

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.06.018

考虑市场计划的微能源网双层优化配置方法

王维^{1,2}, 贾丽^{1,2}, 杨逸凡^{1,2}, 孙明宇^{1,2}, 王琦^{1,2}

(1. 南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210046;

2. 江苏省综合能源设备及集成国际联合实验室, 江苏 南京 210046)

摘要: 由于微能源网具有多能协同运行、消纳清洁能源发电的特点, 其在“双碳”目标和新型电力系统背景下具有广泛的应用价值。但随着风光接入规模日益增大, 风光出力的不确定性势必会影响微能源网运行的稳定性。为此, 文中充分考虑风光出力不确定性与相关性, 提出一种考虑市场计划的微能源网双层优化配置方法。首先, 基于 Wasserstein 距离指标将风光概率分布最优离散化处理, 采用 Frank-Copula 函数建立风光出力联合分布函数, 生成典型日出力场景; 然后, 考虑电力市场与天然气市场计划经济性, 建立微能源网双层优化配置模型, 实现设备配置与系统运行的紧密耦合; 最后, 基于某地区微能源网实测数据生成典型风光出力场景进行优化计算。算例结果表明, 双层优化配置方法可以降低微能源网的年化成本, 增加对风光极限信息的包容性, 提高系统运行的经济性与稳定性。

关键词: 微能源网; Wasserstein 距离; 相关性拟合; 场景生成; 市场计划; 双层优化配置

中图分类号: TM732

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2023)06-0170-09

0 引言

随着能源互联网的提出和发展, 多种能源之间的耦合互补形式日益紧密, 在实现能源高效利用的同时, 对全球能源低碳转型发挥重要作用^[1-3]。微能源网中多种能源协同互补、优化利用, 是构建高效低碳能源体系的关键环节, 是能源互联网的重要组成部分^[4-6]。在“双碳”目标背景下, 风光等新能源大规模接入微能源网也将成为必然趋势^[7-9]。然而, 风光发电具有随机性和不确定性, 市场计划也对微能源网优化经济性也有着不可忽视的影响。因此, 如何考虑风光不确定性影响, 考虑市场计划经济性因素, 确定系统优化配置和优化运行方案问题成为研究热点。

目前, 在风光出力场景构建方面, 大多数学者考虑风光出力不确定性影响, 选取风光出力典型日场景对系统进行优化运行, 也有小部分学者忽略风光不确定性影响, 如文献[10-13], 以确定的风光出力作为研究基础, 但缺乏一定的科学性。文献[14]利用周期内风光历史数据进行聚类分析, 形成可以反映随机变量实际特点的风光典型场景集; 文献[15]建立风光出力误差概率分布函数, 并采用拉丁抽样法构建风光出力场景; 文献[16]考虑风光接入对系统的影响, 以 Weibull 分布和 Beta 分布作为风光边缘概率分布, 并考虑随机变量的时序性和相关

性, 生成风光出力场景; 文献[17]采用核密度估计法计算风光边缘概率分布, 并考虑随机变量间相关性生成风光出力场景。以上研究都进行风光出力场景的合理预测, 但未考虑极限信息的缺失对风光出力预测结果的影响, 与真实情况存在偏差。

在风光接入的微能源网优化配置与运行方面, 也有专家学者做了较多的研究, 在优化运行目标上, 国内外学者大多都考虑了微能源网系统运行规划的经济环保因素^[18-20]。文献[21]建立两层嵌套系统优化模型, 优先增大系统收益、减小风电波动影响, 然后考虑风电预测误差, 最终实现经济运行; 文献[22]上下层优化模型分别以年化总成本和能源节约率为优化运行目标, 求得设备最优配置与最优出力; 文献[23]以系统运行成本和年二氧化碳排放率最小为目标求解设备最优选型定容问题, 实现系统经济环保; 文献[24]考虑氢能处理方法, 以系统运行总成本最小为目标, 实现系统优化运行。上述微能源网优化运行研究均未考虑后续优化运行中的市场计划经济因素。

针对以上问题, 文中考虑风光不确定性, 基于 Wasserstein 距离指标分别将风光随机变量最优离散化, 采用 Frank-Copula 函数建立风光出力联合分布函数, 考虑随机变量间相关性得到的风光不确定性场景, 可使得风光出力预测更为准确, 对微能源网系统优化配置起到积极作用; 建立微能源网优化配置与运行双层优化模型, 使配置和运行紧密耦合, 考虑市场计划经济因素来提高微能源网系统优化

收稿日期: 2023-04-20; 修回日期: 2023-07-04

基金项目: 江苏省重点研发计划资助项目(BE2020081)

运行的经济性。最后,通过具体算例仿真验证了文中方法的有效性。

1 风光不确定性场景生成

当微能源网优化模型不考虑风光发电的不确定性问题时,优化配置模型为一个确定性线性数学模型,可以直接通过数学方法高效求解。然而,实际的风电站、光伏电站的出力都具有随机性和波动性,如果在系统优化配置时将其作为一个确定的问题进行计算,势必会导致最终结果不能满足系统对误差的要求以及对风光消纳的要求。因此,不确定性场景生成成为微能源网优化运行的必要前提。

1.1 风光随机变量概率密度最优离散化

在风光出力过小等极限情况时,为提高场景构建的包容性^[25]以便更好地处理风光出力不确定因素,文中提出采用离散区间的划分方法,将风光随机变量连续概率密度函数最优离散化处理。

