

基于全生命周期评价的冷热电联供系统优化研究

许小刚^{1,2}, 嵇晓鹏^{1,2}, 王惠杰^{1,2}

(1. 华北电力大学动力工程系, 保定 071003; 2. 河北省低碳高效发电技术重点实验室, 保定 071003)

摘要: 天然气与太阳能互补是提高能源利用率和实现节能减排的有效方法, 该文构建一种光-气-储互补的冷热电联供(CCHP)系统。基于全生命周期理论, 以一次能源节约率、总污染物减排率为目标函数, 建立冷热电联供系统优化模型, 应用遗传算法对系统变工况运行下的容量配置进行优化; 将物质回收阶段纳入全生命周期评价, 并在运输阶段考虑燃料运输。结果表明: 经优化后, CCHP系统电跟随(FEL)策略可实现较好的节能减排效益。分供(SP)系统在物质回收阶段对环境的影响微乎其微, CCHP系统燃料运输能耗量远低于SP系统。

关键词: 冷热电联供系统; 生命周期评估; 能源消耗; 污染物排放

中图分类号: TK019

文献标志码: A

0 引言

太阳能作为一次能源, 具有总量丰富、清洁无污染等优点, 太阳能的利用技术比较成熟, 但由于太阳能的能量密度较低, 存在波动性较大的问题, 因此不能作为单一的能量为建筑供能^[1-2]。太阳能光伏光热与天然气驱动的内燃机耦合, 可结合两者的优势, 既弥补了太阳能的不稳定性, 又降低了能源消耗与污染物的排放。冷热电联供(combined cooling, heating and power, CCHP)系统能够同时满足用户冷、热、电需求, 实现了能量梯级有效利用, 极大提高了能源利用率, 同时具有节能减排、缓解电网压力等诸多优点^[3]。因此, 耦合可再生能源的CCHP系统成为当今研究的主流。

任福康等^[4]提出一种耦合太阳能与地热能的混合冷热电联供系统, 运用多目标遗传算法对系统配置及运行策略进行寻优求解; 杜传铭等^[5]构建了光-气互补的冷热电联供系统, 采用遗传算法对驱动设备容量配置进行优化; 谢伟伟等^[6]采用全生命周期评价方法, 将泳池综合能源系统的全生命周期分为建设、使用、回收3个过程, 并利用GaBi软件计算出生命周期环境影响; Marques等^[7]对微型三联供系统进行生命周期评价, 指出对环境影响最大的设备为内燃机与蒸汽发生器; Herrando等^[8]对一个提供空间供暖、制冷、生活热水和电力的太阳能冷热电三联供系统进行“从摇篮到坟墓”生命周期评估。由此可见, 全生命周期评价与应用算法优化系统配置是当下CCHP系统研究的热点话题。

本文采用DeST软件模拟北京某办公楼逐时冷热电负荷, 基于此建筑构建一种光-气-储互补的冷热电联供系统。基于

全生命周期理论, 以分供(separated production, SP)系统为参照对象, 以一次能源节约率、总污染物减排率为优化目标, 应用遗传算法对变工况运行下的系统配置进行优化; 将物质回收阶段纳入全生命周期评价, 并在运输阶段加入燃料运输。在最优系统配置下, 求解生命周期数据清单, 进行全生命周期结构分析; 分析物质回收阶段与燃料运输对生命周期的影响, 并对系统在全生命周期内的能耗与污染物排放进行分析。

1 冷热电联供系统

1.1 系统描述

SP系统以消耗非可再生能源为用户提供冷热电能, 电负荷来自城市电网, 冷负荷来自电制冷机, 燃气锅炉提供热负荷。对于光-气-储互补的冷热电联供系统, 如图1所示, 能量来源有一次能源、太阳能、天然气。CCHP系统电负荷主要由光伏与燃气内燃机提供, 不足的从电网购买; 冷负荷主要由吸收式制冷机和电制冷机提供, 吸收式制冷机可吸收利用来自内燃机的高温烟气为系统提供冷量; 热负荷主要由太阳能集热器与热回收设备提供, 不足再由燃气锅炉供给。在系统中加入蓄热装置, 可调控系统的冷量与热量, 有多存少补的功能, 以实现系统的冷热调节。

为使太阳能得到充分利用, 提高系统的节能减排效益, CCHP系统优先利用光伏发电满足用户的电负荷, 集热器优先满足冷、热负荷。光伏发电量与太阳能集热量不足以满足电负荷与热负荷时, 则由燃气内燃机与蓄水罐分别提供, 当两者不能满足全部冷热电负荷时, 最终由电制冷机、燃气锅炉、电网分别补充剩余的冷、热、电量。

