

考虑生命周期碳排放的综合能源系统容量配置优化

高月芬,孔凡鹏,员成博,黄丽壮

(华北电力大学 能源动力与机械工程学院,河北 保定 071003)

摘要:耦合多种能源与设备的综合能源系统供能灵活、能源利用率高,有利于国家能源结构低碳清洁转型。本文从生命周期角度对综合能源系统进行优化,更有助于双碳目标的实现。首先对综合能源系统所使用能源和设备生命周期碳排放进行计算,而后建立含碳交易成本在内的双层优化模型对综合能源系统的容量配置与调度运行进行优化。设立3种场景对综合能源系统与传统供能系统的经济性与碳排放进行分析。结果表明:综合能源系统较传统能源系统具有良好的低碳性与经济性;能源消耗是综合能源系统生命周期碳排放的主体,其中20%以上来自上游各类电厂的间接排放,系统设备带来的碳排放仅有1%左右;综合能源系统优化中考虑生命周期碳排放可以起到减碳的作用,但结合当前的电价、燃气价格及碳交易价格并不占经济优势。

关键词:综合能源系统;生命周期碳排放;多目标优化;容量配置;孔雀算法

中图分类号:TK01+9

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.mdlgc.2024.09.009

[引用本文格式]高月芬,孔凡鹏,员成博,等.考虑生命周期碳排放的综合能源系统容量配置优化[J].热能动力工程,2024,39(9):71-79. GAO Yuefen, KONG Fanpeng, YUAN Chengbo, et al. Optimization of capacity allocation of integrated energy system considering life cycle carbon emissions[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(9): 71-79.

Optimization of Capacity Allocation of Integrated Energy System Considering Life Cycle Carbon Emissions

GAO Yuefen, KONG Fanpeng, YUAN Chengbo, HUANG Lizhuang

(School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding, China, Post Code: 071003)

Abstract: The integrated energy system (IES) coupling multiple energy sources and equipment has a flexible energy supply and a high energy utilization rate, which is conducive to the low-carbon and clean transformation of the national energy structure. In this paper, optimizing it from the perspective of the life cycle was more conducive to the realization of the dual-carbon goal. Firstly, the carbon emissions in the life cycle of energy and equipment used in the integrated energy system were calculated, and then a bi-level optimization model including carbon transaction cost was established to optimize the capacity allocation and dispatching operation of the integrated energy system. Three scenarios were set up to analyze the economy and carbon emissions of integrated energy systems and traditional energy supply systems. The results show that the integrated energy system has better low carbon and economy than the traditional energy system. Energy consumption is the main body of carbon emissions in the life cycle of an integrated energy system, of which more than 20% comes from indirect emissions of various upstream power plants, and the carbon emissions brought by system equipment are only about 1%. Considering life cycle carbon e-

收稿日期:2023-10-31; 修订日期:2023-12-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(5226007)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (5226007)

作者简介:高月芬(1971-),女,华北电力大学副教授。

missions in the optimization of integrated energy system can reduce carbon, but it does not occupy an economic advantage by combining the current electricity price, gas price and carbon trading price.

Key words: integrated energy system, life cycle carbon emissions, multi-objective optimization, capacity allocation, peacock algorithm

引言

工业化的急速发展推动了社会进步,但也造成温室气体的大量排放,为解决温室效应逐渐加重的全球性问题,我国于2020年正式提出“2030年碳达峰·2060年碳中和”的目标^[1]。目前我国各行业中,电力行业的碳排放占到总量的40%^[2],拥有巨大的减排空间。电力行业碳排放的主要来源之一是化石燃料的燃烧。风、光等可再生能源发电技术的发展有利于减少电力行业碳排放,是实现未来能源结构低碳转型的主要手段之一^[3]。储能、电转氢、碳捕集等技术的进步也为综合能源系统的低碳化发展提供了更多的可能。文献[4]基于转型、改造等多个维度探索了煤电低碳化发展,得出燃煤机组的智能运行控制及碳捕集的运用有利于电厂低碳发展的结论。文献[5]搭建了分别以燃气轮机与固体燃料电池为驱动的分布式综合能源系统,研究表明,固体燃料电池的低碳性更佳,但可持续性较差。

相较传统供能系统,综合能源系统(Integrated Energy System, IES)能够将一定区域内含天然气、风、光等在内的多种能源整合,且各种设备的耦合能够做到对能源的梯级利用,使得其供能更为灵活,更具有经济性^[6]。碳交易市场机制将碳排放量作为一种可在市场上自由流通的货物。文献[7]考虑了碳交易、电制氢等多种减排手段,建立考虑中长期碳减排约束的多阶段动态规划模型,对区域综合能源系统经济性、碳排放和设备配置三方面进行了分析。文献[8]建立耦合风光燃储的冷热电联供系统,并对系统经济性与环境效益进行了优化,得出风光燃储具有良好的可再生能源消纳能力,并对光伏价格与碳交易价格间的关系进行了分析。文献[9]提出一种基于双层主-从博弈的多主体运行策略,并引入阶梯型碳交易和综合需求响应限制碳排放量,实现了综合能源系统的低碳、经济运行。

