

张璟, 万皓, 高洁, 等. 基于天气分型的区域风光出力互补规律评价与并网容量优化方法[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(5): 111-122. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.009

ZHANG Jing, WAN Hao, GAO Jie, et al. Evaluation of regional wind and photovoltaic power output complementarity and grid-connected capacity optimization method based on weather type classification[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(5): 111-122. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.009

基于天气分型的区域风光出力互补规律评价与并网容量优化方法

张璟¹, 万皓², 高洁³, 朱非林¹, 卢鹏⁴, 刘为锋⁵, 徐斌¹,
樊宇堃¹, 钟平安¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098; 2. 水利部水文仪器及岩土工程仪器质量监督检验测试中心, 江苏南京 210012; 3. 水电水利规划设计总院, 北京 100120; 4. 中国电建昆明勘测设计研究院有限公司, 云南昆明 650051; 5. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120)

摘要:【目的】风光互补发电存在波动性和间歇性, 给系统运行的稳定性和效率带来巨大挑战。现有研究多单一分析风光出力或容量配置, 缺乏基于天气分型的综合风光出力互补规律评价与并网容量优化的研究。【方法】针对此问题, 研究基于青海省2020年气象数据, 计算并归一化处理风光出力并构建风光出力矩阵。采用K-means算法划分天气类型, 通过波动互补率和爬坡互补率指标, 分别从波动性和爬坡性两个方面评估不同天气类型下的风光出力互补特性。此外, 从多个时间尺度对区域的逐日、逐月风光互补特性开展定量评价。最后, 建立风光并网容量比例优化模型, 采用蛇鹫优化算法和枚举法相互参证的方式对波动互补率和爬坡互补率进行优化, 以确定最佳风光并网容量比例。【结果】结果表明: (1) 青海地区的风光出力季节差异显著, 夏秋季节两者之间具有良好的互补性, 可以形成有效的互补发电系统。(2) 不同天气类型对风光互补性影响显著, 晴朗天气下风光互补性较弱, 多云或突变天气下互补性相对较强。(3) 所有天气类型的爬坡互补率均值为20.74%, 远高于波动互补率的均值1.84%, 表明风光联合出力可以有效降低出力爬坡率, 增强系统的可靠性。(4) 不同天气类型下, 优化风光并网容量比例可以最大化互补率指标, 实现最佳互补效果。【结论】研究结果能够有效揭示不同天气类型下的风光出力互补特性, 并确定最佳风光并网容量比例, 为风光互补发电系统的规划、建设和运行提供科学依据。

关键词: 风光出力互补特性; 天气分型; 风光并网容量比例优化; K-means聚类; 蛇鹫优化算法; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.009

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TM61

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)05-0111-12



与作者互动
请扫码
加好友

收稿日期: 2024-11-28; 修回日期: 2025-01-13; 录用日期: 2025-01-14; 网络出版日期: 2025-01-17

基金项目: 中国电力建设股份有限公司科技项目(DJ-ZDXM-2022-10); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(B240201123); 国家自然科学基金(52009029)

作者简介: 张璟(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事水风光储多能互补调度方面研究。E-mail: 3288292045@qq.com

通信作者: 朱非林(1992—), 男, 教授, 博士, 主要从事水风光储多能互补调度、流域水库群防洪预报调度方面的研究。E-mail: zhufeilin@hhu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Evaluation of regional wind and photovoltaic power output complementarity and grid-connected capacity optimization method based on weather type classification

ZHANG Jing¹, WAN Hao², GAO Jie³, ZHU Feilin¹, LU Peng⁴, LIU Weifeng⁵,
XU Bin¹, FAN Yukun¹, ZHONG Pingan¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China; 2. MWR Hydrological Instruments and Geotechnical Engineering Instrument Quality Supervision, Inspection and Testing Center, Nanjing 210012, Jiangsu, China; 3. China Renewable Energy Engineering Institute, Beijing 100120, China; 4. Power China Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming 650051, Yunnan, China; 5. MWR General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Beijing 100120, China)

