

朱志芳¹ 林紫菡¹ 陈丽萍¹ 董红¹ 高艳娜¹ 林凌雪²

基于自然资源评价的独立微网电源优化配置

摘要

为了保证独立微网运行的经济性和可靠性,在进行独立微网规划时,首先要确认电源的优化配置.微网内部负荷水平、所在地区地理和气候等自然资源条件会影响独立微网电源类型和容量的选择.本文研究不同地区“风/光/水/储”的综合自然资源特性,考虑独立微网供电可靠性和发电环保性,建立以微网电源最小综合发电成本为目标,计及电力电量平衡等约束条件的优化模型,采用线性化算法求解.针对风机、光伏和水电出力的不确定性,研究生成对抗网络 GAN,对风光水出力进行多场景模拟,采用 K-Medoids 聚类算法的改进方法,实现运行场景的削减,提高了计算效率.为了分析风光水资源特性,构建了风光水资源指标评价体系,基于模糊评价方法,获取我国大陆地区 31 个省级行政区的风光水资源水平.选取 5 个代表地区,验证所提方法的可行性和合理性,分析地区独立微网电源配置方案和电源配置规律,为独立微网电源规划提供参考.

关键词

独立微网;自然资源;风光水;电源优化;场景模拟

中图分类号 TM715

文献标志码 A

收稿日期 2024-01-03

资助项目 南方电网公司项目(030100QQ0022 0008);直流输电技术国家重点实验室开放基金(SKLHVDC-2022-KF-01)

作者简介

朱志芳,男,高级工程师,研究方向为电力系统运行分析与规划.zhuzhifang@163.com

林凌雪(通信作者),女,博士,讲师,研究方向为电力系统运行分析与规划.linlx@scut.edu.cn

1 广东电网有限责任公司 广州供电局,广州,510510

2 华南理工大学 电力学院,广州,510641

0 引言

为保证分布式电源发电的可控性,微电网技术应运而生.微电网可以在并网和离网两种模式下运行^[1].在进行独立微网规划时,必须要优化微网的电源配置,以保证离网状态下独立微网运行的经济性和可靠性.微网内部负荷水平、所在地区地理和气候等自然资源条件会影响独立微网电源类型和容量的选择.因此,通过全面分析评价地区资源情况,并以此进行独立微网的电源规划,能在提高微网清洁能源利用率的基础上,有效指导独立微网建设.

按电源分类,独立微电网系统可分为风/光/储型、风/光/柴/储型、风/光/水/储型和风/光/生物质能/储型等^[2].微网中的风力发电机、光伏阵列和小径流水电等可再生能源属于不可调度电源,柴油发电机、生物质能发电机和储能装置等属于可调度电源.独立微网应该优先采用风光水等自然资源的发电形式,并配置一定可调度电源作为备用和补充.

关于独立微电网电源规划,目前主要是建立不同的优化模型,并通过优化算法求解获取.通常,优化模型会确定最优经济目标^[3]、最高供电可靠性^[4]、最低弃风弃光量^[5]等优化目标.文献[6]根据不同新能源补贴政策,建立以总成本最低为目标的优化模型,研究电源容量配置方法.也有文献同时计及多个因素,建立多目标问题^[7].对于优化模型的运行约束,可以分为考虑可再生能源的出力随机性约束^[8-9]、需求侧负荷响应程度约束^[10]、负荷增长约束^[11]等.文献[12]研究了可中断负荷和可平移负荷等不同负荷响应程度下电源配置的差异;文献[13]研究了各种优化模型对独立微电网电源容量的影响.但少有优化模型会计及风光水资源条件对电源选择的影响.

微网所处地区的自然资源特性,需要通过建立科学的指标体系开展评价与分析.已有研究针对单种资源^[14],如风能资源、光伏资源和水电资源进行评价.文献[15]从运行层面建立评价体系,研究风电和光伏互补形式;文献[16]建立了以风电、水电资源的最大发电量为目标的多目标优化模型,以此提高可再生能源的利用率;文献[17]和文献[18]探讨了基于风光资源评价的独立微网电源配置方法.所采用的评价方法,包括模糊评价^[19]、灰色评价^[20]、人工神经网络评价^[21]等,例如文献[22]针对含风光资源的系统,采用灰色法进行可靠性评价.多数评价均基于指标体系的层次分析,并考虑各指标权重进行综

合评价, 如何保证评价标准的客观性是有待研究的问题。

为了使电源配置结果更适应微网各种运行状态, 许多研究探讨计及可再生能源随机性的微网运行场景构建方法。文献[23]采用概率密度函数, 建立微网典型日模型, 并生成随机组合运行场景; 文献[24]基于蒙特卡罗法, 生成电源出力随机模型和负荷概率模型。但如何保障概率抽样和随机模拟生成场景的代表性, 目前未见有相关讨论。

本文从自然资源条件评价的角度, 研究独立微网的电源规划问题。采用风/光/水/储型系统作为研究对象, 构建基于气象数据指标的风光水资源指标体系, 采用模糊评价进行自然资源特性分析; 通过运行场景模拟和聚类削减, 构建微网场景模型, 并建立电源配置的多目标优化模型。本文研究不同综合自然资源条件下独立微网的电源规划方案, 分析电源配置规律, 为独立微电网规划提供指导。

1 自然资源综合评价

为了研究独立微电网所处地区的自然资源特性, 提出风光水两级评价体系如图 1 所示。其中: 一级评价指标有 6 个, 即风电资源、光伏资源、水电资源、风光互补、光水互补和水风互补; 二级评价指标 19 个。

