

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200407

基于场景构建技术的含多种清洁能源微能源网 多目标随机规划研究

宋云超¹, 王丹¹, 何伟², 熊华强², 王培汀¹, 雷杨¹

(1. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072;

2. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096)

摘要: 为实现微能源网经济高效、可持续发展, 提出了多种清洁能源利用的微能源网架构模型与运行策略。分析了影响微能源网规划的多种不确定因素, 将典型日风速、光照和负荷数据状态矩阵与 Copula 函数相结合, 综合考虑随机变量的时序性和互相关性, 构建微能源网多种运行场景。以全生命周期成本最小和碳排放量最小建立微能源网的多目标随机规划模型。在 Matlab 仿真平台通过 NSGA-II 算法求取 Pareto 前沿, 结合多目标优选决策方法确定规划方案。通过具体算例分析了影响微能源网多目标随机规划的因素, 验证了规划模型的可行性与有效性。

关键词: 微能源网; 场景构建技术; 多目标随机规划; Pareto 前沿

Research on multi-objective stochastic planning of a micro energy grid with multiple clean energy sources based on scenario construction technology

SONG Yunchao¹, WANG Dan¹, HE Wei², XIONG Huaqiang², WANG Peiting¹, LEI Yang¹

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Tianjin 300072, China;

2. State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanchang 330096, China)

Abstract: In order to realize the economical, efficient and sustainable development of micro-energy grids, this paper proposes a micro energy grid architecture model and operating strategies for multiple clean energy use. We analyze various uncertain factors affecting micro energy grid planning, and combine the state matrix of typical daily wind speed, light, and load data with the Copula function. The timing and cross-correlation of random variables are comprehensively considered to construct a variety of operating scenarios for the micro energy grid. A multi-objective stochastic planning model of a micro energy network is established with minimum life cycle cost and minimum carbon emission. The Matlab simulation platform is used to obtain the Pareto front by the NSGA-II algorithm, combining multi-objective optimization decision methods to determine planning schemes. The factors affecting multi-objective stochastic planning of micro energy grids are analyzed through specific examples, and the feasibility and effectiveness of the planning model are verified.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China in 2020 "Integrated Solution Design and Demonstration Project Construction for Rural Typical Scene Electrification Projects" (No. 5400-202025208A-0-0-00).

Key words: micro energy grid; scene construction technology; multi-objective stochastic planning; Pareto frontier

0 引言

随着经济的飞速发展, 我国已成为世界第二大

能源消费国^[1]。当前, 能源短缺与环境污染问题日益严重, 为了实现可持续发展, 必须减少对化石燃料的依赖, 逐步使用清洁能源进行替代。我国可再生能源发展“十三五”规划中明确指出, 到2020年全部可再生能源发电装机6.8亿kW, 发电量1.9万亿kWh, 占全部发电量的27%^[2]。

微能源网位于“能源互联网”的末端, 主要面

基金项目: 国家电网有限公司2020年总部科技项目资助“乡村典型场景电气化项目一体化解决方案设计及示范工程建设”(5400-202025208A-0-0-00)

向智能楼宇、居民小区、商业园区、农村社区和孤立海岛等区域^[1], 通过能源的综合供应满足多种负荷的用能需求。近年来, 随着分布式发电技术的发展与国家能源政策的扶持, 微能源网对清洁能源的利用比例在不断攀升。考虑到分布式发电具有间歇性与波动性的特点^[4-5], 微能源网中通常存在弃风、弃光现象, 造成电能的大量浪费。传统的电储能装置规划成本较高且无法满足绿色能源的发展需求, 氢能作为一种清洁高效的新能源, 已成为我国能源技术发展的重要战略方向^[6], 加强氢能基础设施建设势在必行。微能源网中配置电转氢设备能够实现电能向氢能源的转化, 在提高能源利用率的同时降低系统整体的碳排放水平。

目前, 关于微能源网的多目标优化问题已有较多的研究。文献[7]以微能源网的系统收益和能源利用率最大化为目标, 为决策者提供多种优化调度方案。文献[8]以系统的年度总成本、二氧化碳排放和能源供应缺失率最小化为目标, 分别考虑两种运行策略对系统进行优化配置。文献[9]综合考虑了经济效益与环境效益, 以加权的方式将多目标优化问题转化为单目标优化问题。文献[10]将短期的灵活性考虑到长期的规划中, 以能源损失率和全生命周期成本最小为目标, 降低系统的投资。上述研究在规划考虑了经济、能耗、环保等多方面指标, 但没有考虑系统中的不确定性。实际上, 含多种清洁能源微能源网中源荷受到多种不确定因素的影响, 忽略不确定性会降低规划的准确性。

随机规划是一种解决不确定性规划问题的重要方法^[11], 对含多种不确定因素的随机规划问题, 模拟法的应用最为广泛。文献[12]考虑了能源需求的不确定性和不同能源需求之间的相关性, 研究了不确定性对规划的影响。文献[13]研究了风机与光伏发电的不确定性, 有效地解决了系统网络的阻塞。文献[14]分析了多能源系统能源枢纽的不确定性, 提出用场景简化技术来减少模型的计算量。上述文献在研究中均运用了 Monte Carlo 模拟法, 但均未系统地提出场景构建的过程。对于含多种清洁能源微能源网, 一种合理有效的场景构建方法是对其进行多目标随机规划的重要基础。

在此背景下, 本文基于场景构建技术提出了一种微能源网的多目标随机规划方法。首先, 分析了微能源网中的不确定性, 并对多种不确定因素建模; 然后, 考虑随机变量的时序性与互相关性, 构建微能源网的运行场景; 接着, 结合微能源网确定性约束和机会约束建立微能源网的多目标随机规划模型, 并使用 NSGA-II 算法进行求解; 最后, 通过具

体算例分析了影响多目标随机规划的因素, 并验证了规划模型的可行性与有效性。

1 微能源网架构模型与运行策略

1.1 微能源网的架构

多种清洁能源利用的微能源网系统主要由分布式发电系统、冷热电联供系统、储能系统和电转氢系统构成。通过不同系统间的协调配合, 能够降低微能源网对外网的依赖程度, 提高能源供应的稳定性和可靠性。

风机与光伏作为分布式发电设备支撑着微能源网的经济运行, 但由于分布式发电间歇性与波动性的特点, 往往不能对其充分的利用, 发生弃风、弃光现象。电解水制氢是一种成熟的制氢方法, 电解水制氢工艺过程简单、效率高, 但这种方法耗电量大, 直接用电网的电能制氢是十分不经济的。在微能源网中配置电转氢设备, 利用富余的电能制氢^[15], 可以很好地弥补电解水制氢的缺陷。对于产生的氢气可以直接用作氢能汽车的燃料, 在实现一定的经济效益的同时降低整个微能源网的碳排放水平, 还可以供应到现有的天然气网络实现能源的互补转化^[16]。本文给出一种微能源网的架构如图 1 所示。

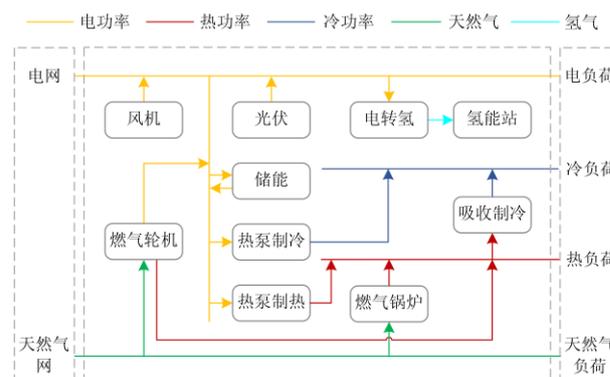


图 1 多种清洁能源利用的微能源网架构图

Fig. 1 Framework of micro energy grid for multiple clean energy utilization

微能源网的架构图直观地展示了微能源网的系统结构和微能源网中能量流动与转化关系, 通过充分地利用风能、太阳能、地热能等清洁能源, 能够实现多种能源间的优势互补, 提高能源综合利用率, 在很大程度上减少对环境的污染, 推动了微能源网的经济高效、可持续发展。

