

考虑碳排放惩罚因子的综合能源系统优化规划

文 明¹, 胡资斌¹, 龙乙林², 李 勇², 蒋 童¹, 王雅慧²

(1. 国网湖南省电力有限公司经济技术研究院, 能源互联网供需运营湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410004;

2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘 要: 能源行业在碳排放中所占比重较大, 是节能减排的主力军, 为保证系统的可持续发展, 有必要将碳排放考虑到综合能源系统规划。为此建立一种考虑碳排放惩罚因子的综合能源系统规划模型, 首先, 针对某园区的热、电负荷特征, 提出 4 种规划方案, 以净现成本最小为优化目标得到 4 种规划方案在考虑碳排放惩罚因子场景下的最优容量配置; 其次, 从经济效益与环境效益两方面对比分析 4 种规划方案优劣势, 并分析综合能源系统的热电供需平衡; 最后, 针对碳排放惩罚因子进行灵敏度分析。结果表明, 考虑碳排放惩罚因子可以减少综合能源系统的碳排放, 且可再生能源、储能装置以及燃气轮机都可以减少碳排放, 提升环境效益。

关 键 词: 碳排放; 综合能源; 优化规划; 碳排放惩罚因子

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.03.002 中图分类号: TM863 文章编号: 1673-9140(2021)03-0011-08

Optimal planning of integrated energy system considering carbon emission penalty factor

WEN Ming¹, HU Zibin¹, LONG Yilin², LI Yong², JIANG Tong¹, WANG Yahui²

(1. Economic & Technical Research Institute, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Hunan Key Laboratory of

Energy Internet Supply-demand and Operation, Changsha 410004, China; 2. College of Electrical and

Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: The energy industry accounts for a large proportion of carbon emissions and it is the main force of energy conservation and emission reduction. In order to ensure the sustainable development of the system, it is necessary to take carbon emissions into account when planning the integrated energy system. Under the background, an integrated energy system planning model is established in this paper considering carbon emission penalty factor. Firstly, according to the thermal and electrical load characteristics of a park, four planning schemes are proposed in this paper. The minimum net present cost is chosen as the optimization objective, the optimal capacity allocation of four planning schemes under the scenario of whether carbon emission penalty factor is considered or not. Secondly, the advantages and disadvantages of the four planning schemes are compared from the aspects of economic benefit and environmental benefit, and the thermoelectric coupling relationship of the integrated energy system is analyzed. Finally, the sensitivity of carbon emission penalty factors is analyzed. The results show that the carbon emission penalty factor can re-

收稿日期: 2019-10-06; 修回日期: 2020-01-06

基金项目: 国际科技合作项目(2018YFE0125300); 国网湖南省电力有限公司科技项目(5216A2200005)

通信作者: 李 勇(1982-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统优化与控制研究; E-mail: yongli@hnu.edu.cn

duce the carbon emission of the integrated energy system, and the renewable energy, energy storage equipment and gas turbine can reduce the carbon emission and improve the environmental benefits.

Key words: carbon emission; integrated energy system; optimal planning; carbon emission penalty factor

随着社会经济的高速发展,人类对能源的需求日益增大,能源短缺与环境问题也由此而生^[1-2]。在此背景下,通过将多种性质各异的能源有机结合在一起,对其生产和转换环节进行协调优化,从而实现能源梯级高效利用和可再生能源大幅消纳的综合能源系统(integrated energy system, IES)^[3]应运而生。2017年5月,中国国家能源局发布《能源发展“十三五”规划》^[4],提出要因地制宜推广冷—热—电三联供、分布式再生能源发电、地热能供暖制冷等供能模式,加强热、电、冷、气等能源生产耦合集成和互补利用。综合能源系统的应用可实现小区域的多种能源的梯级利用,例如在医院、学校和工业园区等区域,具有能够提高能源的利用效率^[5-6]、提高运行经济性和减少环境污染等方面的优势^[7-8],是能源互联网的重要组成部分,同时也为泛在电力物联网的建设奠定了基础。

