

计及需求响应的随机综合能源系统优化配置

王莹, 高岩

(上海理工大学 管理学院, 上海 200093)

摘要: 为兼顾综合能源系统的经济与环境效益, 提出了含产电放热储能的双目标综合能源系统优化配置模型。首先考虑在不同置信水平下风力发电预测误差, 其次基于用户侧的电荷分类以及用户对室内温度感知敏感度分析电/热需求响应, 最终以经济和环境成本最小为目标, 构建含不确定与电/热需求响应的综合能源系统的双目标优化模型。算例结果表明: 风电预测误差置信水平的增大使系统诸多成本随之提高; 电/热需求响应的引入不仅减少峰谷差, 平滑了需求曲线, 还优化了综合能源系统的设备配置, 降低了综合能源系统的经济和环境成本; 同时验证了该模型的有效性。

关键词: 综合能源系统; 需求响应; 随机性; 优化

中图分类号: TM 73

文献标志码: A

Optimal configuration for integrated energy system considering randomness based on demand response

WANG Ying, GAO Yan

(Business School, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: In order to take into account the economic and environmental benefits of the integrated energy system, an optimization configuration model including power generation, heat release and energy storage based on a dual-objective integrated energy system was proposed. Firstly, the prediction error of wind power under different confidence levels was considered. Secondly, the electrical and thermal demand response was analyzed based on the user electric flexible load and user sensitivity indoor temperature. Finally, to minimize the economic and environmental costs, a double-objective optimization model with uncertainty and demand response based on an integrated energy system was established. The results show that the increase in the confidence level of wind power forecast errors increases the cost of the system. The introduction of electricity/heat demand response not only optimizes the demand curve by reducing the peak-to-valley difference, but also reduces the integrated energy system economy and environment cost by optimizing equipment configuration of the integrated energy system. The effectiveness of the model is verified.

Keywords: integrated energy system; demand response; randomness; optimization

收稿日期: 2021-01-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (72071130)

第一作者: 王莹 (1996-), 女, 博士研究生. 研究方向: 电力系统定价机制. E-mail: 2897852343@qq.com

通信作者: 高岩 (1962-), 男, 教授. 研究方向: 电力系统需求侧管理与定价机制、系统工程、非光滑优化.

E-mail: gaoyan@usst.edu.cn

综合能源系统(integrated energy system, IES)引入电网成为一种必然的发展趋势^[1],其发挥承上启下作用的区域多能源系统由智能配电系统、供热/冷系统等供能网络耦合而成^[2],强调不同能源间的协同优化,打破了原有能源系统以单一能源形式供能的局限,有利于系统的稳定、高效、节能、环保^[3]。

目前,许多文献对于供给侧的园区优化配置问题已经有比较深入的研究,求解该类综合优化问题常用的数学规划方法是混合整数线性规划和混合整数非线性程序仿真^[4]。文献[5]针对电、热、气、冷4种储能方式的IES进行配置策略研究;文献[6]提出了一种实现区域智能系统配置的双层优化模型。然而,仅依靠供给侧的调节能力很难完全实现供需平衡。需求侧管理中的需求响应通过调节电力价格或给予补偿引导用户主动调节负荷,以实现高效用电^[7-8]。文献[9]考虑源荷不确定性和多能互补,通过实时定价机制构建供应商利润最大化以及多个微网福利最大化的双层优化模型,并利用PSO-BBA算法求解;文献[10]借助电价需求响应来增加负荷的调控能力,以减少光伏的不确定性影响;激励型需求响应的研究多是基于负荷柔性展开的,文献[11]和文献[12]分别考虑可平移、可转移电荷;文献[13]在IES中考虑了可削减和可转移负荷。

近来,国内外研究开始考虑热负荷响应^[14-15],而综合考虑多种电负荷分类和热负荷需求响应的研究较少,大部分只是研究设备在各个时间段的出力情况,并且因考虑到储能设备对供能安全可靠性的意义^[16]。目前的研究侧重于只优化储能设备的配置^[17],同时由于优化变量过多,在需求响应的基础上优化配置所有设备的研究较少。

此外,清洁能源被越来越多地引入到电网研究中,而IES有利于缓解风力发电的弃风问题^[5],其中风电并网研究关键是风速概率分布,常用于拟合风速分布的模型有威布尔(Weibull)分布^[18]、瑞利(Rayleigh)分布^[19]等。但由于风的波动、间歇性行为导致的强烈不确定性会造成电力系统不稳定,常用的处理风电不确定的方法有场景分析法^[20]、鲁棒优化^[21]以及机会约束规划^[22],其中机会约束规划中描述风电输出功率预测误差常用正态分布^[23]和Beta分布^[22]。然而,在综合考虑需求侧需求响应和供给侧设备配置优化的同时,又对不确定性问题进行研究的文章较少。

本文首先考虑不同显著水平下正态分布的风电预测功率误差模型;其次从用户侧需求响应的角度考虑可平移、可削减、可转移3种电负荷需求响应以及基于热网传输延时性、用户对温度感知模糊性的热负荷响应;最终将供给侧和需求侧结合,构建了包含投资、运行、用能、补偿费用的系统经济成本、环境成本最小的双目标IES优化模型。算例设置了5种场景,采用约束法处理双目标模型并利用Matlab求解,结果表明:系统发电可靠性、经济成本以及环境成本随着风电预测误差置信水平的提高而增大;电/热负荷需求响应的引入对电负荷需求起到削峰作用,平滑了电负荷曲线,也减少了用户侧热负荷需求,并且在优化系统配置的同时也降低了系统成本和环境成本。

1 IES基本模型

1.1 风电并网不确定

描述风速分布的具体模型为^[18]

$$f(v) = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} e^{-(v/c)^k} \quad (1)$$

