

基于太阳能热化学的分布式供能系统 热力学性能及碳排放分析

刘泰秀^{1,2}, 刘启斌^{1,2}, 隋军^{1,2}, 张铁寅³

(1. 中国科学院工程热物理研究所, 北京市 海淀区 100190;

2. 中国科学院大学, 北京市 海淀区 100049;

3. 达华工程管理(集团)有限公司, 北京市 东城区 100005)

Thermodynamic Performance and Carbon Emission Analysis of Distributed Energy Supply System Based on Solar Thermochemistry

LIU Taixiu^{1,2}, LIU Qibin^{1,2}, SUI Jun^{1,2}, ZHANG Tieyin³

(1. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100190, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100049, China;

3. Dahua Engineering Management (Group) Co., Ltd., Dongcheng District, Beijing 100005, China)

摘要: 分布式供能系统临近用户, 具有灵活消纳可再生能源的优势。集成太阳能与清洁燃料互补的分布式供能系统, 旨在实现太阳能与燃料的高效互补利用。提出了基于太阳能热化学的分布式供能系统, 该系统集成了太阳能热化学转化与分布式冷热电联供系统, 将太阳能与甲醇以热化学的形式进行源头互补, 把太阳能转化为合成气燃料化学能, 进而通过内燃机发电机组和余热回收单元输出冷、热、电产品, 以满足用户的负荷需求。通过数值计算的方法, 对所集成的系统开展了热力学性能及 CO₂ 排放性能分析, 研究了设计工况及变工况下运行性能, 结果表明所集成的太阳能与燃料热化学互补供能系统具有显著的节能减排优势。

关键词: 太阳能热化学; 分布式供能系统; 甲醇分解; 碳排放

ABSTRACT: Distributed energy supply system is installed close to end-users with advantages of flexible consumption of renewable energy. Distributed energy supply system with integrating solar energy and clean fuel was conducted to achieve efficient utilization of solar energy and fuel. A distributed energy supply system based on the solar thermochemistry was proposed. The system integrated solar thermochemistry conversion and distributed energy system combined cooling, heating and power. The solar and methanol

were complemented at the source in a thermochemical form, and the solar was converted into chemical energy of syngas, the cold, heat and power products were then exported through the internal combustion engine electric generator and waste heat recovery units to meet the load demand of users. Through numerical calculation method, the thermodynamic performance and CO₂ emission performance of the integrated system were analyzed, and the performance under design and variable operating conditions was studied. The results show that the integrated solar energy and fuel thermochemical complementary energy supply system has significant advantages of energy saving and emission reduction.

KEY WORDS: solar thermochemistry; distributed energy supply system; methanol decomposition; carbon emission

0 引言

相对于集中式供能, 分布式供能系统面向临近用户直接供能, 受集中供能调度、输配影响较小, 具有可靠、节能减排、灵活消纳可再生能源的特点^[1]。目前, 研究者^[2-6]已针对集成可再生能源利用的分布式供能开展了大量研究工作, 并在多能互补分布式供能方面取得了显著进展。太阳能作为一种清洁、分布广泛的可再生能源, 对其进行转化利用对促进可再生能源的大力开发具有重大意义, 对节约传统能源供给结构中化石能源

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFB0905102)。

Project Supported by National Key Research and Development Program of China (2018YFB0905102).

消耗起到积极作用^[7]。

针对太阳能的利用技术, 现已开展了太阳能光伏发电^[8]、光热发电^[9]以及太阳能制冷^[10]等方面的研究工作。文献[9]研究了太阳能驱动有机朗肯循环(organic Rankine cycle, ORC)发电系统, 将其应用于分布式供能系统中并进行了热力学性能分析。文献[10]对太阳能驱动吸收式制冷循环进行集成分析, 研究了不同气候条件下系统的运行经济性。不同于利用太阳能驱动热力循环的利用方式, 太阳能可通过热化学转化的形式进行利用, 即利用聚光太阳热能驱动热化学反应, 将间歇、不稳定的太阳能转化为高能量密度、稳定的燃料化学能。研究者针对太阳能驱动 $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ 分解、甲烷干/湿重整等方面开展了大量的研究工作^[11-16]。文献[11-12]研制了 4 kW 太阳能热化学腔体式反应器, 在室内太阳能聚光模拟光源驱动下开展 CO_2 分解及 $\text{H}_2\text{O}/\text{CO}_2$ 混合介质热分解的实验测试研究。针对基于甲烷重整反应的太阳能热化学转化过程, 研究者进行了反应动力学^[13]、催化剂制备^[14]、反应器研制^[15]及原理样机^[16]等方面的研究, 在 950 °C 时甲烷重整转化率达 80%^[17]。

