2021 年 第21卷 第31期
2021, 21(31): 13342-07

科 学 技 术 与 工 程
Science Technology and Engineering

ISSN 1671—1815
CN 11—4688/T

引用格式:郑亚锋, 魏振华, 刘思渠. 考虑风光不确定性的综合能源系统规划设计方法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(31): 13342-13348.
Zheng Yafeng, Wei Zhenhua, Liu Siqu. Integrated energy system planning and design method considering uncertainty of wind power and photovoltaic system[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(31): 13342-13348.

能源与动力工程

考虑风光不确定性的综合能源系统规划设计方法

郑亚锋[1], 魏振华[1*], 刘思渠[2]
(1. 国核电力规划设计研究院有限公司, 北京 100095; 2. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206)

摘 要 在能源互联网飞速发展的背景下,综合能源系统逐渐成为能源低碳高效运行的重要实现方式。为了实现综合能源系统配置的合理规划,提出了一种考虑风光不确定性的综合能源系统多目标规划模型。通过结合序列分布概率的典型曲线挖掘方法获得风光的典型出力曲线,减小可再生能源出力描述不确定性对配置的影响。以综合能源系统运行成本最低、系统电网供电率最低为优化目标,采用基于混合博弈决策的改进型多目标粒子群算法对规划模型进行求解和 Pareto 解集决策,生成满足决策者的不同偏好需求的配置结果。并对影响系统规划的关键参数进行敏感性分析。基于中国某综合能源示范工程的实际数据,给出了规划方案,仿真结果验证了该方法的有效性。

关键词 综合能源系统; 风光不确定性; 系统规划; 可再生能源; 多目标优化
中图法分类号 TK01+9; **文献标志码** A

Integrated Energy System Planning and Design Method Considering Uncertainty of Wind Power and Photovoltaic System

ZHENG Ya-feng[1], WEI Zhen-hua[1*], LIU Si-qu[2]
(1. State Nuclear Electric Power Planning Design & Research Institute Co. Ltd., Beijing 100095, China;
2. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

[**Abstract**] In the context of the rapid development of energy internet, integrated energy system has gradually become an important way to realize multi-energy low-carbon and efficient operation. In order to realize the rational planning of the integrated energy system configuration, a multi-objective integrated energy system planning model considering the uncertainty of landscape was proposed. The typical output curve of landscape was obtained by the method of typical curve mining combined with the probability of sequence distribution. Aiming at the lowest system operating cost and power supply rate, an improved multi-objective particle swarm optimization algorithm was adopted to solve the problem. The generated Pareto solution set was screened by hierarchical composition class mixed strategy game, so as to meet the different preferences of decision makers. The sensitivity analysis of the key parameters affecting the system planning scheme was carried out. Based on the actual data of a comprehensive energy demonstration project in China, the planning scheme was presented, and the simulation results verify the effectiveness of the proposed method.

[**Keywords**] integrated energy systems; landscape uncertainty; system planning; renewable energy; multi-objective optimization

随着一次能源的过度开发和全球环境问题的日益严峻,合理高效利用可再生能源,提高终端能源消耗的效率和清洁化水平至关重要[1]。综合能源系统以电力系统为核心[2],统一规划调度电/气/冷/热等多种能源系统[3],被认为是实现能源低碳排放和高效运行的有效途径[4],对国民经济和社会发展产生极大的促进作用[5]。

已有文献对综合能源系统规划问题进行探讨。文献[6]分析了不同层次规模的综合能源系统,对电、气、热(冷)等模型特征进行了描述。文献[7]建立园区综合能源系统优化调度模型,以运行成本作为其优化目标。文献[8]提出一种基于多主体博弈的电力-天然气综合能源系统联合规划方法,基于不同的投资主体博弈机理进行分析。文献[9]提出一种考虑清洁能源利用率的储能规划方法。文献[10]建立了基于全生命周期的园区型综合能源系

收稿日期: 2021-04-10; **修订日期**: 2021-08-07
基金项目: 国家电力投资集团资助项目(KYTC2020ZH07)
第一作者: 郑亚锋(1979—),男,汉族,北京人,硕士,高级工程师。研究方向:电力设计。E-mail:zhengyafeng@snpdri.com。
* **通信作者**: 魏振华(1983—),男,汉族,北京人,硕士,高级工程师。研究方向:电力热控设计。E-mail:weizhenhua@snpdri.com。

统分期协同规划模型。文献[11]提出了含储能装置的园区型综合能源系统的三级协同规划方法,将综合能源的规划分成三个阶段。但是上述研究均未针对系统不确定性问题进行考虑,可再生能源作为系统的能源支撑,其供能不确定性对系统规划的影响不能忽视。