收稿日期: 2023-01-02

通信作者: 许小刚(1979—), 男, 博士, 副教授, 主要从事分布式能源系统优化方面的研究。xsg@ncepu.edu.cn

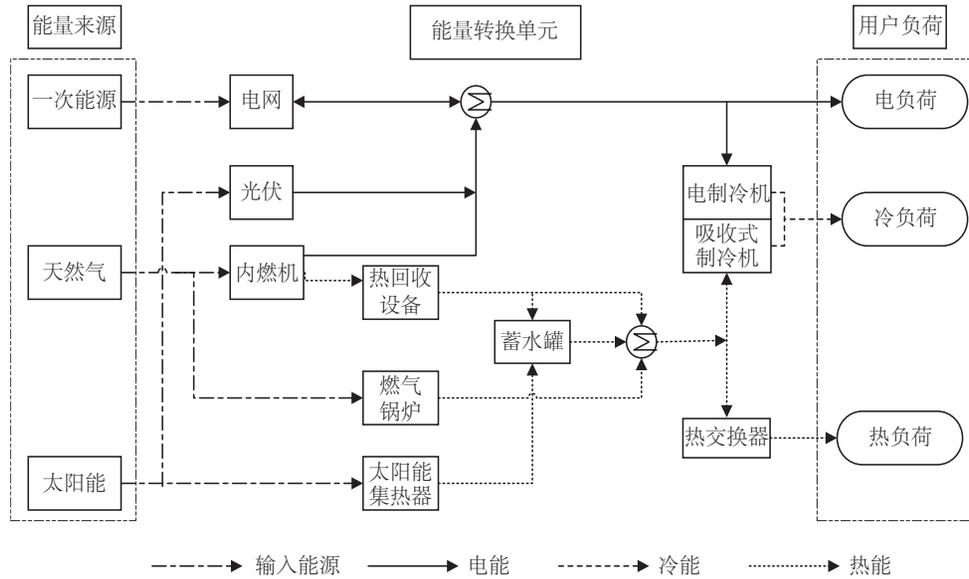


图1 光-气-储互补的冷热电联供系统能量流程图

Fig. 1 Energy flow diagram of CCHP system with complementary solar-gas-storage

1.2 系统变工况运行

由于用户逐时冷热电需求不断变化,相应要求系统设备变工况运行,以满足用户逐时的冷、热、电负荷。CCHP 系统按照电跟随(following electric load, FEL)策略运行时,系统会有多余的热量剩余;以热跟随(following thermal load, FTL)策略运行时,会剩余一定电量。当系统存在多余的电、热量时,系统的节能优势会减弱。因此,在变工况运行下,求解优化出最佳的系统配置,减少系统多余电量或热量的剩余,以实现最优的节能减排效益。

2 全生命周期理论

生命周期法是通过能量和物质的利用以及由此造成的废物排放进行辨识和量化,评估能量和物质利用以及废物排放对环境的影响^[9]。本文从原材料获取、设备制造、设备、原材料与燃料的运输、系统运行、物质回收等 5 个阶段进行研究,5 个阶段的详细介绍如 2.1 节生命周期清单。假定分供系统与联供系统设备运行寿命均为 20 a,生命周期内系统的输入为能源输入,输出包括污染物排放和用户利用后排出的热能,由于排出的热能温度不高,且不对环境造成污染,也不可重新利用,因此可忽略该部分能量。

2.1 生命周期清单

2.1.1 原材料的获取

本阶段考虑系统中设备制造所需要的原材料,由于 CCHP 系统设备种类较多,制造生产这些设备所需的原材料也各不相同^[10]。主要考虑铁、铜、铝、PVC、玻璃 5 种原料,其余原材料消耗量过少,可忽略不计。原材料获取阶段能源消耗与污染物排放如表 1 所示^[10-11]。

表 1 原材料获取阶段能源消耗与污染物排放

Table 1 Energy consumption and pollutant emissions during raw material acquisition phase

原材料	污染物排放/(g/kg)					能耗/(kWh/kg)	
	SO ₂	CO ₂	NO _x	PM _{2.5}	CO		
铁	9.70	2000	4	15	25	53	1.70
铝	205.50	25800	94.70	290	14	24	36.10
铜	17.70	1900	11.48				1.80
PVC	3.37	247	2.80	2.20	1.10		21.90
玻璃	1.10	132.30	3.70	7			0.60

2.1.2 设备制造

本阶段将厂房建设、设备制造及安装环节纳入计算范围。根据装机容量估算厂房建设、设备安装所需的原材料及能耗。此阶段的能耗来自电网的电能,污染物排放来自燃煤电厂。设备制造过程能源与原材料消耗如表 2 所示^[10-13]。

2.1.3 设备、原材料与燃料运输

由于燃料的运输也会消耗一定的能源,因此将燃料的运输纳入全生命周期评价,主要考虑煤炭与天然气的运输。设备与原材料的运输以公路为主,消耗柴油;煤炭运输以铁路为主,天然气运输消耗电能;污染物排放主要来自柴油与燃煤电厂。运输阶段污染物排放与能耗如表 3 所示^[12-13]。

2.1.4 系统运行

此阶段需要消耗能源不断地给用户冷热电,是生命周期最重要的阶段之一。在此阶段,能源消耗主要为太阳能、天然气与煤炭,污染物排放来自天然气与煤炭。非可再生能源消耗对应污染物排放如表 4 所示^[11, 13]。

表 2 设备制造过程能源与原材料消耗

Table 2 Energy and raw material consumption during equipment manufacturing process

设备单元	原材料/(kg/kW)					能耗/ (kWh/kW)
	铁	铝	铜	PVC	玻璃	
电制冷机	4.0816	0.0408	1.0204	2.0408		4.6531
燃气锅炉	1.5000	0.0408				1.0000
热交换器	1.9000					1.2000
燃气内燃机单	9.8182					6.3636
吸收式制冷机	18.3673					11.8980
光伏	27.0000	10.5000		9.2000	80.0000	82.0000
太阳能集热器	2.5000	1.1250		4.7250	0.8000	5.9000
蓄水罐	1.0000					1.0000