式中: v 表示风速; c , k 分别为形状参数、规模参数。

如果取每个间隔的平均值作为输出风速,则风电机组输出功率可由分段函数表示为

$$g_{W,t}^* = \begin{cases} 0, & 0 \leq v_t \leq v_{in}, v_t > v_{out} \\ \frac{v_t - v_{in}}{v_{rated} - v_{in}} g_R, & v_{rated} \leq v_t \leq v_{out} \\ g_R, & v_{in} \leq v_t \leq v_{rated} \end{cases} \quad (2)$$

式中:各变量下标的字符 t 表示第 t 个时刻, $g_{W,t}^*$, g_R 分别为风电机组预测出力、额定容量; v_t , v_{rated} , v_{in} , v_{out} 分别为实时、额定、切入、切出风速^[19]。

引入随机变量风电的预测误差项 ε 描述风电出力的不确定性,即

$$\varepsilon = g_{W,t}^0 - g_{W,t}^* \quad (3)$$

式中, $g_{W,t}^0$ 为风电功率的实际值。假设它服从 $\varepsilon \sim N\left(0, \frac{1}{5} g_{W,t}^* + \frac{1}{50} g_m\right)$ 的正态分布^[23], g_m 为风电总装机容量。

将不同置信水平下风电出力约束转化为等价的确定性模型进行求解,得到

$$P' \{g_{W,t}^0 \geq p_{W,t}\} \geq \rho \quad (4)$$

$$g_{W,t} = \max p_{W,t} \quad (5)$$

式中: P' 为风电机组出力大于可接受出力值的概

率; $g_{w,t}$ 表示风电机组出力值; $p_{w,t}$ 表示可接受的风电机组出力值; ρ 为置信水平。

1.2 电/热需求响应

1.2.1 热需求响应

假设热需求仅考虑室内建筑物供暖,且用建筑物的一阶热力学模型计算室内温度变化^[14],即

$$T_{in,t+1} = T_{in,t}e^{-\frac{\Delta t}{\tau}} + (RQ_{h,t}^{\text{load}} + T_{out,t})\left(1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau}}\right) \quad (6)$$

式中: $\tau = RC_{\text{air}}$, R 为建筑物的等效电阻, $^{\circ}\text{C}/\text{kW}$, C_{air} 为室内空气热容, $(\text{kW}\cdot\text{h})/^{\circ}\text{C}$; $T_{in,t}$, $T_{in,t+1}$ 分别为 t , $t+1$ 时段室内温度; $T_{out,t}$ 为室外温度; $Q_{h,t}^{\text{load}}$ 为热需求, kW ; Δt 为调度时段时长, h 。

记 $k = e^{-\Delta t/\tau}$,由式(6)可得

$$Q_{h,t}^{\text{load}} = \frac{1}{R} \left(\frac{T_{in,t+1} - kT_{in,t}}{1 - k} - T_{out,t} \right) \quad (7)$$

室内温度需满足 $T_{\min} \leq T_{in,t} \leq T_{\max}$,其中, $T_{\max}$, $T_{\min}$ 分别为满足人体舒适度的室内温度上、下限^[14]。

1.2.2 电需求响应

假设典型日内只存在一段持续时间是 t_s 的可平移负荷,平移后的初始平移时段为 t_{sh} ^[17],则

$$\sum_{t=t_{\text{sh}}}^{t_{\text{sh}}+t_s-1} y_t^{\text{shift}} = t_s, \quad t \in [t_{\text{sh}}, t_{\text{sh}}+1] \quad (8)$$

式中: $[t_{\text{sh}}, t_{\text{sh}}+1]$ 表示负荷对应的可平移时间区间; y_t^{shift} 为 t 时刻刻画可平移负荷的0-1状态变量, $y_t^{\text{shift}} = 1$ 表示存在可平移负荷。

响应后可平移负荷为

$$P_t^{\text{shift}} = y_t^{\text{shift}} L_t^{\text{shift}} \quad (9)$$

式中, L_t^{shift} , P_t^{shift} 分别为需求响应前、后可平移负荷量。

响应后的负荷平移补偿费用 C_{shift} 为^[17]

$$C_{\text{shift}} = c_{\text{shift}} \sum_{t=t_{\text{sh}}}^{t_{\text{sh}}+t_s-1} P_t^{\text{shift}} \Delta t \quad (10)$$

式中, c_{shift} 为负荷平移的单位补偿费用。

可转移负荷不会在同一时段既转移出去又转移进来,即

$$\sum_{t=1}^T y_t^{\text{tran-}} y_t^{\text{tran+}} = 0, \quad t \in [t_{\text{tr-}}, t_{\text{tr+}}] \quad (11)$$

式中: T 为典型日总的时间段,取值为24 h; $y_t^{\text{tran-}}$, $y_t^{\text{tran+}}$ 分别为刻画可转移负荷转出、转入的0-1状态变量; $[t_{\text{tr-}}, t_{\text{tr+}}]$ 表示负荷对应的可转移时间区间。

转移前后总可转移负荷不变,即

$$\sum_{t=1}^T P_t^{\text{tran}} = \sum_{t=1}^T L_t^{\text{tran}} \quad (12)$$

式中, L_t^{tran} , P_t^{tran} 分别为需求响应前、后的可平移负荷量。

可转移负荷受最小持续转入时间 $T_{\min}^{\text{tran}}$ 的约束,即

$$\sum_{\tau=t}^{t+T_{\min}^{\text{tran}}-1} y_{\tau}^{\text{tran+}} \geq T_{\min}^{\text{tran}} (y_t^{\text{tran+}} - y_{t-1}^{\text{tran+}}), \quad t = t_{\text{tr-}}, t_{\text{tr-}} + 1, \dots, t_{\text{tr+}} - T_{\min}^{\text{tran}} + 1 \quad (13)$$