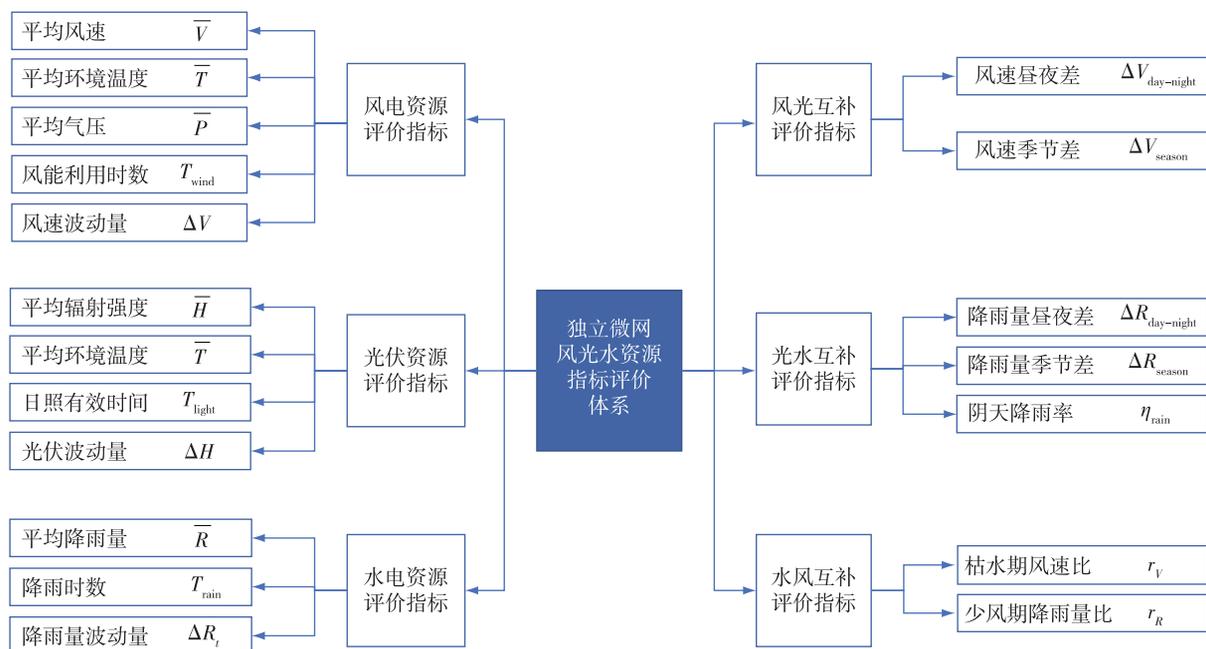


图 1 独立微网风光水资源指标评价体系

Fig. 1 Standalone microgrid wind/PV/water resources evaluation system

1.1 风电、光伏、水电资源指标

风电、光伏和水电的发电资源和电源配置与其能源出力、能源利用率、能源波动性 3 个方面有关。

1) 风电资源指标

风能大小与风速、环境温度和气压有关, 因此, 采用平均风速 \bar{V} 、平均环境温度 \bar{T} 和平均气压 \bar{P} 三个指标评价风能出力, 风能利用率采用 T_{wind} (有效利用时数) 评价, 风能波动性采用 ΔV 评价。

\bar{V} 、 \bar{T} 和 \bar{P} 分别为一年 (8 760 h) 风速、环境温度和气压的平均值:

$$\bar{V} = \frac{1}{8\ 760} \sum_{t=1}^{8\ 760} V_t, \quad (1)$$

$$\bar{T} = \frac{1}{8\ 760} \sum_{t=1}^{8\ 760} T_t, \quad (2)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{8\ 760} \sum_{t=1}^{8\ 760} P_t. \quad (3)$$

其中: V_t 、 T_t 、 P_t 分别表示每小时风速、环境温度和气压。

T_{wind} 为平均风速在切入和切出风速之间的小时数:

$$T_{\text{wind}} = \sum_{t=1}^{8\ 760} K_t, \quad K_t = \begin{cases} 1, & V_i \leq V_t \leq V_o; \\ 0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (4)$$

其中: V_i 、 V_o 分别为切入和切出风速。

风能波动性 ΔV 为各时段平均风速差值总和, 用以表征风速变化特性:

$$\Delta V = \sum_{t=2}^{8760} |V_t - V_{t-1}|. \quad (5)$$

2) 光伏资源指标

光伏强弱与光辐射强度、环境温度有关,因此,采用平均辐射强度 \bar{H} 、平均环境温度 \bar{T} 两个指标评价光伏强弱,光伏利用率采用 T_{light} 评价,光伏波动性采用 ΔH 评价。

\bar{H} 和 \bar{T} 分别为一年平均日辐射强度和平均环境温度, H_d 、 T_d 分别表示每天的日辐射强度、日平均环境温度:

$$\bar{H} = \frac{1}{365} \sum_{d=1}^{365} H_d, \quad (6)$$

$$\bar{T} = \frac{1}{365} \sum_{d=1}^{365} T_d. \quad (7)$$

光伏利用率 T_{light} 是日照有效时间之和, T_{light}^d 表示每天的日照有效时间:

$$T_{\text{light}} = \sum_{d=1}^{365} T_{\text{light}}^d. \quad (8)$$

光伏的波动性 ΔH 为一年平均日辐射强度差值总和,用以表征光辐射强度变化特性:

$$\Delta H = \sum_{d=2}^{365} |H_d - H_{d-1}|. \quad (9)$$

3) 水电资源指标

微网中大多为调节能力较差的径流式小水电,水能资源取决于所处地区的地形和降水量.因此,采用平均降雨量 \bar{R} 表征水能大小,水能利用率采用 T_{rain} 评价,水能波动性采用 ΔR 评价。

\bar{R} 为年平均降雨量, R_t 为每小时降雨量,即:

$$\bar{R} = \frac{1}{8760} \sum_{t=1}^{8760} R_t. \quad (10)$$

T_{rain} 为年总有效降雨总小时数, T_{rain}^d 为每天的有效降雨小时数,即:

$$T_{\text{rain}} = \sum_{d=1}^{365} T_{\text{rain}}^d. \quad (11)$$

ΔR 为各月降雨量差值总和,表征降雨量变化特性,即:

$$\Delta R = \sum_{i=2}^{12} |R_i - R_{i-1}|. \quad (12)$$

1.2 风电、光伏、水电互补指标

分别考虑微网内风光互补、光水互补、水风互补特性,建立反映各类发电资源之间相互影响的指标。

1) 风光互补指标

采用风速昼夜差 $\Delta V_{\text{day-night}}$ 和风速季节差 ΔV_{season} 评价风和光的互补特性:

$$\Delta V_{\text{day-night}} = \sum_{d=1}^{365} (V_{\text{night}} - V_{\text{day}}), \quad (13)$$

$$\Delta V_{\text{season}} = V_{\text{winter}} - V_{\text{summer}}. \quad (14)$$

其中: V_{night} 指当日 18:00 至次日 06:00 间的平均风速; V_{day} 为当日 06:00 至 18:00 间的平均风速;以北半球为例, V_{winter} 为当年 10 月至次年 4 月的平均风速, V_{summer} 为当年 4 月至 10 月的平均风速。