近年来,综合能源系统优化规划的问题受到了学者的广泛关注,文献[9]针对 IES 容量规划与运行问题,提出一种多区域 IES 两阶段优化方法,第 1 阶段优化目的是使经济成本和环境成本最小,第 2 阶段优化是确定系统的最优运行方案;文献[10]从站—网整体规划的角度出发,对能源站数量、位置和设备容量配置,供能网络布局进行统一规划研究,基于电—热—冷多能互补特性,提出了一种园区综合能源站—网双层规划优化模型;文献[11]考虑供能侧与用能侧的协同优化,建立了考虑综合需求响应的综合能效模型,并将其引入优化目标,以系统经济成本最低与综合能效最高为目标建立了电—气—热 IES 多目标优化调度模型;文献[12]提出了以规划期内投资和运行总成本最小为目标的 IES 协调优化规划的混合整数非线性优化模型,以确定 EH 设备和能源网络的优化配置方案;文献[13]对区域综合能源系统(park-level integrated energy system, PIES)的规划周期分成若干个阶段,以投资、运行和维护费用的全生命周期成本最低为目标建立 PIES 的多阶段规划模型,提出了一种考虑建设时序的

PIES 多阶段规划方法;文献[14]从实际工程应用的角度出发,考虑了功率约束、能量约束、设备运行约束和用户场地约束等条件,建立了用户级综合能源系统优化规划模型,模型以全规划周期建设和运行成本最低为目标,提出了一种基于最大利用小时数的用户级综合能源系统规划流程和方法;文献[15]以高比例可再生能源消纳与系统综合经济性为目标,考虑典型日系统冷热电功率平衡约束、设备输入—输出耦合约束(能量枢纽模型)、设备出力限制、电网联络线功率约束等约束条件,建立了面向可再生能源高比例消纳的综合能源系统优化规划模型。以上文献针对综合能源系统的优化规划问题,建立了多种类型的模型,但均未考虑碳排放。

2020年9月22日,习近平总书记向世界作出了“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”的重大宣示。各地积极响应,把碳达峰和碳中和工作当作当前的重点工作来抓^[16]。而能源行业在碳排放中所占比重较大,是节能减排的主力军,为保证系统的可持续发展,有必要将碳排放考虑到综合能源系统规划中^[17-18]。为此,该文建立了计及碳排放惩罚因子的综合能源系统优化规划模型。首先,针对某园区的热、电负荷特征,提出4种规划方案,以净现成本最小为优化目标得到4种规划方案的最优容量配置。其次,从经济效益与环境效益两方面对比分析4种规划方案优劣势,分析综合能源系统的热电耦合关系。最后,针对碳排放惩罚因子进行灵敏度分析。

1 综合能源系统架构

该文所指的综合能源系统以电力系统为核心,融合了天然气系统与热力系统,能够实现电力、天然气与热能间的耦合互补。综合能源系统框架如图1所示。综合能源系统为并网型综合能源系统,主要由电热负荷、光伏、燃气轮机、热水锅炉以及变流器组成。对于电能供给侧,主要由电网、光伏发电、燃

气轮机供电;对于热能供给侧,主要由燃气轮机的余热回收以及热水锅炉供热。

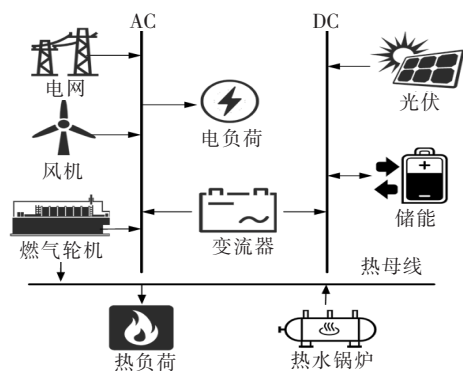


图 1 综合能源系统结构

Figure 1 The structure of IES

1.1 负荷

该文所研究的综合能源系统主要为居民群体供能,负荷包括电负荷与热负荷 2 种负荷类型。负荷数据取自 HOMER (hybrid optimization of multiple electric renewables platform) 软件提供的典型居民负荷,负荷曲线如图 2、3 所示。由图 2、3 可知,电负荷的峰值出现在夏季,集中在 6—9 月,热负荷的峰值出现在冬季,集中在 1、11—12 月。

