

基于决策理论的不确定性条件下 分布式供能系统优化配置

黎达, 张士杰*

(中国科学院大学, 北京市 海淀区 100190)

Optimal Design of Distributed Energy Resource Systems Under Uncertainties Based on Decision-making Theory

LI Da, ZHANG Shijie*

(University of Chinese Academy of Sciences, Haidian District, Beijing 100190, China)

ABSTRACT: It is very important to consider uncertain factors in distributed energy resource (DER) systems to achieve good system performance. This paper considered uncertainties in load demands, renewable energy intensity and energy price in DER systems, and studied the optimal design of DER systems based on the decision-making theory. A scenario generation method was adopted to present the uncertain parameters using discrete point sets and corresponding probabilities, and an orthogonal experiment design method was used to generate scenario sets to consider combinations of various uncertain parameters. After optimization calculations, optimal system plans under scenarios were obtained, and these plans were applied to other scenarios to obtain the economic performance of the systems. Five uncertain decision-making theories (optimistic criterion, pessimistic criterion, Hurwicz criterion, Laplace criterion and minimax regret criterion) were adopted to select appropriate plans. The model was applied to a hospital, and the validity and feasibility of the model were verified. Results show that the installed capacity of equipment in the plan selected by optimistic criterion is small, and the installed capacity of equipment in the plan selected by pessimistic criterion is relatively large. Plans selected by the Laplace criterion and minimax regret criterion can achieve good economic performance operating in various scenarios. This research can help decision makers make scientific decisions and reduce operating risks of DER systems under uncertainties.

KEY WORDS: distributed energy resource; optimal design; uncertainty; uncertain decision-making theory; orthogonal

experiment design

摘要: 考虑分布式供能系统中存在的不确定性因素对系统实现良好性能十分重要。该文考虑分布式供能系统中负荷需求、可再生能源强度与能源价格的不确定性, 基于决策理论研究分布式供能系统的优化配置。采用一种情景产生方法利用离散的点集与对应概率表示参数的不确定性, 使用正交试验设计方法设计情景集考虑各不确定性参数之间的组合。经过优化计算, 得到各情景下的最优系统方案, 将这些方案应用于其他情景中, 得到系统的经济性能, 使用5种不确定型决策理论(乐观法、悲观法、乐观系数法、等可能值法、最小最大后悔值法)对方案进行选择。将模型应用于一家医院, 验证了模型的有效性与可行性。结果表明, 乐观法选择的方案中设备的安装容量较小, 悲观法选择的方案中设备的安装容量较大。等可能值法与最小最大后悔值法选择的方案在各情景中运行时可实现较好的经济性能。研究有助于决策者制定科学决策, 降低分布式供能系统在不确定性条件下运行的风险。

关键词: 分布式供能系统; 优化设计; 不确定性; 不确定型决策理论; 正交试验设计

0 引言

分布式供能系统是一种靠近用户设置的, 可同时利用传统化石燃料与可再生能源的能量供应系统^[1]。在系统配置与运行策略设计合理情况下, 分布式供能系统比传统能量供应系统展现出更佳的性能^[2], 比如更好的经济性与更低的污染物排放, 近年得到了广泛的应用与研究^[3-5]。由于分布式供能系统中的设备种类繁多, 系统结构与能量流动复杂, 往往需借助数学规划进行优化配置, 比如线性规划^[6-7], 混合整数线性规划^[8-9], 混合整数非线性

基金项目: 航空发动机及燃气轮机重大专项基础研究项目(2017-I-0002-0002)。

Project Supported by Fundamental Research Project in Chinese National Science and Technology Major Project (2017-I-0002-0002).

规划^[10-11]，多目标优化^[12-13]等；此外，分布式供能系统优化配置中存在多种不确定性因素^[14-15]，比如负荷需求、能源价格、可再生能源强度的不确定性等，可能使系统的配置形式不合理，系统运行偏离设计状态，导致系统的经济性能变差。

已有许多工作^[15-18]考虑了分布式供能系统中存在的多种不确定性因素。同时，多种不确定性优化方法被应用于不确定性条件下的分布式供能系统优化配置中。研究^[19-20]采用了 2 阶段随机规划方法，两阶段随机规划将决策过程划分为 2 个阶段：第一阶段确定系统的最优配置形式，第二阶段确定系统的最优运行策略。研究^[21-22]采用了鲁棒优化方法，鲁棒优化基于可能发生的最坏情况对问题进行优化，并且可以保证得到的解对所有可能的不确定性因素情况都可行。虽然两阶段随机规划与鲁棒优化可以有效地处理不确定性条件下的分布式供能系统优化配置问题，这种 2 种方法对风险的态度较为单一，不能考虑决策者对风险的多种态度。在随机规划中，参数的不确定性常以概率密度函数表示，目标函数常为目标量的期望值，此时对风险的态度是中立的；而鲁棒优化采取的是一种远离风险，确保结果可行的策略。事实上，不同的决策者对于风险可能持有不同态度，有必要考虑决策者的风险偏好，从而做出更合适的选择，以降低系统在不确定性条件下运行的风险。

更进一步，学者基于不确定型决策理论，考虑了决策者的风险态度，并结合对未来状况的判断来选择合适的系统方案。杨允等^[23]采用决策理论研究了长时间周期负荷需求不确定性条件下的分布式供能系统优化配置，以假定的一系列情景表示负荷需求的不确定性。Mavromatidis 等^[24]考虑了建筑负荷需求、太阳能辐射、能源价格及上网电价等不确定性因素以及决策者的风险态度，基于决策理论和两阶段随机规划，研究不确定性条件下的分布式供能系统优化，分析了不同目标函数下系统的经济性能、配置形式、运行策略与能耗份额。

本文考虑了分布式供能系统优化配置中负荷需求、能源价格和可再生能源强度的不确定性，将连续分布的不确定性参数用离散的点集及相应的概率进行表示，采用正交试验设计方法设计情景集考虑多种不确定性因素的组合，并得到各情景的概率。通过优化计算，得到各情景下最优的系统方案，将各方案应用于不同情景中，得到系统的经济性

能，使用 5 种不确定型决策理论(乐观法，悲观法，乐观系数法，等可能值法，最小最大后悔值法)对方案进行选择。将模型应用于一家医院，验证了模型的有效性，并对决策理论选择方案的配置形式，方案在不同情景下运行的经济性，及各个决策理论的特点进行了分析。