针对不确定性问题的研究中,文献[12]运用条件风险价值理论对系统接入的风电、光伏等可再生能源设备所产生的运行风险进行控制。文献[13]在规划模型中引入碳交易机制,构建奖惩阶梯型碳交易成本模型,并利用两阶段鲁棒优化模型应对不确定性因素的影响。文献[14]针对负荷和风速的随机模糊性,以随机模糊变量来描述其不确定性,建立了配电网的重构模型。文献[15]提出了一种长时间尺度的园区综合能源系统规划方法,考虑风、光、荷的不确定性,给出随机规划模型。文献[16]从能源服务公司的角度出发,建立了计及不确定性的综合能源系统双层规划模型。但上述研究中的涉及的综合能源系统不确定性规划通常以经济性为优化目标,未从其他角度综合研究系统的其他性能指标。

现考虑风电、光伏出力的不确定性,采用结合序列分布概率的方法来获得风光典型出力曲线。以综合能源系统运行成本和系统电网供电率为目标,采用改进的多目标粒子群算法进行优化。对生成的 Pareto 解集使用分级构成类混合策略博弈方法进行筛选,以满足工程人员不同的偏好需求。最后通过某个园区综合能源系统实际案例对方法加以验证。

1　综合能源系统模型

1.1　典型综合能源系统结构

本文中研究的综合能源系统的结构和能流示意图如图 1 所示。

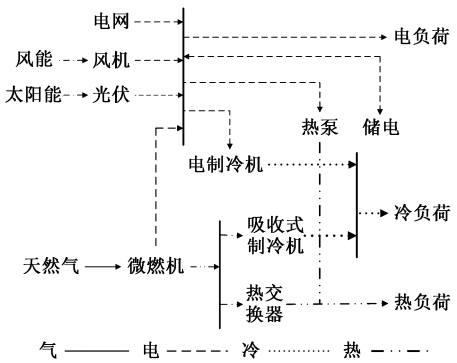

图 1　综合能源系统结构和能流示意图

Fig. 1　Schematic diagram of integrated energy system structure and energy flow

1.2　综合能源系统中的数学模型

1.2.1　风电机组

风电机组风速 v 和输出功率 P_{WT} 的关系为

$$\begin{cases} P_{WT} = 0, & v < v_{ci} \\ P_{WT} = \dfrac{v^3 - v_{ci}^3}{v_r^3 - v_{ci}^3}, & v_{ci} \leqslant v \leqslant v_r \\ P_{WT} = P_{wtr}, & v_r \leqslant v \leqslant v_{co} \\ P_{WT} = 0, & v > v_{co} \end{cases} \tag{1}$$

式(1)中:P_{WTR}、v_{ci}、v_{co}、v_r 分别为风机的额定功率、切入风速、切出风速、额定风速。

1.2.2　光伏电池板

光伏阵列的输出功率 P_{WT} 具有强烈的线性,其计算公式为

$$P_{WT} = P_{STC}\frac{G_T}{G_{STC}}[1 + K_C(T_C - T_{STC})] \tag{2}$$

式(2)中:P_{STC} 为标准条件下(太阳光入射强度 G_{STC} 为 1 000 W/m^2,环境温度 T_{STC} 为 25 ℃)最大功率;G_T 为电池板受到的辐射量;K_C 为功度系数;T_C 为电池板工作温度。

1.2.3　微型燃气轮机

微燃机的发电出力 P_{MT} 和回收烟热的可利用热值 H_{MT} 计算公式分别为

$$\begin{cases} P_{MT} = \alpha Q_{MT} + \beta \\ H_{MT} = pQ_{MT} + q \end{cases} \tag{3}$$

