

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2020.04.008

ISCC 发电系统研究进展

Research progress in ISCC power generation system

杨谱,段立强*,潘盼

YANG Pu,DUAN Liqiang*,PAN Pan

(华北电力大学 能源动力与机械工程学院,北京 102206)

(School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

摘要: 太阳能热互补联合循环(ISCC)发电系统可以有效利用太阳能热量,提升太阳能光电效率并减少原联合循环系统的燃料消耗,近年来备受关注。对4种典型的ISCC系统集成模式研究进展进行了总结与分析,探讨了系统经济性能并介绍了ISCC系统的性能评价指标。针对太阳能的间歇性及我国发电系统的调峰特性,分析了集成系统的变工况特性,最后系统总结了国内外的工程示范项目。研究成果可对未来ISCC系统的设计和运行优化提供参考。

关键词: 太阳能热互补联合循环;集成模式;性能评价;变工况特性;可再生能源;储能;光煤互补发电

中图分类号: X 131.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-1951(2020)04-0047-10

Abstract: Integrated solar combined cycle (ISCC) power generation system can effectively utilize the solar power by improving the photoelectric conversion efficiency and reducing fuel consumption of original gas-steam combined cycle system, which has attracted more attentions in recent years. The development of four typical ISCC system integration modes were studied and summarized, and their economic performances and performance evaluation indicators were explored. According to the intermittent of solar power and the peak-shaving characteristic of China's power generation systems, the features of off-design working conditions of the integrated system were analyzed and verified systematically by domestic and foreign engineering demonstration projects. The research achievements will provide guidance for the design and operation optimization of ISCC systems.

Keywords: ISCC; integration mode; performance evaluation; off-design working condition; renewable energy; energy storage; solar-coal complementary power generation

0 引言

进入21世纪之后,能源发展呈现多元化发展趋势,发展高效、洁净的可再生能源是目前国际社会的共识。在众多可再生能源中,太阳能由于储量巨大,是开发潜力最大的可再生能源,但太阳能发电存在能量密度低、稳定性差、效率低、初期建设成本高等缺点。将太阳能集成到传统化石燃料动力系统中构成太阳能热互补发电系统,成为近年来重要的发展方向,备受国际社会关注。太阳能热互补联合循环(Integrated Solar Combined Cycle, ISCC)发电系统正是在这样的背景下发展起来的一项新兴技术,将太阳能耦合到联合循环中的不同位置,可达

到节省燃料或增大功率的目的。本文将重点论述ISCC系统的特点、典型集成方式、性能评价指标、变工况性能以及工程示范等方面的研究进展。

1 ISCC 系统简介

ISCC系统利用聚光集热镜场汇集太阳热,然后引入联合循环系统中,太阳能耦合在联合循环系统不同位置时,可以分别加热系统中做功工质、压缩空气或进入底循环之前的燃气轮机排气,从而将太阳能转化成热能,进而转换成电能。国外学者首先从理论方面系统分析了太阳能热互补联合循环发电技术的可行性及发展前景。S. C. Gülen等^[1]根据热力学第二定律对ISCC系统进行了焓分析,结果表明,太阳能辅助燃气-蒸汽联合循环系统在热力学性能上具有较大的优势。目前,燃气-蒸汽联合循环在化石燃料发电系统中具有最高的热功转换效率,因此,将太阳热能引入燃气-蒸汽联合循环系统构

收稿日期:2020-03-07;修回日期:2020-04-04

基金项目:国家自然科学基金项目(51576062);国家科技重大专项项目(2017-1-0002-0002)

成的 ISCC 发电系统具有较大发展潜力。从太阳能集热场的角度来看,应用最广的 2 种系统是槽式和塔式集热系统。G. Franchini 等^[2]比较了太阳能朗肯循环和太阳能联合循环发电系统分别在槽式和塔式集热方式下的热力性能。段立强等^[3]将太阳能集成于联合循环的不同位置,并研究了多种方案下太阳能辅助燃气-蒸汽联合循环的年热力性能,得到的最大年平均太阳能发电效率为 13.6%。

2 典型 ISCC 系统集成模式

2.1 太阳能与燃气轮机顶循环集成系统

将太阳能耦合在顶循环的 ISCC 系统如图 1 所示(图中:HT 为高压缸;IT 为中压缸;LT 为低压缸;

RH 为再热器;HPS 为高压过热器;HPB 为高压蒸发器;IPS 为中压过热器;HPE2 高压二级省煤器;LPS 为低压过热器;IPB 为中压蒸发器;IPE 为中压省煤器;HPE1 高压一级省煤器;LPB 为低压蒸发器;LPE 为低压省煤器)。

太阳能通过定日镜场汇聚后集中在塔式集热塔的吸热器上,加热经熔盐泵到达集热塔的熔盐。加热后的高温熔盐被送至换热器,直接与抽取的部分压气机出口空气进行换热,然后与另一部分压缩空气混合进入燃烧室燃烧,达到规定温度后进入燃气轮机透平膨胀做功。太阳能的引入使压缩空气的初始温度升高,所需燃料量降低,节省了天然气用量。

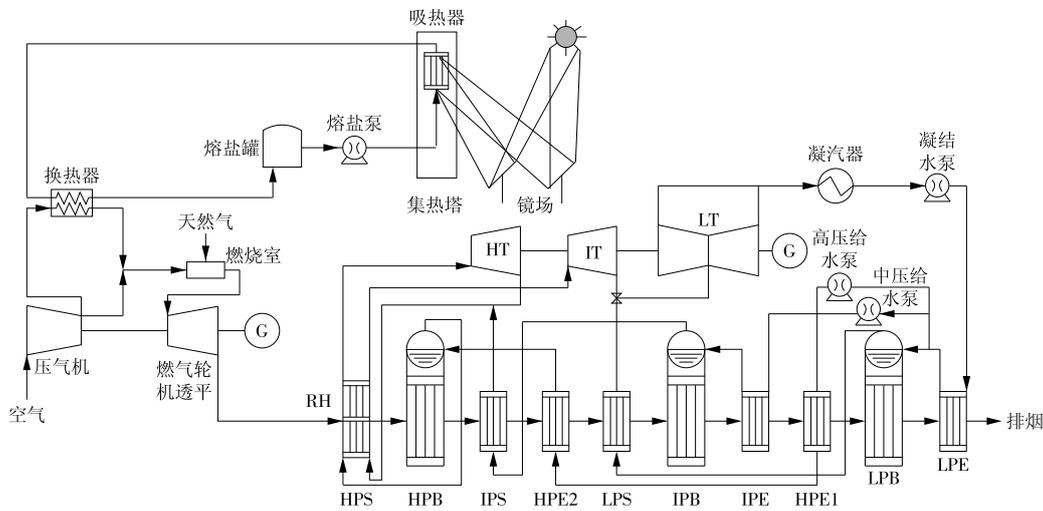


图 1 塔式太阳能集成在顶循环的 ISCC 系统

Fig. 1 ISCC system with tower solar system integrated in the topping cycle

研究表明^[4],此种集成模式能有效减少燃料消耗量,某典型日不集成太阳能的联合循环基准系统与 ISCC 系统的燃料量对比见表 1。由表 1 可知,一天中直接法向辐照度(Direct Normal Irradiance, DNI)最大时(13:00),ISCC 系统的燃料消耗量最低,为 12.90 kg/s,与基准系统相比,节省了 1.18 kg/s。

