

# 考虑后悔规避的工业园区综合能源系统扩展规划方法

潘乐真<sup>1</sup>, 周满<sup>2</sup>, 赵璞<sup>1</sup>, 刘文琳<sup>3</sup>, 郑思源<sup>1</sup>

(1. 国网浙江省电力有限公司温州供电公司, 浙江 温州 325000;

2. 国网浙江省电力有限公司, 杭州 310007;

3. 北京天和本安电力科技有限公司, 北京 102206)

**摘要:** 工业园区的能源形式多样且规划的不确定性因素多, 针对工业园区能源规划后悔风险大的问题, 提出一种考虑后悔规避的综合能源系统扩展规划方法。该方法从最小-最大后悔规避和平均后悔值最低两方面, 以规划方案在不同天然气价格波动场景下的建设、运维和环保成本的后悔值为优化目标, 通过优化计算得到工业园区能源系统的规划方案, 并讨论了天然气价格对工业园区综合能源系统扩展规划的影响。温州工业园区的优化结果表明: 与传统的基于期望的规划方法相比, 所提规划方法可将最大后悔值减少 17.8%, 综合后悔值减少 9.4%, 效果明显。

**关键词:** 综合能源系统; 后悔规避; 最小-最大后悔值; 工业园区; 规划方法

文章编号: 1007-1881(2021)04-0040-07

DOI: 10.19585/j.zjdl.202104006

中图分类号: TM73

文献标志码: B

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



## An Expansion Plan of the Integrated Energy System in Industrial Park Based on Regret Aversion

PAN Lezhen<sup>1</sup>, ZHOU Man<sup>2</sup>, ZHAO Pu<sup>1</sup>, LIU Wenlin<sup>3</sup>, ZHENG Siyuan<sup>1</sup>

(1. State Grid Wenzhou Power Supply Company, Wenzhou Zhejiang 325000, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China;

3. Beijing Tianhe Benan Electric Power Technology Co., Ltd., Beijing 102206, China)

**Abstract:** Due to the mixed energy and planning uncertainty of industrial park, the paper proposes an expansion plan of integrated energy system based on regret aversion considering high regret aversion risk of energy planning in an industrial park. The method, in respect of min-max regret value and the minimum average regret value, optimizes the regret value of the construction, operation and maintenance and environmental protection costs in the expansion plan for IPIES with different natural gas price fluctuations to conclude a planning scheme of the energy system in the industrial park, and discusses the impact of natural gas prices on the expansion plan. The optimization results of Wenzhou Industrial Park show that the proposed method, in contrast to the traditional planning method based on expectation, can reduce the maximum regret value by 17.8% and the comprehensive regret value by 9.4%.

**Keywords:** integrated energy system; regret aversion; min-max regret value; industrial park; planning method

## 0 引言

建设综合能源系统, 集电、蒸汽、冷和热等能源的生产、转换、存储和消费于一体, 进而实现多能源系统的协调互补、高效利用和综合服务是未来能源技术的发展趋势<sup>[1-3]</sup>, 针对多种能源集

中的工业园区, 如何规划、建设工业园区的能源系统是当前研究的热点<sup>[4-5]</sup>。为规划能源系统结构和容量, 国内外学者提出了很多能源系统的规划目标、规划模型和算法<sup>[6-8]</sup>, 但主要是针对特定状态的系统规划。

针对综合能源系统规划, 文献[9]将综合能源系统设备容量视为连续变量, 提出了一种考虑电、热、气耦合的综合能源系统混合整数线性规划规划方法, 实现对综合能源系统设备容量的优化。

基金项目: 国网浙江省电力有限公司资助项目(5211WZ18007D)

文献[10]提出了基于CCHP(冷热电联产)的区域综合能源系统优化规划模型。文献[11]从多网耦合和可靠性两个层面研究了城市综合能源系统电、气、热网络的联合规划方法。文献[12]建立了典型的电转气设备模型,对电转气厂站和风电场联合进行选址定容优化,以总投资收益最大为目标对模型求解。文献[13-14]证明,与传统的低成本计划方法相比,灵活的扩展规划可更好地处理不确定性。上述研究针对各类能源的增长需求和不确定性提出了扩展规划的方法,以解决能源系统的规划或对场景进行处理。