上述文献对综合能源系统的经济性与环保性等做出了分析,且表明引入碳交易市场机制可以起到

激励减排的作用,使得综合能源系统在进行经济性优化的同时保障其低碳性。综合能源系统大多以冷热电联供系统(Combined Cooling Heating and Power, CCHP)为基础,目前众多文献大多仅考虑运行过程的直接碳排放,对综合能源系统生命周期其他阶段碳排放的研究较少。文献[10]虽然对综合能源系统能源链的生命周期碳排放进行了计算,但仍未考虑系统设备的碳排放。此外,对IES设备进行合理的规划配置,一方面有利于提升系统经济性;另一方面可以避免容量冗余及设备效率低下的问题^[11]。

本文构建了以CCHP系统为基础的综合能源系统,建立双层模型对综合能源系统进行容量与调度优化,采用生命周期评价法对综合能源系统所用能源及设备的生命周期碳排放进行了计算,将综合能源系统与传统供能系统的经济性与低碳性进行了对比,分析了考虑生命周期碳排放对综合能源系统设备容量及调度优化的影响。

1 IES 供能结构

综合能源系统所含设备较多,包括能源生产设备、能源转换设备等,能量流动较为复杂。IES供能结构和能量流框架如图1所示。

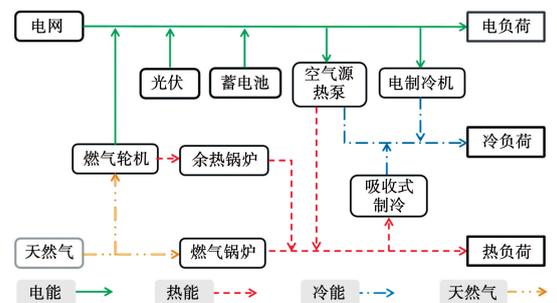


图1 IES 供能结构和能量流框架图

Fig. 1 IES energy supply structure and energy flow frame diagram

综合能源系统中用户电负荷由燃气轮机、光伏发电机组及电网购电满足。燃气轮机、余热锅炉、吸收式制冷机构成冷热电联供系统,产电余热梯级利

用以满足用户侧冷热负荷。空气源热泵全年分不同工况运行,供暖季及过渡季提供热量,满足用户热负荷,供冷季提供冷量满足用户冷负荷。燃气锅炉、电制冷机组为辅助供能设备。设备数学模型参考文献[12]。

2 生命周期碳排放计算

生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)是以能量与物质守恒为基础,对产品从“摇篮”至“坟墓”间各阶段造成的环境影响进行综合分析的理论。本文仅对综合能源系统的碳排放进行计算。综合能源系统生命周期碳排放分为能源与设备两部分,其中设备仅指代系统中的燃气轮机、电制冷机组、光伏机组等分布式设备,对于各类电厂内其他设备的碳排放均将其折算至能源碳排放中。

2.1 能源生命周期碳排放

目前我国存在各类发电方式的电厂,其生命周期都大致可分为原材料生产加工、建设、运输、维护、运行、拆除等阶段。除火电厂外其他电厂在运行阶段的碳排放通常视为零。各类电厂设备生产阶段碳排放主要来自钢、铝、铜、铁等金属和水泥、砂浆等材料的获取及加工。火电厂则需考虑煤炭开采等过程的碳排放。各类电厂不同阶段的碳排放根据其发电量及寿命情况转换为每发一度电造成的碳排放,即碳排放系数。各发电厂不同阶段的碳排放系数如表1所示^[13-21]。

表1 电厂生命周期各阶段碳排放因子(g/(kW·h))

Tab. 1 Carbon emission factors in each stage of life cycle of power plants (g/(kW·h))

阶段	火电	光电		风电	水电	核电
		多晶	单晶			
原材料及设备生产	112.30	58.62	72.07	23.97	3.10	3.67
电厂建设	1.94	18.64	-	4.31	0.42	2.41
运输	8.14	0.017	-	0.015	-	-
维护	83.3	14.18	0.57	1.42	9.95	5.72
拆除回收	0.19	6.24	8.36	1.45	1.34	-
总计	114.43	72.42	81.00	31.15	14.77	11.81

根据国家发改委最新发布数据,华东地区火力发电碳排放因子为792.1 g/(kW·h)。图2为华东

地区2022年发电量数据,其中火力发电占总发电量比例为72.6%,华东地区的电网碳排放因子为575.1 g/(kW·h)。结合表1数据加权可得,华东地区电网的LCA碳排放因子为674.01 g/(kW·h)(由于电厂的光伏板材料多为多晶硅,故这里计算时取值为72.42 g/(kW·h))。

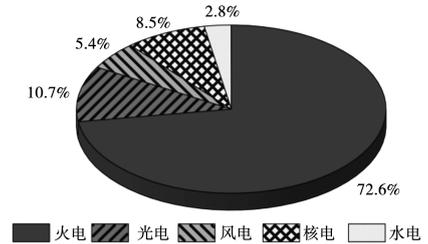


图2 华东地区发电量占比情况

Fig. 2 Proportion of power generation in East China

天然气的生命周期碳排放核算包括天然气开采、管道建设、天然气输送、发电阶段^[22]。根据《中国能源统计年鉴2018》与《2006 IPCC》的燃料数据,取天然气热值为38 931 kJ/m³,单位热值含碳量15.32 t/TJ,碳氧化率为100%,此时天然气的碳排放因子为2.16 kg/m³,开采阶段碳排放系数为0.50 kg/m³,管道建设及输送阶段的碳排放系数为0.47 kg/m³^[13],故天然气的LCA碳排放系数为3.13 kg/m³。