表 1 2 种系统燃料量对比

Tab. 1 Comparison of fuel consumption in two systems kg/s

时刻	基准系统	ISCC 系统
07:00	14.08	14.08
08:00	14.08	13.86
09:00	14.08	13.53
10:00	14.08	13.23
11:00	14.08	13.04
12:00	14.08	12.92
13:00	14.08	12.90
14:00	14.08	12.97
15:00	14.08	13.13
16:00	14.08	13.36

太阳能年均热效率随聚光集热镜场规模的变化如图 2 所示。镜场规模变化时,太阳能年均发电热效率随之变化;当空气集成温度一定时,太阳能年均热效率随镜场规模的增加而增加;镜场达到一定规模后,由于不同集成温度影响塔式集热过程中对外散热以及泵的耗功,空气集成温度升高反而会导致太阳能年均热效率降低,与联合循环端无关。

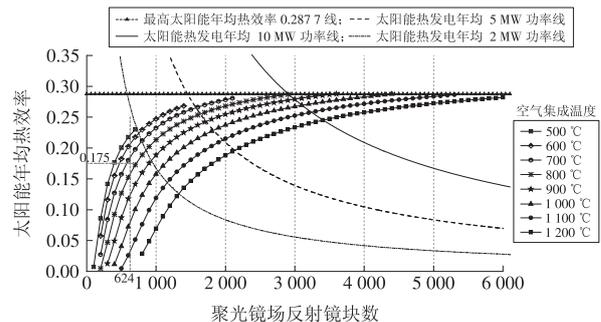


图 2 太阳能年均热效率随聚光集热镜场规模的变化

Fig. 2 Relationship between the annual average thermal efficiency and the size of concentrating mirror field

采用管式空腔式接收器的西班牙 PS10 电站太阳能年均热效率为 17.5%^[5],由此可见,以燃气轮机作为集成载体并合理选择压缩空气加热温度,在降低成本的同时可保证较高的太阳能热利用效率;同时,该系统在光热利用方面也具有显著优势,随着燃气轮机压缩空气温度的升高,最大热发电容量也随之增加。

2.2 太阳能与朗肯底循环集成系统

将太阳能耦合到底循环有多种方式,较典型的有将太阳能集热器出口过热蒸汽与余热锅炉高压蒸发器出口、再热器入口、低压过热蒸汽耦合等,在

其他条件相同的情况下,太阳能集热器出口过热蒸汽接入余热锅炉的高压蒸发器出口时,热力性能较原系统提升最高^[6]。此外,针对塔式和槽式太阳能集热器,也有许多不同的集成方式。马敬凯^[7]针对耦合在底循环的 ISCC 系统,分别对比分析了替代一级受热面和替代两级受热面的性能,如图 3、图 4 所示(图中:SH 为过热器)。

替代一级受热面时,高压二级省煤器中流出的高压给水一部分进入槽式太阳能集热系统进行蒸发,另一部分继续进入余热锅炉的高压蒸发器完成蒸发,然后与槽式太阳能系统侧的蒸汽混合后一起

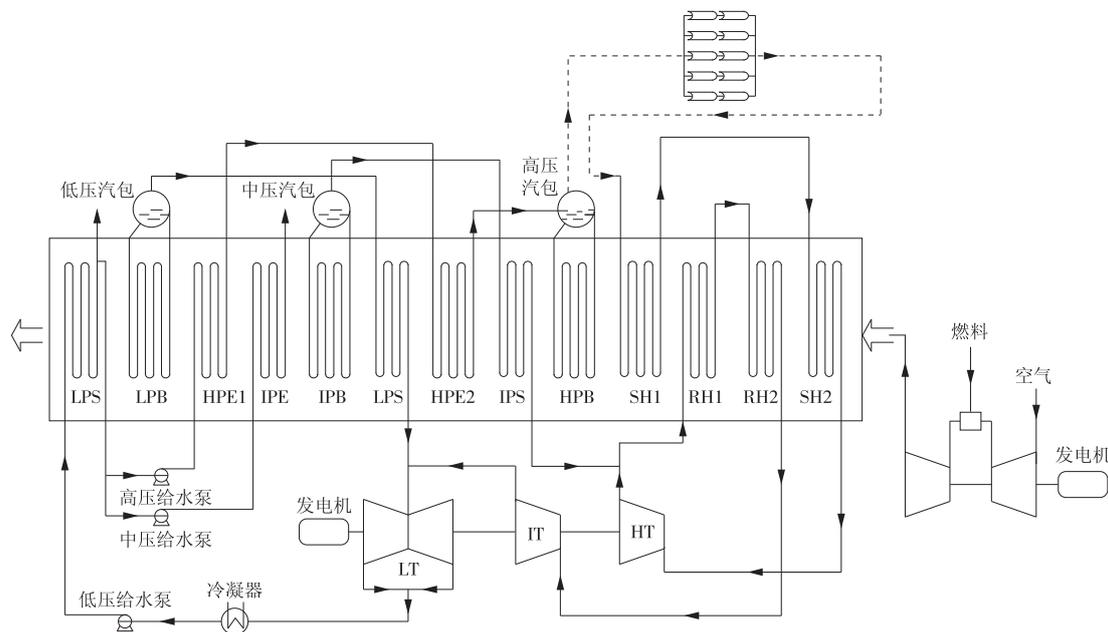


图 3 槽式太阳能集成在底循环的 ISCC 系统(替代一级受热面)

Fig. 3 ISCC system with trough solar system integrated in the bottom cycle(one-stage heater 's substitution)

