

# 太阳能辅助燃煤一体化热发电系统研究与经济性分析

杨勇平\*, 崔映红, 侯宏娟, 郭喜燕, 杨志平

华北电力大学能源的安全与清洁利用北京市重点实验室, 北京 102206

\* E-mail: [yyp@ncepu.edu.cn](mailto:yyp@ncepu.edu.cn)

收稿日期: 2008-03-12; 接受日期: 2008-05-28

国家自然科学基金(批准号: 50776028, 50606010)和新世纪优秀人才计划(批准号: NCET-05-0217)资助项目

**摘要** 进行了太阳能与燃煤机组集成方式和集成机理的研究. 利用抛物面槽式集热器收集太阳能, 在与燃煤机组集成时, 考虑 2 种系统的物质流和能量流的匹配, 进行了集成方案的拟定. 在研究太阳能热发生系统的热力特性以及对火电机组热力性能影响的基础上, 建立了一体化热发电系统拓扑结构与参数的综合集成优化模型, 对大量的集成方案进行了模拟分析, 总结了太阳能辅助燃煤一体化热发电系统的集成规律并揭示了其耦合机理. 最后对这种一体化发电系统进行了经济性分析, 结果表明, 考虑了 CO<sub>2</sub> 减排带来的环境效益后, 这种技术太阳能部分的 LEC 成本为 0.098 \$/kW·h, 低于单纯太阳能热发电方式 SEGS 成本 0.14 \$/kW·h.

## 关键词

太阳能热发电  
燃煤机组  
系统集成  
经济性

太阳能热发电是未来利用太阳能进行大规模发电的一种方式<sup>[1,2]</sup>. 从 20 世纪 70 年代初石油危机后, 世界主要发达国家如美国、西班牙、德国等都逐步开始大规模太阳能热发电的研究, 取得了大量的成果<sup>[3]</sup>. 但是单纯太阳能热发电系统因其高额的初投资和较低的热力性能一直阻碍着它进一步的商业化进程. 自 20 世纪 90 年代以来, 为了有效解决上述问题, 欧美等国提出通过提高太阳能热发电系统的热力性能, 以减少太阳能热发电成本. 为此, 太阳能与化石能源相结合的复合热发电系统得到了广泛关注<sup>[4]</sup>. 自 1997 年, 国际能源署 IEA 和 SolarPACES 根据能源可持续发展战略, 将太阳能与化石能源相结合的集热式太阳能复合热发电系统(solar-hybrid system)列为 21 世纪近期和中期太阳能热利用的发展目标<sup>[5,6]</sup>.

“十一五”期间我国提出了单位 GDP 能耗下降

20% 的节能目标, 作为全国煤炭消耗大户的火力发电厂, 节能任务意义重大. 在燃煤机组设计框架基础上, 合理集成太阳能热利用系统, 组成太阳能辅助燃煤一体化热发电系统, 是实现我国太阳能大规模利用和火电机组技术节能的一个有效途径. 近年来, 国外关于太阳能与化石燃料机组混合发电技术的研究比较多, 主要对太阳能与燃气-蒸气联合循环、太阳能与化石燃料锅炉以及与火电机组热力系统结合的系统进行了研究<sup>[7~15]</sup>. 这些研究大都集中于案例分析、常规的经济性评估和可行性分析上, 用于 2 系统之间集成的方法太简单, 集成性较差, 缺乏系统层面的理论和方法研究. 系统地研究太阳能热利用系统与火电机组的耦合方式和集成机理, 是实现这种多能源综合利用系统一次能源的综合利用率, 全系统效率达到最高的重要基础.

