

光热汽轮机组设计特点及发展概述

张 竞 朱 熹 张伟荣 刘珩博 陈铁宁

东方电气集团东方汽轮机有限公司, 四川 德阳 618000

[摘要] 光热在新型能源体系中, 既扮演了可再生能源, 又扮演了灵活性能源的角色, 其最大的特点是灵活可控, 在新能源风电和光电占比不断提升的现状下, 能够有效缓解弃风和弃光现象, 是可再生能源进一步提高电网占比的重要支撑和保证。光热汽轮机设备必须具备灵活, 快速启停的良好特性, 该特性决定了光热汽轮机不能按照传统承担基础负荷的发电设备进行设计, 本论文主要介绍了 50MW 及 100MW 等级以上大功率光热汽轮机组设计特点, 并对光热汽轮机组未来的发展方向进行了展望。

[关键词] 光热汽轮机; 设计特点; 发展

DOI: 10.33142/hst.v8i3.15821

中图分类号: TK262

文献标识码: A

Overview of Design Features and Development of Solar Thermal Steam Turbine Units

ZHANG Jing, ZHU Xi, ZHANG Weirong, LIU Hengbo, CHEN Tiening

Dongfang Electric Group Dongfang Steam Turbine Co., Ltd., Deyang, Sichuan, 618000, China

Abstract: Solar thermal energy plays the role of both renewable and flexible energy in the new energy system. Its biggest feature is its flexibility and controllability. With the increasing proportion of renewable energy such as wind and solar power, it can effectively alleviate the phenomenon of wind and solar power curtailment, and is an important support and guarantee for further increasing the proportion of renewable energy in the power grid. The thermal turbine equipment must have good characteristics of flexibility and fast start stop, which determines that the thermal turbine cannot be designed according to traditional power generation equipment that bears basic loads. This paper mainly introduces the design characteristics of high-power thermal turbine units of 50MW and 100MW above, and looks forward to the future development direction of thermal turbine units.

Keywords: solar thermal turbine; design features; development

引言

2021 年, 国务院发布《2030 年前碳达峰行动方案》(国发〔2021〕23 号)明确: 积极发展太阳能光热发电, 推动建立光热发电与光伏发电、风电互补调节的风光热综合可再生能源发电基地。光热在新型能源体系中, 既扮演了可再生能源, 又扮演了灵活性能源的角色, 其最大的特点是灵活可控, 在新能源风电和光电占比不断提升的现状下, 能够有效缓解弃风和弃光现象, 是可再生能源进一步提高电网占比的重要支撑和保证, 故其在电力体系的重要性和未来的发展不可估量。

相比其他类型新能源发电路线, 光热发电具有如下优势:

连续发电调节能力强: 可最低 15%超低负荷运行, 爬坡能力强, 启动时间快, 可快速响应电网调度, 同时又可承担大容量基础负荷能力;

可配套大容量储能消纳新能源电力: 光热一般配套熔盐储能系统, 通常利用风电, 光伏等不稳定电力进行熔盐热能的存储, 需要时再进行释放, 在新能源风电和光电占比不断提升的现状下, 光热发电能够有效缓解弃风和弃光现象, 是可再生能源进一步提高电网占比的重要支撑和保证;

可实现与电网的双向连接与互补: 一方面可通过太阳能热能的转化向电网发电, 另一方面也可将网上的峰值电

力转化为热能进行存储, 有利于电力系统的平衡;

全球目前大概有 6.8GW 的太阳能热发电, 近年来伴随西北地区新能源装机容量的大幅提升, 光热作为配套的灵活性电源, 其装机增长量也在大幅增加; 2024 年底, 中国太阳能光热发电总装机容量约占全球总量的 1/10, 不论是国内市场, 还是国外市场, 其市场发展潜力不可估量。

1 光热汽轮机组运行要求

传统的燃煤/气发电以承担电网用电基础负荷为主, 而光热发电项目往往配套 6~12h 大型熔盐储热系统, 根据电网调度参与电网调峰, 汽轮发电机组在一天中处于低负荷及中高负荷运行的阶段性十分明显, 年运行小时数约在 1500~2500h 之间; 汽轮发电机组满负荷运行时间短, 机组快速响应负荷能力要求高, 这与常规发电汽轮机运行特点完全不同, 故汽轮机在设计时需针对性开发, 不能简单地按传统发电汽轮机设计。

2 光热汽轮机设计特点^[1]

针对上述运行特点, 光热汽轮机在设计时, 需遵循如下设计原则:

(1) 满足电网快速启停及升降负荷的调节功能(要求机组冷态启动 120min 以内, 极热态 15min 以内, 机组升降负荷率最大 5MW/min);

