

DOI:10.3969/j.issn.2097-0706.2023.10.002

计及双重不确定性的综合能源系统运行优化模型研究

Integrated energy system operation optimization model considering double uncertainties

喻小宝¹, 赵雯婧¹, 孙艺新²

YU Xiaobao¹, ZHAO Wenjing¹, SUN Yixin²

(1. 上海电力大学 经济与管理学院, 上海 201306; 2. 国网能源研究院有限公司, 北京 102209)

(1. School of Economics and Management, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 201306, China;

2. State Grid Energy Research Institute Company Limited, Beijing 102209, China)

摘要: 可再生能源的大规模应用是解决温室效应的重要途径, 综合能源系统的开发是提高能源利用率的重要方向, 但分布式能源出力随机性会引发系统的安全运行。通过对分布式能源不确定性和能源价格不确定性进行分析, 并以清洁能源消纳率最大和系统运行成本最低作为系统优化目标, 构建了考虑双重不确定性的综合能源系统优化模型。通过选取长三角地区某综合能源系统示范基地进行算例分析, 有效验证了提出模型的可行性, 为碳中和目标的实现奠定了基础。

关键词: 综合能源系统; 碳中和; 不确定性; 分布式能源; 低碳经济调度

中图分类号: TK 01: TM 715

文献标志码: A

文章编号: 2097-0706(2023)10-0010-08

Abstract: Wide application of renewable energy is effective in alleviate greenhouse gas emissions, and the integrated energy system is an important way to improve its utilization efficiency. However, the randomness of distributed new energy output can lead to unstable operation of the system. Based on the study on the uncertainty of distributed energy outputs and prices, an integrated energy system optimization model considering the two uncertainties above is proposed. And the model takes the highest renewable energy accommodation rate and minimum operating cost as optimization objectives. Finally, the feasibility of the proposed model is verified by an integrated energy system of a demonstrative base located in the Yangzi River Delta, laying the foundation for pursuing carbon neutrality.

Keywords: integrated energy system; carbon neutrality; uncertainty; distributed energy; low carbon economic dispatch

0 引言

为了实现我国提出的“碳中和”这一目标, 必须改变传统用能模式, 不断向可再生能源的规模化开发转型, 其中具有典型性的是以风电和光伏为代表的分布式能源开发。综合能源系统是当前解决分布式能源利用效率的一种重要方式, 也是能源互联网的一种重要表现形式, 包括电力、热能、冷能和气能等不同能源子系统。这些子系统相互之间存在着强耦合性^[1]。但是, 由于电源侧分布式能源的不确定性, 导致这些能源的使用存在明显的随机性, 同时由于能源价格的波动性, 需求侧也存在预测误差, 双重不确定性下可能导致系统运行问题, 从而

限制了可再生能源的大规模开发利用^[2]。因此, 如何通过优化能源结构, 如何降低双重不确定性给系统运行带来的风险, 提高可再生能源的利用效率面临着巨大的挑战和机遇, 关乎碳中和目标的实现。

对于综合能源系统的构建来说, 国内外学者对此均进行了深入研究。郭宴秀等^[3]构建了区域多综合能源系统, 将电热交互和共享储能纳入到模型中, 有效降低了系统运行成本, 为本文设置优化目标函数提供基础; 胡道明等^[4]在考虑碳中和目标的前提下, 将氢能纳入到综合能源系统中, 对系统碳排放情况和经济性进行了分析; 赵芳正等^[5]对区域综合能源系统的低碳经济调度进行了优化, 考虑了绿证和碳配额互认的机制, 进而构建相关模型进行了验证, 为本文考虑碳减排约束提供基础; Mao等^[6]基于负荷转移机制, 设计了一套多能源系统的运行策略; Asl等^[7]也提出了一种综合能源系统多级调度

基金项目: 上海市哲学社会科学规划项目(2020BGL032)
Shanghai Program of Philosophy and Social Sciences (2020BGL032)

框架。此外,还有一些学者从分布式能源出力不确定性角度对综合能源系统运行优化问题进行了研究^[8],例如 LV 等^[9]考虑风电不确定性、Yan 等^[10]考虑极端天气对系统运行的影响、Qi 等^[11]利用机会约束对风光不确定性进行预测等。

已有研究对综合能源系统运行过程中的不确定性因素考虑过于单一,本文在此基础上考虑双重不确定性因素对系统运行的影响,并构建运行优化模型。在该模型中,将以清洁能源消纳率最高和系统运行成本最低为目标函数,并考虑系统运行的约束条件。同时,采用区间数对供给侧和需求侧的不确定性进行量化,并构建随机计划约束模型,以概率形式解决了不确定性因素给综合能源系统运行带来的问题。

1 方法理论与模型构建

1.1 系统结构

综合能源系统主要分为 3 个部分,包括外部供给、内部运行和负荷需求^[12]。外部供给本文中仅考虑电网、热网和气网供应,内部运行考虑电力流、冷流、热流和气流,负荷需求考虑电负荷、冷负荷、热负荷和气负荷,具体结构如图 1 所示。