2) 光水互补指标

采用降雨量昼夜差 $\Delta R_{\text{day-night}}$ 、降雨量季节差 ΔR_{season} 和阴天降雨率 η_{rain} 评价光和水的互补特性:

$$\Delta R_{\text{day-night}} = \sum_{d=1}^{365} (R_{\text{night}}^d - R_{\text{day}}^d), \quad (15)$$

$$\Delta R_{\text{season}} = R_{\text{winter}} - R_{\text{summer}}, \quad (16)$$

$$\eta_{\text{rain}} = d_{\text{rain}} / (d_{\text{cloudy}} + d_{\text{rain}}). \quad (17)$$

其中: R_{night}^d 指当日 18:00 至次日 06:00 间的平均降雨量; R_{day}^d 为当日 06:00 至 18:00 间的平均降雨量;以北半球为例, R_{winter} 为当年 10 月至次年 4 月的平均降雨量, R_{summer} 为当年 4 月至 10 月的平均降雨量; d_{rain} 为年降雨总天数; d_{cloudy} 为年阴天总天数。

3) 水风互补指标

采用枯水期风速比 r_V 和少风期降雨量比 r_R 两个指标,评价水和风的互补特性:

$$r_V = \frac{V_m}{V_y}, \quad (18)$$

$$r_R = \frac{R_m}{R_y}. \quad (19)$$

其中: V_m 为枯水期平均风速; V_y 为年平均风速; R_m 为少风期平均降雨量; R_y 为年平均降雨量.枯水期指一年内连续降雨最少的 3 个月,少风期指一年内连续风速最小的 3 个月。

1.3 风光水资源评价方法

对于不同地区,气象数据各有特点,这就造成在自然资源评价时,难以形成清晰和明确的评价标准和评判阈值.而模糊评价方法能灵活有效应对这种情况,实现地区自然资源特性的客观评价。

通过各指标的测算,确定其隶属度向量,并建立模糊评价的矩阵;确定各指标评价的权重,基于线性变换,计算模糊评判矩阵,获得模糊评价;基于最大隶属度原则,确定各级指标的等级.模糊评价过程如图 2 所示。

进行模糊评价时,一般采用 5 个等级,能较为全面地覆盖评价对象特征的各层次表现.设 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4, v_5\}$, 其中, v_1, v_2, v_3, v_4, v_5 分别对应风光水资源

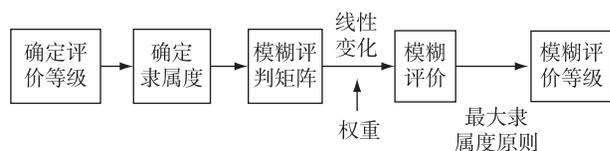


图2 指标体系模糊评价

Fig. 2 Flow chart of fuzzy evaluation

的差、较差、一般、较好、好5个评价等级. 基于风光水资源在一个地区的统计分布近似于高斯分布的特点, 故采用高斯函数构造风光资源的模糊隶属度函数, 如式(20)所示. 模糊评价的隶属度和分级如图3所示.

$$v_i(x) = e^{-\frac{(x-m_i)^2}{2\sigma_i^2}}, i = 1, 2, \dots, 5. \quad (20)$$

式中: x 为原始数据.

确定隶属度函数形式后, 指标分级界限与隶属度函数参数就存在式(21)的关系, 因此只要确定指标分级界限 $c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5$, 隶属度函数就唯一确定. 规定各级别隶属度函数方差相等, 分级界限如式(22)所示.

$$\sigma_{ji} = c_{ji} - c_{j(i-1)}, m_{ji} = 0.5(c_{ji} + c_{j(i-1)}). \quad (21)$$

$$c_{ji} = q_j^{avg} + (i - 2.5)(q_j^{max} - q_j^{min})/5. \quad (22)$$

式中: c_{ji} 为第 j 个指标第 i 个分级界限; q_j^{avg}, q_j^{max} 和 q_j^{min} 分别为第 j 个指标的均值、最大值和最小值; σ_{ji}

和 m_{ji} 分别表示第 j 个指标第 i 个等级的隶属度方差和中间值.

2 基于场景分析法的微电网场景模型

独立微网中, 风机、光伏和小水电等分布式电源的出力, 受所处地区风速、太阳辐射强度和降雨量等不确定性因素的影响. 在独立微网电源规划时, 应该关注这些不确定性因素带来的规划场景不确定性. 因此, 本文采用场景分析法对所处地区的风电、光伏、水电资源进行多场景建模.

2.1 基于生成对抗网络算法的风光水资源场景模拟生成

场景生成关注的是生成模型与原始数据模型的相似程度. 基于生成对抗网络(Generative Adversarial Network, GAN)的场景生成, 理论上可以逐渐逼近原始数据的分布, 能较为准确地实现出力随机性的风光水场景生成.

GAN的基本思路是两个神经网络的相互竞争, 竞争双方分别为生成器 G (Generator) 和鉴别器 D (Discriminator). 其中: 生成器 G 是基于原始数据的分布模拟, 进行新数据的生成; 鉴别器 D 为二进制分类器, 对原始数据和新生成数据进行判别和分类, 其输出为 1 表示真, 输出为 0 表示假. GAN 框架如图 4 所示.