Abstract: [Objective] Wind and photovoltaic (PV) complementary power generation is characterized by volatility and intermittency, which poses significant challenges to the stability and efficiency of system operation. Existing research often focuses on the analysis of wind and PV power output or capacity configuration in isolation, and there is a lack of research on the evaluation of the complementarity of wind and PV power output and the optimization of grid-connected capacity based on weather type classification. [Methods] To address this issue, wind and PV power outputs were calculated and normalized using meteorological data from Qinghai Province in 2020, and the wind and PV power output matrix was constructed. The K-means clustering algorithm was employed to classify weather types, and the indicators of complementary volatility rate and ramp rate were used to assess the complementary characteristics of wind and PV power output under different weather types from the aspects of volatility and ramping. In addition, the daily and monthly wind and PV complementary characteristics of the region were quantitatively evaluated from multiple time scales. Finally, the optimization model for the wind and PV grid-connected capacity ratio was established. The secretary bird optimization algorithm and enumeration method were used to optimize the complementary volatility rate and ramp rate to determine the optimal wind and PV grid-connected capacity ratio. [Results] The result showed that: (1) there was a significant seasonal difference in wind and PV power output in Qinghai, with good complementarity between the two in summer and autumn, making it possible to form an effective complementary power generation system. (2) Different weather types had a significant impact on the complementarity of wind and PV power, with weaker complementarity in sunny weather and relatively stronger complementarity in cloudy weather or abrupt weather change. (3) The average complementary ramp rate of all weather types was 20.74 %, much higher than the average complementary volatility rate of 1.84 %, indicating that the combined output of wind and PV power could effectively reduce the power ramp rate and enhance the reliability of the system. (4) Under different weather types, optimizing the wind and PV grid-connected capacity ratio could maximize the indicator of complementary rate and achieve the best complementary effect. [Conclusion] The research findings effectively reveal the complementary characteristics of wind and PV power output under different weather types and determine the optimal wind and PV grid-connected capacity ratio, which provides a scientific basis for the planning, construction, and operation of wind and PV complementary power generation system.

Keywords: complementary characteristics of wind and photovoltaic power output; weather classification; wind and photovoltaic grid-connected capacity ratio optimization; K-means clustering; secretary bird optimization algorithm; influencing factors

0 引言

为了促进能源结构转型并实现“双碳”目标,我国正积极推动风能和太阳能等可再生能源的开发和利用^[1-3]。然而,风能和太阳能不可避免地受到天气和气候的影响,发电具有波动性^[4]和间歇性^[5],给电力系统的稳定运行、调峰调频、备用容量配置及并网问题带来了挑战。风光互补特性能够有效缓解这些挑战,提高电力系统运行的稳定性,并增强系统对可再生能源的消纳能力^[6-8]。因此,定量评估风光互补

性并优化风光并网容量比例,对于风光互补发电系统的规划、建设和运行具有重要意义。

近年来,国内外学者对风光互补性开展了广泛研究并取得了诸多进展。研究主要集中在互补性分析以及容量优化配置两个方面。

在互补性分析方面,现有研究主要利用统计分析方法和机器学习方法来揭示风光互补的时空分布特征和规律。统计分析方法基于数理统计原理,对风光出力数据进行统计分析,能在一定程度上反映风光资源的互补性。例如,COSTOYA等^[9]利用来自CMP6项

目的 10 个全球气候模式的多模式集合, 分析了 2025—2054 年北美地区风光发电的互补性。REN 等^[10] 基于不同波动状态和波动幅度提出了一种改进评估方法, 在小时、日、月三个时间尺度上评估了中国地区的风光互补性。田露等^[11] 对水风光资源的互补性进行了全面分析, 涵盖了日内、年内和年际三个不同时间尺度。朱非林等^[12] 针对龙羊峡水电站水风光资源在年时间尺度下出力的互补性开展了定量评估。MONFORTI 等^[13] 采用意大利太阳辐射和风速的高时空分辨率数据, 基于小时、日和月的相关系数, 对意大利的风光互补性进行了评估。乔延辉等^[14] 提出了基于核主成分分析 (Kernel Principal Component Analysis, KPCA) 和自组织特征映射 (Self-organizing Feature Map, SOFM) 神经网络的方法, 分析了不同天气类型下风光出力的互补特性。李昕阳等^[15] 通过构建适用于风光水三能源互补特性评价的指标体系, 研究了雅砻江流域风光水出力的长期和短期互补特性。基于机器学习的互补性分析方法能够有效识别和提取互补性特征, 并对其进行量化评估。吴晓刚等^[16] 提出了一种基于 GRU 和 CNN 并结合时序注意力机制的模型, 实现了水风光多场站联合的超短期功率预测。WANG 等^[17] 提出了一种基于马尔可夫链和 Copula 函数的风光出力动态时空相关性模型, 有效描述了两者之间的动态时空依赖关系。这些研究大部分仅仅探讨风光的互补特征和规律, 未将互补性分析结果应用于风光互补发电系统的优化决策。此外, 这些研究较少考虑天气类型对风光互补特性的影响, 导致在实际应用中可能无法准确反映不同天气条件下的互补效果。