式(3)中:Q_{MT} 为输入的燃料热值;α 和 p 分别为发电效率和产热效率;β 和 q 为系数常数。

1.2.4　热交换器

热交换器输入、输出端热值之间的换算关系为

$$Q_{HE,h} = \eta_{HE}Q_{HE,in} \tag{4}$$

式(4)中:$Q_{HE,h}$、$Q_{HE,in}$ 为输出与输入端热值;η_{HE} 为热交换效率。

1.2.5　吸收式制冷机

吸收式制冷机输出冷功率和输入热功率之间的转换关系为

$$C_{AC} = \eta_{AC}Q_{AC,in} \tag{5}$$

式(5)中:C_{AC} 和 $Q_{AC,in}$ 分别为其输出冷功率和输入热功率;η_{AC} 为冷输出能效比。

1.2.6　电制冷机

电制冷机通过消耗电能来制冷,其数学模型为

$$C_{ER} = COP_{ER}P_{ER} \tag{6}$$

式(6)中:C_{ER} 为电制冷机的输出冷功率;COP_{ER} 为该设备的能效系数;P_{ER} 为消耗的功率。

1.2.7　热泵

热泵是典型的耦合设备,本文中设计的热泵为

电热耦合设备,其数学模型为

$$Q_{EH} = \eta_E P_{EH} \tag{7}$$

式(7)中:Q_{EH} 为热泵的输出热功率;η_E 的能效系数;P_{EH} 为热泵消耗的功率。

1.2.8 储能设备

本文中选用储能设备是蓄电池。当蓄电池为充电状态时,蓄电池剩余容量计算公式为

$$S_{SOC}(t+1) = S_{SOC}(t) + P_{ES,c}\eta_c \Delta t \tag{8}$$

当蓄电池为放电状态时,蓄电池剩余容量计算公式为

$$S_{SOC}(t+1) = S_{SOC}(t) - P_{ES,d}\Delta t/\eta_d \tag{9}$$

式中:$S_{SOC}(t+1)$、$S_{SOC}(t)$ 分别为对应时段的剩余容量;$P_{ES,c}$ 和 $P_{ES,d}$ 为 Δt 时段的充、放电功率;η_c、η_d 分别为充、放电效率。

1.3 约束条件

$$P_e(t) = P_{net}(t) + P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{MT}(t) + P_{ES}(t) \tag{10}$$

式(10)中:$P_e(t)$ 是 t 时刻系统电负荷需求;$P_{net}(t)$ 为 t 时刻系统与电网的交换功率;$P_{WT}(t)$、$P_{PV}(t)$、$P_{ES}(t)$、$P_{MT}(t)$ 分别是 t 时刻风机、光伏、储能、微燃机的有功功率。

$$\begin{cases} Q_{MT}(t) = Q_{HE,in}(t) + Q_{AC,in}(t) \\ Q_{HE,h}(t) + Q_{EH}(t) \geqslant Q_H(t) \end{cases} \tag{11}$$

式(11)中:$Q_{MT}(t)$ 为微燃机的热出力;$Q_{HE,in}(t)$ 和 $Q_{AC,in}(t)$ 分别是热交换器和吸收式制冷机的输入端;$Q_{HE,h}(t)$ 和 $Q_{EH}(t)$ 分别是热交换器和热泵设备的热出力;$Q_H(t)$ 为系统热负荷。

$$C_{AC}(t) + C_{ER}(t) \geqslant Q_C(t) \tag{12}$$

式(12)中:$C_{AC}(t)$ 是吸收式制冷机冷出力;$C_{ER}(t)$ 为电制冷机冷出力;$Q_C(t)$ 为系统冷负荷。

2 综合不确定性因素的多维优化规划模型

2.1 总体思路

提出一种综合不确定性、经济性与可靠性因素的综合能源系统多维优化规划模型,如图 2 所示。该模型由不确定性因素优化模型和基于分级构成类混合策略博弈的多维协调规划模型构成。利用不确定性优化模型对风光资源进行优化处理,获得更合理的可再生能源出力特性,减少可再生能源出力不确定性对系统的影响。采用基于混合策略博弈的多维协调规划模型依据处理后的数据来进行规划分析,最终输出合理的综合能源系统配置方案。

2.2 不确定性优化模型

可再生能源作为综合能源系统的重要能源支撑,其出力的不确定性对系统的合理配置产生极大的影响。提出结合序列分布概率的不确定性优化模型来减小不确定性因素对系统规划的影响。将全年出力分成冬季、夏季和过渡性季节三类典型出力曲线,更准确的描述可再生能源的出力特性,从而减小由于可再生能源出力不确定性带来的对系统规划配置的影响。

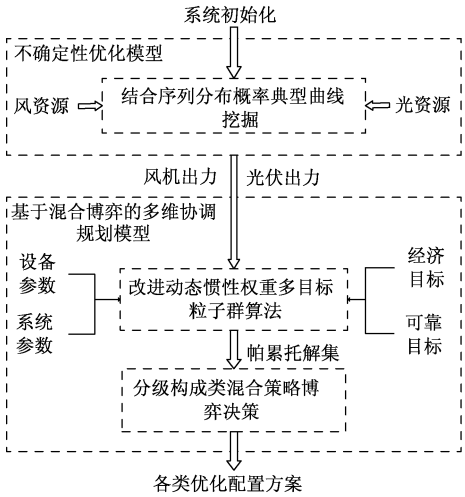

图 2 综合不确定性因素的多维优化规划模型

Fig. 2 Multi-dimensional optimization planning model with integrated uncertain factors