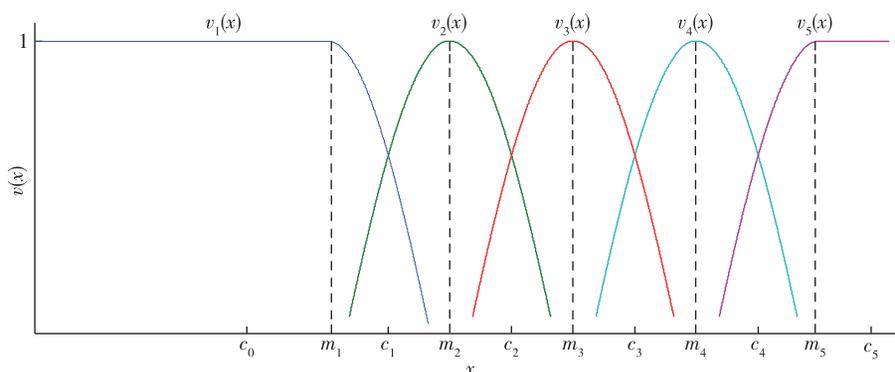


图3 模糊隶属度与分级

Fig. 3 Membership degree and classification of fuzzy evaluation

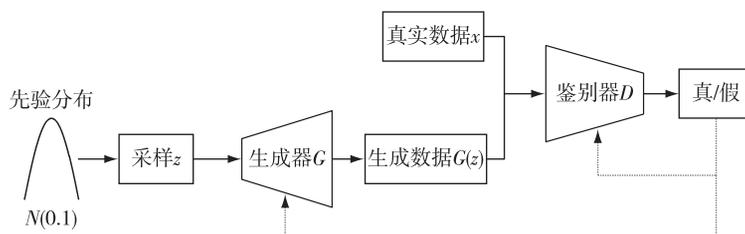


图4 GAN 技术框架

Fig. 4 Technical structure of GAN

原始数据为 x , 其分布为 $p_{\text{data}}(x)$, 通过生成器 G 生成数据 $G(z)$ 和分布 $p_g(z), p_g(z)$ 应该逼近 $p_{\text{data}}(x)$. 生成数据 $G(z)$ 和原始数据 x 输入到鉴别器 D 中, 会形成区间为 $[0, 1]$ 的值, 其数值越接近 1, 表示生成数据越接近真实数据.

生成器 G 和鉴别器 D 进行对抗和博弈, 可描述为极小极大化问题的求解过程, 如式 (23) 所示:

$$\min_G \max_D V(D, G) = E_{x \sim p_{\text{data}}(x)} [\ln D(x)] + E_{z \sim p_{\text{data}}(x)} [\ln(1 - D(G(z)))]. \quad (23)$$

其中: $E_{x \sim p_{\text{data}}(x)} [\ln D(x)]$ 进行真实数据判别; $E_{z \sim p_{\text{data}}(x)} [\ln(1 - D(G(z)))]$ 进行生成数据判别.

生成器和鉴别器为两个对抗神经网络, 在学习和优化过程中, 最终博弈形成纳什平衡, 获得符合要求的生成模型.

2.2 基于改进 K-Medoids 聚类的场景削减

基于 GAN 模拟生成大量风光水场景后, 如果针对所有风光水场景都进行微网电源规划, 计算过程复杂、计算量庞大. 因此, 需要进一步分析生成场景的典型特征, 并通过分类, 提取典型场景集.

假设原始场景集 S 的规模为 n , 需要削减至只有 k 个场景的集合 J_k , 即实现 S 中特征明显、出现概率大的场景的聚类, 其实质就是基于聚类算法寻找聚类中心集.

假设任意 2 个场景 u^i 与场景 u^j 的距离为 $d(u^i, u^j)$, 则聚类的优化目标为欧几里得距离最小:

$$\min \sum_{u^i \in u_c^k} \min_{u^j \in u_c^k} d(u^i, u^j). \quad (24)$$

K-Medoids 聚类算法对含孤立点的场景有较强鲁棒性, 适用于求解随机性较强的自然资源场景聚类问题. 本文采用 K-Medoids 聚类算法, 通过改良初始聚类中心, 对风光水场景进行快速聚类和削减, 其步骤和流程如图 5 所示.

3 电源容量配置优化模型

本文建立以综合成本为最小, 并计及供电可靠性和发电环保性的独立微网电源容量配置多目标优化模型, 通过拉格朗日乘子变换, 实现多目标函数向单目标函数转换, 提高优化模型的求解效率. 基于混合整数线性规划 (Mixed Integer Linear Programming, MILP) 算法, 采用 GAMS 优化软件中的线性规划求解器 CPLEX, 求解优化模型.

3.1 目标函数

建立的多目标函数如下:

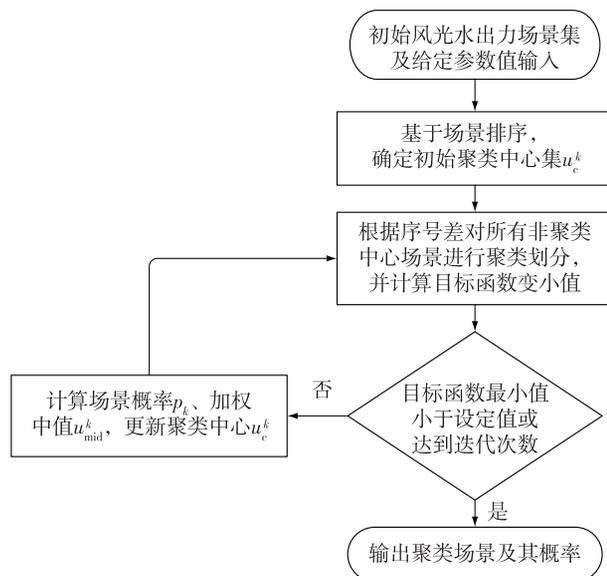


图 5 基于改进 K-Medoids 的场景削减

Fig. 5 Scenario reduction based on improved K-Medoids

$$\min C = \min(C_{\text{invest}} + C_{\text{loss}} + C_{\text{waste}}). \quad (25)$$

1) 年投资成本 C_{invest}

年投资成本 C_{invest} (元/年) 为全寿命周期内总成本的等年值, 即:

$$C_{\text{invest}} = C_{\text{initial}} + C_{\text{O\&M}}. \quad (26)$$

其中, 初始投资成本 C_{initial} (元/年) 为设备初始投资成本与资金年回收系数的乘积, 如 (27) 所示:

$$C_{\text{initial}} = (N_{\text{PV}} I_{\text{PV}} + N_{\text{WT}} I_{\text{WT}} + N_{\text{hy}} I_{\text{hy}} + N_{\text{bat}} I_{\text{bat}}) \gamma. \quad (27)$$

其中: 各分布式电源的容量 (kW) 分别用光伏 N_{PV} 、风机 N_{WT} 、小水电 N_{hy} 和储能 N_{bat} 表示; 对应的初始安装成本 (元/kW) 分别为光伏 I_{PV} 、风机 I_{WT} 、小水电 I_{hy} 和储能 I_{bat} ; γ 为资金年回收系数, 取 0.060 2.

