

引用格式:易 纯,肖 辉,吴公平,等.含电、冷、热、气的区域综合能源系统优化运行[J].电力科学与技术学报,2024,39(4):215-221.

Citation: YI Chun, XIAO Hui, WU Gongping, et al. Optimal operation of regional integrated energy system including electricity, cooling, heating and gas[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(4): 215-221.

含电、冷、热、气的区域综合能源系统优化运行

易 纯,肖 辉,吴公平,曾林俊,施星宇,颜 勤

(长沙理工大学电气与信息工程学院,湖南 长沙 410114)

摘 要:区域综合能源系统(regional integrated energy system, RIES)含有风电、光伏等多种能源、冷热电负荷和蓄电池,具有提升可再生能源利用率等优势。首先,考虑风光出力的不确定性,构建多面体不确定集的鲁棒优化模型并对不确定性进行处理;然后,建立碳排放量最少和运行成本最小的多目标优化模型,引入碳排放惩罚因子,将多目标转换为单目标进行求解;最后,通过实际 RIES 进行仿真验证,仿真结果表明所提方法的准确性与有效性。所建模型可以很好地兼顾系统的环保性和经济性,能够更好地处理不确定性,实现系统的经济优化运行。

关 键 词:区域综合能源系统;鲁棒模型;优化运行;分时电价;多目标问题

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.04.024 中图分类号:TM732 文章编号:1673-9140(2024)04-0215-07

Optimal operation of regional integrated energy system including electricity, cooling, heating and gas

YI Chun, XIAO Hui, WU Gongping, ZENG Linjun, SHI Xingyu, YAN Qin

(School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: A regional integrated energy system (RIES) incorporates various energy sources such as wind and solar power, and cooling, heating and electrical loads, as well as batteries, offering advantages like enhancing the utilization of renewable energy. Firstly, considering the uncertainty of wind and solar power output, a robust optimization model with a polytopic uncertainty set is constructed to handle this uncertainty. Secondly, a multi-objective optimization model is established to minimize carbon emissions and operating costs, and a carbon emission penalty factor is introduced to convert the multi-objective into a single-objective for solution. Finally, simulations are conducted using an actual RIES, and the results demonstrate the accuracy and effectiveness of the proposed method. The model effectively balances the environmental protection and economic aspects of the system, better handles uncertainties, and achieves economic optimization of system operation.

Key words: regional integrated energy system; robust model; optimal operation; time-of-use electricity price; multi-objective problem

随着环境问题日益凸显,可再生能源的发展得到了越来越多的关注,其中,风电和光伏的发展最为迅速,主要因其对全球气候和环境污染的负面影响较小,使得其不断发展。为了提升可再生能源的利用率,利用 RIES 可以实现不同能源之间的梯级利用,从而有效提高系统能源利用率、减少运行成

本等多目标功能,具有经济、环保的特点^[1-2]。

目前,在 RIES 容量配置和优化运行方面,已有不少的研究。文献[3-5]基于多种储能构建了 RIES 运行成本最低的优化模型,但却忽略了风光所具有的不确定性,将对优化结果产生一定的影响。对于 RIES 中多种不确定性带来的影响,常用的建模方法

收稿日期:2023-03-16;修回日期:2023-06-07

基金项目:湖南省自然科学基金(2022JJ40498);长沙市自然科学基金(kq2202213);湖南省自然科学基金优秀青年基金(2024JJ4001);湖南省科技人才托举工程项目(2023TJ-X69);湖南省教育厅优秀基金(22B0306)

通信作者:肖 辉(1975—),女,博士,教授,主要从事电力系统保护与控制研究;E-mail:xiaohui@csust.edu.cn

有区间、随机和鲁棒优化^[6]。文献[7]对区间优化进行扩展,以解决可再生能源的多重不确定性以及应对多目标微电网的调度,然而,使用区间优化处理不确定性时不能保证其全景的可行性^[8]。文献[9]充分考虑了风光具有的不确定性,搭建随机优化模型,但是随机优化需要实际工程中难以获得的数据样本,且场景的数量会对计算速率和结果产生一定的影响^[10]。而鲁棒优化不需要随机优化的真实分布假设也不需要获取概率密度分布的繁琐步骤,可再生能源所具有的不确定性以集合的形式来表示,从而在不确定变量的取值范围内约束条件都能适用^[11]。文献[12]建立了虚拟电厂多目标日前鲁棒优化调度模型,以适应系统中的源-荷不确定性;文献[13]更是提出了一种两阶段可调鲁棒优化方法,用来改善系统中电动汽车充电和风光发电不确定性而恶化的经济,结果表明鲁棒优化方法相对于确定性优化模型表现更好。因此,本文选用鲁棒优化模型来表征风光出力的不确定度。同时,也可以考虑蓄电池加入对RIES运行的影响。蓄电池作为一种电储能装置,可达到降低系统峰谷差的目的^[14]。文献[15-16]仿真结果表明,蓄电池作为RIES能量补充,可以有效降低系统运行成本。

