

新型太阳能冷热电联供系统性能分析

魏钰函 李俊辉* 高佼 胡粤 丁永琪

青岛工学院机电工程学院 青岛 266300

摘要: 为了践行“双碳”目标,本文以太阳能作为热源,设计了一套新型冷热电联供系统,在二氧化碳减排的同时实现了能量的梯阶利用。系统整体由有机朗肯循环、热水循环和单效 LiBr 吸收式制冷循环三部分组成,使用有机朗肯循环进行发电,余热可用于居民供暖和制冷。将抛物面槽式集热器系统和蓄热罐结合,保证了发电、供热、供冷的持续性与稳定性。对冷热电联供系统进行分析,结果表明当甲苯作为有机朗肯循环工质在 303℃蒸发时,系统性能最佳,发电循环效率可达 17.42%,冷热电联供能量利用率为 23.89%。

关键词: 冷热电联供; 太阳能热发电; 吸收式制冷; 有机朗肯循环

1 引言

能源危机与环境污染问题日益严峻,推动可再生能源的高效利用成为研究热点。太阳能作为广泛应用的可再生能源,然而,传统太阳能发电系统存在能量转换效率低、供能不稳定等问题,难以满足多元化用能需求。设计一种新型太阳能冷热电联供系统,实现冷-热-电的高效协同转换与稳定供应,具有重要的研究价值和应用意义。

赵振东针对不同太阳能冷热电强度的系统进行系统优化运行的研究,将太阳能热发电与供热和制冷系统相结合,并对其系统进行优化以及评估,实现了多能互补,促进可再生能源的消纳^[1]。

何哲晨等人提出了针对传统的耦合光氢的冷热电联供系统管控存在的配置和运行割裂问题,充分发挥质子交换膜水电解制氢技术在大范围负荷波动下可稳定运行的优势,实现了能耗的有效降低和经济性的显著提高,通过“先配置优化后运行”模型和“先运行优化后配置”这两种模型实现了总成本分别降低 42.89 万元和 14.38 万元的突破^[2]。罗雯提出一种由地热能、太阳能与天然气冷热电联产耦合的分布式能源系统,利用 DeST 模拟软件,并采用 NSGA-II 算法进行多目标优化,结果表明,耦合系统费用年值节约率、一次能源节约率与二氧化碳减排率分别高达 17.9%、32.7% 与 43.4%^[3]。

吴基文对基于太阳能利用的冷热电联供的系统结构、评价准则与运行优化进行了研究,提出了将太阳能光伏发电系统、太阳能光热系统与燃料电池冷热电联供系统集成成为基

于太阳能利用的冷热电联供系统,还提出一种新的运行策略——混合跟随运行策略^[4]。李国良提出了一种太阳能分布式光伏蓄能空调系统并将其与冷热电系统匹配的特性研究,分布式光伏源端驱动变频压缩机负载端与储能端及负荷端的能量得以有效协同,提高了太阳能全年利用效率^[5]。

邓旺对太阳能驱动的冷热电联供系统的集成原理、结构组成、做功流程进行了分析,并对太阳能驱动的冷热电联供系统的三个子系统——槽式太阳能集热系统、有机朗肯循环系统、吸收式制冷系统进行热力学分析,发现联供系统不仅可实现孤岛运行,也可将不同品位的能量进行梯级利用^[6]。

王异林等人提出了一种太阳能辅助沼气化学回热的新型冷热电联产系统,在新系统中考虑了沼气池的热负荷,并通过中温槽式太阳能生产大量水蒸气来构建一种高水碳比的沼气蒸汽重整工艺,新系统的发电效率较原系统提高 13.4%,供热量较原系统高 1476.69kW,增幅可达 110.62%^[7]。

本文提出一种利用太阳能热发电的新型冷热电联供系统,在二氧化碳减排的同时实现了能量的梯阶利用。系统由基于螺杆膨胀机的有机朗肯循环、供热循环和单效 LiBr 吸收式制冷循环组成。该系统由基于螺杆膨胀机的朗肯循环进行发电,冷凝放热量可用于居民供暖和制冷,可以最大限度的实现能量的高效转化。热源可以是工业余热、地热能、生物质能等,可以广泛的利用各种能源从而提高能量的利用率,合理充分的利用各种能量并减少能量消耗。该系统在“节能减排”方面同时具有提高能效和二氧化碳减排的双重作用,可以实现“能·碳”双控,具有较强的理论可行性与较