综合能源系统的能源形式多样性和规划的不确定性因素多,能源系统的规划存在后悔的风险,需要考虑规划方案后悔的风险及其成本。文献[15]提出了基于最小-最大化后悔值的模型,以便在最大化后悔决策方案中选择后悔值最小的规划决策。目前,后悔理论在经济学中的消费者行为研究和出行路径规划等方面已经有大量的应用<sup>[16-17]</sup>。在综合能源系统的规划中,不确定性引起的预测误差会导致决策者为系统建设付出超额的建设、运行成本,同样会引起决策者的后悔,因此研究考虑后悔规避的能源系统规划方法具有重要意义。

## 1 系统结构和能量流

针对典型工业园区综合能源系统实际和参考大量现有研究成果,本文所研究的能源系统结构和能量流如图1所示。热锅炉系统包括4个部分:供应部分,包括电网、天然气网和蒸汽网;转换部分,包括微燃机、电锅炉、燃气锅炉、热泵、电制冷机、热交换器、溴冷机;存储部分,包括电池储电、蒸汽蓄热、储冷;负荷部分,包括电负荷、蒸汽负荷、热负荷、冷负荷。

## 2 规划模型和算法

工业园区综合能源系统规划分场景分析层、扩展规划层和后悔规避层3个层次。

### 2.1 场景分析层

采用文献[18]的场景分析法处理各种能源负荷的功率波动和随机性。负荷场景缩减后的典型日场景数为 $M$ ,典型日场景在全年中所占天数为 $D_m$ 。针对规划期内能源负荷的增长性,参考电力系统多阶段规划方法,采用持续负荷曲线描述中

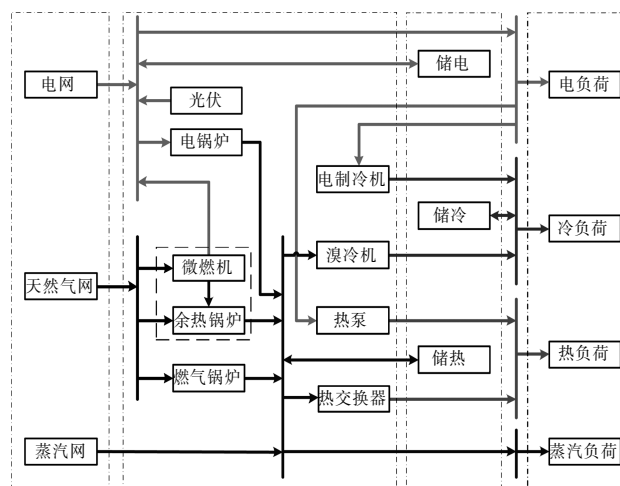


图1 工业园区能源系统结构和能量流

长期负荷增长预期<sup>[19]</sup>,将规划期内的负荷水平分为若干个水平段。不同负荷水平下的典型日负荷特性曲线经等比值变化得到。另外,考虑规划期内设备价格会随着科技发展递减,并在技术成熟后趋于平稳<sup>[20]</sup>。采用分段指数函数来表示设备价格的动态变化<sup>[21]</sup>,即:

$$c^{1,k,y} = \begin{cases} c_0^{1,k}(1+g_k)^y, & 1 < y < Y_k^c \\ c_0^{1,k}(1+g_k^c), & Y_k^c \leq y < Y \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $c^{1,k,y}$ 为设备 $k$ 第 $y$ 年的建设价格; $g_k$ 为设备 $k$ 的价格修正系数; $g_k^c$ 为设备的临界降价系数; $Y_k^c$ 为设备达到临界价格的时间; $Y$ 为系统运行年限。