以风机典型功率曲线为例。采用模糊 C 均值聚类方法对风速数据进行聚类,得到冬季、夏季和过渡性季节三大类风速数据,基于所得的数据,采用基于序列分布概率的典型功率曲线挖掘算法获得风速典型曲线,结合式(1)计算出风机典型出力曲线。将获得的三类典型出力曲线按照季节天数合成为全年出力曲线。具体流程如图 3 所示。关于挖掘算法的具体实现过程本文不再详述,可以参考有关文献[17]。

2.3 基于混合策略博弈的多维协调优化模型

2.3.1 综合经济性与可靠性的多目标优化

从经济性与可靠性两个维度出发,构建计及经济性与可靠性的双目标函数。

目标 1 以综合能源系统在生命周期内所有收支费用按实际利率年均化后的成本 C_{com} 为经济指标。

$$C_{com} = \min\left(\sum_{j}^{n} C_{jann,cost} + C_{buy,gas} + C_{net}\right) \tag{13}$$

式(13)中:n 为系统元件个数;$C_{jann,cost}$ 为第 j 个元件的年均成本;$C_{buy,gas}$ 为系统年购气费用;C_{net} 电网年购电成本与售电成本之差。

$$C_{buy,gas} = \sum_{t=1}^{8\,760}\left[c_{gas}P_{gas}(t)\right] \tag{14}$$

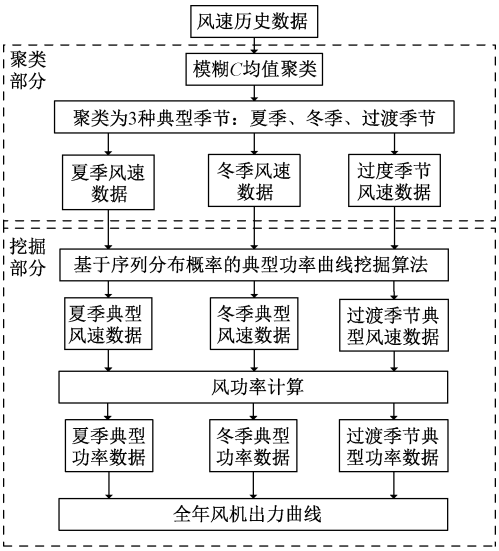

图 3　风电典型日曲线挖掘流程图

Fig. 3　Flow diagram of typical daily curve mining of wind power

$$C_{\text{net}} = \sum_{t=1}^{8\,760} \left[c_{\text{net,buy}} P_{\text{net,buy}}(t) - c_{\text{net,sell}} P_{\text{net,sell}}(t) \right] \tag{15}$$

式中：c_{gas}、$c_{\text{net,buy}}$、$c_{\text{net,sell}}$ 分别为天然气售价、电网售电、购电价格；$P_{\text{gas}}(t)$、$P_{\text{net,buy}}(t)$ 和 $P_{\text{net,sell}}(t)$ 分别为 t 时刻的购气功率、从电网购电的功率和向电网售电功率。

目标 2　综合能源系统运行阶段应最大程度地依靠自身系统为负荷提供支撑,尽可能减少负荷对电网的依赖程度,采用电网供电率 f_{net} 来表征系统供能的可靠性。

$$f_{\text{net}} = \min \frac{\sum_{t=1}^{8\,760} \left[P_{\text{net,buy}}(t) \right]}{\sum_{t=1}^{8\,760} \left[P_{\text{e}}(t) + P_{\text{r}}(t) + P_{\text{c}}(t) \right]} \tag{16}$$

式(16)中：$P_{\text{e}}(t)$ 为 t 时刻系统的电负荷；$P_{\text{r}}(t)$、$P_{\text{c}}(t)$ 分别为 t 时刻系统的热、冷负荷由电网供给时的所需的功率；$P_{\text{net,buy}}(t)$ 为 t 时刻系统的购电功率。

2.3.2　改进动态惯性的多目标粒子群算法

采用多目标粒子群算法[18]对上述多目标规划模型进行求解,同时为提高算法的速度和收敛性,本文设计了改进动态惯性权重和学习因子的策略,具体改进如下。

(1)采用动态惯性权重 ω,即

$$\omega(k) = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \left(\frac{k}{k_{\max}} \right)^2 \tag{17}$$

式(17)中：$k_{\max}$ 为最大迭代次数，$k_{\max} = 100$。

(2)改进学习因子 c_1、c_2。学习因子采用线性调整策略,即

$$\begin{cases} c_1 = 2.5 - \dfrac{k}{k_{\max}} \\ c_2 = 1 - \dfrac{1.5k}{k_{\max}} \end{cases} \tag{18}$$

