

太阳能热发电最低投资定量分析

范洁¹, 杜凤丽², 孙建朝¹

(1. 中国华电科工集团有限公司, 北京 100088; 2. 太阳能光热产业技术创新战略联盟, 北京 100090)

摘 要:太阳能热发电以环保、无污染物排放的可再生能源形式发电上网,具有电力输出可调节的优点,但其成本目前均高于风电和太阳能光伏发电。将太阳能热发电分为聚光、吸热、换热和储热、常规发电 4 部分,分别对其最低成本进行定量分析,发现镜场材料价格、太阳能热发电系统效率、土建对发电稳定性的要求对电站单位造价具有规律性的影响,通过提高太阳能热发电系统效率、根据当地气候条件控制土建费用、控制镜场用材及材料价格,能够较好地降低整个系统投资,同时结合控制场地使用费用和降低融资费用,能够使目前的电价水平进一步降低。

关键词:太阳能;热发电;塔式镜场;吸热换热和储热;降低投资

中图分类号:TM 615 **文献标志码:**B **文章编号:**1674 - 1951(2018)10 - 0069 - 04

1 太阳能热发电系统划分^[1]

太阳能热发电与传统火力发电相比有较大区别,聚光式太阳能热发电形式种类繁多,但无论采用哪种技术路线,都可以划分为太阳能聚光部分、集热部分、传热和储热部分、发电部分等四大部分。其中,聚光、集热、传热和储热 3 部分是传统电力较少涉及的范畴,也是太阳能热发电技术的核心,集中体现了太阳能热发电的特点;而发电部分与传统发电尤其是火力发电是相同或者类似的。为抓住问题关键,本文以我国 2017 年 100 MW 等级塔式太阳能的可研估算,就太阳能系统 4 部分的成本比例进行分析,探究太阳能热发电最低单位造价的底线。

2 塔式太阳能热发电系统主要数据

太阳能塔式热发电系统的镜场由多面玻璃反射镜组成,发电系统由汽轮发电机组及其热力系统组成^[2]。镜场将太阳光反射聚焦到塔顶的集热器,热量可储存,当储热达到一定量后,在夜晚没有太阳能量的情况下,塔式热发电系统仍可连续发电,从而保证 24 h 连续发电,而能量来源为太阳能和经过储热的太阳能。其他化石能源或可再生能源可以在机组启动或冬季严寒季节进行补燃,以保证机组的安全运行。系统每个模块可独立运行,可靠性和调节性能高,也可提供持续的热量用于供热和制冷、农业加工等其他用途。典型的塔式系统主要参数见表 1。

表 1 典型 50 MW 塔式太阳能热发电站主要参数^[3]

序号	内容	单位	参数
1	经纬度		东经 E97°22', 北纬 N37°22'
2	汽轮机容量	MW	50
3	太阳能资源	(kW · h)/(m ² · a)	1 873
4	设计年发电量	(GW · h)/a	145.8(发电)/130.8(供电)/125.6(含可靠性)
5	年运行小时数	h	2 916(发电)/2 616(供电)/2 512(含可靠性)
6	电价	元/(kW · h)	1.385
7	定日镜总面积	m ²	523 000
8	定日镜数量	台	5 230(100 m ² 平面镜)
9	集热塔高度	m	110
10	熔盐总量	t	11 096
11	总占地面积	hm ²	199(动力中心占地 5 hm ²)
12	冷却方式		空冷
13	储热小时	h	7

根据表 1 确定的系统静态投资为 134 004 万元,静态单位造价为 26 800 元/kW,动态投资 139 943

万元,动态单位投资 27 989 元/kW。一般 50 MW 等级常规火电机组(年运行小时 5 000 h)静态单位投资不超过 5 000 元/kW,则同等太阳能电站静态投资(发电年运行小时 2 916 h)是火电机组的 5.36 倍。

由表 1 可明显看出太阳能热发电的特点。由于项目静态投资较高,与常规火电相比,工程一次性投资大,增加了项目融资成本,其中工程固定资产折旧所占度电成本的比例高达 60% 左右;另一方面,由于发电能源来自太阳能,电站中占有大部分的燃料费用没有了,有些电站仅消耗极少量的启动、低负荷运行和保温用天然气燃料,因而运营成本相对较低。因此,有必要对工程投资的组成进行分析,并分析高投资和低运行成本同时对发电电价的影响。表 2 为 50 MW 太阳能电站各分项系统的投资费用。

表 2 典型 50 MW 塔式太阳能热发电站经济参数

项目	投资额/万元	投资比例/%
镜场	64 458	48.1
集热	12 472	9.3
储热	18 415	13.7
发电	19 019	14.2
其他费用	19 640	14.7
静态投资	134 004	100.0