### 2.2 扩展规划层

#### 2.2.1 目标函数

扩展规划层模型以天然气价波动场景 $s \in S$ 下多阶段规划的综合总成本净现值 $C_s^{\text{COM}}$ 为目标函数,包括建设成本 $C_s^I$ 、运行成本 $C_s^O$ 、维护成本 $C_s^M$ 及排放环保成本 $C_s^{\text{ENV}}$ ,4项成本可通过计算得到,即:

$$C_s^{\text{COM}} = C_s^I + C_s^O + C_s^M + C_s^{\text{ENV}} \quad (2)$$

#### 2.2.2 约束条件

##### (1) 扩展规划约束

系统各设备进行一次扩容或保持上一阶段的配置,设备寿命到期则需退役,可表示为:

$$W_{s,a}^k \geq W_{s,a-1}^k - W_{s,a}^{k,\text{out}}, \quad (3)$$

$$I_a^{\text{des}} \geq I_{a-1}^{\text{des}}, \quad (4)$$

$$W_{s,a}^{k,\text{out}} = W_{s,a-n_k}^k - W_{s,a-n_k-1}^k, \quad (5)$$

式中: $W_{s,a}^k$ 为 $k$ 设备在场景 $s$ 下 $a$ 阶段的配置容

量;  $W_{s,a}^{k,out}$  为  $k$  设备在场景  $s$  下  $a$  阶段的退役容量;  $n_k$  为  $k$  设备能服役的规划阶段数; 当  $a \leq 0$  时,  $W_{s,a}^k = 0$ 。

### (2) 功率平衡约束

制定各种能源设备功率平衡约束。例如, 吸收式制冷机输出冷功率、电制冷机输出冷功率、冷负荷功率约束如下:

$$H_{s,a,m,t}^{HC} + H_{s,a,m,t}^{EH} = H_{s,a,m,t}^{LD}, \quad (6)$$

$$C_{s,a,m,t}^{AC} + C_{s,a,m,t}^{EC} = C_{s,a,m,t}^{LD} + C_{s,a,m,t}^{CS}, \quad (7)$$

$$G_{s,a,m,t}^{SYS} = G_{s,a,m,t}^{LD} + G_{s,a,m,t}^{CHP} + G_{s,a,m,t}^{GB}, \quad (8)$$

式中:  $H_{s,a,m,t}^{HC}$ ,  $H_{s,a,m,t}^{EH}$ ,  $H_{s,a,m,t}^{LD}$  分别为热交换器输出热功率、热泵输出热功率、热负荷功率;  $C_{s,a,m,t}^{AC}$ ,  $C_{s,a,m,t}^{EC}$ ,  $C_{s,a,m,t}^{LD}$  分别为吸收式制冷机输出冷功率、电制冷机输出冷功率、冷负荷功率;  $G_{s,a,m,t}^{LD}$ ,  $G_{s,a,m,t}^{CHP}$ ,  $G_{s,a,m,t}^{GB}$  分别为天然气负荷功率、微型燃气轮机功率、燃气锅炉消耗的天然气功率。

### (3) 外网交互约束

外网交互约束如下:

$$P_{\min}^{SYS} \leq P_{s,a,m,t}^{SYS} \leq P_{\max}^{SYS} + P_0 \cdot I_a^{des}, \quad (9)$$

$$G_{\min}^{SYS} \leq G_{s,a,m,t}^{SYS} \leq G_{\max}^{SYS}, \quad (10)$$

$$S_{\min}^{SYS} \leq S_{s,a,m,t}^{SYS} \leq S_{\max}^{SYS}, \quad (11)$$

式中:  $P_{\max}^{SYS}$ ,  $G_{\max}^{SYS}$ ,  $S_{\max}^{SYS}$  分别为系统与外部电、气、热蒸汽网的交互功率上限;  $P_0$  为电力传输扩容容量;  $P_{\min}^{SYS}$ ,  $G_{\min}^{SYS}$ ,  $S_{\min}^{SYS}$  分别为系统与外部电、气、热、蒸汽网的交互功率下限。

### (4) 能源转换设备约束

为简化计算, 取各能源转换设备的运行效率为常数, 变工况特性忽略不计。燃气锅炉、电蒸汽锅炉、吸收式制冷机、电制冷机、热泵、热交换器的约束统一表述为:

$$Q_{s,a,m,t}^{k1,out} = \eta^{k1} \cdot Q_{s,a,m,t}^{k1,in}, \quad (12)$$

$$\varepsilon_{\min}^{k1} \cdot W_{s,a}^{k1} \leq Q_{s,a,m,t}^{k1,in} \leq W_{s,a}^{k1}, \quad (13)$$