(2) 满足长期稳定低负荷运行(15%极低负荷)及稳

定满发运行的电网调峰功能；

(3) 在满足上述(1),(2)前提下,具备一定的发电经济性要求；

(4) 具备一键启停,无人值守功能以便于光热偏远地区项目后期运维的需要；

结合第一批次光热汽轮机组实际投运经验反馈,各设备厂家对光热机组特性有了更加充分的认识,积累了丰富的经验,在此基础上开发了国内第二批次新一代大功率光热汽轮机组,具体设计特点表现为:

①兼顾机组灵活性可靠性为前提的经济性能的取舍；具体表现为通流间隙及通流级次的合理选择；

②汽缸等主机结构设计更为简洁,提升机组整体(汽缸与转子)膨胀的均匀性及同步性；

③轴系稳定性及滑销系统可靠性要求进一步提升；

④光热频繁启停工况下转子寿命评估分析手段进一步完善^[2]；

3 结构设计特点

100MW 等级以上大型光热汽轮机组主要以哈汽,上汽,东汽三家汽轮机设备供应商为主,从各家最终的方案来看,各有不同；现以东汽 100MW 等级光热机组为例,对其结构方案做以简要介绍:

(1) 采用两缸(高压缸独立模块,中低压缸合缸设计),单排汽,单流,一次再热,空冷凝汽式,轴向排汽或下排汽设计型式；母型机为成熟余热发电设计机型；机布置方案如下:



图 1 100MW 等级光热轴向排汽外形图

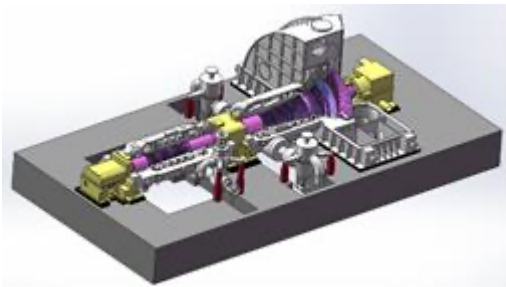


图 2 100MW 等级光热下排汽外形图

(2) 通流方案:高压采用反动式,中低压采用冲动式设计,均采用单流设计；

设计优势:中低压采用冲动式设计,汽缸仅采用单层缸结构,有利于汽缸与转子的同时受热,降低中低压缸胀

差,同时冲动式转子轴向推力较小,前轴封位置无大直径的平衡台阶,转子直径均匀,受热膨胀性能佳；

(3) 阀门配置^[4]:高压及中压均采用双阀门对称进汽方式,如下图:

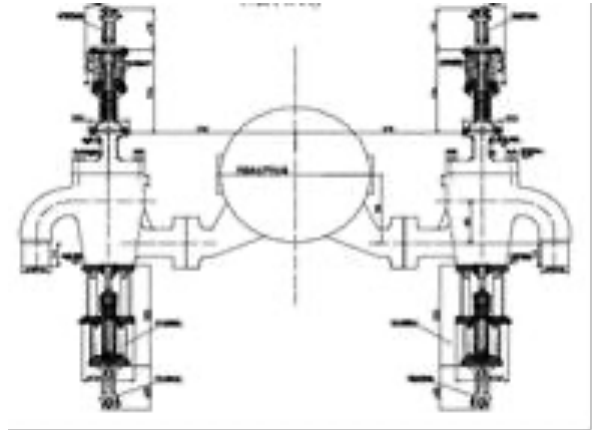


图 3 高压及中压进汽阀门布置

设计优势:采用双阀门对称布置方式,能够平衡机组两侧的管道推力,有利于汽缸的稳定性,降低膨胀过程中卡涩的风险,防止单侧推力或力矩过大使汽缸倾斜；

轴系设计方面,采用三支点轴系支撑方

案,相比常规凝汽式余热发电机组,机组跨距缩短,轴系刚度增强,临界转速提高,轴系抗汽流干扰能力进一步增强；

4 热力系统设计特点:

与第一批次光热不同的是,二批次光热电价大幅降低,其电网调峰作用明显大于发电作用,故在实际设计中,应以提高机组灵活可靠性为主,同时尽可能降低机组建设成本,实现用户利益的最大化。当前,主机厂家配合国内大型电力设计院,围绕光热汽轮机回热级数,背压,进汽参数,换热端差等边界,进行了一系列论证优化工作,现简要论述如下:

以 100MW 等级,进汽 14MPa/545℃/545℃,背压 12KPa 参数的光热汽轮机为例:

(1) 回热级数的选择:对不同回热级数的热耗率对比如下:

表 1 不同回热级数对机组热耗的影响

	3GJ+1CY+3DJ	3GJ+1CY+4DJ	2GJ+1CY+2DJ	1GJ+1CY+1DC
THA 工况	基准 0	-0.25%	0.54%	2.77%
75%THA 工况	基准 0	-0.2%	0.53%	2.78%
50%THA 工况	基准 0	-0.15%	0.68%	3%
15%THA 工况	基准 0	0%	0.75%	3.22%