在本文构建的综合能源系统中,电电子系统是

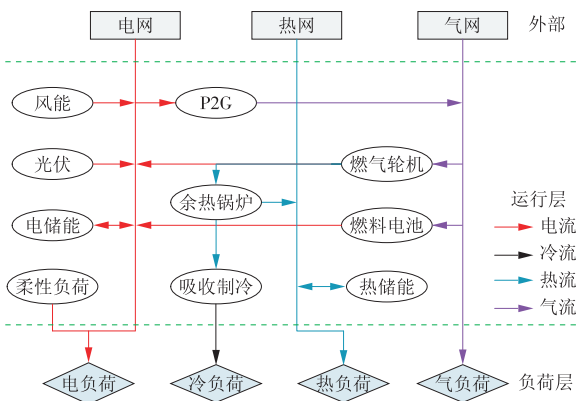


图 1 综合能源系统架构示意
Fig. 1 Schematic structure of the IES

整个多能互补协同系统的核心网络,其运行策略是整个系统运行优化的关键部分,因此在设置系统运行优化方案时,优先对电电子系统进行建模。其次,考虑供给侧多种分布式能源的出力不确定性,对系统运行方案进行优化,构建不确定性优化模型,满足不同负荷需求。最后,考虑负荷外购价格变化,构建热能子系统和气能子系统的运行优化模型,进而实现整个综合能源系统的运行优化策略。

1.2 模型构建

模型及公式中主要参数和释义见表 1,后续不再赘述。

表 1 式中各参数与释义

Table 1 Parameters and their interpretations

参数	释义	参数	释义
r	清洁能源消纳率/%	P_{WT}	风电消纳功率/kW
P_{PV}	光伏消纳功率/kW	$\bar{P}_{WT}$	风电预测出力/kW
$\bar{P}_{PV}$	光伏预测出力/kW	T	最大运行时间/h
C_E	系统运行总成本/元	C_S	电系统运行成本/元
C_L	需求侧管理成本/元	C_H	热系统运行成本/元
P_{grid}	外网购电功率/kW	q_{grid}	电价水平/元
P_{SB}	储能充放电功率/kW	k_{SB}	储能运维系数
k_{WT}	风电运维系数	k_{PV}	光伏运维系数
f_{MT}	微燃机成本/元	P_{MT}	微燃机功率/kW
f_{FC}	燃料电池成本/元	P_{FC}	燃料电池功率/kW
c_{delay}^0	平移负荷固定成本/元	P_{delay}^0	可平移负荷功率/kW
c_{delay}	转移可变系数	P_{delay}	负荷平移功率/kW
λ_{delay}	转移电效益损耗系数	P_H	外网购热功率/kW
p_H	外系统供热价格/元	P_X	储能充放热功率/kW
k_X	蓄能功率运维成本/元	P_G	购气功率/kW
C_{NG}	天然气单价/(元·m ⁻³)	α_H	热能系统置信度水平
$\bar{C}_H$	热系统乐观值	α_G	气能系统置信度水平
$\bar{C}_G$	气系统乐观值	C_G	气系统运行成本/元