式中:  $Q_{s,a,m,t}^{k1,in}$  和  $Q_{s,a,m,t}^{k1,out}$  分别为  $k_1$  设备在场景  $s$  下  $a$  阶段典型日  $m$  内  $t$  时刻的输入和输出功率;  $W_{s,a}^{k1}$  为场景  $s$  下  $a$  阶段的设备总配置容量;  $\eta^{k1}$  为设备运行效率;  $\varepsilon_{\min}^{k1}$  为设备最低功率系数。

## 2.3 后悔规避层

### 2.3.1 最优备选方案

后悔规避层包括最优备选方案和后悔规避优化两部分。最优备选方案利用扩展规划模型、式(2)规划目标和式(3)—(13)约束条件, 依次计算天然气价格场景  $s \in S$  下的综合成本  $C_s^{COM}$ , 最优

备选方案  $\omega_s$  和运行方案  $\tau_s^\omega$ , 将  $C_s^{COM}(\omega_s, \tau_s^\omega)$  作为已知参数代入后悔规避优化部分。

### 2.3.2 后悔规避优化

后悔规避优化针对规划决策者没有选择更优方案的后悔情绪, 选取额外综合总成本为后悔值, 即:

$$C_s^{REG}(\omega, \tau_s^\omega) = C_s^{COM}(\omega, \tau_s^\omega) - C_s^{COM}(\omega_s, \tau_s^{\omega_s}), \quad (14)$$

式中:  $C_s^{REG}(\omega, \tau_s^\omega)$  为规划方案  $\omega$  在场景  $s$  下的后悔值;  $\tau_s^\omega$  为方案  $\omega$  在场景  $s$  下的运行方案;  $C_s^{COM}(\omega, \tau_s^\omega)$  为规划方案  $\omega$  在场景  $s$  下以方案  $\tau_s$  运行的综合总成本;  $C_s^{COM}(\omega_s, \tau_s^{\omega_s})$  为场景最优方案计算得到的场景  $s$  下的最低综合总成本。

在天然气价格波动下, 使用了最小-最大后悔值, 并考虑了这些情况的分布, 以此来控制综合能源系统扩展计划方案在不同天然气价格波动情况下的后悔风险, 即:

$$C_{\min \max} = \min_{s \in S} \max \pi^s \cdot C_s^{REG}(\omega, \tau_s^\omega), \quad (15)$$

式中:  $\pi^s$  为场景  $S$  出现的概率。

此外, 将最小-最大后悔目标与平均综合成本的最小目标一起考虑。由于已知每种情况下的最佳综合成本, 因此平均后悔值等于最小预期综合成本的目标。综合能源系统扩展计划方法的目标功能最终构造为:

$$C_{\min} = \min C^{CRE}(\omega, \tau_s^\omega), \quad (16)$$

$$C^{CRE}(\omega, \tau_s^\omega) = \alpha \cdot \max_{s \in S} \pi^s \cdot C_s^{REG}(\omega, \tau_s^\omega) + \beta \cdot \sum_{s \in S} \pi^s \cdot C_s^{COM}(\omega, \tau_s^\omega), \quad (17)$$

式中:  $C^{CRE}(\omega, \tau_s)$  为综合后悔值;  $\alpha$ ,  $\beta$  分别为最小-最大后悔规避目标和平均后悔最低目标的权重系数, 且  $\alpha + \beta = 1$ 。当  $\alpha$  取为 1 时, 式(16)与式(17)等价。

后悔规避优化以式(16)为目标函数, 以式(3)—(13)约束条件优化求解工业园区综合能源系统多阶段扩展规划方案。

### 2.4 求解算法

工业园区综合能源系统的规划模型为混合整数非线性模型, 考虑模型中变量和约束条件多, 在 MATLAB 平台上通过 YALMIP 工具箱进行数学建模, 调用商业优化求解器 GUROBI 进行模型求解。求解环境为: Intel Core 2 Duo P8600 CPU; 6