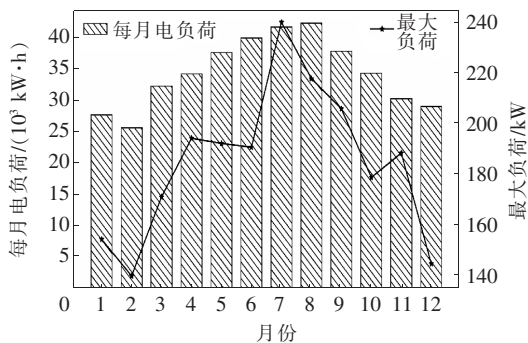


图 2 电负荷

Figure 2 Electric load

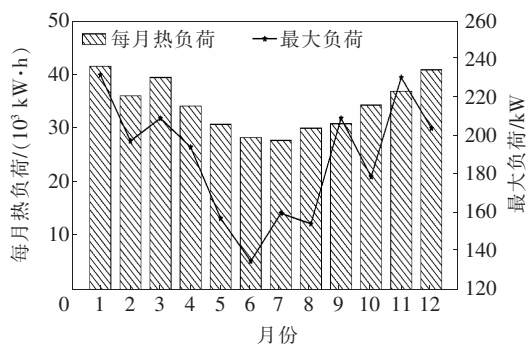


图 3 热负荷

Figure 3 Thermal load

1.2 光伏

该文利用太阳全球水平辐射(global horizontal irradiation,GHI)资源来计算平板光伏阵列的输出,GHI 资源是波束辐射、漫射辐照度和非反射辐射的总和。一年的太阳辐射数据来自 NASA Surface Meteorology and Solar Energy 网站。月平均全球水平辐射如图 4 所示。该地区年平均太阳辐射为 $4.00 \text{ (kW} \cdot \text{h/m}^2\text{)/d}$ 。

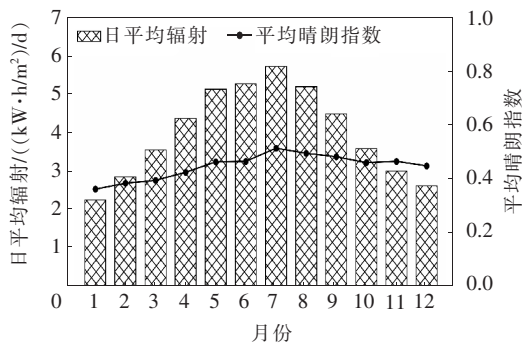


图 4 月平均 GHI

Figure 4 Monthly average GHI

1.3 系统参数

该文综合能源系统的规划周期设为 20 年。系统各元件的相关参数如表 1 所示^[19]。燃气轮机的

表 1 元件参数

Table 1 The Component parameters

| 系统元件 | 投资成本/ (元/kW) | 置换成本/ (元/kW) | 维护成本 | 生命周期/ a | 效率/ % | 碳排放 |
|------|-----------------|-----------------|-------------------|------------|------------------|--------------------------|
| 光伏 | 4 000 | 4 000 | 90(元/kW) | 25 | — | — |
| 变流器 | 800 | 800 | 20(元/kW) | 20 | 95 | — |
| 燃气轮机 | 2 000 | 2 000 | 0.3 (元/(kW/h)) | 24.6 | 气转热:45 气转电:35 | 1 964(g/m ³) |
| 热水锅炉 | — | — | — | — | 85 | 1 964(g/m ³) |
| 电网 | — | — | — | — | — | 632(g/(kW·h)) |

效率根据某能源站燃气轮机运行数据预估得到,燃气轮机与热水锅炉的碳排放根据天然气燃烧的质量守恒定律计算得到。

在仿真软件 HOMER 中,认为热水锅炉是现有的基础设施,所以它没有成本。该文的购电电价采用某省工商业电价,购电价格如表 2 所示。

表 2 分时电价

| 时段 | 电价 |
|-----------------------------------|---------|
| 19:00—22:00 | 0.910 3 |
| 8:00—11:00,15:00—19:00 | 0.810 3 |
| 7:00—8:00,11:00—15:00,22:00—23:00 | 0.660 3 |
| 23:00—24:00,0:00—7:00 | 0.440 3 |

2 数学建模及求解

2.1 HOMER 软件

该文采用 HOMER 软件对综合能源系统的优化规划进行求解。HOMER 是美国国家可再生能源实验室 (the national renewable energy laboratory) 开发的一种规划和设计可再生能源微电网的仿真工具。仿真和优化分析是 HOMER 的 2 个主要任务。对于仿真功能,HOMER 可以确定一年中每小时微电网的技术可行性和生命周期成本。此外,HOMER 对微电网的结构和供电元件的运行策略也进行了测试,以得到这些组件在给定的设置下如何工作。

HOMER 的仿真能力可以得到微电网的长期运行结果,HOMER 的优化功能也依赖于这种仿真能力。对于优化功能,HOMER 在用户定义的搜索空间下,根据微电网的总净现成本 (net present cost) 最小排序,确定可行系统及其配置。在 HOMER 中,仿真部分确定微网的系统配置后,优化部分计算并显示最优微网配置。