续表

参数	释义	参数	释义
P_{loss}	网损功率/kW	$\bar{P}_{\text{L}}$	需求管理负荷功率/kW
$P_{\text{E,G}}$	热转电的功率/kW	$P_{\text{E,H}}$	电转热的功率/kW
$d(j,t)$	负荷平移矩阵元素	$P_{\text{grid}}^{\text{max}}$	外购电功率最大值/kW
R_{MT}	微燃机额定爬坡率	R_{FC}	燃料电池额定爬坡率
$P_{\text{MT}}^{\text{min}}$	微燃机最小出力/kW	$P_{\text{MT}}^{\text{max}}$	微燃机最大出力/kW
$P_{\text{FC}}^{\text{min}}$	燃料电池最小出力/kW	$P_{\text{FC}}^{\text{max}}$	燃料电池最大出力/kW
$P_{\text{E,G,max}}$	热转电最大功率/kW	$P_{\text{E,H,max}}$	电转热最大功率/kW
η_{dis}	储能放电效率/%	S_{SB}	储能剩余电量/(kW·h)
$S_{\text{SB}}^{\text{min}}$	储能余量最小值/(kW·h)	η_{ch}	储能充电功率/kW
$P_{\text{SB}}^{\text{min}}$	储能充放功率下限/kW	$S_{\text{SB}}^{\text{max}}$	储能余量最大值/(kW·h)
Q_{SB}	储能容量/(kW·h)	$P_{\text{SB}}^{\text{max}}$	储能充放功率上限/kW
$P_{\text{E}}^{\text{max}}$	最大供电容量/(kW·h)	$\hat{P}_{\text{L,max}}$	电负荷偏差最大值
$\bar{P}_{\text{PV}}$	光伏实际功率/kW	$\bar{P}_{\text{PV}}$	光伏预测功率/kW
$\hat{P}_{\text{PV}}$	光伏功率偏差/%	$\hat{P}_{\text{PV,min}}$	光伏偏差最小值
$\hat{P}_{\text{PV,max}}$	光伏偏差最大值	$\bar{P}_{\text{WT}}$	风电实际功率/kW
$\bar{P}_{\text{PV}}$	光伏实际功率/kW	$\bar{P}_{\text{PV}}$	光伏预测功率/kW
$\bar{P}_{\text{WT}}$	风电预测功率/kW	$\hat{P}_{\text{WT}}$	风电功率偏差
$\hat{P}_{\text{WT,min}}$	风电偏差最小值	$\hat{P}_{\text{WT,max}}$	风电偏差最大值
$\bar{P}_{\text{L}}$	电负荷实际功率/kW	$\bar{P}_{\text{L}}$	电负荷预测功率/kW
$\hat{P}_{\text{L}}$	电负荷功率偏差	$\hat{P}_{\text{L,min}}$	电负荷偏差最小值
$\hat{P}_{\text{L,max}}$	电负荷偏差最大值	C_{he}	吸收制热的制热系数
P_{LH}	热负荷功率/kW	$P_{\text{H}}^{\text{max}}$	购热的最大功率/kW
λ_{x}	热量自损失系数	P_{min}	充放热功率最小值/kW
P_{max}	充放热功率最大值/(kW·h)	X_{min}	蓄热装置余热下限
X_{max}	蓄热装置余热上限/(kW·h)	$P_{\text{H}}^{\text{min}}$	购热的最小功率/kW
$P_{\text{H}}^{\text{max}}$	购热的最大功率/kW	P_{gs}	储气罐气体释放功率/kW
$P_{\text{E,G}}$	气转电的功率/kW	$P_{\text{L,G}}$	天然气负荷功率/kW
P_{rs}	储气罐余量功率/kW	$P_{\text{rs}}^{\text{max}}$	储气余量功率上限/(kW·h)
$P_{\text{rs}}^{\text{min}}$	储气余量功率下限/(kW·h)	$P_{\text{gs}}^{\text{max}}$	储气释放功率上限/(kW·h)
$P_{\text{gs}}^{\text{min}}$	储气释放功率下限/(kW·h)	$\text{Pr}\{\}$	事件发生的概率
$P_{\text{in}}^{\text{min}}$	购气的最小功率/kW	ξ	随机变量
u	控制变量	m	不确定约束条件个数
$f(u,\xi)$	模型的目标	n	确定性约束条件个数
β_j	置信度	$\beta_{\text{H}}/\beta_{\text{G}}$	确定性约束条件个数热能/气能置信度
$\bar{f}$	乐观值	$P_{\text{in}}^{\text{max}}$	购气的最大功率/kW
δ	不平衡功率偏差		

1.2.1 目标函数

目标函数包括清洁能源消纳率最大和系统运行成本最小,其中系统运行成本又分为电能子系统、热能子系统和气能子系统的运行成本。

(1)消纳率。用电能子系统中的风电、光伏出力的消纳率最大表示,即

$$f_1 = \max r = \frac{\sum_{t=1}^T P_{\text{WT}}(t) + \sum_{t=1}^T P_{\text{PV}}(t)}{\sum_{t=1}^T \bar{P}_{\text{WT}}(t) + \sum_{t=1}^T \bar{P}_{\text{PV}}(t)} \quad (1)$$

(2)系统运行成本。系统运行成本主要考虑多

个子系统的运行成本,包括电能子系统、需求侧管理成本、热能子系统和气能子系统成本,具体目标函数如下

$$f_2 = \min C_{\text{E}} = C_{\text{S}} + C_{\text{L}} + C_{\text{H}} + C_{\text{G}}, \quad (2)$$

$$C_{\text{S}} = P_{\text{grid}}(t)q_{\text{grid}}(t) + k_{\text{SB}}|P_{\text{SB}}(t)| + k_{\text{WT}}P_{\text{WT}}(t) + k_{\text{PV}}P_{\text{PV}}(t) + f_{\text{MT}}(P_{\text{MT}}(t)) + f_{\text{FC}}(P_{\text{FC}}(t)), \quad (3)$$

$$C_{\text{L}} = c_{\text{delay}}^0 P_{\text{delay}}^0(t) + \sum_{i=1}^T [c_{\text{delay}} P_{\text{delay}}(t) + \lambda_{\text{delay}} P_{\text{delay}}(t)], \quad (4)$$

$$\min C_{\text{H}} = \sum_{t=1}^T [P_{\text{H}}(t)p_{\text{H}}(t) + k_{\text{x}}|P_{\text{x}}(t)|], \quad (5)$$

$$\min C_G = \sum_{t=1}^T [P_G(t)C_{NG}(t)], \quad (6)$$

$$\Pr\{C_H \leq \bar{C}_H\} \geq \alpha_H, \quad (7)$$

$$\Pr\{C_G \leq \bar{C}_G\} \geq \alpha_{G_0}. \quad (8)$$

对于多目标优化,本文采用的是加权系数法将多目标问题转化为单目标问题,并且考虑到2个目标不同的属性问题,得到最终的目标函数

$$\min F = \lambda_1 \frac{f_{1,\max} - f_1}{f_{1,\max}} + \lambda_2 \frac{f_2 - f_{2,\min}}{f_{2,\min}}. \quad (9)$$