随着研究的不断深入,RIES的研究已经扩展到多目标优化^[17]。文献[18-19]提出了不同的算法来解决运行成本、用户舒适度和能源效率等多目标函数的最优方案集。然而,上述研究的多目标优化问题的目标函数涉及非线性和离散问题,相对复杂,为此,本文建立具有最小运行成本和最小碳排放的多目标优化模型。首先,在传统综合能源系统的基础上加入电储能装置;然后,选用鲁棒优化处理风光出力不确定性的问题,再引入碳排放惩罚因子,将多目标转化为单目标问题进行求解;最后,通过仿真验证所建模型的有效性。

1 RIES运行优化模型

本文构建的RIES主要由电网、风机、光伏阵列、蓄电池、燃气轮机、余热回收装置、热交换器、燃气锅炉、电锅炉、电制冷机、吸收式制冷机等装置组成,如图1所示。工作原理:风电、光伏、燃气轮机和电网一起出力给电力负荷、电力锅炉和电制冷机使用,当系统处于用电高峰期时,增加燃气轮机出力或向电网购电的同时,蓄电池可以向系统放电;当系统处于用电低谷期或用电平时时期时,既可以减少燃气轮机的出力,蓄电池也可以进行充电或出售多

余的电能给电网。无论系统处于哪种时期,都优先消耗可再生能源的出力,再考虑增加燃气轮机出力或向电网购电、售电。燃气轮机在供电的同时,利用余热回收装置,将低品质电能用于供冷和供热。各个设备按供需平衡出力,在不同时间段各个设备的出力不同,通过调节各个设备的出力,达到运行成本最小和碳排放量最少的目的。

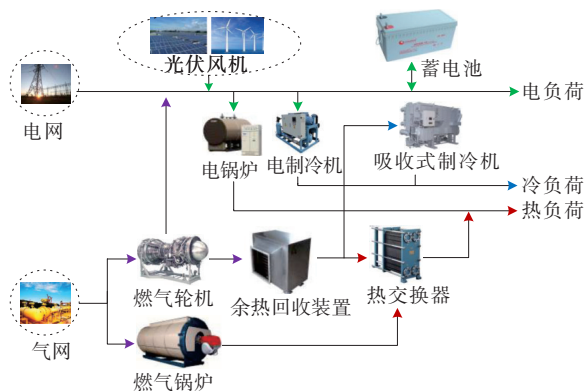


图1 RIES结构框图

Figure 1 Block diagram of RIES

1.1 目标函数

1) 经济性目标。

针对RIES的日前优化运行,本文主要考虑系统的天然气购买费用和电能购买费用作为运行成本,不考虑系统的安装成本。本文的调度周期为1d(24h),单位时间为1h,各设备按供需平衡输出,使总成本最小。RIES的经济目标函数为

$$\begin{cases} F_{do,t} = F_{e,t} + F_{g,t} \\ F_{e,t} = C_{buy,t} \cdot P_{buy,t} + C_{sell,t} \cdot P_{sell,t} \\ F_{g,t} = C_{g,t} \cdot V_{grid,t} \end{cases} \quad (1)$$

式中, $F_{do,t}$ 为系统 t 时段运行成本; $F_{e,t}$ 为系统 t 时段向电网购电成本; $F_{g,t}$ 为系统 t 时段向气网购气成本; $P_{buy,t}$ 、 $P_{sell,t}$ 分别为 t 时段内向电网购电、售电功率; $C_{buy,t}$ 、 $C_{sell,t}$ 分别为 t 时段内向电网购电、售电给电网的单位电价; $C_{g,t}$ 为 t 时段向气网购气的单位气价; $V_{grid,t}$ 为 t 时段向气网购气量。

2) 环保性目标。

整个系统的排放物以 CO_2 为主,以最少碳排放量作为环保性指标,建立目标函数:

$$G_{ec,t} = \partial_e \cdot P_{buy,t} + \partial_g \cdot V_{grid,t} \quad (2)$$

式中, $G_{ec,t}$ 为系统 t 时段碳排放量, ∂_e 、 ∂_g 分别为消耗单位电功率的 CO_2 排放系数、消耗单位体积天然气的 CO_2 排放系数,参考文献[20], ∂_e 取 $0.798 \text{ kg}/(\text{kw} \cdot \text{h})$, ∂_g 取 $2 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

多目标优化求解难度相对较大,本文引入碳排

放惩罚因子,将碳排放量转化为碳排放惩罚费用,环保性目标转化到经济性目标中,即将多目标转化为单目标问题进行求解。则碳惩罚费用为

$$F_{ec,t} = C_{CO_2} G_{ec,t} \quad (3)$$

式中, $F_{ec,t}$ 为系统环境成本也即碳排放惩罚成本; $G_{ec,t}$ 为系统 t 时段碳排放量; C_{CO_2} 为碳排放惩罚因子,取 0.028 元/kg。