1 分布式供能系统优化配置模型

本文采用文献[17]中基于超结构建模方法构建的分布式供能系统混合整数线性规划模型对分布式供能系统进行优化配置。图 1^[17]展示了分布式供能系统的超结构图。

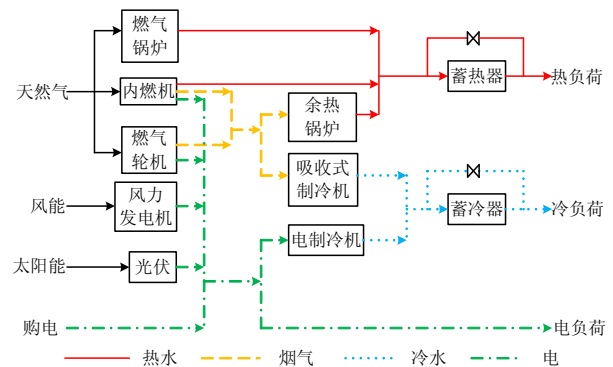


图 1 分布式供能系统超结构图

Fig. 1 Superstructure of the DER system

模型的优化目标为最小化年总成本 C_{Total} 。年总成本为设备年投资成本 C_{ECapital} ，年能耗费用 C_{Energy} ，设备年运行维护费用 C_{EOM} 的和减去可再生能源发电的年补贴收入 R_{subsidy} 。如下式所示：

$$C_{\text{Total}} = C_{\text{ECapital}} + C_{\text{Energy}} + C_{\text{EOM}} - R_{\text{subsidy}} \quad (1)$$

模型的约束条件包括设备的种类、容量与台数约束，设备运行特性约束和系统能流平衡约束，具体的数学模型可参见本文附录 A 与文献[17]。为避免出现数学模型中能流平衡约束得不到满足导致模型无法求解的问题(如情景中的负荷需求过大而方案中设备的配置容量过小，系统不能满足用户的负荷需求)，本文采用文献^[25]中的处理办法，假设当系统提供的能量不能满足用户的冷负荷与热负荷需求时，可以从外部市场购买这部分能量，通过设置较高的购能价格，使得只有当系统不能满足用户负荷需求时才选择外部购能。

2 决策理论

当前普遍采用的不确定型决策理论有乐观法、悲观法、乐观系数法、等可能值法和最小最大后悔值法 5 种类型。

1) 乐观法。

乐观法对未来的状况持积极态度,充分考虑可能发生的最好情况。当方案 p 应用于不同情景 s 中得到多个年总成本 $C_{\text{Total},p,s}$ 时,乐观法将其中最低的年总成本值作为方案的决策值,比较各个方案的决策值,最低决策值对应的方案为乐观法选择的方案,如式(2)^[26]所示:

$$\min_{p \in P} \{ \min_{s \in S} \{ C_{\text{Total},p,s} \} \} \quad (2)$$

2) 悲观法。

悲观法认为最坏的状况最有可能发生,进而做出方案选择。在本文研究中,将方案 p 应用于各个情景中,得到各个情景下的年总成本值,悲观法将其中最大的年总成本值作为方案 p 的决策值,比较各个方案的决策值,最小的决策值对应的方案为悲观法选择的方案^[26],可表示为

$$\min_{p \in P} \{ \max_{s \in S} \{ C_{\text{Total},p,s} \} \} \quad (3)$$

3) 乐观系数法。

乐观系数法也称为 Hurwicz 决策。乐观系数法认为最有可能发生的既不是最好的状况,也不是最坏的状况,而是在这之间的一种状况。它利用乐观系数 $\alpha (0 < \alpha < 1)$ 对乐观法与悲观法进行平衡。在本文研究中,首先从各方案在各个情景下运行的年总成本值中找到最小值与最大值,然后利用乐观系数 α 进行加权,作为各个方案的决策值。比较各个方案的决策值,最小决策值对应的方案为最优方案^[26],可以表示为

$$\min_{p \in P} \{ \alpha \min_{s \in S} \{ C_{\text{Total},p,s} \} + (1 - \alpha) \max_{s \in S} \{ C_{\text{Total},p,s} \} \} \quad (4)$$

4) 等可能值法。

等可能值法也称为 Laplace 决策法。等可能值法认为各个情景发生的概率相同。典型等可能值法在本文中的应用方式为将每个方案在各个情景下运行的年总成本值乘上各情景的平均概率作为该方案的决策值,比较各个方案的决策值,最小决策值对应的方案认定为最优的方案,可以表示为:

$$\min_{p \in P} \{ \frac{1}{m} \times \sum_{s \in S} C_{\text{Total},p,s} \} \quad (5)$$

本文通过正交试验设计,得到了各个情景的概率 Pr_s ,故对等可能值法的应用做出调整,将各个方案在各个情景下的年总成本值与对应情景的概率的积的和作为该方案的决策值,从各个方案中找到决策值最小的方案作为最优方案,可以表示为:

$$\min_{p \in P} \{ \sum_{s \in S} C_{\text{Total},p,s} \times Pr_s \} \quad (6)$$

5) 最小最大后悔值法。

后悔值法也称为 Savage 决策法。最小最大后悔值法的决策准则为使后悔程度最小。在本文研究中典型的最小最大后悔值法的应用方式为:首先得到各个方案在各个情景下运行的后悔值(定义为各方案在各情景下的年总成本值与对应情景下最小年总成本值 $C_{\text{Total},p^*(s),s}$ 的差),从中找到最大的后悔值作为方案的决策值。比较各个方案的决策值,最小决策值对应的方案即为最优方案,可以表示为

$$\min_{p \in P} \{ \max_{s \in S} \{ C_{\text{Total},p,s} - C_{\text{Total},p^*(s),s} \} \} \quad (7)$$

本文通过正交试验设计得到了各个情景的概率,故对最小最大后悔值法的应用方式做出调整。将各个后悔值与各个情景的概率的积重新定义为该方案在对应情景下的后悔值,从中找到最大的后悔值作为方案的决策值。比较各个方案的决策值,决策值最小的方案即选为最优方案,可以表示为

$$\min_{p \in P} \{ \max_{s \in S} \{ (C_{\text{Total},p,s} - C_{\text{Total},p^*(s),s}) \times Pr_s \} \} \quad (8)$$

3 案例研究

本文选取我国东部某城市中的一家医院作为案例研究对象。

3.1 气候特征

该城市位于暖温带气候区南部,根据当地的气候变化特征,将全年划分为夏季、冬季和过渡季 3 种典型日,各典型日的持续时间分别为 153、120 和 92 天。将每种典型日划分为 1:00 至 24:00 的 24 个时段,每个时段持续时间为 1h,则全年共划分为 72 个时段。这种处理方法可以在保证准确性的同时有效地解决数学模型规模过大的问题。图 2—4 表