采用双参数 Weibull 分布描述风速概率分布情况,采用 Beta 分布描述光照强度概率分布情况。选取 Wasserstein 距离指标来测度离散化概率分布与连续概率分布之间的距离,记 $d(p', p'')$ 表示概率分布 p' 与 p'' 的距离测度,而 Wasserstein 距离不是定义的距离本身,而是其 r 次方,记为 $d_w(p', p'')^r$,其具体表达如式(1)所示。

$$d_w(p', p''; d)^r = \int d(p', p'')^r dx \quad (1)$$

式中: r 为阶数。

对风速和光照强度单独求最优离散化概率分布,首先根据风速和光伏历史数据计算风光概率密度函数中的相关参数,假设用 M 个离散分位点的离散分布来模拟随机变量连续概率密度函数,由文献[25]可知,通过式(2)和式(4)可分别计算风速、光照强度最优分位点 x_s ($s=1, 2, \dots, M$),通过式(5)计算最优分位点 x_s 对应概率。

$$c_3 \Gamma(a) \Gamma(c_1 + c_2 x_s, a) - \Gamma(c_1, a) = \frac{2s-1}{2M} c_3 \Gamma(a) (\Gamma(c_1 + c_2 x_s, a) - \Gamma(c_1, a)) \quad (2)$$

$$\begin{cases} c_1 = v_{in}/c \\ c_2 = c_1(h/w_n) \\ c_3 = (kc_2)^{-r/(1+r)}(1+r)^a \\ a = (k+r)/[(1+r)k] \end{cases} \quad (3)$$

$$B(x_s; \alpha, \beta) = \frac{2s-1}{2M} \quad (4)$$

$$P_s = \int_{(x_{s-1}+x_s)/2}^{(x_s+x_{s+1})/2} p(x) dx \quad (5)$$

式中: $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数; k 为分布参数,当 $k=1$ 和 $k=2$ 时,该分布分别为指数分布和瑞利分布,一般取 $k=2$; w_n 为风电机组的额定功率; c, c_1, c_2, c_3, a 为常参数,是为简化计算而引入的中间参量; v_n, v_{in} 分别为额定、切入风速; $h = v_n/v_{in} - 1$; c 为 Weibull 分布的尺度参数; $B(\cdot)$ 为 Beta 分布; α, β 为 Beta 分布两形状参数; P_s 为 s 分位点的离散概率; $p(x)$ 为连续概率密度函数。

对概率分布离散化来模拟随机变量连续概率时,由于离散分位点的存在,离散概率在计算时会使最两侧产生剩余概率,如图1阴影所示。图中 p_1-p_6 分别为对应区间概率密度的积分。

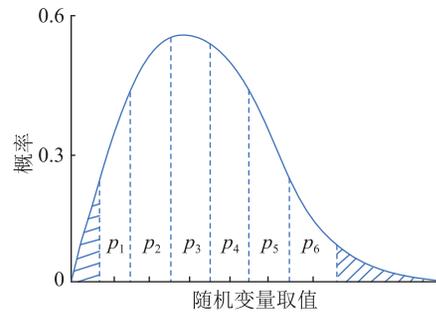


图1 剩余概率示意

Fig.1 Schematic diagram of residual probability

为使总概率为1,应对剩余概率进行处理,对式(5)进行修正得到式(6)。

$$\begin{cases} P_s = \int_{(x_{s-1}+x_s)/2}^{(x_s+x_{s+1})/2} p(x) dx & s = 2, 3, \dots, M-1 \\ P_1 = \int_{x_0}^{(x_1+x_2)/2} p(x) dx \\ P_M = \int_{(x_{M-1}+x_M)/2}^{x_{M+1}} p(x) dx \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_1, P_M 分别为第1个分位点、第 M 个分位点对应的离散概率; x_0, x_{M+1} 分别为变量的下限和上限,即 $-\infty$ 和 $+\infty$ 。

1.2 考虑风光相关性的场景生成

微能源网中不确定性因素之间具有相关性,相关性体现了多种不确定性因素场景生成时的相互牵制作用,随机采样的结果会因为相关性的作用更贴合实际。因此,当不确定性含有多个随机变量时,应考虑多随机变量之间的相关性。

文中基于最优离散化和随机变量相关性的风光出力场景构建步骤。

步骤1:以风速和光伏的实际历史数据为基础,将风光随机变量连续概率密度函数最优离散化。

步骤2:根据风机和光照强度的最优离散化边缘概率分布,考虑相关性建立风光随机变量联合分布函数。

引入 kendall 相关系数 τ 来衡量风光 n 个随机变量之间的相关性。

$$\tau = \frac{2}{n(n-1)} \sum_{1 \leq i < j \leq n} \text{sign}(u_i - u_j)(w_i - w_j) \quad (7)$$

式中: u_i, u_j, w_i, w_j 分别为 i, j 场景的风速和光照强度大小。

基于风光最优离散化边缘概率分布 u 和 w , 采用 Frank-Copula 函数建立风光随机变量联合分布关系。

$$C^{\text{Fr}}(u, w; \lambda) = -\frac{1}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{(e^{-\lambda u} - 1)(e^{-\lambda w} - 1)}{e^{-\lambda} - 1} \right) \quad (8)$$

式中: C^{Fr} 为风光随机变量联合分布函数; u, w 分别为边缘概率分布; λ 为秩相关系数, $\lambda \in (-\infty, +\infty)$ 且 $\lambda \neq 0$ 。

步骤 3:对风光随机变量联合分布函数进行采样,借助三次样条插值法^[26]求解相应时刻风光出力。

将全概率区间划分为 Z 个小区间, $z=1, 2, \dots, Z$ 。在第 z 区间 $[u_z, u_{z+1}]$ 、 $[w_z, w_{z+1}]$ 上边缘概率分布 u 和 w 为因变量, 累计概率 F_u, F_w 为自变量, 3 次样条插值法中三次样条多项式如式(9)所示。

$$\begin{cases} x = u^{-1} = a_{1z}F_u^3 + b_{1z}F_u^2 + c_{1z}F_u + d_{1z} \\ y = w^{-1} = a_{2z}F_w^3 + b_{2z}F_w^2 + c_{2z}F_w + d_{2z} \end{cases} \quad (9)$$

式中: $a_{1z}, b_{1z}, c_{1z}, d_{1z}, a_{2z}, b_{2z}, c_{2z}, d_{2z}$ 为多项式系数。

对于任意的采样累计概率 F_u, F_w , 一定落在某一区间 $[u_z, u_{z+1}]$ 、 $[w_z, w_{z+1}]$ 内, 通过将累计概率代入式(9)计算, 即可求出风速和光伏的大小 x 和 y 。

