

中国科学院太阳能热利用及光伏系统重点实验室 杜凤丽

摘要：以系统年平均发电效率为引领，以发电工质温度和换热介质种类为主线，提出了降低聚光太阳能热发电成本的途径。

关键词：聚光太阳能热发电；成本；途径

一 引言

聚光太阳能热发电(以下简称太阳能热发电)是通过聚光器将太阳光反射聚集在吸热部件上,经由传热介质将太阳能转换为热能,然后通过热力循环做功实现发电的技术形式。聚光太阳能热发电可以采用郎肯循环,也可使用效率更高的布雷顿循环或斯特林循环。在原理上,聚光太阳能热发电系统与传统的化石燃料电站类似,两者最大的区别在于输入的能源不同,前者采用的是太阳能。

太阳能具有间歇性及输入不稳定的特点,因此利用太阳能进行发电存在电力输出波动大的问题。与目前的光伏发电技术不同,太阳能热发电可以带有储热系统,将白天多余的热量储存起来,当太阳辐照不好时,释放储存的热能,保持汽轮机持续运行,从而保证输出电力的稳定性,并增加全负荷发电时数。此外,太阳能热发电站还可以利用化石燃料进行补燃,实现在夜间或连续阴雨天时的持续发电。

太阳能热发电目前在国外已经进入商业化发展的阶段。然而,与传统的化石燃料电站相比,太阳能热发电的发电成本(LEC)仍然很高。在现有技术条件下,太阳能热发电的成本为 $0.19 \sim 0.25$ \$/kWh^[1]。相对较高的发电成本在一定程度上影响了太阳能热发电大规模化的进程,因此降低发电成本是推进太阳能热发电发展的首要任务。

二 降低太阳能热发电成本的途径

发电成本是影响太阳能热发电发展的最关键因素。国际能源署(IEA)曾公布一种计算可再生能源系统发电成本的简化公式^[2],详见式(1)。

$$LEC = \frac{crf \cdot K_{invest} + K_{OM} + K_{fuel}}{E_{net}} \quad (1)$$

式中: K_{invest} 为电站总投资; K_{OM} 为年运行管理费用; K_{fuel} 为年燃料费用; E_{net} 为年净发电量。 $crf = \frac{k_d(1+k_d)^n}{(1+k_d)^n - 1} + k_{insurance}$ 其中: k_d 为实际利率; n 为电站寿命; $k_{insurance}$ 为年保险费。

从式(1)可以看出,发电成本与电站的初始投

资、贷款利率、年运行维护费用以及年净发电量等密切相关。其中,初始投资和电站年净发电量(年发电量-用电量)是关键。降低太阳能热发电站的初始投资,提高太阳能热发电站的年净发电量是降低太阳能热发电成本的有效途径。

太阳能热发电站的初始投资成本主要包括太阳能部件(太阳能镜场、太阳能吸热器、蓄热系统)以及常规热力循环部件(蒸汽发生、发电模块)的费用。降低初始投资的成本可通过降低各种部件的成本来实现。太阳能热发电站的年发电量与系统年均效率、投射在镜场上的年太阳直射辐照量相关,在相同的太阳辐照量下,系统年均效率越高,则电站的年发电量就越多。

经过初步测算发现,系统效率每提高1%,相当于初投资降低5%~7%。因此,提高系统效率是降低发电成本的重要途径。太阳能热发电的发电成本、初投资和系统效率的关系如图1所示。

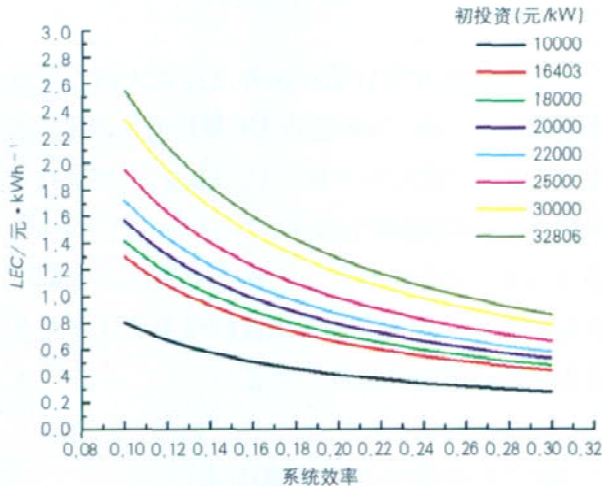


图1 太阳能热发电的发电成本、系统效率和初投资的关系

太阳能热发电的系统效率,即光电转换效率取决于集热效率和热机效率两个参数。这两者又与聚光比和吸热器的工作温度密切相关。当聚光比一定时,随着吸热器工作温度升高,集热效率会下降,而汽轮机的效率提高,系统效率曲线会出现一个“马鞍点”(图2)。因此单纯提高吸热器的工作温度,并不一定能提高系统效率,反而可能会降低光电转换效率。只有聚光比与吸热器的温度协同提高,才是降低发电成本的有效途径^[3]。