GB 内存; 软件版本为 MATLAB R2014A, YALMIP R20180612, GUROBI 8.1。求解流程如图2所示。

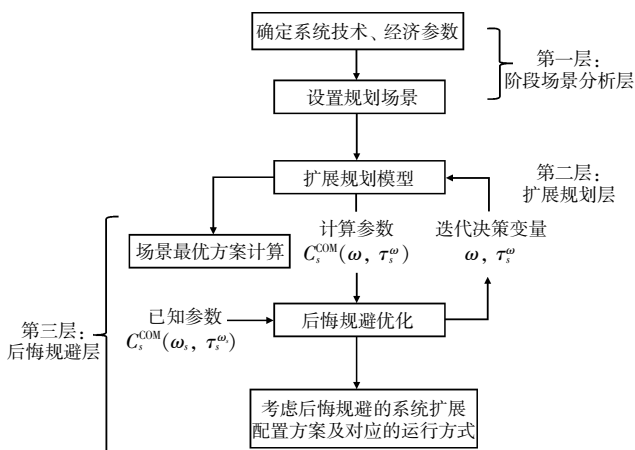


图2 考虑后悔规避的工业园区综合能源系统规划算法流程

### 3 温州工业园区扩展规划

#### 3.1 基础数据

本文以温州工业园区为例, 制定寿命15年和每阶段为5年的扩展规划。典型日分为夏日、冬日、平日三类, 在全年中所占天数分别为100, 60, 200天, 夏日有冷负荷需求, 冬日有热负荷需求。典型日负荷曲线如图3所示。按园区负荷增长预测, 三个扩展规划阶段的持续负荷分别为现负荷的150%, 200%, 250%。园区现阶段分时电价、蒸汽和天然气价格如表1所示。由于不同阶段天然气价格较现价可能有50%的波动, 设天然气价格波动分100%-150%-150%; 100%-150%-100%; 100%-150%-50%; 100%-100%-150%; 100%-100%-100%; 100%-100%-50%;

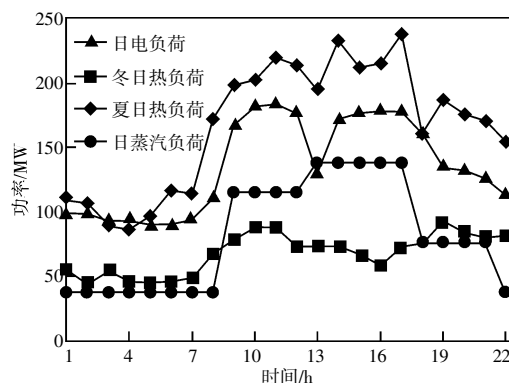


图3 典型日电、蒸汽、冷、热负荷曲线

表1 能源峰平谷价格

能源类型	元/kWh		
	峰时段	平时段	谷时段
	19:00—21:00	8:00—11:00 13:00—19:00	00:00—8:00 11:00—13:00 22:00—00:00
电	1.309 7	1.004 7	0.481 7
天然气	0.353 0	0.353 0	0.353 0
蒸汽	0.312 0	0.312 0	0.312 0

100%-50%-150%; 100%-50%-100%; 100%-50%-50%共计9种场景。

为提高运算效率, 近似后的设备运行参数、单位建设费用、运行维护费如表2所示。园区与电网、蒸汽网的交互功率上限与管网容量相关, 分别为280 MW, 192.25 MW(250 t/h)。系统不向外网输出能量, 即各网络的交互下限为0。各设备最低功率系数为0。园区电力可扩容35 MW, 扩容成本500万元。园区利用电、天然气、蒸汽的排放环保成本分别为0.07, 0.01和0.04元/kWh。取年折现率5%, 蒸汽低热值769 kWh/t, 天然气低热值9.9 kWh/m<sup>3</sup>。