2.2 设备LCA碳排放

设备生命周期包含原材料开采加工、设备运输、维护、运行、废弃回收阶段,运输与维护阶段碳排放可忽略不计,设备运行阶段的碳排放主要由外购电力或天然气消耗产生的直接碳排放,故设备运行阶段的碳排在核算过程中视为零。设备耗材主要为各种金属材料,在设备废弃后,材料大部分仍可回收利用,回收率取85%^[23],PVC等进行填埋处理。

表2为综合能源系统设备部分耗材的碳排放因子^[24]。表3为设备单位容量主要耗材与生产耗电情况^[25-26]。

表2 材料碳排放因子(g/kg)

Tab. 2 Carbon emission factor of materials (g/kg)

参数名称	钢	铝	铜	铁	玻璃	PVC
碳排放因子	2 000	25 800	1 900	1 360	132	247

表3 设备单位容量的耗材(kg/kW)及生产耗电(kW·h/kW)
Tab.3 Consumables per unit capacity of equipment (kg/kW)
and production power consumption (kW·h/kW)

设备	钢	铝	铜	PVC	生产耗电
燃气轮机	9.82	-	-	-	6.36
余热锅炉	1.90	-	-	-	1.20
吸收式制冷	18.36	-	-	-	11.89
空气源热泵	30.40	-	7.73	2.30	28.22
电制冷	4.08	0.04	1.02	2.04	4.65
燃气锅炉	1.50	0.04	-	-	1.00

对于热泵与电制冷机组,其制冷剂在运行过程中会因泄漏而产生碳排放,应将此部分也计算在内,表达式如下^[27]:

$$E_R = m_R \text{GWP}(1 + L \cdot N) \quad (1)$$

式中: E_R —制冷剂泄漏造成的碳排放量,kg; m_R —制冷剂首次充注量,kg;GWP—制冷剂的全球变暖潜值; L —机组设计使用寿命,a; N —制冷剂年泄漏率,%。

3 IES 容量配置优化模型

本文构建双层模型对综合能源系统的容量进行优化,上层对设备容量进行选取,下层进行定容优化。

3.1 上层模型

上层以 IES 年化成本与碳排放量最低为目标,表达式如下:

$$\begin{cases} \min F = F_{\text{open}} + F_{\text{main}} + F_{\text{opera}} \\ \min E = E_{\text{opera}} + E_{\text{upenergy}} + E_{\text{equip}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: F —年化总成本,元/a; F_{open} —年化初投资成本,元/a; F_{main} —年化运维成本,元/a; F_{opera} —年化运行成本,元/a; E —年化生命周期碳排放量,kg/a; E_{opera} —一年能源消耗直接碳排放,kg/a; E_{upenergy} —一年能源消耗的间接碳排放,kg/a; E_{equip} —年化设备碳排放,kg/a。

初投资成本:

$$F_{\text{open}} = \sum_{i=1}^I P_i F_i k_i \quad (3)$$

$$k_i = \frac{r(1+r)^{L_i}}{(1+r)^{L_i} - 1} \quad (4)$$

式中: I —设备种类数; P_i —设备*i*的额定功率,kW;

F_i —设备*i*的单位投资成本,元/kW; k_i —设备*i*的年化系数; r —贴现率,%; L_i —设备*i*的设计使用寿命,a。

运维成本^[28]:

$$F_{\text{main}} = F_{\text{open}} c \quad (5)$$

式中: c —运维成本系数,%。

能源直接碳排放:

$$E_{\text{opera}} = \sum_{t=1}^T E_{\text{opera},t} = \sum_{t=1}^T (\gamma_{\text{gas}} V_{\text{gas},t} + \gamma_{\text{grid}} P_{\text{grid},t}) \quad (6)$$

式中: T —调度周期; $E_{\text{opera},t}$ — t 时刻系统直接碳排放量,kg; $V_{\text{gas},t}$ — t 时刻系统购燃气量, m^3 ; $P_{\text{grid},t}$ — t 时刻购电功率, $\text{kW}\cdot\text{h}$; γ_{gas} —天然气碳排放因子,kg/ m^3 ; γ_{grid} —电网电力碳排放因子,kg/($\text{kW}\cdot\text{h}$)。

能源间接碳排放:

$$E_{\text{upenergy}} = \sum_{t=1}^T (\gamma_{\text{up,gas}} V_{\text{gas},t} + \gamma_{\text{up,grid}} P_{\text{grid},t}) \quad (7)$$

式中: $\gamma_{\text{up,gas}}$ —天然气上游碳排放因子,kg/ m^3 ; $\gamma_{\text{up,grid}}$ —电网上游碳排放因子,kg/($\text{kW}\cdot\text{h}$)。

设备碳排放:

$$E_{\text{equip}} = \sum_{i=1}^I \gamma_{\text{equip},i} P_i \quad (8)$$

式中: $\gamma_{\text{equip},i}$ —设备*i*的碳排放因子,kg/kW。

3.2 下层模型

3.2.1 下层目标函数

下层模型以运行成本最低为目标,包括购能成本与碳交易成本,表达式如下:

$$\min F_{\text{opera}} = \sum_{t=1}^T (F_{\text{energy},t} + F_{\text{car},t}) \quad (9)$$