根据 50 MW 煤电系统的单位造价分析,锅炉系统(含输煤系统、除灰系统、除尘等)造价大约 7 500 万元,考虑到部分电气和热控的就地柜、表盘、仪表等费用额度不超过 500 万元,锅炉系统费用约 8 000 万元,扣除这部分,汽轮发电机部分的造价约 1.7 亿元。表 2 中发电投资 19 019 万元,与常规发电设备相比高约 11.9%。

同理,太阳能热发电站其他费用包括设计费、现场征地、工程管理等不可预见费用,其投资额比例也比常规火电高约 30%。根据众多数据分析比较,太阳能电站的占地是常规电站占地的 10 倍,因而其土地费用等也会增加,但由于太阳能电站基本建在戈壁荒芜地区,在得到政策支持条件下,其费用节省的可能性是有的,其他费用投资可控制在 1.5 亿元范围内。

储热部分的功能主要是提高太阳能热发电的负荷调节能力,具有类似抽水蓄能调峰水电站的功能,因而这部分费用可以单独分析。

镜场和集热部分类似火电厂锅炉部分^[4],两者分别占总费用的 48.1% 和 9.3%,两项投资为 7.693 亿元。

3 定量分析电站单位造价方法

太阳能塔式电站镜场布置和优化比较复杂,镜

场的太阳反射计算依赖于当前太阳、反射镜与集热塔的位置,并考虑邻近玻璃镜阴影遮挡情况。目前,太阳能计算国外有 HFLCAL 和 EBSILON 两套软件,第 1 种可计算确定太阳能镜场、集热塔、发电系统的主要参数,并对布置参数进行优化设计;第 2 种用于模拟电厂运行,输入当地太阳条件等参数,利用镜场运行小时数据和集热器性能分析,可得到全年的发电结果,计算出年总发电量。在所有计算中,发电量的计算是最重要的,但发电量计算不能仅依靠软件,还需要根据已建电站的每年实际发电量,依靠当地电站的实际外部条件,用实际数据进行对比,才能得到较真实的依据。目前,国外电站已有近 30 年的运行数据,国内也有 1 个电站具有 1 年以上的实际运行数据,这些数据是分析电站发电量最好的校核数据。

为了定量分析塔式太阳能热发电的单位造价,根据投资费用和电站效率计算公式,推导出如下关系式:

$$P_{\text{solar}} = P_{\text{gra}} + P_{\text{sto}} + k_1 P_{\text{pow}} + P_{\text{oth}}, \tag{1}$$
$$P_{\text{solar}} = \frac{n_1 n_2 h_1}{\eta_1 \omega} + 3\,600 \frac{h_2 n_3 \eta_2}{\eta_1 c \Delta t} + k_1 P_{\text{pow}} + P_{\text{oth}} \tag{2}$$

式(1)中: P_{solar} 为塔式太阳能热发电站单位造价,元/kW; P_{gra} 为镜场系统单位造价,元/kW; P_{sto} 为储热系统单位造价,元/kW; P_{pow} 为发电系统(包括汽轮发电机组及全部热力系统,集热塔系统等,该系统与同等容量常规火电站相比,单位造价相近略低)单位造价,元/kW; k_1 指塔式太阳能热常规发电单位投资和同等容量火电站单位投资比; P_{oth} 为其他费用单位造价(主要为工程建设管理费用),元/kW。

式(2)中等式右侧第 1 项为式(1)中的 P_{gra} ,式中: n_1 为反射镜钢结构材料单位重量,不含土建部分用钢,kg/m²; n_2 为反射镜钢结构材料单位价格,含全套支架、土建、安装费用,元/kg; h_1 为发电年运行小时数(全年总发电量与铭牌功率比),h; η_1 为塔式电站发电效率,%; ω 为当地太阳能直射辐射值,kW/(m²·a)。

式(2)中等式右侧第 2 项为式(1)中的 P_{sto} ,式中:3 600 指 1 kW·h 电的热含量,kJ/(kW·h); h_2 为储热小时数,h; n_3 为熔盐单位价格,元/kg,含罐体、土建、安装费用; η_2 为塔式电站镜场和吸热塔效率,%; c 为熔盐工作温度范围内的平均比热容,J/(kg·K); Δt 为高温熔盐罐和低温熔盐罐温度差,℃。

式(1)中 P_{oth} 是电站单位投资的其他费用常规

项; P_{pow} 是常规火电站的单位投资, k_1 可修正两者的差;前两项可分别独立判断镜场系统和储热系统的单位造价。式(2)将技术数据和单位造价形成关系式,可定量分析塔式太阳能热发电的单位造价。从式(2)中可看出影响太阳能热发电的因素,也可看出选择高太阳能辐射值的地区和提高电站发电效率是降低镜场成本的关键;对于储热系统,选择更大储热比热的材料和提高熔盐储热温度差,能有效降低储热成本。