因此,系统的总经济成本即为总目标函数:

$$F = \sum_{t=1}^T (F_{ec,t} + F_{do,t}) \quad (4)$$

1.2 约束条件

1) 电功率平衡。平衡表达式为

$$\begin{aligned} P_{grid,t} + P_{WT,t} + P_{PV,t} + P_{GT,t} + P_{dis,t} = \\ P_{EL,t} + P_{EC,t} + P_{EB,t} + P_{cha,t} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{cases} P_{buy,t} = P_{grid,t}, P_{sell,t} = 0, P_{grid,t} > 0 \\ P_{sell,t} = P_{grid,t}, P_{buy,t} = 0, P_{grid,t} < 0 \end{cases}$$

式中, $P_{grid,t}$ 、 $P_{GT,t}$ 、 $P_{EC,t}$ 、 $P_{EL,t}$ 、 $P_{EB,t}$ 分别为 t 时段电网交互功率、燃气轮机出力、电制冷机消耗功率、电力负载功率和电锅炉消耗功率; $P_{WT,t}$ 、 $P_{PV,t}$ 分别为 t 时段风机、光伏出力; $P_{cha,t}$ 、 $P_{dis,t}$ 分别为储电装置 t 时段内的充、放电功率; $P_{buy,t}$ 为 t 时段 RIES 向电网的购电量; $P_{sell,t}$ 为 t 时段 RIES 向电网的售电量。

2) 气功率平衡。平衡表达式为

$$V_{grid,t} = V_{GT,t} + V_{GB,t} \quad (6)$$

式中, $V_{GT,t}$ 、 $V_{GB,t}$ 分别为燃气轮机、燃气锅炉消耗的天天然气量。

① 燃气轮机约束。约束条件为

$$\begin{cases} Q_{GT,t} = P_{GT,t}(1 - \eta_{GT,e} - \eta_{GT,l})/\eta_{GT,e} \\ V_{GT,t} = P_{GT,t}/\eta_{GT,e}L_{HVNG} \\ P_{GT,min} \leq P_{GT,t} \leq P_{GT,max} \end{cases} \quad (7)$$

式中, $Q_{GT,t}$ 为 t 时段燃气轮机的热输出功率; $\eta_{GT,e}$ 、 $\eta_{GT,l}$ 分别为燃气轮的发电效率、热损失系数; L_{HVNG} 为天然气的低位热值; $P_{GT,max}$ 、 $P_{GT,min}$ 分别为燃气轮机输出功率的最大、最小值。

② 燃气锅炉约束。约束条件为

$$\begin{cases} V_{GB,t} = Q_{GB,t}/\eta_{GB}L_{HVNG} \\ Q_{GB,min} \leq Q_{GB,t} \leq Q_{GB,max} \end{cases} \quad (8)$$

式中, $Q_{GB,t}$ 为 t 时段燃气锅炉的热输出功率; η_{GB} 为燃气锅炉的转换效率; $Q_{GB,max}$ 、 $Q_{GB,min}$ 分别为燃气锅炉输出功率的最大、最小值。

3) 热功率平衡。平衡表达式为

$$Q_{EB,t} + Q_{HE,out,t} = Q_{HL,t} \quad (9)$$

式中, $Q_{EB,t}$ 为电锅炉的热输出功率; $Q_{HL,t}$ 为热负荷

的功率需求; $Q_{HE,out,t}$ 为热交换器的输出功率。

① 热交换器约束。约束条件为

$$\begin{cases} Q_{HE,out,t} = \eta_{HE} Q_{HE,in,t} \\ Q_{HE,in,t} = Q_{GT,t} + Q_{GB,t} - Q_{AC,in,t} \\ Q_{HE,out,min} \leq Q_{HE,out,t} \leq Q_{HE,out,max} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $Q_{HE,in,t}$ 、 $Q_{HE,out,t}$ 分别为热交换器输入、输出热功率; $Q_{HE,out,min}$ 、 $Q_{HE,out,max}$ 分别为热交换器输出功率的最小、最大值; $Q_{AC,in,t}$ 为吸收式制冷机的输入功率。

② 电力锅炉约束。约束条件为

$$\begin{cases} Q_{EB,t} = \eta_{EB} P_{EB,t} \\ Q_{EB,min} \leq Q_{EB,t} \leq Q_{EB,max} \end{cases} \quad (11)$$

式中, η_{EB} 为电力锅炉的转换效率; $Q_{EB,max}$ 、 $Q_{EB,min}$ 分别为电力锅炉的输出热功率的最大、最小值。

4) 冷功率平衡。平衡表达式为

$$Q_{EC,out,t} + Q_{AC,out,t} = Q_{CL,t} \quad (12)$$

式中, $Q_{EC,out,t}$ 为电制冷机的输出功率; $Q_{AC,out,t}$ 为吸收式制冷机的输出功率; $Q_{CL,t}$ 为冷负荷的功率需求。

① 电制冷机约束。约束条件为

$$\begin{cases} Q_{EC,out,t} = \eta_{EC} P_{EC,in,t} \\ Q_{EC,out,min} \leq Q_{EC,out,t} \leq Q_{EC,out,max} \end{cases} \quad (13)$$