式中: $F_{\text{energy},t}$ — t 时刻系统购能成本,元; $F_{\text{car},t}$ — t 时刻系统碳交易成本,元。

运行能耗成本:

$$F_{\text{energy},t} = F_{\text{grid},t} P_{\text{grid},t} + F_{\text{gas}} V_{\text{gas},t} \quad (10)$$

式中: $F_{\text{grid},t}$ — t 时刻单位购电成本,元/($\text{kW}\cdot\text{h}$); F_{gas} —单位购气成本,取2.38元/ m^3 。

碳交易成本:

$$F_{\text{car},t} = d_{\text{car}} (E_{\text{opera},t} - E_{q,t}) \quad (11)$$

式中: $E_{q,t}$ — t 时刻系统碳配额,kg; d_{car} —碳交易价格,取0.07元/kg。

系统碳配额量可表示为:

$$E_{q,t} = E_{\text{grid},t} + E_{\text{cchp},t} \quad (12)$$

$$E_{grid,t} = \lambda_{grid} P_{grid,t} \quad (13)$$

$$E_{cchp,t} = \lambda_e P_{GT,t} + \lambda_h P_{out,t} \quad (14)$$

式中: $E_{grid,t}$ — t 时刻电网购电碳配额, kg; $E_{cchp,t}$ —CCHP 系统 t 时刻碳配额, kg; λ_{grid} —单位购电碳配额系数, kg/(kW·h); $P_{GT,t}$ —CCHP 系统 t 时刻产电功率, kW·h; $P_{out,t}$ —CCHP 系统 t 时刻热功率, MJ; λ_e —燃气机组单位产电碳配额系数, kg/(kW·h); λ_h —燃气机组单位产热碳配额系数, kg/MJ。

3.2.2 约束条件

系统约束包含冷、热、电负荷与设备出力间的平衡约束、设备运行上下限约束。

负荷平衡约束:

$$Q_{ele,t} = P_{GT,t} + P_{pv,t} + P_{grid,t} - P_{sale,t} - P_{AP,t} - P_{EC,t} \quad (15)$$

$$Q_{heat,t} = P_{GB,t} + P_{HR,t} + \varepsilon P_{AP,t} \quad (16)$$

$$Q_{cool,t} = P_{AC,t} + P_{EC,t} + (1 - \varepsilon) P_{AP,t} \quad (17)$$

式中: $Q_{ele,t}$ 、 $Q_{heat,t}$ 、 $Q_{cool,t}$ — t 时刻用户电负荷、热负荷、冷负荷, kW·h; $P_{pv,t}$ — t 时刻光伏机组产电功率, kW·h; $P_{sale,t}$ — t 时刻系统售电功率, kW·h; $P_{AP,t}$ 、 $P_{EC,t}$ — t 时刻空气源热泵、电制冷机组耗电功率, kW·h; $P_{GB,t}$ 、 $P_{RB,t}$ 、 $P_{AP,t}$ — t 时刻燃气锅炉、余热锅炉、空气源热泵热功率, kW·h; $P_{AC,t}$ 、 $P_{EC,t}$ 、 $P_{AP,t}$ — t 时刻吸收式制冷机组、电制冷机组、空气源热泵冷功率, kW·h; $\varepsilon=0 \sim 1$ 变量, 描述空气源热泵 t 时刻的运行工况。

设备约束:

$$P_{i,min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,max} \quad (18)$$

式中: $P_{i,max}$ 、 $P_{i,min}$ —设备 i 运行功率上、下限, kW。

3.3 模型求解

基于 MATLAB 平台进行优化, 上层采取蚁群遗传算法^[29], 蚁群算法适用于路径类寻优问题的求解, 而结合遗传算法可以避免蚁群算法迭代后期陷入局部最优解的问题。蚁群算法的优化过程体现在信息要素的更新迭代中, 其多目标更新策略表达式如下^[30]:

$$\Delta\tau_{l,m,\dots,n}(q, q+1) = \sum_{a=0}^A \Delta\tau_{l,m,\dots,n}^U(q, q+1) \cdot \frac{(A-a)}{A} + \sum_{a=0}^A \Delta\tau_{l,m,\dots,n}^V(q, q+1) \cdot \frac{(A-a)}{A} \quad (19)$$

式中: $\Delta\tau_{l,m,\dots,n}^U(q, q+1)$ 和 $\Delta\tau_{l,m,\dots,n}^V(q, q+1)$ 表达式为:

$$\Delta\tau_{l,m,\dots,n}^{UV}(q, q+1) = \begin{cases} \frac{H_1/H_2}{u/v}, & \{l, m, \dots, n\} \subset S_q \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (20)$$

式中: l, m, \dots, n — i 种设备的型号组合; S_q — q 次迭代精英种群; A —精英种群个数; a —精英序号; U, V —不同目标; u, v —目标值; H_1, H_2 —常数。

下层采取孔雀算法^[31], 其可以较好地平衡局部探索与全局搜索, 有效获得高质量解。

4 案例分析

4.1 基础数据

以浙江某园区为例进行数据仿真。光伏发电机组最大可安装面积按屋面可用面积的 70% 进行计算^[32]。表 4 为能源价格, 表 5 为设备参数^[33]。

表 4 能源价格 (元/(kW·h))

Tab. 4 Energy price (yuan/(kW·h))