式(2)除了计算塔式系统外,理论上可计算槽式系统,但需注意与造价有关的定义范围。

4 镜场费用下降空间

对太阳能热发电和火电两种类型的电站造价进行分析,材料使用量和材料单价可以比较出两者的差异。表 3 针对同等容量常规和太阳能热电站的材料量进行了比较^[5]。

美国国家可再生能源实验室(NREL)对先进塔式太阳能热发电有一些指标要求:在反射镜偏差小于 3 mrad、抗风速小于 37 m/s 的条件下,反射镜的成本应小于 75 美元/m²。可见,反射镜的成本降低空间很大。目前计算数据为 1 232 元/m²,根据对 100 m² 反射镜架进行的优化计算,在满足 6 级风速(14 m/s)时,反射镜单位质量可以控制在 70 kg/m²,仅此一项,镜场造价可降为 4.5121 亿元,节省 1.933 7 亿元。从单位质量投资分析,火电站锅炉系统包括锅炉及其附属设备、输煤、除灰设备等,材料单位质量价格为 1.540 2 万元/t,而镜场设施仅包括反射镜架、控制旋转单元及缆线、基础土建费用等部分,单位质量价格为 1.232 5 万元/t,今后规模化生产和建设后,可在此指标上进一步降低投资。

太阳能镜场土建费用分析如下:假定外部条件中,按照 7 度抗震(0.1 g)、II 类场地土、采用天然地基,地基承载力按 200 kPa 考虑,按照国内规范将风力转换为风压数据,则不同风力条件下的基础材料用量如图 1 所示。由图 1 可见,当风力在 5~8 级时,基础钢材和混凝土使用量不变,9 级以上时,基

础的钢材和混凝土使用量增加,当达到 11 级风速时,材料量增加了 1 倍。

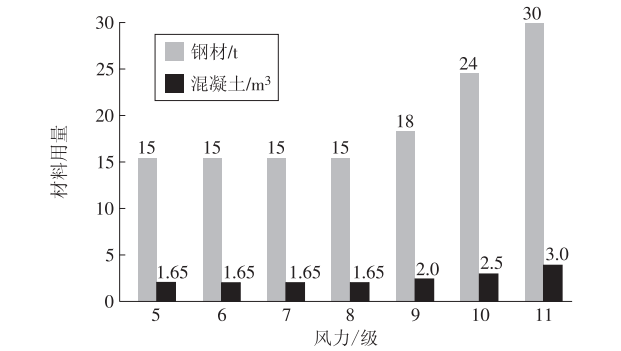


图 1 100 m² 塔式太阳反射镜支架基础材料用量

根据如上分析,镜场设计可根据每年当地风级分布,确定安全运行控制点,当反射镜可在 6,7,8 级风速以下安全运行时,超过上述风速即采取停机保护措施。该计算也可证实,通过分析全年不同风速的时间范围,分析反射镜在不同风速下的单位造价,可得到最佳的安全运行停机保护点。

系统效率提高也是降低造价的有效手段,表 4 列出了典型 50 MW 塔式太阳能热发电站的各分项效率数据。典型电站从光到电的效率为 14.88%,据报道国外 100 MW 塔式电站效率为 18.76%。分析各分项效率可知,国外对吸热器设备采取了优化设计,特别是吸热器表面涂吸热层等措施,可提高能量的吸收,降低散热损失,使光热效率达到 50% 以上。通过计算可知,现有条件下的光热效率可达到 44%;厂用电率按 11% 设计,而实际厂用电率可控制在 8%~9%。提高机组的热力参数也是有效手段,根据计算,同等条件下超高压参数机组比高压机组效率提高 3.80 百分点,亚临界机组比超高压又提高 1.21 百分点,目前国内汽轮机制造厂都在为提高汽轮机内效率开展研究,同等容量新型机组的内效率提高很多。

在表 4 的数据条件下,光热效率提高 1.50 百分点,汽轮机热电效率提高 2.00 百分点,仅此两项就可使全厂效率提高 1.40 百分点,达到 16.3%。效率提高可使镜场面积降低 8.5%,投资降低 3 813 万元。

表 3 常规电站与太阳能热电站材料量对比

范围	煤电(锅炉)	塔式(镜场)		比例	
		优化前	优化后	优化前	优化后
设备、管道、钢结构材料总质量/t	5 194	52 300	36 610	10.07	7.05
全部系统总费用/万元	8 000	64 458	45 121	8.06	5.64
聚光镜单位质量/(kg·m ⁻²)		100	70		
单位面积价格/(元·m ⁻²)		1 232	863		
单位重量价格/(元·t ⁻¹)	15 402	12 325	12 325	0.8	0.8