表2 工业园区综合能源系统设备参数

设备类型	运行效率	建设单价 /(元·kW <sup>-1</sup> )	维护单价 /(元·kWh <sup>-1</sup> )	价格修正系数 /%	临界降价系数 /%	使用寿命 /y
光伏机组 PV	—	9 000	0.04	-5	-50	>15
微型燃气轮机 CHP	气-电: 0.3; 气-蒸汽: 0.45	6 500	0.05	-5	-50	>15
燃气锅炉 GB	0.85	700	0.02	-3	-20	>15
电锅炉 EB	0.95	900	0.01	-3	-20	>15
热泵 HP	3	1 000	0.01	-3	-20	>15
电制冷机 EC	4.5	1 000	0.01	-3	-20	>15
热交换器 HC	0.89	150	0.01	-2	-10	>15
制冷机 AC	1.2	1 100	0.01	-3	-20	>15

### 3.2 结果分析

取  $a$  为 0.5, 优化的温州工业园区综合能源系统扩展规划方案如表 3 所示。规划方案在 9 种天然气价波动场景下的后悔值及成本情况如表 4 所示。

从表 3 规划方案可看出, 由于考虑设备价格动态变化, 且从阶段 2 开始系统天然气价格出现不可预计的波动, 阶段 1 与阶段 2 之间的设备增配容量大于阶段 3。

图 4 为天然气价格波动下阶段 2 规划方案能源的购买量情况。由图 4 可看出: 当天然气价格较现价上涨 50% 时, 系统天然气购买量下降, 电和蒸汽的购买量提高; 当天然气价格较现价下降 50% 时, 系统中的天然气购买量上升, 电和蒸汽的购买量下降, 其中蒸汽的购买量几乎下降为 0。

表 5 为规划方案在 9 种天然气价场景下的成本。比较表 4 和表 5 可知, 场景 1 和场景 9 的后悔值较大, 场景 5 后悔值最小; 因此, 场景 1 和场景 9 中天然气价极高或极低导致最优备选方案间设备配置容量出现了显著的差异, 引起实际规划方案与最优备选方案不匹配, 从而引起后悔值

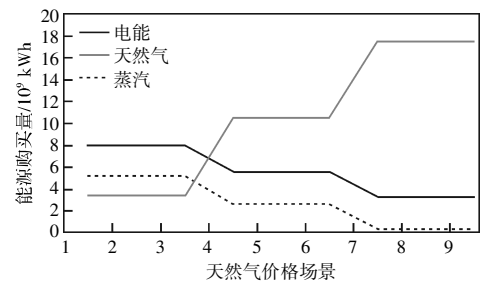


图 4 多场景下的能源购置情况

增大。

规划方案在不同场景下的成本差异主要来自运行成本差异。场景 1 整体的用能价格高, 运行成本高, 场景 9 整体的用能价格低, 运行成本低。阶段 3 用能需求大, 所以阶段 3 用能成本高, 对总体运行成本的影响大于阶段 2, 使场景 7 成本高于场景 3。

### 3.3 方法验证

通过比较方法 1: 基于后悔规避的扩展规划方法; 方法 2: 基于期望成本最低的扩展规划方法; 方法 3: 不计气价波动的扩展规划方法的扩展规划等情况, 可验证本文考虑后悔规避的扩展

表 3 考虑后悔规避的工业园区综合能源系统扩展规划方案

规划阶段容量	光伏	天然气热电联供	燃气锅炉	电锅炉	热泵	电制冷机	热交换器	溴冷机	MW
阶段 1 容量	426.15	129.43	0	39.96	77.63	126.47	68.79	37.93	
阶段 2 容量	536.87	205.09	6.13	59.00	103.51	184.43	143.84	104.32	
阶段 3 容量	536.87	224.06	6.13	61.97	122.01	191.41	143.84	104.32	

表 4 多场景下的规划方案后悔值

项 目	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4	场景 5	场景 6	场景 7	场景 8	场景 9	10 <sup>6</sup>
后悔值	252.19	161.07	185.70	65.47	13.97	80.32	69.49	50.09	347.41	
综合后悔值										87.40
考虑分布的最大后悔值										38.60
平均后悔值										136.19