表 3 运输阶段污染物排放与能耗量

Table 3 Pollutant emissions and energy consumption during transportation phase

运输方式	污染物排放/[g/(t·km)]						能耗/ [kWh/ (t·km)]
	SO ₂	CO ₂	NO _x	PM _{2.5}	CO	CH ₄	
铁路	0.065	6.772	0.033	0.004	0.0039	0.046	0.063
公路	9.421	209	3.159	0.942	8.944	0.143	0.900

表 4 能源消耗对应污染物排放

Table 4 Energy consumption corresponds to pollutant emissions

能源种类	g/kWh					
	SO ₂	CO ₂	NO _x	PM _{2.5}	CO	CH ₄
煤	3.14	326.37	1.13	0.06		0.003
天然气	0.01	203.74	0.20			0.015
柴油	10.46	232.22	3.51	1.04	9.93	0.159

2.1.5 物质回收

物质回收处于生命周期的最后一个阶段,系统设备达到运行年限后会被淘汰。在此阶段中,将达到运行年限的设备进行回收利用,经过拆解的可回收物被运输到第一阶段作为原材料重新利用。取铁、铝和铜的回收率为 0.5;PVC 和玻璃的回收率分别为 0.1 和 0。各原材料的回收量可表示为:

$$R_i = W_{1 \times i} E_{i \times j} N_{j \times 1} \quad (1)$$

式中: R_i —— i 种原材料的回收量,kg; $W_{1 \times i}$ —— i 种物质的回收率; $E_{i \times j}$ —— 第 j 个设备单元的 i 种原材料的消耗,kg/kW,见表 2; $N_{j \times 1}$ —— 第 j 个设备单元的设备容量,kW。

本文重点分析系统在全生命周期内一次能源消耗量和污染物排放量,如式(2)~式(3)所示。

$$F_{LC} = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 = F_{gas} + F_{coal} + F_{oil} \quad (2)$$

$$[M_{LC}] = [M_1] + [M_2] + [M_3] + [M_4] + [M_5] \quad (3)$$

式中: F_{LC} ——全生命周期内的一次能源消耗量,kWh; F_1 、 F_2 、 F_3 、 F_4 、 F_5 ——全生命周期 5 个阶段的一次能源消耗量,kWh; M_{LC} ——全生命周期内污染物排放量,g; M_1 、 M_2 、 M_3 、 M_4 、 M_5 ——全生命周期 5 个阶段的污染物排放量,g。

3 优化方法

3.1 决策变量

燃气内燃机是 CCHP 系统的核心部件,其容量的大小直接影响到电网购电量、热回收设备容量等。太阳能光伏机组输出有一定的不确定性,需要合理布置光伏机组,一旦光伏发电机组确定后,太阳能集热器容量也可确定。燃气内燃机在低负荷运行时,其发电效率极低,要控制燃气内燃机的运行。因此,所有决策变量可表示为:

$$X = [N_{pgu}, N_{pv}, N_{wst}, N_b, N_{cc}, \theta] \quad (4)$$

式中: N_{pgu} 、 N_{pv} 、 N_{wst} 、 N_b 、 N_{cc} ——燃气内燃机、光伏、蓄水罐、燃气锅炉、电制冷机的容量配置; θ ——燃气内燃机最低负荷率。

3.2 目标函数

3.2.1 节能指标

本文选取一次能源节约率(primary energy saving ratio, PESR)为节能指标,以衡量 CCHP 系统相对于 SP 系统的节能性。PESR 定义为 CCHP 系统相对于 SP 系统的一次能源节约量与分供系统一次能源消耗量之比^[14]:

$$\eta_{PESR} = \frac{F_{SP} - F_{CCHP}}{F_{SP}} \quad (5)$$

式中: η_{PESR} ——CCHP 系统一次能源节约率; F_{SP} ——SP 系

统一次能源消耗量, kWh; F_{CCHP} ——联供系统一次能源消耗量, kWh。

3.2.2 环境指标

污染物气体会造成大气污染、酸雨、全球变暖、臭氧层破坏等环境问题,还会对人体呼吸系统产生一定的影响。本文主要考虑将全球变暖(GWP)、酸雨(AP)、对人体呼吸系统影响(REP)三者作为环境评价指标。各种污染物气体对3种影响贡献大小如表5所示^[11, 13]。

表5 各污染物气体的影响因子

Table 5 Influencing factor of each pollutant gas

指标	SO ₂	CO ₂	NO _x	PM _{2.5}	CO	CH ₄
全球变暖		1			3	21
酸雨	1.0		0.7			
人体呼吸系统	1.9		0.3	1		

分别用当量 CO₂ 排放量、当量 SO₂ 排放量、当量 PM_{2.5} 排放量来衡量全球变暖影响、酸雨影响和对人体呼吸系统影响的大小程度,三者的计算公式为:

$$F_{CO_2\text{-equiv}} = [G]_{1 \times 6} \times [M]_{6 \times 1} \quad (6)$$

$$F_{SO_2\text{-equiv}} = [A]_{1 \times 6} \times [M]_{6 \times 1} \quad (7)$$

$$F_{PM_{2.5}\text{-equiv}} = [R]_{1 \times 6} \times [M]_{6 \times 1} \quad (8)$$