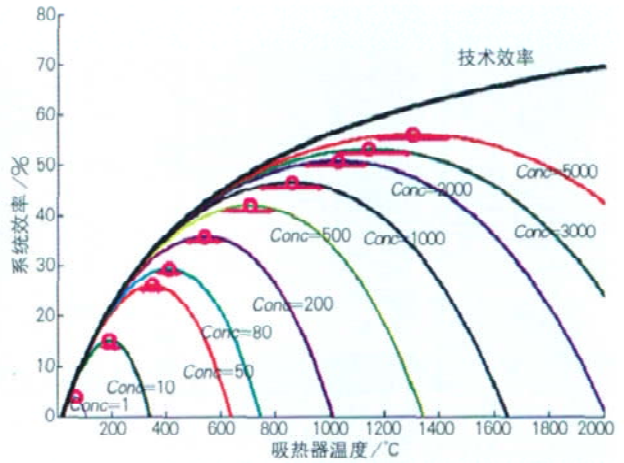


图2 聚光比、吸热器温度和系统效率的关系

三 太阳能热发电的技术发展路线图

太阳能热发电的技术进步主要反映在发电成本上,太阳能热发电系统的光电转换效率是影响发电成本最重要的因素。从热力学的角度,发电工质的参数(温度、压力)会对系统效率产生重要影响。而发电工质参数与聚光、光热转换、储热过程中的材料、热学和力学等问题密切相关。基于以上考虑,以系统年平均发电效率为引领,以发电工质的温度和换热介质种类为主线,将太阳能热发电技术分为四代,如图3所示。

“十一五”期间(2006~2010年),我国对以水/油作为集热系统换热介质的第一代技术进行了研发示范,建立了1MW_t塔式实验示范电站;对以熔融盐为传热介质的第二代技术,主要进行了熔融盐热物性等研究,搭建了熔融盐工质系统的实验平台,并研制了用于塔式发电站的100kW_t熔融盐吸热器;针对第三代技术,对以碳化硅泡沫陶瓷作为吸热体的空气吸热器进行了基础问题的摸索;针对第四代技术,分别在北京和银川建立了20kW_t和300kW_t的高温太阳炉聚光集热系统。

“十二五”期间(2011~2015年),水和油作为集热系统换热介质进入产业化推广阶段,以熔融盐为传热介质的集热系统进入规模化示范阶段,而以空气为换热介质的集热系统从基础研究进入应用基础研究阶段,并逐步进行中试。

“十三五”期间(2016~2020年),第一代技术继续大规模商业化,第二代技术开始进入市场,发

图3 太阳能热发电技术发展路线图^[4]

电效率提高到20%。由于熔融盐的使用,传热介质温度大大提高,超临界太阳能热发电技术也开始进入中试。

“十四五”期间(2021~2025年),第三代以空气为传热介质和发电工质的技术进入市场,系统年发电效率达到30%,并且无需耗水。但由于高温空气传输的原因,该类电站的容量受到制约,此时第四代以固体颗粒作为传热介质的吸热过程进入高技术示范阶段。

“十五五”期间(2026~2030年),第四代太阳能热发电技术进入市场,系统年发电效率达到35%,并且突破了第三代技术的系统容量问题,高温储热问题也得到了解决,超临界太阳能热发电站也将出现。

四 结论

太阳能热发电是真正的不影响自然环境和经济社会可持续发展的绿色能源,太阳能热发电站的建设可以利用贫瘠的荒漠土地进行并网发电,也可独立于电网运行,建成分布式电源,为偏远地区供电。太阳能热发电可采用储热系统,或者利用化石燃料补燃,克服了太阳能间歇性、不稳定的缺点,因此,太阳能热发电技术的发展具有

重要意义。

从根本上来说,相对较高的发电成本阻碍了太阳能热发电大规模发展的进程。降低太阳能热发电的成本主要有两个途径:降低初投资和提高系统效率。据测算,系统效率每提高1%,相当于初投资降低5%~6%,因此提高太阳能热发电站的系统效率是降低发电成本的重要途径。从热力学的角度讲,发电工质的参数(温度、压力)会对系统效率产生重要影响,而发电工质的参数与聚光、光热转换、储热过程中的材料、热学和力学等问题密切相关。通过四代太阳能热发电技术的逐步发展,太阳能热发电技术在成本上将更具有竞争性。

参考文献

- [1] Hermann Spellmann, Luis Fajnas Martinez, Alexander Karnick. The CSP industry: An awakening giant[R]. Deutsche Bank, Global Markets Research, Companies, 2009-03-19.
- [2] Robert Pitz-Paal, Jürgen Dersch, Barbara Milow. European Concentrated solar thermal road-mapping (ECOSTAR)[R]. SES6-CT-2003-502578, 2004.
- [3] Wang Zhifeng, Du Fengli. Concentrating solar power strategies in China[J]. Journal of the Japan Institute of Energy, 2010, 89(4): 331 - 336.
- [4] 王志峰, 杜凤丽. 太阳能热发电的技术发展途径[A]. 科技创新促进中国能源可持续发展——首届“中国工程院/国家能源局能源论坛”论文集[C], 北京: 化学工业出版社, 2010: 661 - 665. 太阳能