表 4 典型 50 MW 塔式太阳能热发电站效率参数 %

序号	各系统效率	数据	备注
1	年均光热效率	40.70	镜场损失(含吸热)
2	管道与储热效率	98.40	换热和储热损失
3	年均热电发电效率	37.20	热电损失
4	年均热电供电效率	33.10	厂用电
5	年均光电效率	14.90	净发电量

要提高塔式太阳能电站聚光、集热和储热的效率空间已经不大,而提高机组的热电转换效率则可使电站效率有大幅的提高,目前提出的二氧化碳超超临界布雷登循环系统,可使热电转换效率从目前

表 5 典型 50 MW 塔式太阳能热发电站经济分析结论

序号	优化方法	效率/%	单位造价/(元·kW ⁻¹)	电价/[(元·(kW·h) ⁻¹)]
1	初始计算数据	14.88	26 800	1.350
2	目前技术允许条件	16.35	21 200	1.015
3	进一步提高技术	18.90	17 200	0.730
4	除尘脱硫脱硝补偿(降低 0.05 元/(kW·h))			0.680
5	调峰电价(降低 0.16 元/(kW·h))			0.520
6	调峰电价(根据投资反推 0.16 元/(kW·h))			0.520

按照目前国内已达到的技术条件,结合国家开展的 20 个太阳能示范电站的经济数据,电站管理费用控制在常规火电站范围内,单位造价控制在 21 200 元/kW,则含税上网电价 1.015 元/(kW·h)。

通过进一步降低镜场投资、提高电站整体效率、采用高效率的发电机组,同时在土地政策上给予较好的条件,单位造价控制在 17 200 元/kW,含税电价可在 0.730 元/(kW·h)。

此时,考虑太阳能热发电无烟尘、硫化物、氮氧化物、汞等污染物排放,环保补偿电价为 0.050 元/(kW·h)进行折算,考虑到太阳能热发电采用了 7 h 储热,此部分的费用折算电价约为 0.160 元/(kW·h)。

为进行电站总投资及其经济性分析,根据我国电站融资、贷款、投资回收期、赢利模式等要求,结合以上技术数据就可以对太阳能电站进行具体投资和电价分析。计算结果显示,按照电站寿命期 30 a,全部投资收益率 8% 计算,在国内太阳辐射资源条件下,最低含税电价可达到 0.730 元/(kW·h)。考虑到环保排放补偿和太阳能热发电调峰补偿,则相当含税电价为 0.520 元/(kW·h)。

参考文献:

[1]黄湘. 太阳能热发电技术[M]. 北京:中国电力出版社,

的 40% 左右大幅提高到 48% ~ 50%。根据测算,当热电转换效率再提高 5.00 百分点,镜场费用可再降低 1 亿元左右。

5 电站投资比较结论

按照常规火电站的技经数据和工程量数据,与 50 MW 塔式太阳能热发电站的投资进行对比,利用式(2)关系式得到的结论见表 5。

表 5 中初设数据为国内 2014 年版的火力发电工程建设预算编制与计算规定数据,当时的单位造价为 26 800 元/kW,含税电价为 1.350 元/(kW·h)。

2015:110 – 113,136 – 148.
[2]ANDERSON Bruce N. Modular solar systems for 24/7 scalable, flexible, affordable electricity[C]//Proceedings of the ASME 2017 power and energy conference 2017. Chartlote: Power Division, Advanced Energy Systems Division, Solar Energy Division,Nuclear Engineering Division,2017.
[3]中国电力工程顾问集团西北电力设计院. 亚洲新能源德令哈 50 MW 太阳能光热发电工程可行性研究阶段可行性研究报告[R]. 2013.
[4]方勇,宿建峰,王娜娜,等. 塔式太阳能热发电吸热器模拟计算[J]. 发电与空调,2014,35(3):4 – 8.
[5]广东东北电力工程设计有限公司. 首航节能敦煌 100 MW 熔盐塔式光热发电示范项目工程可行性研究报告[R]. 2015.

(本文责编:白银雷)

作者简介:

范洁(1969—),女,重庆万州人,高级工程师,从事火电、新能源设计和咨询工作(E-mail:fanj@chec.com.cn)。
杜凤丽(1990—),女,江苏沛县人,秘书长,硕士,从事太阳能热发电研究和管理工 作(E-mail:du.fengli@mail.iee.ac.cn)。
孙建朝(1981—),男,河北沧州人,工程师,从事火电、新能源设计和咨询工作(E-mail:sunj@chec.com.cn)。