表 5 多场景下的规划方案成本情况

项目	场景 1	场景 2	场景 3	场景 4	场景 5	场景 6	场景 7	场景 8	场景 9	10 <sup>9</sup> 元
建设成本										5.81
运行成本	19.49	18.49	16.81	18.64	17.65	15.97	16.97	15.98	14.30	
维护成本	0.57	0.62	0.70	0.64	0.70	0.77	0.72	0.78	0.85	
环保成本	1.54	1.44	1.32	1.40	1.30	1.18	1.28	1.18	1.06	
综合成本	27.41	26.36	24.64	26.50	25.46	23.74	24.80	23.75	22.03	
平均成本										24.97

规划方法的有效性。通过计算得到3种不同规划方法在3个阶段的设备扩展规划情况见表6,不同规划方法在不同场景下的后悔值见表7。

比较表6和表7可知,在方法2和方法3中,例如CHP(天然气热电联产)与天然气有关的设备的规划是不充分的,导致当天然气价格下降时的后悔值大幅度增加。与不计天然气价格波动的扩展规划方法相比,基于后悔规避的扩展规划方法可将最大后悔值减少17.8%,综合后悔值减少9.4%。与方法2扩展规划方法相比,方法1的扩展规划方法具有较低的后悔值。因为,规划的目标函数有效地限制了最大后悔值。

另外,考虑后悔规避的扩展规划方法通过引入更多的天然气设备(如CHP),使得规划方法在场景6—9中的性能更好,在场景1—5下的性能相对要差一些。进一步考虑代表决策者风险控制要求的最小—最大后悔权重系数的影响,表7中方法1和方法2间的综合后悔值的减少量 $\Delta C^{CRE}$ 可表示为:

$$\Delta C^{CRE} = \frac{C^{CRE}(\omega_2, \tau_s^{\omega_2}) - C^{CRE}(\omega_1, \tau_s^{\omega_1})}{C^{CRE}(\omega_2, \tau_s^{\omega_2})} \quad (18)$$

结果表明,在不同的最小—最大后悔目标权重下,方法1和方法2间的综合后悔值可降低,即随着决策者对最大后悔风险控制要求的增加,考虑后悔规避的规划方法优于基于最低预期成本的传统方法,从而使规划在面对不确定的天然气价格时更具适应性。如果决策者对风险控制要求不高,考虑后悔规避的规划方法与传统的规划方法相似,但综合后悔值仍会有所降低。因此,本文基于温州工业园区验证的考虑后悔规避的规划方法可有效控制规划决策的后悔风险,在面临天然气价格变化时,该规划方法更具适应性,以及良好的通用性。

#### 4 结论

(1)本文提出了考虑后悔规避的工业园区综合能源系统扩展规划方法,以温州工业园区为例,验证了规划方法的有效性。

(2)从最小—最大后悔规避和后悔值最低两方面,以不同天然气价格波动场景下的建设、运维、环保综合成本后悔值为优化目标,对温州工业园区进行扩展优化规划。

表6 不同规划方法下的典型设备扩展规划情况

								MW
规划方法	阶段	光伏	天然气热电联供	燃气锅炉	电锅炉	热交换器	溴冷机	
方法1	1	426.15	129.43	0	39.96	126.47	68.79	
	2	536.87	205.09	6.13	59.00	184.43	143.84	
	3	536.87	224.06	6.13	61.97	191.41	143.84	
方法2	1	426.15	129.43	0	91.13	126.47	68.79	
	2	553.52	194.88	6.21	110.46	184.43	128.52	
	3	553.52	220.51	6.21	110.46	184.43	128.52	
方法3	1	426.15	129.43	0	91.13	126.47	68.79	
	2	536.87	184.56	0	93.31	181.54	113.04	
	3	536.87	220.51	0	93.31	181.54	128.52	

表7 不同规划方法不同场景下的后悔值

										10 <sup>6</sup>
项目	规划方法	场景1	场景2	场景3	场景4	场景5	场景6	场景7	场景8	场景9
后悔值	方法1	252.19	161.07	185.70	65.47	13.97	80.32	69.49	50.09	347.41
	方法2	200.11	130.54	181.91	36.53	6.60	99.68	98.50	57.54	403.15
综合后悔值	方法1				87.40					
	方法2				89.87					
考虑分布的最大后悔值	方法1				38.60					
	方法2				44.80					
平均后悔值	方法1				136.19					
	方法2				134.95					