式中, η_{EC} 为电制冷机转换效率; $Q_{EC,out,max}$ 、 $Q_{EC,out,min}$ 分别为电制冷机输出功率的最大、最小值。

② 吸收式制冷机约束。约束条件为

$$\begin{cases} Q_{AC,out,t} = \eta_{AC} Q_{AC,in,t} \\ Q_{AC,in,min} \leq Q_{AC,in,t} \leq Q_{AC,in,max} \end{cases} \quad (14)$$

式中, η_{AC} 为吸收式制冷机的转换效率; $Q_{AC,in,max}$ 、 $Q_{AC,in,min}$ 分别为吸收式制冷机功率的最大、最小值。

5) 蓄电池约束。控制蓄电池运行时必须考虑其荷电状态 (state of charge, SOC), 其约束条件为

$$\begin{cases} P_{Bat,t} = P_{cha,t} - P_{dis,t} \\ 0 \leq P_{cha,t} \leq 0.25S_{OC,max} \cdot I_{cha,t}/e_{ta,cha} \\ 0 \leq P_{dis,t} \leq 0.25S_{OC,max} \cdot I_{dis,t}/e_{ta,dis} \\ 0 \leq I_{cha,t} + I_{dis,t} \leq 1 \\ 0.3S_{OC,max} \leq S'_{OC} \leq 0.9S_{OC,max} \\ S'_{OC} = -\sum_{i=1}^t P_{dis,i} + \sum_{i=1}^t P_{cha,i} + S_{OC}^0 \\ S_{OC}^{24} = S_{OC}^0 \end{cases} \quad (15)$$

式中, $P_{Bat,t}$ 为蓄电池 t 时段的充放电功率; e_{cha} 、 e_{dis} 分别为蓄电池的充、放电效率; $I_{cha,t}$ 、 $I_{dis,t}$ 分别为 t 时段蓄电池的充、放电标志, 在同一时间段, 蓄电池不能既充电又放电; $S_{OC,max}$ 为蓄电池最大容量, 取 400 kW·h; S'_{OC} 为蓄电池 t 时段的储存容量。

6)其他约束。

①与电网交互的负荷量应低于最大带载容量^[6],则容量约束条件为

$$\begin{cases} -P_{\text{grid,max}} \leq P_{\text{grid},t} \leq P_{\text{grid,max}} \\ P_{\text{grid},t} = I_{\text{buy},t}P_{\text{buy},t} + I_{\text{sell},t}P_{\text{sell},t} \\ 0 \leq I_{\text{buy},t} + I_{\text{sell},t} \leq 1 \end{cases} \quad (16)$$

式中, $P_{\text{grid,max}}$ 为与电网交互功率的上限,取600 kW·h; $I_{\text{buy},t}$ 、 $I_{\text{sell},t}$ 分别为系统向电网购电和售电标志,同一时间段系统不能既向电网购电又售电给电网。

②系统正备用约束。当系统负荷超载时,燃气轮机和电网可以为RIES提供备用^[6]:

$$P_{\text{grid,max}} + P_{\text{GT,max}} + P_{\text{WT},t} + P_{\text{PV},t} \geq (1 + L\%)P_{\text{EL},t} + P_{\text{EC},t} + P_{\text{EB},t} + P_{\text{Bat},t} \quad (17)$$

式中, $L\%$ 表示系统负荷的旋转备用率,取10%。

③系统负备用约束。约束条件为

$$P_{\text{grid,min}} + P_{\text{GT,min}} + P_{\text{WT},t} + P_{\text{PV},t} \leq (1 - L\%)P_{\text{EL},t} + P_{\text{EC},t} + P_{\text{EB},t} + P_{\text{Bat},t} \quad (18)$$

2 构建鲁棒模型

2.1 RIES构建不确定集

由于风光具有不确定性的特点,本文考虑光伏、风电出力的表达式分别为

$$P_{\text{PV},t} = \bar{P}_{\text{PV},t} + \hat{P}_{\text{PV},t} \quad \text{s.t.} \quad \underline{\hat{P}}_{\text{PV},t} \leq \hat{P}_{\text{PV},t} \leq \bar{\hat{P}}_{\text{PV},t} \quad (19)$$

$$P_{\text{WT},t} = \bar{P}_{\text{WT},t} + \hat{P}_{\text{WT},t} \quad \text{s.t.} \quad \underline{\hat{P}}_{\text{WT},t} \leq \hat{P}_{\text{WT},t} \leq \bar{\hat{P}}_{\text{WT},t} \quad (20)$$

式(19)、(20)中, $P_{\text{PV},t}$ 、 $P_{\text{WT},t}$ 分别为光伏电站、风电站 t 时刻出力; $\bar{P}_{\text{PV},t}$ 、 $\hat{P}_{\text{PV},t}$ 分别为光伏预测、实际出力与预测出力的偏差; $\bar{P}_{\text{WT},t}$ 、 $\hat{P}_{\text{WT},t}$ 分别为风机的预测和实际出力的偏差; $\bar{\hat{P}}_{\text{PV},t}$ 、 $\underline{\hat{P}}_{\text{PV},t}$ 分别为 $\hat{P}_{\text{PV},t}$ 的上、下限; $\bar{\hat{P}}_{\text{WT},t}$ 、 $\underline{\hat{P}}_{\text{WT},t}$ 分别为 $\hat{P}_{\text{WT},t}$ 的上、下限。

