

双机回热系统在1000MW超超临界燃煤机组中的构建及分析

梁岩

山东电力工程咨询院有限公司, 山东 济南 250061

摘 要： 目前高效清洁的燃煤发电越来越受到重视。文中以1000MW 常规超超临界二次再热机组为基础，针对常规二次再热系统回热抽汽过热度高，在传热过程中能量损失大的现象，提出一种带背压式汽轮机的双机回热系统，对2种方案进行研究比较。结果表明：双机回热系统可以有效降低抽汽过热度，减少加热器不可逆损失；在100%THA工况下，降低汽轮机热耗30kJ/kWh，降低发电煤耗1.1 g/kWh。

关 键 词： 超超临界机组；二次再热；热耗

Optimization of Double-turbine Regeneration System in 1000MW Ultra-supercritical Double – reheat Unit

Liang Yan

Shandong Electric Power Engineering Consulting Institute CORP.,LTD. Jinan, Shandong 250061

Abstract： At present, efficient and clean coal power generation is receiving more and more attention. In this paper, a kind of double reheat steam with small regenerative steam turbine was proposed based on the current 1000MWconventional supercritical reheating unit. By comparing calculation of 1000 MW high ultra–Supercritical double–reheat system compared to the conventional ultra–supercritical double–reheat unit, the heat rate decreases by about 30KJ/Kwh. The results show that the double–reheat system can effectively reduce the superheat of the steam and reduce the irreversible loss of the heater. The heat loss of the turbine is about 30 kJ/ kWh, equivalent to coal consumption rate of 1.1 g/ kWh.

Keywords： ultra-supercritical pressure unit; double reheat; heat rate

引言

我国以煤电为主的发电格局使得火电厂煤炭消耗量占煤炭总产量的一半以上^[1]，多年的电力结构调整，确立了超(超)临界高参数大容量机组的未来火电主力地位^[2-3]。提高燃煤机组的蒸汽参数，发展高经济性、高效率的高参数大容量机组对我国节能减排有重要的意义。

提高机组初参数是提高发电系统效率、降低煤耗最直接的途径。我国近几年投产的国电泰州二次再热机组参数已经达到31MPa/610/620/620，随着初参数的提高，回热系统的抽汽参数随之提高，抽汽过热度亦提高，回热系统的不可逆损失增加，削弱了蒸汽参数升高带来的收益^[4]。针对这一问题，传统的解决方案是通过增设外置式蒸汽冷却器来降低回热系统的过热度。近年来，有学者提出采用回热式汽轮机系统来降低再热后回热系统抽汽过热度，提高系统能级利用效率，提高机组效率。

周璐瑶^[5-6]等用单耗分析法外置式蒸汽冷却器和增加回热式小汽轮机两种提高过热度的利用方式做对比分析，认为回热式汽轮机的节能效果优于外置式蒸汽冷却器；段立强等^[7]进一步对集成式回热汽轮机系统的不同形式做出对比分析；Sven jaer 等对双机回热系统汽轮机组的主要运行参数进行了初步计算，结果表明采用回热式小汽轮机系统能够有效降低抽汽过热度，提高机组的热经济性^[8]。蔡小燕等^[9]基于火用分析指标，对比了采用双机回热系统的700℃二次再热1000MW 机组和常规机组的热经济指标，双机回热系统机组的全厂火用效率高达46.37%。阚伟民等^[10]发现在机组低负荷运行时，双机回热系统发电效率比常规机组提升更多，发电煤耗下降幅度更大，双机回热系统的超超临界机组变负荷特性良好。可见，双机回热系统在降低回热抽汽过热度，减少不可逆损失，有效提升机组循环热效率的经济效益上具有良好的效果和显著优势。

因此，本文在某1000MW 超超临界二次再热机组典型热力系统的基础上，以回热小汽轮机为研究对象，提出一种带 BEST 小机的双机，并将其与双机回热系统进行热力、经济性能对比，为带 BEST 小机系统的优化和应用提供理论基础和数据支撑。