1.2 微能源网的模型

1) 风机模型

风机能够将风能直接转换为电能, 小型的、分布式的风力发电设备已成为了微能源网电能来源的

重要方式。风机输出功率的大小与风速 V 有关，其输出功率可表示为^[17]

$$P_{WT} = \begin{cases} 0 & V < V_{in}, V > V_{out} \\ \frac{V - V_{in}}{V_r - V_{in}} P_{WT}^r & V_{in} \leq V < V_r \\ P_{WT}^r & V_r \leq V \leq V_{out} \end{cases} \quad (1)$$

式中： V_{in} 、 V_r 、 V_{out} 分别为切入风速、额定风速、切出风速； P_{WT}^r 为风机的额定功率。

2) 光伏模型

太阳能是一种储备丰富的清洁能源，随着太阳能利用成本的降低，太阳能在整个能源供应体系中占比不断提高。这里认为光伏的输出功率只与光照强度和温度有关。光伏的输出功率为^[17]

$$P_{PV} = \frac{I}{I^{re}} \left(1 + \gamma_T (T - T^{re}) \right) P_{PV}^{re} \quad (2)$$

式中： P_{PV} 为光伏的发电功率； I 为光照强度； I^{re} 为参考光照强度； T^{re} 为参考温度； P_{PV}^{re} 为参考条件下光伏的发电功率； γ_T 为温度功率系数。

3) 微型燃气轮机模型

微型燃气轮机(Micro Turbine, MT)本身是一个发电设备，能够利用天然气、氢气等燃烧产生的热能发电。微型燃气轮机的模型为

$$P_{MT}^{gen} = \eta_{MT}^E F_{MT} \quad (3)$$

$$Q_{MT} = \eta_{MT}^Q F_{MT} \quad (4)$$

式中： P_{MT}^{gen} 为微型燃气轮机发电功率； η_{MT}^E 为发电效率； η_{MT}^Q 为产热效率； F_{MT} 为天然气的消耗速率； Q_{MT} 为产热功率。

4) 储能模型

储能是微能源网平衡和调节的重要手段，储能包括电储能、热储能、冷储能等。电储能较热储能、冷储能能在微能源网的调控中更加灵活，在保证电力系统正常运行抑制可再生能源波动方面意义重大。电储能的模型为

$$E_{ES}(t+1) = (1 - \mu_0) E_{ES}(t) + \eta_{ch} P_{ES}^{ch} - P_{ES}^{dis} / \eta_{dis} \quad (5)$$

$$P_{ES}^{ch} P_{ES}^{dis} = 0 \quad (6)$$

$$SOC_{ES} = E_{ES} / E_{ES}^r \quad (7)$$

式中： $E_{ES}(t)$ 为 t 时刻储能设备的电量； η_{ch} 与 η_{dis} 分别为充电效率与放电效率； P_{ES}^{ch} 与 P_{ES}^{dis} 分别为充电功率与放电功率； SOC_{ES} 为储能设备的荷电状态； E_{ES}^r 为额定容量。

5) 电转氢模型

碱性电解水制氢是目前最为成熟的电转氢技

术，设备正常运行的功率范围较宽，能够应对可再生能源波动性和间歇性。电转氢模型可以表示为

$$F_{H_2}^E = \eta_{P2G}^E P_{P2G}^E \quad (8)$$

$$F_{O_2}^E = 0.5 F_{H_2}^E \quad (9)$$

式中： $F_{H_2}^E$ 和 $F_{O_2}^E$ 分别为氢气、氧气的产出速率； P_{P2G}^E 为电转氢设备的电功率； η_{P2G}^E 为转换效率。

6) 冷热设备模型

微能源网中制冷制热设备包括地源热泵、吸收式制冷机和燃气锅炉。地热能是一种清洁能源，地源热泵技术在楼宇空调系统中得到了很好的应用。地源热泵的能效比很高，具有很好的发展前景。地源热泵模型可以表示为

$$Q_{HP}^h = \eta_{HP}^h P_{HP}^{h,E} \quad (10)$$

$$Q_{HP}^c = \eta_{HP}^c P_{HP}^{c,E} \quad (11)$$

式中： Q_{HP}^h 为制热功率； $P_{HP}^{h,E}$ 为制热模式下的电功率； Q_{HP}^c 为制冷功率； $P_{HP}^{c,E}$ 为制冷模式下的电功率； η_{HP}^h 与 η_{HP}^c 分别为制热与制冷模式的能效比。

吸收式制冷机不依赖电力，可以通过利用低质热能制冷。目前，常见的吸收式制冷机包括氨-水溶液吸收式制冷机和溴化锂-水溶液吸收式制冷机两种。吸收式制冷机模型为

$$Q_{AC}^c = \eta_{AC} Q_{AC}^h \quad (12)$$

式中： Q_{AC}^c 为制冷功率； η_{AC} 为性能系数； Q_{AC}^h 为耗热功率。

燃气锅炉利用天然气燃烧产生的热能供热，当微能源网中的热能供应不足时，燃气锅炉可作为补充的供热源。燃气锅炉模型为

$$Q_{GB} = \eta_{GB} F_{GB} \quad (13)$$

式中： Q_{GB} 为燃气锅炉制热功率； η_{GB} 为燃气锅炉效率； F_{GB} 为天然气的消耗速率。

1.3 微能源网的运行策略

微能源网的运行模式通常由系统的具体配置与能源需求的优先级决定，受季节、地区等因素的影响。根据运行模式的不同，微能源网运行过程中各机组的出力情况也各不相同。通常以“冷-热-电”联供系统为核心的微能源网有“以热定电”、“以电定热”两种运行模式。当微能源网运行在“以热定电”的模式时，系统首先保证热能的供应，如果热能需求较高就会产生富余的电能，“以电定热”的模式正好相反。

微能源网在运行时，既可以通过电制冷和电制热的方式满足冷热负荷的需求，又可以通过吸收制冷和燃气制热的方式满足冷热负荷的需求，这取决

于两种方式的运行成本。引入电制冷比 λ_1 和电制热比 λ_2 作为优化变量, 经过优化可使微能源网的运行成本达到最优。

$$\lambda_1 = Q_{HP}^c / Q_c \quad (14)$$

$$\lambda_2 = Q_{HP}^h / Q_h \quad (15)$$

$$Q_{AC}^c = (1 - \lambda_1) Q_c \quad (16)$$

$$Q_{MT} + Q_{GB} = (1 - \lambda_2) Q_h \quad (17)$$

式中, Q_c 和 Q_h 分别为冷热负荷的需求。多种清洁能源利用的微能源网系统中配备了储能设备和电转氢设备, 能够以能量转化的方式实现富余电能的利用, 提高清洁能源的消纳水平。因此, 本文基于“以热定电”模式提出了含多种清洁能源利用的微能源网运行策略如图 2 所示。