本文选用低保守度的多面体不确定集描述不确定参数的波动范围^[21],即

$$U = \left\{ \xi \left| \sum_{j \in J_i} |\xi_{ij}| \leq \Gamma_i, |\xi_{ij}| \leq 1, \forall j \in J_i \right. \right\} \quad (21)$$

$$b_{ij,t} = \bar{b}_{ij,t} + \xi_{ij} \hat{b}_{ij,t} \quad (22)$$

式(21)、(22)中, ξ 为随机变量, $\xi_{ij} \in [-1, 1]$; Γ_i 为鲁棒参数, $\Gamma_i \in [0, 2]$; J_i 包括系统内所有不确定参数的不等式约束; $b_{ij,t}$ 为不确定集中不确定参数的矢量; $\bar{b}_{ij,t}$ 为 $b_{ij,t}$ 的预测值; $\hat{b}_{ij,t}$ 为预测值与实际值的差异。

2.2 鲁棒优化

基于上文所述的多面体不确定集,引入辅助决策变量 z_i , $z_i \geq \hat{b}_{ij} |x_0| = \max_j \hat{b}_{ij} |x_0|$,可以将含有风电

和光伏不确定性的约束条件转换成鲁棒约束条件:

$$P_{\text{grid,max}} + P_{\text{GT,max}} + P_{\text{WT},t} + P_{\text{PV},t} + z_1 \Gamma_1 \geq (1 + L\%)P_{\text{EL},t} + P_{\text{EC},t} + P_{\text{EB},t} + P_{\text{Bat},t} \quad (23)$$

$$P_{\text{grid,min}} + P_{\text{GT,min}} + P_{\text{WT},t} + P_{\text{PV},t} + z_2 \Gamma_2 \leq (1 - L\%)P_{\text{EL},t} + P_{\text{EC},t} + P_{\text{EB},t} + P_{\text{Bat},t} \quad (24)$$

3 仿真分析

3.1 算例介绍

可再生能源的供应情况、天气状况、用户侧需求情况等各种因素都会影响RIES的运行^[22]。本文在考虑可再生能源的基础上,选取某RIES的夏季典型日负荷。夏季冷、热、电负荷及风光出力如图2所示;与电网交互采用分时电价,与气网交互采用固定气价,如表1所示;其他设备参数如表2所示。

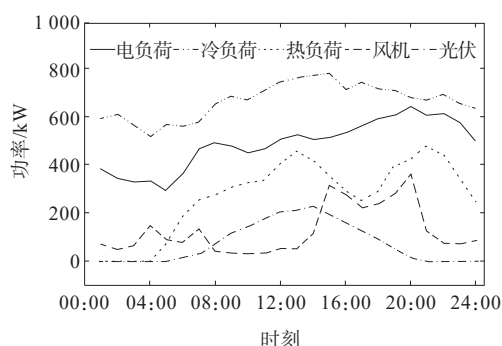


图2 典型日负荷需求及风光出力

Figure 2 Load demand and the output power of wind and photovoltaic on typical day

表1 分时电价与气价

Table 1 Time-of-use electricity price and gas price

		元/(kW·h)	
时段	购电价格	售电价格	
平(07:00—08:00,11:00—18:00)	0.75	0.62	
峰(08:00—11:00,18:00—23:00)	1.19	0.91	
谷(23:00—07:00)	0.42	0.30	
天然气价格/(元·m ⁻³)(00:00—24:00)	3.45	—	

表2 设备的经济技术参数

Table 2 Economic and technical parameters of equipment

设备类型	效率	功率(上/下限)/kW
燃气轮机	0.52(热损失系数)	400/750
	0.32(发电效率)	
电力锅炉	0.87	50/700
吸收式制冷机	1.44	400/680
热交换器	0.86	450/800
燃气锅炉	0.93	70/600
电制冷机	3.10	100/550
蓄电池	0.85(充放电效率)	0/800

由图 2 可知,风机和光伏的输出不足以供应电负荷需求,需要增加其他设备的出力或向电网购电。夏季对冷负荷的需求明显高于对电、热负荷的需求。

3.2 场景说明

为了计及风光出力的不确定性以及蓄电池接入对系统运行的影响,设置 3 种运行方案进行分析,如表 3 所示(“×”表示不接入蓄电池,“√”表示计及风光出力的不确定性);3 种方案下的环境、运行以及总经济成本如表 4 所示。

表 3 运行方案

Table 3 Operation scheme

方案	储能	可再生能源输出不确定性
1	×	×
2	√	×
3	√	√

表 4 不同方案下的经济成本

Table 4 Economic costs under different scheme 元

方案	环境成本	运行成本	总经济成本
1	221.56	9 549.71	9 771.27
2	222.48	9 261.71	9 484.19
3	219.68	9 563.78	9 783.46