2.2 数学模型

该文以总净现成本最小为目标函数对综合能源系统进行优化规划。

净现成本为

$$N_{PC} = \frac{\sum_{i \in x} C_i^A}{C_{RF}(\alpha, y)} \quad (1)$$

式中 C_i^A 为综合能源系统供能元件 i 的成本; $C_{RF}(\alpha, y)$ 为资本回收系数。

供能元件 i 的成本为

$$C_i^A = C_{ic}^A + C_{ir}^A + C_{io}^A \quad (2)$$

式中 C_{ic}^A 为投资成本; C_{ir}^A 为置换成本; C_{io}^A 为运行成本。光伏、变流器、燃气轮机的成本包括投资成本、置换成本以及运行成本,对于燃气轮机的运行成本包括维修成本、燃气成本以及碳排放惩罚,热水锅炉的成本包括燃气成本和碳排放惩罚,电网成本包括购电成本和碳排放惩罚。

资本回收系数为

$$C_{RF}(\alpha, y) = \frac{\alpha(1+\alpha)^y}{\alpha(1+\alpha)^y - 1} \quad (3)$$

式中 α 为年实际贴现率; y 为项目规划周期。

该文所考虑的规划方案中,燃气轮机、热水锅炉以及电网均存在碳排放,碳排放惩罚成本为

$$C_{co_2} = c_{cep} N_{i,co_2} \quad (4)$$

式中 c_{cep} 为碳排放惩罚因子; N_{i,co_2} 为供能元件 i 所产生的碳排放量,它是由每种二氧化碳的排放因子(每单位燃料消耗排放的污染物千克)乘以年燃料消耗总量来计算的年排放量。

约束条件主要包括 3 种约束:电、热平衡约束,即规划的元件容量需满足供需平衡;模拟系统运行中供能系统的运行状态需满足各元件自身的约束条件;旋转备用是指在负荷突然增加或可再生电力输出突然减少时能够立即响应的剩余运行容量,其约束提供了一个安全裕度以确保在电力负荷和可再生电力供应变化的情况下仍有可靠的电力供应。该文的旋转备用约束主要包括 2 个约束条件:系统必须确保有足够的运行储备来应对突然增加的 10% 的负荷;即使光伏阵列的输出突然下降 50%,系统也必须确保有足够的运行储备来满足负荷需求。