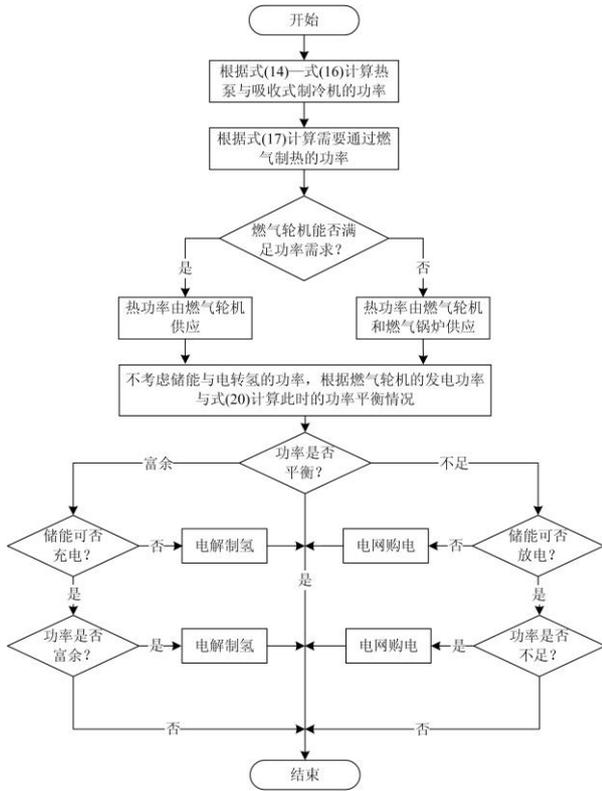


图 2 多种清洁能源利用的微能源网运行策略

Fig. 2 Operation strategy of micro energy grid for multiple clean energy utilization

在本文提出的运行策略下, 微能源网运行需满足冷、热、电功率平衡约束, 这里不考虑传输过程中的功率损耗。当微能源网以优化方式运行仍存在富余电能时, 可以考虑以负荷调控的方式将其消纳。冷、热、电功率平衡约束可分别表示为

$$Q_{AC,t}^c + Q_{HP,t}^c = Q_{c,t} \quad (18)$$

$$Q_{MT,t} + Q_{GB,t} + Q_{HP,t}^h - Q_{AC,t}^h = Q_{h,t} \quad (19)$$

$$P_{WT,t} + P_{PV,t} + P_{MT,t}^{gen} + P_{ES,t}^{dis} - P_{ES,t}^{ch} - P_{HP,t}^{h,E} - P_{HP,t}^{c,E} - P_{P2G,t}^E - P_{waste,t} = P_{e,t} \quad (20)$$

2 微能源网不确定性分析与场景构建技术

2.1 微能源网不确定性分析

微能源网中存在着许多不确定因素, 如果在规划的过程中不加以考虑就可能影响到规划结果的准确性^[18]。微能源网的不确定性主要包括分布式发电设备出力的不确定性、负荷功率的不确定性和能源价格的不确定性^[19]。本文将微能源网的不确定性用概率分布模型描述。

1) 风速分布

风机的输出功率与风速大小有关, 风速的分布情况可以用威布尔分布来描述^[20], 其概率密度函数可表示为

$$f(V) = kc^{-k} (V)^{k-1} e^{-(V/c)^k} \quad (21)$$

式中: k 表示形状参数; c 表示尺度参数; 参数值能够根据风速的历史数据计算, 也可以根据风速的统计均值与标准差估算。

2) 光照分布

光伏的输出功率与光照强度有关, 光照强度的分布情况可以用 Beta 分布来描述, 其概率密度函数可表示为^[21]

$$f(I) = \frac{\Gamma(\tau + \nu)}{\Gamma(\tau)\Gamma(\nu)} (I/I_{max})^{\tau-1} (1 - I/I_{max})^{\nu-1} \quad (22)$$

式中: Γ 表示伽马函数; τ 、 ν 表示形状参数; I_{max} 表示最大光照强度。

3) 负荷分布

正态分布能够较好地表示一段时间内的负荷分布情况^[22-23], 其分布参数受地域气候的影响, 其概率密度可表示为

$$f(P) = (1/\sqrt{2\pi}\sigma_p) \exp\left[-(P - \mu_p)^2 / 2\sigma_p^2\right] \quad (23)$$

式中: P 表示负荷功率; σ_p 与 μ_p 表示均值与标准差。

4) 价格分布

能源价格的分布情况直接影响对微能源网的经济性分析^[24]。均匀分布、正态分布、三角分布等均可以描述能源价格的分布情况。本文根据各类负荷的分布特征, 参照城市能源价格的定价规则, 认为电价分布可以用均匀分布来描述, 天然气与氢气的价格可以用三角分布来描述。其概率密度可分别表示为

$$f(e) = (\zeta_b - \zeta_a)^{-1} \quad (24)$$

$$f(g) = \begin{cases} 2(g - \zeta_a)(\zeta_b - \zeta_a)^{-1}(\zeta_c - \zeta_a)^{-1}, & \zeta_a \leq g \leq \zeta_c \\ 2(\zeta_b - g)(\zeta_b - \zeta_a)^{-1}(\zeta_b - \zeta_c)^{-1}, & \zeta_c < g \leq \zeta_b \end{cases} \quad (25)$$

式中： ζ_a 、 ζ_b 分别为分布区间的下限与上限； e 为电价； g 为气价； ζ_c 为三角分布的众数。

2.2 微能源网场景构建技术

场景构建技术是对微能源网进行多目标随机规划研究的技术手段，通过对随机变量的模拟来实现运行场景集的构建。Monte Carlo 模拟是一种常用的模拟方法，能够根据随机变量的分布特征生成对应的样本序列。微能源网中含有多个随机变量，在模拟采样的过程中需要考虑其互相关性。互相关性体现了随机变量的并发行为，影响着随机变量样本集的空间结构，进而影响到运行场景构建的合理性。相关系数能够检验样本的相关性，是构建相关性样本集的基础，其中 Pearson 相关系数为

$$r_p(x_i, x_j) = \text{cov}(x_i, x_j) / (\sigma(x_i)\sigma(x_j)) \quad (26)$$

式中， $\text{cov}(x_i, x_j)$ 为随机变量间的协方差。Spearman 相关系数是秩相关系数的一种，反映样本的顺序相关性^[25]。当样本服从正态分布时，Spearman 相关系数 ρ_s 与其 Pearson 相关系数 ρ_p 的拟合关系为^[26]

$$r_p = 2 \sin\left(\frac{\pi}{6} r_s\right) \quad (27)$$

模拟具有互相关性的随机变量需要确立随机变量的联合概率分布函数。微能源网中不同随机变量服从的分布特征不同，因此很难确立联合概率分布函数。这里根据 Copula 函数的功能性，引入正态 Copula 函数建立各随机变量的联合分布关系。

$$C(v_1, \dots, v_n; \mathbf{R}) = \Phi_n(u_1, \dots, u_n) \quad (28)$$

$$u_i = \Phi^{-1}(v_i) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (29)$$

式中： \mathbf{R} 为随机变量的 Pearson 相关系数矩阵； Φ_n 为 n 元标准正态分布函数； u_i 为相互独立的且服从标准正态分布随机变量。随机变量经上述变换后未改变其秩相关性，因此微能源网原随机变量 x_i 可以表示为

$$x_i = F_i^{-1}(v_i) \quad i=1, 2, \dots, n \quad (30)$$

式中， F_i^{-1} 为随机变量 x_i 所对应分布的逆函数。

微能源网中的随机变量具有时序性特征，仅考虑互相关性不能生成具有时序特征的样本。本文参考马尔可夫链中状态转移矩阵的相关理论^[27-28]，统计典型日的历史数据并确定各随机变量的状态转移频数，进而得到随机变量的状态转移概率矩阵。根据状态转移概率矩阵可以得到随机变量的状态序列矩阵。随机变量的状态序列矩阵可以表示为

$$\boldsymbol{\kappa} = [\boldsymbol{\kappa}_1, \boldsymbol{\kappa}_2, \dots, \boldsymbol{\kappa}_m] \quad (31)$$