式中: $F_{CO_2\text{-equiv}}$ 、 $F_{SO_2\text{-equiv}}$ 、 $F_{PM_{2.5}\text{-equiv}}$ ——当量 CO₂ 排放量、当量 SO₂ 排放量、当量 PM_{2.5} 排放量, g; $[G]_{1 \times 6}$ 、 $[A]_{1 \times 6}$ 、 $[R]_{1 \times 6}$ ——各污染物气体的影响因子,如表5所示; $[M]_{6 \times 1}$ ——各污染物气体的排放量, g。

类比节能指标,同样采用相对标准来评价环境指标,当量 CO₂ 减排率(CO₂-EERR)定义为 CCHP 系统相对于 SP 系统的当量 CO₂ 减排量与 SP 系统当量 CO₂ 排放量之比^[15]:

$$\eta_{CO_2\text{-EERR}} = \frac{F_{CO_2\text{-equiv}}^{SP} - F_{CO_2\text{-equiv}}^{CCHP}}{F_{CO_2\text{-equiv}}^{SP}} \quad (9)$$

式中: $\eta_{CO_2\text{-EERR}}$ ——当量 CO₂ 减排率; $F_{CO_2\text{-equiv}}^{SP}$ ——SP 系统全生命周期内的当量 CO₂ 排放量, g; $F_{CO_2\text{-equiv}}^{CCHP}$ ——CCHP 系统全生命周期内的当量 CO₂ 排放量, g。

类似地,分别定义当量 SO₂ 减排率 $\eta_{SO_2\text{-EERR}}$ 和当量 PM_{2.5} 减排率 $\eta_{PM_{2.5}\text{-EERR}}$ 来衡量对污染物 AP 和 REP 的影响。

本文假设 GWP、AP、REP 对环境有相同的影响,取 $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = 1/3$,总污染物减排率可表示为:

$$\eta_{PERR} = \omega_1 \eta_{CO_2\text{-EERR}} + \omega_2 \eta_{SO_2\text{-EERR}} + \omega_3 \eta_{PM_{2.5}\text{-EERR}} \quad (10)$$

式中: η_{PERR} ——CCHP 系统的总污染物减排率。

3.3 求解算法

本文基于光-气-储互补的冷热电联供系统,运用遗传算法对系统变工况运行下的容量配置进行优化。

4 案例分析

4.1 基础数据

遗传算法的参数设置与寻优范围如表6所示。

表6 遗传算法参数设置与决策变量搜索范围

Table 6 Genetic algorithm parameter setting and decision variable search range

类别	参数	数值
GA	种群大小	20
	最大迭代次数	100
	交叉概率	0.6
	变异概率	0.1
决策变量搜索范围	燃气内燃机容量配置 N_{pgu}/kW	[0,800]
	蓄水罐容量配置 N_{ws}/kW	[0,1500]
	电制冷机容量配置 N_{ec}/kW	[0,1000]
	光伏容量配置 N_p/kW	[0,2000]
	燃气锅炉容量配置 N_b/kW	[0,500]
	内燃机最低负荷率	[0,0.1]

以北京某办公楼为研究案例进行分析。办公楼包含办公室、健身房、休闲室、卫生间等,建筑面积约 10266 m²,可利用的太阳能面积为 2000 m²。供暖季节开始日期 11 月 15 日,结束日期次年 3 月 15 日;空调开始日期 6 月 1 日,结束日期 8 月 31 日。用 DeST 软件模拟建筑逐时冷热负荷,根据建筑内设备用电情况,得到建筑全年逐时电负荷。建筑全年逐时冷热电负荷如图2所示。逐时到电力需求相对稳定,而每小时热负荷与冷负荷的波动都大于电需求,最大热、冷、电负荷分别为 1278.67、821.34 和 285.13 kW。北京地区全年逐时太阳辐照度如图3所示。系统设备技术参数如表7所示^[16-18]。表7中 f 代表设备的负荷率,系统内设备为变工况运行。