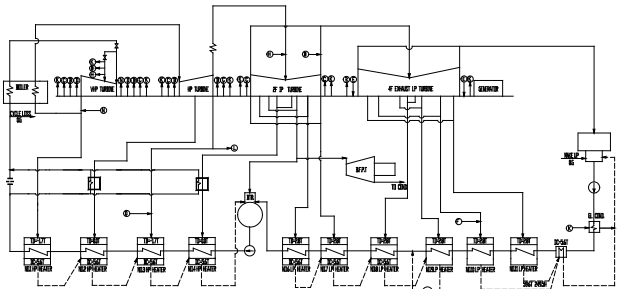
一、机组简介

本文选取某典型1000MW超超临界机组作为案例机组，其锅炉为超超临界变压直流锅炉、单炉膛，汽轮机为N1000-31.5/600/615/615 型、汽轮机型式为超超临界、二次中间再热、单轴、五缸四排汽、十一级回热抽汽、反动凝汽式，其主要性能参数如表1所示。

表1 热力系统主要参数

参数	数值
发电功率 /MW	1000
主汽口前蒸汽压为 /MPa	31.5
主蒸汽进汽量 /(t/h)	2559
一次再热后蒸汽压为 /MPa	10.6
一次再热后蒸汽温度 /℃	620
二次再热后蒸汽压力 /MPa	3.374
二次再热后蒸汽温度 /℃	620
额定背压 /MPa	0.004
给水温度 /℃	330.7

图1 为该机组典型的二次再热机组的热力系统图，采用11级回热抽汽，4个高压加热器、1个除氧器和6个低压加热器，抽汽依次来自超高压缸、高压缸、中压缸和低压缸，并配置了2个外置式蒸汽冷却器。



> 图1 11级回热二次再热热力机组

表1中可以看出，二次再热机组主蒸汽温度和再热蒸汽温度高达600℃以上，导回热抽汽系统的抽汽过热度高。高温抽汽加热给水时，回热加热器内汽侧和水侧换热不可逆损失增加，熵增变大，削弱了蒸汽参数升高带来的收益，进而影响了整个机组的循环效率。

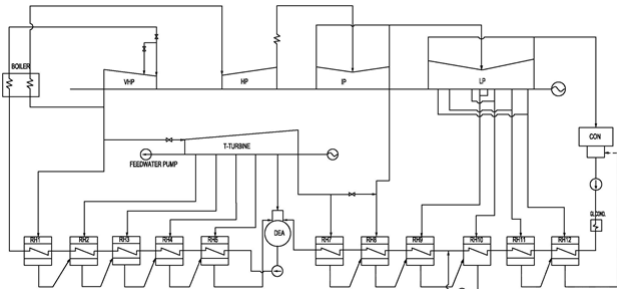
因此，降低回热抽汽系统中的抽汽过热度，减少系统热损失，合理利用系统能量，优化传统二次再热系统，提高机组经济性有很重要的意义。

二、BEST 双机回热系统

为了解决中压缸抽汽过热度偏高的问题，获得更好的热力学性能，考虑采取增设回热式汽轮机的方式。图2为双机回热系统的热力系统图。相比于常规二次再热系统，双机回热系统取消了高压缸抽汽接口，增设回热式汽轮机系统。回热式小汽轮机上设

有多级抽汽口，抽汽压力逐级降低。回热式小汽轮机系统的抽汽按照压力等级由高到低依次进入各级高压加热器，排汽流入除氧器；超高压缸排汽分流为三部分，一部分进入首级高压加热器加热给水，一部分进入锅炉再热器进行再热，另一部分作为回热小汽轮机汽源。小汽轮机入口常设有进汽调阀，以便在机组变负荷运行时，可通过调节进汽阀门开度，实现进汽节流，以匹配变工况下的给水泵功率需求，维持锅炉汽水流量平衡，保障机组安全稳定运行。