3 案例分析

为了研究碳排放惩罚因子对综合能源系统规划的影响,该文设置了 4 种规划方案,如图 5 所示,并针对是否考虑碳排放惩罚因子给出了不同的规划结果。

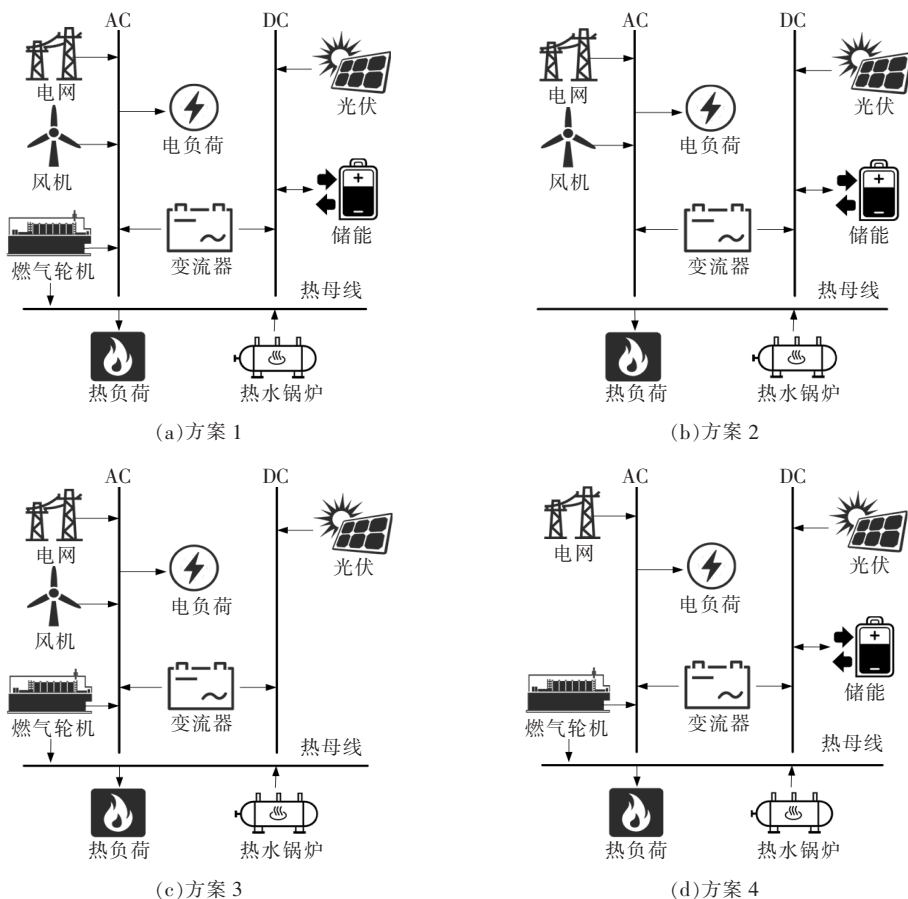


图 5 4 种规划方案的结构
Figure 5 Structure of four cases

3.1 经济性分析

表 3 为 4 种规划方案的各装置容量优化结果。表中“是”代表考虑碳排放惩罚因子,“否”代表不考虑碳排放惩罚因子。由表 3 可知,无论是否考虑碳排放惩罚因子,方案 2 的净现成本最小。从经济性的角度来看,方案 2>方案 1>方案 3>方案 4。显而易见,在考虑碳排放惩罚因子时,净现成本会增加。

图 6 为 4 种规划方案考虑碳排放惩罚因子与不考虑碳排放惩罚因子的资金流对比图。从图 6 可以得到,无论是哪一种方案,在考虑碳排放惩罚因子时,电网购电费用和燃料费用会减少,而可再生能源

的资金投入会增加。这是因为若考虑碳排放惩罚因子,电网的购电量以及燃料使用量的增加会导致碳排放惩罚费用的增加,因此需减少购电量以及燃料费用而增加可再生能源发电。

对比图 6(a)、(b)可知,添加燃气轮机虽然可以减少电网购电费用,但会增加可再生能源的投资费用以及燃料费用,因此在该文的规划场景中,添加燃气轮机反而会增加总成本。对比图 6(a)、(c),添加储能会增大可再生能源的投资,从而增大投资费用,但储能可以利用其“低价充电,高价放电”的特性来减少电网购电费用以及燃料费用,因此添加储能可以减少总成本。对比图 6(a)、(d),添加风机会增大

表 3 仿真结果

Table 3 Simulation results

| 方案 | 光伏容量/kW | | 风机容量/kW | | 燃气轮机/kW | | 储能装置/(kW·h) | | 变流器/kW | | 净现成本/(10 ⁴ 元) | |
|----|---------|------|---------|----|---------|-----|-------------|-----|--------|------|--------------------------|--------|
| | 是 | 否 | 是 | 否 | 是 | 否 | 是 | 否 | 是 | 否 | 是 | 否 |
| 1 | 67.9 | 44.4 | 89 | 78 | 270 | 270 | 205 | 130 | 38.6 | 27.6 | 447.19 | 420.58 |
| 2 | 89.9 | 48.3 | 93 | 83 | 0 | 0 | 257 | 159 | 46.9 | 30.8 | 429.67 | 399.20 |
| 3 | 50.9 | 16.9 | 80 | 76 | 270 | 270 | 0 | 0 | 31.5 | 11.7 | 454.62 | 423.18 |
| 4 | 125 | 104 | 0 | 0 | 270 | 270 | 43 | 18 | 67.7 | 62.7 | 485.39 | 449.46 |