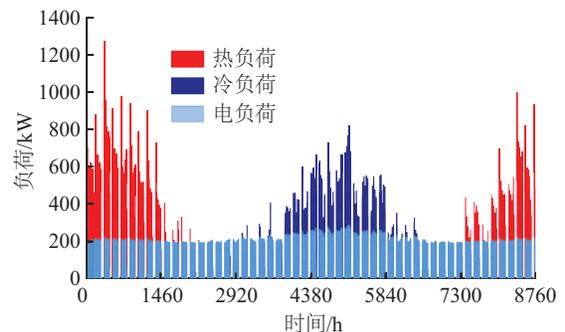


图2 办公楼全年逐时冷热电负荷

Fig. 2 Hourly heating, cooling and power throughout year of office building

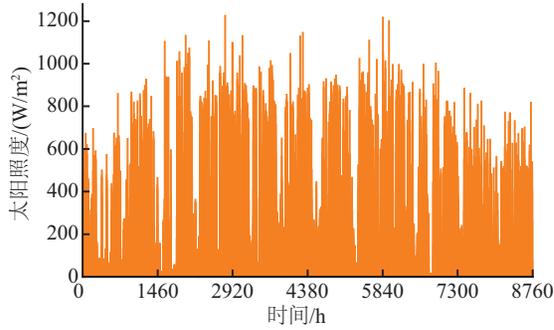


图3 北京地区全年逐时太阳辐照度

Fig. 3 Hourly solar irradiance in Beijing throughout year

4.2 优化结果分析

遗传算法优化结果如表 8 所示。在最优系统配置下,对 CCHP 系统与 SP 系统在全生命周期内进行能源消耗与污染物排放分析。

4.2.1 能源消耗分析

优化后,FTL 策略下一次能源节约率为 38.16%,FEL 策略为 44.22%,FEL 节能效益略优于 FTL。年能源消耗如图 4 所示,当采用 FTL 策略运行时,煤炭消耗量远大于 FEL;而 FEL 消耗天然气量较多,两种运行策略下太阳能消耗量相差不多。3 种供能模式的非可再生能源消耗量排序为:SP>FTL>FEL,CCHP 系统节能性优于 SP 系统。

表 7 系统设备技术参数

Table 7 Technical parameters of system equipment

项目	技术参数
内燃机发电效率 $\eta_{e,pgu}$	$\eta_{e,pgu} = a_5 f^5 + a_4 f^4 + a_3 f^3 + a_2 f^2 + a_1 f^1 + a_0 f^0$ $a_5 = 2.8725, a_4 = -9.0468, a_3 = 11.1760$ $a_2 = -6.9889, a_1 = 2.3782, a_0 = -0.000002$
电制冷机 η_{ec}	$\eta_{ec} = b_3 f^3 + b_2 f^2 + b_1 f^1 + b_0$ $b_3 = 8.7389, b_2 = -15.8250, b_1 = 12.5080, b_0 = -0.3618$
吸收式制冷机 COP _{ac}	$\eta_{ac} = c_3 f^3 + c_2 f^2 + c_1 f + c_0$ $c_3 = 1.1080, c_2 = -2.4190, c_1 = 1.6830, c_0 = 0.4250$
光伏发电效率 η_{ac}	$\eta_{e,pv} = d_1 f + d_2 f^{d_3}$ $d_1 = -0.0237, d_2 = 0.1681, d_3 = 0.1078$
燃气锅炉效率 η_b	$\eta_b = g_1 f + g_0$ $g_1 = 0.00428, g_2 = 0.922716$
太阳能集热器效率	61.5
热回收设备效率/%	80
电网传输效率/%	92
蓄水罐自耗率/%	10
电厂发电效率/%	41

表 8 GA 优化结果

Table 8 GA optimization results

设备	参数	FEL	FTL	SP
燃气内燃机	N_{pgu}/kW	241	177	
蓄水罐	N_{ws}/kW	670	965	
电制冷机	N_{ec}/kW	338	223	1280
光伏	N_{pv}/kW	1524	1204	
燃气锅炉	N_b/kW	141	122	825
燃气内燃机	最低负载率	0.0925	0.0424	

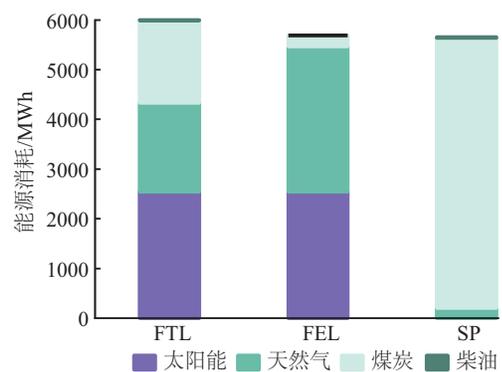


图4 年能源消耗

Fig.4 Annual energy consumption

3 种供能系统能源消耗构成如表 9 所示,太阳能与天然

气是系统主要的能量来源,在FTL策略中占比71.83%,FEL策略占比96.16%。两种运行策略下太阳能年平均利用率约为43.72%。由于FTL运行策略下从电网购电较多,导致煤炭占比远高于FEL,整个生命周期中,柴油消耗量最少。

表9 3种供能系统能源消耗构成

Table 9 Three energy supply system energy consumption composition

能源种类	FTL	FEL	SP
太阳能	42.135	44.700	
天然气	29.697	51.463	3.600
柴油	0.082	0.019	0.250
煤炭	28.086	3.818	96.150

在全生命周期的5个阶段中,无论是CCHP系统还是SP系统,运行阶段能耗最高;SP系统在运行阶段能耗量远高于CCHP系统。除去系统运行阶段,其余4个阶段能耗如图5所示。在联供系统两种运行策略下,原材料获取阶段能耗最高,设备、原材料与燃料运输阶段次之,而设备制造过程能耗最低;物质回收阶段能耗占4个阶段总能耗的13.3%,此阶段不可忽略。SP系统在生命周期运行期间,原材料、燃料与设备运输阶段能耗最多,物质回收阶段最少。

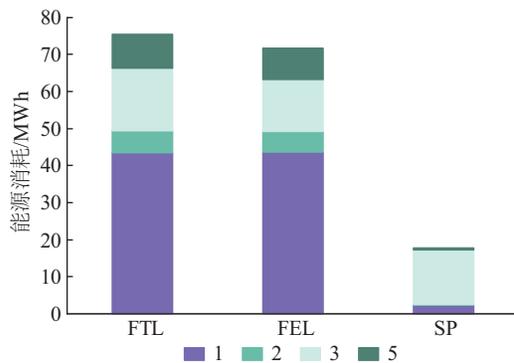


图5 生命周期各阶段能耗

Fig. 5 Energy consumption at each stage of life cycle

运输阶段包括原材料运输、设备运输、燃料运输,其中原材料由制造设备所需要的原材料与拆解设备回收的原料两部分组成。燃料运输主要考虑消耗煤炭与天然气两种能源。运输阶段3个过程能耗如图6所示。FTL燃料运输的能耗量高于FEL,FTL与FEL燃料运输的能耗分别占运输阶段总能耗的36.4%和18%;SP系统在燃料运输阶段占运输阶段总能耗的97%。