式 (26) 中, $C_{\text{O\&M}}$ 为年运行维护成本 (元/年), 即各类电源的运行维护费用:

$$C_{\text{O\&M}} = K_{\text{PV}} \sum_{t=1}^T P_{\text{PV}}(t) \Delta t + K_{\text{WT}} \sum_{t=1}^T P_{\text{WT}}(t) \Delta t + K_{\text{hy}} \sum_{t=1}^T P_{\text{hy}}(t) \Delta t + K_{\text{bat}} \sum_{t=1}^T |P_{\text{bat}}(t)| \Delta t. \quad (28)$$

其中: K_{PV} 、 K_{WT} 、 K_{hy} 、 K_{bat} 分别表示光伏、风机、小水电和储能的单位能量运行维护成本 (元/(kW·h)); T 为调度时段总数, 本研究取值为 8 760; Δt 为调度时段长度, 一般取 1 h; 各电源在第 t 个调度时段的功率 (kW) 分别为 $P_{\text{PV}}(t)$ 、 $P_{\text{WT}}(t)$ 、 $P_{\text{hy}}(t)$ 和 $P_{\text{bat}}(t)$.

2) 年停电惩罚成本 C_{loss}

目标函数中计及供电可靠性, C_{loss} 表示年停电惩罚成本, 即:

$$C_{\text{loss}} = K_{\text{loss}} \sum_{t=1}^T P_{\text{loss}}(t) \Delta t. \quad (29)$$

其中:单位发电量不足的惩罚成本(元/(kW·h))用惩罚因子 K_{loss} 表示,为保证供电可靠性,该项取值较大;第 t 个调度时段的功率缺额用 $P_{\text{loss}}(t)$ 表示,即该时段内,负荷功率 $P_{\text{load}}(t)$ 与各类分布式电源总出力的差值,如:

$$P_{\text{loss}}(t) = P_{\text{load}}(t) - (P_{\text{PV}}(t) + P_{\text{WT}}(t) + P_{\text{hy}}(t) + P_{\text{bat}}(t)). \quad (30)$$

3) 年能量浪费惩罚成本 C_{waste}

目标函数中还计及环保性,表现为弃风光造成能量浪费的惩罚成本,即:

$$C_{\text{waste}} = K_{\text{waste}} \sum_{t=1}^T P_{\text{waste}}(t) \Delta t. \quad (31)$$

其中:单位能量浪费的惩罚成本(元/(kW·h))用惩罚因子 K_{waste} 表征;第 t 个调度时段的功率盈余(kW)用 $P_{\text{waste}}(t)$ 表示,其表达式为

$$P_{\text{waste}}(t) = N_{\text{PV}} P_{\text{PV1max}}(t) + N_{\text{WT}} P_{\text{WT1max}}(t) + N_{\text{hy}} P_{\text{hy1max}}(t) - P_{\text{PV}}(t) - P_{\text{WT}}(t) - P_{\text{hy}}(t). \quad (32)$$

其中: $P_{\text{PV1max}}(t)$ 和 $P_{\text{WT1max}}(t)$ 分别表示该时段内,受自然条件影响的光伏和风机单台最大发电功率。

3.2 约束条件

优化模型中,以分布式电源出力、储能电池电量为约束条件。

1) 分布式电源出力的约束

$$0 \leq P_{\text{PV}}(t) \leq N_{\text{PV}} P_{\text{PV1max}}(t), \quad (33)$$

$$0 \leq P_{\text{WT}}(t) \leq N_{\text{WT}} P_{\text{WT1max}}(t), \quad (34)$$

$$0 \leq P_{\text{hy}}(t) \leq N_{\text{hy}} P_{\text{hy1max}}(t), \quad (35)$$

$$-N_{\text{bat}} P_{\text{bat1Ndis}} \leq P_{\text{bat}}(t) \leq N_{\text{bat}} P_{\text{bat1Nch}}(t). \quad (36)$$

其中: P_{bat1Ndis} 和 P_{bat1Nch} 分别为单个储能电池的额定放电功率和充电功率。

2) 储能电池电量约束

$$E(t) = E(t-1)(1 - \delta \Delta t) + P_{\text{bat}}(t) \Delta t, \quad (37)$$

$$S_{\text{OC}, \text{min}} N_{\text{bat}} E_{\text{bat1N}} \leq E(t) \leq S_{\text{OC}, \text{max}} N_{\text{bat}} E_{\text{bat1N}}. \quad (38)$$

其中: $E(t)$ 为储能电池在第 t 个调度时段末的剩余电量; $S_{\text{OC}, \text{max}}$ 和 $S_{\text{OC}, \text{min}}$ 分别表示其剩余电量百分比的上限和下限,一般储能电池上下限分别为 0.9 和 0.2; δ 表示自放电率 (h^{-1}); E_{bat1N} 为单台电池额定容量。