## 1 太阳能辅助燃煤机组一体化热发电系统集成方案

太阳能热发电与常规燃煤机组都是用热作为中间能量的载体, 组成太阳能辅助燃煤热发电系统的2子系统之间主要是通过热量耦合到一起. 常规燃煤机组做功工质的温度跨度较大, 从几十度到 500 多度, 为太阳能的集成提供了多种方案. 抛物面槽式太阳能集热器是中温太阳能集热器的一种, 在美国投入商业并网运行的9座大型太阳能热发电系统(SEGS I~IX), 均利用了这种技术, 是聚光类集热器中唯一在商业化基础上进行试验的技术, 许多研究机构都在努力寻求与常规的化石燃料电站相结合的方案. 根据集热器吸收管中吸热介质的不同, 抛物面槽式集热器分为2种主要类型: 油吸热和水吸热. 其中, 上述9台 SEGS 电站均采用了油吸热方式, 吸收了太阳能热量后的油在换热器中加热朗肯循环的做功工质水, 水的最终参数为(10 MPa, 391℃); 在集热器吸收管中直接利用水吸收太阳能热量的方式, 即DSG(direct solar steam)方式, 国外已建有试验项目, 由欧盟资助的 DISS 项目在西班牙的热发电研究中心 PSA 进行了 DSG 技术试验, 试验中过热蒸气工作参数达到(10 MPa, 400℃). 对于采用油为冷却介质的集热器, 在与燃煤机组集成时, 两系统间仅有热量的传递; 而对于采用水为冷却介质的集热器, 与燃煤机组集成时, 两系统间不仅有能量流的传递, 而且还可有物质流的交换. 这样, 集热器类型不同, 在与燃煤机组集成时, 必定具有不同的集成方案. 为了论述方便, 以下将这2种方式分别称为DSG型和油冷却型. DSG型太阳能集热器在与燃煤机组集成进行混合发电时, 要同时考虑物质流和能量流的匹配, 基本思路为在单纯燃煤机组热力系统的基础上, 由热力系统的某一部分引出一定量的水经由由集热器组成的太阳能场加热, 加热后考虑参数的匹配, 在适当部位引回热力系统的方式. 考虑到电厂热力系统中各设备和流程的特点, 可采用如下具体方案.

方案一: 从凝结水泵出口引出一部分凝结水, 经由集热器场加热至某级回热抽气参数后, 返回燃煤机组热力系统和该级抽气混合进入该级加热器放热; 图1示出了太阳能集热器场出口参数达到一段抽气参数的系统图.

方案二: 从凝结水泵出口引出一部分凝结水, 经由太阳能集热器场后, 达到再热冷段的参数, 引出和机组再热冷段汇合, 之后进入再热器中继续吸热. 当然, 对于上述2种方案, 去太阳能场的水也可由给水泵中间抽头引出, 或从前置泵出口引出, 图2给出了从给水泵中间抽头分出一部分给水到太阳能场加热后汇集到再热冷段的系统. 两种系统的压力可用泵或节流装置进行调整. 这2类集成方案, 在集成了太阳能热利用系统后, 可认为汽轮机主气流量保持不变, 而仅仅会引起汽轮机各段抽气流量的变化从而使汽轮机做功、热效率等热经济性改变. 当然, 对于再热燃煤机组, 如太阳能热利用系统的引入引起再热冷段之前抽气量的改变时, 则不仅汽轮机的热力性能会发生变化, 而且由于锅炉中再热器吸热量变化, 锅炉的热力性能也会改变.