然而, 上述研究所开展的太阳能热化学反应所需反应温度均在 800 °C 以上, 较高的反应温度需要较高聚光比的太阳能聚光集热装置, 导致装置结构复杂、运行条件苛刻。为此, 研究者^[18-21]提出集成商业化抛物型槽式太阳能集热器的中低温太阳能热化学利用方法, 较低的反应温度一方面降低了太阳能聚光集热过程的复杂度, 另一方面增大了太阳能热能的做功潜力。Jin 等^[18]提出

基于甲醇分解/重整反应的太阳能热化学利用方法, 即利用 200~300 °C 的聚光太阳热能驱动吸热的甲醇分解/重整反应, 将太阳能升级转化为合成气燃料化学能。针对基于甲醇分解/重整反应的中低温太阳能热化学转化, 目前已开展了反应器研制^[19]、数值仿真分析^[20]、原理样机实验^[21]等方面的研究。

鉴于中低温太阳能热化学利用方法中太阳能热能具有做功潜力大、结构简单等优点, 本文提出了基于太阳能热化学的分布式供能系统, 该系统集成了中低温太阳能热化学转化与分布式冷热电联供系统, 以太阳能和甲醇为能源输入, 通过热化学反应过程, 将太阳能转化为合成气燃料化学能, 进而通过内燃机(internal combustion engine, ICE)发电机组及余热回收装置, 面向用户输出冷、热、电产品, 从而实现太阳能和燃料的高效互补利用。

1 基于太阳能热化学的分布式供能系统

1.1 系统介绍

基于太阳能热化学的分布式供能系统流程如图 1 所示。该系统主要集成太阳能热化学转化、动力发电、余热回收及辅助供能等关键过程, 主要以太阳光和甲醇燃料为系统能源输入, 面向用户负荷需求实时供给冷、热、电负荷。该系统主要包括太阳能热化学单元、合成气储存单元、内燃机发电单元、动力余热回收单元(吸收式制冷机组及供热换热器等)及辅助供能单元。各主要单元的功能如下:

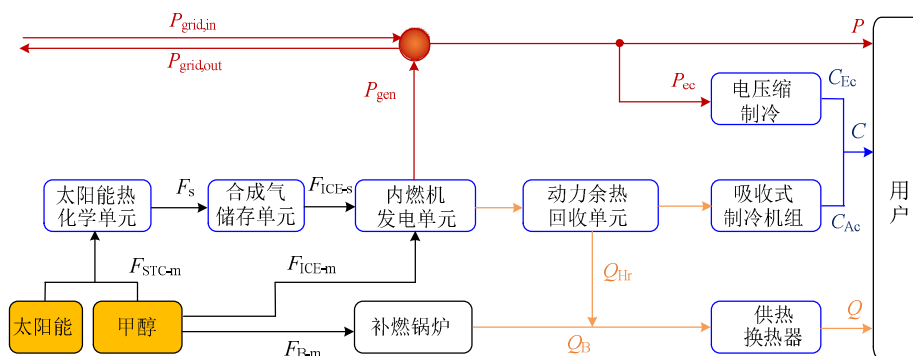


图 1 基于太阳能热化学的分布式供能系统流程

Fig. 1 Flow chart of distributed energy supply system based on solar thermochemistry

1) 在太阳能热化学单元中, 通过抛物型槽式聚光集热器聚焦太阳热能, 用于驱动甲醇分解热化学反应, 将聚光太阳热能转化为合成气(H_2 和 CO)化学能, 实现聚光太阳热能的品位提升及稳定储存。

2) 产生的合成气作为内燃机的燃料, 用于驱动内燃机发电单元, 太阳能以燃料的形式做功, 实现了太阳能到电的转化利用。

3) 通过动力余热回收单元, 对内燃机排烟余热及缸套水余热进行回收利用, 用于向用户输出冷和热。

4) 受用户负荷需求和太阳能辐照强度实时波动的影响, 系统中集成了辅助供能单元, 其包括电网供电、电压压缩制冷机组及补燃锅炉, 旨在提升系统的供能可靠性及运行稳定性。