由表 4 可知,系统的环境成本远小于运行成本;由方案 1、2 对比可知,考虑蓄电池可以减少系统的运行成本。对于考虑风光出力不确定性的方案 3,系统总经济成本较方案 2 的高,这是由于方案 3 考虑了预测误差,得到的结果具有一定的保守性,系统总的经济成本也随之增加。

3.3 优化运行分析

为考虑风光出力不确定性,以及储能设备的加入对系统运行的影响,选择方案 1~3 下的电、冷、热功率平衡进行对比分析。

1) 不同方案下电功率优化结果分析。

各方案下的电功率优化结果如图 3 所示,可以看出,夏季电负荷峰谷差较大,系统需要的电功率主要由经济性更高的燃气轮机提供。在用电低谷时段(23:00—次日 07:00),系统优先消纳可再生能源的时,通过燃气轮机出力以及向电网购电的方式补充电能的缺额,此时向电网购电的经济性略高于燃气轮机。在用电平时段和高峰时段,系统优先消纳风机和光伏出力的同时,系统电能的缺额全部由经济性较高的燃气轮机来提供,多余的电能出售给电网,以此获得最佳的运行成本。

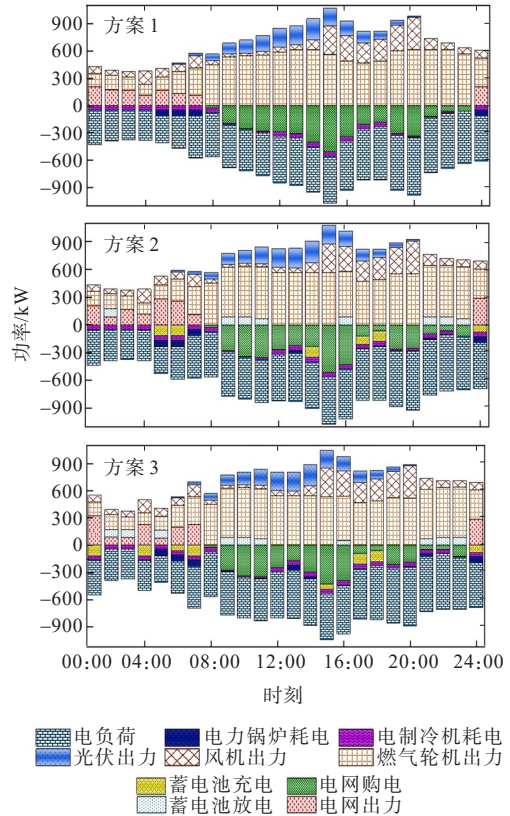


图 3 各方案下的电功率优化结果

Figure 3 Electric power optimization results under each scheme

由方案 1、2 对比可知,蓄电池的加入可以使系统在电价低谷和平时段储存电能,在系统高峰时段释放电能,以此获得更高的经济性;由方案 2、3 对比可知,在考虑风光出力不确定性时,系统向电网购电更多,因此成本更高,并用蓄电池进行储存,来补充电源侧出力的不确定性。

2) 不同方案下冷功率优化结果分析。

不同方案下的冷功率优化结果如图 4 所示,可知夏季对冷功率的负荷需求较高,全天各个时段都有冷功率需求。由于吸收式制冷机比电制冷机经济性更高,因此系统所需要的冷功率主要由吸收式制冷机提供。由方案 1、2 以及方案 2、3 对比可知,蓄电池、可再生能源出力的不确定性对电制冷机和吸收式制冷机的输出均有影响,但是影响较小。

3) 不同方案下热功率优化结果分析。

不同方案下的热功率优化结果如图 5 所示,可知夏季热功率需求没有冷功率需求大,00:00—04:00 时几乎没有热功率需求。热交换器比电力锅炉经济性较高,系统的热能需求主要由热交换器提供。由方案 1、2 以及方案 2、3 对比可知,蓄电池、可再生能源出力的不确定性对电力锅炉和热交换器的输出均有影响,但是影响不大。