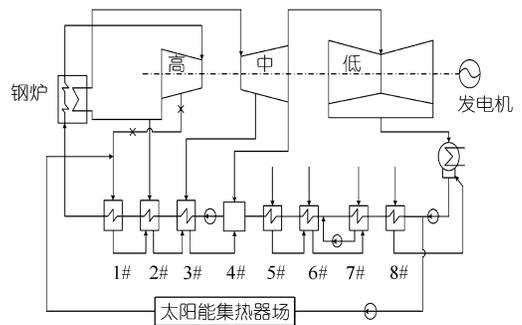


图1 凝结水泵出口引出经DSG集热器场后进入一段抽气系统

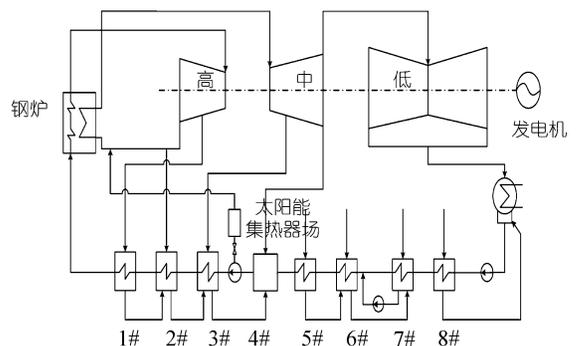


图2 给水泵出口引出经DSG集热器场后进入再热冷段系统

对于油冷却型, 太阳能热利用系统与燃煤机组间仅仅是能量流的交换. 在2系统集成时, 只要满足热力学基本定律即可, 考虑到抛物面槽式太阳能集

热器可达到的最高温度, 可知太阳能热利用系统收集的太阳能热量可用于燃煤机组中水加热到饱和和气态之前的任何部位, 从而使汽轮机的抽气或锅炉的燃煤量减少. 如太阳能热量可用于取代汽轮机各段抽气在加热器中的放热量(可以是单独一段抽气也可以是几段抽气), 图 3 给出了燃煤机组中给水流经一号高加时吸收的热量不用由常规燃煤机组的一段抽气供给, 而利用了太阳能热量的系统; 太阳能热量也可用于加热在锅炉中流经省煤器、水冷壁的工质, 图 4 给出了高加出口的部分给水吸收太阳能热量加热到燃煤锅炉的饱和气态, 之后汇入锅炉过热器的系统; 当然, 太阳能热量还可用于既取代汽轮机的抽气, 又减少工质在省煤器、水冷壁中的吸热量, 图 5 给出了给水泵出口的部分给水吸收太阳能热量, 一直加热到饱和和气态后进入锅炉过热器的系统.

## 2 系统建模

太阳能辅助燃煤一体化热发电机组, 可利用燃煤机组的可调整性来弥补太阳能辐射的波动, 从而

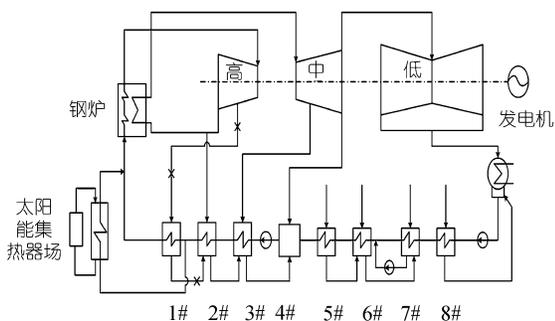


图 3 油冷却型集热器收集太阳能用于一号高加吸热系统

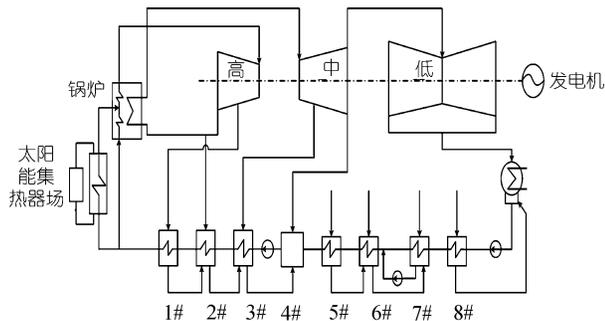


图 4 油冷却型集热器收集太阳能用于锅炉预热和汽化吸热系统

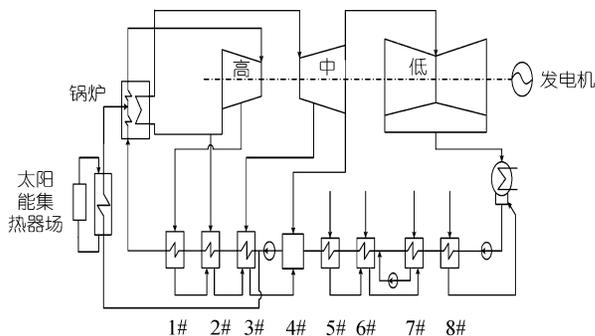


图 5 油冷却型集热器收集太阳能用于高加、锅炉预热和汽化吸热系统

省去单纯太阳能发电所需的庞大储能设备. 也就是说, 太阳能辐射波动时, 利用燃煤机组的煤量来调整. 当夜间太阳能辐射为零时, 机组在单纯燃煤方式下运行.

太阳能辅助燃煤机组在燃煤机组设计的框架上, 合理集成了太阳热能. 当燃煤机组系统发生变化时, 包括系统的拓扑结构和热力参数变化, 必然会引起锅炉各受热面、汽轮机通流部分和热力系统参数及其效率的变化, 从而引起机组热经济性的改变. 对于太阳能热利用系统与燃煤机组不同的集成方案和集成参数, 一体化发电系统的热经济性必然不同. 在燃煤机组热经济性分析中, 锅炉的变工况热力计算一般都采用热力计算标准, 近 50 年来, 我国发电锅炉计算普遍采用的是前苏联 1957 年(包括 2 个修正)和 1973 年 2 个联合标准方法<sup>[16]</sup>. 汽轮机及其系统的变工况不仅要考虑汽轮机通流部分的变工况, 还需要进行热力系统的变工况计算. 改进型弗留格尔公式改善了原型 Flugel 公式的精度, 简化了汽轮机的变工况计算<sup>[17]</sup>; 热力系统热经济性状态方程的结构与系统拓扑结构一一对应, 为热力系统的分析和综合提供了新的基础和研究方法<sup>[18]</sup>; 稳态工况下, 对热力循环进行分解与综合便于多能源综合利用系统的分析<sup>[19]</sup>. 综合这些理论基础, 一体化热发电系统的综合集成优化步骤为:

- a) 给定一新的一体化热发电系统流程和太阳能热利用系统加热的工质流量;
- b) 锅炉变工况计算;
- c) 汽轮机变工况计算, 初步估计由于太阳能热利用系统的引入引起回热抽气量的变化, 在考虑汽轮机各级的通流能力的基础上假定汽轮机主气量;

利用改进型弗留格尔公式计算各段抽气压力; 根据一体化热发电系统的拓扑结构, 进行热力循环的分解, 构造燃煤循环部分的热经济性状态方程; 利用热经济性状态方程计算各段抽气流量和主气流量; 对上述假定回热抽气流量和主气流量进行校核;

d) 综合锅炉和汽轮机的变工况, 进行一体化热发电系统的热经济性评价;

e) 改变太阳能热利用系统加热的工质流量, 重复上述计算, 进行集成参数的优化;

f) 改变系统流程, 重复上述计算, 进行流程优化.

利用太阳能热电转换效率指标  $\eta_{h-e}$  进行评价一体化热发电系统的热经济性, 定义为

$$\eta_{h-e} = \Delta E / Q_{ths} = (E_h - m_c \cdot L \cdot \eta_{ref}) / Q_{ths}$$

式中,  $Q_{ths}$  为太阳能集热器场单位时间输入燃煤机组的热量, 单位 kW;  $E_h$  为太阳能辅助燃煤发电系统发电量, 单位 kW·h;  $\eta_{ref}$  为参考燃煤电站发电效率;  $\Delta E$  为太阳能场净发电, 单位 kW;  $m_c$  为单位时间标煤的质量流量, 单位 kg/s;  $L$  为标准煤的低位发热量, 单位 kJ/kg. 参考电站是指与太阳能混合发电的燃煤机组在纯燃煤时设计工况下运行的电站. 该指标反映了太阳能集热器收集到的太阳能热量转换为电的能力. 利用上述定义得到的太阳能热发电方面的指标数值偏低, 因为在上述定

义中, 由于加入太阳能部分引起的系统不足归到太阳能部分, 这样定义使得只有真正经济性好的太阳能热发电技术才可能在实际工程中应用推广. 依据评价时间尺度的不同, 太阳能热电转换效率可有瞬时热电转换效率和年热电转换效率 2 种.

### 3 模拟结果和集成机理分析

表 1 和 2 给出了太阳能热利用系统与 300 MW 燃煤机组集成, 不同集成方案的模拟结果. 其中, 对于 DSG 型太阳能集热器在与燃煤机组集成时, 主要考虑了太阳能集热器场的水分别从凝结水泵出口或给水泵出口引出, 经集热器加热后出口参数分别达到 1~7 段抽气或再热冷段参数的系统; 而对于采用油冷却型集热器收集太阳能与燃煤机组的集成系统, 主要进行了以下方案的计算: 太阳能热量用于减少 1~7 段各段抽气、1~3 段高加抽气同时减小, 锅炉省煤器和水冷壁中吸热量减少从而引起燃煤量减少以及 1~3 段抽气与省煤器、水冷壁吸热量都同时减少的方案. 分析中, 考虑到相比燃煤机组, 太阳能热量为辅, 引起燃煤机组的流量变动较小, 故假定锅炉和汽轮机本体结构保持不变, 而仅对系统进行适当改造. 对于涉及到锅炉或汽轮机的结构变动情况, 本文后面还将详细论述.

由表 1 和 2 可以看出:

表 1 DSG 太阳能集热器与 300 MW 燃煤机组一体化热发电不同集成方案的模拟结果

	方案一							方案二	
	1 段抽气	2 段抽气	3 段抽气	4 段抽气	5 段抽气	6 段抽气	7 段抽气	再热冷段	
从凝结水泵出口引出	集热器出口工质压力/MPa	6.31	3.852	1.74	0.889	0.374	0.149	0.0716	3.81
	集热器出/入口工质温度/°C	391.74/34.4	324.1/34.4	432.5/34.4	334.2/34.3	231.9/34.4	140.1/34.4	89.1/34.3	321.5/34.4
	集热器通流量 t/h	31.84	35.52	32.4	32.62	37.45	24.87	26.72	28.67
	太阳能热利用系统输出热量/MW	26.635	28.56	28.46	27.15	29.09	18.08	18.54	22.99
	瞬时太阳能热电效率	0.277	0.2547	0.22	0.178	0.1312	0.0432	0.0039	0.218
从给水泵出口引出	集热器出口工质压力/MPa	6.212	3.81	1.74					3.81
	集热器出/入口工质温度/°C	388.4/173.7	321.5/173.7	432.5/173.7					321.5/173.7
	集热器通流量 t/h	31.85	35.55	34.75					28.67
	太阳能热利用系统输出热量/MW	21.48	22.8	25.14					18.34
	瞬时太阳能热电效率	0.303	0.276	0.247					0.23

