

太阳能热发电工程建造成本构成研究

张娟, 张鑫, 徐袁博

(中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 由于太阳能热发电工程已投产实际资料少, 从而使得投资控制的效果不够客观。本文对槽式、塔式、线性菲涅尔式三种不同型式已投产的项目调研分析, 通过了解相关系统工艺构成、技术经济性分析、建造工艺组成及成本构成, 从而更好地控制项目成本。对即将迎来的项目规模化起到了重要的促进作用, 同时促进太阳能热行业高质量发展。

关键词: 太阳能热发电; 建造成本; 成本构成

中图分类号: TU723.3 文献标识码: A 文章编号: 1002-851X(2024)S1-0317-04

DOI: 10.14181/j.cnki.1002-851x.2024S1317

Research on the Construction Cost Composition of Solar Thermal Power Generation Project

ZHANG Juan, ZHANG Xin, XU Yuanbo

(PowerChina Northwest Engineering Co., Ltd, Xi'an 710065, China)

Abstract: Because of the lack of actual data of solar thermal power generation projects put into operation, the effect of investment control is not objective. This paper investigates and analyzes the projects of three different types of trough, tower and linear Fresnel that have been put into operation. By understanding the process composition, technical and economic comparison, construction process composition and cost composition of the relevant system, the project cost can be better controlled. It plays an important role in promoting the upcoming project scale, promoting the high-quality development of the solar thermal industry.

Keywords: solar thermal power generation; construction cost; cost composition

1 引言

太阳能热发电是技术和资金双密集型行业, 产业链长, 涉及学科多, 系统工艺复杂, 项目的投资受装机容量规模、储热时间影响较大。目前常用装机容量为50MW、100MW、200MW三种。同时太阳能热发电系统是跨领域的系统集成, 具有出力稳定, 对负荷支撑能力强, 并具备一定的储能功能, 可与电网进行双向互动等优点。另外太阳能热与风电、光伏及其他能源打捆的平滑效益会极大提升可再生能源的消纳水平。根据接收器和聚光类型的不同, 目前国际上商业化应用的可配置大容量储热系统的太阳能热发电常见发电形式主要包

括塔式、槽式和线性菲涅尔式三种。本文将围绕这三种太阳能热发电的成本构成进行探讨, 并分析各类成本的占比。

2 三种太阳能热发电系统工艺构成

太阳能光热发电作为一种出力稳定、可靠的新能源发电技术, 是实现我国能源转型目标不可或缺的重要手段。该技术原理主要涉及集热系统、储热系统、蒸汽产生系统及发电装置等多个系统的集成与协调, 发电原理的实施直接决定了工艺系统复杂度, 从而影响整个项目的成本。

太阳能热电站投资按照功能系统划分为聚光集热系统、储热系统、蒸汽发生系统、热力系统、水处理系统、供水系统、电气系统、仪表与控制系统, 其中聚光集热系统占整个发电系统投资比重最高(图1)。