(3)以温州工业园区为例开展的研究工作,不仅证明规划方法的有效性,同时证明了规划方案与不考虑天然气价格波动的方案相比,可大幅降低决策后悔程度和系统成本;与考虑期望成本最低的规划方案相比,也能有效控制决策后悔的风险。

(4)随着电力体制改革深入,多区域能源的协同规划和多主体间能源规划及运行博弈将是下一步重点研究的内容。

### 参考文献:

- [1] 别朝红,王旭,胡源.能源互联网规划研究综述及展望[J].中国电机工程学报,2017,37(22):6445-6462.
- [2] 余晓丹,徐宪东,陈硕翼,等.综合能源系统与能源互联网综述[J].电工技术学报,2016,31(1):1-13.
- [3] WU J, YAN J, JIA H J, et al. Integrated energy systems[J]. Applied Energy, 2016, 167:155-157.
- [4] 国家能源局.关于推进多能源互补集成优化示范工程建设的实施意见[EB/OL].(2016-07-07)[2020-10-02].http://nea.gov.cn/2016-07/07/c-13549603.htm.
- [5] 贾宏杰,王丹,徐宪东,等.区域综合能源系统若干问题研究[J].电力系统自动化,2015,39(7):198-207.
- [6] ZHOU Z, ZHANG J, LIU P, et al. A two-stage stochastic programming model for the optimal design of distributed energy systems[J]. Applied Energy, 2013, 103(1):135-144.
- [7] ZHANG X, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A S et al. Security-constrained co-optimization planning of electricity and natural gas transportation infrastructures[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6):2984-2993.
- [8] 黄武靖,张宁,董瑞彪,等.多能源网络与能量枢纽联合规划方法[J].中国电机工程学报,2018,38(18):5425-5437.
- [9] 雷金勇,于力,郭晓斌,等.考虑电热气耦合的综合能源系统规划方法[J].电力系统及其自动化学报,2019,31(1):19-24.
- [10] 权超.考虑冷热电联供的综合能源系统规划研究[D].北京:华北电力大学,2019.
- [11] 周贤正.城市综合能源系统配电-气-热网联合规划研究[D].杭州:浙江大学,2019.
- [12] 王芑,刘伟佳,林振智,等.基于场景分析的风电场与电转气厂站协同选址规划[J].电力系统自动化,2017,41(6):20-29.
- [13] CESEÑA E A M, CAPUDER T, MANCARELLA P. Flexible distributed multienergy generation system expansion planning under uncertainty. IEEE Transactions Smart Grid 2016, 7(1):348-357.
- [14] 雷霞,唐文左,李逐云,等.考虑区域综合能源系统优化运行的配电网扩展规划[J].电网技术,2018,42(11):3459-3470.
- [15] SAVAGE L J. The theory of statistical decision[J]. Publications of the American Statistical association, 1951, 46(253):55-67.
- [16] HIGASHIKAWA Y, AUGUSTINE J, CHENG S, et al. Minimax regret 1 sink location problem in dynamic path networks[J]. Theoretical Computer Science, 2015, 85(24):24-36.
- [17] HALPERN J Y, LEUNG S. Minimizing regret in dynamic decision problems[J]. Theory and Decision, 2016, 81(1):123-151.
- [18] 李哲,王成福,梁军,等.计及风电不确定性的电-气-热综合能源系统扩展规划方法[J].电网技术,2018,42(11):3477-3487.
- [19] 丁涛,李澄,胡源,等.考虑非预期条件的电力系统多阶段随机规划建模理论与方法[J].电网技术,2017,41(11):3566-3573.
- [20] JEON C, SHIN J. Long-term renewable energy technology valuation using system dynamics and Monte Carlo simulation: Photovoltaic technology case[J]. Energy, 2014, 66(4):447-457.
- [21] 曹晓宇,王建学,张忠,等.基于长期运行模拟的独立型微网规划方案动态评估[J].电工技术学报,2016,31(21):46-56.

收稿日期:2020-12-07

作者简介:潘乐真(1984),女,高级工程师,从事电网规划、新能源管理工作。

(本文编辑:童凯)