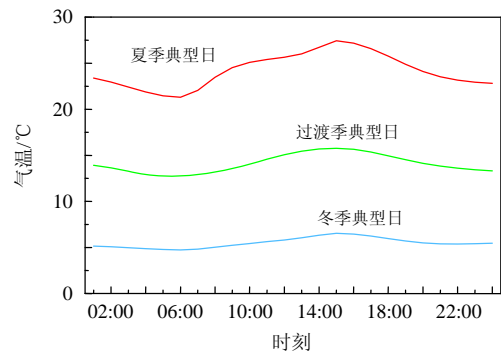


图 2 3 种典型日内逐时气温值
Fig. 2 Ambient air temperature during the three typical days

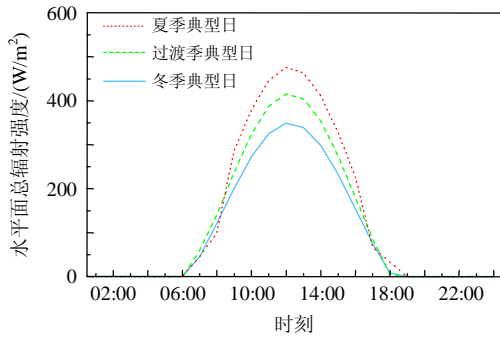


图 3 3 种典型日内太阳能辐射强度值
Fig. 3 Solar radiation intensity during the three typical days

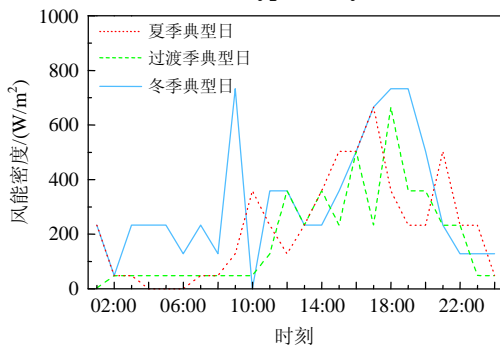


图 4 3 种典型日内风能密度值

Fig. 4 Wind energy density during the three typical days

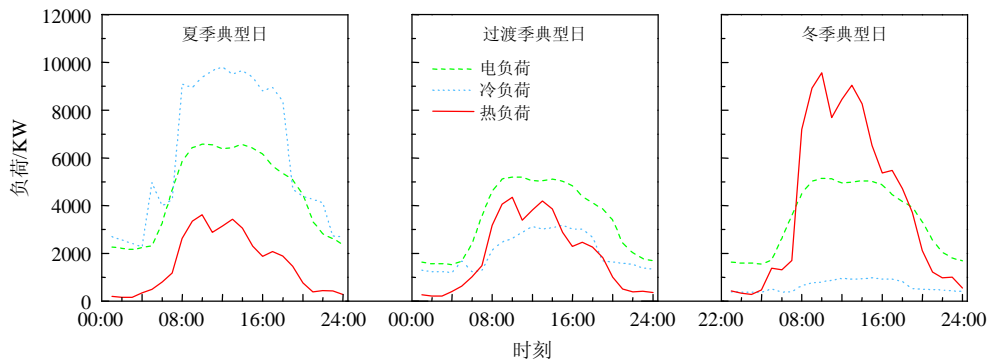


图 5 医院典型日内逐时负荷需求值

Fig. 5 Load demands of the hospital during the three typical days

为负荷需求服从正态分布，标准差 σ 等于 10.2% 平均值 μ 。

Mavromatidis 等^[16]采用均匀分布表示未来能源价格的不确定性，假定能源价格的变化量为当前值的 $\pm 30\%$ ，分析了能源价格不确定性对系统经济性等方面的影响。本文采用此种假设，认为能源价格服从均匀分布，变化范围为当前值的 70% 至 130%。

已有许多学者研究了可再生能源强度中太阳辐射强度的不确定性^[34-37]。Kaplanis^[34]的研究结果表明，太阳辐射强度服从正态分布。本文采用 Kaplanis 的研究结论，假定可再生能源强度服从正态分布，标准差 σ 等于 12% 平均值 μ 。

示 3 种典型日的逐时气温值、太阳能辐射强度与风能密度^[27]。

3.2 负荷需求

研究的医院建筑面积为 29.4 万 m^2 。医院在 3 种典型日的逐时负荷需求如图 5 所示。

3.3 电价与天然气价

本文研究采用的天然气低位热值为 $41.9 \text{MJ}/\text{m}^3$ ，价格为 3.578 元/ m^3 。医院用电属于商业用电，价格为 0.882 元/($\text{kW}\cdot\text{h}$)。

3.4 设备特性

本文考虑的分布式供能系统如图 1 所示，系统中设备的技术与经济特性如表 B1^[10, 28-30]所示。使用优化计算软件 AIMMS 4.28 进行模型构建，使用 CPLEX12.6 求解器进行计算求解。

4 情景产生

4.1 不确定性参数描述

Gamou 等^[31]的研究结果表明，负荷需求的概率密度分布通常符合正态分布，一些研究^[15, 32-33]证明了这一假设的合理性。因而本文采用此种假设，认

4.2 情景产生

对于上述不确定性参数，直接使用连续的概率密度函数生成情景存在一定的困难。因此，本文采用一种基于连续分布离散近似的情景产生方法，Miller 等^[38]曾经采用矩量匹配技术实现过该方法，即使用一系列离散点集来匹配连续分布的统计矩量。本文采用 4 点近似的方法，标准正态分布与 0-1 均匀分布采用 4 点近似得到离散点的值与对应概率如表 1^[38]和表 2^[38]所示。

通过不确定性参数的近似离散化，分别得到电、热、冷负荷需求，能源价格，以及可再生能源强度这 5 种参数的 4 个离散取值及对应概率。表 3

表1 标准正态分布近似值与对应概率

Table 1 Approximate values and probabilities of standard normal distribution

水平	值	概率
1	2.334414	0.045876
2	0.741964	0.454124
3	-0.741964	0.454124
4	-2.334414	0.045876

表2 0-1均匀分布近似值与对应概率

Table 2 Approximate values and probabilities of 0-1 uniform distribution

水平	值	概率
1	0.069 432	0.173 927
2	0.330 009	0.326 073
3	0.669 991	0.326 073
4	0.930 568	0.173 927

表3 5种不确定性参数的4种取值水平(μ 为典型值)Table 3 4 levels of 5 uncertain parameters (μ is the current value of each parameter)

水平	电/热/冷负荷需求	能源价格	可再生能源强度
1	(1-0.238 2) μ	1.258 μ	(1+0.280 13) μ
2	(1-0.075 71) μ	1.102 μ	(1+0.089 04) μ
3	(1+0.075 71) μ	0.898 μ	(1-0.089 04) μ
4	(1+0.238 2) μ	0.7417 μ	(1-0.280 13) μ

