

中国部分城市太阳能蒸汽热发电系统性能分析

林林

(北京科技大学机械工程学院, 100083, 北京)

摘要: 以饱和蒸汽循环太阳能热发电系统为研究对象,对太阳能热电系统进行了理论-模型-模拟的一体化研究.根据中国 30 个省会城市的气象数据,模拟运行了所设计的槽式热发电系统,计算了所设计的各地热发电系统全年的运行情况,分析了系统总效率随昼夜、季节、年度以及纬度的变化,探讨了不同常规能源作为太阳能补充时的经济性.研究表明:电站整体有效工作时间以及全年总发电量是选择太阳能热发电站地址的主要考虑因素,此外,无烟煤以及天然气资源可作为不同情况下备选的常规能源,以提高太阳能热发电站的整体性能.

关键词: 太阳能热发电系统;系统模拟;直接生成蒸汽;太阳直射辐射

中图分类号: TK514 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)05-0026-05

Performance Analysis of Direct Steam Generation Trough Solar Energy Generation System in Some Major Cities of China

LIN Lin

(School of Mechanical Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: An integrative theory-model-simulation (TMS) is performed for investigating the performance of the trough solar energy generation system (SEGS) with saturated steam cycle. Based on the solar radiation data in 30 provincial capital cities in China, the running of the whole SEGS is simulated and the yearly performance is evaluated, and the effects of day-and-night, seasons, years and latitude on the system total efficiency are analyzed. The influence of different conventional energy as the supplementary energy source on the SEGS cost is also discussed. The simulation results show that the effective working time of the SEGS and the yearly energy production are the major factors that ought to be taken into account while choosing the place to build a SEGS. In addition, for different cases anthracite and natural gas can be chosen as the conventional energy sources to improve the SEGS performance.

Keywords: solar energy generation system; system simulation; direct steam generation; direct solar radiation

能源是人类生存和发展的重要物质基础,关系到国家的政治、经济、军事、外交战略,尤其关系到国家安全问题.世界化石燃料的储量与可开采的年份有限,同时化石能源燃烧释放出的大量温室气体与有害气体极大地破坏了人类的生存环境.中国人均能源拥有量仅为世界平均值的 1/2,能源问题已成为国家经济持续发展的瓶颈.

中国具有丰富的太阳能资源,全国 2/3 以上的

地区年日照时数大于 2 200 h,所以开发和利用可再生能源,特别是太阳能显得尤为迫切和意义重大.目前,太阳能发电主要有两种途径:一是光伏发电,即通过半导体的光伏电池直接把太阳辐射能转化为电能;另一种是用太阳能转化的热能产生蒸气,然后利用热力循环的方法来带动发电机发电,称为热发电.

建设成本高是制约太阳能热发电系统商业化运行的主要因素之一.光热发电的方式与传统发电方

式相同,具有生产适应性强、易于并入电网、适于大规模生产等特点,所以在全世界范围得到了广泛关注,被视为一种有前途的可降低成本的方法.国外先后完成了碟式、槽式太阳能热发电的示范电站建设和商业化运行,且完成了多个塔式热发电示范电站的建设.2003 年,西班牙的 DISS 工程证明了直接生成蒸汽发电技术的可行性^[1].很多学者对利用太阳能产生蒸汽的热发电技术进行了研究,以提高效率,降低建设与运行成本,有代表性的研究如文献[2-6].从这些研究中可以发现,槽式太阳能热发电系统是一种可行的中等规模热发电系统.但是,上述研究很少涉及厂址的选择问题.很显然,在建造一座新的太阳能热发电站的过程中,厂址的选择是一个非常重要的问题.

本文将中国 30 个省会城市作为建立太阳能热发电站的备选地址,以直接生成饱和蒸汽的槽式太阳能热发电站为研究对象,分析了系统总效率随昼夜、季节、年度和纬度的变化趋势.为了克服太阳辐射的不稳定性和不连续性,可将不同常规能源系统和太阳能热发电系统连接,因此本文也分析了不同常规能源对整个系统经济性的影响.

