

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.02.007

国标《塔式太阳能光热发电站设计标准》 关键共性技术

许继刚^{1,✉}, 李心², 仇韬³, 汪毅⁴, 赵晓辉³

(1. 中国能源建设集团有限公司工程研究院, 北京 100022; 2. 浙江中光新能源科技有限公司, 杭州 310018;
3. 中国电力工程顾问集团西北电力设计院有限公司, 西安 710075; 4. 中国电力企业联合会, 北京, 100761)

摘要: [目的] 塔式光热发电是我国首批太阳能热发电示范项目的主流型式。为了促进科技进步, 推动产业发展, 有必要对塔式光热发电站的设计进行规范。[方法] 在总结分析塔式光热发电站设计经验的基础上, 对光热发电设计的共性原则和关键技术进行了研究, 给出了适用范围、规模划分、设计寿命等共性原则, 重点研究了太阳能资源评估、集热系统与设备、储热系统与设备、自动化系统等关键技术方案。[结果] 确定了塔式光热发电站的主要设计方案, 给出了发电量估算方法, 制定了世界首部太阳能光热发电设计标准《塔式太阳能光热发电站设计标准》。标准为国内塔式光热发电项目的开发、建设和运行提供了技术支撑, 其主要内容已经上升为国际标准 IEC62862-4-1《塔式太阳能光热发电站设计总体要求》。[结论] 标准可对塔式光热发电站的设计提供指导。

关键词: 塔式光热发电; 设计标准; 集热系统; 储热系统; 自动化系统

中图分类号: TM615; TK519

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)02-0046-05

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Key Generic Technologies on National Standard of "Standard for Design of Solar Power Tower Plant"

XU Jigang^{1,✉}, LI Xin², QIU Tao³, WANG Yi⁴, ZHAO Xiaohui³

(1. Engineering Institute of China Energy Engineering Group, Beijing 100022, China; 2. Zhejiang Heliuss New Energy Co., Ltd., Hangzhou, 310018, China; 3. Northwest Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, China; 4. China Electricity Council, Beijing 100761, China)

Abstract: [Introduction] Solar power tower generation is the mainstream of the first solar thermal power generation demonstration projects in China. In order to promote the progress of science and technology, promote the development of industry, it is necessary to standardize the design of solar power tower plant. [Method] On the basis of summarizing and analyzing the design experience of solar power tower plant, the common principles and key technologies of power plant design were studied, common principles such as scope of application, scale division and design life were given, and the key technical schemes such as solar resource assessment, collector system and equipment, thermal storage system and equipment, automation system, etc. were mainly studied. [Result] The main design scheme of the solar power tower plant is determined, the method of power generation estimation is given, and the "standard for design of solar power tower plant", the first solar thermal power generation design standard in the world, is formulated. The standard provides technical support for the development, construction and operation of domestic solar power tower generation projects, and its main content has risen to the international standard IEC62862-4-1 "General requirements for the design of solar power tower plant". [Conclusion] The standard can provide guidance for the design of solar power tower plant.

Key words: solar power tower generation; design standard; collector system; thermal storage system; automation system

收稿日期: 2019-12-20 修回日期: 2020-01-17

基金项目: 中国能建工程研究院科技项目“国家标准《塔式太阳能光热发电站设计标准》”(GB/T51307—2018)

0 前言

随着化石能源的不断枯竭, 以及生态环境的逐

渐恶化,大力发展可再生能源,尤其是充分利用太阳能资源,已经是我国的一项基本国策。伴随2016年国家能源局公布的首批20个太阳能光热发电示范项目的大力推进,光热发电工程建设在国内迎来了雨后春笋般的发展。按照聚光方式分类,光热发电包括塔式、槽式、菲涅耳式和碟式四种。首批20个示范项目,塔式占据近半壁江山,高居首位,占9个,无疑成为光热发电实现商业化和规模化最具竞争力的主流型式^[1-3]。

为促进和规范太阳能光热发电技术的发展,《住房城乡建设部关于印发2015年工程建设标准规范制定、修订计划的通知》明确,由中国电力企业联合会和中国能源建设集团有限公司工程研究院担任主编单位,制定国家标准《塔式太阳能光热发电站设计标准》。目前,GB/T 51307—2018《塔式太阳能光热发电站设计标准》(以下简称本标准)已经发布,自2018年12月1日正式实施。本标准是世界上首部光热发电设计综合标准,填补了国内外太阳能光热发电设计标准的空白,对我国首批光热发电示范项目以及后续光热电站的开发、建设、运营等将发挥重要指导作用。以本标准编制内容为基础,中国正在主导编制国际标准IEC62862-4-1《塔式太阳能光热发电站设计总体要求》,对全世界太阳能光热发电行业的技术发展也将产生重要影响。