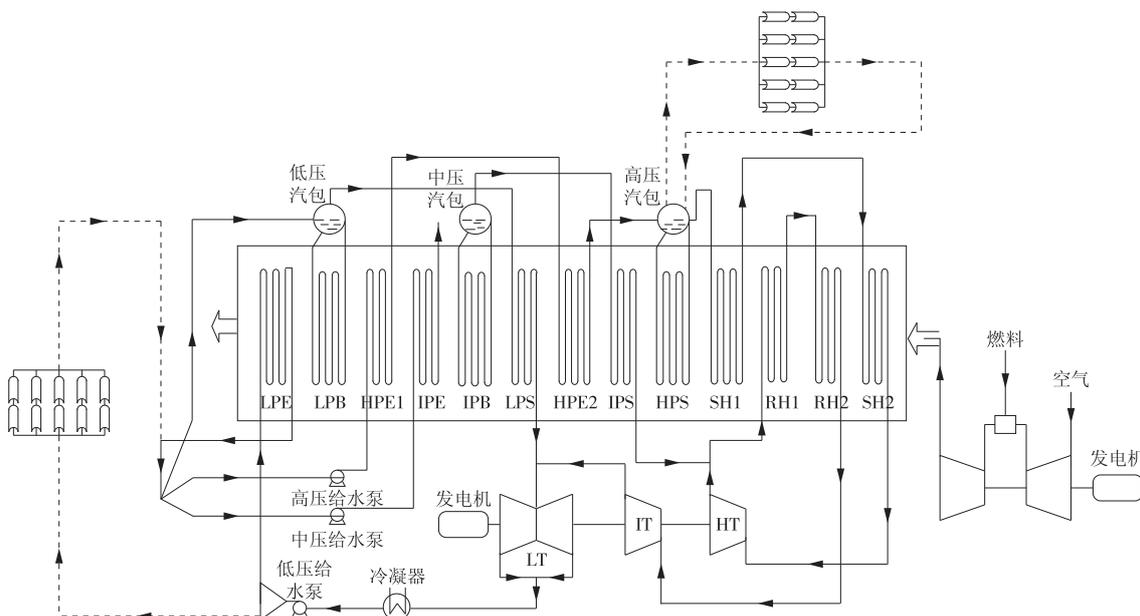


图 4 槽式太阳能集成在底循环的 ISCC 系统(替代两级受热面)

Fig. 4 ISCC system with trough solar system integrated in the bottom cycle(two-stage heater 's substitution)

进入高压过热器进行过热。

替代两级受热面适合 DNI 较高时,部分太阳能资源替代低压省煤器,缓解对排烟温度的影响,进一步增加高压给水及总给水流量。把超出的太阳能资源分成 2 部分,一部分替代低压省煤器以缓解排烟温度的限制,另一部分继续替代高压蒸发器蒸发从高压二级省煤器抽取的高压给水。在其他条件相同的情况下,2 种方案在典型日的太阳能加热给水流量及镜场效率变化如图 5 所示。

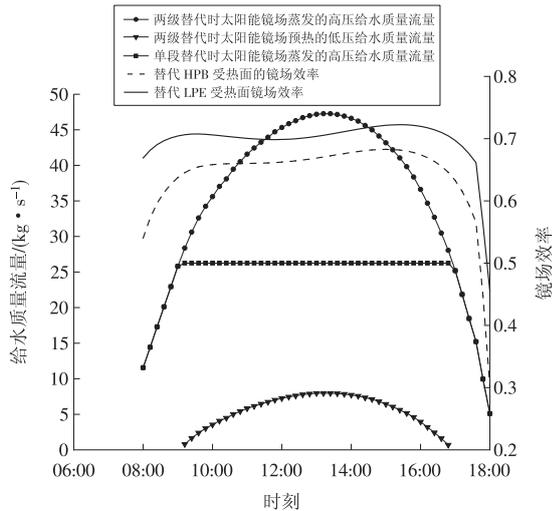


图 5 2 种替代方案下太阳能加热给水量和镜场效率变化
Fig. 5 Variation of feedwater heated by solar power and mirror field efficiency in two substitutions

在此典型日,替代一级受热面时太阳能发电功率为 15.67 MW,光电效率为 19.88%,替代两级受热面时平均太阳能发电功率为 22.99 MW,太阳能日平均光电效率为 29.17%,比槽式太阳能系统单独替代高压蒸发器时效率增加了 9.29 百分点,发电

功率增加了 7.32 MW,显示出替代两级受热面的优势。林汝谋等^[8]也从能量的梯级利用及能量品位匹配等角度对太阳能与燃气-蒸汽联合循环的耦合进行了深入研究。可以看出,集成到底循环时可以有多种方式,以后的工程应用中还可以发展更多的耦合方式。刘仁志等^[9]则分析了不同类型的太阳能集热装置的集热特性,实现了太阳能与燃气轮机联合循环系统的梯级互补。M. Montes 等^[10]也展开了集成至底循环的研究,选取了 Almeria(地中海气候)和 Las Vegas(热带沙漠气候)2 个城市进行对比,结果表明:ISCC 系统与传统的燃气-蒸汽联合循环电厂相比,在日照强度高和环境温度高的情况下可有效改善燃气轮机性能;Las Vegas 气象条件卓越,更适合建厂。

2.3 同时集成在顶循环与底循环的 ISCC 系统

由热力学知识可知,压气机耗功 W 为

$$W = \frac{n}{n-1} \cdot R_g T_1 \left[\left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{n-1}{n}} - 1 \right], \quad (1)$$

式中: n 为压气机中气体的多变指数; R_g 为气体常数; T_1 为压气机进口温度, K; p_1, p_2 分别为压气机进、出口压力, MPa。

由式(1)可知,随着 T_1 的升高,压气机耗功增加,从而导致系统发电效率降低,故使用溴化锂吸收式制冷机冷却燃气轮机压气机入口空气可以有效提高机组发电量和效率。吕志鹏^[11]提出了一种利用太阳能驱动吸收式制冷机并与余热锅炉集成的新型 ISCC 系统,将太阳能同时集成在燃气轮机顶循环和底循环,并对其运行方式、热力性能和全年工况进行了详细的研究,如图 6 所示。