该系统面向用户负荷需求, 其运行策略及性能受太阳能辐照强度及用户冷、热、电负荷需求等方面的影响, 具体如下:

1) 当太阳辐照强度充足时, 聚光太阳热能驱动甲醇分解转化为合成气燃料, 进而通过内燃机发电单元满足用户电负荷需求。过量的合成气将储存于合成气储存单元中, 实现了太阳能的源头蓄能。

2) 当太阳能辐照强度不足时, 太阳能热化学单元所产生的合成气不能满足内燃机耗气需求。此时, 合成气储存单元将释放所蓄存的合成气, 以使内燃机发电功率满足用户电负荷需求。

3) 当合成气储存单元储气量超过储能上限时, 内燃机发电机组将满负荷运行, 过量的电将上传电网或用于驱动电压压缩制冷机组。

4) 当太阳能热化学单元实时产气量不能满足内燃机耗气需求, 且当合成气储存单元储气量低于储能下限时, 内燃机将逐步降低发电负荷, 直至达到运行最低负荷(20%负荷)而执行停机。

5) 当内燃机发电单元无法满足用户电负荷需求时, 将调用电网电作为补充。

6) 当余热回收单元制冷量或供热量不能实时满足用户冷、热负荷需求时, 启动电压压缩制冷机组或补燃锅炉进行补充, 从而实时满足用户冷或热的负荷需求。

表 1 为基于太阳能热化学的分布式供能系统关键参数。其中, 太阳能热化学单元聚光集热器开口面积为 806.40 m^2 , 内燃机额定发电功率达 767.00 kW , 额定工况下发电效率为 37.30% , $LiBr/H_2O$ 吸收式制冷机组能效系数(coefficient of performance, COP)为 $1.26^{[22]}$ 。

表 1 系统关键参数

Tab. 1 Key parameters of system

参数	数值
设计太阳直射辐照强度/(W/m^2)	700.00
太阳能集热器开口面积/ m^2	806.40
集热器光学效率/%	74.10
太阳能热化学反应温度范围/ $^{\circ}C$	200~300
额定发电功率/ kW	767.00
发电机组额定发电效率/%	37.30
发电机组额定排烟温度/ $^{\circ}C$	460
发电机组额定排烟流量/(kg/h)	4 606.00
吸收式制冷机排烟温度/ $^{\circ}C$	179.00
吸收式制冷机 COP	1.26
管线热损失率/%	10.00

1.2 太阳能热化学转化过程

太阳能热化学单元作为系统核心单元之一, 具有太阳能与燃料源头互补的功能, 其结构示意图如图 2 所示。该过程利用聚光太阳热能驱动甲醇分解热化学反应, 将聚光太阳热能吸收并转化为燃料化学能。太阳能热化学单元采用商业化的抛物型槽式集热器, 其焦线位置处布置有太阳能热化学吸收/反应器。太阳能热化学吸收/反应器采用真空层隔热的直通管结构形式, 透明石英玻璃管与镀膜吸收管之间环形空间维持真空状态, 以减小太阳能热化学吸收/反应器对环境的散热损失; 催化剂颗粒填充于镀膜吸收管内部, 用于催化甲醇分解转化为合成气。采用 $Cu/ZnO/Al_2O_3$ 作为甲醇裂解催化剂, 在该催化剂作用下甲醇蒸汽在 $180\sim 300 \text{ }^{\circ}C$ 吸收聚光太阳热能, 分解转化为

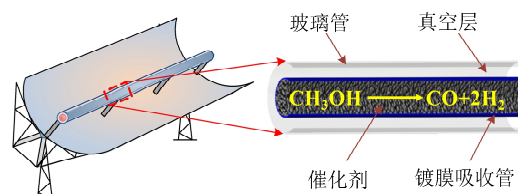


图 2 太阳能热化学单元结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of solar thermochemical unit structure

合成气, 将中温聚光太阳热能转化为高品位的合成气燃料化学能, 进而以燃料化学能的形式驱动动力循环进行热功转化。

2 系统建模及性能评价指标

2.1 系统建模

2.1.1 太阳能热化学过程建模

太阳能热化学转化涉及到太阳能聚光集热、传热传质及化学反应过程, 甲醇蒸汽沿程吸收太阳热能, 发生热化学反应, 其反应进程主要受能量传输特性和反应动力学特性的影响。图3为太阳能热化学转化模型示意图。将太阳能热化学吸收/反应器沿程方向划分为*i*个反应微元, 每个反应微元都近似看作等温反应域, 并对各个反应微元进行迭代计算, 进而得出太阳能热化学单元的运行性能。笔者在文献[23]的研究工作中已对该模型进行了验证。