式中， $\boldsymbol{\kappa}_m$ 为第 m 时刻随机变量的状态向量。按照状态序列矩阵可生成具有时序特征的样本。考虑时序性后，随机变量的互相关性没有发生变化。因此，考虑随机变量时序性和互相关性的运行场景集构建步骤如下：

1) 对随机变量的 Spearman 相关系数矩阵 \mathbf{R}_s 进行计算，求解对应正态分布的 Pearson 相关系数矩阵 \mathbf{R}_p ，获取状态序列矩阵 $\boldsymbol{\kappa}$ 。

2) 根据相关系数矩阵 \mathbf{R}_s 与 \mathbf{R}_p ，采用 Monte Carlo 模拟法生成具有互相关性且服从正态分布的随机变量矩阵 $\mathbf{U}_{m \times 1}$ 。

3) 根据式(28)一式(30)得到符合原随机变量分布特征的样本矩阵 $\mathbf{X}_{m \times m}$ ，判断当前序列的状态条件是否满足。

4) 重复步骤 2) 和步骤 3)，获取多组满足时序性和互相关性的样本，构建运行场景集。

为了提高规划结果的可靠性，通常需要对大量的场景数据进行分析计算。然而，随着运行场景的增多，规划模型求解的计算量显著增加。因此，需要平衡计算精度与计算效率确定合适规模的运行场景集。本文通过 k -means 算法对运行场景进行缩减，缩减后的运行场景为每个聚类的中心，聚类中心对应的频率为

$$f_{c_i} = N_{c_i} / N_s \quad (32)$$

式中： N_{c_i} 表示聚类 c_i 对应的样本数； N_s 表示样本的总数。设置合理的聚类数目是场景构建技术的重要步骤，这里通过 DBI 指数(Davies-Bouldin index)来度量其合理性。

$$\text{DBI} = \frac{\sum_{i=1}^k \max_{j \neq i} \left((\bar{C}_i + \bar{C}_j) \|g_i - g_j\| \right)}{k} \quad (33)$$

式中： k 为聚类数目； \bar{C}_i 为聚类 i 的类内平均距离； $\|g_i - g_j\|$ 为两聚类中心距离。综上，运行场景构建的过程如图 3 所示。

3 微能源网多目标随机规划模型

3.1 目标函数

微能源网的规划需要同时考虑设备的出力特性和设备的固定成本，并在已有的运行模式下优化设备容量。在考虑多种清洁能源利用的微能源网架构下，不但要考虑微能源网的经济效益，还要考虑微能源网的环境效益。因此本文确立了全生命周期成本和碳排放量两个目标函数。

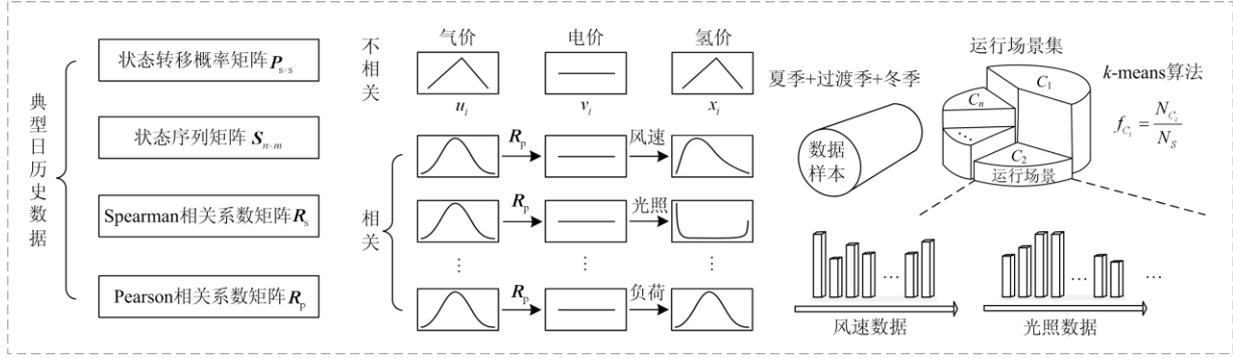


图3 微能源网运行场景构建过程

Fig. 3 Construction process of micro energy grid operation scenario

1) 全生命周期成本

微能源网的全生命周期成本为微能源网在全生命周期内产生的净费用, 包括投资成本、重置成本、维护成本、能源成本、设备残值。全生命周期成本可以表示为

$$F_{LCC} = F_{INV} + F_{RES} + F_{OPE} + F_{ENE} - F_{SAL} \quad (34)$$

$$\begin{cases} F_{INV} = \sum_{j=1}^M U_j C_j \\ F_{RES} = \sum_{j=1}^M \sum_{n=1}^{N_j} \frac{U_j C_j}{(1+r)^{nT_j}} \\ F_{OPE} = \sum_{j=1}^M \sum_{y=1}^Y \frac{\mu_j C_j}{(1+r)^y} \\ F_{ENE} = \frac{\sum_{y=1}^Y \sum_{d=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} P_{d,t}^{grid} S_{d,t}^e + F_{d,t}^{gas} S_{d,t}^g - F_{d,t}^{H2} S_{d,t}^{H2}}{(1+r)^y} \\ F_{SAL} = \sum_{j=1}^M \frac{\tau_j U_j C_j}{(1+r)^Y} \end{cases} \quad (35)$$

式中: j 为微能源网中设备序号; U_j 为设备的单位容量成本; C_j 为设备的配置容量; N_j 为设备重置次数; T_j 为设备的投入年限; Y 为项目的规划年限; μ_j 为设备的单位维护费用; $P_{d,t}^{grid}$ 为 d 日 t 时刻电网的购电功率; $S_{d,t}^e$ 为电网电价; $F_{d,t}^{gas}$ 为燃气网络的购气功率; $S_{d,t}^g$ 为天然气价格; τ_j 为设备的残值率; $F_{d,t}^{H2}$ 为氢气的产出速率; $S_{d,t}^{H2}$ 为氢能源价格。

2) 碳排放量

微能源网中非清洁能源的利用会产生温室气体 (CO_2) 和污染气体 (SO_2 、 NO_x), 其中 CO_2 排放量的占比最大。这里通过 CO_2 排放折算系数将微能源网电力的消耗量和天然气的消耗量转化为碳排放量, 碳排放量可以表示为

$$F_{CO_2} = \sum_{d=1}^{365} \sum_{t=1}^{24} (P_{d,t}^{grid} \alpha^e + F_{d,t}^{gas} \alpha^g) \quad (36)$$

式中: α^e 为电能的折算系数; α^g 为天然气的折算系数。

3.2 约束条件

1) 优化变量约束

在微能源网的规划中, 本文将风机、光伏、微型燃气轮机、地源热泵、蓄电池和电转氢的容量作为优化变量, 同时考虑运行中电制冷比 λ_1 、电制热比 λ_2 的优化。优化变量需满足

$$\begin{cases} C_j^{\min} \leq C_j \leq C_j^{\max} \\ 0 \leq \lambda_1 \leq 1 \\ 0 \leq \lambda_2 \leq 1 \end{cases} \quad (37)$$

式中, C_j^{\min} 与 C_j^{\max} 分别为设备 j 的容量规划下限与上限。

2) 设备运行约束

微能源网中设备运行时首先要满足网络的功率平衡约束, 其次设备运行的功率不可以超过最大功率, 同时考虑过度充放电对蓄电池储能寿命的影响, 必须控制其荷电状态的范围。设备运行需满足

$$\begin{cases} 0 \leq P_j \leq P_j^{\max} \\ SOC_{ES}^{\min} \leq SOC_{ES} \leq SOC_{ES}^{\max} \end{cases} \quad (38)$$