表示这5种不确定性参数的4种取值水平。若将这些参数的取值进行全面组合考虑,需要设计 $4 \times 5 = 1024$ 个情景,过多的情景给计算与求解带来一定困难。本文采用正交试验设计的方法设置情景,在减小情景数量的同时,可以较为充分地考虑各不确定性参数之间的组合。

依据正交试验设计的步骤,首先根据因素数与水平数,选择合适的正交表。本文考虑5种不确定性参数,每种参数考虑4种不同取值情况,为5因素4水平问题,在可选的正交表中依据试验次数最少的原则,选择 $L_{16}(4^5)$ 正交表。根据正交设计表,将各不确定性参数的水平值进行组合,得到16个不确定性情景。每个情景的初始概率为构成该情景的参数取值水平对应概率之积。为使设计的16个情景的概率之和等于1,将每个情景的初始概率与16个情景的初始概率之和的比值重新定义为每个情景的概率。以各参数的典型值构成确定性情景17,作为不确定性情景的对比加入总情景集中,其概率不予考虑。表4表示依据正交试验设计方法设计的16个情景与各情景的概率。

表4 表 $L_{16}(4^5)$ 正交试验设计表Table 4 $L_{16}(4^5)$ Orthogonal experiment table

情景	电负荷需求	冷负荷需求	热负荷需求	能源价格	可再生能源强度	概率
1	1	1	1	1	1	0.000 1
2	1	2	2	2	2	0.214 3
3	1	3	3	3	3	0.214 3
4	1	4	4	4	4	0.000 1
5	2	1	2	3	4	0.021 6
6	2	2	1	4	3	0.114 3
7	2	3	4	1	2	0.114 3
8	2	4	3	2	1	0.021 6
9	3	1	3	4	2	0.114 3
10	3	2	4	3	1	0.021 6
11	3	3	1	2	4	0.021 6
12	3	4	2	1	3	0.114 3
13	4	1	4	2	3	0.002 2
14	4	2	3	1	4	0.011 5
15	4	3	2	4	1	0.011 5
16	4	4	1	3	2	0.002 2

5 结果与分析

对各情景下的分布式供能系统进行优化配置得到了各情景下最优的系统方案。进而,将这些方案应用于不同的情景中,得到各个方案在不同情景中运行的经济性能。最后,使用5种不确定型决策理论对方案进行选择,得到相应决策准则下最优的系统方案。

5.1 经济性

图6中的表格展示了各方案在各情景中运行的年总成本值,表中的颜色表示各年总成本值与对应情景下最小年总成本值的差值。在每一种情景下,最小的年总成本值在该情景对应的方案中取得,如图中对角线所示。依据5种决策理论计算各方案的决策值,选择得到相应的最优系统方案。图7表示各方案的决策值,图中实心点表示曲线上的最小值,对应的方案为相应决策理论选择的最优方案。

乐观法选择的方案为方案VI,该方案在情景6中运行时的年总成本值为图6表格中的最小值,体现了乐观法对未来状况的乐观态度。悲观法选择的方案为方案XIV,该方案在情景14中运行时年总成本为图6表格对角线上的最大值,体现了悲观法悲观保守的态度。采用等可能值法和最小最大后悔值法得到的方案分别为方案VII和方案IV。对于乐

	情景1	情景2	情景3	情景4	情景5	情景6	情景7	情景8	情景9	情景10	情景11	情景12	情景13	情景14	情景15	情景16	情景17
方案 I	3541	3547	3512	3630	3255	2794	5123	4538	3308	4202	4365	5159	5203	5605	3664	4298	4008
方案 II	3570	3412	3297	3370	3201	2778	4904	4342	3159	3986	4344	5084	5046	5446	3578	4270	3840
方案 III	3591	3426	3093	3018	3221	2786	4703	4082	3111	3856	4262	4920	4930	5388	3481	4075	3802
方案 IV	3608	3442	3103	2863	3239	2805	4584	4085	3127	3756	4277	4927	4839	5399	3498	4083	3818
方案 V	3555	3490	3395	3490	3173	2811	4989	4419	3172	4067	4376	5109	5059	5488	3623	4313	3899
方案 VI	3613	3601	3529	3656	3327	2751	5168	4554	3394	4264	4298	5162	5302	5637	3654	4222	4009
方案 VII	3612	3444	3108	2898	3227	2796	4566	4093	3112	3734	4266	4922	4802	5369	3484	4092	3801
方案 VIII	3594	3429	3110	2988	3218	2786	4673	4064.6	3103	3831	4255	4899	4903	5368	3478	4064	3791
方案 IX	3565	3472	3292	3358	3179	2822	4871	4322	3068	3943	4386	5117	4938	5394	3631	4323	3877
方案 X	3590	3438	3211	3129	3212	2793	4662	4265	3097	3730	4352	5076	4782	5356	3589	4284	3840
方案 XI	3648	3675	3553	3599	3406	2768	5180	4475	3496	4357	4220	5053	5388	5704	3642	4042	4065
方案 XII	3624	3545	3406	3408	3250	2781	5040	4315	3314	4183	4244	4873	5190	5514	3460	4053	3898
方案 XIII	3672	3560	3346	3275	3258	2875	4804	4371	3128	3820	4416	5146	4748	5345	3632	4320	3931
方案 XIV	3700	3607	3436	3514	3279	2838	4997	4413	3166	4004	4368	5100	4938	5296	3582	4270	3904
方案 XV	3599	3502	3341	3358	3225	2769	4966	4286	3277	4127	4238	4901	5163	5503	3455	4070	3871
方案 XVI	3788	3793	3648	3665	3498	2852	5282	4557	3559	4422	4277	5096	5364	5666	3648	4027	4151
方案 XVII	3590	3439	3188	3159	3206	2773	4798	4144	3148	3961	4243	4900	5019	5402	3463	4068	3781



图 6 各方案应用于各个情景中的年总成本值(万元)

Fig. 6 Total annual cost of plans in scenarios(10⁴ RMB)

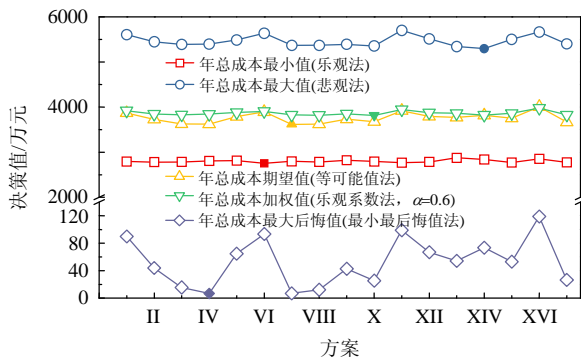


图 7 各方案的决策值(万元)