1.2.2 约束条件

(1)电能子系统功率平衡约束。电能子系统功率平衡约束主要考虑不同时段下的电能平衡问题,由于电能供应不同于其他能源,系统可靠性和安全性对此要求高,因此,系统运行首要满足电系统的平衡约束

$$P_{\text{grid}}(t) + P_{\text{MT}}(t) + P_{\text{FC}}(t) + P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{SB}}(t) = \bar{P}_L(t) + P_{\text{loss}}(t) + P_{\text{E,H}}(t) + P_{\text{E,G}}(t), \quad (10)$$

其中, $\bar{P}_L(t)$ 的计算如下

$$\bar{P}_L(t) = P_L(t) + P_{\text{delay}}(t) - \sum_{j=1, j \neq i}^T d(j, t) P_{\text{delay}}(j). \quad (11)$$

(2)可再生能源发电出力约束。在制定风电出力和光伏出力的实际消纳计划时,实际的消纳功率不能超过预测出力

$$0 \leq P_{\text{WT}}(t) \leq \bar{P}_{\text{WT}}(t), \quad (12)$$

$$0 \leq P_{\text{PV}}(t) \leq \bar{P}_{\text{PV}}(t). \quad (13)$$

(3)电源出力约束。这里主要考虑出力系统在满足爬坡功率方面的约束,重点考虑的是可控电源的爬坡约束,同时,系统运行还需要满足外网供应功率最大约束

$$\begin{cases} P_{\text{MT}}(t)(P_{\text{MT}}(t) - P_{\text{MT}}^{\min}) \geq 0 \\ P_{\text{MT}}(t) \leq P_{\text{MT}}^{\max} \\ P_{\text{FC}}(t)(P_{\text{FC}}(t) - P_{\text{FC}}^{\min}) \geq 0 \\ P_{\text{FC}}(t) \leq P_{\text{FC}}^{\max} \end{cases}, \quad (14)$$

$$\begin{cases} P_{\text{MT}}(t) - P_{\text{MT}}(t-1) \leq R_{\text{MT}} \Delta t \\ P_{\text{FC}}(t) - P_{\text{FC}}(t-1) \leq R_{\text{FC}} \Delta t \end{cases}, \quad (15)$$

$$-P_{\text{grid}}^{\max} \leq P_{\text{FC}}(t) \leq P_{\text{grid}}^{\max}. \quad (16)$$

(4)能源转化约束。首先考虑电能系统与热能系统间的转换约束,其次考虑电能系统与气能系统的转换约束,由于电能系统约束更为关键,因而热能系统和气能系统运行要基于电能系统运行计划

$$P_{\text{E,H}}(t) \leq P_{\text{E,H,max}}, \quad (17)$$

$$P_{\text{E,G}}(t) \leq P_{\text{E,G,max}}. \quad (18)$$

(5)储能运行约束。储能运行约束主要是考虑储能系统自身的一些限制,例如容量限制、充放电功率限制、转换约束等,还会受到储能最小最大容

量的约束

$$\begin{cases} S_{\text{SB}}^{\min} \leq S_{\text{SB}}(t) \leq S_{\text{SB}}^{\max} \\ P_{\text{SB}}^{\min} \leq P_{\text{SB}}(t) \leq P_{\text{SB}}^{\max} \\ S_{\text{SB}}(t+1) = \begin{cases} S_{\text{SB}}(t) - P_{\text{SB}}(t) \Delta t / \eta_{\text{dis}} - \Delta t D_{\text{SB}} Q_{\text{SB}}, P_{\text{SB}}(t) > 0 \\ S_{\text{SB}}(t) - P_{\text{SB}}(t) \Delta t \eta_{\text{ch}} - \Delta t D_{\text{SB}} Q_{\text{SB}}, P_{\text{SB}}(t) < 0 \end{cases} \end{cases}. \quad (19)$$

(6)负荷转移约束。在需求侧管理中,可转移负荷能够有效降低峰谷差,提高负荷率,为系统运行成本的优化提供了可能性,但负荷转移也有一定的约束条件

$$0 \leq \bar{P}_L(t) \leq P_{\text{E}}^{\max}, \quad (20)$$

$$0 \leq P_{\text{delay}}(t) \leq P_{\text{delay}}^0(t). \quad (21)$$

(7)分布式能源条件。分布式能源在应用过程中受到的约束条件非常苛刻,不仅要满足自身运行的约束,还要考虑系统负荷需求的约束,这里以风电、光伏和不确定性负荷为例,对风电和光伏运行的约束进行描述

$$\bar{P}_{\text{PV}}(t) = \bar{P}_{\text{PV}}(t) + \hat{P}_{\text{PV}}(t), \quad (22)$$

$$\hat{P}_{\text{PV}}(t) \in [\hat{P}_{\text{PV,min}}(t), \hat{P}_{\text{PV,max}}(t)], \quad (23)$$

$$\bar{P}_{\text{WT}}(t) = \bar{P}_{\text{WT}}(t) + \hat{P}_{\text{WT}}(t), \quad (24)$$

$$\hat{P}_{\text{WT}}(t) \in [\hat{P}_{\text{WT,min}}(t), \hat{P}_{\text{WT,max}}(t)], \quad (25)$$