GJ: 高压加热器; DJ: 低压加热器; CY: 除氧器; DC: 低压除氧器。

结论：采用 7 级回热（3GJ+1CY+3DJ）与 8 级回热（3GJ+1CY+4DJ）经济性差异小，7 级回热在新型大功率光热上具有较大的推广前景。

机组背压选择：

以 12KPa 额定背压为设计工况，分析背压变化对机组热耗影响如下：

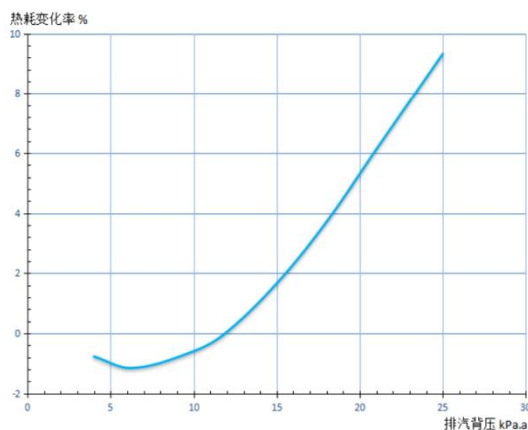


图 4 排汽背压对热耗影响

结论：背压变化对机组热耗影响较大，背压与热耗正相关，但背压低会带来空冷岛投资成本急剧增大，实际工程设计应结合当地环境温度，发电时长综合选取。

加热器端差对经济性影响：

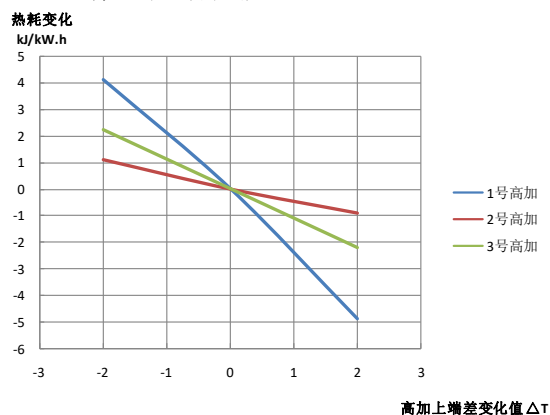


图 5 高加上端差对热耗影响

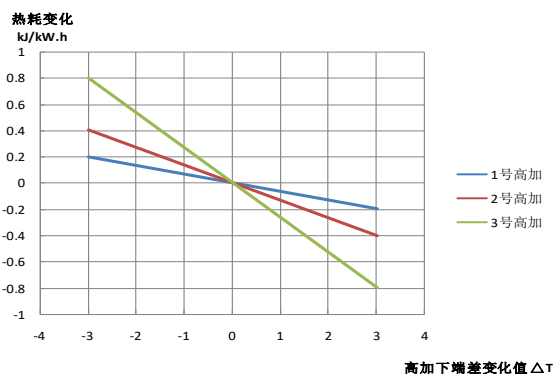


图 6 高加下端差对热耗影响

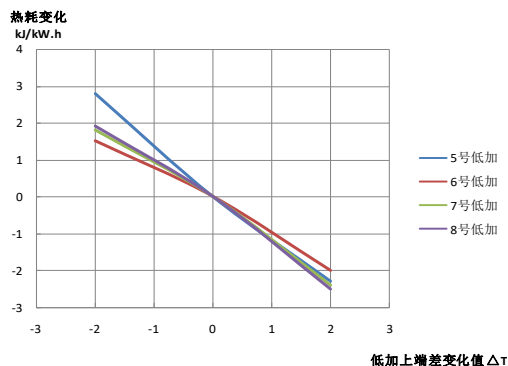


图 7 低加上端差对热耗影响

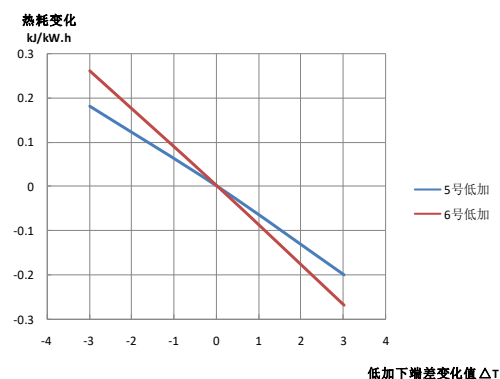


图 8 低加下端差对热耗影响

结论：1 号高加的上端差对经济性影响最大；

高加下端差对于热耗的影响微小，可忽略；低加上端差的变化对于经济性影响基本相当，整体在 2~3KJ 左右；低加下端差对于热耗影响微小，可忽略；除 1#高加上端差外，端差总体对热耗影响不大；