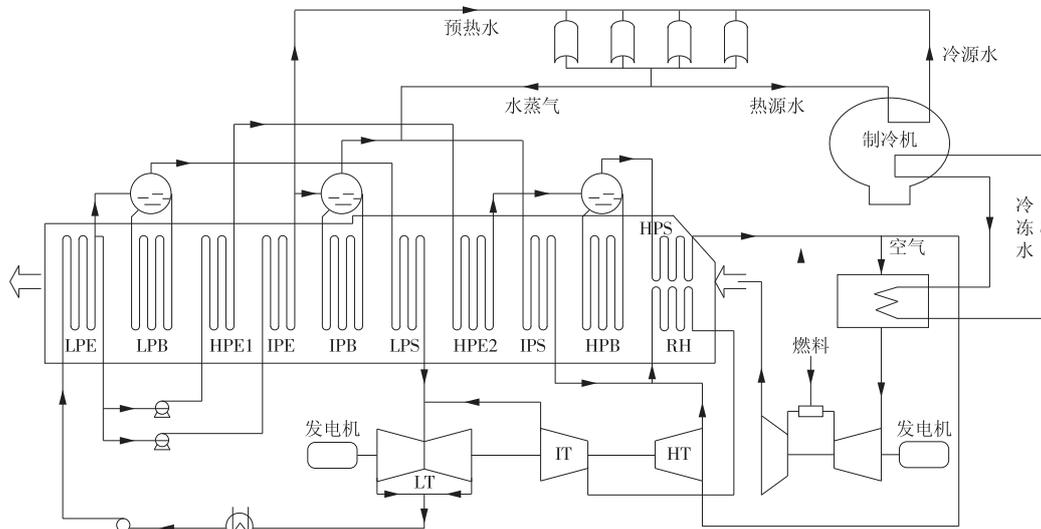


图 6 槽式太阳能同时集成在顶循环和底循环的 ISCC 系统

Fig. 6 ISCC system with trough solar system integrated in both the topping and the bottom cycles

该系统选用槽式太阳能集热镜场和直接蒸汽发生(Direct Steam Generation, DSG)系统,太阳能直接加热给水,而不通过其他传热介质。流经集热镜场的水工质一部分进入溴化锂吸收式制冷机中提供热源,另一部分集成到余热锅炉的中压蒸发段,加热一部分中压省煤器的给水至和中压蒸发器出

口相同的温度后一起进入中压过热器。

中国在世界上较早实现了燃气轮机压气机入口空气冷却技术的应用,泰国、沙特阿拉伯等国家也使用各种制冷技术来提升燃气轮机的性能^[12-13]。相比单独制冷的系统,同时集成在顶循环和底循环的新 ISCC 系统性能也更加卓越,见表 2。

表 2 全年各系统太阳能利用小时数和出电量

Tab. 2 Annual utilization hours and power output of solar energy in each system

系统	太阳能利用小时数	系统全年发电量/(GW·h)	太阳能发电量/(GW·h)	全年太阳能发电份额/%
同时集成在顶循环和底循环的新 ISCC 系统	2 071	3 454.970	25.863	0.75
单独集成制冷的系统	1 498	3 447.265	18.158	0.52
传统 ISCC 系统	2 071	3 440.095	10.988	0.32
燃气-蒸汽联合循环系统	0	3 429.107	0	0

由表 2 可见,同时集成在顶循环和底循环的新型 ISCC 系统充分考虑了 DNI 和环境温度对做功和效率的影响,其对太阳辐射能的利用更加充分。

在此基础上,段立强等^[14]做了更详细的分析,与之前略有不同。根据环境温度和 DNI 的变化,新系统优先将太阳能集成到溴化锂吸收式制冷系统中。新系统可以根据每半个月的气象数据来调节冷却器系统和余热锅炉中使用的太阳能比例,从而优先将太阳能集成到溴化锂吸收式制冷系统中。结果表明,新系统的平准化度电成本(Levelized

Costs of Electricity, LCOE)为 0.181 美元/(kW·h),参比系统的 LCOE 为 0.242 美元/(kW·h),在经济性上也有一定优势。

2.4 带蓄能的 ISCC 系统

太阳每日东升西落,一天中不断变化,常规的 ISCC 电站在实际运行中存在输出电能波动、DNI 较高时不能完全消纳等问题。针对此问题,刘玉磊^[15]提出一种新型带蓄能的 ISCC 系统,将波动的太阳能用于削峰填谷,可以实现系统的平稳运行以及更高的太阳能光电转换效率,如图 7 所示。

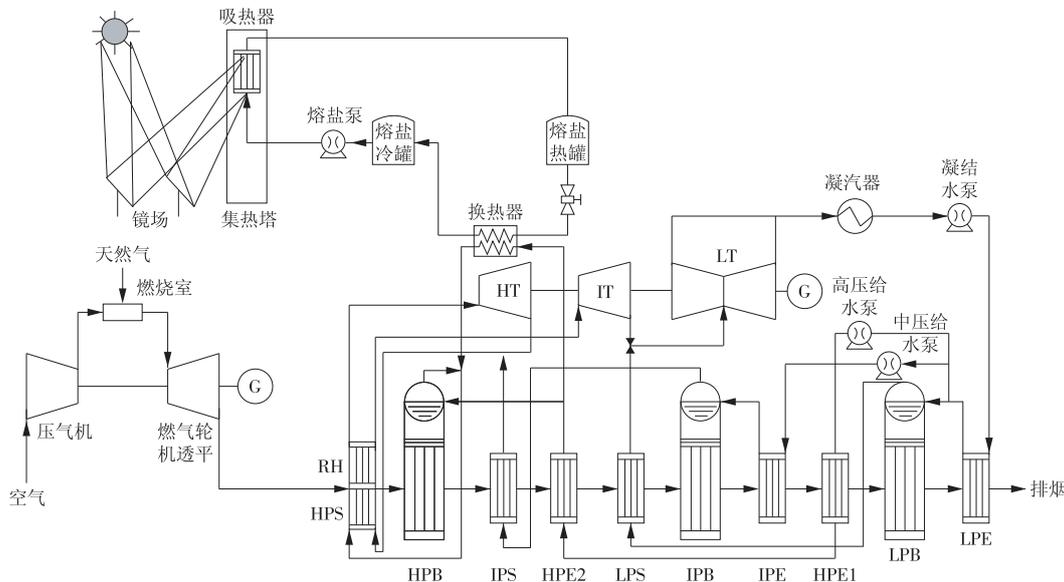


图 7 集成双罐蓄热的 ISCC 系统

Fig. 7 ISCC system with dual heat storage tanks

该系统采用双罐蓄热,当太阳能辐射逐渐升高时,冷罐通过熔盐泵被送至集热塔吸收热量,然后送入热罐,热罐进入换热器与工质换热之后再次进入冷罐,完成一个循环。由于采用了双罐系统,可以控制熔盐的流动,从而更好地利用太阳能,而且

在太阳能辐射较低时也可以维持系统的稳定运行。选取的熔盐成分为 $w(\text{NaNO}_3)=60\%$, $w(\text{KNO}_3)=40\%$,冷罐和热罐的温度分别设置为 372 °C 和 550 °C。结果表明,引入蓄能后,太阳能侧的性能提升尤为明显,年太阳能利用量、年太阳能贡献度、年