2.3.3　基于分级构成类混合策略博弈的决策方法

博弈优化理论能很好地处理多目标优化中各个函数互相争斗的问题。将经济性和可靠性指标作为博弈的参与者,Pareto 最优解集中的各个解作为博弈参与者的策略集合,使得博弈的结果达到纳什均衡。

通过使用分级构成类混合策略博弈来寻求最优解,如表 1 和图 4 所示,采用低、中、高等级对目标函数进行分级，a_i、b_i 作为决策者对划分后的隶属度等级的价值评估。

表 1　目标函数收益系数表

Table 1　Income coefficient table of objective function

目标函数	低	中	高
F_1	a_1	a_2	a_3
F_2	b_1	b_2	b_3

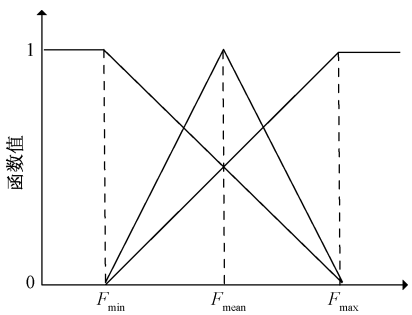

图 4　隶属函数

Fig. 4　Membership function

其中低、中、高收益等级的模糊隶属度计算公式为

$$u_{\text{s},i} = \frac{f_{i,\max} - f_i}{f_{i,\max} - f_{i,\min}} \tag{19}$$

$$u_{\text{b},i} = \frac{f_i - f_{i,\min}}{f_{i,\text{mean}} - f_{i,\min}} \tag{20}$$

$$u_{\text{m},i} = \begin{cases} \dfrac{f_i - f_{i,\min}}{f_{i,\text{mean}} - f_{i,\min}}, & f_i < f_{i,\text{mean}} \\ \dfrac{f_{i,\max} - f_i}{f_{i,\max} - f_{i,\text{mean}}}, & f_i \geqslant f_{i,\text{mean}} \end{cases} \tag{21}$$

Pareto 最优解中每个方案的评价指标为

$$\text{obj}_i = u_i(a_i, b_i) = u_{\text{s},i} a_1 + u_{\text{m},i} a_2 + u_{\text{b},i} a_3 + u_{\text{s},i} b_1 + u_{\text{m},i} b_2 + u_{\text{b},i} b_3 \tag{22}$$

式中：$u_{\text{s},i}$、$u_{\text{m},i}$、$u_{\text{b},i}$ 分别对应目标函数的低、中、高三个收益等级的模糊隶属度；$f_{i,\max}$、$f_{i,\text{mean}}$、$f_{i,\min}$ 分别是

第 i 个目标函数的最大值、平均值和最小值。最后 obj 值最大者表示决策者越满意,反之则越不满意。

3 算例分析

3.1 基础数据

选取某综合能源系统示范项目进行验证分析。根据图 1 的综合能源系统结构搭建仿真模型,仿真步长为 1 h,全年 8 760 h,项目生命周期 25 年。电、热、冷负荷数据如图 5 所示。系统规划的设备参数如表 2 所示。依据图 2 典型日曲线挖掘流程图,分别获得 3 类典型季节下的风机和光伏的典型日功率曲线,如图 6、图 7 所示。选择夏季 90 d、冬季 111 d、过渡季节 164 d 组成全年的风电、光伏功率曲线。