4 独立微电网电源优化配置应用研究

通过自然资源评价,进行独立微电网电源规划,其流程如图 6 所示。

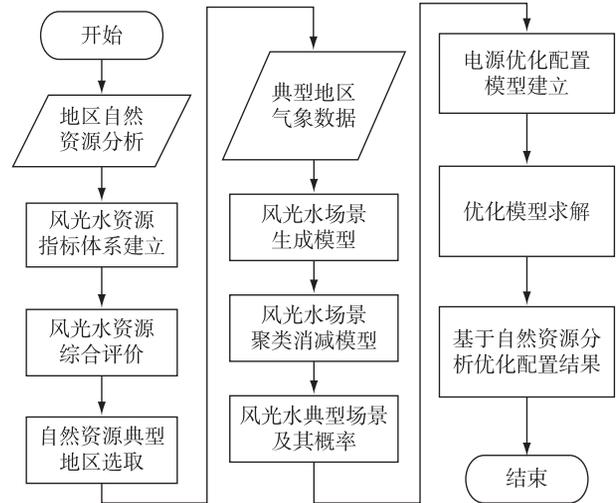


图 6 独立微网电源优化配置

Fig. 6 Flow chart of power capacity optimization for standalone microgrids

4.1 算例条件

考虑我国典型的独立微电网情况,分布式电源参数如表 1 所示,设备的寿命周期取 20 年.图 7 为某独立微网的典型最大综合负荷典型曲线,每小时一个采样点,一年共计 8 760 个采样点。

表 1 微网分布式电源参数

Table 1 Distributed generation equipment parameters

设备名称	初装成本/(元/kW)	运维成本/(元/(kW·h))
光伏	4 500	0.03
风机	4 000	0.05
小水电	6 000	0.018
储能电池	10 000	0.98

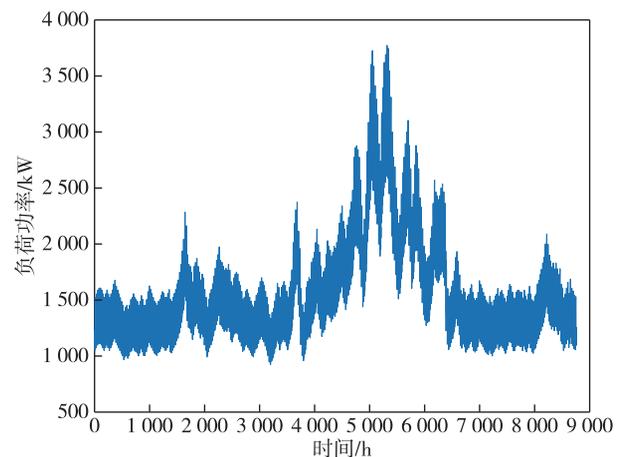


图 7 典型年负荷曲线

Fig. 7 Typical annual load curve

4.2 代表地区的风光水资源评价

根据我国大陆地区 31 个省级行政区的风光水气象数据,采用前文所述的评价指标,进行各地区自然资源模糊评价.海南、内蒙古、甘肃、北京和湖北作为风电、光伏和水电资源不同水平的代表性地区,其模糊评价等级如图 8 所示.

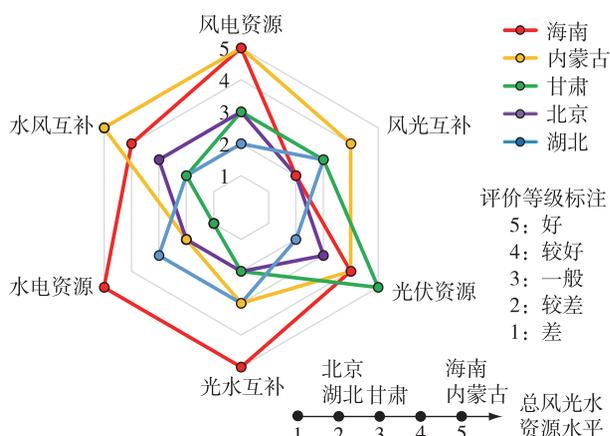


图 8 代表地区的自然资源评价

Fig. 8 Evaluation of natural resources for representative regions

由图 8 可知,海南的风电和水电资源最丰富,光伏资源较好,而内蒙古的风电资源丰富,光伏资源优良,风水互补特性好,光伏资源和风光互补特性均较好,因此,海南和内蒙古的总风光水资源水平指标等级最高.甘肃的光伏资源非常丰富,水电资源较差.北京和湖北的总风光水资源水平等级较差,但 6 个一级指标的评价等级各有特点,风光水资源水平较均衡.基于这 5 个地区,开展电源配置算例分析.

4.3 微网电源配置与自然资源评价的关系

同等负荷水平下,输入 8 760 h 的风光水出力数据,随机抽取 8 760 个场景作为训练集,采用 GAN 场景生成模型,生成 876 个新场景.基于改进 K-Medoids

法,削减得到 k 个典型场景,在本算例中, k 取 10.测算典型场景发生概率,并加权求取综合场景.基于综合场景,采用优化模型进行独立微网电源配置,结果如表 2 所示.

由表 2 可知:

- 1) 对于地区总风光水资源,其评价等级越高,风光水电源配置总容量越少,需要的投资成本也越小;
- 2) 在风机单位成本较优的情况下,风电资源评价等级与风机容量占比存在相关关系,风电资源等级越高,风机容量占比越高;
- 3) 小水电除了枯水期不发电,其他时期出力较为平稳,因此,小水电容量占比基本稳定,与该微网水电资源评价等级的相关性不强;
- 4) 储能独立微网中是平衡电力的重要设备,因此,风光水总容量越多,储能所需配置容量也越多.

4.4 风电资源与风机配置关系

在相同负荷水平下,分别对我国大陆地区其他省级行政区独立微网进行电源配置,分析风电资源等级与风机容量比例的关系,结果如图 9 所示.