风光容量配比优化是指在风光互补发电系统中, 通过合理配置风光的发电容量, 以最大化风光互补效果或最小化系统成本。容量配比优化对于提高风光互补发电系统整体性能具有重要意义, 研究者们提出了多种模型和方法来确定最优的风光并网容量比例。FAN 等^[18] 基于 NSGA-II 算法开发了一种多目标优化模型, 评估了中国 31 个省份每 15 分钟的风光水互补发电潜力。HAN 等^[19] 从随机波动和爬坡特性两个角度提出了一系列互补性指标, 并分析了不同风光并网容量比例对互补性的影响。成驰等^[20] 以气象因子日变化典型特征曲线为基础, 构建了风光并网容量优化配置模型。赵振宇等^[21] 从源荷匹配的角度出发, 建立了风光互补容量优化配置模型。李翠萍等^[22] 分析了吉林电网某地区风光出力波动特性, 并结合集群风电功率, 构建了风光互补发电系统。侯慧等^[23] 构建了一个以系统成本最小化为目标的风光储联合发电系

统容量优化模型, 并引入重力储能形式, 通过实例验证了该模型的有效性。LIU 等^[24] 提出了一种综合考虑发电稳定性与河流生态系统影响的水风光联合优化调度模型, 并采用改进的多目标进化算法求解, 以实现更科学的决策支持。申建建等^[25] 针对水风光多能互补发电系统调度面临的挑战, 探讨了风光电站集群调度、风光发电长短期协调优化等问题, 为清洁能源消纳和新型电力系统调度提供技术支持。然而, 这些研究大多侧重于模型构建和算法设计, 忽略了对风光出力特性的深入分析, 以及如何将这些特性与天气因素相结合以优化配置。因此, 这些研究在指导实际风光互补发电系统的优化配置时, 可能导致对风光互补特性的理解不够全面, 进而影响风光互补发电系统设计的准确性和经济性。同时由于未充分考虑到天气变化对系统性能的影响, 限制了其在实际应用中的有效性和适用性。

综上所述, 现有研究主要集中在单一的评价风光互补性或研究风光容量配比优化方法, 缺乏对风光互补发电系统进行综合分析和优化调度的研究, 从而难以对系统的整体性能进行准确评估。此外, 天气因素作为影响风光出力互补性的重要因素, 在现有研究中较少得到充分考虑, 导致互补性的评估结果或系统运行的优化策略存在局限性。基于此, 本文提出了一种基于天气分型的区域风光出力互补规律评价与并网容量优化方法。以青海省为例开展研究实例, 侧重从风光出力的波动性和爬坡性分析不同天气类型下的互补特性, 并建立优化模型以确定最佳风光并网容量比例, 实现最佳互补效果。

1 研究方法

本文的研究框架如图 1 所示。本研究首先收集气象资料, 通过气象资料计算得到风光出力, 归一化处理后构建风光出力矩阵。然后构建基于 K-means 算法对的天气类型划分模型, 将风光出力矩阵划分在不同的天气类型下。并对区域的逐日、逐月风光互补特性开展定量评价。接着基于波动互补率和爬坡互补率两个评价指标, 分析不同天气类型的风光出力互补程度, 最后构建风光并网容量比例优化模型, 通过优化算法求解得到不同天气类型的风光最佳并网容量比例。