图3 太阳能热化学转化模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of solar thermochemical conversion model

以第*i*微元为研究对象, 甲醇反应量 $\Delta\dot{n}_{\text{CH}_3\text{OH},i}$ 及热化学反应吸热量 $\dot{Q}_{\text{chem},i}$ 分别表示如下:

$$\Delta\dot{n}_{\text{CH}_3\text{OH},i} = r_{\text{D},i} \cdot A_{\text{m}} \cdot \rho_{\text{cat}} \cdot \Delta V_{\text{cat},i} \quad (1)$$

$$\dot{Q}_{\text{chem},i} = \Delta H_{\text{r}} \cdot \Delta\dot{n}_{\text{CH}_3\text{OH},i} \quad (2)$$

式中: $r_{\text{D},i}$ 和 ΔH_{r} 分别为甲醇分解反应速率及反应焓; A_{m} 、 ρ_{cat} 和 $V_{\text{cat},i}$ 分别为催化剂比表面积、密度及体积。

通过太阳能热化学反应单元, 甲醇分解转化率 X_{cov} 及太阳能热化学转化效率 $\eta_{\text{sol-che}}$ 分别表示如下:

$$X_{\text{cov}} = \sum \Delta\dot{n}_{\text{CH}_3\text{OH},i} / \dot{n}_{\text{CH}_3\text{OH},0} \quad (3)$$

$$\eta_{\text{sol-che}} = \sum \dot{Q}_{\text{chem},i} / (I_{\text{DN}} \cdot A / 1000) \quad (4)$$

式中: I_{DN} 和 A 分别为太阳能直射辐照强度和集热器开口面积; $\dot{n}_{\text{CH}_3\text{OH},0}$ 为输入太阳能热化学单元的甲醇摩尔流量。

2.1.2 内燃机变工况性能

太阳能热化学反应产物是以 H_2 和 CO 为主的合成气, 其中 H_2 与 CO 体积比约为2:1。受用户负荷需求及太阳能辐照强度实时波动的影响, 内燃机发电机组常处于变工况运行状态。内燃机变负荷下发电效率 η_{ICE} 计算公式^[24]为

$$\eta_{\text{ICE}} = \eta_{\text{N}} (0.13 + 2.47N - 1.6N^2) \quad (5)$$

式中 η_{N} 和 N 分别为内燃机机组额定发电效率及负荷率。

2.2 评价指标

通过太阳能净发电效率、系统能源利用率、燃料节省率及 CO_2 减排率等对系统热力性能进行评价。

系统太阳能净发电效率 $\eta_{\text{sol-ec}}$ 通过太阳能热化学转化效率 $\eta_{\text{sol-che}}$ 与内燃机发电效率 η_{ICE} 的乘积进行计算, 即

$$\eta_{\text{sol-ec}} = \eta_{\text{sol-che}} \cdot \eta_{\text{ICE}} \quad (6)$$

系统能源利用率 η_{th} 为系统总输出与系统能量总输入的比值, 即

$$\eta_{\text{th}} = (\dot{P} + \dot{Q}_{\text{th}} + \dot{C}) / (I_{\text{DN}} \cdot A + X_{\text{cov}} \cdot \dot{n}_{\text{CH}_3\text{OH}} \cdot H_{\text{CH}_3\text{OH}}) \quad (7)$$

式中: $\dot{P}$ 、 $\dot{Q}_{\text{th}}$ 、 $\dot{C}$ 分别为系统输出电、热和冷功率; $H_{\text{CH}_3\text{OH}}$ 为甲醇低位热值; $\dot{n}_{\text{CH}_3\text{OH}}$ 为系统消耗的甲醇摩尔流量。