表 2 油冷却型太阳能集热器与 300 MW 燃煤机组一体化热发电不同集成方案的模拟结果

	单独使各段抽气减少							3 台高加抽气	省煤器和	3 台高加抽气、省煤器和
	1 段	2 段	3 段	5 段	6 段	7 段	同时减少	水冷壁吸热减少	水冷壁吸热同时减少	
出口最低温度/°C	275.3	243.6	201.7	134.5	104.9	84.7	394.3	365.71	365.71	
热利用系统输出热量/MW	18.32	21.18	24.77	25.74	16.47	17.5	23.27	16.00	22.14	
瞬时热电效率	0.2966	0.27	0.2467	0.139	0.0396	0.00134	0.277	0.454	0.405	

1) 无论是哪种集热器, DSG 或油冷却型, 在和燃煤机组集成进行一体化发电使汽轮机抽气减少时, 引起低压抽气减少系统的热经济性要大大低于用于高压抽气系统, 这是由于太阳能热量用于取代低加抽气, 使机组热效率下降较多, 在发同样电量情况下, 多耗煤, 折算到太阳能热电转换效率上; 对于利用 DSG 型集热器的辅助燃煤系统, 集热器出口参数相同时, 从给水泵出口引出至集热器场加热的热经济性要高于从凝结水泵出口引出; 对于油冷却型集热器, 如收集的太阳能热量使燃煤机组的某一段抽气减少时, 其热经济性与利用 DSG 型集热器加热从给水泵出口引出的水至该段抽气的热经济性相当。

2) 同一一体化发电系统流程, 太阳能热利用系统输出的热量不同, 利用太阳能热量加热的工质流量不同, 系统中锅炉、汽轮机的效率必定也不同, 导致太阳能热电转换效率的不同。表 1 和 2 中列出的太阳能集热器通流量或太阳能热利用系统输出热量值是考虑在系统集成过程中保持锅炉或汽轮机结构不变时, 使瞬时太阳能热电转换效率最大时的值。图 6 给出了对于图 1 所示系统, 锅炉和汽轮机结构不变时, 通过太阳能集热器的流量与瞬时太阳能热电效率的关系。由图 6 可以看出, 随着通过集热器流量的增加, 热电效率呈先增加后下降的趋势。这是因为开始利用集热器加热的流量不大时, 由该部分流量排挤抽气流量从而引起汽轮机通流部分流量的增加也不多, 导致功率的增加不是很明显。随着流量的增加, 汽轮机通流部分做功能力增加, 效率略有增加, 两者综合使其功率增加逐渐明显, 热电效率提高; 但当流量增加到一定量后, 对于汽轮机而言, 汽轮机末级的通流能力达到最大, 这时需要对汽轮机限负荷, 导致热电效率开始下降。对于锅炉而言, 随着流量的增加, 可能会使过热汽温不足, 从而使循环效率降低。

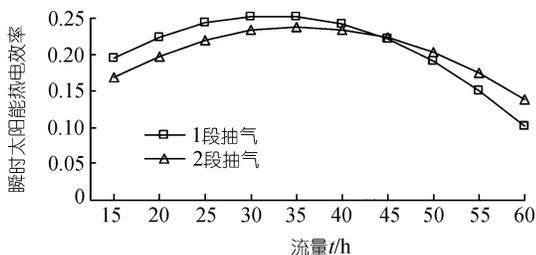


图 6 太阳能集热器场流量与瞬时太阳能热电效率关系

实际上, 当通过集热器场的流量比较大, 导致汽轮机或锅炉偏离设计工况, 热效率下降很多时, 可考虑对锅炉或汽轮机进行结构改造。工程中是否进行改造, 需结合当地的辐射资源综合考虑。如某地的日照时间很长, 辐射强度高且较平稳, 则可以考虑结合太阳能部分进行一体化热发电方式的重新设计并对结构进行调整, 使混合发电机组大多数时间运行于设计工况, 只有在太阳能辐射强度降低或甚至为零的少部分时间运行于非设计工况。仍以图 1 所示系统为例, 图 7 给出了在不同辐射时间下结构变动和不变动时, 年太阳能热电转换效率随流量的变化关系, 其中假定混合发电机组为带基本负荷机组。并且为计算方便, 图 7 中所给的辐射时间为保证设计辐射强度时间, 当实际辐射强度低于设计值时, 太阳能热利用系统不投入运行, 仅燃煤机组部分在非设计工况下运行。