时段	时刻	购电	售电
低谷	00:00—08:00	0.381 1	0.497 7
	11:00—13:00	0.381 1	0.497 7
	22:00—00:00	0.381 1	0.497 7
平段	08:00—11:00	0.960 1	0.497 7
	13:00—19:00	0.960 1	0.497 7
	21:00—22:00	0.960 1	0.497 7
高峰	19:00—21:00	1.29	0.497 7

表 5 IES 系统设备参数

Tab. 5 IES system equipment parameters

设备	单位投资成本	效率	寿命/a
微型燃气轮机	6 800 元·kW ⁻¹	-	20
余热锅炉	150 元·kW ⁻¹	0.85	20
吸收式制冷机	1 200 元·kW ⁻¹	1.2	20
空气源热泵	3 000 元·kW ⁻¹	热能 4/冷能 5	15
电制冷	1 100 元·kW ⁻¹	3	15
燃气锅炉	500 元·kW ⁻¹	0.9	20
光伏机组(单晶硅)	957/元·m ⁻²		25

注:“-”无法用确定值表示。

4.2 容量配置结果及优化调度分析

设置 3 种场景对综合能源系统与传统供能系统进行分析。场景 1: 传统供能系统, 由燃气锅炉供应用户侧热负荷, 电制冷机组供应冷负荷, 电网电力供应电负荷。场景 2: 综合能源系统。采用双层模型对设备容量和运行调度进行优化, 上层目标仅含综合经济成本。场景 3: 在场景 2 基础上考虑生命周期碳排放, 采用双层多目标模型对系统设备容量和运行调度进行优化。

表6为3种场景下的设备容量配置选型结果。图3为场景2夏季典型日设备出力与电、冷负荷的平衡结果。

表6 设备容量配置选型结果

Tab.6 Results of equipment capacity allocation selection

设备	场景1	场景2	场景3
光伏机组/m ²	-	6 685	6 685
燃气锅炉/kW	6 500	1 500	-
燃气轮机/kW	-	2 400	1 600
换热器/kW	-	4 200	2 800
吸收式制冷机/kW	-	6 800	3 300
空气源热泵/kW	-	1 700	2 800
电制冷机/kW	7 000	1 800	1 100

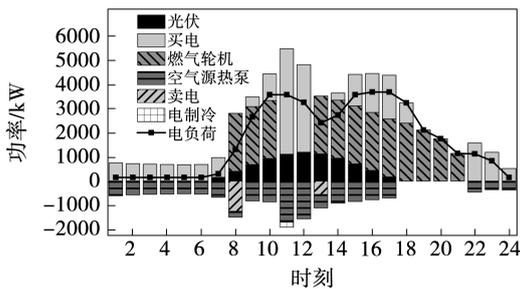
较空气源热泵更低。故系统选择燃气轮机最大出力,并将多余电力出售,获得部分收益。

表7为天然气与电网单位产能碳排放量对比。从表7可以看出,随着运行负载的变化,CCHP系统单位产能碳排放也有所变化。在不考虑生命周期碳排放的情况下,尽管CCHP系统单位产电碳排放强度较高,但在产热制冷方面,其碳排放强度都相对电网更低。综合来说,CCHP系统容量提升有助于减少运行阶段碳排放。当考虑生命周期碳排放后,CCHP系统与燃气锅炉的产能碳排放强度大多高于电网,燃气锅炉的单位制冷碳排放甚至可达电网单位制冷碳排放的2.86倍。结合表6,由于天然气生命周期单位产能碳排放较高,故场景3所对应系统不再配置燃气锅炉,燃气轮机等机组的容量也有所下降,以减少系统生命周期碳排放。燃气产能减少的部分则由电网电力进行补充。

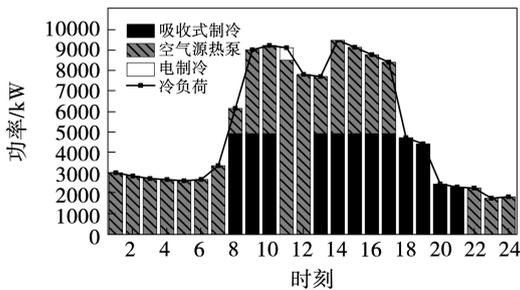
表7 天然气与电网单位产能碳排放量(g/(kW·h))

Tab.7 Carbon emissions per unit production of natural gas and power grid (g/(kW·h))

产能类型	电网	CCHP	燃气锅炉
产电(仅运行)	575.10	666.37 ~ 994.06	-
产电(LCA)	674.01	969.67 ~ 1454.51	-
产热(仅运行)	143.78	116.73 ~ 142.68	245.37
产热(LCA)	168.50	169.86 ~ 207.78	355.57
热泵制冷(仅运行)	115.02	94.51 ~ 116.12	204.45
电制冷	191.70	131.94 ~ 151.52	
热泵制冷(LCA)	134.80	137.56 ~ 169.91	296.31
电制冷	224.67	192.99 ~ 220.67	



(a) 设备出力与电负荷



(b) 设备出力与冷负荷

图3 场景2设备出力与负荷平衡结果

Fig.3 Equipment output and load balance results in scenario 2

由图3可知,在电价低谷时段(22:00 - 次日8:00及11:00 - 13:00),系统电负荷由电网电力供应。其余时段燃气产电成本更低,系统将优先选用微型燃气轮机供应电负荷。在白天,光伏机组产电满足部分电负荷。制冷方面,系统优先将燃气轮机余热再利用,通过吸收式制冷机组转换为冷量供给冷负荷。冷负荷缺额由能效比更高的空气源热泵优先供应,仍不足则由电制冷机组补充。同时可以看到,在8:00与13:00,系统有大量电力出售,这是由于该时刻冷负荷较高,而CCHP系统单位制冷成本