负荷转移的补偿费用为

$$C_{\text{tran}} = c_{\text{tran}} \sum_{t=t_{\text{tr-}}}^{t_{\text{tr+}}} y_t^{\text{tran+}} P_t^{\text{shift}} \quad (14)$$

式中, c_{tran} 为负荷转移的单位补偿费用^[13]。

削减后的可削减负荷为

$$P_t^{\text{cut}} = (1 - \alpha_t y_t^{\text{cut}}) L_t^{\text{cut}} \quad (15)$$

式中: L_t^{cut} , P_t^{cut} 分别为响应前、后的可削减负荷; y_t^{cut} 为 t 时段刻画可削减负荷的0-1状态变量; α_t 为削减系数。

可削减负荷需要满足的最小持续时间 $T_{\min}^{\text{cut}}$ 和最大持续时间 $T_{\max}^{\text{cut}}$ 约束为

$$\sum_{\tau=t}^{t+T_{\min}^{\text{cut}}-1} y_{\tau}^{\text{cut}} \geq T_{\min}^{\text{cut}} (y_t^{\text{cut}} - y_{t-1}^{\text{cut}}), \quad t = 1, 2, \dots, T - T_{\min}^{\text{cut}} + 1 \quad (16)$$

$$\sum_{\tau=t}^{t+T_{\max}^{\text{cut}}-1} (1 - y_{\tau}^{\text{cut}}) \geq 1, \quad t = 1, 2, \dots, T - T_{\max}^{\text{cut}} \quad (17)$$

可削减负荷的补偿费用为

$$C_{\text{cut}} = c_{\text{cut}} \sum_{t=1}^T \alpha_t y_t^{\text{cut}} L_t^{\text{cut}} \quad (18)$$

式中, c_{cut} 为负荷削减的单位补偿费用^[13]。

1.3 IES设备模型

燃气轮机、余热锅炉、电锅炉、燃气锅炉发电产热设备运行的数学公式为^[17]

$$\begin{cases} Q_{GT,t} = v_{GT} P_{GT,t} \\ P_{GT,t} = \eta_{GT} P_{GT,t}^f \\ Q_{HB,t} = \eta_{HB} Q_{GT,t} \\ Q_{EB,t} = \eta_{EB} P_{EB,t} \\ Q_{GB,t} = \eta_{GB} Q_{GB,t}^f \end{cases} \quad (19)$$

式中: $P_{GT,t}^f$, $P_{GT,t}$ 分别为燃气轮机的输入、输出电功率; $Q_{GT,t}$ 为燃气轮机发电产生的余热; η_{GT} , v_{GT} 分别为燃气轮机输出电效率、热电比; η_{HB} 为余热锅炉回收效率; $Q_{HB,t}$ 为余热锅炉的输出功率; $P_{EB,t}$, $Q_{EB,t}$ 分别为电锅炉的输入、输出功率; $Q_{GB,t}^f$, $Q_{GB,t}$ 分别为燃气锅炉的输入、输出功率; η_{EB} , η_{GB} 分别为电锅炉、燃气锅炉的热效率。

储能设备包含蓄电池 BD, 储热箱 HS, 储能设备每个时刻荷电状态 $S_{i,t}$ 为

$$S_{i,t} = (1 - \sigma_i) S_{i,t-1} + \left(P_{i,t}^c \eta_i^c - \frac{P_{i,t}^d}{\eta_i^d} \right) \Delta t \quad (20)$$

式中: $P_{i,t}^c$, $P_{i,t}^d$ 分别为设备 i 的充、放量; σ_i 为自耗率; η_i^c , η_i^d 分别为充、放能效率^[17]。

2 IES 配置优化建模

2.1 IES 运行结构

构建的 IES 模型包含风力发电机、燃气轮机、燃气锅炉、余热锅炉、蓄电池、储热罐和电热负荷, 如图 1 所示。

2.2 目标函数

综合考虑包含投资 C_{inv} , 用能 C_{fue} , 运行 C_{ope} , 补偿费用 C_{com} 之和的系统产电以及环境成本 C_{wr} , 建立目标函数来优化 IRES 中设备配置容量, 目标函数为

$$\begin{cases} \min(C_1, C_2) \\ C_1 = C_{inv} + C_{ope} + C_{fue} + C_{com} \\ C_2 = C_{wr} \end{cases}$$

a. 设备年等额投资成本。

$$C_{inv} = \sum_{i=1}^I (\beta_i + f_i) c_i P_i^r \quad (21)$$

式中: I 为设备的总数目; P_i^r 为设备 i 的配置容量;

c_i 为设备 i 的单位投资成本; β_i , f_i 分别为设备年等额投资折算系数、固定运行维护成本系数。

设备年等额投资折算系数为

$$\beta_i = \frac{m(1+m)^{N_i}}{(1+m)^{N_i} - 1} \quad (22)$$

式中: m 为贴现率; N_i 为设备 i 的寿命。

b. 设备可变运行维护成本。

$$C_{ope} = \sum_{i=1}^I a_i P_{i,t} \quad (23)$$

式中: $P_{i,t}$ 为设备 i 在时段 t 的出力值; a_i 为可变运行维护成本系数。

c. 用能成本。

$$C_{fue} = \sum_t (c_{e,t}^b P_{e,t}^b - c_{e,t}^s P_{e,t}^s) + \sum_t \left(c_{gas} \sum_{x=1}^X P_{gas,t} \right) \quad (24)$$