1 共性原则

1.1 适用范围

塔式太阳能光热发电站主要由定日镜场、吸热塔、吸热器、储热器、换热器和发电机组等组成。按照传热工质的种类,塔式太阳能光热发电系统主要有水/蒸汽、熔融盐和空气等形式。水/蒸汽和熔融盐工质的光热电站在世界范围内已经开始大规模商业化应用,也是目前光热电站建设的主流,而空气介质的光热电站目前还处于小规模试验阶段,离大规模商业化运营还有相当的距离。

本标准适用于采用蒸汽轮发电机组的新建、扩建和改建塔式太阳能光热发电站的工程设计^[4]。该适用范围首先从发电机组的类型上进行了界定,明确指向采用蒸汽轮发电机组。大家知道,水/蒸汽介质通过蒸汽轮发电机组发电,采用熔融盐工质的光热电站也要通过二次回路加热水/蒸汽发电,因

此,该适用范围虽然没有直接明确采用何种介质,但实际上已经指向采用水/蒸汽和熔融盐工质的光热电站。另外,标准的适用范围涵盖了不同建设阶段和建设性质的光热电站。

1.2 规模划分

本标准对塔式光热发电站的规模进行了等级划分,电站按照总装机容量分为大型、中型、小型。总装机容量大于等于400 MW宜为大型电站,小于400 MW且大于等于50 MW宜为中型电站,小于50 MW宜为小型电站^[4]。本标准已经报批的《槽式太阳能光热发电站设计标准》采用统一的规模划分方式,将光热电站分为大、中、小3个等级。

该规模划分方式与火电厂不同,《大中型火力发电厂设计规范》(GB 50660—2011)(以下简称《大火规》)明确单机容量在125 MW及以上的为大中型^[5]。考虑光热发电的特殊性,本标准并未采用单机容量的传统划分方式,而是采用了总容量进行划分。

采用总容量进行划分的创新意义有3点:(1)更符合光热发电的工艺特点;(2)更能体现电站的实际建设规模;(3)是和电站的防洪建设标准相吻合。

本标准按照重要程度将电站划分为两个层次:第一个层次,明确了发电区和吸热塔的防洪(涝)标准应符合表1规定。第二个层次,定日镜场和其他独立区域的防洪(涝)标准不应低于50年一遇的高水(潮)位^[4]。

表1 发电区防洪(涝)标准

Tab. 1 Flood control standards of power generation area

发电区容量/MW	防洪标准
≥400	≥100年一遇的高水(潮)位
≥50,且<400	≥50年一遇的高水(潮)位
<50	≥50年一遇的高水(潮)位

1.3 设计寿命

《大火规》规定火力发电厂工艺系统的设计寿命为30年,考虑塔式光热发电站集热系统和传热、储热、换热系统的工艺特性,结合定日镜、吸热器、储热器、换热器等主要设备特点,以及频繁启停对系统寿命的影响等因素,本标准明确:电站工艺系统的设计寿命应按25年设计^[4]。

但是,虽然工艺系统的设计寿命规定为25年,

但建筑结构的设计寿命和火力发电厂采用同样的标准。本标准明确：除临时性结构外，电站的建（构）筑物的结构设计使用年限应为50年^[4]。

2 关键技术

和火电厂相比，塔式太阳能光热发电站无论是在工艺系统流程，还是在设计流程上，都存在一定的差异。太阳能光热发电站设计中的关键技术涵盖前期站址选择、系统工艺及其设备、自动化系统、土建工程和运行维护等方面，涉及电站整体运行水平和安全性能的主要问题。在前期选择站址方面：主要涉及太阳能光资源评估、站址的规划与选择、塔式太阳能光热电站光污染防治等方面。在光热发电工艺及设备方面：主要包含太阳能光热关键设备部件选型设计、镜场设计、储热系统设计、工艺系统集成设计等方面。在光热发电自动化方面主要有控制系统设计和信息系统设计。在电站土建方面主要有吸热塔结构设计和定日镜结构设计。在运行维护方面有光热电站消防设计和镜场清洗等^[6]。下面将重点针对太阳能资源评估、集热系统与设备、储热系统与设备、自动化系统等4个方面进行论述。