式中: P_j 为设备 j 的运行功率; P_j^{\max} 为设备 j 的最大运行功率; SOC_{ES}^{\min} 与 SOC_{ES}^{\max} 分别为蓄电池荷电状态下限与上限。

3) 机会约束

在微能源网的规划中包含多种随机变量, 在优化的过程中不仅要考虑确定性约束还要考虑机会约束。微能源网的运行受到多种非确定因素的影响, 有时会出现电能富余的情况, 这里定义电能的损失率, 并将其表示为机会约束的形式。

$$E_{\text{rat}} = \frac{E_{\text{was}}}{E_{\text{gen}}} \quad (39)$$

$$P_r \{E_{\text{rat}} \leq E_{\text{rat}}^0\} \geq \beta \quad (40)$$

式中： E_{was} 为微能源网中富余的电量； E_{gen} 为风机与光伏的发电量； E_{rat} 为电能的损失率； E_{rat}^0 为允许损失率的最大值； β 为置信度。

3.3 多目标随机规划模型

微能源网的多目标随机规划模型包括多个优化变量和多种随机变量，综合考虑两个目标函数和多种等式与不等式约束，可以将多目标随机规划模型表示为

$$\begin{cases} \min(F_{\text{LCC}}) \\ \min(F_{\text{CO}_2}) \\ \text{s.t.} \\ P_r \{F_{\text{LCC}}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq \min(F_{\text{LCC}})\} \geq \alpha \\ P_r \{F_{\text{CO}_2}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq \min(F_{\text{CO}_2})\} \geq \alpha \\ P_r \{E_{\text{rat}} \leq E_{\text{rat}}^0\} \geq \beta \\ h(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = 0 \\ g(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \leq 0 \end{cases} \quad (41)$$

式中： \mathbf{x} 为随机变量； \mathbf{y} 为优化变量； α 与 β 为置信度； h 与 g 分别代表等式约束与不等式约束。

3.4 求解方法

本文使用 NSGA-II 算法在 Matlab 仿真平台进行求解。NSGA-II 算法使用带精英策略的快速非支配排序，具有很强的寻优能力，可以提高多目标优化问题的求解速度并得到 Pareto 前沿。

本文使用模糊优选决策的方法对可行解进行决策，将解集中的数据转化为相对优属度。当确定规划方案的相对优属度后，根据设置的评判等级可得到方案的相对隶属度^[29]。相对隶属度最小的规划方案即为决策的优选方案。

综上，微能源网的多目标随机规划模型求解步骤如图 4 所示。

4 算例分析

4.1 算例介绍

本文综合考虑了微能源网对多种清洁能源的利用与转化，其中一次清洁能源包括风能、太阳能和地热能，二次清洁能源为氢能。一次清洁能源的利用可有效降低微能源网的运行成本和碳排放量水平，二次清洁能源的转化可以有效提高微能源网的电能利用率。

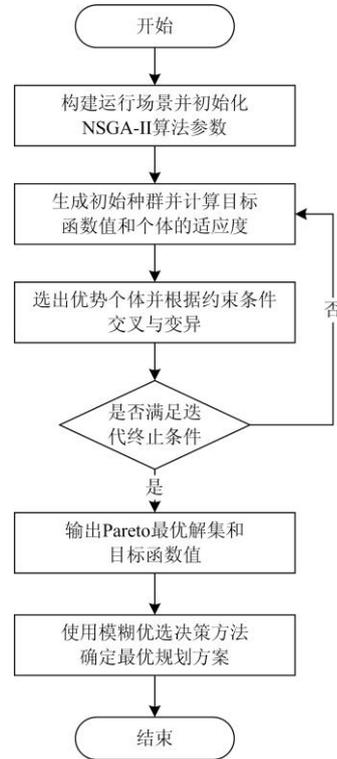


图 4 微能源网多目标随机规划模型求解步骤

Fig. 4 Solving steps of multi-objective stochastic programming model for micro energy grid

在多种清洁能源利用的微能源网架构下，考虑影响微能源网规划的多种不确定因素，将风速、光照强度、负荷大小和能源价格作为随机变量。同时，将风机、光伏、微型燃气轮机、地源热泵、储能和电转氢的设备容量以及电制冷比和电制热比作为优化变量。运用多目标随机规划的方法确定规划的优选配置方案。

4.2 算例数据

本文选取了夏季、过渡季和冬季三种典型日进行分析，每种典型日中多种随机变量的分布参数各不相同。夏季典型日包括 6、7、8、9 月，典型日特征表现为日光照小时数较长且平均光照强度较高，系统中对热负荷的需求较低，这里在分析中假设热负荷的需求为 0。过渡季典型日包括 4、5、10、11 月，典型日特征表现为日风速的不确定性较强且平均风速较高，系统中既有冷负荷需求又有热负荷需求，但需求量不大。冬季典型日包括 1、2、3、12 月，典型日特征表现为日光照小时数较短且平均光照强度较低，系统中对冷负荷的需求较低，这里在分析中假设冷负荷的需求为 0。这里参考文献[30-31]中能源价格数据，根据价格的分布特性设电价服从 $U(0.30, 0.70)$ 的均匀分布，天然气价格服从 $T(0.23,$

0.28, 0.25)的三角分布, 氢气售价服从 $T(1.01, 1.13, 1.10)$ 的三角分布, 单位均为元/kWh。

微能源网具体候选设备的参数信息如表 1 所示。本文将微能源网的规划周期设为 20 年, 期间需要根据设备的寿命进行重置更新。氢气混入燃气供应网络会影响网络的安全性, 因此, 本文仅考虑将产生的氢能源出售给氢能源汽车的充电站。电网的 CO_2 折算系数为 0.972 kg/kWh , 天然气的 CO_2 折算系数为 0.23 kg/kWh ^[3]。

表 1 设备参数信息^[30-32]

Table 1 Equipment parameter information^[30-32]

| 设备名称 | 单位成本/元 | 效率 | 维护费用/元 | 寿命/年 |
|--------|--------|----------|--------|------|
| 风机 | 7 000 | — | 0.010 | 20 |
| 光伏 | 8 796 | — | 0.010 | 25 |
| 微型燃气轮机 | 8 024 | 0.3, 0.5 | 0.015 | 25 |
| 地源热泵 | 7 000 | 4.2, 3.8 | 0.010 | 20 |
| 燃气锅炉 | 866 | 0.85 | 0.002 | 20 |
| 吸收式制冷机 | 1 353 | 0.7 | 0.008 | 20 |
| 蓄电池 | 1 901 | 0.9 | 0.009 | 5 |
| 电转氢 | 3 500 | 0.6 | 0.020 | 15 |

4.3 结果分析

1) 场景构建中影响因素的对比分析

在微能源网的多目标随机规划中, 时序性与互相关性的影响是不容忽视的。微能源网中的随机变量如不考虑时序性与互相关性, 就会使随机场景的设计严重违背客观事实。现实中有很多具有互相关性的例子, 并且对于不同的典型日也各有不同。例如, 在夏季典型日中光照强度较高的时候, 风速较低、冷负荷的需求较高; 在冬季典型日中光照强度较低的时候, 风速较高、热负荷的需求较高。

应用本文提出的场景构建技术能够很好地解决随机变量的采样问题。这里通过光照强度和风速数据的采样过程来分析是否考虑互相关性对采样数据的影响。根据光照强度服从 Beta 分布、风速服从威布尔分布分别对光照强度和风速进行 1 000 次采样, 采样结果如图 5 所示, 其中光照强度和风速数据均取为标么值。