Fig. 7 Decision values of plans(10⁴ RMB)

观系数法，当乐观系数取 0.2 时，得到的方案与悲观法相同；当乐观系数取 0.8 时，选择的方案与乐观法相同；当乐观系数取 0.6 时，选择的方案为方案 X。

图 6 表格中的列体现了不同方案在同一种情景下运行的经济性能。从表格中的颜色分布可以直观地看出，不同情景下各方案年总成本之间的差异情况不同，一些情景下不同方案年总成本之间的差值较小，比如在情景 6、情景 11 和情景 15 中；而一些情景下最优方案与其他某些方案年总成本之间的差值较大，比如在情景 4、情景 7 和情景 8 中。在情景 4 中，方案 XVI 运行的年总成本相比方案 IV 增加了 28%，表明在一定的运行条件下，分布式供能系统的配置形式对系统取得良好的经济性能十分重要，若系统配置形式不合理，系统的年总成本将大大增加。

图 6 表格中的行体现了各个方案应用于不同情景中的经济性，每一行中的颜色体现了方案对各情景的适应性。对 5 种不确定型决策理论选择的方案

进行分析可以发现，乐观法选择的方案 VI 应用于其他情景中出现较多颜色偏红的年总成本值，比如在情景 4，情景 7，情景 13 中，说明该方案虽然在对应情景下可以实现良好的经济性能，但当运行条件变化时，并不能保证继续取得良好的经济性，表明使用只考虑最乐观情况的乐观法具有一定的风险。采用悲观法得到的方案 XIV 对其他情景的适应性，如表中所示，好于乐观法选择的方案。但由于悲观法在选择方案时只考虑了最坏的情况，没有考虑其他情景，选择出的方案对其他情景的适应性仍有限，比如方案 XIV 应用于情景 4、情景 7 中时年总成本相比对应情景下最优方案均有较大增加。乐观系数为 0.6 时乐观系数法选择的方案 X 对情景的适应性优于乐观法与悲观法选择的方案，但由于只考虑了最好与最坏的情况，在某些情景中运行时方案 X 的年总成本值较最优方案有较大增加，比如在情景 8 和情景 16 中。等可能值法和最小最大后悔法在做决策时考虑了所有的情景，并考虑了各个情景的概率，如图 6 表格中所示，它们得到的方案对不同情景具有较好的适应性。

5.2 配置形式

图 8 表示各个方案的系统配置形式。如图所示，方案 X、方案 XII 和方案 XVI 中没有安装燃气锅炉，其他方案中均安装有燃气锅炉，所有方案中安装的其他设备的种类均相同。在这些方案中，光伏和燃气轮机由于设备造价较高或运行效率较低，不具有经济优势而没有被选用。

乐观法选择的方案 VI 中安装设备的总容量在所有方案中最小。结合正交设计表与各不确定性参

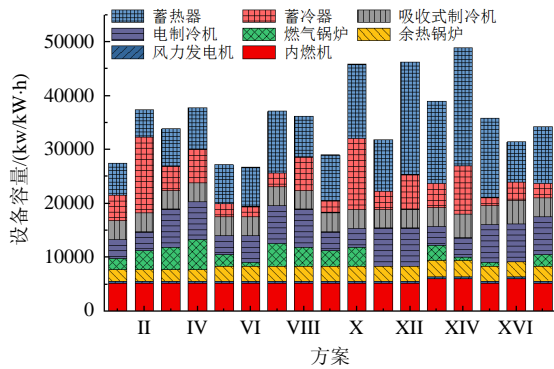


图8 各方案中设备安装容量

Fig. 8 Installed capacities of equipment in the plans

数水平值, 可以看到在方案 VI 对应的情景 6 中, 电、热、冷负荷需求较小, 能源价格较低, 在此条件下优化得到的系统年总成本值较低, 同时系统中各设备的安装容量也较低。方案 VI 中燃气锅炉、电制冷机和蓄冷器的安装容量分别为 700kW、4920kW 和 1928kW·h, 均低于确定性方案 XVII 中相应设备的安装容量 2100kW、7040kW 和 2748kW·h。较低容量的设备使系统的设备年投资成本较低, 但当用户的负荷需求增加时, 系统需要增加外部的购能量, 使得系统的运行成本大幅增加, 年总成本相应增大, 对应于图 6 表格中, 方案 VI 应用于其他一些情景中时经济性较差。

悲观法选择的方案 XIV 中安装设备的总容量在所有方案中最大。结合正交设计表与各不确定性参数水平值, 可以发现, 在方案 XIV 对应的情景 14 中, 电、热、冷负荷需求较大, 能源价格较高, 使得系统中设备的安装容量较大, 年总成本较高。在方案 XIV 中, 内燃机、余热锅炉与吸收式制冷机的安装容量分别为 6000kW、3000kW 和 4360kW, 均高于确定性方案 XVII 中相应设备的安装容量 5200kW、2800kW 和 3488kW, 并且方案 XIV 中蓄冷器和蓄热器的安装容量分别为方案 XVII 的 3.29 倍和 2.08 倍。当负荷需求减小时, 方案 XIV 中设备的安装容量过大, 使得系统的设备年投资成本和年总成本较高, 对应于图 6 表格中, 方案 XIV 应用于其他一些情景中时经济性较差。

在乐观系数为 0.6 的乐观系数法选取的方案 X 中, 蓄冷器的安装容量为 13 224 kW·h, 为确定性方案 XVII 中蓄冷器安装容量的 4.81 倍。较大安装容量的设备导致的较高设备年投资成本使得方案 X 在其他一些情景中运行时年总成本值较高, 如图 6 所示。

在等可能值法和最小最大后悔值法选择的方

案 VII 和方案 IV 中, 蓄冷器与蓄热器的安装容量, 及各设备总的安装容量在所有方案中属于中等, 使系统的设备年投资成本不致过高。在这 2 个方案中, 燃气锅炉的安装容量较大, 分别为 4 200 kW 和 5 600 kW, 电制冷机的安装容量均为 7 040 kW, 可以满足较大的用户热负荷与冷负荷需求, 从而减小负荷需求较高时从外部的购能量, 控制能耗费用。2 个方案较低的设备年投资成本, 与较高的热量与冷量供应能力, 使 2 方案在其他情景中运行时可以实现较好的经济性能, 如图 6 所示。

6 结论

本文考虑了分布式供能系统中负荷需求、能源价格和可再生能源强度的不确定性, 采用 5 种不确定型决策理论考虑决策者对风险的多种态度, 对分布式供能系统优化得到的方案进行选择。