1 气象数据处理

本文从中国各地气象站搜集了 2002 年 30 个省会城市的气象数据,通过自编程序,将其中的年逐时太阳总辐射值、散射辐射值处理为逐时、日、月、年的太阳直射辐射值,以为模拟整个太阳能热发电系统性能提供基础数据.

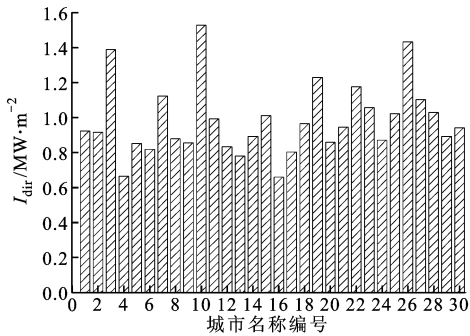
通过对气象参数的处理,发现以下规律.

(1) 受昼夜的影响,各地区全年有一半以上的时间太阳直射辐射强度为 0.在所选择的 30 个地区内,有效直射辐射时间 t_0 和太阳辐射总时间 t_t 的比值大于 50% 的只有拉萨、呼和浩特、昆明、兰州、太原、沈阳、石家庄、北京和长沙这 9 个城市.根据文献[3]的研究结果,当太阳直射辐射小于 250 W/m^2 时,聚焦太阳能热已经没有利用价值.本文将这种限制定义为“250 准则”,用 t_0 表示太阳直射辐射大于 250 W/m^2 的时间,用 t_t 表示太阳直射辐射为非零的时间.

(2) 全年太阳直射辐射能与纬度没有直接的联系.如果将全年获得的太阳直射辐射量作为选择建立太阳能热发电站的依据,那么拉萨、呼和浩特、昆明、兰州、太原、长沙、沈阳、石家庄、乌鲁木齐、北京和合肥可进入考虑之列,这些地区全年获得的太阳

直射辐射强度 I_{dir} 都在 1.0 MW/m^2 以上.

30 个地区全年太阳直射辐射的计算结果见图 1 (图 1 数据是模拟太阳能热发电系统性能的基础),图中横坐标 1~30 分别表示根据纬度由小到大排列的 30 个城市名.



1: 香港;2: 广州;3: 昆明;4: 桂林;5: 福州;6: 贵阳;7: 长沙;
8: 南昌;9: 重庆;10: 拉萨;11: 杭州;12: 武汉;13: 成都;
14: 上海;15: 合肥;16: 南京;17: 西安;18: 郑州;
19: 兰州;20: 济南;21: 西宁;22: 太原;23: 石
家庄;24: 天津;25: 北京;26: 呼和
浩特;27: 沈阳;28: 乌鲁木齐;
29: 长春;30: 哈尔滨

图 1 中国 30 个地区的年太阳直射辐射强度

2 直接生成饱和蒸汽的热力循环概念及系统设计

太阳能热发电系统一般由 6 部分组成:太阳能聚光-集热子系统、吸收与输送热量子系统、蓄热子系统、蒸汽发生子系统、动力子系统和发电子系统.其中,太阳能聚光-集热系统和动力子系统是最为关键的 2 个部分,发电子系统与常规能源发电系统基本相同.本节对聚光-集热和动力这 2 个部分进行了设计,最后形成饱和蒸汽循环槽式太阳能热发电系统模型.

2.1 槽式集热器镜场设计

采用 DISS 工程中的集热器,集热器参数取自文献[7],如表 1 所示.单个集热器由 8 个吸热单元组成,每排由 8 个集热器南北方向串联而成,这些集热器采用双轴跟踪系统,以确保太阳辐射能够垂直照射到抛物镜开口平面,从而实现太阳辐射能的最大利用.根据 Eck 等人^[8]的经验,饱和蒸汽循环方式中的集热器共有 9 排,各排集热器最后与一个集管连接,集管再连接到汽液分离器,汽液分离器入口处的水蒸气干度为 0.85.从汽液分离器出来的饱和水进入集热器镜场的入口,而饱和蒸汽则直接进入

饱和蒸汽轮机. 在兼顾经济成本和水蒸气干度的情况下, 应尽量使汽液分离器入口处的干度接近 0.85.