(4) 配置 0#高加的必要性：

低负荷运行汽轮机给水温度下降，考虑到熔盐安全运行特性，一般要求给水温度不得低于 240℃，而当机组负荷低于 75%后，汽轮机本身回热系统抽汽压力下降，无法满足 240℃给水温度要求，二批次光热机组长期调峰运行负荷多处于 75%以下中低负荷运行区间，配置 0#高加，是确保整个光热发电系统长期低负荷安全可靠运行的必备手段。

5 光热汽轮机未来发展^[3]

5.1 大容量高参数光热的发展

光热目前熔盐储热介质基本以二元硝酸盐为主，受限于介质工作温度无法进一步提升，目前光热汽轮机组主汽参数基本控制在 15MPa/550℃以下；国内外科研院所已经着手开发 800℃等级更高参数的熔盐储能及换热系统研究，开发与之匹配的太阳能光热发电机组是作为设备厂家的重要方向之一，伴随着汽轮机参数的提升，可极大提高光热发电收益，缩短项目回收周期。

从 50MW 到 100MW 再到 200MW 等级光热，汽轮发电机组容量不断增大，进一步带来了机组建设成本的降低，发

电收益的提高，也可进一步降低项目建设成本。

目前，300MW 等级及以上的更大功率的光热机组，也在陆续规划及论证之中，相信未来将会逐步布局并得以推广。

5.2 新型集热模式的发展^[4]

国内光热项目集热模式主要以槽式导热油，塔式以及线性菲涅尔路线为主，其中，塔式光热占比最大，现对几种路线做以对比：

表 2 几种光热路线对比

路线	槽式导热油	线性菲涅尔	单塔式
投资成本	最高	略高于塔式	最低
占地面积	最低	与槽式相当	最大
机组效率	最低	中间	最高
200MW 以上大功率机组	适用	适用	不适用
应用业绩	中间（主要应用于 50MW 等级以下机组）	最少	最多

不同集热模式，各有优劣，但对于后续大功率光热机型而言，上述几种路线均存在一定的局限性，开发集热效率更高的双塔乃至多塔式技术以及发展槽式熔盐技术，将在今后更大功率光热机组商业化发展铺平道路。

5.3 光热建设成本的管控

当前，如何降低光热项目的总体建设成本，是制约光热大批量发展的核心关键，汽轮机等整个热电岛部分虽然占比不大（约 7%~10%），但也是作为重点优化的方向之一，国内第二批次光热项目已经逐步意识到这个问题，部分项目在汽轮机回热系统，排汽背压等多方面逐步做了改进，但受限第一批次光热传统设计理念，行业固有思维仍然较为严重，整体收益仍然不大，未来，进一步扭转光热行业对光热汽轮机的认知，进一步简化汽轮机设计，降低机组造价，同时开发更大功率的光热机组，来降低整体光

热项目的建造成本，是设备厂家重要的研究课题之一。

6 结束语

从已有光热汽轮机后期投运情况来看，国内外各大厂商设备实际投运效果并不理想。我国光热发电技术起步较晚，但随着第一批次示范光热项目陆续投运，国内设备厂家对光热汽轮机作为新型调峰能源的认识更加深入，对机组的设计经验和准则的把握更加成熟，技术进步十分迅速。相信在新一批 100MW 等级大功率机组投运后，已有问题将得到极大改善，也为后续开发更大功率等级机组奠定基础。

光热作为一种新型清洁能源，其汽轮机设备在电网调峰，灵活运行方面都有着传统发电设备无可比拟的优越性，今后在整个电网系统中必将扮演越来越重要的角色。我国光热发电技术起步较晚，但项目总体建设量大，技术进步飞速。给光热技术的快速发展提供了强大的实践支撑，相信未来光热发电必将更加贴近国家电力需求，发挥更大的作用。

【参考文献】

- [1] 张晓东. 光热汽轮机技术特点及研发经验[J]. 2017 中国海西德令哈光热大会论文集, 2017(1): 54.
- [2] 陈贝贝等. 光热汽轮机汽缸的低周疲劳寿命研究与预测[J]. 东方汽轮机, 2020(2): 1-5.
- [3] 中国太阳能热发电行业蓝皮书（2022）. 国家太阳能光热产业技术创新战略联盟[Z]. 2022
- [4] 尹刚等. 槽式光热发电汽轮机经济性关键技术研究[J]. 东方汽轮机, 2021(1): 29-32.

作者简介：张竞（1987—），男，学士，工程师，毕业于南京航空航天大学，现主要从事光热发电以及联合循环汽轮机组以及小型工业汽轮机组相关工作。