作者简介: 张娟, 高级工程师, 主要研究方向: 工程经济、新能源。

张鑫, 工程师, 主要研究方向: 工程经济。

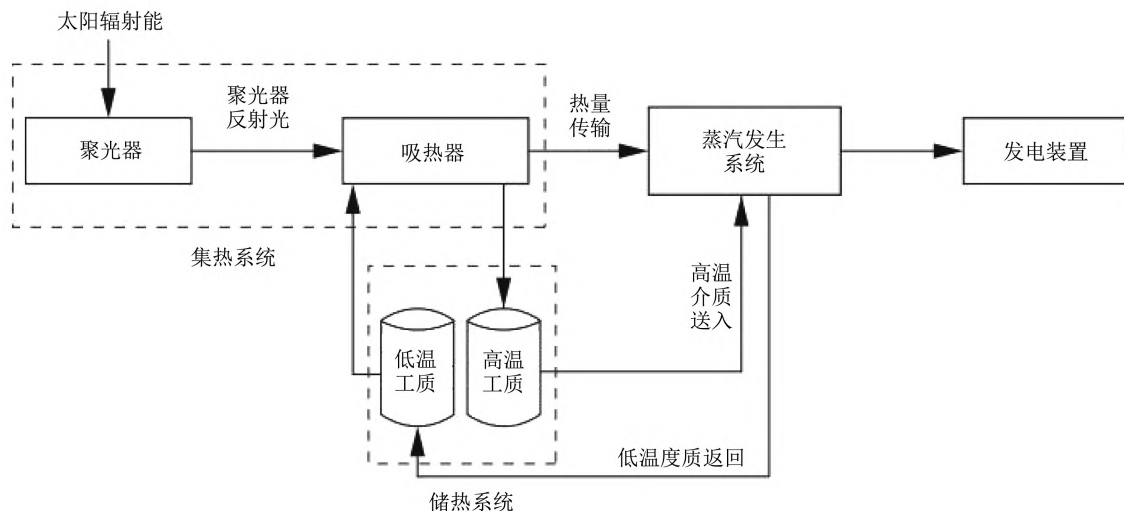


图1 太阳能热发电系统组成

3 三种太阳能热发电技术经济性分析

槽式太阳能发电系统聚光方式为抛物面反射镜，跟踪方式为单轴跟踪。优点：同步跟踪降低跟踪控制代价，成本低，具有商业化运行经验；中、高温过程，可以蓄热储能、联网发电运行。缺点：管道系统比塔式复杂得多，热量及阻力损失大，真空管破损更换增加成本。

塔式太阳能发电系统聚光方式为平凹面反射镜，跟踪方式为两轴跟踪。优点：采用高温熔融盐蓄热储能，聚光比高，易达到较高工作温度；接收器散热面积相对较小。缺点：技术复杂，投资较大，发电成本高。

线性菲涅尔发电系统工作原理类似槽式太阳能热发电，只是采用菲涅尔结构的聚光镜来替代抛物镜。这使得它的成本相对来说较低，但效率也相应降低，跟踪方式为单轴跟踪。由于系统结构简单、直接使用导热介质产生蒸汽等特点，其建设和维护成本也相对较低。优点：集热管固定，连接简单，反射镜为平面镜，便于制造与清洗，同时近地安装，风阻小；直接产生蒸汽，参数高；造价相对便宜。缺点：投运机组少，效率不够高，储能时间较小。

从表1所示，三种太阳能热发电形式技术特点略有不同，根据系统容量配置角度分析，太阳能热发电站的聚光镜场、储热时长、商业化程度和装机规模与电站的经济性密切相关。一般来说，为了储存更长时间的能量，就需要增加聚光镜场的面积，这种情况下一投资成本就会增加。储热时长越长，单位造价越高。然而，需要注意的是，由于储能时长的增加，电站发电量将提高，综合度电成本则会下降。

表1 太阳能热发电系统技术经济性分析

项目		槽式	塔式	线性菲涅尔式
聚光镜场	聚光方式	线聚焦	点聚焦	线聚焦
	二次反射	无	无	有
	跟踪控制	简单	复杂	简单
	聚光比	30-80	600-1500	25-100
	镜面效率	低	高	低
	集热方式	单轴跟踪	双轴跟踪	单轴跟踪
储热	储能	可储热	可储热	可储热
	吸热器运行温度/℃	350-740	500-1200	270-550
系统投资成本		中	高	中
聚光比		50-90	600-1000	35-170
成熟度 已装机 规模	商业化程度	商业化	商业试点	示范
	100MW	200MW	50MW	

4 三种太阳能热发电建造成本构成

目前光热发电成本依旧较高，由于国内光热产业还处于示范阶段，光热发电站装机规模尚未形成规模化，造成成本较高。从初始投资成本看，光热发电站的单位千瓦投资成本在2.0万-3.5万元，是传统煤电站的3-4倍、陆上风电的3-4倍、光伏电站的4-5倍。

根据统计分析，已投产的太阳能热发电示范项目各部分单位造价所占比例为：设备购置费占比60%，安装工程费占比18%，建设期利息3%。经分析，影响投资占比较大因素主要是设备购置费和安装工程费。其中，在设备购置方面，目前国内已基本可全部生产太阳能热发电的关键和主要装备，一些部件具备了商业生产条件，但由于实际项目应用较少，装备的性能、质量还需要进

一步验证。本文结合实际项目调研数据主要从设备购置费、安装工程费和运营维护方面对成本进行论述。

4.1 槽式太阳能热发电建造成本构成

随着槽式太阳能热发电站装机容量增加,聚光集热系统成本所占的比重也越来越高。以青海50MW某槽式太阳能热发电站为例,经调研数据如下:电站配置9小时熔盐储能,镜场采光面积62万平方米,7个镜场组成。通过冷态工作介质流体导热油,由中央区导热油泵送到太阳岛平行回路。电站一次性初投资约19.38亿元,设计年发电量2.25亿kWh,每年可节约标准煤6万吨,减少二氧化碳等气体排放10万吨。聚光集热系统成本占比最高,占整个电站建设成本的55%;储热系统和导热油系统占总投资的22%;热力系统占总投资成本的15%左右;其余为场地准备费、电站配套及基础设施费和间接费用等。