表 1 槽式抛物镜集热器的性能参数

参数名称	参数值	参数名称	参数值
L/m	98.5	D_o/m	0.07
W/m	5.76	D_i/m	0.055
A_t/m^2	548.35	l/m	12.27
N	8	E_{po}	0.765

注: L 为单个集热器的总长度; W 为抛物镜开口宽度; A_t 为单个集热器开口总面积; N 为单个集热器中抛物镜单元数目; D_o 为吸热管外径; D_i 为吸热管内径; l 为单个抛物镜单元长度; E_{po} 为抛物镜的光学效率.

在进行集热器性能计算时, 所作简化假设如下.

(1) 未考虑玻璃圆管的作用, 吸热管表面涂上合金陶瓷选择性吸收层, 根据文献[9], 吸热管表面的热发射率为

$$\epsilon_{\text{ab}} = 0.000\ 42T_{\text{w}} - 0.099\ 5 \tag{1}$$

式中: T_{w} 为管子外壁温度, 单位为 K.

(2) 未考虑管壁的厚度, 管子平均直径取内外径的平均值.

(3) 吸热管横截面上的温度恒定, 温度仅沿吸热管轴向分布.

(4) 每个计算单元吸热管外表面的温度取工质进口温度.

(5) 不考虑整个管道中的压降以及各集热器连接处的损失.

通常情况下, 直接生成的蒸汽槽式集热器镜场由 3 部分组成: 过冷水段、汽液两相段和过热蒸汽段. 对于过冷水段和过热蒸汽段, 吸热管将划分成若干个计算单元, 如图 2 所示. 在每个计算单元中, T_{in} 、 T_{out} 和 Δl 分别是进、出口温度以及计算单元的轴向长度.

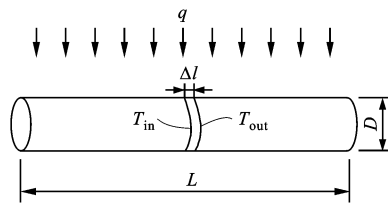


图 2 吸热管计算简图

在上述 2 个区段, 计算单元的出口温度与长度的关系如下

$$\Delta l\ W\ I_{\text{dir}}\ E_{\text{po}} = q_{\text{m}}(h_o - h_i) + \sigma\ \epsilon_{\text{ab}}A(T_{\text{w}}^4 - T_{\text{c}}^4) + hA(T_{\text{w}} - T_{\text{c}}) \tag{2}$$

式中: q_{m} 为工作介质的质量流量, 本文中的介质是

水或水蒸气; W 和 A 分别为计算单元集热器开口面宽度和辐射面积; h 为管子与环境之间的对流换热系数; $\sigma = 5.67 \times 10^{-8}$ 为 Stepan-Boltzmann 常数; h_o 和 h_i 分别为每个计算单元进、出口工作介质的焓值. 水和水蒸气的焓值均可通过下式计算

$$h = 4\ 348.520\ 53T - 1.193\ 99 \times 10^6, \tag{3}$$
$$283\ \text{K} < T < 553\ \text{K}$$

$$h = 2\ 482.165\ 19T + 1.472\ 93 \times 10^6, \tag{4}$$
$$563\ \text{K} < T < 1273\ \text{K}$$

式(3)和式(4)只有当压力为 7 MPa 时才成立, 两式都是根据水和水蒸气焓熵图中焓值和温度的关系表拟合得到的.

在汽液两相段且不考虑损失的情况下, 工质的压力、温度恒定, 因此可假设管壁温度是恒定的, 此时汽液两相段的长度由下式计算

$$l_{\text{T}}\ I_{\text{dir}}\ E_{\text{po}} = q_{\text{m}}(h'' - h') + \sigma\ \epsilon_{\text{ab}}\pi D_{\text{T}}l_{\text{T}}(T_{\text{w}}^4 - T_{\text{c}}^4) + h\pi D_{\text{T}}l_{\text{T}}(T_{\text{w}} - T_{\text{c}}) \tag{5}$$

式中: l_{T} 是两相段的长度; h'' 和 h' 分别为计算点饱和蒸汽和饱和水的焓值. 其他参数和式(2)中的具有相同的意义.