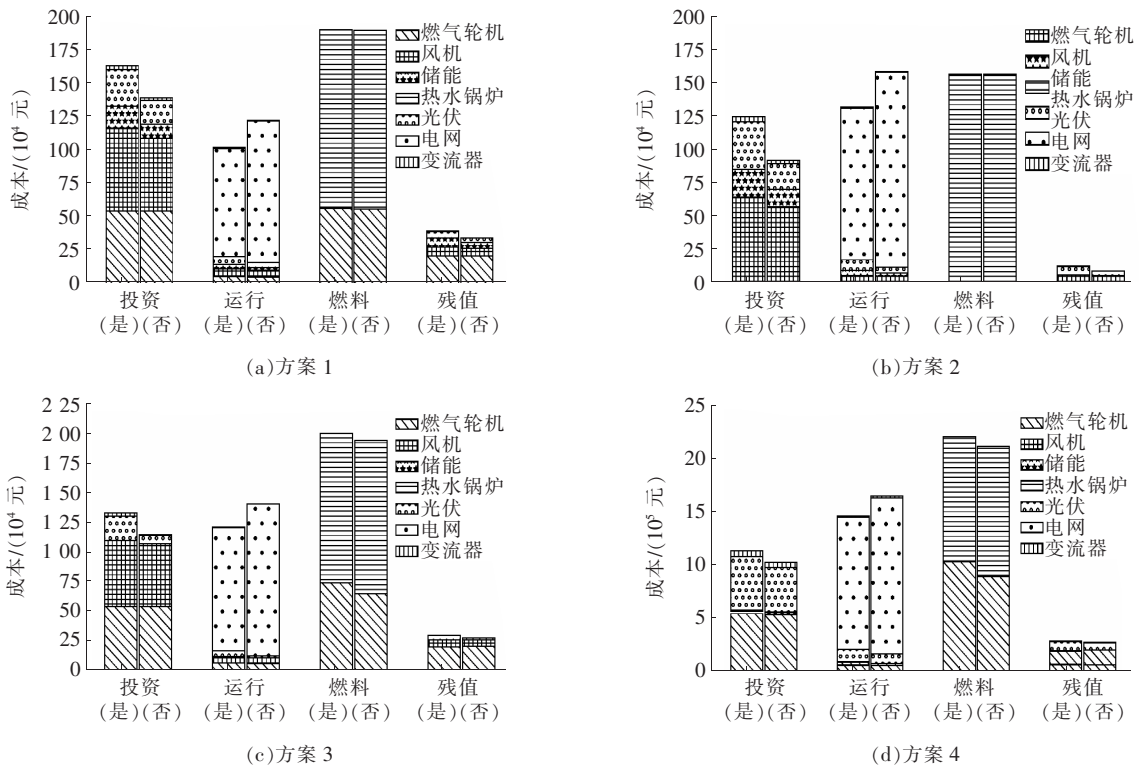


图 6 4 种规划方案的资金流

Figure 6 Cash flow of four cases

投资成本,但同样也会大大减少电网购电费用以及燃料费用,因此在该文的规划场景中,添加风机会减少总成本。同时从图 6 中还可以得到,添加风机也会增大储能的投资,这是因为风机在夜晚发电量较大,而此时负荷较小,因此需要储能来储存剩余的风力发电用于白天供电。

3.2 环境效益分析

图 7 为 4 种规划方案考虑碳排放惩罚因子与不考虑碳排放惩罚因子的碳排放对比。由图 7 可知,考虑碳排放惩罚因子会减少碳排放,且方案 1 的碳排放最小。因此,从环境的角度考虑规划方案时,方案 1 > 方案 3 > 方案 4 > 方案 2。

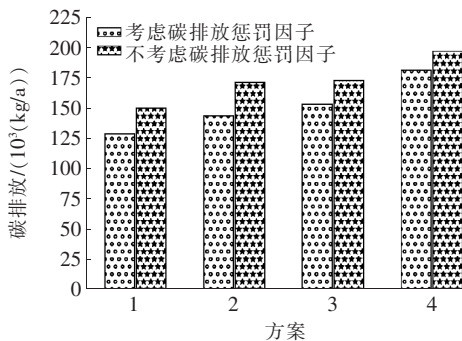


图 7 4 种规划方案的碳排放

Figure 7 Carbon emission of four cases

对比 4 种方案的结构图以及图 7,可以得到可再生能源、储能装置以及燃气轮机都可以减少碳排放,提升环境效益。因此若将环境效益视为最重要的规划目标,方案 1 为最优方案。

3.3 热电供需平衡分析

图 8 和图 9 分别为方案 1 中某一天的电、热能供需。由图 8 可知,风力发电主要集中在晚上,因此在时段 1 中,电负荷较小,风力发电过剩,将剩余电力对储能进行充电。在时段 2 中,电负荷逐渐增大,而此时光伏发电几乎为 0,因此主要通过储能放电、风机与电网来满足电力供应。光伏发电主要集中在 8:00—15:00,因此在时段 3 中,主要由光伏与电网进行供电。18:00—20:00(时段 4)为用电高峰期,此时风力发电相对较小,储能装置电量为 0,且此时电网购电价格较高,因此此时启动燃气轮机发电以满足电负荷。

由图 9 可知,时段 1 的热负荷一直都由热水锅炉来满足,而时段 2 由燃气轮机来满足,这是因为在时段 2 中,燃气轮机需要发电来满足电负荷,而余热可用于供热。时段 2 中,燃气轮机的热出力过剩,因而会出现弃热现象。因此,从能源利用方面考虑,燃气轮机也不适用该文的规划场景中。