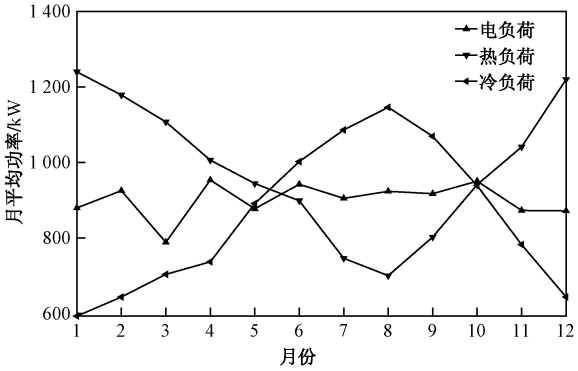

图 5 系统负荷月平均功率

Fig. 5 Average monthly power of system load

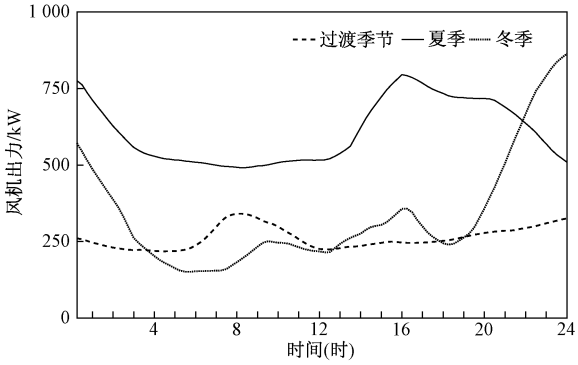

图 6 风机典型日功率曲线

Fig. 6 Typical daily power curve of fan

表 2 设备基本参数

Table 2 Basic parameters of equipment

设备	单机容量/kW	初始安装成本/(kW·元$^{-1}$)	维护成本/(kW·元$^{-1}$)	置换成本/(kW·元$^{-1}$)
风机	1 000	7 490	129	7 490
光伏	60	6 000	60	6 000
储能	100(kW·h)	1 100	11	1 100
微燃机	300	6 900	10	6 900

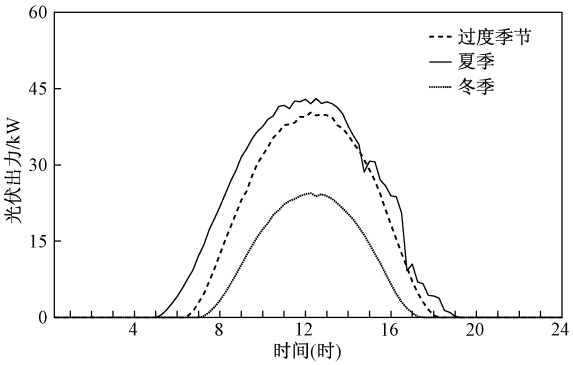

图 7 光伏典型日功率曲线

Fig. 7 Typical daily power curve of PV

3.2 优化配置结果分析

基于所提方法进行仿真分析,使用分级构成类混合策略博弈方法通过对目标函数进行分级多权重处理,从目标偏好信息相同、侧重经济收益、侧重可靠性三个维度分别获得最优配置解,结果如表 3 所示。

表 3 不同偏好下的系统配置结果

Table 3 System configuration results under different preferences

偏好	风机/台	光伏/kW	锂电池/台	微型燃气轮机/台	电网供电率	系统运行成本/元
偏好信息相同	8	1 020	0	7	0.020 8	7 891 718
偏好经济效益	7	1 140	0	6	0.033 4	7 648 120
偏好可靠性	7	540	1	9	0.009 4	8 280 041

由表 3 可知,不同的偏好侧重点不同,其系统配置结果也各不相同。相同偏好信息下,电网供电率为 0.020 8、系统运行成本为 7 891 718 元,在偏好经济效益时,系统电网供电比例增加,设备配置数量下降,系统运行成本降至 7 648 120 元,电网供电率为 0.033 4,系统可靠性降低。偏好可靠性时,系统配置设备数量增加,对电网的依赖降低,此时电网供电率降至 0.009 4,但系统运行成本增至 8 280 041 元。

3.3 不确定性影响分析

为了验证本文提出的不确定性优化模型的有效性,以偏好信息相同为例,本文进一步开展可再生能源出力不确定性对规划结果的影响分析。由 3.2 节仿真结果分析,风电为系统能源主要支撑。选取过渡季节 365 d 组成风机全年出力曲线,仿真对比结果如表 4 所示。

由表 4 可知,相较于本文提出的多典型日组合出力特性方案,单一典型日出力方案下系统多配置一台微型燃气轮机,产生更高的运行成本。这是由

表 4　不同典型日组合下的系统配置结果

Table 4　System configuration results under different typical day combinations

典型日	风机/台	光伏/kW	锂电池/台	微型燃气轮机/台	电网供电率	系统运行成本/元
组合典型日	8	1 020	0	7	0.020 8	7 891 718
单一典型日	8	1 080	0	8	0.016 7	8 386 173

于采用单一典型日组成的年出力方式,其估计的风机出力小于实际的风机出力,导致系统增加一台微型燃气轮机来弥补负荷不足。以上分析可知,在不考虑不确定性的情况下,对风光等资源的估计会产生较大偏差,进而影响整个系统的配置合理性。因此,对可再生能源出力的不确定性分析十分必要。