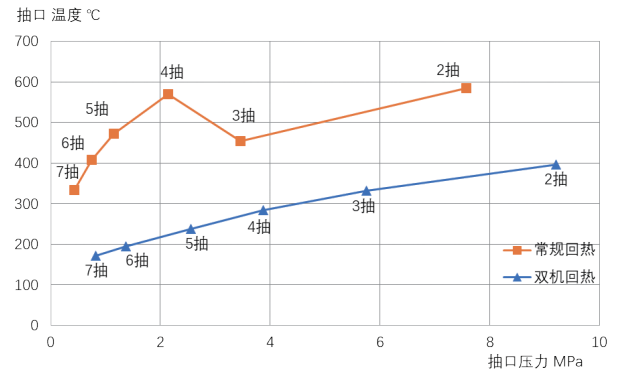
从图2中可以看出，双机回热系统为12级回热，比常规的二次再热系统增加了一级抽汽，同时增设了一个回热式汽轮机。超高压缸排汽作为回热式汽轮机将作的汽源，回热式汽轮机的抽汽供给 #2 ~ #6 加热器，排汽至7号低加。回热式汽轮机驱动给水泵并带小发电机。高压、中压缸不再增设抽汽口进行抽汽。



> 图2 BEST小汽轮机（带功率平衡发电机）系统原理图

三、性能比较

图3中给出了常规二次再热系统和双机回热系统回热抽汽系统的抽汽温度。从图3中可以看出，双机回热系统的抽汽温度比同等参数下常规二次再热系统的抽汽温度下降约200℃；尤其是二次再热之后的抽汽温度下降300℃。这说明，回热式小汽轮机的设置极大地降低了二次再热过程后抽汽的过热度、抽汽管道及附属的阀门的温度，进而降低了相关部件的材料等级，节约了机组的投资成本；同时可以减小高压加热器的热应力，提高设备使用寿命。

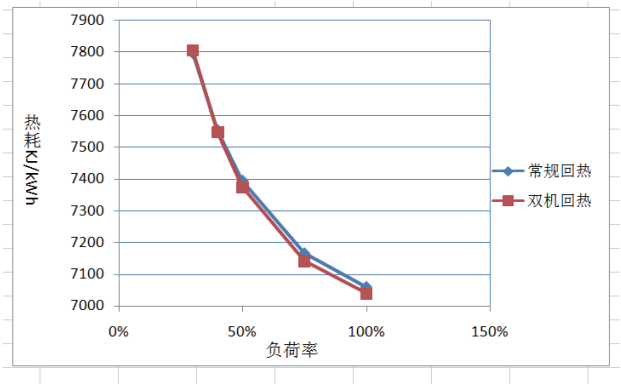


> 图3 双机回热系统与常规系统回热抽汽参数对比

1000MW 常规超超临界二次再热系统、超超临界双机回热系统的热力性能参数比较，如表3 所示。常规二次再热系统和双机回热系统热耗不同负荷下热耗曲线对比如图4所示。

表3 热力系统主要参数

名 称	常规二次再热系统	双机回热系统	变化
小汽机替代回热级数	--	5抽1排	
给水温度	330.7	326.6	
主蒸汽流量 t/h	2559	2717	+6.17%
一次再热压力 MPa	10.6	11.667	
一次再热流量 t/h	2274	1777.73	-21.8%
二次再热压力 MPa	3.374	2.991	
二次再热流量 t/h	1958.7	1787.45	-8.7%
回热小汽机进汽量 t/h		703	
回热小汽机背压	-	0.9	
主电机功率	1000	1000	
小电机功率	-	15	
THA 工况热耗 kJ/kWh	6962.2	6932.2	-30
75%THA 工况热耗 kJ/kWh	7058.2	7033.2	-25
50%THA 工况热耗 kJ/kWh	7287.2	7267.2	-20
40%THA 工况热耗	7446.2	7440.2	-6
30%THA 工况热耗	7689.2	7697.2	+8
发电煤耗 g/kWh	248.51	247.42	1.1