式中: $P_{e,t}^b$, $P_{e,t}^s$, $c_{e,t}^b$, $c_{e,t}^s$ 分别为 t 时刻从外网买电量、卖电量、购电价、售电价; c_{gas} 为天然气的价格; X 为消耗天然气的设备总台数; $P_{gas,t}$ 为消耗天然气设备的输入功率^[24]。

d. 补偿费用。

$$C_{com} = C_{shift} + C_{tran} + C_{cut} \quad (25)$$

e. 环境成本。

$$C_{wr} = s \sum_t (pCO_x RCO_{x,t} + pSO_x RSO_{x,t} + pNO_x RNO_{x,t}) \quad (26)$$

式中: s 为一年内典型日的天数; $RCO_{x,t}$, $RSO_{x,t}$, $RNO_{x,t}$, pCO_x , pSO_x , pNO_x 分别为碳化物、硫化物、氮化物的排放量以及单位除污价格, 具体计算为

$$\begin{cases} RCO_{x,t} = (\theta_{GT}^{CO_x} P_{GT,t} + \theta_{GB}^{CO_x} Q_{GB,t} + \theta_e^{CO_x} (P_{e,t}^b - P_{e,t}^s)) \Delta t \\ RSO_{x,t} = (\theta_{GT}^{SO_x} P_{GT,t} + \theta_{GB}^{SO_x} Q_{GB,t} + \theta_e^{SO_x} (P_{e,t}^b - P_{e,t}^s)) \Delta t \\ RNO_{x,t} = (\theta_{GT}^{NO_x} P_{GT,t} + \theta_{GB}^{NO_x} Q_{GB,t} + \theta_e^{NO_x} (P_{e,t}^b - P_{e,t}^s)) \Delta t \end{cases} \quad (27)$$

式中, $\theta_{GT}^{CO_x}$, $\theta_{GT}^{SO_x}$, $\theta_{GT}^{NO_x}$, $\theta_{GB}^{CO_x}$, $\theta_{GB}^{SO_x}$, $\theta_{GB}^{NO_x}$, $\theta_e^{CO_x}$,

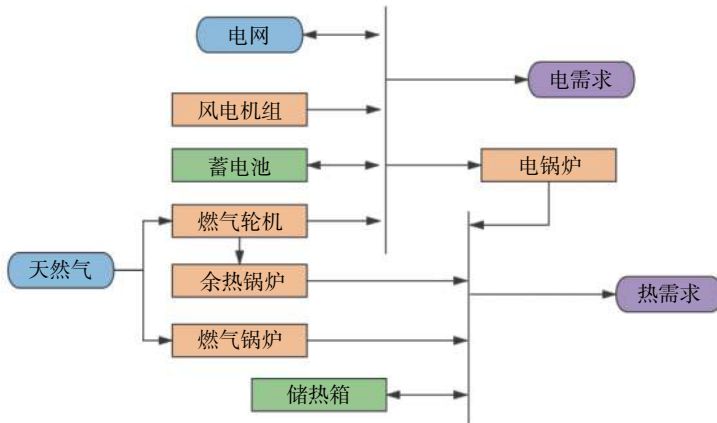


图 1 IES 运行结构

Fig.1 System structure of IES

$\theta_e^{\text{SO}_x}$, $\theta_e^{\text{NO}_x}$ 分别为燃气轮机、燃气锅炉、外网的碳化物、硫化物、氮化物污染物排放因子^[25]。

2.3 约束条件

每个时刻系统电热供需能量平衡，即

$$\begin{cases} g_{W,t} + (P_{e,t}^b - P_{e,t}^s) + (P_{BD,t}^d - P_{BD,t}^c) + P_{GT,t} = Q_{e,t}^{\text{load}} \\ Q_{GB,t} + Q_{EB,t} + (P_{HS,t}^d - P_{HS,t}^c) + Q_{HB,t} = Q_{h,t}^{\text{load}} \end{cases} \quad (28)$$

其中，电负荷 $Q_{e,t}^{\text{load}}$ 为

$$Q_{e,t}^{\text{load}} = P_t^{\text{bas}} + P_t^{\text{shift}} + P_t^{\text{tran}} + P_t^{\text{cut}} \quad (29)$$

式中， P_t^{bas} 表示基础电负荷。所有设备出力值都不得超过其配置容量。此外，储能设备每个时段不能同时充放电，荷电量和充放电功率有上下限；充放电周期取24 h，为了延长设备寿命，规定每个周期始末保持相同的荷电量。

$$\begin{cases} \lambda_{t,\min} W_i \leq S_{i,t} \leq \lambda_{t,\max} W_i \\ 0 \leq P_{i,t}^d \leq P_{i,\max}^d, 0 \leq P_{i,t}^c \leq P_{i,\max}^c \\ P_{i,t}^d P_{i,t}^c = 0 \\ S_{i,1} = S_{i,T} \end{cases} \quad (30)$$

式中： $\lambda_{t,\max}$, $\lambda_{t,\min}$ 为储能设备*i*的荷电量上下限系数； $P_{i,\max}^c$, $P_{i,\max}^d$ 分别为最大充、放电量； W_i 为配置容量^[17]。

2.4 求解方法

所构建的考虑不确定性和需求响应模型是0-1混合整数非线性规划模型，即

$$\begin{aligned} &\min(F_1, F_2) \\ \text{s.t.} \quad &\begin{cases} h_i(x) = 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \\ g_j(x) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \\ x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ x_k \in \{0, 1\} \end{cases} \end{aligned}$$

式中： F_1 , F_2 为目标函数； x 为优化变量； $h_i(x) = 0$ 为等式约束； $g_j(x) \leq 0$ 为不等式约束； $x_{\min}$, $x_{\max}$ 分别为变量的上下限； x_k 为状态变量。

构建的IES模型中优化变量为设备配置容量，采用约束法进行求解，具体方法是将第二个环境成本作为约束处理，然后使用Matlab软件平台编写模型程序并调用Yalmip进行求解。