3.4　备用度对配置方案的影响

综合能源系统的备用容量是指在系统理论负荷需求达到供需平衡的前提下,增加一定的备用容量以满足"源""荷"两侧的供给需求波动对于系统供需平衡的影响。以电负荷为例,冷、热负荷同理,备用容量用系统平均电负荷的年增量 δ 形式描述为

$$\delta = (1+\mu)\overline{P_{\mathrm{L}}} \tag{23}$$

式(23)中:μ 表示系统中的备用度,%;$\overline{P_{\mathrm{L}}}$ 为系统的平均电负荷。

在偏好信息相同的条件下,将系统电、热、冷负荷备用度均逐渐递增至 10% 来模拟不同时间段出现的负荷变化。从图 8 可知,随着备用度增加,系统的储能设备容量相应增加。结果表明通过合理增加蓄电池这类可控储能容量,可以达到提高系统可靠性的目的。

系统备用度与电网供电率和系统运行成本的关系如图 9 所示。系统备用度与电网供电率成反比,与系统运行成本成正比。系统备用容量的增加伴随着系统的电网供电率降低以及系统成本的增加。

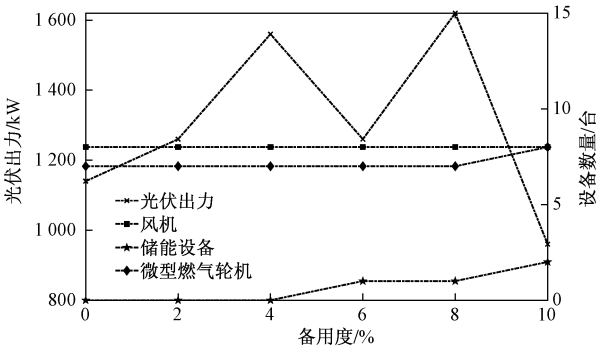

图 8　不同备用度下的综合能源系统配置结果

Fig. 8　Comprehensive energy system configuration results with different reserve degrees

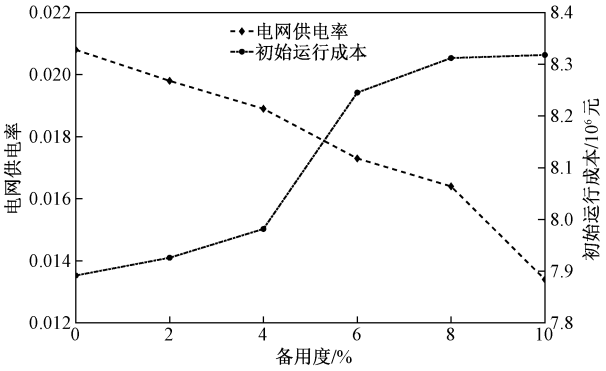

图 9　系统备用度与电网供电率和系统运行成本的关系

Fig. 9　Relationship between system reserve degree, power supply rate of power grid and initial operating cost

4　结论

在考虑可再生能源充分消纳的背景下,提出了一种考虑风光不确定性的综合能源系统博弈决策多维协同规划模型。采用基于序列分布的典型曲线挖掘方法,获得风光的典型出力曲线,组合生成风光出力不确性优化模型,削弱风光不确定性对系统规划的影响。以系统运行成本最低、系统电网供电率最低为优化目标,采用改进型多目标粒子群算法进行求解,对生成的 Pareto 解集使用分级构成类混合策略博弈进行筛选,生成满足决策者的不同偏好需求的规划配置。通过国内某个园区综合能源系统实际案例仿真,验证了方法有效性,并分析了风光不确定性、系统备用度对系统规划配置的影响。研究结果可为决策者规划综合能源系统提供参考。

参　考　文　献

[1] 王成山, 吕超贤, 李　鹏, 等. 园区型综合能源系统多时间尺度模型预测优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6791-6803, 7093.
Wang Chengshan, Lü Chaoxian, Li Peng, et al. Predictive and optimal scheduling of park integrated energy system based on multi-time scale model[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 6791-6803, 7093.

[2] Yang M, Shi C Y, Liu H Y. Day-ahead wind power forecasting based on the clustering of equivalent power curves[J]. Energy, 2021, 218: 119515.

[3] 任洪波, 侯亚群, 李琦芬, 等. 基于博弈论的多能互补综合能源系统规划设计方法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(5): 1812-1819.
Ren Hongbo, Hou Yaqun, Li Qifen, et al. A method for planning and design of multi-energy complementary comprehensive energy system based on game theory[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(5): 1812-1819.

[4] 刘敦楠, 秦光宇, 李　奇. 考虑多类型能源转换与存储的综合

能源微网优化运行研究[J]. 南方电网技术, 2018, 12(3): 105-115.
Liu Dunnan, Qin Guangyu, Li Qi. Research on optimization operation of integrated energy microgrid considering multi-type energy conversion and storage[J]. Southern Power Grid Technology, 2018, 12(3): 105-115.