从图 5 中可以看出, 当不考虑光照强度和风速之间的互相关性时, 随机数据的采样较为分散; 当考虑光照强度和风速之间的互相关性时, 随机数据的采样会聚集在某个区域。

考虑了随机样本的互相关性后, 在场景构建中还要满足随机样本的时序性。这里以光照强度为例, 将其分别划分为 10 个与 20 个状态, 光照强度的采样数据如图 6 所示。当不考虑互相关性时, 划分为 20 个状态的光照强度比划分为 10 个状态的光照强

度的波动区间更小, 对比典型场景数据, 自相关系数的平均偏差率分别为 7.2% 和 10.3%, 即划分为 20 个状态的光照强度时序性优于划分为 10 个状态的光照强度。当光照强度同时划分为 20 个状态时, 考虑互相关性的光照强度的波动区间更小, 这也印证了图 5 的聚集现象, 并且此时自相关系数的平均偏差率为 5.9%, 更好地保留了时序特征。场景构建的合理性与有效性直接关乎多目标随机规划结果的准确性。因此, 在微能源网的多目标随机规划中考虑随机变量的时序性与互相关性是十分必要的。

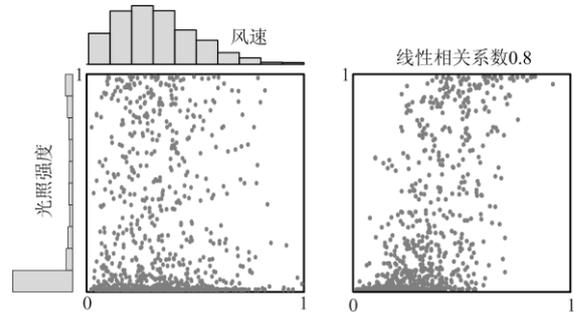


图 5 光照强度和风速的采样结果

Fig. 5 Sampling results of light intensity and wind speed

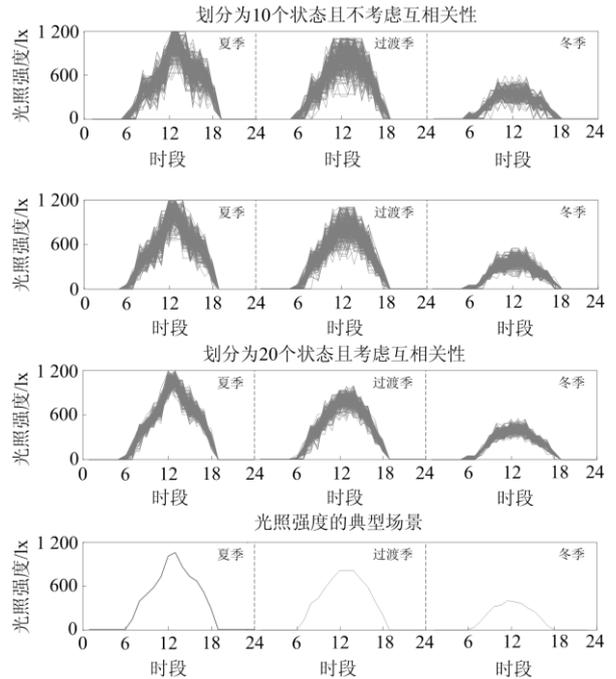


图 6 光照强度的采样数据

Fig. 6 Sample data of light intensity

2) 随机规划结果与确定性规划结果的对比分析

在微能源网的多目标随机规划中, 为了使规划结果尽可能准确, 通常对目标函数取较高的置信度水平, 这里置信度取为 0.95。为了分析多目标随机

规划与多目标确定性规划结果的不同之处,对两种优化得到的 Pareto 最优解集进行对比分析,仿真结果如图 7 所示。

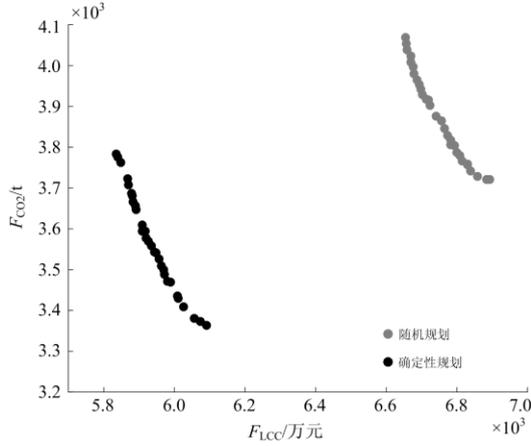


图 7 随机规划结果与确定性规划结果

Fig. 7 Stochastic programming results and deterministic programming results

从两者的帕累托前沿可以看出,确定性规划结果位于随机规划结果的左下方,两个目标函数的结果整体上优于随机规划。将全生命周期成本的权重设为 0.4,碳排放量的权重设为 0.6,在经过多目标优选决策后,确定两种规划的容量配置方案如表 2 所示。

表 2 容量配置方案对比

Table 2 Capacity configuration scheme comparison

| 优化变量 | 随机性 | 确定性 |
|--------|-----|-------|
| 风机 | 950 | 1 000 |
| 光伏 | 995 | 892 |
| 微型燃气轮机 | 189 | 37 |
| 地源热泵 | 186 | 193 |
| 蓄电池 | 341 | 450 |
| 电转氢 | 443 | 161 |

在随机规划方案中,微型燃气轮机与电转氢装置的配置容量较大;在确定性的规划方案中,微型燃气轮机与电转氢装置的配置容量较小。为了分析确定性规划方案的局限性,将确定性规划的规划结果代入到随机规划的多个运行场景中,并将不同运行场景下的目标函数值与原确定性规划的目标函数值进行对比,结果如图 8 所示。从仿真结果中可以看出,按照确定性的规划结果对微能源网进行配置,不同运行场景下的全生命周期成本和碳排放量与原确定性的规划结果会有差异,部分场景下会超过原有的规划结果,即确定性的配置方案不适用于具有不确定性的微能源网中,规划结果具有一定的局限

性。因此,考虑不确定性对微能源网进行多目标随机规划是十分必要的。

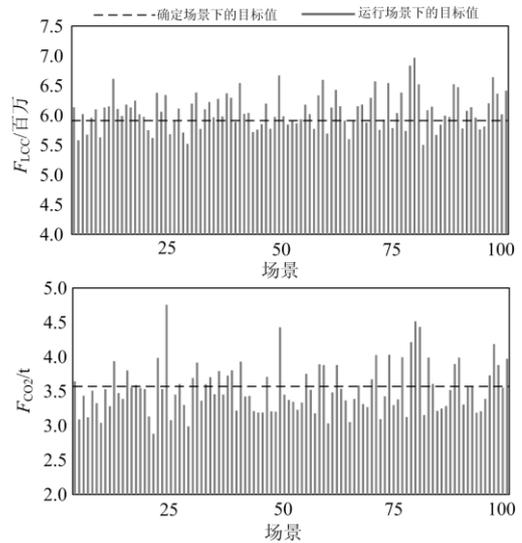


图 8 运行场景与确定场景下的目标值对比

Fig. 8 Comparison of objective function values between running scenario and determining scenarios

3) 不同发电设备规划容量上限的对比分析

在微能源网的多目标随机规划中,如要保证重要负荷供电的可靠性,通常对清洁能源发电装置的最大装机容量有所限制。这里对目标函数的置信度同取为 0.95,同时分别将风机与光伏的装机容量上限依次设为 500 kW 和 1 000 kW。规划的容量配置方案如表 3 所示。