研究表明, 乐观法选择的方案中安装的设备容量较小, 在对应情景下可以实现良好的经济性能, 但当负荷需求增大时, 系统的外部购能量增加, 使能耗费用增大, 系统经济性变差, 存在一定的风险。悲观法考虑最坏的情况, 选择的方案中安装的设备容量较大, 当运行条件变化时, 过高的设备容量使得系统的设备年投资成本较高, 系统经济性变差。乐观系数法是乐观法与悲观法之间的一种权衡, 根据乐观系数的不同选择的方案有所不同。乐观系数法没有考虑其他更多的情景, 方案的选择有一定的局限性, 在某些情景下运行时系统的经济性较差, 并且乐观系数的确定具有一定的主观性。等可能值法与最小最大后悔值法考虑了所有可能的情景, 并且在本文研究中考虑了各个情景的概率, 选择的方案中电制冷机与燃气锅炉的安装容量较大, 在不同情景下运行时可以实现较好的经济性能。

参考文献

- [1] TWAHA S, RAMLI M A M. A review of optimization approaches for hybrid distributed energy generation systems: off-grid and grid-connected systems[J]. Sustainable Cities and Society, 2018, 41: 320-331.
- [2] DI SOMMA M, YAN Bing, BIANCO N, et al. Multi-objective operation optimization of a distributed energy system for a large-scale utility customer[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 101: 752-761.
- [3] 金红光, 隋军, 徐聪, 等. 多能源互补的分布式冷热电联产系统理论与方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3150-3161.

- JIN Hongguang, SUI Jun, XU Cong, et al. Research on theory and method of multi-energy complementary distributed CCHP system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3150-3160(in Chinese).
- [4] 杨承, 王平, 刘换新, 等. 分布式燃气-蒸汽联合循环供能系统热经济性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(18): 5424-5432.
- YANG Cheng, WANG Ping, LIU Huanxin, et al. Thermo-economic analysis on gas-steam combined cycle-based distributed energy supply system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(18): 5424-5432(in Chinese).
- [5] 张华煜, 陈上, 朱彤, 等. 含有绝热压缩空气储能的分布式能源系统供能特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(S1): 142-150.
- ZHANG Huayu, CHEN Shang, ZHU Tong, et al. Performance analysis of distributed energy system with adiabatic compressed air energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 142-150(in Chinese).
- [6] HENNING D. MODEST-an energy-system optimisation model applicable to local utilities and countries[J]. Energy, 1997, 22(12): 1135-1150.
- [7] RONG Aiyang, LAHDELMA R. An efficient linear programming model and optimization algorithm for trigeneration[J]. Applied Energy, 2005, 82(1): 40-63.
- [8] ARCURI P, FLORIO G, FRAGIACOMO P. A mixed integer programming model for optimal design of trigeneration in a hospital complex[J]. Energy, 2007, 32(8): 1430-1447.
- [9] LOZANO M A, RAMOS J C, SERRA L M. Cost optimization of the design of CHCP(combined heat, cooling and power) systems under legal constraints[J]. Energy, 2010, 35(2): 794-805.
- [10] LI Hongwei, NALIM R, HALDI P A. Thermal-economic optimization of a distributed multi-generation energy system—a case study of Beijing[J]. Applied Thermal Engineering, 2006, 26(7): 709-719.
- [11] REN Hongbo, GAO Weijun, RUAN Yingjun. Optimal sizing for residential CHP system[J]. Applied Thermal Engineering, 2008, 28(5-6): 514-523.
- [12] KAVVADIAS K C, MAROULIS Z B. Multi-objective optimization of a trigeneration plant[J]. Energy Policy, 2010, 38(2): 945-954.
- [13] CARVALHO M, LOZANO M A, SERRA L M. Multicriteria synthesis of trigeneration systems considering economic and environmental aspects[J]. Applied Energy, 2012, 91(1): 245-254.
- [14] HOUWING M, AJAH A N, HEIJNEN P W, et al. Uncertainties in the design and operation of distributed energy resources: the case of micro-chp systems[J]. Energy, 2008, 33(10): 1518-1536.
- [15] ZHOU Zhe, ZHANG Jianyun, LIU Pei, et al. A two-stage stochastic programming model for the optimal design of distributed energy systems[J]. Applied Energy, 2013, 103: 135-144.
- [16] MAVROMATIDIS G, OREHOUNIG K, CARMELIET J. Uncertainty and global sensitivity analysis for the optimal design of distributed energy systems[J]. Applied Energy, 2018, 214: 219-238.
- [17] YANG Yun, ZHANG Shijie, XIAO Yunhan. Optimal design of distributed energy resource systems based on two-stage stochastic programming[J]. Applied Thermal Engineering, 2017, 110: 1358-1370.
- [18] 杨允, 张士杰, 肖云汉, 等. 蒙特卡罗法在分布式供能系统不确定性评价中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(2): 16-23.
- YANG Yun, ZHANG Shijie, XIAO Yunhan, et al. Application of Monte Carlo method in uncertainty evaluation for cogeneration systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(2): 16-23(in Chinese).
- [19] REZVAN A T, GHARNEH N S, GHAREHPETIAN G B. Optimization of distributed generation capacities in buildings under uncertainty in load demand[J]. Energy and Buildings, 2013, 57: 58-64.
- [20] PAZOUKI S, HAGHIFAM M R. Optimal planning and scheduling of energy hub in presence of wind, storage and demand response under uncertainty[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 80: 219-239.
- [21] AKBARI K, NASIRI M M, JOLAI F, et al. Optimal investment and unit sizing of distributed energy systems under uncertainty: a robust optimization approach[J]. Energy and Buildings, 2014, 85: 275-286.
- [22] BILLIONNET A, COSTA M C, POIRION P L. Robust optimal sizing of a hybrid energy stand-alone system[J]. European Journal of Operational Research, 2016, 254(2): 565-575.
- [23] YANG Yun, LI Da, ZHANG Shijie, et al. Optimal design of distributed energy resource systems under large-scale uncertainties in energy demands based on decision-making theory[J]. Thermal Science, 2019, 23(2): 873-882.
- [24] MAVROMATIDIS G, OREHOUNIG K, CARMELIET J. Comparison of alternative decision-making criteria in a two-stage stochastic program for the design of distributed energy systems under uncertainty[J]. Energy, 2018, 156: 709-724.
- [25] REZVAN A T, GHARNEH N S, GHAREHPETIAN G B. Robust optimization of distributed generation investment in buildings[J]. Energy, 2012, 48(1): 455-463.