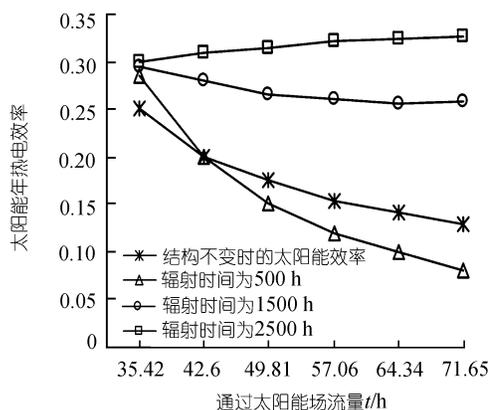


图 7 太阳能年热电效率随流量和辐射时间的变化

3) 无论哪种方案, 一般而言, 太阳能热量用于参数高的工质吸热时, 其热电效率也较高。如太阳能用于省煤器、水冷壁中水的吸热要优越于用于水管路上加热器中水的吸热; 在用于各加热器水的吸热时, 用于高温水的吸热要优越于低温水的吸热。这是因为太阳能热量在用于参数高的工质吸热时, 该工质吸收的焓量也高所致。如果在太阳能集热器场中, 无论太阳能集热器的热力参数如何, 都采用价格完全相同的集热器, 则在选用具体的方案时, 只要根据热经济性的大小即可决定, 也就是说, 应选用太阳能热量用于高参数工质吸热的方案; 但如果对于不同的热力参数, 选用的集热器不同, 如低温低压集热器的单位吸热量投资比高温高压集热器的投资小, 则

在具体方案的选定时需进行技术经济性分析. 假定集热器的参数与其单位吸热量投资成线性关系, 即随着集热器参数的提高, 吸收单位太阳能热量所需成本成比例增加, 利用焓来表示集热器的参数高低, 则焓效率可用来反映热经济性和投资的关系. 仍以图 1 所示系统为例, 图 8 给出了太阳能用于不同加热器取代不同段抽气的焓效率.

4) 图 9 给出了不同容量的燃煤机组与太阳能热利用系统集成时的热经济性比较. 表中计算采用了图 2 所示系统. 由图 9 可见, 对于不同容量机组太阳能热量取代同一段的抽气时, 热经济性是不同的, 这和不同容量机组的同一阶段抽气的参数不同有关. 实际上, 经过作者研究, 当太阳能热量用于取代不同容量相同参数的蒸汽流时, 热经济性也是不同的, 这是由于焓流的不等价造成的, 论文“太阳能辅助燃煤一体化热发电系统耦合机理研究”对这一点进行了详细的论述<sup>[20]</sup>.

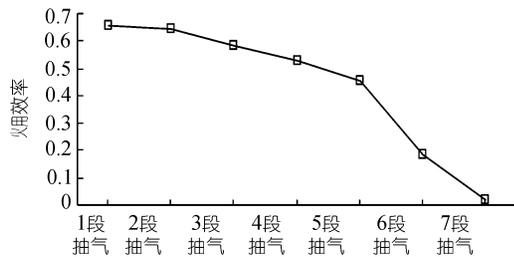


图 8 太阳能用于不同级加热器的焓效率

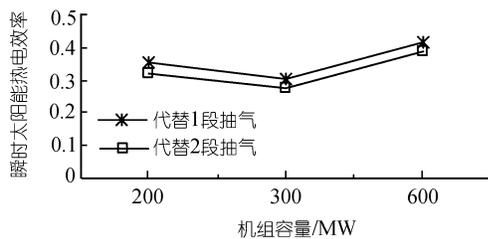


图 9 热经济性比较

#### 4 技术经济性分析

太阳能作为一种可再生能源, 和燃煤机组结合发电减少了有限资源煤的使用以及温室气体的排放, 运行成本相对燃煤机组降低, 而且可避免单纯太阳能热发电中由于太阳能辐射不稳定而需要的巨额投资设备; 但和其他可再生能源利用装置相同, 其初投资费用极高. 技术经济性分析可以综合考虑装置效