3 算例分析

3.1 算例说明

算例仿真一个已配置500 kW风电机组，且含500个用户的工业园区，需要优化配置的设备是燃气轮机、燃气锅炉、余热锅炉、蓄电池、储热罐以及电锅炉，相关参数见表1、表2^[17,24]。典型日风速数据见图2；外网买卖电实行分时定价，见表3；设外网买电上限取值为600 kW，天然气价格为0.387元/(kW·h)^[24]。表3中峰、平、谷对应的时间为国家制定电价时确定的时间段，不同于本文算例中用户实际的峰、平、谷时间段。

碳化物、硫化物、氮化物的污染排放系数^[25]、单位除污成本^[26]分别见表4。典型日电负荷构成相关参数见表5^[17]； R , C_{air} 为常数，取值分别为18°C/kW、0.525(kW·h)/°C，典型日室外温度见图3，满足人体舒适度的室内温度范围为19~23°C，最适温度为21°C；年贴现率*m*为6%。

为对比分析优化后设备配置容量以及成本，

表1 设备的经济及技术参数

Tab.1 Economic and technical parameters of equipment

设备	电效率	热效率	单位投资成本/(元·kW ⁻¹)	固定维护成本系数	可变维护成本系数	寿命/a
燃气轮机	0.3	0.4	7 786	0.02	0.059	15
燃气锅炉	—	0.9	782	0.04	0.026	15
余热锅炉	—	0.8	122	0.04	0.013	15
电锅炉	—	0.95	1 047	0.04	0.013	15
风电机组	—	—	—	—	0.020	20

表2 储能设备的经济及技术参数

Tab.2 Economic and technical parameters of storage equipment

设备	充放率	自耗率	充放上限系数率	初始储能系数	储能上下限系数	投资/(元·kW ⁻¹)	维护/(元·kW ⁻¹)	寿命/a
蓄电池	0.9	0.001	0.25	0.4	[0.2, 0.8]	600	0.018	10
储热箱	0.9	0.01	0.25	0.4	[0.1, 0.8]	450	0.016	10

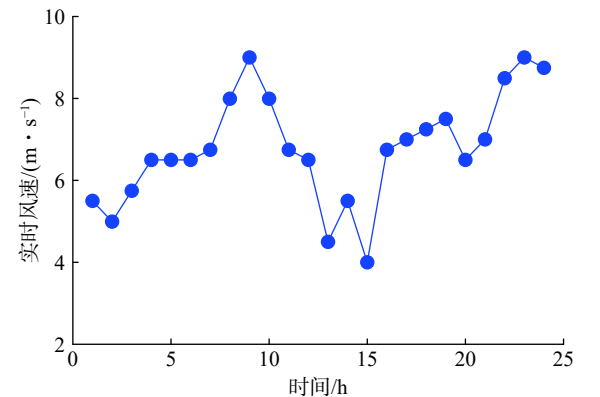


图2 典型日实时风速

Fig. 2 Real-time wind speed in typical days

表3 分时电价

Tab.3 Time-of-use price

时段名称	购电价格/ (元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	售电价格/ (元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	时间
峰	1.3458	0.6729	8:00—11:00
			18:00—23:00
平	0.9003	0.4513	7:00—8:00
谷	0.4748	0.2374	11:00—18:00
			23:00—7:00

表4 设备污染物排放系数以及除污成本

Tab.4 Pollutant discharge parameters and cost of pollutant discharge and treatment

污染物	电厂/ (g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	燃气轮机/ (g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	燃气锅炉/ (g·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)	单位除污成本/ (kg·元 ⁻¹)
碳化物	543	724	254	543
硫化物	0.15	0.2	0.54	724
氮化物	0.0032	0.0036	0.764	254

表5 电力柔性负荷参数

Tab.5 Electric flexible load parameters

类型	参数
可平移负荷	$[t_{sh+}, t_{sh-}] = [5, 24], t_s = 3 \text{ h}, t_{sh} = 18 \text{ h}, c_{shift} = 0.05 \text{ kW} \cdot \text{h}$
可转移负荷	$[t_{tr+}, t_{tr-}] = [5, 22], T_{min}^{tran} = 2 \text{ h}, c_{tran} = 0.08 \text{ kW} \cdot \text{h}$
可削减负荷	$T_{min}^{cut} = 2 \text{ h}, T_{max}^{cut} = 5 \text{ h}, c_{cut} = 0.3 \text{ kW} \cdot \text{h}$

验证 IES 模型的有效性，算例场景设置如表 6 所示。

3.2 仿真结果

3.2.1 不同置信水平结果分析

显著性水平越高说明风电机组实际发电功率小于预测发电功率的可能性越小，由图 4 可得显著性水平越高，考虑预测误差后的风电预测出力越小。同时，随着置信水平的升高，系统运行经济成本以及环境成本增大，如表 7 所示。显著性水平高说明用户对系统发电可靠性要求更高，需