- [26] FRENCH S. Decision theory: an introduction to the mathematics of rationality[M]. Chichester: Ellis Horwood, 1986.
- [27] 杨允. 区域型分布式供能系统优化配置研究及不确定性优化探索[D]. 北京: 中国科学院研究生院(工程热物理研究所), 2016.
YANG Yun. Research on optimal design of district-scale CCHP systems and exploration on optimal design under uncertainty[D]. Beijing: Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, 2016(in Chinese)
- [28] YOKOYAMA R, ITO K. Optimal design of gas turbine cogeneration plants in consideration of discreteness of equipment capabilities[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power-Transactions of the Asme, 2006, 128(2): 336-343.
- [29] MEHLERI E D, SARIMVEIS H, MARKATOS N C, et al. Optimal design and operation of distributed energy systems: application to greek residential sector[J]. Renewable Energy, 2013, 51: 331-342.
- [30] FARMER R. Simple cycle OEM design ratings[J]. Gas Turbine World 2012 GTW Handbook, 2012, 29: 70-80.
- [31] GAMOU S, YOKOYAMA R, ITO K. Optimal unit sizing of cogeneration systems in consideration of uncertain energy demands as continuous random variables[J]. Energy Conversion and Management, 2002, 43(9-12): 1349-1361.
- [32] LI C Z, SHI Y M, HUANG X H. Sensitivity analysis of energy demands on performance of CCHP system[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(12): 3491-3497.
- [33] LI Chaozhen, SHI Yumei, LIU Sheng, et al. Uncertain programming of building cooling heating and power(BCHP) system based on Monte-Carlo method[J]. Energy and Buildings, 2010, 42(9): 1369-1375.
- [34] KAPLANIS S N. New methodologies to estimate the hourly global solar radiation; comparisons with existing models[J]. Renewable Energy, 2006, 31(6): 781-790.
- [35] CAO Jiacong, LIN Xingchun. Study of hourly and daily solar irradiation forecast using diagonal recurrent wavelet neural networks[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(6): 1396-1406.
- [36] JANJAI S, PANKAEW P, LAKSANABOONSONG J. A model for calculating hourly global solar radiation from satellite data in the tropics[J]. Applied Energy, 2009, 86(9): 1450-1457.
- [37] EL-SEBAILI A A, AL-HAZMI F S, AL-GHAMDI A A, et al. Global, direct and diffuse solar radiation on horizontal and tilted surfaces in Jeddah, Saudi Arabia[J]. Applied Energy, 2010, 87(2): 568-576.
- [38] MILLER III A C, RICE T R. Discrete approximations of probability distributions[J]. Management Science, 1983, 29(3): 352-362.

附录 A 分布式供能系统优化配置模型中的约束条件

约束条件包括以下 3 种类型^[27]。

1) 设备种类、容量与台数约束。

蓄热器和蓄冷器的设备容量均为连续变量, 2 种设备分别最多可选择安装 1 台。蓄能装置之外的其他设备的容量被离散化处理, 每种设备有多种容量可供选择, 但最多可选择一种容量。每种设备所选台数不应超过其最大可选数量。

$$\begin{cases} n_{i,j} \leq N_{i,j} \times \gamma_{i,j}, & \forall i \in I, j \in J_i \\ \gamma_{i,j} \leq n_{i,j} \end{cases} \quad (A1)$$

$$\sum_{j \in J_i} \gamma_{i,j} \leq 1, \quad \forall i \in I \quad (A2)$$

式中: n 为除蓄能装置外其他设备选择的台数, 整型变量; N 为设备最大可选数量, 整型变量; γ 为除蓄能装置外其他设备是否选择, 二元变量(0 代表不选择、1 代表选择); i 为设备种类; j 为第 i 种设备的容量种类; I 为设备种类集合; J 为设备 i 的容量集合。

2) 设备运行特性约束。

对于燃气轮机、燃气内燃机、燃气锅炉、余热锅炉、吸收式制冷机和电制冷机, 在设备出力上限和下限之间, 设备的运行特性可近似表示成输入能量 x 与出力 y 的线性关系。在任意时刻处于运行状态的设备台数应小于该设备选择的台数。

$$y_{k,i,u} = \sum_{j \in J_i} Slo_{k,i,j,u} \times \gamma_{i,j} \times x_{k,i} + \sum_{j \in J_i} Int_{k,i,j,u} \times \gamma_{i,j} \times \delta_{k,i} \quad (A3)$$

$$\sum_{j \in J_i} MinX_{k,i,j} \times \gamma_{i,j} \times \delta_{k,i} \leq x_{k,i} \leq \sum_{j \in J_i} MaxX_{k,i,j} \times \gamma_{i,j} \times \delta_{k,i} \quad (A4)$$

$$\delta_{k,i} \leq \sum_{j \in J_i} n_{i,j}, \quad \forall k \in K, i \in I \quad (A5)$$

式中: δ 为设备机组中处于运行状态的设备台数; k 为时段; K 为全年划分的所有时段的集合; u 为能量类型; Slo 为设备输入能量功率与输出能量功率线性关系式的斜率; Int 为设备输入能量功率与输出能量功率关系式的截距; $minX$ 表示设备输入能量功率的下限; $maxX$ 为设备输入能量功率的上限。

对于风力发电机与光伏, 其发电量 y 取决设备安装面积 W_{Area} , 可再生能源强度 $Intens$, 与设备发电效率 β_{jRE} , 并且发电量不能超过其额定功率 R_{cap} 。

$$y_{k,RE,el} \leq \sum_{j \in J_{RE}} W_{Area,jRE} \times Intens_k^I \times \beta_{jRE} \times \gamma_{RE,jRE} \times \delta_{k,RE} \quad (A6)$$

$$y_{k,RE,el} \leq \sum_{j \in J_{RE}} R_{cap,RE,jRE} \times \gamma_{RE,jRE} \times \delta_{k,RE} \quad (A7)$$

蓄能装置中能量的蓄放与 2 相邻时段内装置中蓄存的能量有关, 规定蓄能装置在一个典型日的初始和终止时刻的蓄存量相等。此外, 蓄能装置的蓄存量应小于其额定容量, 蓄放量应位于装置能量蓄放量的上、下限之间。以某典型日(假定该典型日划分为 K_1 个时段)为例:

$$H_{k+1} = H_{k,i} \times (1 - \mu_i)^{\Delta t} + E_{k,i} \times \Delta t, \quad \forall 1 \leq k \leq K_1 - 1 \quad (A8)$$

$$H_{k=1,i} = H_{k=KI,i} \times (1 - \mu_i)^{\Delta t} + E_{k=KI,i} \times \Delta t \quad (A9)$$

$$H_{k,i} \leq H_{\text{vol}i}, \forall 1 \leq k \leq KI \quad (A10)$$

$$E_{\text{min}i} \leq E_{k,i} \leq E_{\text{max}i}, \forall 1 \leq k \leq KI \quad (A11)$$