本系统采用燃料节省率 S_{fuel} 和 CO_2 减排率 S_{CO_2} 来评估基于太阳能热化学的分布式供能系统相对于参比供能系统的节能减排性能。选用基于燃煤的分产系统作为参比供能系统, 其发电效率、电制冷效率及供热效率分别为0.38、1.67和0.83^[25]。

$$S_{\text{fuel}} = (\dot{F}_{\text{sep}} - X_{\text{cov}} \cdot \dot{n}_{\text{CH}_3\text{OH}} \cdot H_{\text{CH}_3\text{OH}}) / \dot{F}_{\text{sep}} \quad (8)$$

$$S_{\text{CO}_2} = (\dot{m}_{\text{CO}_2\text{-sep}} - \dot{m}_{\text{CO}_2\text{-DES}}) / \dot{m}_{\text{CO}_2\text{-sep}} \quad (9)$$

式中: $\dot{F}_{\text{sep}}$ 为在相同电、热和冷功率下, 参比供能系统的燃料消耗量; $\dot{m}_{\text{CO}_2\text{-DES}}$ 和 $\dot{m}_{\text{CO}_2\text{-sep}}$ 分别为基于太阳能热化学的分布式供能系统及参比供能系统的 CO_2 排放量。

3 系统热力学性能及排放性能分析

3.1 设计工况性能分析

表2为设计工况系统热力学及碳排放性能。

表 2 设计工况系统热力学及碳排放性能

Tab. 2 System thermodynamics and carbon emission performance under design condition

参数	数值
系统总能量输入/kW	3 030.21
输入燃料/kW	2 465.73
接收太阳能/kW	564.48
系统总供能/kW	2 541.20
供电/kW	767.00
供冷/kW	532.13
供热/kW	440.10
储合成气化学能/kW	904.26
能源综合利用效率/%	83.86
太阳能净发电效率/%	24.66
系统能量输入太阳能份额/%	18.63
相对燃料节省率/%	40.91
CO ₂ 排放量/(kg/s)	0.17
CO ₂ 减排率/%	51.43

所集成系统对燃料化学能及余热进行梯级利用,其能源综合利用效率达 83.86%。采用太阳能热化学转化过程,太阳能以高品位燃料热化学能的形式驱动热力循环发电,实现太阳能到电的高效转化,太阳能净发电效率达 24.66%。通过太阳能与燃料源头互补,所集成系统相对于分产系统在节省燃料和减小排放方面具有显著的优势,其燃料节省率达 40.91%, CO₂ 减排率达 51.47%。

3.2 变工况性能分析

受太阳能辐照强度和用户负荷需求实时波动的影响,系统常偏离设计工况运行。不同的运行状态下,系统的运行模式及运行性能将发生变化。为此,选取我国华北地区某一办公楼为供能目标用户,开展典型日及全年的运行性能分析。

针对实时波动的太阳能辐照强度和办公楼目标用户负荷需求,系统通过太阳能与燃料源头互补,合成气储存单元及内燃机发电、吸收式制冷、集中电网供电、压缩式制冷及补燃供热等的协同运行,高效、稳定、实时地满足用户的电、热、冷负荷需求。系统以太阳能热化学互补供能为核心,通过太阳能热化学转化过程及余热回收过程,实现了太阳能和燃料的高效利用。以集中电网供电、电压缩制冷及直燃供热为补充,调节系统能源输出以满足用户负荷需求。

3.2.1 典型日运行模式分析

由于太阳能辐照强度和用户负荷需求随季节性变化显著,在此选取四季典型日对供能系统运行策略进行阐述。

图 4 为四季典型日电负荷供需特性曲线,显示了典型日中各时刻电负荷需求、内燃机发电功率及电网输电情况。按照所提出的系统运行策略,内燃机发电功率一方面受用户电负荷需求的影响,另一方面也受太阳能辐照强度和合成气储存容量的影响。夏季典型日(6月12日)中,由于太阳能辐照资源充足,因此合成气产气充足,致使合成气储存容量超过上限预警值,内燃机发电机组将满负荷运行,产生的多余电量将实时输送上网或者用于驱动电压缩制冷机组。冬季典型日(12月15日)中,受太阳能辐照强度较弱的影响,在白天辐照充足的时间段,内燃机跟随用户电负荷需求实时供电,在辐照不足的时间段将由电网补充供电。