好的应用价值。

2 系统介绍及优势分析

2.1 系统结构介绍

所提出的新型冷热电联供系统工艺流程图如图 1 所示。

该冷热电联供系统基于太阳能槽式集热技术，结合有机朗肯循环、溴化锂吸收式制冷和供热模块，实现电热冷三联供。其工作过程可分为太阳能集热与蓄热、发电循环、供热循环、制冷循环四个核心环节。

有机工质在太阳能槽式集热器中吸热变成饱和气体，进入储液罐中完成蓄热。蓄热罐的出口为饱和气体，进入膨胀机膨胀做功，带动发电机发电，完成膨胀的气体在表面式换热器中完成放热后，经工质泵升压返回太阳能厂中进行加热。

来自低温储液罐的水通过水泵加压后进入高温换热器，

完成与顶部有机工质的换热后进入高温储液罐，当有供热需求时，三通阀打开，高温储液罐中的热水在用户端进行放热，达到用户端供暖需求，完成用户端放热后水进入低温储液罐。

当有制冷需求时三通阀底部打开，高温储液罐的热水在发生器中换热，作为吸收式制冷系统的热源，完成放热后同样回到低温储液罐。

在发生器中溴化锂溶液完成水分蒸发后的蒸气在冷凝器中放热，变成饱和液体，经节流阀节流后，在蒸发器中通过吸热完成制冷后回到吸收器。发生器底部的高温浓溶液在溶液热交换器中放热后经节流阀在吸收器中完成喷淋，吸收器中的溴化锂稀溶液在溶液热交换器中吸热，经溴化锂溶液泵升压后回到发生器。