表 3 容量配置方案对比

Table 3 Capacity configuration scheme comparison

| 优化变量 | ≤1 000 | ≤500 |
|--------|--------|------|
| 风机 | 950 | 494 |
| 光伏 | 995 | 430 |
| 微型燃气轮机 | 189 | 498 |
| 地源热泵 | 186 | 161 |
| 蓄电池 | 341 | 385 |
| 电转氢 | 443 | 34 |

从表 3 中可以看出,当装机容量限制在 500 kW 时,微型燃气轮机的配置容量明显增加,电转氢装置的配置容量明显降低,即系统更多以燃气的方式进行热电联产。以夏季典型日为例,在满足置信度水平的一种运行场景下分析微能源网运行中的电功率平衡状态。电功率平衡状态如图 9 所示。

从图 9 中可以看出,当装机容量限制在 1 000 kW 时,风机与光伏的发电功率较高,能够在很大程度上支撑微能源网的电负荷。而当装机容量限制在 500 kW 时,风机与光伏的发电功率较低,

需要燃气轮机发电, 不足的电能由电网补充。

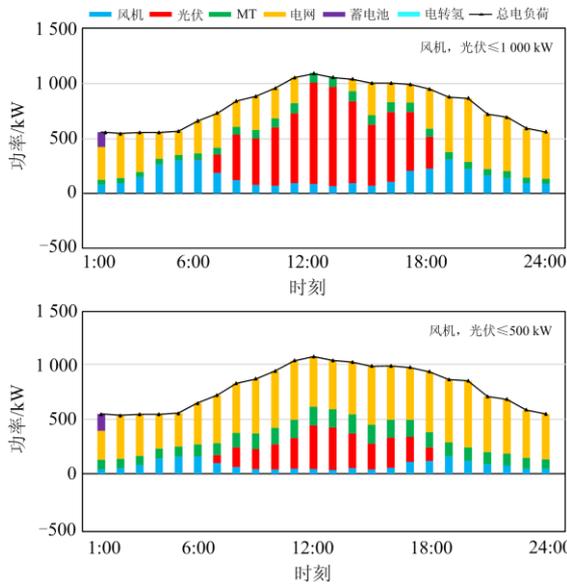


图 9 夏季典型日电功率平衡状态对比

Fig. 9 Comparison of typical power balance states in summer

图 10 为过渡季典型日微能源网的电功率平衡状态。蓄电池正向功率为放电, 反向功率为充电, 蓄电池能够在微能源网的运行中起到调节作用。虽然风机与光伏的发电功率已超过系统的总电负荷, 但燃气轮机仍需根据系统的热能需求进行发电。当装机容量限制在 1 000 kW 时, 微能源网可以利用富余的电功率制氢, 在 11~15 h 时产生了电能的浪费, 即富余的电功率大于电转氢装置的最大功率。当装

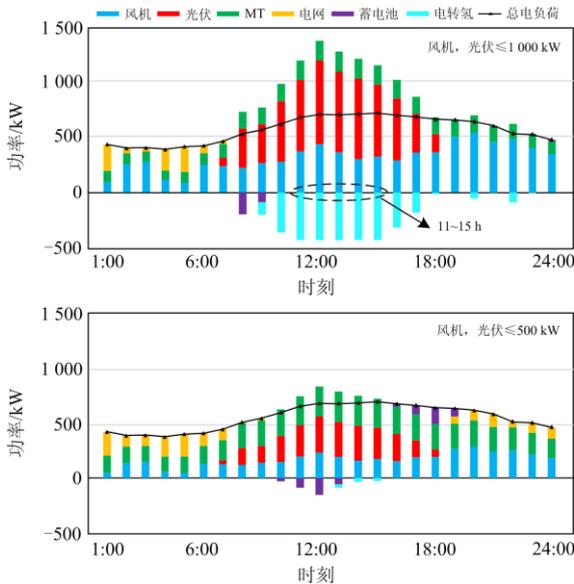


图 10 过渡季典型日电功率平衡状态对比

Fig. 10 Comparison of typical power balance states in transition season

机容量限制在 500 kW 时, 微能源网中也会出电功率富余的情况, 但富余的电功率较小, 可以通过蓄电池与电转氢装置完全消纳。

冬季典型日的电能平衡状态与过渡季相似, 当蓄电池的电量达到上限时, 通过电转氢的方式消纳富余的电能。虽然规划方案出现电能损失的情况, 但规划周期内电能损失率满足规划的要求。因此, 不同规划容量上限会对规划的结果产生影响, 需要根据规划的具体要求确定优化变量的取值区间。

4) 不同置信度水平下规划结果的对比分析

在微能源网的多目标随机规划中, 对目标函数取不同的置信度水平, 得到的 Pareto 最优解集也各不相同。这里分别对目标函数置信度取值为 0.95、0.85、0.75, 得到的仿真结果如图 11 所示。从仿真结果中可以看出, 随着置信度的取值增大, Pareto 最优解集整体上会向右上方移动。这是因为当置信度水平较低时, 只需在部分运行场景下满足给定的机会约束就可以作为优化的结果。反之, 当置信度水平较高时, 优化的结果需满足更多的运行场景, 从而优化结果整体偏大。因此, 要根据规划的具体要求选取合适的置信度水平。

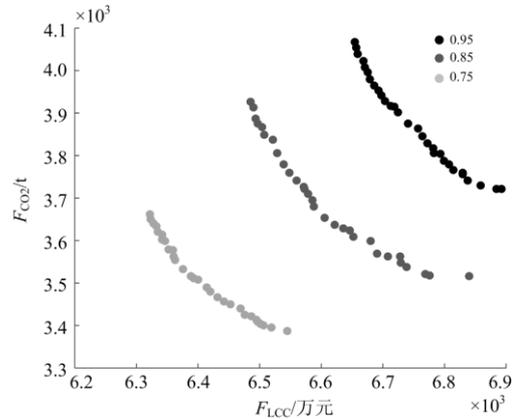


图 11 不同置信度水平的优化结果

Fig. 11 Optimization results of different confidence levels

5 结论

本文基于多种清洁能源利用的微能源网模型, 构建了微能源网的多种运行场景。以全生命周期成本最小和碳排放量最小建立了微能源网的多目标随机规划模型。采用具体的算例, 对微能源网的多目标随机规划方法进行验证。结果表明:

1) 本文提出的微能源网多目标随机规划模型能够兼顾微能源网运行的经济性与环保性, 能够根据不同的规划要求给决策者提供多种规划方案。

2) 微能源网的多目标随机规划方法相较于传统的确定性规划方法得到的优化结果更为可行、有

效, 同时也可用于其他规划问题的研究。

3) 在使用多目标随机规划时, 一定要考虑随机变量的时序性与互相关性。同时, 根据规划的具体要求选择合适的置信度水平。

参考文献

- [1] 付艳. 能源消费、能源结构与经济增长的灰色关联分析[J]. 工业技术经济, 2014, 33(5): 153-160.
FU Yan. Grey correlation analysis of energy consumption, energy structure and economic growth[J]. Industrial Technology Economy, 2014, 33(5): 153-160.
- [2] 田世明, 栾文鹏, 张东霞, 等. 能源互联网技术形态与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3482-3494.
TIAN Shiming, LUAN Wenpeng, ZHANG Dongxia, et al. Technology form and key technology of energy Internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3482-3494.
- [3] 马腾飞, 吴俊勇, 郝亮亮, 等. 基于能源集线器的微能源网能量流建模及优化运行分析[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 179-186.
MA Tengfei, WU Junyong, HAO Liangliang, et al. Energy flow modeling and optimal operation analysis of micro energy grid based on energy hub[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 179-186.
- [4] BADAL F R, DAS P, SARKER S K, et al. A survey on control issues in renewable energy integration and microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 87-113. DOI: 10.1186/s41601-019-0122-8.
- [5] 王林富, 邱方驰, 张斌, 等. 基于分布式电源的配电网多目标优化策略研究[J]. 智慧电力, 2019, 47(1): 47-53, 65.
WANG Linfu, QIU Fangchi, ZHANG Bin, et al. Research on multi-objective optimal strategy for distribution network based on distributed generation[J]. Smart Power, 2019, 47(1): 47-53, 65.
- [6] 凌文, 刘玮, 李育磊, 等. 中国氢能基础设施产业发展战略研究[J]. 中国工程科学, 2019, 21(3): 76-83.
LING Wen, LIU Wei, LI Yulei, et al. Research on the development strategy of China's hydrogen energy infrastructure industry[J]. China Engineering Science, 2019, 21(3): 76-83.
- [7] 陈丽萍, 林晓明, 许苑, 等. 基于能源集线器的微能源网建模与多目标优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 9-16.
CHEN Liping, LIN Xiaoming, XU Yuan, et al. Micro energy grid modeling and multi-objective optimal scheduling based on energy hub[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 9-16.
- [8] LI G, WANG R, ZHANG T, et al. Multi-objective optimal design of renewable energy integrated CCHP system using PICEA-g[J]. Energies, 2018, 11(4): 743.
- [9] 刘辉, 刘强, 张立, 等. 考虑需求侧协同响应的热电联供微网多目标规划[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 43-51.
LIU Hui, LIU Qiang, ZHANG Li, et al. Multi objective planning of cogeneration microgrid considering demand side cooperative response[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 43-51.
- [10] KIPTOO M K, ADEWUYI O B, LOTFY M E, et al. Multi-objective optimal capacity planning for 100% renewable energy-based microgrid incorporating cost of demand-side flexibility management[J]. Applied Sciences, 2019, 9(18): 38-55.
- [11] YUAN Y, LI Q, WANG W. Optimal operation strategy of energy storage unit in wind power integration based on stochastic programming[J]. IET Renewable Power Generation, 2011, 5(2): 194-201.
- [12] LI C Z, SHI Y M, LIU S, 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.
- [13] HEMMATI R, SABOORI H, JIRDEHI M A. Stochastic planning and scheduling of energy storage systems for congestion management in electric power systems including renewable energy resources[J]. Energy, 2017, 133(15): 380-387.
- [14] DOLATABADI A, MOHAMMADI-IVATLOO B, ABAPOUR M, et al. Optimal stochastic design of wind integrated energy hub[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(5): 2379-2388.
- [15] ZABRZESKI L, JANUSZ P, LISZKA K, et al. Hydrogen-natural gas mixture compression in case of transporting through high-pressure gas pipelines[J]. Iop Conference, 2019, 214.
- [16] CLEGG S, MANCARELLA P. Integrated modeling and assessment of the operational impact of power-to-gas (P2G) on electrical and gas transmission networks[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4): 1234-1244.
- [17] SHATERABADI M, JIRDEHI M A. Multi-objective stochastic programming energy management for integrated INVELOX turbines in microgrids: a new type of turbines[J]. Renewable Energy, 2019, 145.
- [18] PETKOV I, GABRIELLI P. Power-to-hydrogen as seasonal energy storage: an uncertainty analysis for optimal design of low-carbon multi-energy systems[J]. Applied Energy, 2020, 274: 115197.

- [19] 石玉东, 刘晋源, 徐松, 等. 考虑时序特性的配电网风光-储随机规划模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 23-32.
SHI Yudong, LIU Jinyuan, XU Song, et al. Wind light storage stochastic programming model of distribution network considering time series characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(10): 23-32.
- [20] SAMAKPONG T, ONGSAKUL W, MANJIPARAMBIL N M. Optimal power flow incorporating renewable uncertainty related opportunity costs[J]. Computational Intelligence, 2020.
- [21] THANG V V. Optimal sizing of distributed energy resources and battery energy storage system in planning of islanded micro-grids based on life cycle cost[J]. Energy Systems, 2020: 1-20.
- [22] ZIDAN A, GABBAR H A, ELDESSOUKY A. Optimal planning of combined heat and power systems within microgrids[J]. Energy, 2015, 93: 235-244.
- [23] 杨娴, 汪柳兵, 李德林. 基于自适应预测箱的风电场场景分析方法[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(8): 82-90.
YANG Xian, WANG Liubing, LI Delin. A wind power scenarios analysis method based on adaptive prediction box[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(8): 82-90.
- [24] MAVROTAS G, FLORIOS K, VLACHOU D. Energy planning of a hospital using mathematical programming and Monte Carlo simulation for dealing with uncertainty in the economic parameters[J]. Energy Conversion and Management, 2010, 51(4): 722-731.
- [25] 张沈习, 李珂, 程浩忠, 等. 考虑相关性的间歇性分布式电源选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 53-58, 140.
ZHANG Shenxi, LI Ke, CHENG Haozhong, et al. Location and capacity planning of intermittent distributed generation considering correlation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 53-58, 140.
- [26] 王俊, 蔡兴国, 季峰. 基于 Copula 理论的相关随机变量模拟方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 75-82, 13.
WANG Jun, CAI Xingguo, JI Feng. Simulation method of correlated random variables based on Copula theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 75-82, 13.
- [27] 蒋平, 霍雨翀, 张龙, 等. 基于改进一阶马尔可夫链的风速时间序列模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(19): 22-27.
JIANG Ping, HUO Yuchong, ZHANG Long, et al. Time series model of wind speed based on improved first-order Markov chain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19): 22-27.
- [28] 刘雪飞, 李江南, 林子钊, 等. 基于状态转移矩阵的调度操作事故评级方法[J]. 智慧电力, 2020, 48(7): 106-111.
LIU Xuefei, LI Jiangnan, LIN Zizhao, et al. Accident rating method of dispatching operation based on state transition matrix[J]. Smart Power, 2020, 48(7): 106-111.
- [29] 陈守煜. 多目标决策系统模糊优选理论、模型与方法[J]. 华北水利水电学院学报, 2001(3): 136-140.
CHEN Shouyu. Theory, model and method of fuzzy optimization for multi-objective decision system[J]. Journal of North China Institute of Water Resources and Hydropower, 2001(3): 136-140.
- [30] 张剑光. 氢能产业发展展望—氢燃料电池系统与氢燃料电池汽车和发电[J]. 化工设计, 2020, 30(1): 3-6.
ZHANG Jianguang. Prospects for the development of hydrogen energy industry—hydrogen fuel cell systems and hydrogen fuel cell vehicles and power generation[J]. Chemical Design, 2020, 30(1): 3-6.
- [31] 李德智, 龚桃荣. 用户侧多能互补微能源网的规划方法[J]. 中国电力, 2019, 52(11): 68-76.
LI Dezhi, GONG Taorong. User-side multi-energy complementary micro-energy network planning method[J]. Electric Power, 2019, 52(11): 68-76.
- [32] 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.
LEI Jinyong, YU Li, GUO Xiaobin, et al. Comprehensive energy system planning method considering the coupling of electricity, heat and gas[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31(1): 19-24.

收稿日期: 2020-04-17; 修回日期: 2020-12-20

作者简介:

宋云超(1994—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为能源互联网规划; E-mail: sycwyx@126.com

王丹(1981—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为综合能源系统分析; E-mail: wangdantjuee@tju.edu.cn

何伟(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为新能源接入和电能质量. E-mail: lanlyhw@163.com

(编辑 周金梅)