$$\bar{P}_L(t) = \bar{P}_L(t) + \hat{P}_L(t), \quad (26)$$

$$\hat{P}_L(t) \in [\hat{P}_{L,min}(t), \hat{P}_{L,max}(t)]. \quad (27)$$

(8)热负荷系统运行约束。热负荷系统运行约束主要考虑热系统的平衡问题、储热系统运行功率、外网购热功率、储热装置容量约束、充放热功率约束等

$$\begin{cases} P_{\text{MT}}(t)C_{\text{he}} + P_{\text{x}}(t) + P_{\text{H}}(t) + P_{\text{E,H}}(t) = P_{\text{L,H}}(t) \\ X(t) = X(t-1) + P_{\text{x}}(t) - \lambda_{\text{x}} \Delta t \\ P_{\text{min}} \leq P_{\text{x}}(t) \leq P_{\text{max}} \\ X_{\text{min}} \leq X(t) \leq X_{\text{max}} \\ P_{\text{H}}^{\min} \leq P_{\text{H}}(t) \leq P_{\text{H}}^{\max} \end{cases}. \quad (28)$$

(9)气负荷系统运行约束。在气能子系统优化运行中心制定运行计划时,需要考虑一些约束,主要包括气能子系统的功率平衡、储气罐运行、向外网购气功率等约束

$$\begin{cases} P_{\text{in}}(t) + P_{\text{rs}}(t) + P_{\text{E,G}}(t) = \frac{P_{\text{FC}}(t)}{\eta_{\text{FC}}(t)Q_{\text{LHV}}} + P_{\text{L,G}}(t) \\ P_{\text{rs}}(t) = P_{\text{rs}}(t-1) + P_{\text{gs}}(t) \\ P_{\text{rs}}^{\min} \leq P_{\text{rs}}(t) \leq P_{\text{rs}}^{\max} \\ P_{\text{gs}}^{\min} \leq P_{\text{gs}}(t) \leq P_{\text{gs}}^{\max} \\ P_{\text{in}}^{\min} \leq P_{\text{in}}(t) \leq P_{\text{in}}^{\max} \end{cases}. \quad (29)$$

1.2.3 不确定性优化

在上述优化模型构建基础上,不仅要考虑风电

光伏的不确定性,还需要考虑终端采购的不确定性,针对这种能源价格不确定性,采用随机机会约束函数进行运行优化,从而转化为随机机会约束规划问题。这里的目标函数设置为系统运行成本最小,置信度采用最小化乐观值。

同时,考虑到能源价格不确定性既包括热供应价格和天然气价格,因此针对不同随机机会约束规划模型的变量存在一定的差异^[13-15]。对于热能子系统优化运行中心,控制变量取热能子系统的能源供应价格,对于气能子系统运行,控制变量取天然气市场价格。此外,由于模型采用随机机会约束规划形式进行建模意味着功率平衡约束不可能绝对成立,当不平衡功率偏差满足在一定范围之内,以及满足该范围的概率达到设置的约束条件置信度时,则模型认为功率平衡约束得到了满足。

$$\begin{cases} \min_u \bar{f} \\ s.t. \\ \Pr \{ f(u, \xi) \leq \bar{f} \} \geq \beta \\ \Pr \{ g_j(u, \xi) \leq 0 \} \geq \beta_j, j = 1, 2, \dots, p \\ h_i(x) \leq 0, i = 1, 2, \dots, q \end{cases}, (30)$$

$$\Pr \left\{ \begin{aligned} & -\delta \leq P_{MT}(t)C_{he} + Q_x(t) + P_H(t) + \\ & P_{E,H}(t) - P_{L,H}(t) \leq \delta \end{aligned} \right\} \geq \beta_H, (31)$$

$$\Pr \left\{ \begin{aligned} & -\delta \leq P_{in}(t) + P_{rs}(t) + P_{E,G}(t) - \\ & \frac{P_{FC}(t)}{\eta_{FC}(t)Q_{LHV}} + P_{L,G}(t) \leq \delta \end{aligned} \right\} \geq \beta_G. (32)$$

1.2.4 求解流程

针对不确定性优化模型,系统决策者和分布式能源出力决策者通过博弈最终达成纳什均衡。针对建立的不确定性模型采用萤火虫算法进行求解。具体不确定性模型的求解流程,如图2所示。

2 算例仿真

本文选取中国长三角地区某园区数据作为算例仿真基础,该园区拥有较为成熟的小型综合能源系统,包括光伏板、小型风电机组、储热罐、储气罐、燃料电池、微燃机、储能设备、电转气(P2G)等,可以为本文提供较好的数据支撑^[16-18]。

2.1 参数设置

该综合能源系统的某典型运行日的清洁能源出力区间,如图3所示。

该综合能源系统的电负荷、热负荷和气负荷水的需求情况,如图4所示。该园区系统与外部电网进行能源电力交易,采用分时电价机制,分为峰、平、谷3个时段。峰时段主要包括09:00—15:00和18:00—21:00,电价为1 321元/(MW·h);谷时段主