步骤 4:通过后向场景缩减方法对采样场景进行场景削减, 并得到各场景生成的概率。

通过概率分布特征, 可以实现随机模拟抽样。得到大量的基础场景具有相似度高的缺点, 采用后向场景缩减方法。

(1) 设定目标场景个数为 6, 同时设定每个初始场景对应概率相等。

(2) 基础场景中的两两样本计算场景距离, 在第 i 次迭代中, 以风速为例判断目标函数值 L 是否最小, 进行场景集削减。

$$L = \sum_{i \in N} p_i \times \sqrt{\sum_{t=0}^{24} (u_{i,t} - u_{j,t})^2} \quad j \notin J \quad (10)$$

$$p_j'' = p_j + \sum_{i \in J} p_i \quad (11)$$

式中: $u_{i,t}, u_{j,t}$ 分别为 t 时刻 i, j 场景的风速; N 为初始总场景数; J 为已删减的场景集; p_i, p_j 为分别为 i, j 场景的概率; p_j'' 为保留场景的概率。

(3) 删除的场景汇入场景集 J , 然后继续进行迭代, 重复上述步骤直至达到目标函数个数。

1.3 拟合优度检验

生成联合函数分布观测样本与经验真实分布样本之间的拟合度需要使用标准的方法进行衡量, 文中选取贝叶斯信息准则法 (Bayesian information criterion, BIC) 来衡量模型的拟合优度, 由偏差和参数个数导致的不确定性两个部分组成, 考虑了样本数量与模型参数个数, 可有效防止因精度过高而导致的计算量过大的问题, 如式(12)和式(13)所示。

$$I_{\text{BIC}} = \ln I_{\text{MSE}} + q \ln l \quad (12)$$

$$I_{\text{MSE}} = \frac{1}{l} \sum_{h=1}^l (p'_{0h} - p'_h)^2 \quad (13)$$

式中: I_{BIC} 为贝叶斯值, 越小说明拟合优度更高; l 为样本数量; q 为模型参数个数; I_{MSE} 为均方误差; p'_{0h}, p'_h 分别为第 h 个样本的经验概率和理论概率。

2 微能源网双层优化模型

2.1 典型微能源网框架模型

微电网是指由分布式电源、储能装置、能量转换装置和负荷等组成的小型发配电系统, 微电网常和热电联供等技术结合起来, 组成多种能源综合利用的微能源网, 实现多种能源的协同运行。

文中以电、气、热为负荷需求对象, 典型微能源网由能源产生部分、能源转换及存储部分、能源需求部分组成, 物理框架如图 2 所示。

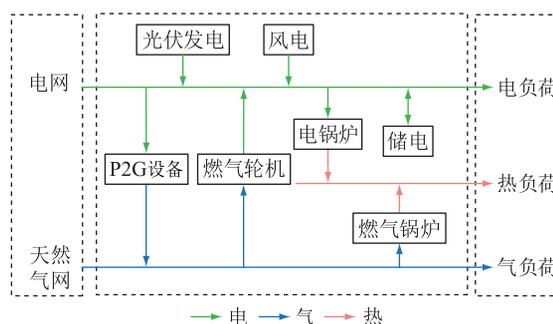


图 2 微能源网物理框架

Fig.2 Physical framework of micro-energy network

由图 2 可知, 能源产生部分由电网主网、天然气网、风电站 (wind turbine, WT) 和光伏电站 (photovoltaic, PV) 组成, 能源转换及存储部分由电转气 (power to gas, P2G) 设备、燃气轮机 (gas turbine, GT)、燃气锅炉 (gas boiler, GB)、电锅炉 (electric boiler, EB)、储电装置 (electrical storage, ES) 组成。

2.2 双层优化模型建立

为充分考虑微能源网系统优化中市场计划的经济因素, 文中提出了将微能源网配置与运行相结

合的双层优化模型,并在下层模型中加入市场计划惩罚目标以实现经济最优目标。

2.2.1 上层目标函数

上层以年化总成本最小为目标,包括投资成本、维护成本和运行成本,控制变量为各设备台数。目标函数如式(14)所示。

$$\min F = F_{in} + F_m + F_{op} \quad (14)$$

$$\begin{cases} F_{in} = \frac{m(1+m)^{y'}}{(1+m)^{y'} - 1} \sum_{n \in \Omega} b_n f_n \\ F_m = \varepsilon \sum_{n \in \Omega} b_n f_n \end{cases} \quad (15)$$

式中: F 为年化总成本; F_{in} 为设备年化投资成本; Ω 为风电站、光伏电站、P2G设备、燃气轮机、燃气锅炉、电锅炉、储电装置的集合; m 为贴现率,取8%; y' 为设备使用年限; b_n 和 f_n 分别为第 n 种设备的设备台数和单台设备的投资成本; F_{op} 为年化运行成本,与下层模型 C_{op} 相等; F_m 为设备年化维护成本; ε 为设备维护成本系数。

2.2.2 下层目标函数

下层以年化运行成本、市场计划惩罚、弃能惩罚成本、消纳激励成本之和最小为目标,控制变量为各设备出力,目标函数如式(16)所示。

$$\min C = C_{op} + C'_{penalty} + C_{penalty} + C_{encourage} \quad (16)$$

式中: C_{op} 、 $C'_{penalty}$ 、 $C_{penalty}$ 、 $C_{encourage}$ 分别为年化运行成本、市场计划惩罚、弃能惩罚成本和消纳激励成本。

(1) 年化运行成本。年化运行成本包括设备运行成本、购气成本与电网交互成本,如式(17)所示。

$$C_{op} = 365 \sum_{s=1}^S p_s \sum_{t=1}^{24} (U_{\psi,t} C_{\psi} + c_{g,t} P_{g,t} + c_{e,t}^{in} P_{e,t}^{in} - c_{e,t}^{out} P_{e,t}^{out}) \quad (17)$$