光电效率都有显著提升。此外,在经济性方面也有一定的优势。由于引入太阳能使得初始投资成本增加,采用 LCOE 作为经济性衡量指标。

$$C = \frac{I_t + \sum_{t=1}^n \frac{M_t}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}}, \quad (2)$$

式中: C 为平准化度电成本, 美元/(kW·h); I_t 为第 t 年的建造成本, 美元; M_t 为第 t 年的运维成本, 美元; E_t 为第 t 年的太阳能发电量, kW; r 为折现率; n 为电站运行年限。

不同太阳倍数和蓄热时长下,带蓄能的 ISCC 系统太阳能侧 LCOE 如图 8 所示。由图 8 可见,带蓄能的 ISCC 系统的 LCOE 低于目前的纯光热电站,体现了蓄能系统的优越性。此外,裴杰等^[16]针对华能海南发电股份有限公司南山电厂菲涅尔式 ISCC 系统中太阳能集热场产生的过热蒸汽引入汽轮机低压段做功所导致的能量损失问题,在太阳能集热场设置了蓄热系统,提升了热力系统性能,也证明了蓄热系统是解决太阳能波动性的有效手段。

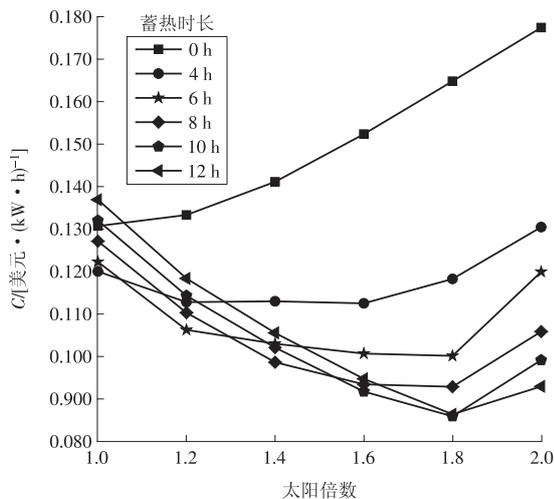


图 8 带蓄能的 ISCC 系统太阳能侧 LCOE

Fig. 8 LCOE on solar system side in the ISCC system with energy storage system

3 ISCC 系统性能评价指标

ISCC 系统的性能评价指标主要有燃料消耗量、系统发电功率、太阳能发电功率、太阳能光-热/热-电/光-电转化效率和转化焓效率等。如果从运行角度看,主要指标有年太阳能利用量、年太阳能贡献度、年光电效率、年光热利用效率等。光热效率为工质吸收太阳能与总太阳能辐射量之比,热电效率为太阳能发电量与工质吸收太阳能之比,光电效率为太阳能发电量与总太阳能辐射量之比。此外,由于引入了太阳能,需要分析其贡献度,传统的太阳

能贡献度计算方法有参考电站法和按热量比例分配法^[17-19]。参考电站法是假定 ISCC 系统中化石燃料的发电效率与耦合太阳能前的传统机组效率相同,先计算系统中化石燃料的发电份额,再用总发电量减去化石燃料发电份额,从而得出太阳能发电份额,即为太阳能贡献度,如图 9a 所示。按热量比例分配法是按联合循环中化石燃料热量和太阳能热量的比例来分配辅助发电系统的发电量,如图 9b 所示。图中: Q_{Solar} 为太阳能输入热量; Q_{Fuel} 为燃料输入热量; P_{Solar} 为太阳能发电功率; P_{Fuel} 为燃料发电功率; Q_{In} 为总输入热量; P_{ISCC} 为联合发电系统中的太阳能输出功率; η_{GTCC} 为燃气-蒸汽联合循环电站的热效率。

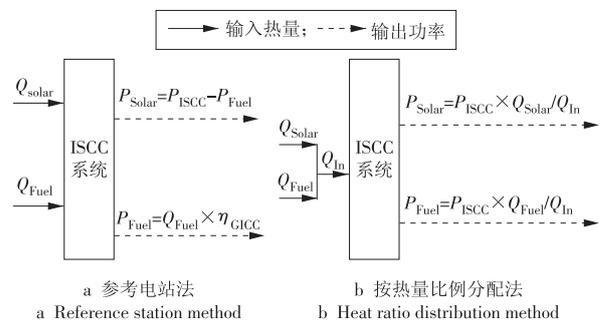


图 9 传统的太阳能贡献度计算方法

Fig. 9 Traditional calculation method for solar energy contribution

由于传统计算方法没有考虑余热锅炉内部各个受热面换热情况的改变,计算时有一定的局限性,谢坤^[20]采用了一种新的计算方法。当太阳能作为热源对余热锅炉某一受热面输入热量后,烟气在余热锅炉中各个换热面上的进出口节点品位、温度和换热效率随之改变,随着换热过程中焓损失的改变,烟气在各个缸中的做功能力也随之改变。因此,太阳能在 ISCC 系统中贡献度的计算应充分考虑余热锅炉内部烟气做功能力的变化,并且要考虑太阳能集成位置对烟气以及太阳能热在余热锅炉中做功能力的影响。具体计算过程如图 10 所示,将三压再热余热锅炉划分为 3 个换热区域,即高压区、中压区和低压区,按照上述 3 个区域依次计算。

根据太阳能耦合在底循环位置的不同分为 7 种工况:当集成在单独受热面时,耦合位置分别为高压过热器(工况 1)、再热器(工况 2)、高压蒸发器(工况 3)、高压省煤器 2(工况 4);考虑到一般熔盐换热介质的工作温度区间较大,会有太阳能同时集成至 2 个串联换热面的情况,耦合位置分别为高压蒸发器+高压省煤器 2(工况 5)、高压过热器+高压蒸发器(工况 6)和再热器+高压蒸发器(工况 7)。太阳能贡献度随太阳能输入热量的变化如图 11 所示。