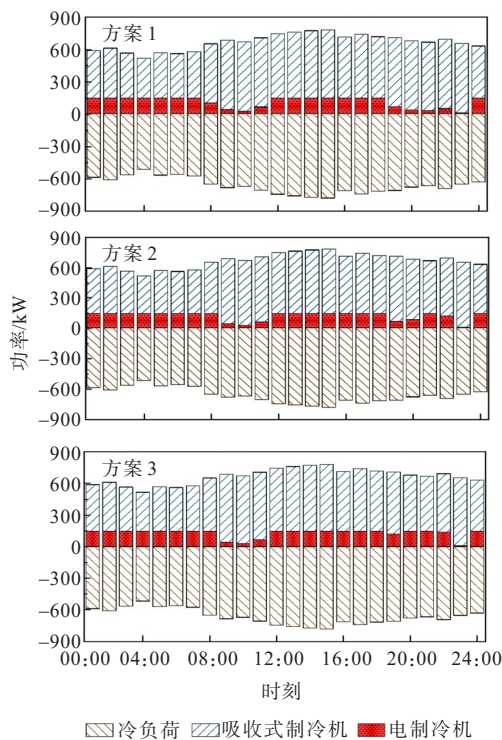


图4 各方案下的冷率优化结果

Figure 4 Cooling power optimization results under each scheme

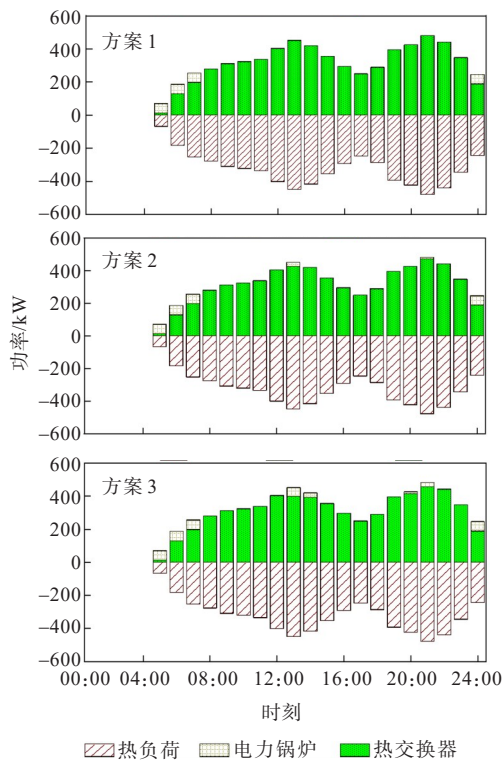


图5 各方案下的热功率优化结果

Figure 5 Heating power optimization results under each scheme

4 结语

本文为了分析风光出力不确定性以及蓄电池对系统运行的影响,研究了某RIES优化运行问题,

通过算例验证了该模型的有效性,结合优化结果可以得到如下结论:

1) 蓄电池的加入可以使系统在电价低谷和平时段储存电能,在高峰时段释放电能,为系统带来一定的经济性与环保性;

2) 电、冷、热、气联合供应,体现了能量梯级利用和多能互补的优势,同时考虑了碳排放问题,仿真结果表明了系统能够兼顾经济性和环保性;

3) 通过构建鲁棒模型来表征风光出力不确定性,结果表明系统的鲁棒性和经济性之间相互制约。

参考文献:

- [1] 张凯杰,丁国锋,闻铭,等.虚拟电厂的优化调度技术与市场机制设计综述[J].综合智慧能源,2022,44(2):60-72. ZHANG Kaijie,DING Guofeng,WEN Ming,et al.Review of optimal dispatching technology and market mechanism design for virtual power plants[J].Integrated Intelligent Energy,2022,44(2):60-72.
- [2] 吴涵,刘洋,杨祺铭,等.计及需求响应的分布鲁棒博弈区域综合能源系统运行优化策略[J].电力建设,2022,43(4):108-118. WU Han,LIU Yang,YANG Qiming,et al.Optimal RIES operation strategy based on distributionally robust game considering demand response[J].Electric Power Construction,2022,43(4):108-118.
- [3] 郭泰,刘忠,王彬,等.多场景通用的综合能源系统标准化信息模型与应用[J].电力系统自动化,2022,46(17):239-247. GUO Tai,LIU Zhong,WANG Bin,et al.Multi-scenario general standardized information model and application of integrated energy system[J].Power system automation,2022,46(17):239-247.
- [4] 白雪婷,杨瑞琪,陈泽春,等.计及综合需求响应的园区综合能源系统优化运行[J].电力科学与技术学报,2021,36(3):27-35. BAI Xueting,YANG Ruiqi,CHEN Zechun,et al.Optimal operation of park integrated energy system considering integrated demand response[J].Journal of Electric Power Science and Technology,2021,36(3):27-35.
- [5] 陈红坤,王雪纯,陈磊.考虑灵活性供给约束的区域综合能源系统节点边际能价分解分析[J].电工技术学报,2023,38(13):3576-3589. CHEN Hongkun,WANG Xuechun,CHEN Lei.Decomposition analysis of node marginal energy price of regional integrated energy system considering flexible supply constraints[J].Transactions of China Electrotechnical Society,2023,38(13):3576-3589.
- [6] 白雪岩,樊艳芳,刘雨佳,等.考虑可靠性及灵活性的风光储虚拟电厂分层容量配置[J].电力系统保护与控制,2022,50(8):11-24.