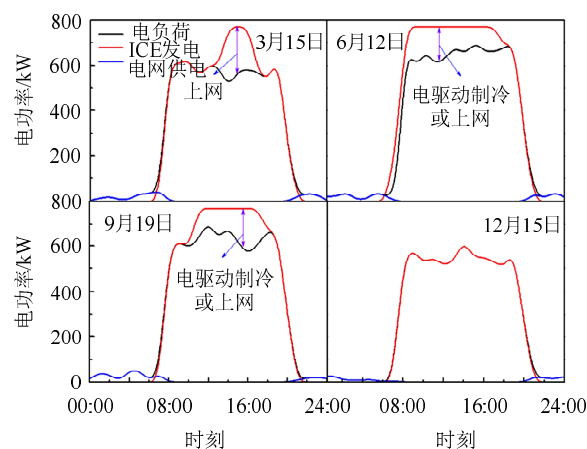
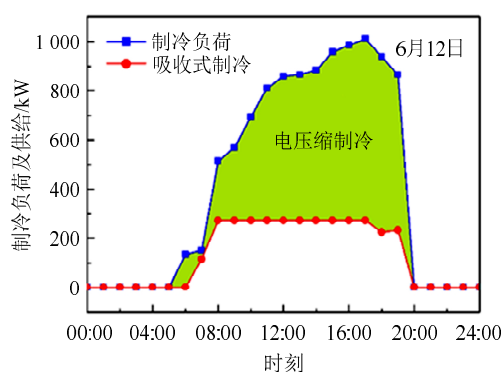


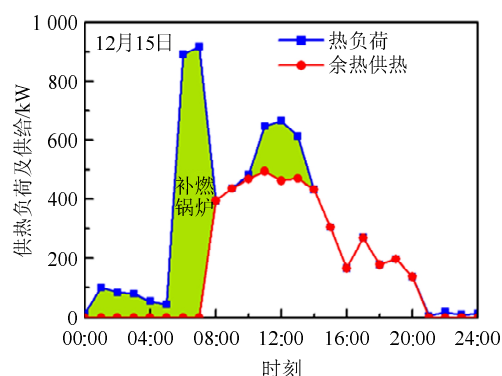
图 4 四季典型日电负荷供需特性曲线

Fig. 4 Supply and demand electricity loads on typical days of four seasons

受季节性影响,用户冷/热负荷需求呈现显著的季节性变化,分别选取夏季和冬季典型日对冷和热供需特性进行说明。夏季,为了满足用户的冷负荷需求,优先利用内燃机排烟余热驱动吸收式制冷机组制冷,不足的冷量将由电压缩制冷补充,夏季典型日冷负荷供需匹配特性如图 5(a)所示。冬季,为了满足用户热负荷需求,优先利用内燃机缸套水余热和排烟余热供热,不足的热量将由补燃锅炉补充,图 5(b)为冬季典型日热负荷



(a) 夏季典型日冷负荷供需特性



(b) 冬季典型日热负荷供需特性

图5 典型日冷/热负荷供需匹配特性曲线

Fig. 5 Supply and demand matching characteristic curves of cooling/heating loads on typical days

供需匹配特性曲线。

3.2.2 系统年运行性能分析

基于太阳能热化学的分布式供能系统中,将太阳能与燃料以热化学的形式进行源头互补,其中,太阳能热化学燃料转化过程受太阳能直射辐照强度的影响。在太阳能热化学燃料转化单元中采用抛物线槽式太阳能集热器聚焦太阳热能,其呈南-北方向进行布置。输入系统的太阳能为 $I_{DN} \cdot A / 1000$, 受太阳能余弦角的影响,输入有效太阳能直射辐照强度为 $I_{DN} \cdot A \cdot \cos \theta / 1000$ 。图6为各月份太阳能输入量及太阳能热化学燃料转化过程产生的合成气量。全年范围内,夏季太阳能辐照资源较为充足;冬季太阳能余弦损失显著,导致冬季有效太阳能直射辐照强度较低。随着有效太阳能直射辐照强度增加,太阳能热化学燃料转化单元产气量相应增加。