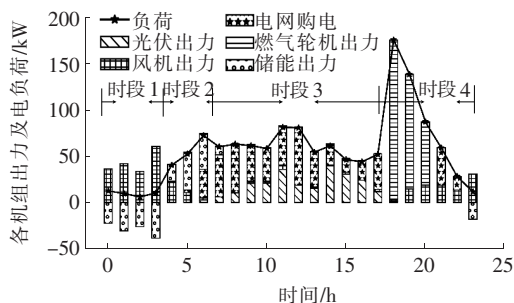


图 8 电能供需

Figure 8 electricity supply and demand

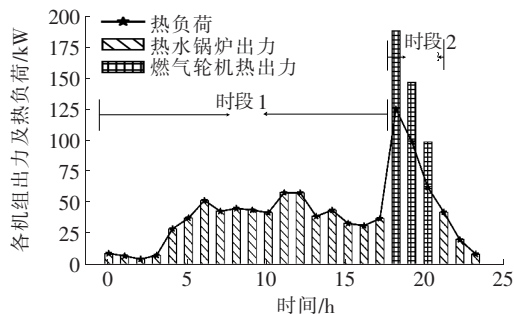


图 9 热能供需

Figure 9 electricity supply and demand

3.4 灵敏度分析

图 10 为净现成本与碳排放随碳排放惩罚因子变化的曲线。由图 10 可知,随着碳排放惩罚因子的增大,净现成本会逐渐增大,碳排放会逐渐减小。同时也可以得到,随着碳排放惩罚因子的增大,碳排放量的变化率在逐渐减小。

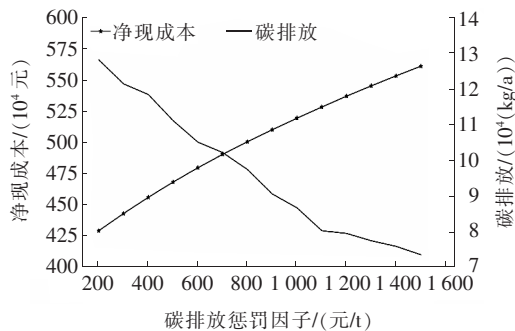


图 10 碳排放惩罚因子的灵敏度分析

Figure 10 Sensitivity analysis COP factor

4 结语

该文针对综合能源系统的规划给出了 4 种方案,采用 HOMER 软件得到了考虑碳排放惩罚因子的 4 种方案的优化结果,对 4 种方案进行了经济效益与环境效益的对比分析,并分析了综合能源系统的热电耦合关系,最后对碳排放惩罚因子进行了灵

敏度分析。

1)考虑碳排放惩罚因子,会增加综合能源系统的运行成本,但会减少外购电量以及燃气轮机的发电量,从而减少碳排放,提高环境效益。

2)在该文的规划场景中,从经济性考虑,选用方案 1(光伏、风机、电网、热水锅炉、储能)进行供能是最优的;从环境效益考虑,选用方案 2(燃气轮机、光伏、风机、电网、热水锅炉、储能)进行供能为最优。

3)燃气轮机的安装可以减少碳排放,提升环境效益,但也应结合多能负荷的用能情况来综合考虑是否需要安装燃气轮机,或同时考虑储热装置与燃气轮机,以防止弃热现象的发生。

参考文献:

[1] 张柏林,郁娇山,黄万龙,等. 甘肃地区高比例新能源大外送电网面临的挑战及思考[J]. 电网与清洁能源, 2020,36(4):81-89+96.
ZHANG Bolin, YU Jiaoshan, HUANG Wanlong, et al. Challenges and reflections on the power grid of high proportion of new energy in Gansu province [J]. Power System and Clean Energy, 2020,36(4):81-89+96.

[2] 吕振华,李强,韩华春,等. 计及源荷不确定性和多类储能响应的园区 IES 多目标优化调度模型[J]. 电力科学与技术学报, 2021,36(2): 40-50.
LU Zhenhua, LI Qiang, HAN Huachun, et al. A multi-objective optimization scheduling model of industrial parks IES considering source-charge uncertainty and multi-class energy storage responses[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021,36(2): 40-50.

[3] 周兵兵,林宏宇,杨莘博,等. 可再生能源多能互补系统多主体效益均衡模型[J]. 智慧电力, 2020, 48(1): 74-79.
ZHOU Bingbing, LIN Hongyu, YANG Shenbo, et al. Multi-agent Benefit equilibrium model for renewable energy in multi-energy complementary system[J]. Smart Power, 2020,48(1):74-79.

[4] 国家能源局. 能源发展“十三五”规划[EB/OL]. https://www.ndrc.gov.cn/fggzfzllgh/gjjzxgh/201705/t20170517_1196766.html, 2017-05-17.

