRAM NR. 30358-W711-A1500 R3; SIEMENS AG power generation [R]. Erlangen: Deutschland, 2003.

(责任编辑 李虹燕)