式中: $U_{\psi,t}$ 、 C_{ψ} 分别为 ψ 设备 t 时刻的运行功率与单位功率运行费用; $c_{g,t}$ 、 $P_{g,t}$ 分别为 t 时刻购买天然气单价和天然气量; $c_{e,t}^{in}$ 、 $c_{e,t}^{out}$ 分别为 t 时刻购买电、售电单价; $P_{e,t}^{in}$ 、 $P_{e,t}^{out}$ 分别为 t 时刻购买电量和上网电量; S 为场景个数; p_s 为第 s 个场景的生成概率。

(2) 市场计划惩罚。计划购电、购气量提前上报,只有在实际能源需求与计划误差较小时,电力、天然气市场才会处于稳定平衡状态,倘若购电量大于或小于实际需求超过一定比例,不论是对电力市场平稳运行还是对能源需求侧来说,都存在不利因素,所以文中制定以下惩罚以激励计划购电量、购气量减小误差。

$$C'_{penalty} = 365 \sum_{s=1}^S p_s \sum_{t=1}^{24} \left(\sum c'_{e,penalty} P_{e,t}^{in} + c'_{g,penalty} P_{g,t}^{in} \right) \quad (18)$$

$$1 - \frac{\sum_{t=1}^{24} |P_{e,t}^{in} - P_{e,t}^{out}|}{E_e} \geq \sigma_e \quad (19)$$

$$1 - \frac{\sum_{t=1}^{24} |P_{g,t}^{in}|}{V_g} \geq \sigma_g \quad (20)$$

式中: $C'_{penalty}$ 为计划惩罚; $c'_{e,penalty}$ 、 $c'_{g,penalty}$ 分别为 t 时刻计划购电、购气不合理的惩罚因子; $P_{e,t}^{in}$ 、 $P_{g,t}^{in}$ 分别为 t 时刻购电、气量; E_e 、 V_g 分别为系统当日实际需要的电能和气能; σ_e 为电力市场能承受计划用电与实际用电最大相对误差; σ_g 为天然气市场能承受计划用气与实际用气最大相对误差。

(3) 弃能惩罚成本。

$$C_{penalty} = 365 \sum_{s=1}^S p_s \sum_{t=1}^{24} [c_{penalty} (\Delta P_{W,t} + \Delta P_{P,t}) + \sum (c_{\sigma,penalty} \Delta P_{\sigma,t})] \quad (21)$$

式中: $c_{penalty}$ 为弃风弃光的惩罚成本系数; $\Delta P_{W,t}$ 、 $\Delta P_{P,t}$ 分别为 t 时刻弃风量和弃光量。 $c_{\sigma,penalty}$ 、 $\Delta P_{\sigma,t}$ 分别为第 σ 种能源弃能惩罚成本系数和 t 时刻的弃能量。

(4) 消纳激励成本。

$$C_{encourage} = -365 \sum_{s=1}^S p_s \sum_{t=1}^{24} [c_{encourage} (P_{W,t} + P_{P,t})] \quad (22)$$

式中: $c_{encourage}$ 为风光消纳激励系数; $P_{W,t}$ 、 $P_{P,t}$ 分别为风、光在 t 时刻的消纳量。

2.2.3 约束条件

(1) 能量平衡约束。

$$L_{e,t} = P_{W,t} + P_{P,t} + P_{e,t}^{in} - P_{e,t}^{out} + P_{e,t}^{GT} - P_{e,t}^{P2G} - P_{e,t}^{EB} + P_{e,t}^{ES,release} - P_{e,t}^{ES,store} \quad (23)$$

$$L_{g,t} = P_{g,t}^{in} + P_{g,t}^{P2G} - P_{g,t}^{GB} - P_{g,t}^{GT} \quad (24)$$

$$L_{h,t} = P_{h,t}^{EB} + P_{h,t}^{GB} \quad (25)$$

式中: $L_{e,t}$ 、 $L_{g,t}$ 、 $L_{h,t}$ 分别为 t 时刻系统的电、气、热负荷需求; $P_{e,t}^{in}$ 、 $P_{e,t}^{out}$ 分别为 t 时刻电转气设备、电锅炉用电量; $P_{g,t}^{GB}$ 、 $P_{g,t}^{GT}$ 分别为 t 时刻燃气锅炉、燃气轮机用气量; $P_{e,t}^{ES,release}$ 、 $P_{e,t}^{ES,store}$ 分别为 t 时刻储电量与放电量; $P_{e,t}^{GT}$ 、 $P_{g,t}^{P2G}$ 分别为 t 时刻燃气轮机、电转气设备出力大小; $P_{h,t}^{EB}$ 、 $P_{h,t}^{GB}$ 分别为 t 时刻电锅炉、燃气锅炉出力大小。

(2) 设备出力约束。

$$\begin{cases} P_{\psi,min} \leq P_{\psi,t} \leq P_{\psi,max} \\ S_{\psi,min} \leq S_{\psi} \leq S_{\psi,max} \end{cases} \quad (26)$$

式中: $P_{\psi,max}$ 、 $P_{\psi,min}$ 分别为第 ψ 种设备出力上、下限; $S_{\psi,max}$ 、 $S_{\psi,min}$ 分别为第 ψ 种设备容量最大值、最小值;

$P_{\psi,t}$ 为 t 时刻第 ψ 设备的出力大小; S_{ψ} 为 ψ 设备的容量。

(3) 爬坡约束。

$$-\gamma_{\psi,down} \leq P_{\psi,t} - P_{\psi,t-1} \leq \gamma_{\psi,up} \quad (27)$$

式中: $\gamma_{\psi,down}$ 、 $\gamma_{\psi,up}$ 分别为设备的向下爬坡与向上爬坡约束,主要为燃气轮机和燃气锅炉。

3 算例分析

文中采用某地实际历史数据作为基础数据分析,验证所提基于考虑风光随机变量不确定性场景生成的微能源网双层优化模型的有效性。选择风力发电机的装机容量为 200 kW,光伏发电的装机容量 100 kW,切入风速为 4 m/s,切出风速为 25 m/s,额定风速为 11.4 m/s,天然气价格为 2.28 元/m³,单位热值价格为 0.23 元/(kW·h)。