4.3 经济性分析

表8为3种场景下的各项年化成本与碳排放量情况。可以看出,场景1虽然初投资成本较低,但由于供能单一,能源利用率较低,运行过程中需从外部购买大量电力,使得运行成本较高且伴随着大量的碳排放。场景2多种设备、能源耦合的供能方式提高了系统规划和运行的灵活性。经济性方面,尽管初始投资成本有所增长,但CCHP系统及热泵的高效用能方式使得场景2的运行成本相比场景1下降了50.96%,总成本降低34.22%。环境方面,场景2的运行碳排放量也显著下降,降低22.89%。由此可得,综合能源系统较传统供能系统更具有经济性与低碳性。

表8 不同场景年化数据

Tab. 8 Annualized data of different scenarios

参数	场景1	场景2	场景3
初投资成本/万元·a ⁻¹	112.90	368.13	297.64
运维成本/万元·a ⁻¹	3.38	11.04	8.92
运行成本/万元·a ⁻¹	1 808.32	886.85	987.66
购电量/万 kW·h·a ⁻¹	2 049.24	511.15	813.84
购燃气量/万 m ³ ·a ⁻¹	267.32	320.15	198.74
碳排放量/t·a ⁻¹	12 795.93	9 867.49	8 984.57

场景3采用多目标优化的方法,在优化过程考虑了生命周期碳排放。结果显示,在考虑生命周期碳排放后,燃气设备容量减少使得系统购电量增加,场景3年购电量为813.84万kW·h,较场景2增加59.2%,而年购燃气量则减少37.9%。场景2与场景3的光伏机组容量相同,均为最大可安装面积。经济性方面,场景3年化初投资成本较场景2减少19.1%,但年运行成本增长9.1%,运行阶段碳排放则减少8.9%。结果表明,在考虑生命周期碳排放后,系统为保证低碳性从而牺牲了部分经济性。

4.4 生命周期碳排放分析

图4为3种场景生命周期碳排放量对比。可以看出,在供能系统的生命周期中,设备的碳排放占比很小,在3个场景中均仅有1%左右,其生命周期碳排放的主要来源为运行过程中由能源消耗而产生的碳排放,其30%以上来自上游施工建设、运输、维护等阶段。场景2中,能源消耗的直接碳排放与上游间接碳排放在其生命周期中的占比分别为65.7%,33.23%。场景3对系统设备容量与运行调度进行优化调整后,年化生命周期碳排放则减少1 758.86 t,较场景2减少11.54%,其中能源消耗的直接碳排放减少了28.19%。

进一步分析,在场景2、场景3中,分布式光伏发电机组为单晶硅材质,其碳排放量为153.3 t,占设备碳排放的95%左右,相较于其他设备,光伏发电机组在生产过程会有较大的碳排放。但光伏机组全年产电约为190万kW·h,将其换算为电网购电,则相当于减少全生命周期碳排放约1 280.6 t,年净减排1 127.3 t。

运行过程中由能源消耗产生的碳排放与设备运行效率及电网中清洁能源的比例有关,随着设备技术的发展和清洁能源的并网量的增加可进一步减少

碳排放。假设原材料开采加工阶段碳排放中有30%由耗电产生,当电网碳排放因子由575 g/(kW·h)降为400 g/(kW·h),则场景2的生命周期碳排放量将为12 238.27 t/a,较目前减少10%左右。实际上,这个值可能会更多,如在光伏机组的生产加工过程中,仅硅原料的处理加工耗电产生的碳排放就占到90%以上^[10]。

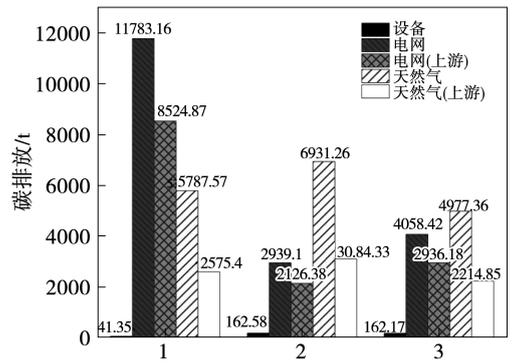


图4 不同场景生命周期碳排放源的分布比例

Fig. 4 Distribution proportion of life cycle carbon emission sources in different scenarios

场景3较场景2年化总成本增加了28.2万元左右,而减少的碳排放以目前碳交易价格进行折算,仅相当于12.3万元。结合当前的电价、气价及碳交易价格,天然气产能更具有经济优势,但其生命周期碳排放强度较高,因此目前综合能源系统优化中考虑生命周期碳排放并不占优势。

5 结论

(1) 综合能源系统较传统供能系统供能灵活,能源利用效率高,不论是经济性还是低碳性前者都更优于后者。

(2) 在综合能源系统生命周期中,以能源消耗而产生的碳排放为主要碳排放源,设备碳排放占比很小,仅有1%左右。来自上游的间接碳排放占20%以上,原材料的开采加工阶段是这部分碳排放的主要来源,其余阶段相对较少。