2.1 太阳能资源评估

建设太阳能光热发电站首先要选址，而选址的首要问题是对太阳能资源的基本状况进行评估，并对相关地理条件、气候特征和基本气象要素进行适应性分析。应选择光热发电站站址所在地附近的参考气象站采集太阳能的辐射量以及其他相关天气数据，另外还需设置现场观测站连续测量直接辐射和总辐射值，之后对采集的太阳辐射观测数据进行验证与分析。

本标准设置了太阳能资源评估章节。太阳能资源评估章节对参考气象站有关资料的获取、现场观测站的设置与参数采集、太阳辐射数据验证与分析等进行了规范。本标准明确，用于太阳能资源评估的现场观测数据应为连续观测记录，且不少于一个完整年。另外，参考气象站宜具有连续近10年以上的太阳法向直射辐照量观测记录^[4]。

2.2 集热系统与设备

与火电厂相比，塔式太阳能光热电站最主要的区别是集热系统与集热场，火电厂有锅炉设备及系统、除灰渣系统、烟气脱硫系统、烟气脱硝系统等

锅炉岛章节，本标准针对太阳岛特点，分别设置了集热系统及设备，传热、储热与换热系统及设备2章。集热系统及设备主要包括定日镜、吸热器和定日镜清洗装置。

作为集热系统最关键的设备，吸热器可采用外置式或腔式两种型式，应根据机组容量和环境气象条件，并结合定日镜的布置方式确定。

外置式熔融盐吸热器设计应符合以下6个方面的规定：（1）对应设计点的吸热器输出热功率应根据汽轮机额定热功率及储热系统容量确定；（2）吸热器出口熔融盐工作温度及压力宜与传热、换热系统设计参数相匹配。吸热器出口熔融盐额定温度宜在 $\pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内变化；（3）吸热器应设置进口缓冲罐，其容积应根据定日镜场散焦时间确定。进口缓冲罐配置空气储罐。在进口缓冲罐和空气储罐上应设置安全阀；（4）吸热器宜设置出口缓冲罐。出口缓冲罐按常压设计；（5）吸热器宜在20%~100%最大热功率范围内安全稳定工作；（6）在吸热器不能被阳光照射的部位，应设置电伴热。电伴热功率宜满足预热和防凝要求。

外置式和腔式水/水蒸汽吸热器设计应符合以下7个方面的规定：（1）对应设计点的吸热器输出热功率不应小于汽轮机额定热功率；（2）吸热器出口过热蒸汽额定温度宜高于汽轮机额定进汽温度 $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；（3）吸热器出口再热蒸汽额定温度宜高于汽轮机中压缸额定进汽温度 $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ；（4）吸热器过热器出口至汽轮机进口的压降，不宜大于汽轮机额定进汽压力的5%；（5）再热器设置应经技术经济比较后确定；（6）吸热器的汽包、过热器出口、再热器进口均应设置安全阀；（7）根据设计参数和系统整体要求，吸热器可采用自然或强制循环方式^[4]。

2.3 储热系统与设备

与风力发电、光伏发电等间歇性可再生能源发电相比，光热发电最明显的优势是在储热的配合下能够连续稳定发电，成为既可以承担基本负荷，又可以承担调峰任务的电网友好发电类型。无论是蒸汽蓄热器储热，还是熔融盐罐储热，都已经拥有国内外成功的运行经验。

传热、储热与换热系统及设备这章主要包括传热系统及设备、储热系统及设备、换热系统及设备、辅助系统及设备4节。储热系统及设备这节重

点对储热介质的选择和储热设备的选择进行了规定。

储热介质的选择应满足以下4个方面的要求:(1) 传热介质作为储热介质具有较好经济性,且系统已被验证成熟可靠时,应优先选用传热介质作为储热介质;(2) 选择利用储热介质的显热或潜热储存热能;(3) 储热介质应能满足工艺需求条件下的储热最高温度,且储热介质的物理化学性能参数应具有长期稳定性;(4) 采用熔融盐作为传热介质时,宜采用同一熔融盐作为储热介质。采用水/蒸汽作为传热介质时,不宜采用水作为大容量储热系统中的储热介质。

储热设备的选择应满足以下3个方面的要求:(1) 熔融盐作为显热储热介质时,宜采用冷、热双罐存储。熔融盐作为潜热储热介质时,宜采用单罐存储。也可采用熔融盐显热储热、潜热储热组合存储;(2) 熔融盐显热储热应采用拱顶储罐;(3) 水/蒸汽作为传热介质并采用熔融盐显热储热时,应设置一组熔融盐充热换热器^[4]。