双层模型的上层优化配置结果为下层优化模型的基础,下层优化结果反馈给上层,上层基于下层反馈结果得出最优配置方案,下层基于上层优化配置方案解决微能源网优化运行问题。若不满足迭代终止条件,则通过遗传算法重新选择、交叉、变异,产生新种群。求解流程如图 3 所示。

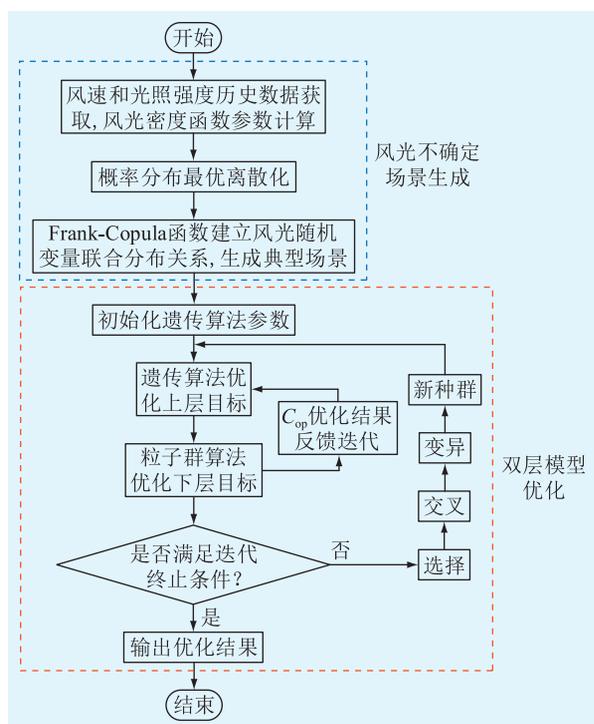


图 3 求解计及风光不确定性的双层优化模型流程
Fig.3 Flow chart of solving a bilevel optimization model taking into account wind power and photovoltaic power uncertainty

3.1 风光出力典型场景生成

3.1.1 场景生成分析

采用考虑风光不确定性的场景生成方法将边

缘概率密度函数最优离散化,以 07:00—08:00 时段为例进行分析,最优离散化概率分布如图 4 所示,离散点分别为 (0.06, 1.14), (0.11, 1.70), (0.16, 1.85), (0.23, 1.89), (0.29, 1.77), (0.34, 1.50), (0.42, 1.50), (0.42, 1.06), (0.51, 0.68), (0.62, 0.31)。

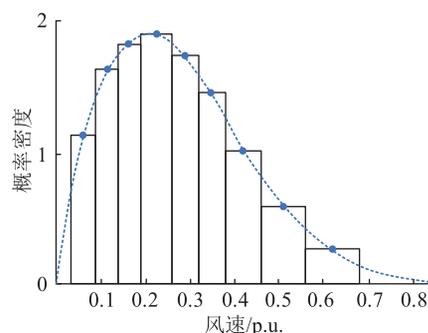


图 4 风速最优离散化结果

Fig.4 Optimal discretization results of wind speed

由图 4 可见,离散化划分方法最小化 Wasserstein 距离指标,以连续概率密度曲线以外的多余面积来抵消连续概率密度曲线以内的缺额面积,以离散化分布来模拟连续概率密度,可以增强系统对极限数据的处理能力。

应用最优离散化边缘概率分布分别对风速和光照强度进行 1 000 次采样,通过风光不确定性场景生成及场景削减,最终得到 6 个典型日风光出力场景,括号中为场景概率,光伏和风速出力以标幺值显示,具体风光出力场景曲线如图 5 和图 6 所示。

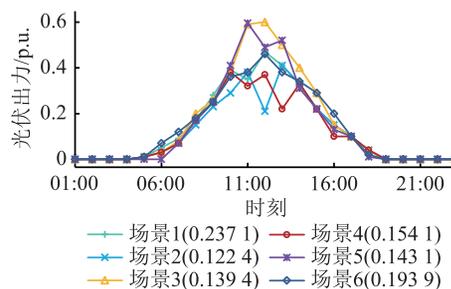


图 5 光伏出力场景生成结果

Fig.5 Photovoltaic output scene generation results

由图 5 和图 6 不同场景的曲线特点可知,单独对风电出力或光伏出力而言,6 种场景在 24 h 内的整体变化发展趋势大致相同,而风光出力在波动性和季节性上有明显的差异,光伏出力和风电出力的在对应时刻的变化趋势具有一定的相关性。场景 3 和场景 5 光伏出力和风电出力都呈现较高的水平,具有夏季的特征;而场景 1 和场景 6 的场景生成概率较大,且光伏出力处于平均水平,具有过渡季的特征;场景 2 和场景 4 的光伏出力较小,具有冬季的特征。

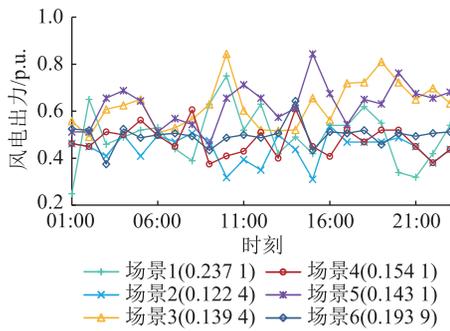


图6 风电出力场景生成结果

Fig.6 Wind power output scene generation results

特征。由此可见,采用考虑相关性的风光联合分布的场景生成可以较好地表征风光出力场景,可以直观地体现出两者的不确定性和相关性,与实际联系密切,较好地拟合了风电出力与光伏出力结果,对微能源网优化运行十分有利。