(3) 从生命周期角度考虑,天然气单位产能碳排放较电网更高,燃气机组容量的减少有利于降低综合能源系统的生命周期碳排放。但以目前碳交易价格来说,在综合能源系统的优化中引入生命周期碳排放并不占优势。

参考文献:

- [1] 王一鸣. 中国碳达峰碳中和目标下的绿色低碳转型: 战略与路径[J]. 全球化, 2021(6): 5-18, 133.
WANG Yiming. Green and low-carbon transition under the China's carbon peak and neutrality goals: Strategy and path[J]. Globalization, 2021(6): 5-18, 133.
- [2] 张继钢, 万正东, 吴良峥, 等. 碳市场视角下的中国电力行业转型研究——以某省级区域电网为例[J]. 建筑经济, 2023, 44(S1): 31-34.
ZHANG Jigang, WAN Zhengdong, WU Liangzheng, et al. Research on the transformation of China's power industry from the perspective of carbon market: Taking a provincial regional power grid as an example[J]. Construction Economy, 2023, 44(S1): 31-34.
- [3] 郝鑫, 孔英. 碳中和目标下电力部门低碳转型路径分析[J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(1): 179-182.
HAO Xin, KONG Ying. Analysis of the low-carbon transformation path of the power sector under the target of carbon neutral[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2022, 40(1): 179-182.
- [4] 孙月巧, 郑宏飞, 孔慧. 碳中和背景下煤电转型关键技术研究及展望[J]. 动力工程学报, 2022, 42(11): 1013-1023.
SUN Yueqiao, ZHENG Hongfei, KONG Hui. Key technologies and prospects of coal power transformation under carbon neutrality background[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(11): 1013-1023.
- [5] 韩俊涛, 韩恺, 王永真, 等. 低碳分布式综合能源系统的能值、经济和环境优化评价[J]. 动力工程学报, 2022, 42(11): 1089-1098.
HAN Juntao, HAN Kai, WANG Yongzhen, et al. Energy, economic and environmental optimization evaluation of low carbon distributed integrated energy system[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(11): 1089-1098.
- [6] 廖柏睿, 吴晓南, 苏要港, 等. 综合能源系统运行优化设计与运行策略研究[J]. 热能动力工程, 2023, 38(3): 82-90.
LIAO Bairui, WU Xiaonan, SU Yaogang, et al. Research on operation optimization design and operation strategy of integrated energy system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(3): 82-90.
- [7] 王小飞, 任洪波, 吴琼, 等. 考虑中长期碳减排约束的区域综合能源系统多阶段动态规划[J]. 中国电力, 2023, 56(11): 185-196.
WANG Xiaofei, REN Hongbo, WU Qiong, et al. Multi-stage dynamic plan of regional integrated energy system considering medium and long-term carbon emission reduction[J]. Electric Power, 2023, 56(11): 185-196.
- [8] 韩旭, 周峻毅, 李奇, 等. 计及碳排放成本的风光燃储综合能源系统规划[J]. 动力工程学报, 2022, 42(9): 873-880.
HAN Xu, ZHOU Junyi, LI Qi, et al. Study on optimization of wind, solar, fuel and storage integrated energy system taking into account the cost of carbon emissions[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(9): 873-880.
- [9] 田福银, 马骏, 王灿, 等. 基于双层主从博弈的综合能源系统多主体低碳经济运行策略[J]. 中国电力, 2022, 55(11): 184-193.
TIAN Fuyin, MA Jun, WANG can, et al. Multi-agent low-carbon and economy operation strategy of integrated energy system based on bi-level master-slave game[J]. Electric Power, 2022, 55(11): 184-193.
- [10] 王泽森, 石岩, 唐艳梅, 等. 考虑LCA能源链与碳交易机制的综合能源系统低碳经济运行及能效分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(6): 1614-1626, 1858.
WANG Zesen, SHI Yan, TANG Yanmei, et al. Low carbon economy operation and energy efficiency analysis of integrated energy systems considering LCA energy chain and carbon trading mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(6): 1614-1626, 1858.
- [11] 李国堂, 宋福浩, 陈杰, 等. 考虑碳排放的综合能源系统“结构-型号-容量”优化模型[J]. 电力建设, 2022, 43(7): 37-47.
LI Guotang, SONG Fuhao, CHEN Jie, et al. Structure-model-capacity optimization model of integrated energy system considering carbon emissions[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(7): 37-47.
- [12] 苟会永. 含光伏及储能的综合能源系统设备容量与运行优化[D]. 长沙: 湖南大学, 2021.
GOU Huiyong. The capacity and operation optimization of integrated energy system including photovoltaic and energy storage[D]. Changsha: Hunan University, 2021.
- [13] 樊金璐, 吴立新, 任世华. 碳减排约束下的燃煤发电与天然气发电成本比较研究[J]. 中国煤炭, 2016, 42(12): 14-17, 23.
FAN Jinlu, WU Lixin, REN Shihua. Comparative study of cost in coal-fired power and natural gas power carbon emission constraint[J]. China Coal, 2016, 42(12): 14-17, 23.
- [14] 周建力. 风-光-氢综合能源系统容量配置优化及决策模型研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2022.
ZHOU Jianli. Research on capacity configuration optimization and decision-making model of wind-photovoltaic-hydrogen integrated energy system[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2022.
- [15] HOU G, SUN H, JIANG Z, et al. Life cycle assessment of grid-connected photovoltaic power generation from crystalline silicon solar modules in China[J]. Applied Energy, 2016, 164: 882-890.
- [16] 姜子英, 潘自强, 邢江, 等. 中国核电源链的生命周期温