率及各项成本的影响. 本文采用了国际上用以比较可再生能源发电装置技术经济性通用的能源平均成本(LEC)进行了这种发电方式的技术经济性分析, 世界银行提出的 LEC 公式定义如下

$$C_{LEC}=[(\Phi_{FCR} \cdot C_{s, tot})+C_{OM}-C]/E,$$

式中,  $C_{LEC}$  为能源平均成本;  $\Phi_{FCR}$  为固定费率;  $C_{s, tot}$  为总初投资;  $C_{OM}$  为运行维护费用;  $C$  为  $CO_2$  的减排收益;  $E$  为年发电量. 其中固定费率是和寿命、利率、折旧、保险、管理等有关的系数, 因为本文主要用于不同发电项目之间的比较, 因此与具体工程有关的因素在本文的分析中不予考虑, 而仅考虑设备寿命、利率对成本的影响. 为了便于不同的可再生能源发电技术进行比较, 本文主要进行了一体化发电系统中太阳能部分的 LEC 成本分析, 后文所提到的 LEC 成本均为太阳能部分的 LEC 成本. 根据对  $CO_2$  的减排收益考虑与否, LEC 成本又分为考虑环境影响因素和不考虑环境影响因素的 LEC 成本.

选取太阳能场及相关部分投资  $320 \text{ \$/m}^2$ , 年运行维修费为总投资费用的 2%, 现值系数 8%, 太阳能设备的使用年限 25 a,  $CO_2$  的单位减排成本为 11  $\text{\$/t}$ .

以表 1 中从给水泵出口引出水至太阳能集热器, 加热至 1 段抽气参数后, 引回汽轮机使一段抽气流量减少系统为例进行计算, 该系统太阳能集热器场设计热容量  $21 \text{ MW}_{(th)}$ , 全年可节煤量为 4302.8 t. 在不考虑  $CO_2$  减排成本时太阳能热发电的 LEC 成本为 0.11  $\text{\$/kW} \cdot \text{h}$ , 考虑了这种机组  $CO_2$  减排带来的环境效益, 其 LEC 成本为 0.098  $\text{\$/kW} \cdot \text{h}$ , 低于单纯太阳能热发电方式 SEGS 成本, 0.14  $\text{\$/kW} \cdot \text{h}$ . 随着集热器投资成本的下降, 这种热发电方式的 LEC 成本下降的趋势如图 10. 由图 10 可看出, 当集热器投资成本达到  $200 \text{ \$/m}^2$  时, 考虑  $CO_2$  减排效益的太阳能 LEC 成本为 0.061  $\text{\$/kW} \cdot \text{h}$ , 当集热器投资成本达到  $150 \text{ \$/m}^2$ , 即使不考虑  $CO_2$  减排效益, LEC 成本降至 0.052  $\text{\$/kW} \cdot \text{h}$ ,

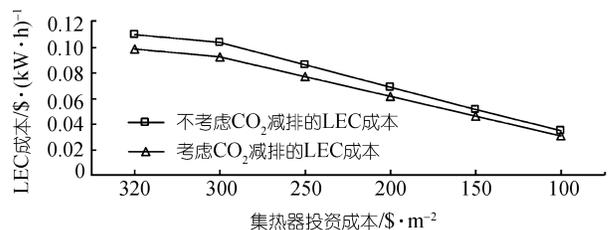


图 10 LEC 成本随集热器投资成本的变化关系

这与现在的其它可再生能源发电技术相当, 如秸秆发电, 风力发电. 而实际上, 在短短的几年内, 随着集热器技术的进步, 集热器成本的下降速度很快. 文献[2]指出: 考虑到最新的技术进步, 抛物面槽式太阳能集热器的批量生产成本有望降到 175 \$/m<sup>2</sup>.

## 5 结束语

本文对太阳能辅助燃煤一体化热发电系统的集成方式进行了研究, 在考虑太阳能热利用系统与燃煤机组 2 种系统物质流和能量流匹配的基础上, 进行了集成方案的拟定. 深入研究了太阳能热发生系统的热力特性以及对火电机组热力性能的影响, 建立了一体化热发电系统拓扑结构与参数的综合集成优化模型, 对大量的集成方案进行了模拟分析, 总结和

揭示了太阳能辅助燃煤一体化热发电系统的集成规律和耦合机理.