[5] 陈忠华,高振宇,陈嘉敏,等. 考虑不确定性因素的综合能源系统协同规划研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021,49(8):32-40.
CHENG zhonghua, GAO Zhenyu, CHEN Jiamin, et al. Research on cooperative planning of an integrated energy system considering uncertainty [J]. Power System

- Protection and Control, 2021, 49(8): 32-40.
- [6] 陈晨,李端超,王海伟,等.考虑不确定性的综合能源系统日前经济调度[J].电力科学与技术学报,2021,36(2): 24-30.
CHEN Chen, LI Duanchao, WANG Haiwei, et al. Study on day-ahead economic dispatch of integrated energy system considering [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(2): 24-30.
- [7] 吴志力,杨卫红,原凯,等.园区能源互联网多能源协同优化配置发展构想[J].中国电力,2018,51(8):99-105.
WU Zhili, YANG Weihong, YUAN Kai, et al. Park energy internet development design of multi-energy synergic optimal allocation [J]. Electric Power, 2018, 51(8): 99-105.
- [8] 冯奕,应展烽,颜建虎.考虑碳排放成本的多能互补微能源网储能装置优化运行[J].电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 92-99.
FENG Yi, YING Zhanfeng, YAN Jianhu. Optimized operation of energy storage in a multi-energy complementary micro-energy network considering carbon emission cost [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 92-99.
- [9] 卢欣,吴明雷,朱睿,等.考虑不确定因素的多能互补智慧能源系统经济优化调度[J].电测与仪表,2019, 56(15):91-97.
LU Xin, WU Minglei, ZHU Rui, et al. Economical optimal operation of intelligent multi-energy complementary energy system considering uncertainty [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(15): 91-97.
- [10] 黄伟,刘文彬.基于多能互补的园区综合能源站-网协同优化规划[J].电力系统自动化,2020,44(23):20-28.
HUANG Wei, LIU Wenbin. Multi-energy complementary based coordinated optimal planning of park integrated energy station network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(23): 20-28.
- [11] 丁煜蓉,陈红坤,吴军,娄清辉,廖家齐,李保林.计及综合能效的电-气-热综合能源系统多目标优化调度[J].电力系统自动化,2021,45(2): 64-73.
DING Yurong, CHEN Hongkun, WU Jun, et al. Multi-objective optimal dispatch of electricity-gas-heat integrated energy system considering comprehensive energy efficiency [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(2): 64-73.
- [12] 张利军,王一铮,陈飞,等.计及能源网络特性的综合能源系统最优协调规划[J].电力科学与技术学报, 2020, 35(1): 3-13.
ZHANG Lijun, WANG Yizheng, CHEN Fei, et al. Optimal coordinated planning of an integrated energy system considering characteristics of energy networks [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1): 3-13.
- [13] 曹严,穆云飞,贾宏杰,等.考虑建设时序的园区综合能源系统多阶段规划[J].中国电机工程学报,2020, 40(21): 6815-6828.
CAO Yan, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Multi-stage Planning of park-level integrated energy system considering construction time sequence [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6815-6828.
- [14] 周长城,马溪原,郭祚刚,等.面向工程应用的用户级综合能源系统规划[J].电工技术学报,2020,35(13): 2843-2854.
ZHOU Changcheng, MA Yuanxi, GUO Zuogang, et al. User-level integrated energy system planning for engineering applications [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(13): 2843-2854.
- [15] 张子阳,张聂鹏,王满商,等.面向可再生能源高比例消纳的综合能源系统优化规划模型研究[J].可再生能源,2020,38(8): 1085-1091.
ZHANG Ziyang, ZHANG Niepeng, WANG Manshang, et al. Research on optimal planning model of integrated energy system for high proportion of renewable energy utilization [J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(8): 1085-1091.
- [16] 国家电网公司发布“碳达峰、碳中和”行动方案[N].国家电网报,2021-03-02(001).
- [17] 程耀华,张宁,康重庆,等.低碳多能源系统的研究框架及展望[J].中国电机工程学报,2017,37(14): 4060-4069+4285.
CHENG Yaohua, ZHANG Ning, KANG Chongqing, et al. Research framework and prospect of low carbon multi-energy system [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 4060-4069+4285.
- [18] 白宏坤,尹硕,李虎军,等.计及碳交易成本的多能源站综合能源系统规划[J].电力科学与技术学报, 2019, 34(1): 11-19.
BAI Hongkun, YING Shuo, LI Hujun, et al. Optimal planning of multi-energy stations considering carbon-trading cost [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1): 11-19.
- [19] Hafez O, Bhattacharya K, Optimal planning and design of a renewable energy based supply system for micro-grids [J]. Renewable Energy, 2012, 45: 7-15.