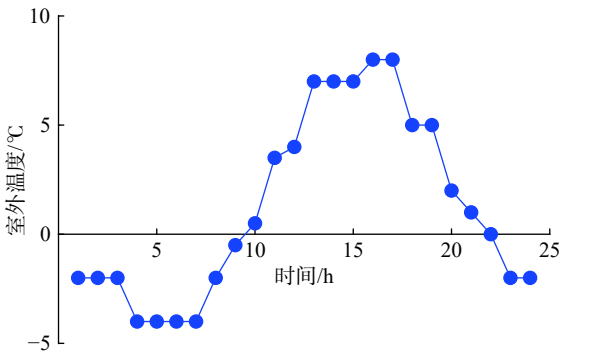


图3 典型日室外温度

Fig. 3 Outdoor temperature in typical days

表6 场景信息

Tab.6 Case information

场景特征	场景				
	1	2	3	4	5
不确定		√	√		√
显著水平	0.5	0.7	0.9	0.5	0.9
电/热需求响应				√	√

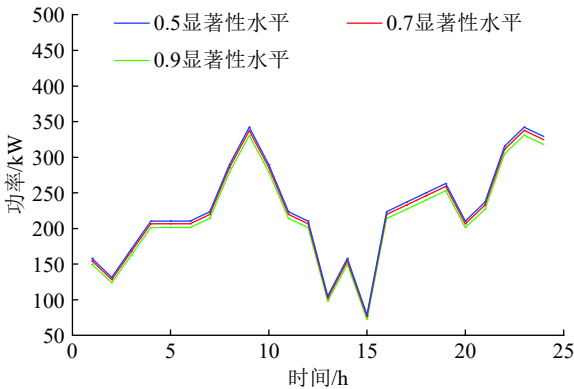


图4 不同显著水平下的风电出力

Fig. 4 Wind power of different significant levels

要燃气轮机等设备更多出力，系统会因此产生更多的成本；反之，随着置信水平的降低，传统的火力发电配置下降，可靠性和成本随之减少。

3.2.2 需求响应结果分析

a. 电需求响应结果分析。

由图 5 可以看出，考虑电负荷需求响应后降低了电需求峰谷差，尤其是在时段 8—12 和 18—21 的实际用电高峰时段，起到了削峰作用，平滑了电负荷曲线。

对比图 6 与图 7，考虑需求响应负荷后的可平移负荷从 18—20 的实际高峰用电时段转移到了

表 7 不同风电出力置信水平成本

Tab.7 Costs in different wind power significant levels

场景	显著水平	系统发电成本/万元	环境成本/万元	总成本/万元
1	0.5	664.27	37.34	701.61
2	0.7	666.96	37.89	704.85
3	0.9	672.34	38.05	710.39

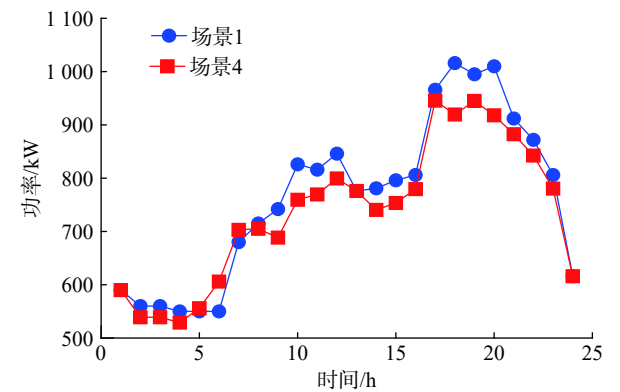


图 5 场景 1 和场景 4 的电负荷

Fig. 5 Power load in scenario 1 and scenario 4

13—15 的实际用电平时时段, 缓解晚高峰用电紧张。所以从并网的角度减少了能源系统外网买卖电的成本; 可转移负荷从时段 18—20、时段 7—10 转移到了时段 5—6、时段 14—17, 即从实际用电的高峰时段转移到其他时段, 满足最大最小持续时间约束, 使电负荷曲线变得更加平缓, 减少了实际用电量较高时段的设备出力, 节约了综合能源系统设备的运行成本。在满足最大削减时间约束情况下, 用户进行了负荷削减, 不仅进一步缓解高峰时段用电紧张、减少设备出力和外网买卖电量, 降低发电成本, 还引导用户节约用电, 减少系统发电量, 进而减少环境污染。

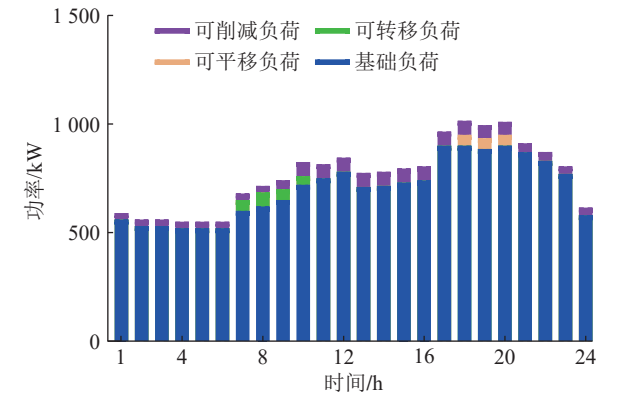


图 6 优化前电负荷组成

Fig. 6 Power load composition without optimization

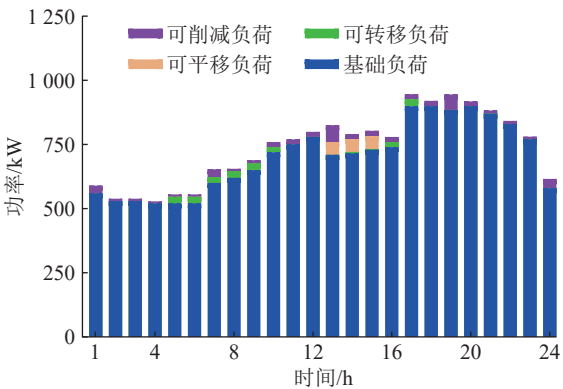


图 7 场景 4 下优化后的电负荷

Fig. 7 Optimized power load in scenario 4

b. 热需求响应结果分析。

建筑物温度不考虑热柔性需求响应时始终保持在人体最适温度 21℃, 考虑热负荷需求响应后室内温度在用户舒适温度 19~23℃范围内波动, 如图 8 所示。结合图 9 可知部分时段考虑热负荷响应的室内温度变化会滞后于热负荷需求变化, 因为本文模型选用的是建筑物的一阶热力学模型。具体来看, 室内温度在 2—9 时段都是维持在 18℃, 这样既满足了用户对温度的舒适度要求, 也减少了热负荷需求。在 10—13 时段, 随着白天室外温度的不断升高, 加上建筑物本身的墙体保温特性, 室内的温度也不断升高, 则用户需求的热负荷减少, 第 13 时段达到用户最适温度范围上限 21℃。之后, 随着室外温度降低建筑物也在损耗热量, 直到第 16 时段达到用户最适温度范围下限 18℃, 然后系统产热增加更多热量维持室温。此外, 由于考虑满足典型日始末时段温度保持一致的假设, 产热设备出力在始末时段附近需进行较大幅度供热功率的调整。