(1) 设备购置费成本:根据统计数据,槽式吸热管达到2300元/根,反射镜120元/平方米,槽式聚光器达到550元/平方米,集热场和传热流体系统设备占整个槽式电站投资成本的40%-50%。集热场和传热流体系统设备成本构成及比例如表2所示。

表2 集热场和传热流体系统设备成本构成

主要部件	所占成本比例
钢结构	27%
吸热管	19%
反射镜	18%
电子电气、控制和太阳能设备	8%
传热流体系统(管道、换热器、泵等设备)	14%
传热流体(导热油)	5%
立柱	5%
旋转接头	2%
跟踪器(液压和电机)	2%

(2) 安装工程费成本:槽式聚光集热系统主要由反射镜、集热管、驱动装置组成。反射镜安装单价不包括槽式集热器车间内组装工作,反射镜安装(标准槽ET150)安装单价3000元/个-4000元/SCE单元,集热管安装(标准槽ET150)单价200元/米-300元/米,驱动系统安装(标准槽ET150)单价4000元/个-5000元/个。

(3) 运营维护成本:槽式太阳能集热器的运营维护成本相对较高,主要是因为反射镜和聚光器的高昂价格和维护的复杂性。为了确保设备的正常运行,需要定期进行维护和检修,以保证集热效率。光热电站发电部分的运行和维护与常规火电没有多大差别,需要24小时全天候运行,通常还规定某些时段最少的值班人数。尽管已经实

现了高度自动化,但跟踪太阳能的聚光场仍然需要进行过专业培训的人员开展定期维护工作。槽式光热电站的日常运行人员大约需要30人,另外还需要10-15人从事太阳能场的维护工作,但聚光场的维护人员需要20-30名。光热电站的运维成本通常包括补燃系统燃料成本、镜面清理用水成本、冷凝器冷却等成本。随着电站规模的增加,单位装机容量的运维成本将下降,太阳能辐照条件非常好的大型电站运维成本甚至可以降低一半。

4.2 塔式太阳能热发电建造成本构成

随着塔式太阳能热发电站装机容量增加,塔式聚光集热系统成本所占的比例也越来越高。以青海50MW项目某塔式太阳能发电站为例,经调研数据如下:电站配置9小时熔盐储能系统,镜场采光面积54.27万平方米,设计年发电量1.46亿kWh,每年可节约标准煤4.6万吨,减排二氧化碳气体约12万吨。电站一次性初投资约10.88亿元,聚光集热系统成本占比最高,占整个电站建设成本61%,热力发电系统成本占15%,储热系统占17%,其余为场地准备费、电站配套及基础设施费和间接费用等。

(1) 设备购置费成本:定日镜是太阳岛中成本占比最高的部件,价格达到700元/平方米,目前中国塔式太阳能热发电站的太阳岛造价为3600-4000元/kW。聚光吸热系统中定日镜场的成本约占整个塔式电站投资成本的40%-50%,所以定日镜的降本为太阳能热发电发展的重中之重,单台定日镜成本构成及比例如表3所示。

表3 定日镜成本构成

主要部件	所占成本比例
驱动装置(水平和俯仰)	35%
反射镜单元	30%
支撑结构	15%
立柱	12%
控制系统	8%

(2) 安装工程费成本:塔式聚光集热系统的定日镜安装费在整个项目安装工程费成本中占比最高,定日镜安装根据每套镜面面积20-120平方米不等,经调研,定日镜安装成本单价在400元/套-900元/套。

(3) 运营维护成本:虽然塔式太阳能发电有很多的比较优势并且国外已建成很多商业化的塔式太阳能电站,但是其复杂的系统以及较高的维护成本,使塔式太阳能发电技术仍未能得到广泛的运用。为了确保设备的正常运行,需要定期进行检修和维护,以保证集热效率。

4.3 线性菲涅尔式太阳能热发电建造成本构成

线性菲涅尔式聚光集热系统占整个发电系统投资

比重最高,以兰州大成敦煌50MW光热发电项目为例,镜场共设置80个集热回路,反射镜总面积127.1万平方米,电站储热时长15小时,正常天气具备24小时持续发电能力。线性菲涅尔发电系统电站一次性初投资约17.24亿元。聚光集热系统成本占比最高,占整个电站建设成本的57%,热力发电系统成本占21%,储热系统占13%,其余为场地准备费、电站配套及基础设施费和间接费用等。