3.1.2 拟合检验结果分析

除了 Frank-Copula 函数可以建立风光随机变量联合分布关系外, Gumbel-Copula 函数和 Clayton-Copula 函数也是建立随机变量联合分布关系的重要工具。为了选择出更合适的 Copula 函数进行风光联合出力拟合,分别采用 3 种不同的 Copula 函数建立风速和光照强度联合概率分布函数,在利用多种 Copula 函数对风光变量联合分布拟合后,采用拟合优度检验指标 BIC 值进行优选,以确定最优 Copula 函数。Frank-Copula、Gumbel-Copula 和 Clayton-Copula 的 BIC 值分别为 -210.46、-198.57、-227.32。 I_{BIC} 值越小,说明拟合优度更高, Frank-Copula 函数的 BIC 指标值最小,其拟合效果最优,因此选择 Frank-Copula 函数拟合是符合风光联合概率分布特点的。

3.2 微能源网双层优化结果分析

3.2.1 典型日电气热功率平衡分析

针对图 2 所示的微能源网,运用第 2 章提出的微能源网双层优化模型对微能源网进行经济优化,夏季典型日电、气、热功率平衡曲线如图 7—图 9 所示。

由图 7—图 9 可知,相比于气负荷和热负荷,夏季对于电负荷的需求较大,且峰谷差较大。电负荷优先由风电站和光伏电站出力供给,考虑风光消纳的相关因素作用,以最大化达到风光消纳的要求。当电功率需求较小,而风光出力较大时,蓄电池可以起到调节的作用,虽然风光发电量已足以供给电负荷需求,但燃气轮机仍可继续转换,满足其他能量的平衡需求;当电功率需求大于风光出力时,通过市场计划惩罚的约束作用,向电网购电供给电负荷缺额。

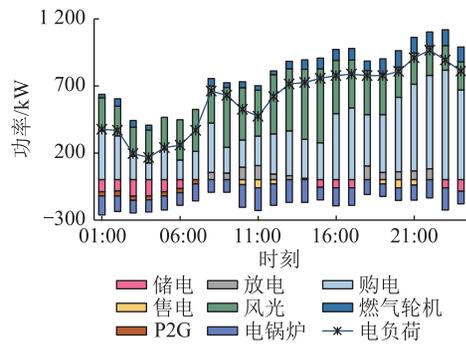


图7 电功率平衡曲线

Fig.7 Electric power balance curve

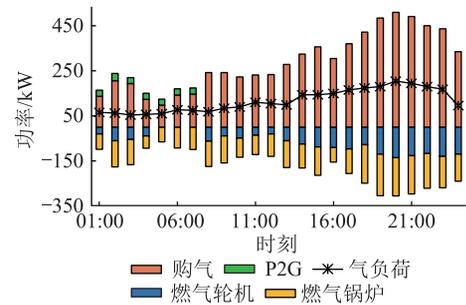


图8 气功率平衡曲线

Fig.8 Natural gas power balance curve

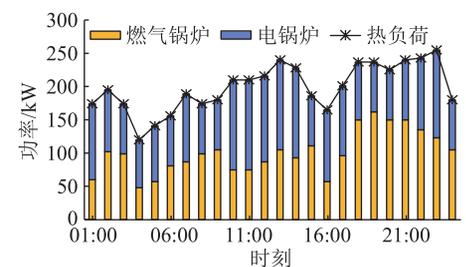


图9 热功率平衡曲线

Fig.9 Heat power balance curve

在 00:00—08:00 时段中,风电站和光伏电站的出力较小,电价较低,电负荷的需求量较小,此时储电装置储电备用,P2G 设备转换多余电能以供气负荷缺额;在 09:00—18:00 时段中,风电站和光伏电站的出力较大,且电负荷需求量较大,但电价较高,通过市场计划惩罚目标的约束作用向气网购气,燃气轮机持续转换出力,系统将多余电能向电网售卖;在 19:00—24:00 时段中,风电站和光伏电站的出力较小,电价较高,燃气轮机平稳运行,系统将富裕的电能以高价向电网售卖,提高整体经济性能。

3.2.2 微能源网系统优化配置分析

为了说明微能源网系统优化配置结果的有效性,选取方案一为运用随机变量连续概率分布进行不确定性场景构建的双层优化配置方法,方案二为

采用基于文中不确定性场景构建方法,但不考虑市场计划经济因素的双层优化配置方法,方案三为采用基于文中不确定性场景构建方法的考虑市场计划经济因素双层协同配置方法。3种方案优化配置结果如表1所示。

表1 优化配置结果

Table 1 Optimized configuration results

设备	配置台数		
	方案一	方案二	方案三
WT	2	2	2
PV	2	2	1
GT	3	2	2
P2G	2	1	4
GB	1	2	1
EB	2	1	2
ES	3	2	2

通过3种方案的优化配置结果,可以计算出各方案年化总成本分别为789.74万元、784.66万元和729.33万元。与运用特定随机变量连续概率分布的风光不确定性场景构建双层优化配置方案一相比,文中优化配置方案三年化总成本降低了8.28%,与不考虑市场计划经济因素的优化配置方案二相比,文中优化配置方案三年化总成本降低了7.59%,极大提升了微能源网系统运行的经济性。表2为各类年化成本数据。

表2 各类年化成本对比

Table 2 Optimized configuration results 万元

方案	投资成本	维护成本	运行成本	
			购气成本	电网交互成本
方案一	167.21	160.62	235.67	113.04
方案二	148.45	150.68	252.43	122.18
方案三	155.13	159.77	239.54	95.26

由表2可知,文中提出考虑市场计划的微能源网双层优化方案是3种方案中经济最优的,其中方案三较方案一投资成本降低7.22%,维护成本降低5.29%,购气成本几乎相等,电网交互成本降低15.73%;方案三较方案二购气成本降低5.11%,电网交互成本降低22.03%,投资成本增加4.5%,维护成本增加6.03%,这是由于方案二优化配置时未考虑市场计划经济因素,使其配置过于理想,但这些成本的增加部分只占年化总成本的很小比例,对微能源网系统整体经济性影响较小,由年化成本中购气成本、电网交互成本分析结果可知方案三的风光消纳能力也得到了显著提高。