4.2.2 环境影响分析

CCHP系统在FEL策略下总污染物减排率为75%,FTL策略为52%。3种供能模式下生命周期数据统计如表10所示。由于CCHP系统设备种类繁多复杂,制造设备所消耗原

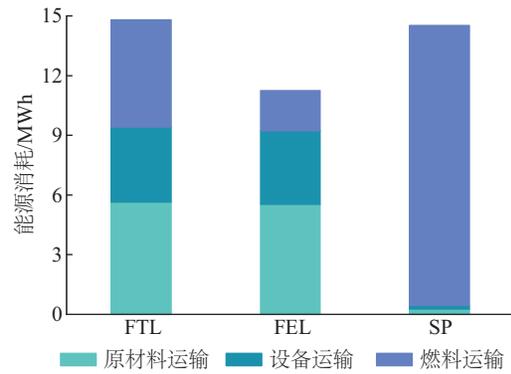


图6 运输阶段3个过程能耗

Fig. 6 Energy consumption in three processes during transportation phase

材料量较多,导致联供系统在原材料获取与设备制造阶段的污染物排放量高于同等阶段的SP系统;CCHP系统在物质回收阶段能耗量与污染物排放量均高于SP系统,而在系统运行阶段,SP系统的污染物排放量高于CCHP系统。

在生命周期统计内,CCHP系统能源与环境效益均优于SP系统。采用FEL策略运行时,当量CO₂减排率与当量SO₂减排率分别为51.7%和87.4%,优于FTL策略的39%和59%。在生命周期的5个阶段中,系统运行阶段污染物排放占比最高,CO₂排放量高于其他污染物的排放量,CH₄排放量最低。

3种供能模式在全生命周期不同阶段的当量CO₂排放量、当量SO₂排放量、当量PM_{2.5}排放量如图7所示。3种供能系统污染物排放趋势相似,就总排放量而言,SP系统的总排放量高于CCHP系统,采取FEL运行策略总排放量最低。CCHP系统在系统运行与原材料获取阶段污染物排放量最高,设备制造阶段排放量最低;SP系统在系统运行与运输阶段排放量最高。CCHP系统在运行阶段当量CO₂排放量占CO₂总排放的71%,SP系统在运行阶段占95%。

SP系统在原材料获取、设备制造、物质回收阶段对环境的影响微乎其微;CCHP系统在物质回收阶段对环境有一定影响,此阶段不可忽略。在生命周期的5个阶段中,系统运行阶段污染物排放量占主导地位。CO₂的当量排放量远高于SO₂与PM_{2.5}的当量排放量,GWP是影响环境的最大因素,AP与REP对环境的影响相差不大。3种供能模式下环境效益排序为:FEL>FTL>SP。

3种供能模式对环境影响的污染物排放结构如图8所示。SP系统对环境影响最大,FTL次之;CO₂排放量对全球变暖影响最大,CO与CH₄有较小的影响;虽然CO与CH₄单位排放量对GWP的影响比CO₂单位排放量影响更大,但这两种污染气体排放总量较少,所以总的较小。SO₂对AP贡献最大,NO_x对AP也有一定影响。SO₂对REP影响最大,因为其排放量大,影响因子较大,而NO_x和PM_{2.5}排放量对其影响较小。

表 10 生命周期数据统计
Table 10 Life cycle data statistics

污染物	策略	原材料获取	设备制造	运输阶段	系统运行	物质回收	生命周期
SO ₂ /g	FTL	5.11×10 ⁴	1.90×10 ⁴	6.06×10 ⁴	2.62×10 ⁵	2.92×10 ⁴	3.97×10 ⁵
	FEL	4.97×10 ⁴	1.86×10 ⁴	2.47×10 ⁴	6.34×10 ³	2.87×10 ⁴	1.04×10 ⁵
	SP	1.59×10 ³	9.11×10 ²	1.47×10 ⁵	8.53×10 ⁵	1.41×10 ³	1.00×10 ⁶
CO ₂ /g	FTL	7.44×10 ⁶	1.98×10 ⁶	2.15×10 ⁶	4.58×10 ⁷	3.04×10 ⁶	5.68×10 ⁷
	FEL	7.31×10 ⁶	1.94×10 ⁶	2.00×10 ⁶	3.42×10 ⁷	2.98×10 ⁶	4.49×10 ⁷
	SP	2.79×10 ⁵	9.47×10 ⁴	3.36×10 ⁶	9.08×10 ⁷	1.47×10 ⁵	9.45×10 ⁷
NO _x /g	FTL	2.71×10 ⁴	6.88×10 ³	2.06×10 ⁴	1.13×10 ⁵	1.06×10 ⁴	1.67×10 ⁵
	FEL	2.60×10 ⁴	6.73×10 ³	8.75×10 ³	3.51×10 ⁴	1.03×10 ⁴	7.62×10 ⁴
	SP	7.47×10 ²	3.29×10 ²	4.95×10 ⁴	3.10×10 ⁵	5.11×10 ²	3.61×10 ⁵
PM _{2.5} /g	FTL	7.97×10 ⁴	3.70×10 ²	5.27×10 ³	5.06×10 ³	5.68×10 ²	5.56×10 ⁴
	FEL	7.70×10 ⁴	3.62×10 ²	1.04×10 ³	87.9	5.57×10 ²	4.46×10 ⁴
	SP	2.06×10 ³	17.7	1.47×10 ⁴	1.66×10 ⁴	27.5	3.23×10 ⁴
CO/g	FTL	3.72×10 ⁴		4.82×10 ⁴			6.69×10 ⁴
	FEL	3.86×10 ⁴		6.59×10 ³			2.60×10 ⁴
	SP	2.81×10 ³		1.39×10 ⁵			1.40×10 ⁵
CH ₄ /g	FTL	7.74×10 ⁴	18.2	7.81×10 ²	1.62×10 ³	27.9	4.12×10 ⁴
	FEL	8.03×10 ⁴	17.8	1.22×10 ²	2.49×10 ³	27.4	4.28×10 ⁴
	SP	5.89×10 ³	87.0	2.22×10 ³	9.68×10 ²	1.35	6.14×10 ³