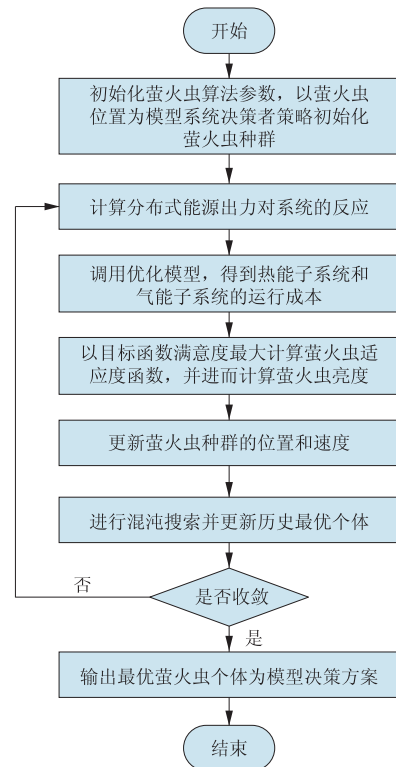


图2 不确定性模型求解流程

Fig. 2 Calculation process of the uncertainty model

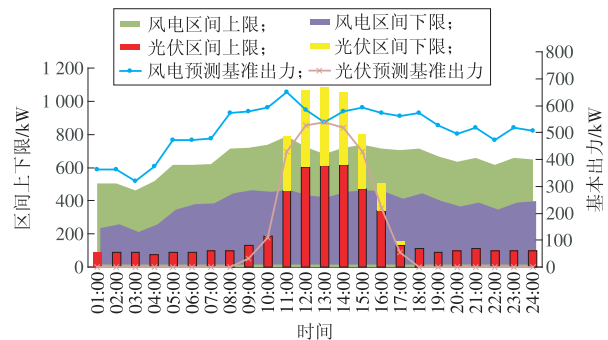


图3 某典型运行日清洁能源出力区间

Fig. 3 Clean energy output range on a typical day

要包括22:00—06:00,电价为300元/(MW·h);其他时段为平时段,电价为580元/(MW·h)。此外,设定园区天然气单价为3元/m³,置信度取值为0.95,其他参数见表2^[19-20]。

在优化模型中,萤火虫数量取值为100,光强系数和最大吸引力取值均为1,最大迭代次数选择250次,混沌搜索次数为20代。

2.2 仿真结果

首先,在不考虑系统运行优化的前提下,测算到1天系统运行成本为18 273.98元,处于较高水平,清洁能源消纳率仅为73.26%,处于较低水平。

其次,为了验证模型的可行性和供给侧与需求侧双重不确定性对系统运行的影响,设置2种不同场景,其中,场景A不考虑双重不确定性,正常运行;

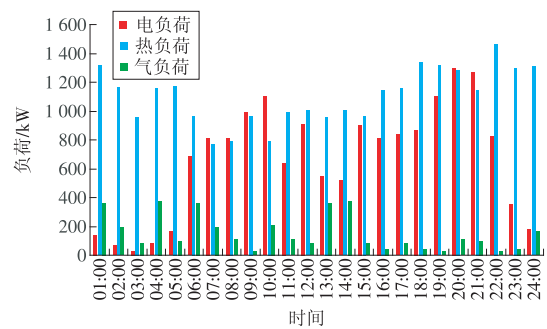


图 4 电负荷、热负荷、气负荷需求

Fig. 4 Demand for electricity, heat, and gas loads

表 2 部分参数设置	
Table 2 Partial parameter settings	
参数	取值
储能充电效率/%	94
储能放电效率/%	95
储能自放电系数	0.011
储能最大容量/(kW·h)	1 000
自损失系数	0.09
储气罐最大容量/m ³	400
补偿系数	2.85