由于内燃机动力余热所驱动的吸收式制冷循环不能实时满足用户冷负荷需求,需由电压缩制

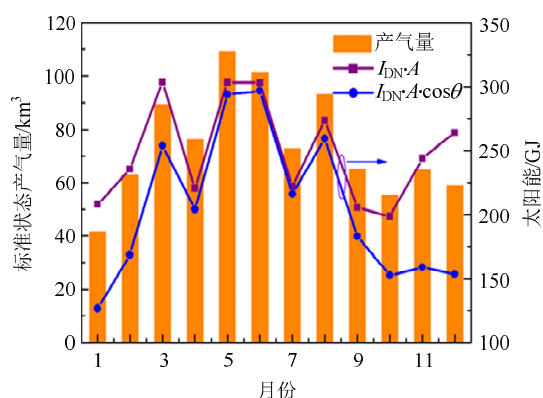


图6 各月份太阳能输入及合成气产气量

Fig. 6 Monthly solar input and syngas production

冷作为补充,因此,用户电力需求主要可分为基本耗电和电压缩制冷耗电2部分。用户所需电能主要由内燃机发电机组进行供电,不足的电负荷将由集中电网供电满足,内燃机所产生的过量电将输送上网。图7为各月份电负荷供需情况,用户所需电力供应主要由内燃机发电机组供给,少部分由集中电网进行补充,同时会向电网上传少量电。

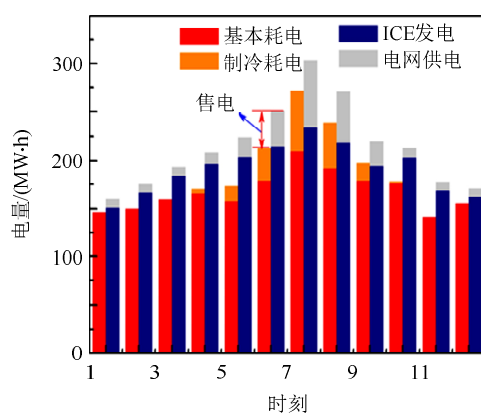


图7 各月份电负荷供需量

Fig. 7 Monthly electricity supply and demand loads

为进一步说明系统的技术优势,在给定的用户负荷案例下,分别从系统年均热力学性能和CO₂减排性能2方面开展性能分析。系统年运行性能如表3所示。系统通过太阳能与燃料以热化学形式进行源头互补,并对系统余热进行梯级回收,实现了太阳能的高效利用,节约了燃料的消耗。能源综合利用效率达到68.14%,相对于分产系统,年燃料节省率达到30.71%,年CO₂排放率降低了38.06%,具有显著的节能减排优势。

表 3 系统年运行性能

Tab. 3 Annual system performance

参数	数值
年能量总输入/(MW·h)	7 530.89
燃料(甲醇)/(MW·h)	5 923.80
太阳能/(MW·h)	828.66
电网供电(折燃煤)/(MW·h)	272.40(778.43)
能源综合利用效率/%	68.14
年燃料相对节省率/%	30.71
年能量总输出/(MW·h)	5 131.82
供电/(MW·h)	2 008.80
供冷/(MW·h)	1 156.40
供热/(MW·h)	1 593.60
上网售电/(MW·h)	373.02
年 CO ₂ 减排率/%	38.06

4 结论

提出了基于太阳能热化学的分布式供能系统，该系统将太阳能与燃料进行源头互补，进而通过联供系统面向用户供给冷、热、电；以集中电网、电压缩制冷机和补燃锅炉为补充，保障太阳辐照和用户负荷实施波动下系统与用户之间的供需匹配。针对所提出的系统，分别从热力学性能及 CO₂ 排放性能 2 方面开展了性能分析与评估。在设计工况下，系统太阳能净发电效率达 24.66%，能源综合利用效率达 83.86%，实现了太阳能和燃料的高效利用。通过系统变工况性能分析可知，系统年燃料节省率达 30.71%，年 CO₂ 减排率达 38.06%，体现出显著的节能减排优势。