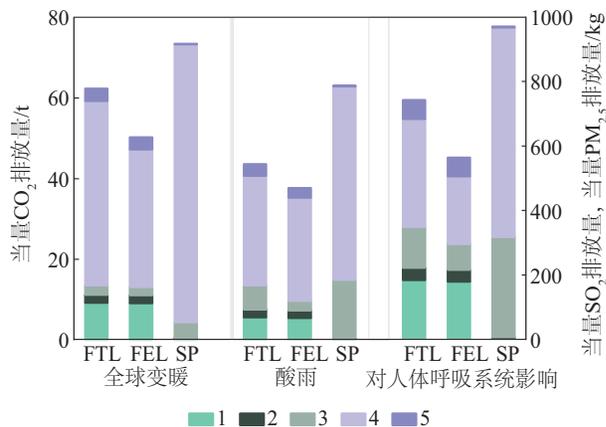


图 7 3种供能模式对环境影响的生命周期结构图
Fig. 7 Life cycle structure diagram of environmental impact of three energy supply modes

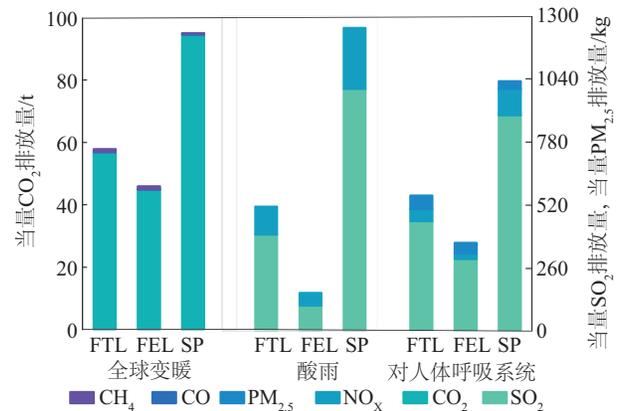


图 8 3种供能模式对环境影响的污染物排放结构图
Fig. 8 Pollutant emission structure diagram of environmental impact of three energy supply modes

5 结 论

基于全生命周期理论,从3方面对系统建立环境评价;以一次能源节约率、总污染物减排率为目标函数,以SP系统为参照对象,建立光-气-储互补的冷热电联供系统优化模型,运用遗传算法对变工况运行下的系统配置进行优化。以北京地区某办公楼为案例,依据建筑全年逐时冷热电负荷进行实例分析,得出以下结论:

1)遗传算法有良好的优化求解能力,可有效地优化求解变工况运行下的设备容量。

2)对办公楼进行案例分析,经优化后,FTL策略下一次能源节约率为38.16%,总污染物减排率为52%;FEL策略一次能源节约率为44.22%,总污染物减排率为75%。FEL策略的节能减排效益较好。

3)CO₂排放量对全球变暖影响最大,SO₂排放量对酸雨影响与对人体呼吸系统影响最大;在能耗阶段,CCHP系统消耗太阳能与天然气较多,而SP系统消耗煤炭量较多。

4)3种供能系统在运行阶段的能耗与污染物排放量最大;CCHP系统燃料运输能耗量远低于SP系统;SP系统在物质回收阶段对环境的影响微乎其微,而CCHP系统在物质回收阶段对环境有一定影响,此阶段对于CCHP系统不可忽略。

[参考文献]