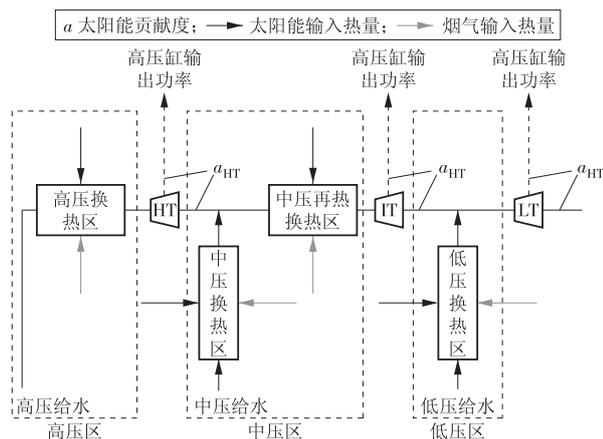


图 10 太阳能贡献度计算流程

Fig. 10 Calculation process of solar power contribution

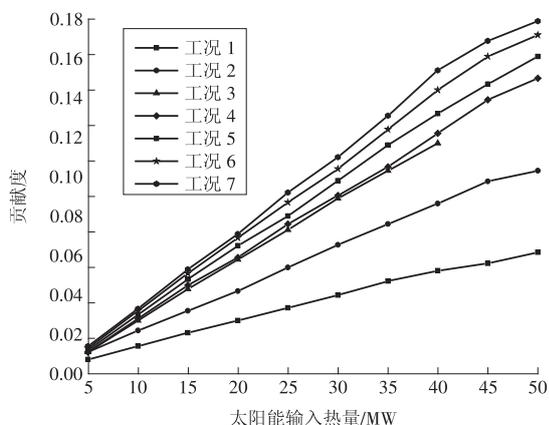


图 11 太阳能贡献度随太阳能输入热量的变化

Fig. 11 Solar power contribution varying with the heat input by solar power

从图 11 可以看出,太阳能输入热量集成位置蒸汽(给水)的压力等级、温度越高,做功能力就越强。Zhu 等^[21]基于集成太阳能的某燃气轮机电站进行了 ISCC 系统的热力学建模,从燃料消耗量、热效率及环境温度等多个方面对该系统的热力学性能及经济性进行了评估。Brodrick 等^[22]在严格控制排放的条件下,用数值模拟的方法研究了系统的净现值,结果表明,ISCC 系统相比较其他 CO₂减排技术具有很强的竞争优势。该团队^[23]还进一步研究了在考虑各种实际约束条件下系统的可行性。结果表明,设计时允许太阳能传热流体的出口温度在一天中变化时,ISCC 系统的操作灵活性明显增加。

由前文可知,由于太阳能取代了部分天然气的能量,集成在顶循环的系统在燃料消耗量上比集成到底循环的系统更有优势,但前者对系统发电功率没有促进作用,而且当太阳辐射强度较高时,还会导致系统的功率略有下降。后者可以提升系统的发电功率,而且随着太阳辐射强度的增加,提升幅度增大(不考虑余热锅炉排烟温度的限制)。从热力学第一定律和第二定律的角度来分析,热量的

损失主要集中在低品位的能源,也就是联合循环侧,而焓损失主要集中在太阳能侧。

系统运行的全年特性随着耦合位置、耦合方式的不同而不同,Achour 等^[24]针对阿尔及利亚南部的 ISCC 系统,分析了一年中系统的光电转换率,结果表明,夏季光电转换率峰值会达到 14.4%,而冬季仅为 8.0%左右,且随着太阳辐射强度的增强,系统效率会随之升高。总的来说,带蓄能系统的全年性能指标要优于不带蓄能的系统,当然这也和电站本地的气象条件息息相关。相比传统的燃气-蒸汽联合循环电站,上述各种集成方式无一例外均提高了系统性能。

4 变工况特性研究

由于太阳能的波动会对 ISCC 系统联合循环侧产生冲击,实际运行中一般采用燃气轮机调节系统的变工况特性。王振^[25]针对将 DSG 集成在底循环的 ISCC 系统,分析了负荷变化时 ISCC 系统的最佳燃气轮机调节方案,并获得了不同环境条件下 ISCC 系统变工况特性的一般规律。

结果表明:进口可转导叶(Inlet Guide Vanes, IGV)调节开度过大不利于燃气轮机高效运行,但有利于 ISCC 系统运行,调节方案对蒸汽轮机循环的影响大于对燃气轮机循环的影响,为了保证 ISCC 系统在变工况下运行最佳,应采用 IGVT3-650-F 方案。相比于 DNI 对于 ISCC 系统性能的影响,环境温度对整体 ISCC 系统性能的影响更大,并起到了主导作用。

4.1 负荷变化时 ISCC 系统变工况特性

针对上述机组,目前变工况运行策略主要为 IGV 参与调节。IGV 参与调节的方案主要分为以下类型(其中: t_3 为燃气透平入口温度; t_4 为燃气透平排气温度)。

(1)IGVT3-F 方案: t_3 在燃气轮机负荷率为 100%~82% 的范围内保持恒定; t_3 在燃气轮机负荷率为 82%~19% 的范围内降低。

(2)IGVT4-F 方案: t_4 在燃气轮机负荷率为 100%~38% 的范围内保持恒定; t_3 在燃气轮机负荷率为 38%~22% 的范围内降低。

(3)IGVT3-610-F 方案: t_3 在燃气轮机负荷率为 100%~82% 的范围内保持恒定;维持 IGV 开度不变,只调节燃料量,在燃气轮机负荷率为 82%~73% 的范围内使 t_4 由 650℃ 降至 610℃(t_4 设计工况温度); t_4 在燃气轮机负荷率为 73%~37% 的范围内保持恒定; t_3 在燃气轮机负荷率为 37%~22% 的范围内降低。

(4)IGVT3-630-F 方案： t_3 在燃气轮机负荷率为 100%~82% 的范围内保持恒定；维持 IGV 开度不变，只调节燃料量，在燃气轮机负荷率为 82%~77% 的范围内使 t_4 由 650℃ 降至 630℃； t_4 在燃气轮机负荷率为 77%~39% 的范围内保持恒定； t_3 在燃气轮机负荷率为 39%~22% 的范围内降低。

(5)IGVT3-650-F 方案： t_3 在燃气轮机负荷率为 100%~82% 范围内保持恒定； t_4 在燃气轮机负荷率为 82%~41% 范围内保持最高温度(650℃)恒定不变； t_3 在燃气轮机负荷率为 41%~22% 范围内降低。

(6)IGVT4 渐升-F 方案：调节 IGV 开度和燃料量，在燃气轮机负荷率为 100%~43% 的范围内使 t_4 逐渐升至 650℃； t_3 在燃气轮机负荷率为 43%~22% 的范围内降低。

王振^[25]通过系统分析得出，当负荷变化时，IGVT3-650-F 为最佳运行方案，如图 12 所示。由于燃气轮机调节方案下 ISCC 效率曲线变化趋势一致，因此，相比于燃气轮机循环来说，蒸汽轮机循环对 ISCC 的影响更大。