对这种一体化发电系统进行了经济性分析, 分析结果表明: 对于上文中所给系统, 全年可节煤量为 4302.8 t. 在不考虑 CO<sub>2</sub> 减排成本时太阳能热发电的 LEC 成本为 0.11 \$/kW·h, 考虑了这种机组 CO<sub>2</sub> 减排带来的环境效益, 其 LEC 成本为 0.098 \$/kW·h, 低于单纯太阳能热发电方式 SEGS 成本 0.14 \$/kW·h. 随着集热器技术的进步, 集热器的成本有望迅速下降, 当集热器投资成本达到 200 \$/m<sup>2</sup>时, 考虑 CO<sub>2</sub> 减排效益的太阳能 LEC 成本为 0.061 \$/kW·h, 当集热器投资成本达到 150 \$/m<sup>2</sup>, 即使不考虑 CO<sub>2</sub> 减排效益, LEC 成本可降至 0.052 \$/kW·h, 这与现在的其他可再生能源发电技术相当, 如秸秆发电、风力发电.

## 参考文献

- 1 世纪能源理事会. 新的可再生能源. 北京: 海洋出版社, 1998. 115—119
- 2 Volker Q. Technical and economical system comparison of photovoltaic and concentrating solar thermal power systems depending on annual global irradiation. *Solar Energy*, 2004, 77(2): 171—178[DOI]
- 3 Mills D. Advances in solar thermal electricity technology. *Solar Energy*, 2004, 76(1-3): 19—31[DOI]
- 4 Helmut K B, Rainer K, Joachim N, et al. Solar thermal power plants for solar countries-technology, economics and market potential. *Appl Energy*, 1995, 52(2-3): 165—183[DOI]
- 5 林汝谋, 金红光, 蔡睿贤. 新一代能源动力系统的研究方向与进展. *动力工程*, 2003, 23(3): 2370—2376
- 6 洪慧. 燃料化学能与物理能综合梯级利用的热力循环. 博士学位论文. 北京: 中国科学院工程热物理研究所, 2004
- 7 Price H, Lü pfer E, Kearney D, et al. Advances in parabolic trough solar power technology. *J Solar Energy Eng*, 2002, 124(5): 109—125[DOI]
- 8 Jurgen D, Michael G, Ulf H, et al. Trough integration into power plants-a study on the performance and economy of integrated solar combined cycle systems. *Energy*, 2004, 29(5-6): 947—959[DOI]
- 9 Eck M, Steinmann W D. Direct steam generation in parabolic troughs: First results of the DISS project. *J Solar Energy Eng*, 2002, 124(5): 134—139[DOI]
- 10 Hank P, Eckhard L. Advances in parabolic trough solar power technology. *J Solar Energy Eng*, 2002, 124(5): 109—125
- 11 Odeh S D, Behnia M, Morrison G L, et al. Performance evaluation of solar thermal electric generation systems. *Energy Convers Manage*, 2003, 44(15): 2425—2443[DOI]
- 12 Gregory J K. Economic evaluation of solar-only and hybrid power towers using molten-salt technology. *Solar Energy*, 1998, 62(1): 51—61[DOI]
- 13 Mechthild H, Heiner F, Jurgen R. Economic analysis of integrated solar combined cycle power plants a sample case: The economic feasibility of an ISCCS power plant in Egypt. *Energy*, 2004, 29(5-6): 935—945[DOI]
- 14 Hosseini R, Soltani M, Valizadeh G. Technical and economic assessment of the integrated solar combined cycle power plants in Iran. *Renewable Energy*, 2005, 30(10): 1541—1555[DOI]
- 15 Eck M, Steinmann W D. Modelling and design of direct solar steam generating collector fields. *J Solar Energy Eng*, 2005, 127(8): 371—380[DOI]
- 16 李振全, 尹艳山, 张国妮, 等. 我国电站锅炉热力计算方法应用的现状. *锅炉技术*, 2006, 37(3): 41—44
- 17 张春发, 崔映红, 杨文滨, 等. 汽轮机临界状态判别定理及改进型 Flugel 公式. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2003, 33(3): 264—272
- 18 张春发, 张素香, 崔映红, 等. 现行电力系统热经济性状态方程. *动力工程*, 2001, 22(6): 665—667
- 19 马芳礼. 电厂热力系统节能分析原理. 北京: 水利电力出版社, 1992. 12
- 20 崔映红, 杨勇平, 杨志平, 等. 太阳能辅助燃煤一体化热发电系统耦合机理. *中国电机工程学报*, 2008, 28(29): 99—104