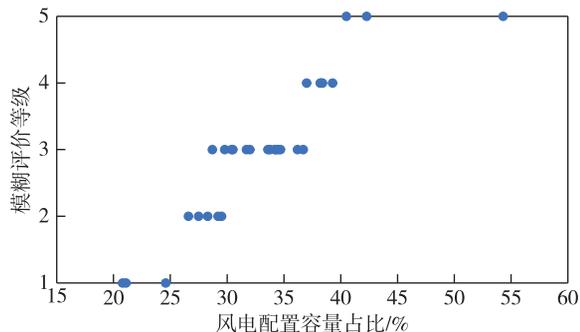


图 9 风电资源等级与风机配置关系

Fig. 9 Relationship between wind power resource level and wind turbine capacity

表 2 不同地区电源配置结果

Table 2 Power allocation results in different regions

参量	海南	内蒙古	甘肃	北京	湖北
风机/kW	1 448	2 206	1 420	1 518	1 395
光伏/kW	2 336	1 543	3 250	3 719	3 891
小水电/kW	1 126	1 225	1 357	1 761	1 885
储能/kW	3 442	3 904	4 822	5 711	6 989
风光水总容量/kW	4 910	4 974	6 027	6 998	7 171
风光水容量配置比例	30:47:23	44:31:25	24:54:22	22:53:25	20:54:26
总成本/万元	498	555	632	736	762

图9结果表明,风电资源越丰富,风机容量占比越大.进一步统计得到微网中风机容量比例的区间,结果如表3所示.

独立微网的电源构成中,相比于风电和光伏出力,小水电出力较为稳定,其容量配置的占比较为稳定,所以可以先配置小水电.在本文的算例条件下,小水电容量占比为22%~26%(表2).由于“风电资源”指标相对于“光伏资源”指标对配置结果的影响更大,因此,根据“风电资源”指标的模糊评价等级确定风电配置容量的占比,可参考表3比例进行风机容量配置.水电、风电容量确定后,可以确定光伏配置容量的占比.

表3 风机容量比例区间

Table 3 Intervals for proportion of wind turbine capacity

	风电资源等级				
	差	较差	一般	较好	好
风机容量比例/%	[20 25)	[25 30)	[30 35)	[35 40)	[40 55)

本文所提的基于风光水资源特性的独立微电网电源优化配置方法和流程,对其他区域、其他国家的独立微电网规划也同样适用.在全面评价研究区域自然资源水平的基础上,指导生成独立微电网的电源配置方案,可以提高规划的效率,具有一定的适用性和推广性.

5 结语

基于独立微网所处地区的自然资源特性评价,提出一种电源优化配置方法.构建的评价指标和评价体系,能全面反映地区的风光水自然资源特性;模糊评价方法能合理给出各种自然资源的水平等级;基于生成对抗网络算法的场景模拟生成法和改进K-Medoids的场景削减法,考虑了风电、光伏和水电出力的随机性,能够获得自然资源代表地区的典型运行场景;基于风电资源评价等级风机容量占比区间,可作为独立微网风机容量配置的参考.基于典型地区的电源优化配置算例,验证了本文所提方法具有适应性和推广性,能有效指导所有地区独立微网的电源规划.

参考文献

References

[1] 程勇,成琦,姚磊茹,等.自适应下垂系数的孤岛微电网无功均分策略[J].南京信息工程大学学报,2024,16(4):528-536

CHENG Yong, CHENG Qi, YAO Leiru, et al. Adaptive droop coefficient-based reactive power sharing strategy for islanded microgrid[J]. Journal of Nanjing University of Information Science & Technology, 2024, 16(4): 528-536

[2] 黄冬梅,陈柯翔,孙锦中,等.含电解制氢装置及光热电站的海岛微网优化调度[J].电力系统及其自动化学报,2022,34(11):24-31

HUANG Dongmei, CHEN Kexiang, SUN Jinzhong, et al. Dispatch optimization of island microgrid with electrolytic hydrogen unit and CSP station[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2022, 34(11): 24-31

[3] 孙运志,蒋德玉,张盛林,等.计及电池寿命损耗的多能源微网储能优化配置[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(5):128-133,144

SUN Yunzhi, JIANG Deyu, ZHANG Shenglin, et al. Optimal energy-storage configuration of multi-energy microgrid considering battery life degradation[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(5): 128-133, 144

[4] 陈虹宇,李星梅,王玉玮.含电动船充电站的海岛光储微网系统容量优化配置[J].智慧电力,2024,52(2):48-54

CHEN Hongyu, LI Xingmei, WANG Yuwei. Optimal capacity configuration of island photovoltaic storage microgrid system with electric ship charging station[J]. Smart Power, 2024, 52(2): 48-54

[5] 周成伟,李鹏,俞斌,等.风光储微电网储能系统容量优化配置[J].综合智慧能源,2022,44(12):56-61

ZHOU Chengwei, LI Peng, YU Bin, et al. Optimal configuration for energy storage system capacity of wind-solar-storage microgrid[J]. Integrated Intelligent Energy, 2022, 44(12): 56-61

[6] 潘文霞,李建成,方坤豪.考虑补贴的独立微网容量配置优化方法[J].电网技术,2018,42(7):2206-2213

PAN Wenxia, LI Jiancheng, FANG Kunhao. Optimization method of capacity configuration of standalone microgrid considering subsidy[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2206-2213

[7] 于凯旋,李凤霞,李双拾.基于改进BASDE算法的孤立微电网多目标容量优化配置仿真[J].电网与清洁能源,2021,37(8):109-117

YU Kaixuan, LI Fengxia, LI Shuangshi. Simulation of multi-objective capacity optimization configuration of isolated microgrid based on improved BASDE algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(8): 109-117

[8] 丁明,王波,赵波,等.独立风光柴储微网系统容量优化配置[J].电网技术,2013,37(3):575-581

DING Ming, WANG Bo, ZHAO Bo, et al. Configuration optimization of capacity of standalone PV-wind-diesel-battery hybrid microgrid[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 575-581