为便于分析,按功能将菲涅尔式太阳能热电站成本分为聚光集热系统建设成本、储热建设成本、热力发电岛建设成本以及相关配套设施建设成本等四部分。聚光集热系统成本占比最高,占整个电站建设成本的58%,热力发电及其他系统成本占19%,储热系统占13%,其余为场地准备费、电站配套及基础设施费和间接费用等。可见集热场建设费用是决定菲涅尔式太阳能热发电项目总体投资水平的决定因素,热力发电岛部分与常规燃煤厂基本一致,技术较为成熟。

线性菲涅尔式太阳能热发电成本低于槽式及塔式太阳能光热电站的平均造价,充分显示了菲涅尔式太阳能光热电站良好的经济性。

(1) 设备购置费成本:线性菲涅尔太阳能集热器通常由多个小型的吸热片组成,这种设备的购置成本相对较低。此外,由于其结构简单,因此采购和运输的成本也相对较低。

(2) 安装工程费成本:线性菲涅尔太阳能集热器的安装过程相对简单,但数量较多时也会产生较高的安装成本。此外,为了保证集热效率,需要对每个吸热片进行精确的定位和调整。线性菲涅尔式聚光集热系统的一次反射镜部分占集热场总投资近50%,通过提高集热场效率,减少镜场面积将会大幅降低集热场建设成本。经调研,一次反射镜安装成本为6.5-8.0元/平方米(面积为太阳能集热器总采光口面积),不包括一次反射镜本体制作。

(3) 运营维护成本:线性菲涅尔式的运营维护成本相对较低,但效率也相应降低。此类系统由于聚光倍数只有数十倍,因此加热的水蒸气质量不高,使整个系统的年发电效率仅能达到10%左右。但由于系统结构简单、直接使用导热介质产生蒸汽等特点,其维护成本也相对较低。

5 太阳能热投资决策建议

根据以上分析,为了作出合理的投资决策,建议考虑以下几个方面:

(1) 选择合适的技术路线:在选择太阳能热技术

时,应根据市场需求、投资规模、成本控制等因素进行综合考虑。采用先进的技术可以提高制热效率,降低成本,但同时也需要投入更多的资金和人力。因此,需要权衡利弊,选择合适的技术路线。

(2) 关注政策环境:政府对太阳能热的支持政策可以降低企业的投资成本和运营成本。因此,在投资决策前,应关注政策环境的变化,了解相关政策,以便更好地利用政策优势降低成本。

(3) 考虑市场状况:市场状况对太阳能热成本有重要影响。在投资决策前,应了解市场状况,包括市场需求、竞争状况等,以便更好地把握市场机会,降低成本。

(4) 重视成本控制:太阳能热的成本控制是投资决策中非常重要的一环。在设备选型、安装施工、维护保养等各个环节中,应注重成本控制,避免浪费和不必要的开支,以提高整体经济效益。

6 结 语

太阳能热发电是可再生清洁能源,在我国能源结构中占有重要地位。有别于风电、光伏等波动性电源,太阳能热发电兼具调峰电源和储能双重功能,连续稳定的发电和调峰发电,提高了电网消纳波动电源的能力,有利于电力系统稳定运行。在产业政策正确引导下,太阳能热发电工程规模迅速扩大,工艺水平稳步提升,科技创新有力推进,行业呈现健康有序发展趋势。目前,太阳能热发电成本仍比较高,通过从系统工艺构成、投资技术经济比较、设备购置成本、安装成本、维护成本等几个方面对太阳能热发电工程建造成本构成分析,为了做出合理的投资决策,应关注政策环境、市场状况,选择合适的技术路线,重视成本控制。只有这样,才能更好地促进太阳能热行业高质量发展,助力双碳目标实现。▲

参考文献

- [1] 胡叶广,张成,周超英,等.太阳能光热发电的集热技术现状及前景分析[J].科学技术与工程,2021(9):3421-3427.
- [2] 高宇,张杰.关于太阳能光热发电的技术特点与应用分析[J].中国设备工程,2023(14):205-207.
- [3] 柯洪.工程造价计价与控制[M].北京:中国计划出版社,2009.
- [4] 张金平,周强,王定美,等.太阳能光热发电技术及其发展综述[J].综合智慧能源,2023(2):44-52.