- [1] 姚玉璧,郑绍忠,杨扬,等.中国太阳能资源评估及其利用效率研究进展与展望[J].太阳能学报,2022,43(10):524-535.
YAO Y B, ZHENG S Z, YANG Y, et al. Progress and prospects on solar energy resource evaluation and utilization efficiency in China [J]. Acta energiae solaris sinica, 2022, 43(10): 524-535.
- [2] WANG X S, YANG C, HUANG M M, et al. Multi-objective optimization of a gas turbine-based CCHP combined with solar and compressed air energy storage system [J]. Energy conversion and management, 2018, 164: 93-101.
- [3] 张凯真,柳善建,刘亚亚,等.冷热电联供系统运行策略及优化控制研究进展[J].新能源进展,2019,7(2):168-175.
ZHANG K Z, LIU S J, LIU Y Y, et al. Research progress on characteristics analysis and optimization control of cogeneration system [J]. Advances in new and renewable energy, 2019, 7(2): 168-175.
- [4] 任福康,陈宜,王江江.耦合太阳能和地热能的冷热电联供系统优化[J].工程热物理学报,2021,42(1):16-24.
REN F K, CHEN Y, WANG J J. Optimization of combined cooling, heating, and power system coupled

- with solar and geothermal energies [J]. Journal of engineering thermophysics, 2021, 42(1): 16-24.
- [5] 杜传铭,陈孟石,杜尚斌,等.光-气互补冷热电联供系统容量配置与运行研究[J].动力工程学报,2022,42(1):83-93.
DU C M, CHEN M S, DU S B, et al. Study on capacity configuration and operation of hybrid CCHP system [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2022, 42(1): 83-93.
- [6] 谢伟伟,邵雪奎.分布式能源系统生命周期环境影响评价[J].资源信息与工程,2021,36(2):116-122,126.
XIE W W, SHAO X K. Environmental impact assessment of distributed energy systems based on life cycle theory [J]. Resource information and engineering, 2021, 36(2): 116-122, 126.
- [7] MARQUES A S, CARVALHO M, OCHOA A A V, et al. Life cycle assessment and comparative exergoenvironmental evaluation of a micro-trigeneration system [J]. Energy, 2021, 216: 119310.
- [8] HERRANDO M, ELDUQUE D, JAVIERRE C, et al. Life cycle assessment of solar energy systems for the provision of heating, cooling and electricity in buildings: a comparative analysis [J]. Energy conversion and management, 2022, 257: 115402.
- [9] 白鹤.基于太阳能利用的分布式冷热电联供系统的优化研究[D].北京:华北电力大学,2012.
BAI H. Optimization analysis of distribute combined cooling heating and power system based on solar energy [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [10] JING Y Y, BAI H, WANG J J. Multi-objective optimization design and operation strategy analysis of BCHP system based on life cycle assessment [J]. Energy, 2012, 37(1): 405-416.
- [11] WANG J J, YANG Y, MAO T Z, et al. Life cycle assessment (LCA) optimization of solar-assisted hybrid CCHP system [J]. Applied energy, 2015, 146: 38-52.
- [12] JING Y Y, BAI H, WANG J J, et al. Life cycle assessment of a solar combined cooling heating and power system in different operation strategies [J]. Applied energy, 2012, 92: 843-853.
- [13] PIERAGOSTINI C, MUSSATI M C, AGUIRRE P. On process optimization considering LCA methodology [J]. Journal of environmental management, 2012, 96(1): 43-54.
- [14] WANG J J, LIU Y, REN F K, et al. Multi-objective optimization and selection of hybrid combined cooling, heating and power systems considering operational flexibility [J]. Energy, 2020, 197: 117313.
- [15] 陈玉林.基于生命周期分析的冷热电联供系统优化设计[J].建筑科学,2014,30(2):30-34,40.

- CHEN Y L. Optimal design of CCHP system based on life-cycle analysis [J]. Building science, 2014, 30 (2) : 30-34, 40.
- [16] ROSATO A, SIBILIO S, SCORPIO M. Dynamic performance assessment of a residential building-integrated cogeneration system under different boundary conditions. Part I: energy analysis [J]. Energy conversion and management, 2014, 79: 731-748.
- [17] WANG J J, ZHANG C F, JING Y Y. Multi- criteria analysis of combined cooling, heating and power systems in different climate zones in China [J]. Applied energy, 2010, 87(4): 1247-1259.
- [18] WANG J J, ZHOU Y, ZHANG X T, et al. Robust multi-objective optimization with life cycle assessment of hybrid solar combined cooling, heating and power system [J]. Energy conversion and management, 2021, 232: 113868.

RESEARCH ON OPTIMIZATION OF COMBINED COOLING, HEATING AND POWER SYSTEM BASED ON FULL LIFE CYCLE EVALUATION

Xu Xiaogang^{1,2}, Ji Xiaopeng^{1,2}, Wang Huijie^{1,2}

(1. Department of Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Hebei Key Laboratory of Low Carbon and High Efficiency Power Generation Technology, Baoding 071003, China)

Abstract: The complementarity between natural gas and solar energy is an effective way to improve energy efficiency and achieve energy conservation and emission reduction. This article constructs a light-gas-storage complementary combined cooling, heating and power (CCHP) system with complementary Based on the whole life cycle theory, taking the primary energy saving rate and total pollutant emission reduction rate as the objective functions, the optimization model of the combined cold, heating and power system is established, and the genetic algorithm is applied to optimize the capacity configuration under variable working conditions of the system. Incorporate the material recovery phase into the life cycle assessment and consider fuel transportation during the transportation phase. The results show that after optimization, the electric following (FEL) strategy of CCHP system can achieve better energy saving and emission reduction benefits. The separated production (SP) system has little environmental impact during the material recovery stage, and the CCHP system consumes much less fuel transportation than the SP system.

Keywords: combined cooling, heating and power system; life cycle assessment; energy consumption; pollutant emission