[5] 孙 强, 高 松, 谢 典, 等. 协调可靠性与经济性的园区综合能源系统优化规划[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(4): 76-82.
Sun Qiang, Gao Song, Xie Dian, et al. Optimal planning of integrated energy system for industrial park based on coordination of reliability and economy[J]. Journal of Electric Power Systems and Automation, 2020, 32(4): 76-82.

[6] 邵成成, 王锡凡, 王秀丽, 等. 多能源系统分析规划初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(14): 3817-3829.
Shao Chengcheng, Wang Xifan, Wang Xiuli, et al. Analysis and planning of multi-energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(14): 3817-3829.

[7] 孙 强, 谢 典, 聂青云, 等. 含电-热-冷-气负荷的园区综合能源系统经济优化调度研究[J]. 中国电力, 2020, 53(4): 79-88.
Sun Qiang, Xie Dian, Nie Qingyun, et al. Research on economic optimal scheduling of integrated energy system in industrial park with electric, heating, cooling and gas loads[J]. China Electric Power, 2020, 53(4): 79-88.

[8] 杨 楠, 黄 禹, 董邦天, 等. 基于多主体博弈的电力-天然气综合能源系统联合规划方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6521-6533.
Yang Nan, Huang Yu, Dong Bangtian, et al. Research on joint planning method of electric power and natural gas integrated energy system based on multi-agent game[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(22): 6521-6533.

[9] 古哲源, 苏小林, 秦 宏, 等. 综合能源系统储能规划研究[J]. 电气自动化, 2019, 41(5): 31-34.
Gu Zheyuan, Su Xiaolin, Qin Hong, et al. Research on energy storage planning of integrated energy system[J]. Electrical Automation, 2019, 41(5): 31-34.

[10] 邹 磊, 唐一铭, 刘祝平, 等. 考虑分期规划与设备替换的园区型综合能源系统最优配置[J]. 中国电力, 2021(1): 1-10.
Zou Lei, Tang Yiming, Liu Zhuping, et al. Optimal configuration of garden type integrated energy system considering staging planning and equipment replacement[J]. China Electric Power, 2021(1), 1-10.

[11] 郑海雁, 邹 磊, 杨 斌, 等. 含储能装置的园区综合能源系统三级协同规划设计方法[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(7): 2705-2712.
Zheng Haiyan, Zou Lei, Yang Bin, et al. Three-level collaborative planning and design method for park integrated energy system with energy storage devices[J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(7): 2705-2712.

[12] 张萌萌, 董 军. 基于 CVaR 的灵活综合能源系统随机调度优化模型[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(3): 301-309.
Zhang Mengmeng, Dong Jun. Optimal model of flexible integrated energy system stochastic scheduling based on CVAR[J]. Global Energy Internet, 2020, 3(3): 301-309.

[13] 张晓辉, 刘小琰, 钟嘉庆. 考虑奖惩阶梯型碳交易和电-热转移负荷不确定性的综合能源系统规划[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(19): 6132-6142.
Zhang Xiaohui, Liu Xiaoyan, Zhong Jiaqing. Integrated energy system planning considering reward and punishment stepped carbon trading and uncertainty of electric heat transfer load[J]. Prceeding of the CSEE, 2020, 40 (19): 6132-6142.

[14] 金亦舟, 张莉萍, 牛启帆. 计及随机模糊不确定性的含风电配电网重构[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(7): 67-72.
Jin Yizhou, Zhang Liping, Niu Qifan. Wind power distribution network reconstruction with stochastic fuzzy uncertainty[J]. Journal of Electric Power Systems and Automation, 2020, 32(7): 67-72.

[15] 赵 瑾, 雍 静, 郇嘉嘉, 等. 基于长时间尺度的园区综合能源系统随机规划[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 62-67.
Zhao Jin, Yong Jing, Xun Jiajia, et al. Stochastic programming of industrial park integrated energy system based on long time scale[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 62-67.

[16] 仇 知, 王蓓蓓, 贲树俊, 等. 计及不确定性的区域综合能源系统双层优化配置规划模型[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 176-185.
Qiu Zhi, Wang Beibei, Ben Shujun, et al. A two-level optimal allocation planning model for regional integrated energy system considering uncertainty[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 176-185.

[17] 杨锡运, 任 杰, 李相俊, 等. 结合序列分布概率的储能系统典型功率曲线提取方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10): 8-14, 28.
Yang Xiyun, Ren Jie, Li Xiangjun, et al. Typical power curve extraction method of energy storage system combined with sequence distribution probability[J]. Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 8-14, 28.

[18] 董德华. 商业园区源-储-荷协调控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2018.
Dong Dehua. Research on coordinated control strategy of source-storage-load in business park[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2018.