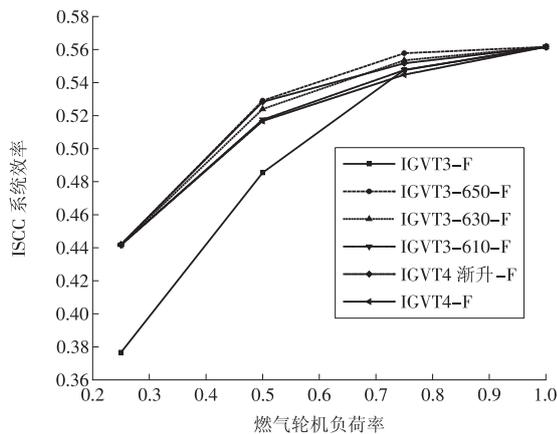


图 12 各种变工况调节方式下的 ISCC 系统效率
Fig. 12 ISCC system efficiencies under various off-design working conditions

4.2 环境条件变化时 ISCC 系统变工况特性

对于 ISCC 系统来说，实际运行过程中环境温度是不断变化的。环境温度的变化会直接影响压气机入口空气质量流量，从而对 ISCC 系统产生巨大的影响，如图 13 所示。研究表明，环境温度对布雷顿循环和朗肯循环都有重要影响，但 DNI 只影响朗肯循环的性能。由于燃气轮机受最大功率的限制，当环境温度低于一定值时(6℃左右)，燃气轮机性能开始恶化。当 DNI 不变时，ISCC 系统热效率的变化趋势与布雷顿循环效率的变化趋势一致。对于 ISCC 系统，环境温度对布雷顿循环性能的影响大于对朗肯循环性能的影响。布雷顿循环对 ISCC 系统的整体性能起着主导作用。随着环境温度和 DNI 的

升高，ISCC 系统总体性能呈下降趋势，但太阳能侧性能有所改善，环境温度和 DNI 值越高，太阳能侧性能参数越高。

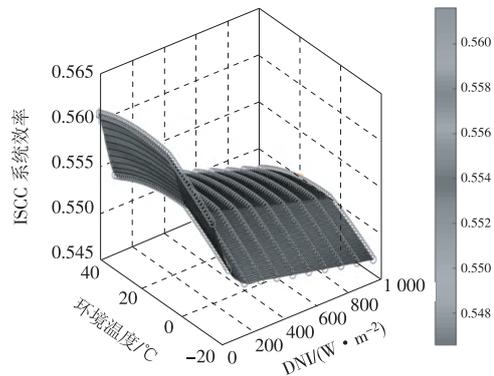


图 13 各种环境条件下的 ISCC 系统效率

Fig. 13 ISCC system efficiencies under various environmental conditions

5 工程示范进展

5.1 国外示范项目

ISCC 技术最初由 Luz 公司提出并在爱尔兰建成了世界上第 1 座 ISCC 示范电站，之后，世界范围内很多学者和机构迅速开展了相关的研究与开发。全球环境基金(Global Environment Facility, GEF)大力推荐发展 ISCC 技术并对太阳能资源丰富的摩洛哥、埃及、墨西哥等发展中国家给予了资金和技术支持，用于建设 ISCC 电站。

中东地区的太阳辐射强度强，资源丰富，伊朗投运的 Yazd 电站装机容量达 467 MW，其中太阳能净发电功率为 17 MW，是世界上运行水平较高的电站之一。伊朗尽管石油资源丰富，但仍大力发展太阳能发电，可见其技术的优越性。

非洲大陆阳光充沛，北非的阿尔及利亚已建成装机容量为 150 MW 的 Hassi R' Me 电站，在此基础上还计划新建 500 MW 的 ISCC 电站。Hassi R' Me 电站采用抛物槽式太阳能聚光装置，太阳能主要用于汽轮机循环部分，太阳能净发电功率达 20 MW。阿尔及利亚的邻居摩洛哥建成的 Aïn Beni Mathar 电站装机容量达 470 MW，太阳能净发电功率也是 20 MW，全年发电量达到了 1.78 TW·h。埃及的 Kuraymat 太阳能与燃气轮机混合发电项目于 2011 年年初投入运行，该电站采用槽式太阳能集热技术，天然气发电功率为 104 MW，太阳能发电功率为 22 MW，其中包括 2 000 个太阳能集热单元，反射镜面积约 130 000 m²，全年发电量可达 980 GW·h。

美国在科罗拉多州(Colorado)帕利塞德建设了世界上第 1 座太阳能光热与燃煤互补的联合发电

站,机组容量为49 MW,太阳能部分设计电力为1 MW。这是一个示范工程,于2010年6月改造后正式成功并网,验证了太阳能光热与常规火电机组联合发电的可行性。

5.2 国内示范项目

国内的研究起步较晚,但近些年来,随着政策的调整倾斜,很多能源研究机构也着力在太阳能热互补化石能源技术方面进行探索研究。2016年国家能源局发布的第1批示范电站名单中包括20个已经建成项目。

(1)国内首座ISCC电站试验基地位于南京市江宁开发区,占地约26 700 m²,采用塔式太阳能集热技术与燃气轮机进行互补,装机容量约70 kW。

(2)2014年,我国首个光煤互补示范项目——大唐天威嘉峪关10 MW光煤互补项目一期1.5 MW项目完成与大唐803燃煤电厂热力系统的连接工程建设,经过1个月左右的调试,实现了联合运行。该项目为大唐集团新能源股份有限公司承担的国家863计划项目“槽式太阳能热与燃煤机组互补发电示范工程应用研究”的重要组成部分,为我国首个槽式太阳能集热场与燃煤机组互补运行电站。该示范项目位于甘肃嘉峪关大唐803发电厂厂区,占地面积为3.5万m²,采用槽式太阳能热发电技术。在600 m长的太阳能集热场内,导热油流经集热管加热至393℃,通过油水换热器将高温导热油的热量接入大唐803发电厂热力系统。以光煤互补发电的方式,利用太阳能资源来补充发电,可有效减少原火电机组的煤耗量,降低污染排放,实现连续稳定发电。

(3)华能海南发电股份有限公司南山电厂菲涅尔式ISCC系统中,在太阳能集热场设置蓄热子系统后,太阳能集热场产生的蒸汽出口温度进入中压段而不是低压段,避免了进入汽轮机低压段之前进行大幅减温减压造成的能量浪费。新系统的发电功率提高了0.189 MW,光电转换效率提高了7.00个百分点,热效率提高了0.15个百分点,等效节气量提高了39.69 m³/h,系统经济性显著。

(4)宁夏哈纳斯ISCC发电站的燃气-蒸汽联合循环容量为100.0 MW,太阳能场发电功率为38.5 MW,占电站总出力的40%左右,建有储能系统。建成后,年发电量约为304 GW·h,相当于每年节约标准煤10.4万t,与年发电量相同的常规火力发电厂相比,每年可减少CO₂排放量21.0万t。