综上,相比于传统的风光特定的不确定性连续

概率分布模型的直接使用,考虑随机变量最优离散化和随机变量间相关性得到的风光不确定性场景,可以使得风光预测更加准确,对极限信息处理能力增强,进而弥补风光出力过于理想化的问题。因此,考虑市场计划经济因素的微能源网双层优化模型可以提升系统经济性。

4 结论

文中基于风光边缘概率分布最优离散化与Frank-Copula函数拟合理论得到了风光出力典型场景,在此基础上提出微能源网配置与运行紧密耦合双层优化配置方法,通过对实际微能源网优化配置分析,得出以下结论:

(1)文中提出的风光出力典型场景生成方法可以使风电、光伏出力预测曲线更为合理,同时改善了风速、光照强度特定边缘概率分布带来的优化配置结果过于理想化问题,有利于微能源网经济优化运行。

(2)考虑市场计划经济因素所建立的微能源网双层优化模型可以有效降低微能源网年化总成本,降低因过量购电、购气对市场及系统本身所带来的经济损失,对系统整体经济性能提高起到至关重要的作用。

致谢

本文得到国网江苏省电力有限公司苏州供电分公司科技项目“电网友好型港口岸电能量路由器低碳供能与主动支撑控制技术”(SGJSSZ00KJJS2202-547)、江苏省研究生科研与实践创新计划项目(1812000024991)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 闫梦阳,李华强,王俊翔,等. 计及综合需求响应不确定性的园区综合能源系统优化运行模型[J]. 电力系统保护与控制,2022,50(2):163-175.
- YAN Mengyang, LI Huaqiang, WANG Junxiang, et al. Optimal operation model of a park integrated energy system considering uncertainty of integrated demand response [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 163-175.
- [2] 熊宇峰,陈来军,郑天文,等. 考虑电热气耦合特性的低碳园区综合能源系统氢储能优化配置[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9): 31-38.
- XIONG Yufeng, CHEN Laijun, ZHENG Tianwen, et al. Optimal configuration of hydrogen energy storage in low-carbon park integrated energy system considering electricity-heat-gas coupling characteristics [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9): 31-38.
- [3] 刘学智,严正,解大,等. 电热综合能源网的强耦合路径研究与展望[J]. 电力系统自动化,2022,46(13):204-215.

- LIU Xuezhi, YAN Zheng, XIE Da, et al. Research and prospect of strong coupling pathway for electricity-heat integrated energy network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(13):204-215.
- [4] 段可, 王维, 曹伟杰, 等. 考虑气热能延迟特性的综合能源系统内能流自分配策略[J]. 电气工程学报, 2022, 17(3):76-84.
- DUAN Ke, WANG Wei, CAO Weijie, et al. Self-allocation strategy of internal energy flow in comprehensive energy system considering gas-heat delay characteristics[J]. Journal of Electrical Engineering, 2022, 17(3):76-84.
- [5] ZHU M T, XU C S, DONG S F, et al. An integrated multi-energy flow calculation method for electricity-gas-thermal integrated energy systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1):1-12.
- [6] 郑重, 苗世洪, 李超, 等. 面向微型能源互联网接入的交直流配电网协同优化调度策略[J]. 电工技术学报, 2022, 37(1):192-207.
- ZHENG Zhong, MIAO Shihong, LI Chao, et al. Coordinated optimal dispatching strategy of AC/DC distribution network for the integration of micro energy Internet[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(1):192-207.
- [7] 冯奕, 应展烽, 颜建虎. 考虑碳排放成本的多能互补微能源网储能装置优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8):92-99.
- FENG Yi, YING Zhanfeng, YAN Jianhu. Optimized operation of energy storage in a multi-energy complementary micro-energy network considering carbon emission cost[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8):92-99.
- [8] 任冲, 柯贤波, 王吉利, 等. 高比例新能源电网新能源功率优化分配方法[J]. 电力工程技术, 2022, 41(3):110-117.
- REN Chong, KE Xianbo, WANG Jili, et al. New energy power optimal distribution method for high proportion new energy power grid[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3):110-117.
- [9] 彭道刚, 张孟然, 沈丛奇, 等. 考虑不同控制策略下的多能互补能源互联网优化调度[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(1):17-28.
- PENG Daogang, ZHANG Mengran, SHEN Congqi, et al. Optimal scheduling of multi-energy complementary energy Internet considering different control strategies[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1):17-28.
- [10] 刘晓峰, 陈雪颖, 柏颖, 等. 计及多重影响因素的居民需求响应行为分析[J]. 电力工程技术, 2022, 41(6):116-124.
- LIU Xiaofeng, CHEN Xueying, BAI Ying, et al. Analysis of residents' demand response behavior considering multiple influencing factors[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(6):116-124.
- [11] WANG W, HUANG S H, ZHANG G M, et al. Optimal operation of an integrated electricity-heat energy system considering flexible resources dispatch for renewable integration[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(4):699-710.
- [12] 杨海晶, 饶宇飞, 李朝晖, 等. 基于随机模拟和 EMD 的含风光电力系统 AGC 调频储能定容[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(5):58-65, 99.
- YANG Haijing, RAO Yufei, LI Zhaohui, et al. Energy storage capacity determination for AGC frequency modulation in the power system with wind and photovoltaic power based on the stochastic simulation and EMD[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(5):58-65, 99.
- [13] 宋云超, 王丹, 何伟, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3):20-31.
- SONG Yunchao, WANG Dan, HE Wei, et al. Research on multi-objective stochastic planning of a micro energy grid with multiple clean energy sources based on scenario construction technology[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3):20-31.
- [14] SANJARI M J, GOOI H B, NAIR N K C. Power generation forecast of hybrid PV-wind system[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2020, 11(2):703-712.
- [15] 郑能, 丁晓群, 管志成, 等. 基于场景法的配电网有功-无功协调优化[J]. 电网技术, 2019, 43(5):1640-1651.
- ZHENG Neng, DING Xiaoqun, GUAN Zhicheng, et al. Coordinated optimization of active power and reactive power in distribution network based on scenario method[J]. Power System Technology, 2019, 43(5):1640-1651.
- [16] 代贤忠, 韩新阳, 董益华, 等. 能源互联网多源多层次协调优化方法研究[J]. 电力工程技术, 2019, 38(2):1-9.
- DAI Xianzhong, HAN Xinyang, DONG Yihua, et al. Multi-source and multi-level coordination optimization method of energy Internet[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(2):1-9.
- [17] 宋宇, 李涵. 基于核密度估计和 Copula 函数的风、光出力场景生成[J]. 电气技术, 2022, 23(1):56-63.
- SONG Yu, LI Han. Typical scene generation of wind and photovoltaic power output based on kernel density estimation and Copula function[J]. Electrical Engineering, 2022, 23(1):56-63.
- [18] 武志宏, 杨永标, 李熙, 等. 综合能源系统中多能源协同优化方法研究[J]. 电气传动, 2022, 52(2):67-73.
- WU Zhihong, YANG Yongbiao, LI Xi, et al. Research on multi-energy collaborative optimization method in integrated energy system[J]. Electric Drive, 2022, 52(2):67-73.
- [19] 矫舒美, 乔学博, 李勇, 等. 计及综合能源系统全寿命周期碳排放和碳交易的电转气和光伏联合优化配置[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(9):156-163.
- JIAO Shumei, QIAO Xuebo, LI Yong, et al. Joint optimal configuration of P2G equipment and PV considering life-cycle carbon emissions and carbon trading of IES[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(9):156-163.
- [20] HUANG W J, ZHANG N, YANG J W, et al. Optimal configuration planning of multi-energy systems considering distributed