> 图4 常规系统与双机回热系统热耗对比曲线

从表3和图4中可以看出，双机回热系统较常规二次再热系统主蒸汽流量增加6.17%，一次再热蒸汽流量和二次再热蒸汽

流量均大幅降低，分别降低了21.8%和8.7%。在 THA 工况至 50%THA 工况区间内，双机回热系统机组热耗低于常规二次再热系统，THA 工况热耗由 6962.2kJ/kWh 降低到 6932.2kJ/kWh，降低了 30kJ/kWh，75%THA 工况下，热耗降低了 25 kJ/kWh；50%THA 工况下，热耗降低了 20 kJ/kWh。随着出力的降低，两种系统热耗的差距逐步缩小。40%THA 工况下，两种回热系统经济性相当；在 30%THA 工况下，常规回热系统热力性能优于双机回热系统。

总体而言，回热式汽轮机系统可以作为提高二次再热机组的热效率的有效手段，双机回热系统总功率增大约 1.5%；一次再热蒸汽流量减少 21.8%，二次再热蒸汽流量减少约 8.7%，100% 工况下，热耗降低 30kJ/kWh，发电煤耗降低 1.1g/kWh。同时，回热式驱动小汽轮机的出力在满足驱动给水泵外可以提供机组一部分厂用电，减少厂用电增加了机组的经济效益。

四、结论

本文针对常规超超临界二次再热机组，提出采用回热式汽轮机的方式降低回热系统抽汽过热率，比较了常规超超临界二次再热系统和双机回热系统，结果如下：

1) 在 100% THA 设计工况下，双机回热系统系的中缸抽汽过热度远低于常规二次再热系统，汽轮机热耗比常规二次再热系统热耗约低 30kJ/kWh；发电煤耗比常规二次再热系统低 1.1g/kWh。

2) 双机回热系统与常规二次再热系统相比，回热系统抽汽温度降低约 200℃，二次再热抽汽后抽汽的温度降低约 300℃，降低抽汽系统过热度效果显著。

3) 变工况情况下，双机回热系统汽轮机热耗和常规二次再热系统热耗的差距随负荷率的降低而缩小，在 100%THA 至 50%THA 负荷率区间，双机回热系统汽轮机热耗低于常规二次再热系统；在 50%THA 至 30%THA 负荷率区间，双机回热系统热耗逐步高于常规二次再热系统。

参考文献

[1] 阎维平. 超临界蒸汽参数发电技术发展评述 [J]. 电力科学与工程, 2014, 30(1): 1-7.

[2] 李华杰, 马丽梅. 近年来我国能源投资发展分析 [J]. 中外能源, 2018, 23(1): 3-13.

[3] Yang Yongping, Guo Xiyang, Wang Ningling. Power generation from pulverized coal in China [J]. Energy, 2010, 35 (11): 4336- 4348.

[4] 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(6).

[5] 刘颖华, 邵宁, 周璐瑶, 等. 超超临界机组回热抽汽过热度的优化利用 [J]. 电站系统工程, 2015, 031(004): 16-18, 25.

[6] 段立强, 孙婧. 集成回热式汽轮机的超超临界二次再热机组设计优化 [J]. 华北电力大学学报 (自然科学版), 2019, 46(003): 80-89.

[7] 乔加飞, 张磊, 刘颖华, 等. 二次再热机组双机回热系统热力性能分析 [J]. 热力发电, 2017(8).

[8] Ploumen P, Stienstra G, Kamphuis H. Reduction of CO2 emissions of coal fired power plants by optimizing steam water cycle [J]. Energy Procedia, 2011, (4): 2074 ~ 2081.

[9] 蔡小燕, 张燕平, 李钰等. 700℃超超临界燃煤发电机组热力系统设计及焓分析 [J]. 动力工程学报, 2012, 32(12): 971-978.

[10] 阙伟民, 宋景慧, 周璐瑶等. 超超临界机组采用 MC 系统的变工况性能研究 [J]. 热力发电, 2014, 43(07): 41-44.