场景 B 考虑双重不确定性因素对系统运行影响。2 种场景下的系统运行均达到最后结果后停止迭代, 得到结果如图 5 和图 6 所示。

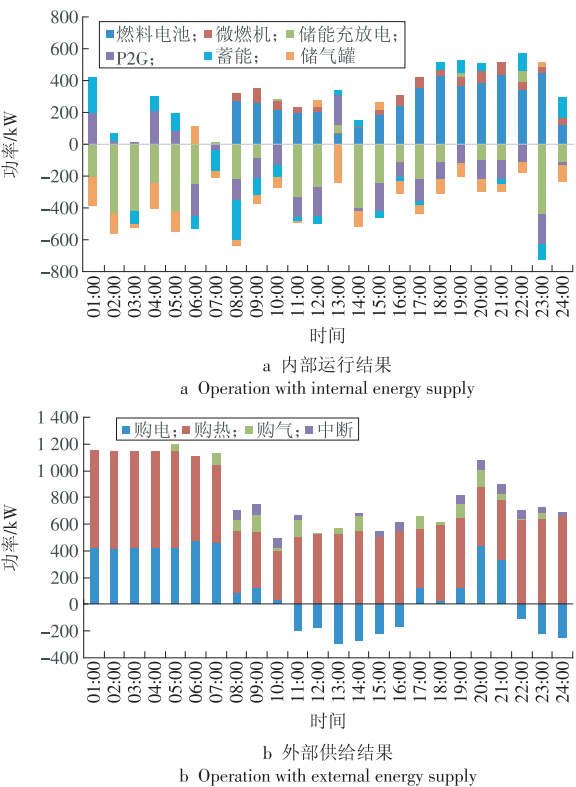


图 5 场景 A 的优化结果

Fig. 5 Optimization results for scenario A

2.3 结果分析

根据图 5 和图 6 运行结果可以发现, 当电负荷

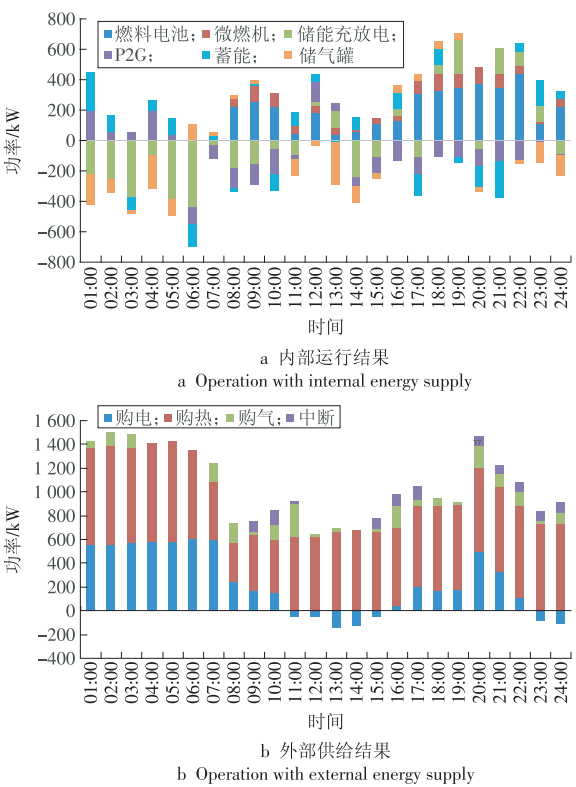


图 6 场景 B 的优化结果

Fig. 6 Optimization results for scenario B

处于较低水平时,例如在第 3 时段(02:00—03:00), 系统选择从外网购电,对储能系统进行充电,没有选择内部系统发电,此时热负荷处于高峰阶段,主要来源为热能外网购热和内部储能放热;当电负荷处于较高水平时,例如第 10 时段(09:00—10:00), 系统会优先选择风能光伏进行供电,然后选择内部燃气发电,最后选择外网购电。这种运行方式能够充分利用清洁能源,但如果忽略不确定性,容易出现内部负荷供应不及时,只能高价购买外网电负荷和热负荷,从而导致系统运行成本高的后果。

对比场景 A 和场景 B 结果可以看出,2 种场景下的系统运行均可以满足系统内部的各类负荷需求,但由于场景 A 没有考虑风电光伏的不确定性和负荷价格的不确定性,在内部供应不足时均采用外购或燃气发电等方式,导致系统综合运行成本偏高,达到了 15 353.76 元,同时由于优先考虑清洁能源消纳,其风电光伏消纳率也偏高,达到了 94.11%,属于较高水平。

相对于场景 A 来说,场景 B 同时考虑了供给侧和负荷侧的不确定性,导致系统运行未知性更大,因此预期运行成本达到了 17 032.13 元,高于场景 A 的系统运行成本。但是,在实际系统运行过程中,由于提前对双重不确定性因素进行了预估,对系统运行进行了优化,实际场景 B 的系统运行成本仅有 14 253.43 元,相比于场景 A 下降了 7.17%。同时,

优化系统为了降低运行成本,在清洁能源消纳上进行了抉择,导致风光消纳率下降到了 91.15%,但仍处于可接受范围内。

3 结论

通过对综合能源系统进行建模优化,提高了风电光伏的消纳率,同时考虑供给侧和需求侧不确定性,将不确定性因素纳入到优化模型中,同样能够提高清洁能源的利用率,降低系统运行成本。具体结论如下。

(1) 本文构建的考虑低碳目标的综合能源系统能够在降低系统运行成本的基础上同时提高清洁能源消纳率。

(2) 系统运行考虑双重不确定性后,虽然风光消纳率有所下降,但运行成本也降低了 7.17%,由此验证了模型的可行性。

参考文献:

- [1] 喻小宝,郑丹丹,杨康,等.“双碳”目标下能源电力行业的机遇与挑战[J].华电技术,2021,43(6):21-32.
YU Xiaobao, ZHENG Dandan, YANG Kang, et al. Opportunities and challenges in the energy and power industry under the "dual carbon" goal [J]. Huadian Technology, 2021, 43(6): 21-32.
- [2] 徐文涛,张晶,马红明,等.计及多能转化效率的区域综合能源系统协同优化模型研究[J].电网与清洁能源,2021,37(10):98-106.
XU Wentao, ZHANG Jing, MA Hongming, et al. Research on the collaborative optimization model of regional comprehensive energy system considering multi energy conversion efficiency [J]. Power Grid and Clean Energy, 2021, 37(10): 98-106.
- [3] 郭宴秀,苏建军,刘洋,等.考虑电热交互和共享储能的多综合能源系统运行优化[J].中国电力,2023,56(4):138-145.
GUO Yanxiu, SU Jianjun, LIU Yang, et al. Optimization of the operation of a multi integrated energy system considering electric heating interaction and shared energy storage [J]. China Electric Power, 2023, 56(4): 138-145.
- [4] 胡道明,李蛟,杜晓东,等.碳中和背景下含氢综合能源系统碳排放和经济性分析[J].热能动力工程,2023,38(4):111-120.
HU Daoming, LI Jiao, DU Xiaodong, et al. Carbon emissions and economic analysis of hydrogen containing integrated energy systems in the context of carbon neutrality [J]. Thermal Power Engineering, 2023, 38(4): 111-120.
- [5] 赵芳正,王俊江,陈斌.考虑绿证-碳配额互认的区域综合能源系统低碳经济调度[J/OL].电测与仪表:1-11(2023-04-21) [2023-05-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20230421.1403.008.html>.
- ZHAO Fangzheng, WANG Junjiang, CHEN Bin. Low carbon economic dispatch of regional comprehensive energy systems considering mutual recognition of green certificates and carbon quotas [J/OL]. Electrical Measurement and Instrumentation: 1-11 (2023-04-21) [2023-05-01]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20230421.1403.008.html>.
- [6] MAO Y S, WU J K, WANG R D, et al. A collaborative demand-controlled operation strategy for a multi-energy system [J]. IEEE Access, 2021, 9: 80571-80581.
- [7] ASL D K, SEIFI A R, RASTEGAR M, et al. Distributed two-level energy scheduling of networked regional integrated energy systems [J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16 (4): 5433-5444.
- [8] LV G Y, CAO B, JIA D X, et al. Optimal scheduling of regional integrated energy system considering integrated demand response [J]. CSEE Journal Power of and Energy Systems, 2021(99): 1-10.
- [9] GAO Y, AI Q. A novel optimal dispatch method for multiple energy sources in regional integrated energy systems considering wind curtailment [J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022(99): 1-10.
- [10] YAN M Y, HE Y B, SHAHIDEHPOUR M, et al. Coordinated regional-district operation of integrated energy systems for resilience enhancement in natural disasters [J]. IEEE Trans on Smart Grid Actions, 2019, 10 (5): 4881-4892.
- [11] QI F, SHAHIDEHPOUR M, LI Z Y, et al. A chance-constrained decentralized operation of multi-area integrated electricity-natural gas systems with variable wind and solar energy [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(4): 2230-2240.
- [12] 曾贤强,张警卫,王晓兰.计及多重不确定性及光热电站参与的区域综合能源系统配置与运行联合优化[J].高电压技术,2023,49(1):353-363.
ZENG Xianqiang, ZHANG Weiwei, WANG Xiaolan. Joint optimization of regional integrated energy system configuration and operation taking into account multiple uncertainties and participation of solar thermal power stations [J]. High Voltage Technology, 2023, 49 (1): 353-363.
- [13] 林威,靳小龙,叶荣.面向区域综合能源系统的分布式优化调度方法[J].电力建设,2021,42(11):44-53.
LIN Wei, JIN Xiaolong, YE Rong. A decentralized optimal scheduling method for integrated community energy system [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(11): 44-53.
- [14] 杨梅,周喜超,魏强,等.考虑经济效益目标的源网荷储

- 综合能源系统动态最优能流优化研究[J].综合智慧能源,2022,44(11):63-69.
- YANG Mei, ZHOU Xichao, WEI Qiang, et al. Study on dynamic optimal energy flow of a source-network-load-storage integrated energy system considering its economic benefit [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44 (11) : 63-69.
- [15]刘自发,谭雅之,李炯,等.区域综合能源系统规划关键问题研究综述[J].综合智慧能源,2022,44(6):12-24.
- LIU Zifa, TAN Yazhi, LI Jiong, et al. Review on key points in the planning for a district-level integrated energy system [J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(6):12-24.
- [16]YU X B, ZHENG D D, ZHOU L Y. Credit risk analysis of electricity retailers based on cloud model and intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 45(3):4285-4302.
- [17]YU X B, ZHENG D D. Cross-regional integrated energy system scheduling optimization model considering conditional value at risk[J]. International Journal of Energy Research, 2020, 44(7):5564-5581.
- [18]YU X B, GENG Y Q. Complementary configuration research of new combined cooling, heating, and power system driven by renewable energy under energy management modes[J]. Energy Technology, 2019, 7(10): 1-11.
- [19]WU J, DE G F, TAN Z F, et al. Study on bilevel multi-objective collaborative optimization model for integrated energy system considering source-load uncertainty. [J] Energy Science & Engineering, 2021, 9(8):1160-1179.
- [20]TAN Z F, DE G F, LI M L, et al. Combined electricity-heat-cooling-gas load forecasting model for integrated energy system based on multi-task learning and least square support vector machine [J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 248:119252.
- (本文责编:齐琳)
- 收稿日期:2023-05-04;修回日期:2023-06-19
上网日期:2023-08-01;附录网址:www.ienergy.cn
- 作者简介:
- 喻小宝(1989),男,副教授,博士,从事电力市场、综合能源系统和数字化转型等方面的研究,yuxiaobao1222@163.com;
- 赵雯婧(2000),女,在读硕士研究生,从事能源经济方面的研究,1119063432@qq.com;
- 孙艺新(1985),男,正高级工程师,博士,从事能源大数据、数字化转型等方面的研究,easy632@126.com。