参考文献

- [1] 国家发展改革委. 可再生能源发展“十三五”规划[R]. 北京: 国家发展改革委, 2016.
- [2] 蒋璿, 许鸣珠, 周雅娣. 城市水光互补分布式能源的优化配置研究[J]. 华电技术, 2020, 42(2): 58-62.
- [3] 张书华, 付林. 优先利用分布式能源及工业余热的多能互补供热模式[J]. 分布式能源, 2018, 3(1): 64-68.
- [4] 叶琪超, 楼可炜, 张宝, 等. 多能互补综合能源系统设计及优化[J]. 浙江电力, 2018, 37(7): 5-12.
- [5] 陈永进. 考虑园区能源互联网接入及其需求响应的配电网规划方法[J]. 广东电力, 2019, 32(10): 45-52.
- [6] 唐艳梅, 闫华光, 朱彬若, 等. 基于自适应遗传算法的分布式综合能源系统优化设计[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(2): 30-35.
- [7] 佟锴, 杨立军, 宋记峰, 等. 聚光太阳能集热场先进技术综述[J]. 发电技术, 2019, 40(5): 413-425.
- [8] 邓忻依, 艾欣. 分布式光伏储能系统综合效益评估与激励机制[J]. 发电技术, 2018, 39(1): 30-36.
- [9] Zhao L, Zhang Y, Deng S, et al. Solar driven ORC-based CCHP: comparative performance analysis between sequential and parallel system configurations [J]. Applied Thermal Engineering, 2018, 131: 696-706.
- [10] Shirazi A, Taylor R A, White S D, et al. A systematic parametric study and feasibility assessment of solar-assisted single-effect, double-effect, and triple-effect absorption chillers for heating and cooling applications [J]. Energy Conversion and Management, 2016, 114: 258-277.
- [11] Marxer D, Furler P, Takacs M, et al. Solar thermochemical splitting of CO₂ into separate streams of CO and O₂ with high selectivity, stability, conversion, and efficiency[J]. Energy & Environmental Science, 2017, 10(5): 1142-1149.
- [12] Furler P, Scheffe J R, Steinfeld A. Syngas production by simultaneous splitting of H₂O and CO₂ via ceria redox reactions in a high-temperature solar reactor [J]. Energy & Environmental Science, 2012, 5(3): 6098-6103.
- [13] Jang W, Jeong D, Shim J, et al. Combined steam and carbon dioxide reforming of methane and side reactions: thermodynamic equilibrium analysis and experimental application[J]. Applied Energy, 2016, 173: 80-91.
- [14] Simakov D, Wright M, Ahmed S, et al. Solar thermal catalytic reforming of natural gas: a review on chemistry, catalysis and system design[J]. Catalysis Science & Technology, 2015, 5(4): 1991-2016.
- [15] Jin J, Wei X, Liu M, et al. A solar methane reforming reactor design with enhanced efficiency[J]. Applied Energy, 2018, 226: 797-807.
- [16] Agrafiotis C, von Storch H, Roeb M, et al. Solar thermal reforming of methane feedstocks for hydrogen and syngas production: a review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, 29: 656-682.
- [17] Gokon N, Yamawaki Y, Nakazawa D, et al. Ni/MgO-Al₂O₃ and Ni-Mg-O catalyzed SiC foam absorbers for high temperature solar reforming of methane[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 35(14): 7441-7453.
- [18] Jin H, Hong H, Sui J, et al. Fundamental study of novel mid- and low-temperature solar thermochemical energy

- conversion[J]. Science in China Series E : Technological Sciences, 2009, 52(5): 1135-1152.
- [19] Hong H, Liu Q, Jin H. Operational performance of the development of a 15 kW parabolic trough mid-temperature solar receiver/reactor for hydrogen production[J]. Applied Energy, 2012, 90(1): 137-141.
- [20] Liu Q, Wang Y, Lei J, et al. Numerical investigation of the thermophysical characteristics of the mid-and-low temperature solar receiver/reactor for hydrogen production[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, 97: 379-390.
- [21] Liu T, Bai Z, Liu Q, et al. 100 kWe power generation pilot plant with a solar thermochemical process: design, modeling, construction, and testing[J]. Applied Energy, 2019, 251: 113217.
- [22] Han W, Chen Q, Lin R, et al. Assessment of off-design performance of a small-scale combined cooling and power system using an alternative operating strategy for gas turbine[J]. Applied Energy, 2015, 138: 160-168.
- [23] Liu T, Liu Q, Lei J, et al. A new solar hybrid clean fuel-fired distributed energy system with solar thermochemical conversion[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 213: 1011-1023.
- [24] Su B, Han W, Chen Y, et al. Performance optimization of a solar assisted CCHP based on biogas reforming[J]. Energy Conversion and Management, 2018, 171: 604-617.
- [25] 全国能量系统标准化技术委员会. 分布式冷热电能源系统的节能率 第1部分: 化石能源驱动: GB/T 33757.1—2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
-
- 收稿日期:** 2020-04-01。
- 作者简介:**
- 
- 刘泰秀(1993), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为多能互补分布式供能, liutaixiu@iet.cn;
- 
- 刘启斌(1979), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为太阳能热化学燃料转化、分布式能源系统, qibinliu@iet.cn;
- 
- 隋军(1973), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为多能源互补的分布式能源系统, suijun@iet.cn。
- (责任编辑 尚彩娟)