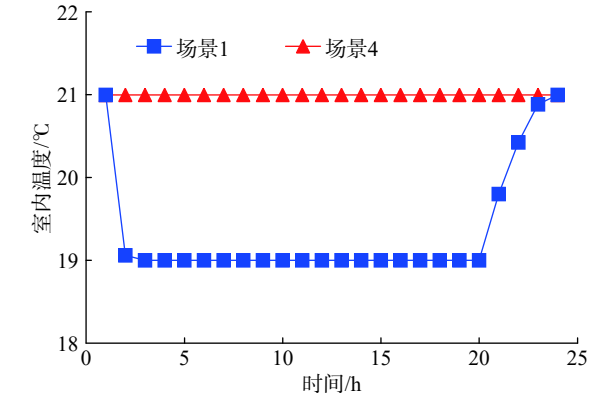


图 8 场景 1 和场景 4 的室内温度

Fig. 8 Indoor temperature in scenario 1 and scenario 4

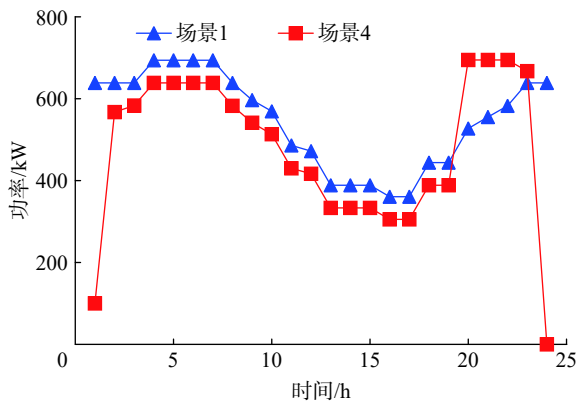


图9 场景1和场景4的热负荷

Fig. 9 Heat load in scenario 1 and scenario 4

3.2.3 不同场景优化结果对比

系统在考虑风电不确定情况下对设备配置容量要求更高，尤其是储电设备。因此，为了满足更高显著性水平要求下综合能源系统供电的可靠性，需要增加储能设备配置容量，如表8所示。结合表9可知，随着显著性水平的增加，年等额投资成本、从外网买卖电的成本和环境成本逐渐增大，即总成本是增加的。

表8 不同场景的优化配置

Tab.8 Optimized capacities of different scenarios kW

场景	燃气轮机	燃气锅炉	余热锅炉	蓄电池	储热箱
1	615	639	246	3977	2556
2	493	682	197	4929	2556
3	515	804	206	5107	2556
4	303	681	121	3600	2200
5	206	796	82	3593	2200

在均不考虑风电预测误差情况下，加入电热负荷需求响应，使除燃气锅炉外的设备配置容量明显下降。其中，燃气轮机下降48.3%，蓄电池下降9.5%，如表8所示。这说明用户对补偿激励的电负荷响应参与度比较大，同时电需求响应缓解了高峰时段用电紧张问题，平滑了电负荷需求曲线。因为系统在热需求响应中考虑到建筑物的保温特性以及用户舒适度范围，所以用户对热负荷的需求更加符合实际，设备配置优化结果也发生了相应变化。由表8可得优化后余热锅炉配置容量下降50.8%，且降低了储热箱配置容量，产热更多的是燃气锅炉。结合表9可知，考虑电热负荷需求响应后虽然增加了补偿费用，但总成本下降了7.3%。其中，优化后设备配置容量的降低使年

表9 不同场景的优化成本

Tab.9 Optimized costs of different scenarios 万元

场景	年等额投资	可变维护	天然气	买卖电	环境	补偿	总成本
1	113.29	24.73	275.97	250.27	37.34	0	701.61
2	111.30	23.68	259.01	272.96	37.89	0	704.85
3	116.16	24.52	262.57	269.09	38.05	0	710.39
4	94.79	21.78	239.05	253.20	33.48	7.72	650.03
5	73.09	19.11	196.96	330.08	36.31	7.72	663.27

等额投资成本下降35.4%，可变运行维护成本下降23%，使用天然气成本下降7.7%，环境成本下降了10.4%。在0.9显著水平下考虑电/热需求响应，燃气轮机、余热锅炉、燃气锅炉、蓄电池以及储热箱的配置容量都明显减少，同时系统设备年等额投资、运行、维护、用能经济成本以及环境成本也是明显降低的。

此外，更高显著性水平下的风电不确定性使IES外网买电量增加30%，买卖电的成本明显增加。同时，考虑到从外网买的电量也产生环境成本，所以表中环境成本增加了7.8%。0.9显著水平比0.5显著水平下的总成本增加了2%，如表9所示。对比场景5和初始场景1可知，考虑风电不确定、电热负荷需求响应后总成本下降了5.3%，小于场景4相对于场景1下降的7.3%，是为满足0.9显著水平下系统可靠性要求而多付出的成本。