2.4 自动化系统

本标准和大火规一样,将电站的自动化系统分为2个层面,第一个层面是控制层面,将直接参与过程测量与控制的系统和设备归在仪表与控制一章,第二个层面是管理层面,将不直接参与过程控制的系统和设备归在信息系统一章。有关塔式光热太阳能系统的特殊测量、跟踪、控制等内容全部列入仪表与控制章节。有关全站信息管理系统、安全防范系统等内容则列入信息系统章节。

太阳能光热电站的定日镜场控制系统和主控制系统是电站最重要的两个自动化系统。定日镜场控制系统具有特殊的控制方式,该系统的灵活性与准确性直接影响能源转化效率,目前成功运行项目的定日镜场控制系统以及定日镜就地控制装置基本上均由境场总包商提供,以确保整个境场的运行性能。

定日镜场控制系统上有主控制系统,下有定日镜就地控制装置,形成了镜场的三级控制。标准对三级控制的关系进行了约定:定日镜就地控制装置可采用可编程控制器或其他控制装置,控制装置应与定日镜场控制系统进行通信;定日镜场控制宜纳入电站主控制系统,当采用独立控制系统时,应与电站主控制系统实现通信连接^[4]。

作为主控制系统的分散控制系统(DCS)是单元发电机组的大脑和指挥系统,承担了整个发电工艺流程的全程控制,功能可以覆盖数据采集系统(DAS)、模拟量控制系统(MCS)、开关量控制系统(SCS)等,条件允许时,还可以覆盖汽轮机数字电液控制系统(DEH)、汽轮机危机遮断系统(ETS)等。DCS也是电站人机交互的主要通道。

与火电厂信息系统这章有所不同,本标准设置了管理信息系统、安全防范系统、生产视频监视系统和视频会议系统。鉴于太阳能光热发电系统的特殊性,大量信息的获取和分析可为电站设计优化和运行维护提供数据支撑。

3 发电量估算

光热电站的发电量估算,是电站前期设计必须考虑的重要环节。本标准的一个重要创新点是给出了塔式太阳能光热电站的发电量估算参考公式,作为本标准的附录。

发电量应基于典型太阳年数据、定日镜场布置、定日镜场采光面积、定日镜外形及性能、吸热器性能、吸热器外形及在定日镜场中的位置、吸热塔所在位置经纬度、储热系统容量、蒸汽发生器设备容量及汽轮机容量进行估算。

发电量估算宜按照不大于1h间隔的逐时段发电量累积计算。同时,发电量估算一方面应计入热力系统设备启动、运行及停运阶段的热量损耗,另一方面还应计入定日镜场效率、吸热器热效率、传热流体管道及储热设备效率、蒸汽发生器及汽水管道效率和汽轮发电机组效率。

发电量估算可按下式计算:

$$e = A_{s.f.} \eta_{p.b.} \sum_{i=1}^n \left[\text{DNI}^i \times t^i \times (1 - d^i) \times \eta_{s.f.}^i \times \eta_{rec.}^i \times \eta_{HTF.p.}^i \right] / 1000 \quad (1)$$

式中: i 为计算时间间隔序号; n 为总计算次数,对于典型太阳年,若按1h间隔计算,则为8760次; e 为发电量(kWh); DNI^i 为法向直射辐照度(W/m^2); t^i 为时间间隔(h); $A_{s.f.}$ 为定日镜场总采光面积(m^2); d^i 为某一计算时刻DNI达不到吸热器启动及正常运行要求、吸热器温升速率限制、最大功率限制、定日镜最大运行风速限制、储热系统容量限制等引起的定日镜场弃光率; $\eta_{s.f.}^i$ 为定日镜场效率(%),包括镜面反射率、定日镜镜面清洁度、

定日镜误差、定日镜余弦效率、遮挡和阴影效率、大气衰减和吸热器截断效率等； η_{rec}^i 为吸热器热效率； $\eta_{HTF,p}^i$ 为集热及换热系统传热流体管道传输效率（%），可取 99%； $\eta_{p.b.}$ 为热电转换平均效率（%），包括储热系统热效率、汽轮发电机组效率、热力系统管道效率。

当采用年均指标计算时，可按式（2）计算：

$$e = J_{DN1a} \times (1 - d) \times A_{s.f.} \times \eta_{s.f.} \times \eta_{rec.} \times \eta_{HTF,p.} \times \eta_{TES} \times \eta_{power,p.} \times \eta_{s.t.} \quad (2)$$