2.2 汽轮机部分的设计、计算

本文的太阳能热发电系统的设计工况: $I_{\text{dir}} = 850\ \text{W}/\text{m}^2$, 环境温度为 293 K, 镜场给水温度为 448 K, 发电机效率为 0.96. 在该设计工况下, 集热器镜场和发电厂的性能如表 2 所示.

表 2 设计工况下直接蒸汽太阳能热发电系统的性能参数

系统	参数	参数值
聚光集热子系统	$G_{\text{r}}/\text{MW} \cdot \text{h}$	124 569
	$Q/\text{MW} \cdot \text{h}$	81 927
	η_{c}	0.658
	$q_{\text{mg}}/\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	10.89
发电子系统	$P/\text{MW} \cdot \text{h}$	19 360
	η_{gs}	0.236
直接蒸汽太阳能热发电系统	η_{t}	0.155

注: G_{r} 为镜场获得的太阳直射辐射能; Q 为镜场产出的热; η_{c} 为聚光集热子系统效率; q_{mg} 为镜场饱和蒸汽产量; P 为发电量; η_{gs} 为发电子系统效率; η_{t} 为系统总效率.

3 整个系统的性能计算

3.1 没有常规能源补充的直接蒸汽太阳能热发电系统性能分析

将上面设计的集热器镜场和发电子系统相连

接,通过导入不同时间和不同地理位置的太阳直射辐射值,来考查饱和蒸汽循环直接蒸汽(DSG)驱动的槽式太阳能热发电系统的性能变化.通过模拟、分析,结果如下.

(1)直接蒸气驱动的热发电系统效率在正午时分最大,沿早、晚两侧递减.晚上由于太阳直射辐射强度为 0,所以系统的效率也为 0.图 3 所示为 2002 年 6 月 22 日西安地区 DSG 热发电系统的时均效率 η 和太阳直射辐射强度时均值的变化情况.从图中看出,除了 6 时和 18 时,2 条曲线非常相似,这正是“250 原则”造成的结果.

(2)根据纬度高低,选取了广州(N23°00′)、南昌(N28°40′)、西安(N34°15′)、北京(N39°57′)、哈尔滨(N45°45′) 5 个城市,以探讨这些地区的 DSG 太阳能热发电系统运行情况.图 4~图 6 所示为 2002 年广州、南昌、西安、北京和哈尔滨 5 个城市 DSG 热发电系统的有效工作时间、净发电量以及总效率.从图 4 看出,夏季低纬度地区的系统有效工作时间 t 比高纬度地区的短,冬季则相反,这可能与中国的气候特点有关.中国隶属东亚季风气候,年降水量从东南沿海向西北内陆递减,南方不仅雨季历时长,而且夏秋季节降水集中,而华北、西北降水较少,在冬季北方地区多为冰雪天气.

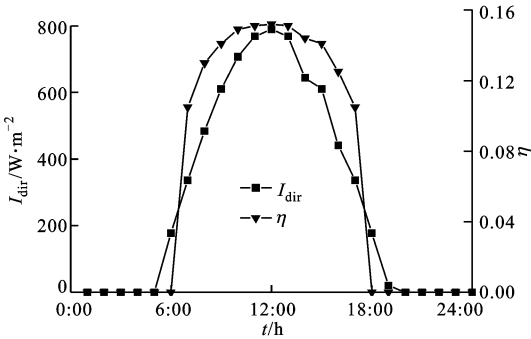


图 3 2002 年 6 月 22 日西安地区太阳直射辐射强度及 DSG 热发电系统效率变化

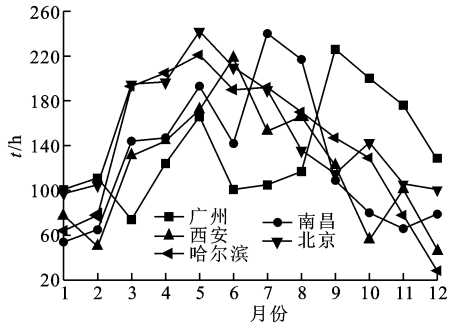


图 4 2002 年不同纬度地区热发电系统有效工作时间比较

图 5 和图 6 显示出,月净发电量 P 和系统效率 η_M 随纬度的变化规律具有一定的相似性,即月净发电量和系统效率随着纬度的增加而减少.此外,从冬季到夏季,低纬度地区系统效率没有太大的变化,而高纬度地区变化比较明显.