6 结束语

ISCC系统已成为当今世界能源动力领域研究

的热点和前沿方向。本文介绍了ISCC系统在集成模式、性能评价指标、变工况特性以及工程示范方面的研究进展。结果表明:随着可再生能源和新能源比例的不断上升,太阳能与化石能源的互补有助于进一步提升燃气-蒸汽联合循环性能并为规模化利用太阳能提供了新的途径,未来ISCC系统集成方式会更加多样,系统性能会进一步提升。

参考文献:

- [1] GÜLEN S. C. Second law analysis of integrated solar combined cycle power plants [J]. *Journal of Engineering for Gas Turbines & Power*, 2015, 137(5):051701.
- [2] FRANCHINI G, PERDICHIZZI A, RAVELLI S, et al. A comparative study between parabolic trough and solar tower technologies in solar Rankine cycle and integrated solar combined cycle plants [J]. *Solar Energy*, 2013, 98(part C): 302-314.
- [3] DUAN Liqiang, QU Wanjun, JIA Shilun, et al. Study on the integration characteristics of a novel integrated solar combined cycle system [J]. *Energy*, 2017, 130:351-364.
- [4] 曲万军. 基于燃气-蒸汽联合循环系统的太阳能热互补发电 (ISCC) 集成特性研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [5] MEDRANO M, GIL A, MARTORELL I, et al. State of the art on high-temperature thermal energy storage for power generation. Part 2: Case studies [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2010, 14(1):56-72.
- [6] 王树成, 付忠广, 高学伟, 等. 太阳能集热器耦合方式对太阳能燃气联合循环性能影响分析 [J]. *热力发电*, 2019, 48(7):32-38.
- [7] WANG Shucheng, FU Zhongguang, GAO Xuewei, et al. Influence of coupling mode of solar collector on solar gas combined cycle performance [J]. *Thermal Power Generation*, 2019, 48(7):32-38.
- [8] 马敬凯. 太阳能热互补联合循环系统优化设计研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [9] 林汝谋, 韩巍, 金红光, 等. 太阳能互补的联合循环 (ISCC) 发电系统 [J]. *燃气轮机技术*, 2013, 26(2):1-15.
- [10] LIN Rumou, HAN Wei, JIN Hongguang, et al. Integrated solar combined cycle (ISCC) power generation system [J]. *Gas Turbine Technology*, 2013, 26(2): 1-15.
- [11] 刘仁志, 李元媛, 杨勇平. 新型太阳能与燃气轮机联合循环互补系统集热场优化研究 [J]. *工程热物理学报*, 2016, 37(9):1817-1821.
- [12] LIU Renzhi, LI Yuanyuan, YANG Yongping. Research on thermal field optimization of new solar energy and gas turbine combined cycle complementary system [J]. *Journal of Engineering Thermophysics*, 2016, 37(9):1817-1821.

- [10] MONTES M J, ROVIRA A, MUÑOZ M, et al. Performance analysis of an integrated solar combined cycle using direct steam generation in parabolic trough collectors[J]. *Applied Energy*, 2011, 88(9):3228–3238.
- [11] 吕志鹏. 新型太阳能热互补联合循环发电系统研究[D]. 北京:华北电力大学, 2018.
- [12] DENG Jianfen, XIA Zhi, LI Bo, et al. World's first gas turbine intake air cooling system with LiBr absorption type chiller as its focal component[J]. *Chinese Journal of Power Engineering*, 2005, 25(1):27–31.
- [13] MOHANTY B, PALOSO G J. Enhancing gas turbine performance by intake air cooling using an absorption chiller[J]. *Heat Recovery Systems & CHP*, 1995(1):41–50.
- [14] DUAN Liqiang, WANG Zhen. Performance study of a novel integrated solar combined cycle system [J]. *Energies*, 2018, 11(12):3400.
- [15] 刘玉磊. 新型带蓄能的太阳能热互补联合循环发电系统研究[D]. 北京:华北电力大学, 2019.
- [16] 裴杰, 赵苗苗, 刘明义, 等. 太阳能与燃气-蒸汽联合循环发电系统优化[J]. *热力发电*, 2016, 45(1):122–125.
PEI Jie, ZHAO Miaomiao, LIU Mingyi, et al. Optimization of Fresnel solar and gas-steam combined cycle hybrid power generation system[J]. *Thermal Power Generation*, 2016, 45(1): 122–125.
- [17] 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[J]. *Energy*, 2004, 29(5–6):935–945.
- [18] REDDY V S, KAUSHIK S C, RANJAN K R, et al. State-of-the-art of solar thermal power plants: A review [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2013, 27(6): 258–273.
- [19] RAKOPOULOS C D, GIAKOUMIS E G. Second-law analyses applied to internal combustion engines operation [J]. *Progress in Energy & Combustion Science*, 2006, 32(1):42–47.
- [20] 谢坤. 塔式太阳能辅助燃气蒸汽联合循环系统研究[D]. 北京:华北电力大学, 2018.
- [21] ZHU G, NEISES T, TURCHI C, et al. Thermodynamic evaluation of solar integration into a natural gas combined cycle power plant [J]. *Renewable Energy*, 2015, 74: 815–824.
- [22] BRODRICK P G, BRANDT A R, DURLOFSKY L J. Optimal design and operation of integrated solar combined cycles under emissions intensity constraints [J]. *Applied Energy*, 2018, 226(9): 979–990.
- [23] BRODRICK P, BRANDT A R, DURLOFSKY L J. Operational optimization of an integrated solar combined cycles (ISCCs) under practical time-dependent constraints [J]. *Energy*, 2017, 141:1569–1584.
- [24] ACHOUD L, BOUHARKAT M, BEHAR O. Performance assessment of an integrated solar combined cycle in the southern of Algeria [J]. *Energy Reports*, 2018, 4: 207–217.
- [25] 王振. 太阳能热互补联合循环系统优化设计研究[D]. 北京:华北电力大学, 2019.

(本文责编:刘芳)

作者简介:

杨谱(1995—),男,四川凉山人,在读硕士研究生,从事太阳能与联合循环互补研究工作(E-mail:yangpu259@163.com)。

段立强*(1973—),男,山西平遥人,教授,工学博士,从事先进能量系统集成与优化研究工作(E-mail:dlq@ncepu.edu.cn)。

潘盼(1994—),男,山东昌乐人,在读硕士研究生,从事太阳能热化学储能研究工作(E-mail:1652498090@qq.com)。