- 室气体排放研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(11): 3502-3510.
- JIANG Ziyang, PAN Ziqiang, XING Jiang, et al. Greenhouse gas emissions from nuclear power chain life cycle in China[J]. China Environmental Science, 2015, 35(11): 3502-3510.
- [17] LI H, JIANG H, DONG K, et al. A comparative analysis of the life cycle environmental emissions from wind and coal power: Evidence from China[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 248: 119192. 1-119192. 13.
- [18] 李新航. 基于全生命周期的风电系统碳排放核算与分析[J]. 环境保护与循环经济, 2021, 41(6): 5-8, 45.
- LI Xinhang. Carbon emission accounting and analysis of wind power system based on life cycle[J]. Environmental Protection and Circular Economy, 2021, 41(6): 5-8, 45.
- [19] 翁琳, 陈剑波. 光伏系统基于全生命周期碳排放量计算的环境与经济效益分析[J]. 上海理工大学学报, 2017, 39(3): 282-288.
- WENG Lin, CHEN Jianbo. Environmental and economic analysis on the carbon dioxide emissions calculation in the life cycle of a photovoltaic system[J]. Journal of University of Shanghai for Science and Technology, 2017, 39(3): 282-288.
- [20] 赵若楠, 董莉, 白璐, 等. 光伏行业生命周期碳排放清单分析[J]. 中国环境科学, 2020, 40(6): 2751-2757.
- ZHAO Ruonan, DONG Li, BAI Lu, et al. Inventory analysis on carbon emissions of photovoltaic industry[J]. China Environmental Science, 2020, 40(6): 2751-2757.
- [21] 李雨晨. 长江上游大中型水利水电工程全生命周期碳足迹核算[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.
- LI Yuchen. Carbon footprint accounting of the life cycle of large and medium-sized hydropower projects in the upper Yangtze River [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022.
- [22] CUI Y, SUN R, ZHAO Y, et al. Carbon emission accounting study on entire life cycle of coal-made gas[J]. Resources & Industries, 2018, 20(6): 52-60.
- [23] 姚均天. 基于LCA的分布式供能系统的评价研究[D]. 上海: 上海电力学院, 2011.
- YAO Juntian. Research on evaluation of distributed energy supply system based on LCA[D]. Shanghai: Shanghai University of Electric Power, 2011.
- [24] JING Y, BAI H, WANG J, et al. Life cycle assessment of a solar combined cooling heating and power system in different operation strategies[J]. Applied Energy, 2012, 92843-92853.
- [25] WANG J, YANG Y, MAO T, et al. Life cycle assessment (LCA) optimization of solar-assisted hybrid CCHP system[J]. Applied Energy, 2015, 146: 14638-14652.
- [26] GABRIEL N, ELKE S, MATTHIAS G. Life cycle assessment of an air-source heat pump and a condensing gas boiler using an attributional and a consequential approach[J]. Procedia CIRP, 2022, 105: 105351-105356.
- [27] 周能, 丁汉新, 苏秀平, 等. 冷水(热泵)机组的运行阶段碳排放研究[J]. 制冷与空调, 2022, 22(3): 93-97, 102.
- ZHOU Neng, DING Hanxin, SU Xiuping, et al. Research on carbon emission of heat pump chiller[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2022, 22(3): 93-97, 102.
- [28] 郭宇航. 含热泵的热电联产型微电网最优容量配置与经济运行研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2015.
- GUO Yuhang. Optimal models of capacity planning and system operation for CHP microgrids incorporating heat pumps [D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [29] 圣文顺, 徐爱萍, 徐刘晶. 基于蚁群算法与遗传算法的TSP路径规划仿真[J]. 计算机仿真, 2022, 39(12): 398-402, 412.
- SHENG Wenshun, XU Aiping, XU Liujing. Simulation of traveling salesman path planning based on ant colony algorithm and genetic algorithm [J]. Computer Simulation, 2022, 39(12): 398-402, 412.
- [30] 胡春磊, 章飞, 曾庆军. 基于多目标蚁群策略的AUV全局路径规划算法[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(11): 107-109, 113.
- HU Chunlei, ZHANG Fei, ZENG Qingjun. Global path planning algorithm for AUV based on multi-objective ant colony strategy [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(11): 107-109, 113.
- [31] WANG J, YANG B, CHEN Y, et al. Novel phasianidae inspired peafowl (Pavo muticus/cristatus) optimization algorithm: Design, evaluation, and SOFC models parameter estimation[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 50: 101825.
- [32] DOU C, 左冲, 贾彦, 等. 中国农村民居屋顶分布式光伏发电的发展潜力分析[J]. 太阳能, 2023(1): 5-16.
- DOU C, ZUO Chong, JIA Yan, et al. Analysis on development potential of rooftop distributed PV power generation of rural residential dwellings in China[J]. Solar Energy, 2023(1): 5-16.
- [33] 唐沂媛. 冷热电联供/综合能源系统的规划研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
- TANG Yiyuan. Study on planning of combined cooling, heating and power system/integrated energy system [D]. Nanjing: Southeast University, 2016.

(姜雪梅 编辑)