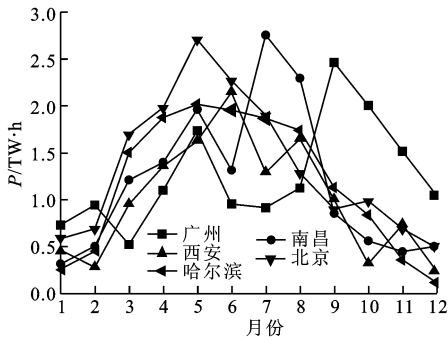


图 5 2002 年不同纬度地区热发电系统净发电量比较

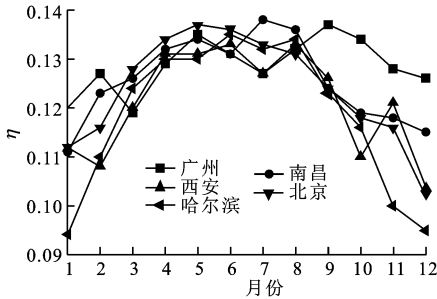


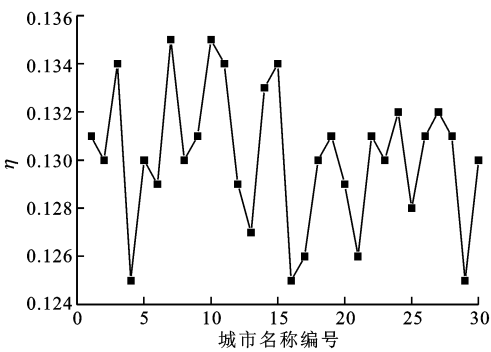
图 6 2002 年不同纬度地区热发电系统效率比较

(3)图 7 所示为 2002 年各地 DSG 热发电系统全年总效率的比较.从图 7 看出,系统全年的平均效率变化不大,各地系统的平均效率均维持在 12.5% 和 13.5% 之间,最高的是拉萨和长沙,效率为 13.5%,最低的是桂林和长春,效率为 12.5%,这说明在选择太阳能热发电站的建造地址时,系统总效率可以不作为主要的考虑因素.

3.2 带有常规能源补充的直接蒸汽的太阳能热发电系统性能分析

众所周知,由于太阳辐射的不稳定性和不连续性,致使单纯的太阳能热发电系统不能安全运行,而且太阳辐射的自身弊端导致了系统寿命缩短,维护成本增加.受到昼夜、季节以及天气变化的影响,系统需利用自动控制装置使常规能源系统自动加热给水,并达到设计工况下汽轮机进口主蒸汽的状态要求,以便汽轮机在设计工况条件下可以稳定工作.

本文选择柴油、天然气、燃煤作为备选常规能源,其市场价格以及燃烧值如表 3 所示.



1:香港;2:广州;3:昆明;4:桂林;5:福州;6:贵阳;7:长沙;
8:南昌;9:重庆;10:拉萨;11:杭州;12:武汉;13:成都;
14:上海;15:合肥;16:南京;17:西安;18:郑州;
19:兰州;20:济南;21:西宁;22:太原;
23:石家庄;24:天津;25:北京;26:呼
和浩特;27:沈阳;28:乌鲁木齐;
29:长春;30:哈尔滨