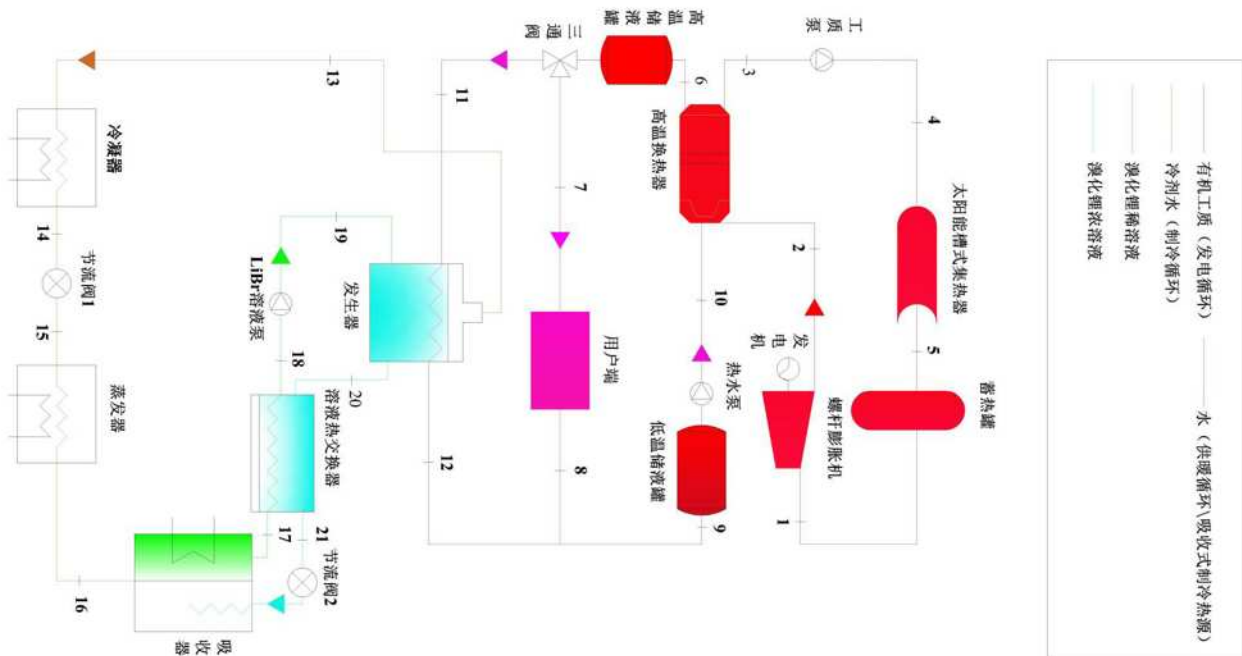


图 1 新型冷热电联供系统原理图

2.2 系统优势分析

将太阳能集热循环和蓄热相结合可以保证发电的持续

性与稳定性，采用集热性能较好的有机工质同时作为集热器中的集热工质，蓄热罐中的蓄热工质和有机朗肯循环工质，

避免了二次换热带来的热损失，提高了系统的热效率。

根据需求可以根据需求在发电、热电联供、冷热电三联供等多种不同模式间进行切换，大大提高了能量的利用率。采用太阳能直膨式发电系统与螺杆膨胀机相结合提高了系统变工况运行的适应性。该系统可以高效利用太阳能，对践行双碳目标有积极作用。

3 系统性能分析

系统的设计参数如表 1 所示。

表 1 系统设计参数表

参数名称	参数值及单位
装机容量	10MW
螺杆膨胀机峰值等熵效果	0.85
冷凝温度	115℃
膨胀机比体积之比	不大于 50
ORC 工质泵等熵压缩效率	0.75
蒸发温度	大于 130℃
冷媒水进口温度	15℃
冷媒水出口温度	5℃
冷却水进口温度	32℃
制冷量	1758kW
供热量	2400kW
泵等熵效率	0.75
吸收器压力损失	1.7%
吸收式制冷驱动热源温度	110℃

分别选取 MDM、甲苯、D4 作为有机朗肯循环工质，顶部发电循环效率随蒸发温度的关系如图 2 所示，随着蒸发温度的升高，三种工质的发电效率均增大。当甲苯作为有机朗肯循环工质在 303℃蒸发时，系统性能最佳，循环效率可达 17.42%。图中阴影部分膨胀机比体积之比大于 50，工程上难以满足 80% 以上的等熵效率^[7]。

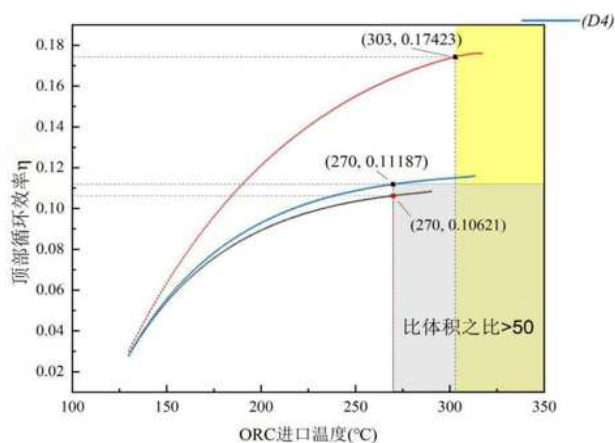


图 2 顶部循环效率与有机朗肯循环蒸发温度的关系

热电系统的能量利用率随蒸发温度的变化关系如图 3 所示，随着蒸发温度的升高，三种工质的热电系统的能量利用率均增大。当甲苯作为有机朗肯循环工质在 303℃蒸发时，热电系统的能量利用率最大，可达 21.88%。

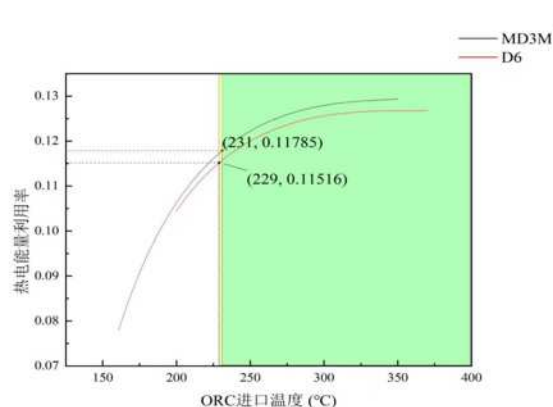


图 3 热能利用率与有机朗肯循环蒸发温度的关系

冷电系统的能量利用率随蒸发温度的变化关系如图 4 所示，随着蒸发温度的升高，三种工质的热电系统的能量利用率均增大。当甲苯作为有机朗肯循环工质在 303℃蒸发时，热电系统的能量利用率最大，可达 19.42%。