- renewable energy[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2019, 10(2):1452-1464.
- [21] 王博,詹红霞,张勇,等. 考虑风电不确定性的风蓄火联合优化经济调度研究[J]. 电力工程技术,2022,41(1):93-100.
- WANG Bo, ZHAN Hongxia, ZHANG Yong, et al. Combined optimal economic dispatch of wind-storage-fire considering wind power uncertainty[J]. Electric Power Engineering Technology,2022,41(1):93-100.
- [22] 白凯峰,顾洁,彭虹桥,等. 融合风光出力场景生成的多能互补微网系统优化配置[J]. 电力系统自动化,2018,42(15):133-141.
- BAI Kaifeng, GU Jie, PENG Hongqiao, et al. Optimal allocation for multi-energy complementary microgrid based on scenario generation of wind power and photovoltaic output[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(15):133-141.
- [23] 汪洋子,陈茜. 计及冷、热、电联产的气电互联网络最优调度[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(3):168-175.
- WANG Yangzi, CHEN Qian. Optimal dispatch for the integrated electrical and natural gas network with combined cooling, heat and power plant[J]. Power System Protection and Control,2019,47(3):168-175.
- [24] 崔杨,闫石,仲伟之,等. 含电转气的区域综合能源系统热电优化调度[J]. 电网技术,2020,44(11):4254-4264.
- CUI Yang, YAN Shi, ZHONG Wuzhi, et al. Optimal thermoelectric dispatching of regional integrated energy system with power-to-gas[J]. Power System Technology,2020,44(11):4254-4264.
- [25] 王群,董文略,杨莉. 基于 Wasserstein 距离和改进 K-medoids 聚类的风电/光伏经典场景集生成算法[J]. 中国电机工程学报,2015,35(11):2654-2661.
- WANG Qun, DONG Wenlue, YANG Li. A wind power/photovoltaic typical scenario set generation algorithm based on Wasserstein distance metric and revised K-medoids cluster[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(11):2654-2661.
- [26] 林顺富,刘持涛,李东东,等. 考虑电能交互的冷热电区域多微网系统双层多场景协同优化配置[J]. 中国电机工程学报,2020,40(5):1409-1421.
- LIN Shunfu, LIU Chitao, LI Dongdong, et al. Bi-level multiple scenarios collaborative optimization configuration of CCHP regional multi-microgrid system considering power interaction among microgrids[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(5):1409-1421.

作者简介:



王维

王维(1988),男,博士,副教授,研究方向为综合能源系统优化运行、无线电能传输技术等(E-mail:wangw_seu@163.com);

贾丽(1997),女,硕士在读,研究方向为综合能源系统优化运行;

杨逸凡(1998),男,硕士在读,研究方向为综合能源系统储能优化运行。

Two-layer optimization configuration method of micro-energy grid considering market plan

WANG Wei^{1,2}, JIA Li^{1,2}, YANG Yifan^{1,2}, SUN Mingyu^{1,2}, WANG Qi^{1,2}

(1. School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210046, China;

2. Jiangsu Province Comprehensive Energy Equipment and Integration International Joint Laboratory, Nanjing 210046, China)

Abstract: Due to its multi-energy coordinated operation and absorption of clean energy for power generation, the micro-energy network has the broad application value in the context of 'double carbon' goal and new power system. However, with the increasing scale of wind power and photovoltaic power access, the uncertainty of wind power and photovoltaic power output would inevitably affect the stability of the operation of the micro-energy network. Therefore, the uncertainty and correlation of wind power and photovoltaic power generation output are fully considered in this paper, and a two-layer optimal allocation method of micro-energy network considering market planning is proposed. Firstly, based on Wasserstein distance index, the probability distribution is optimally discretized, and a joint distribution function is established using Frank-Copula function to generate a typical daily output curve. Then, considering the planned economy of electricity market and natural gas market, a two-layer optimal configuration model of micro-energy network is established to realize the close coupling between equipment configuration and system operation. Finally, based on the measured data of a micro-energy network in a certain area, a typical wind and solar output curve is generated for optimization calculation. The results show that the two-layer optimal configuration method can reduce the annual cost of the micro-energy network and increase the inclusiveness of the wind and solar limit information, thus improving the economy and stability of the system operation.

Keywords: micro-energy grid; Wasserstein distance; correlation fit; scene generation; marketing plan; two-layer optimized configuration

(编辑 李栋)