图 7 2002 年各地 DSG 热发电系统全年总效率比较

表 3 常规能源的市场价格和燃烧值

常规能源	燃烧值/MJ · kg ⁻¹	市场价格/元 · kg ⁻¹
烟煤	29	0.3
无烟煤	34	0.3
焦炭	30	0.3
柴油	33	3.4

常规能源	燃烧值/MJ · m ⁻³	市场价格/元 · m ⁻³
天然气	7.1	1.98

下面以拉萨为例,计算了不同常规能源的质量以及各自的成本,结果如表 4 所示. 从能源数量和经济性来考虑,如果煤炭资源较为丰富,采用无烟煤较为合适;如果煤炭资源紧缺,将天然气作为常规能源是一种较为经济的选择;对于柴油来说,无论从能源数量还是经济性角度来看都不宜作为备选的常规能源. 当然,不同地区采用何种常规能源来补充太阳能

表 4 2002 年全年拉萨地区所需各种
常规能源的数量及其成本

常规能源	质量/t	成本/万元
烟煤	20 033.834	601.015 1
无烟煤	17 087.682	512.630 5
焦炭	19 366.038	580.981 2
柴油	17 605.490	5 985.866 8

常规能源	体积/m ³	成本/万元
天然气	8 182.834	1 620.201 0

的不足,还要根据当地的实际情况而定,如当地及其周边地区矿产资源种类、交通运输方式等.

4 结 论

本文以饱和蒸汽循环槽式太阳能热发电系统为研究对象,进行了太阳能热电系统的理论-模型-模拟一体化分析和研究. 首先,对气象站提供的太阳辐射数据进行了分类、总结和处理,获得了太阳直射辐射能随时间和地理位置的变化曲线. 然后,通过设计直接蒸汽驱动的槽式太阳能热发电系统集热器镜场和饱和蒸汽轮机发电子系统,建立了饱和蒸汽循环槽式太阳能热发电系统模型. 最后,运用处理后的气象数据模拟运行了所设计的发电系统,计算了各地热发电系统全年的运行情况,分析了系统总效率随昼夜、季节、年度以及纬度的变化关系,探讨了不同常规能源作为太阳能补充时的经济性. 研究结果表明,在建造太阳能热发电站时,应将整体电站的有效工作时间以及年度总发电量作为主要的选择依据. 此外,在本文所选的 4 种常规能源中,无烟煤可在煤炭资源相对充足的情况下作为备选常规能源,随着煤炭资源的逐步减少,天然气将是经济性的备选常规能源之一. 以上研究结果在中国建造太阳能热发电站的初始阶段具有一定的参考价值.

参考文献:

[1] ECK M, ZARZA E, EICKHOFF M, et al. Applied research concerning the direct steam generation in the parabolic troughs [J]. Solar Energy, 2003, 74 (4): 341-351.

[2] ECK M, SCHMIDT H, EICKHOFF M, et al. Field test of water-steam separators for direct steam generation in parabolic troughs [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2008, 130 (1): 8-13.

[3] ECK M, STEINMANN W D. Modeling and design of direct solar steam generating collector fields [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2005, 127 (3): 371-380.

[4] NATAN S, BARNEA D, TAITEL Y. Direct steam generation in parallel pipes [J]. International Journal of Multiphase Flow, 2003, 29 (11): 1669-1683.

[5] ECK M, STEINMANN W D, RHEINLANDER J. Maximum temperature difference in horizontal and tilted absorber pipes with direct steam generation [J]. Energy, 2004, 29 (5/6): 665-676.

[6] VALENZUELA L, ZARZA E, BERENGUEL M, et

al. Control concepts for direct steam generation in parabolic troughs [J]. Solar Energy, 2005, 78 (2): 301-311.

[7] ZARZA E, ROJAS M E, GONZALEZ L, et al. INDITEP: the first pre-commercial DSG solar power plant [J]. Solar Energy, 2006, 80 (10): 1270-1276.

[8] ECK M, ZARZAQ E. Saturated steam process with direct steam generating parabolic troughs [J]. Solar Energy, 2006, 80 (11): 1424-1433.

[9] ODEH S D, MORRISON G L. Modeling of parabolic trough direct steam generation solar collectors [J]. Solar Energy, 1998, 62(6): 395-406.

(编辑 王焕雪)