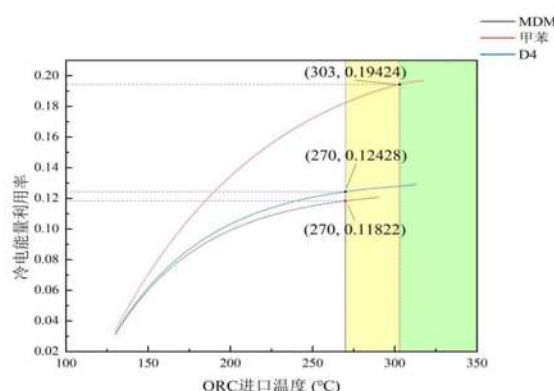


图 4 冷电能量利用率与有机朗肯循环蒸发温度的关系

冷热电系统的能量利用率随蒸发温度的变化关系如图 5 所示，随着蒸发温度的升高，三种工质的热电系统的能量利用率均增大。当甲苯作为有机朗肯循环工质在 303℃蒸发时，热电系统的能量利用率最大，可达 23.89%。

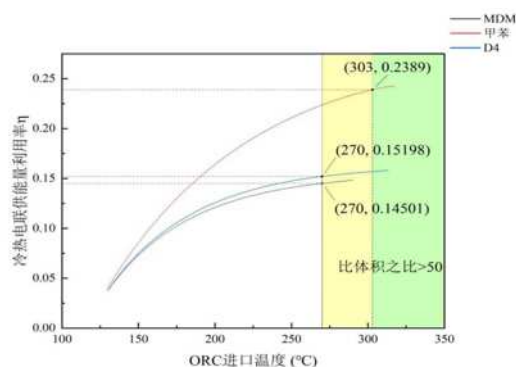


图 5 冷热电联供能量利用率与有机朗肯循环蒸发温度的关系

4 结论

本文提出了一种新型冷热电联供系统实现了太阳能的高效利用,系统可以根据用户需求在发电模式、冷电模式、热电模式、冷热电模式之间切换。对系统性能进行热力学分析,主要结论如下:

随着有机朗肯循环蒸发温度的升高,发电循环效率、冷电效率、热电效率、冷热电效率均有所提高。

分别采取MDM、甲苯、D4作为有机朗肯循环工质在相同运行工况下甲苯运行最佳。

当甲苯作为有机朗肯循环工质在303℃蒸发时,性能最佳,发电效率、冷电效率、热电效率、冷热电效率分别可达17.42%、21.88%、19.42%、23.89%。

参考文献:

[1] 赵振东. 太阳能冷热电联供系统多目标优化设计与运行研究[D]. 广西大学,2018.

[2] 何哲晨,刘锋平,许野,等. 考虑氢储的光伏-冷热电联供系统的双层优化研究[J]. 太阳能学报,2025,46(01):567-578.

[3] 罗雯,高天. 基于NSGA-II算法的太阳能、地热

能与天然气冷热电联产耦合系统的优化设计[J]. 工程与建设,2024,38(05):1032-1035+1038.

[4] 吴基文. 基于太阳能利用的冷热电联供系统研究[D]. 华北电力大学(北京),2020. 李国良. 太阳能分布式光伏蓄能空调系统冷热电匹配特性研究[D]. 云南师范大学,2023.

[5] 李国良. 太阳能分布式光伏蓄能空调系统冷热电匹配特性研究[D]. 云南师范大学,2023.

[6] 邓旺. 太阳能驱动的冷热电联供系统研究[D]. 华北电力大学,2020.

[7] 王异林,苏博生,黄枝,等. 太阳能辅助沼气化学回热的新型冷热电联产系统模拟分析[J]. 动力工程学报,2024,44(02):213-220+231

[8] Li P.C.,Cao Q.,Li J.,Lin H.W.,Wang Y.D.,Gao G.T., et al. An innovative approach to recovery of fluctuating industrial exhaust heat sources using cascade Rankine cycle and two-stage accumulators [J]. Energy, 2021, 228(8): 120587-120587.

通讯作者: 李俊辉(1996-),男,硕士研究生,主要从事新型热力循环、太阳能热发电等方面研究