[9] 南斌,董树锋,唐坤杰,等.考虑需求响应和源荷不确定性的光储微电网储能优化配置[J].电网技术,2023,47(4):1340-1352

- NAN Bin, DONG Shufeng, TANG Kunjie, et al. Optimal configuration of energy storage in PV-storage microgrid considering demand response and uncertainties in source and load [J]. *Power System Technology*, 2023, 47 (4): 1340-1352
- [10] Atia R, Yamada N. Sizing and analysis of renewable energy and battery systems in residential microgrids [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7 (3): 1204-1213
- [11] 崔明勇, 杨林林, 杨少华, 等. 基于需求侧响应的水风互补微电网容量优化配置 [J]. *电工电能新技术*, 2022, 41 (2): 21-34
- CUI Mingyong, YANG Linlin, YANG Shaohua, et al. Optimal configuration of hydro-wind complementary microgrid considering demand-side response [J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2022, 41 (2): 21-34
- [12] 刘燕华, 李雅菲, 赵冬梅, 等. 独立运行微电网电源优化配置模型的对比分析 [J]. *现代电力*, 2015, 32 (6): 14-22
- LIU Yanhua, LI Yafei, ZHAO Dongmei, et al. Comparative analysis on optimized configuration models of distributed generations in stand-alone micro-grid [J]. *Modern Electric Power*, 2015, 32 (6): 14-22
- [13] 黄弦超. 计及可控负荷的独立微网分布式电源容量优化 [J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38 (7): 1962-1970, 2211
- HUANG Xianchao. Capacity optimization of distributed generation for stand-alone microgrid considering controllable load [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38 (7): 1962-1970, 2211
- [14] Kaddour A, El S M, Bekkouche A, et al. Optimization and evaluation of the photovoltaic system in a farm studio located in Ghardaïa [C]//2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC). December 5-8, 2018, Rabat, Morocco. IEEE, 2018: 1-4
- [15] 程思举, 杨建华, 肖达强, 等. 基于多指标评价的清洁能源互补优选策略 [J]. *电气技术*, 2020, 21 (1): 25-30
- CHENG Siju, YANG Jianhua, XIAO Daqiang, et al. Clean energy complementary optimization strategy based on multi-index evaluation [J]. *Electrical Engineering*, 2020, 21 (1): 25-30
- [16] 邵志芳, 赵强, 张玉琼. 独立型微电网源荷协调配置优化 [J]. *电网技术*, 2021, 45 (10): 3935-3946
- SHAO Zhifang, ZHAO Qiang, ZHANG Yuqiong. Source side and load side coordinated configuration optimization for stand-alone micro-grid [J]. *Power System Technology*, 2021, 45 (10): 3935-3946
- [17] 林凌雪, 廖碧英, 管霖. 基于风光资源特性的独立微电网电源优化配置方法 [J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2021, 49 (7): 103-115
- LIN Lingxue, LIAO Biying, GUAN Lin. Optimal generation configuration methods for standalone microgrids based on wind and solar resources characteristics [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2021, 49 (7): 103-115
- [18] 廖碧英. 基于风光水资源特性的独立微电网电源优化配置方法研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2021
- LIAO Biying. Optimal generation configuration methods for standalone microgrid based on wind/solar/hydro resources characteristics [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021
- [19] 赵鹏翔, 覃振坤, 郭东旭, 等. 综合能源灵活性评价指标体系与评估模型 [J]. *分布式能源*, 2023, 8 (6): 66-76
- ZHAO Pengxiang, QIN Zhenkun, GUO Dongxu, et al. Evaluation index system and evaluation model of comprehensive energy flexibility [J]. *Distributed Energy*, 2023, 8 (6): 66-76
- [20] Shi T, Jiang W, Luo P. A method of clustering ensemble based on grey relation analysis [J]. *Wireless Personal Communications*, 2018, 103 (1): 871-885
- [21] 邹艳均, 武周虎, 任鹏, 等. 人工蜂群优化 LM-BP 网络在东平湖水质评价中的应用 [J]. *水电能源科学*, 2022, 40 (4): 66-69, 36
- ZOU Yanjun, WU Zhouhu, REN Peng, et al. Application of LM-BP network based on artificial bee colony optimization in water quality evaluation of Dongping Lake [J]. *Water Resources and Power*, 2022, 40 (4): 66-69, 36
- [22] 田娜. 风光互补发电系统商用可靠性评价体系构建 [D]. 北京: 华北电力大学, 2015
- TIAN Na. A evaluation system of economic reliability for wind-photovoltaic hybrid power systems [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015
- [23] 余金龙, 赵文会, 赵波, 等. 基于多状态建模的独立型微网优化配置 [J]. *电力系统自动化*, 2015, 39 (6): 11-17
- YU Jinlong, ZHAO Wenhui, ZHAO Bo, et al. Optimal configuration of standalone microgrid based on multistate modeling [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39 (6): 11-17
- [24] 鲜杏, 范传光, 文闪闪, 等. 考虑可再生能源随机性的孤岛微网容量优化配置方法 [J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2016, 49 (1): 100-104, 125
- XIAN Xing, FAN Chuanguang, WEN Shanshan, et al. Optimal deployment for island microgrid considering probabilistic factors of renewable energy generations [J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2016, 49 (1): 100-104, 125

Power capacity optimization of standalone microgrids based on natural resource evaluation

ZHU Zhifang¹ LIN Zihan¹ CHEN Liping¹ DONG Hong¹ GAO Yanna¹ LIN Lingxue²

1 Guangzhou Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510510, China

2 School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China

Abstract To guarantee the reliable and economical operation of standalone microgrids, the optimal configuration of power capacity must be determined during the planning phase. The selection of power source types and power capacities of standalone microgrids is affected by internal load levels and the unique natural resource conditions such as wind, photovoltaic (PV), water and storage potential of the respective regions. This paper investigates the comprehensive natural resource conditions of “wind/PV/water/storage” across different regions and establishes a multi-objective optimization model aimed at minimizing the annual generation cost, while considering the reliable power supply and environmentally friendly power generation. Constraints related to electric power and energy balance are incorporated into the optimization model, which is solved via a linearization algorithm. To address the uncertainty in the output of wind, PV and water power, we employ Generative Adversarial Networks (GANs) to simulate multiple scenarios, which are then reduced via an improved K -Medoids clustering algorithm, thereby enhancing the computational efficiency. Furthermore, an index evaluation system is constructed to analyze the characteristics of wind, PV and water resources, and the natural resource levels of 31 provincial-level administrative regions in China’s mainland are obtained using a fuzzy evaluation method. By comparing the power capacity configurations of standalone microgrids in 5 representative regions with varying natural resources, this study validates the feasibility and rationality of the proposed approach, and provides valuable insights for the planning of standalone microgrid system.

Key words standalone microgrid; natural resource; wind, PV and water; power capacity optimization; scenario simulation