- BAI Xueyan, FAN Yanfang, LIU Yujia, et al. Hierarchical capacity configuration of wind-solar-storage virtual power plant considering reliability and flexibility[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(8): 11-24.
- [7] LI Y, WANG P, GOOI H B, et al. Multi-objective optimal dispatch of microgrid under uncertainties via interval optimization[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(2): 2046-2058.
- [8] 翟桥柱, 周玉洲, 李轩, 等. 非预期性与全场景可行性: 应对负荷与可再生能源不确定性的现状、挑战与未来[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(20): 6418-6433.
- ZHAI Qiaozhu, ZHOU Yuzhou, LI Xuan, et al. Nonanticipativity and all-scenario-feasibility: state of the art, challenges, and future in dealing with the uncertain load and renewable energy[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(20): 6418-6433.
- [9] LU Z, LIU M, LU W, et al. Stochastic optimization of economic dispatch with wind and photovoltaic energy using the nested sparse grid-based stochastic collocation method[J]. *IEEE Access*, 2019, 7: 91827-91837.
- [10] 周林, 吕智林, 刘斌. 基于无功电流自适应下垂系数控制的多微网调度与控制协调运行[J]. *智慧电力*, 2022, 50(11): 41-47.
- ZHOU Lin, LYU Zhilin, LIU Bin. Coordinated operation of multi-microgrid scheduling and control based on reactive current adaptive droop coefficient control[J]. *Smart Power*, 2022, 50(11): 41-47.
- [11] 彭春华, 刘兵, 孙惠娟. 基于分类不确定性集合的电力系统环境经济鲁棒调度[C]//江西省电机工程学会年会, 江西, 南昌, 2020.
- PENG Chunhua, LIU Bing, SUN Huijuan. Robust scheduling of power system environment and economy based on categorical uncertainty set[C]//Annual meeting of Jiangxi Electrical Engineering Society, Nanchang, China, 2020.
- [12] ZHANG C, XU Y, LI Z, et al. Robustly coordinated operation of a multi-energy microgrid with flexible electric and thermal loads[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2019, 10(3): 2765-2775.
- [13] 秦子恺, 黄婧杰, 周任军, 等. 计及源-荷不确定性的虚拟电厂多目标鲁棒优化调度[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2023, 35(6): 13-21.
- QIN Zikai, HUANG Jingjie, ZHOU Renjun, et al. Multi-objective robust optimal scheduling of virtual power plant considering source-load uncertainty[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2023, 35(6): 13-21.
- [14] 靳雯皓, 刘继春, 刘俊勇. 基于复合储能系统的微网联络线功率优化[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(6): 22-28+33.
- JIN Wenhao, LIU Jichun, LIU Junyong. Microgrid tie line power optimization based on hybrid energy storage system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(6): 22-28+33.
- [15] 吴梦凯, 施进平, 王凯, 等. 碳市场下计及电-氢储能的综合能源系统需求响应策略[J]. *现代电力*, 2023, 40(6): 947-956.
- WU Mengkai, SHI Jinping, WANG Kai, et al. Demand response strategy of integrated energy system considering electricity-hydrogen energy storage under the carbon market[J]. *Modern Electric Power*, 2023, 40(6): 947-956.
- [16] XIAO H, LONG F, ZENG L, et al. Optimal scheduling of regional integrated energy system considering multiple uncertainties and integrated demand response[J]. *Electric Power Systems Research*, 2023, 217: 109169.
- [17] 臧宝志, 吴长龙, 朱宏光, 等. 考虑环保与可靠性成本的园区综合能源系统经济运行技术[J]. *分布式能源*, 2020, 5(4): 18-27.
- ZHANG Baozhi, WU Changlong, ZHU Hongguang, et al. Economic operation technology of integrated community energy system considering environmental protection and reliability cost[J]. *Distributed Energy*, 2020, 5(4): 18-27.
- [18] LU Y, YU X, JIN X, et al. Bi-level optimization framework for buildings to heating grid integration in integrated community energy systems[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2021, 12(2): 860-873.
- [19] 苏慧玲, 杨世海, 陈铭明. 考虑能源效率的综合能源系统多目标优化调度[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2022, 34(2): 130-136.
- SU Huiling, YANG Shihai, CHEN Mingming. Multi-objective optimal scheduling of integrated energy system considering energy efficiency[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2022, 34(2): 130-136.
- [20] 张亚迪, 孙欣, 谢敬东, 等. 考虑电转气和可平移负荷的区域综合能源系统优化运行[J]. *电力建设*, 2020, 41(12): 100-109.
- ZHANG Yadi, SUN Xin, XIE Jingdong, et al. Optimized operation of regional integrated energy system considering power-to-gas and shiftable load[J]. *Electric Power Construction*, 2020, 41(12): 100-109.
- [21] 皇甫成, 郭金智, 贾非, 等. 一种考虑新能源出力相关性及不确定性的分布式发电规划策略[J]. *电网与清洁能源*, 2022, 38(3): 105-110+118.
- HUANGFU Cheng, GUO Jinzhi, JIA Fei, et al. A distributed generation planning strategy considering the correlation and uncertainty of renewable energy output[J]. *Power System and Clean Energy*, 2022, 38(3): 105-110+118.
- [22] 邱发祥, 王明远, 潘广旭, 等. 园区综合能源系统日前优化运行研究[J]. *山东电力技术*, 2021, 48(11): 21-28.
- QIU Faxiang, WANG Mingyuan, PAN Guangxu, et al. Research on day-ahead optimal operation of park integrated energy system[J]. *Shandong Electric Power*, 2021, 48(11): 21-28.