式中： J_{DN1a} 为年法向直射辐照量（kWh/m²）； d 为定日镜场年平均弃光率（%）； $\eta_{s.f.}$ 为定日镜场年平均效率（%）； $\eta_{rec.}$ 为吸热器年平均效率（%）； $\eta_{HTF,p.}$ 为热及换热系统传热流体管道的年平均传输效率（%）； η_{TES} 为换热区设备效率（%），包括储罐、蒸汽发生器等换热器的效率； $\eta_{power,p.}$ 为电单元汽水管道传输效率（%），可取 99%； $\eta_{s.t.}$ 为轮发电机组年平均发电效率（%）。

公式中，定日镜误差应计入环境风压及环境温度对定日镜跟踪的影响。发电量估算一方面应计入汽轮发电机组全年时段的负荷特性及运行模式的影响，另一方面还应计入系统各设备的可用率^[4]。

4 结论

文章针对塔式光热发电站设计的共性问题 and 关键技术进行了解读，一方面对大家关注的焦点问题进行论述，主要包括基本概念的确立、基本设计原则的制定等，另一方面对标准的关键技术进行了介绍，便于标准的掌握和执行。

参考文献：

- [1] 许继刚,汪毅. 塔式太阳能光热发电站设计关键技术 [M]. 北京:中国电力出版社,2019.
- [2] 许继刚,陈玉红. 太阳能光热发电工程进展 [J]. 中国电力, 2010,43(增刊2):101-105.
XU J G, CHEN Y H. The evolution of solar thermal power project [J]. Electric Power, 2010,43(Supp. 2):101-105.
- [3] 许继刚,王正,李波. 太阳能光热发电技术的发展现状 [J]. 电力工程技术,2008,3(1):54-59.
XU J G, WANG Z, LI B. The development status of solar thermal power technology [J]. Power Engineering Technology, 2008,3(1):54-59.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. 塔式太阳能光热发电站设计标准: GB/T 51307—2018 [S]. 北京:中国计划出版社,2018.

Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China, State Administration of Market Supervision. Standard for design of solar power tower plant: GB/T 51307—2018 [S]. Beijing: China Planning Press, 2018.

- [5] 中华人民共和国住房和城乡建设部,国家市场监督管理总局. 大中型火力发电厂设计规范: GB 50660—2011 [S]. 北京:中国计划出版社,2011.
Ministry of Housing and Urban-Rural Construction of the People's Republic of China, State Administration of Market Supervision. Code for design of fossil fired power plant: GB 50660—2011 [S]. Beijing: China Planning Press, 2011.
- [6] 许继刚,汪毅,王立军. 国家标准《塔式太阳能光热发电站设计标准》编制思路 [J]. 中国能源建设,2017,1(1):68-72.
XU J G, WANG Y, WANG L J. Editorial thought on national standard of "code for design of solar power tower plant" [J]. China Energy Engineering, 2017,1(1):68-72.

作者简介：



许继刚

许继刚（通信作者）

1964-，男，山东泰安人，常务副院长/教授级高级工程师，博士，从事光热发电与火电设计、研发与技术管理工作（e-mail）jgxu@ceec.net.cn。

项目简介：

项目名称 国家标准《塔式太阳能光热发电站设计标准》（GB/T 51307—2018）

承担单位 中国能源建设集团有限公司工程研究院等 13 家单位

项目概述 为适应我国太阳能光热发电技术发展需要，通过对国内外塔式光热发电站设计经验的调查、总结和分析，对塔式光热发电站设计共性问题进行了论证，对塔式光热发电站设计关键技术进行了研究，完成了太阳能光热资源评估、塔式太阳能光热发电站站址选择、塔式太阳能光热电站光污染分析、塔式太阳能光热发电站关键设备部件选型、塔式太阳能光热发电站镜场设计、塔式太阳能光热储热系统设计、塔式太阳能光热工艺系统集成设计、塔式太阳能光热发电站控制系统设计、塔式太阳能光热发电站信息系统设计、塔式太阳能光热发电站吸热塔结构设计、塔式太阳能光热定日镜结构设计、塔式太阳能光热发电站消防设计、塔式太阳能光热发电站镜场清洗等 14 个专题研究，编制了世界首部太阳能光热发电设计标准《塔式太阳能光热发电站设计标准》。

主要创新点 （1）提出了塔式太阳能光热发电站设计共性原则和选场特殊要求；（2）规范了从集热系统、传热系统、储热系统、换热系统到汽轮发电机系统的工艺集成设计方案；（3）明确了塔式光热发电站控制系统特殊技术要求和吸热塔结构特殊技术要求。

（责任编辑 李辉）