式中： H 为能量的蓄存量； E 为蓄能装置中能量的蓄放量(规定蓄存为负，释放为正)； μ 为蓄能装置的能量损失系数； Δt 为 2 相邻时段的时间间隔； H_{vol} 为蓄能装置的容量； E_{min} 为蓄能装置中能量蓄放量的下限，取决于蓄能装置的容量； E_{max}

为蓄能装置中能量蓄放量的上限，取决于蓄能装置的容量。

3) 系统能流平衡约束：

在 k 时段，系统中设备的能量输出量 y 与购能量 EPG 之和，不应低于此时段内负荷需求 LD ，设备耗能量 x ，与蓄能装置在 k 时段储存或释放的能量 E 之和。

$$\sum_i y_{k,i,u} + EPG_k \geq LD_{k,u} + x_{k,i,u} + E_{k,i} \quad (A12)$$

附录 B 设备技术经济性数据

表 B1 设备技术经济性数据

Table B1 Information on the equipment candidates

设备类型	容量/kW	额定效率 (COP)	单位容量 投资成本/(元/kW)	单位容量维护 成本/(元/(kW/年))	单位输出能量维护 成本/(元/(kW·h))	负荷 调节范围	寿命/年
燃气轮机	5 200	29.4%	3 874	0	0.026	0.4~1	15
	4 345	28.3%	4 004	0	0.026	0.38~1	15
燃气内燃机	5 200	40.3%	4 257.5	0	0.058 5	0.4~1	15
	6 000	41.2%	4 127.5	0	0.058 5	0.4~1	15
风力发电机	20	35%	6 610.5	0	0.054 6	—	25
光伏	28	17%	11 011	108.55	0.13	—	25
热水型余热锅炉	700	78%	845	0	0.017 55	0.26~1	15
	1 000	78%	845	0	0.017 55	0.38~1	15
热水型燃气锅炉	700	83%	650	0	0.017 55	0.48~1	15
	1 041	83%	650	0	0.017 55	0.26~1	15
蓄热器	—	—	149.5 元/(kW·h)	—	0.008 45	—	20
烟气吸收式制冷机	1 454	1.417	1 118	0	0.006 5	0.05~1.15	25
	872	1.419	1 118	0	0.006 5	0.05~1.15	25
电制冷机	3 520	4.73	663	0	0.009 75	0.1~1	25
	1 230	4.3	663	0	0.009 75	0.1~1	25
蓄冷器	—	—	149.5 元 / (kW·h)	—	0.008 45	—	20



在线出版日期：2020-11-18。

收稿日期：2020-09-16。

作者简介：

黎达(1993)，男，博士研究生，主要从事分布式供能系统优化研究，liad.111@163.com；

*通作作者：张士杰(1971)，男，博士，研究员，主要从事先进燃气轮机循环和分布式能源系统优化集成研究，zhangsj@mial.etp.ac.cn。

(责任编辑 王庆霞)

Optimal Design of Distributed Energy Resource Systems Under Uncertainties Based on Decision-making Theory

LI Da, ZHANG Shijie

(University of Chinese Academy of Sciences)

KEY WORDS: distributed energy resource; optimal design; uncertainty; uncertain decision-making theory; orthogonal experiment design

Distributed energy resource (DER) systems are widely used because of their excellent economic and environmental performance. Many uncertainties exist in the optimal design of DER systems. To deal with uncertainties in these systems, many optimization methods have been adopted, such as the stochastic programming and robust optimization. However, these methods take only a single decision-maker attitude to risks. Decision makers may adopt multiple attitudes towards risks, and considering this can help make proper decisions and reduce the risks in the decision-making process.

The decision-making theory can consider multiple attitudes of decision makers to risks. This work combines decision-making theory and optimal design model of DER systems. Five decision-making theories (optimistic criterion, pessimistic criterion, Hurwicz criterion, Laplace criterion and minimax regret criterion) are adopted to consider multiple attitudes of decision makers towards risks, and three uncertainties in DER systems (uncertainties in load demands, renewable energy intensity and energy price) are considered.

Five decision-making theories take different attitudes towards risks. For example, optimistic criterion fully considers the best situation that may arise, while pessimistic criterion takes into account the most pessimistic scenario that may occur. Hurwicz criterion considers both the worst and the best possible results, and determines decision makers' degree of optimism by identifying an optimism coefficient α ($0 < \alpha < 1$). Laplace criterion assumes all scenarios are equally likely. Minimax regret criterion tries to make the regret value as small as possible, and is formulated as follows:

$$\min_{p \in P} \{ \max_{s \in S} \{ (C_{Total,p,s} - C_{Total,p^*(s),s}) \times Pr_s \} \} \quad (1)$$

A scenario generation method is used to represent the uncertainty of parameters using discrete point sets and corresponding probabilities. An orthogonal experiment design method is used to generate scenario

sets to consider the combination of various uncertain parameters. By applying the optimal DER system design model, optimal system plans under each scenario are obtained, and these plans are applied to other scenarios to obtain the economic performance of the systems. Five uncertain decision-making theories are adopted to select appropriate plans.

After optimization calculation, the optimal plans under scenarios are obtained. Fig. 1 shows the installed capacities of equipment in these plans. Five decision-making theories select five different plans. The results show that optimistic criterion considers the best situation, and the installed capacity of equipment in plan VI selected by the optimistic criterion is small. Pessimistic criterion considers the worst case, and the installed capacity of equipment in plan XIV selected by the pessimistic criterion is relatively large. Hurwicz criterion is a trade-off between the optimistic criterion and pessimistic criterion, and the selected plan is affected by the optimism coefficient. In plan VII and plan IV selected by Laplace criterion and minimax regret criterion respectively, the installed capacity of compression chiller and gas boiler is large, and these plans can achieve good economic performance when operating in various scenarios.

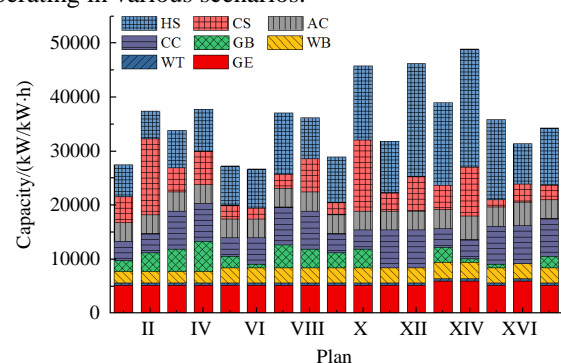


Fig. 1 Installed capacities of equipment in the plans (HS-heat storage, CS-cold storage, AC-absorption chiller, CC-compression chiller, GB-gas boiler, WB-waste-heat boiler, WT-wind turbine, GE-gas engine)