4 结 论

针对综合能源系统问题，本文引入置信水平考虑风电预测误差的不确定，综合考虑可削减、可平移、可转移的电需求响应和用户温度感知模糊性的热需求响应，构建一个考虑电/热负荷需求响应的随机综合能源系统优化配置双目标模型。由算例分析可得：考虑可削减、可平移、可转移的电负荷需求响应减少了设备出力和外网买卖电，进而减少系统设备发电成本，同时缓解高峰时段用电紧张问题，平滑了电负荷曲线；基于人体舒适度和建筑物物理特性考虑热负荷需求响应减少了用户的热负荷需求，进而减少供热设备的压力、系统成本以及环境成本，有利于节能减排。此外，置信水平的大小决定了系统发电成本，决策者对于不同综合能源系统要结合实际情况选择恰当的置信水平，实现经济成本、环境成本的协调统一。总之，通过算例分析验证了所构

建模型统筹兼顾能源供给侧、需求侧和社会环境的有效性,后续研究一方面可以再加入负荷侧不确定性进行优化,另一方面可以考虑多区域综合能源系统协同规划配置问题。

参考文献:

- [1] WU D, HAN Z H, LIU Z J, et al. Comparative study of optimization method and optimal operation strategy for multi-scenario integrated energy system[J]. *Energy*, 2021, 217: 119311.
- [2] 程浩忠, 胡泉, 王莉, 等. 区域综合能源系统规划研究综述[J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(7): 1-13.
- [3] HE B J. Towards the next generation of green building for urban heat island mitigation: Zero UHI impact building[J]. *Sustainable Cities and Society*, 219, 50-101647.
- [4] ZHU X J, ZHAN X Y, LIANG H, et al. The optimal design and operation strategy of renewable energy-CCHP coupled system applied in five building objects[J]. *Renewable Energy*, 2020, 146: 2700-2715.
- [5] LUO F Z, SHAO J P, JIAO Z, et al. Research on optimal allocation strategy of multiple energy storage in regional integrated energy system based on operation benefit increment[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 125: 106376.
- [6] WANG Y L, WANG Y D, HUANG Y J, et al. Planning and operation method of the regional integrated energy system considering economy and environment[J]. *Energy*, 2019, 171: 731-750.
- [7] 高岩. 智能电网实时电价社会福利最大化模型的研究[J]. *中国管理科学*, 2020, 28(10): 201-209.
- [8] 张莉, 高岩, 刘松涛, 等. 具有时间耦合约束的多时段智能电网实时电价[J]. *系统工程理论与实践*, 2019, 39(10): 2599-2609.
- [9] YUAN G X, GAO Y, YE B, et al. Real-time pricing for smart grid with multi-energy microgrids and uncertain loads: a bilevel programming method[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2020, 123: 106206.
- [10] 潘婷婷, 李军祥, 黄芳旧. 基于需求响应的含光伏电力系统优化及其算法改进[J]. *上海理工大学学报*, 2019, 41(5): 448-454.
- [11] 胡荣, 张宓璐, 李振坤, 等. 计及可平移负荷的分布式冷热电联供系统优化运行[J]. *电网技术*, 2018, 42(3): 715-721.
- [12] 姚强, 王昕. 计及可转移负荷的微电网群分布式优化调度[J]. *电气自动化*, 2020, 42(3): 41-44.
- [13] 李子林, 刘蓉晖. 考虑需求侧响应的含储能区域综合能源系统运行优化[J]. *现代电力*, 2019, 36(6): 61-67.
- [14] WU C Y, GU W, XU Y L, et al. Bi-level optimization model for integrated energy system considering the thermal comfort of heat customers[J]. *Applied Energy*, 2018, 232: 607-616.
- [15] ZHANG L Z, KUANG J Y, SUN B, et al. A two-stage operation optimization method of integrated energy systems with demand response and energy storage[J]. *Energy*, 2020, 208: 118423.
- [16] LI C B, JIA X F, ZHOU Y, et al. A microgrids energy management model based on multi-agent system using adaptive weight and chaotic search particle swarm optimization considering demand response[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 262: 121247.
- [17] 许周, 孙永辉, 谢东亮, 等. 计及电/热柔性负荷的区域综合能源系统储能优化配置[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(2): 53-59.
- [18] DEEP S, SARKAR A, GHAWAT M, et al. Estimation of the wind energy potential for coastal locations in India using the Weibull model[J]. *Renewable Energy*, 2020, 161: 319-339.
- [19] 辛禾. 考虑多能互补的清洁能源协同优化调度及效益均衡研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [20] CHEN J, RABITI C. Synthetic wind speed scenarios generation for probabilistic analysis of hybrid energy systems[J]. *Energy*, 2017, 120: 507-517.
- [21] 王长浩, 刘洋, 许立雄. 考虑风电和负荷不确定冷热电联供微网日前经济调度[J]. *中国电力*, 2020, 53(8): 50-59.
- [22] 隋鑫, 卢盛阳, 苏安龙, 等. 计及风电和柔性负荷的核电多目标优化调度研究[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(24): 7232-7241.
- [23] 赵冬梅, 殷加珏. 考虑源荷双侧不确定性的模糊随机机会约束优先目标规划调度模型[J]. *电工技术学报*, 2018, 33(5): 1076-1085.
- [24] 周灿煌, 郑杰辉, 荆朝霞, 等. 面向园区微网的综合能源系统多目标优化设计[J]. *电网技术*, 2018, 42(6): 1687-1696.
- [25] 滕云, 刘硕, 回茜, 等. 考虑区域多能源系统集群协同优化的联合需求侧响应模型[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(22): 7282-8296.
- [26] LIU J C, XU F Q, LIN S S, et al. A multi-agent-based optimization model for microgrid operation using dynamic guiding chaotic search particle swarm optimization[J]. *Energies*, 2018, 11(12): 3286.

(编辑: 丁红艺)