1.1 风光出力计算方法

1.1.1 风电出力计算

风力发电是利用风能驱动风力发电机将风能转化为电能的过程。风电出力主要受风速的影响, 其计算公式^[26]为

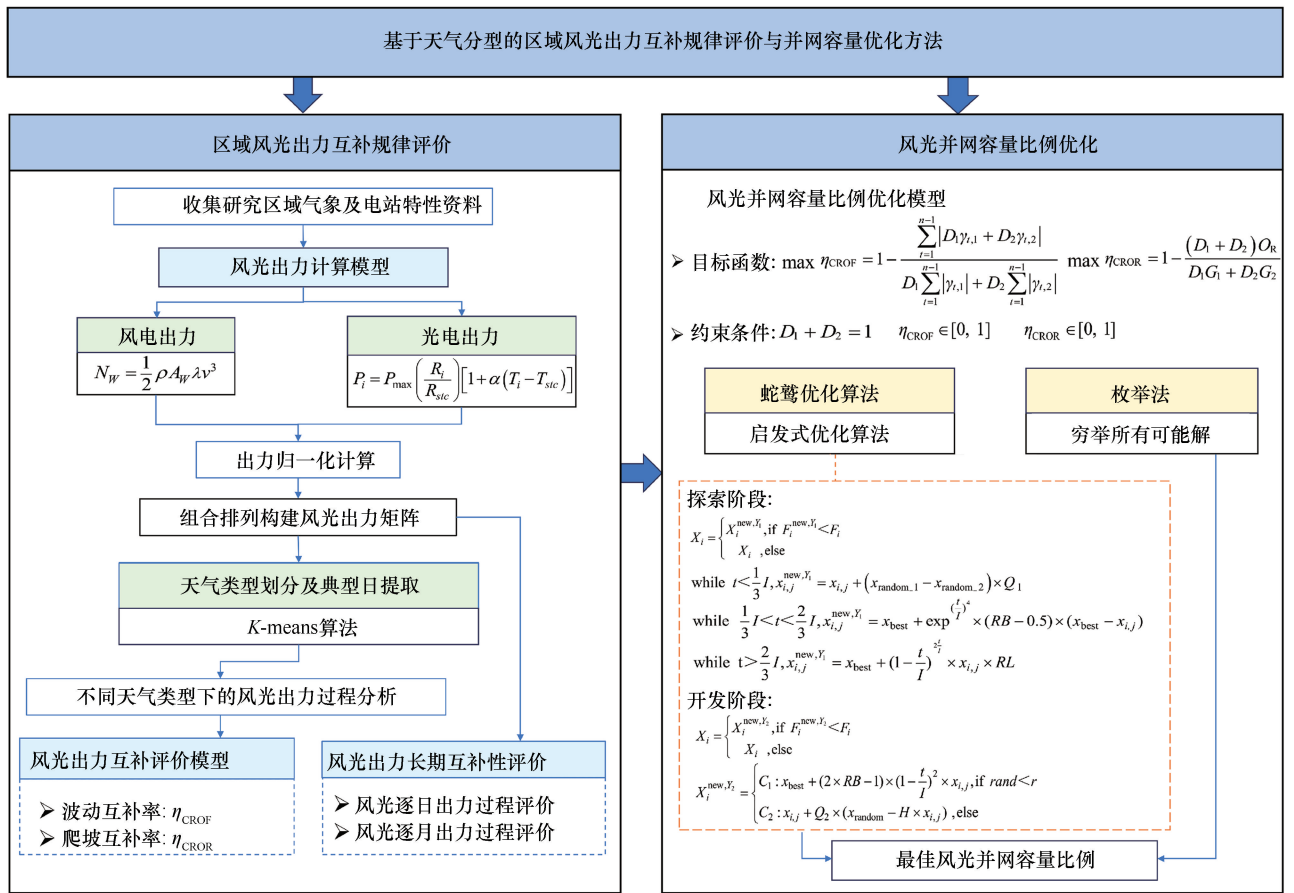


图1 研究框架

Fig. 1 Research framework

$$N_w = \frac{1}{2} \rho A_w \lambda v^3 \quad (1)$$

式中, N_w 为风电出力(W); ρ 为空气密度(kg/m^3); A_w 为风力涡轮机叶片扫掠面积(m^2); λ 为风能利用系数; v 为风速(m/s)。

1.1.2 光电出力计算

光伏发电是利用太阳能电池板将太阳辐射的能量转换为电能的过程。其出力主要受太阳辐射强度、电池板温度影响, 计算公式^[27]为

$$P_i = P_{\max} \left(\frac{R_i}{R_{stc}} \right) [1 + \alpha (T_i - T_{stc})] \quad (2)$$

式中, P_i 为光电出力(W); P_{\max} 为光伏电站装机容量(W); R_i 为太阳辐射强度(W/m^2); T_i 为太阳能电池板温度($^{\circ}\text{C}$); R_{stc} 为标准测试条件下的太阳辐射强度, 取 $1\,000\ \text{W}/\text{m}^2$; T_{stc} 为标准测试条件下的气温, 为 $25\ ^{\circ}\text{C}$; α 为气温功率转换系数, 取 $-0.35\ \%/^{\circ}\text{C}$ 。

太阳能电池板温度可由气象站的实测气温换算得到, 计算公式为

$$T_i = T_{air, i} + \frac{R_i}{R_{stc}} (T_{noc} - T_{stc}) \quad (3)$$

式中, $T_{air, i}$ 为气象站的实测气温($^{\circ}\text{C}$); T_{noc} 为正常运行状态下的太阳能电池板温度, 取 $48\ ^{\circ}\text{C}$ 。

1.1.3 出力归一化处理

为了避免风电站和光伏电站装机容量差异对互补性评价造成影响, 分别对风电和光电出力进行归一化处理, 确保互补性分析结果的可靠性。本文采用归一化公式为

$$E_{new} = \frac{E_{raw} - E_{\min}}{E_{\max} - E_{\min}} \quad (4)$$

式中, E_{raw} 为原始风光出力数据; E_{new} 为归一化后的数据, 范围为 $[0, 1]$; E_{\max} 和 E_{\min} 分别为原始出力数据的最大值和最小值。

1.2 基于 K-means 聚类算法的天气分型

短期时间尺度内, 风光出力的互补特性会受天气的显著影响, 并会随天气类型变化呈现出明显的差异。因此, 在分析风光出力互补特性时, 本文先采用 K-means 算法对天气类型进行划分, 具体流程如图 2 所示。

K-means 聚类算法是一种常见的无监督学习算

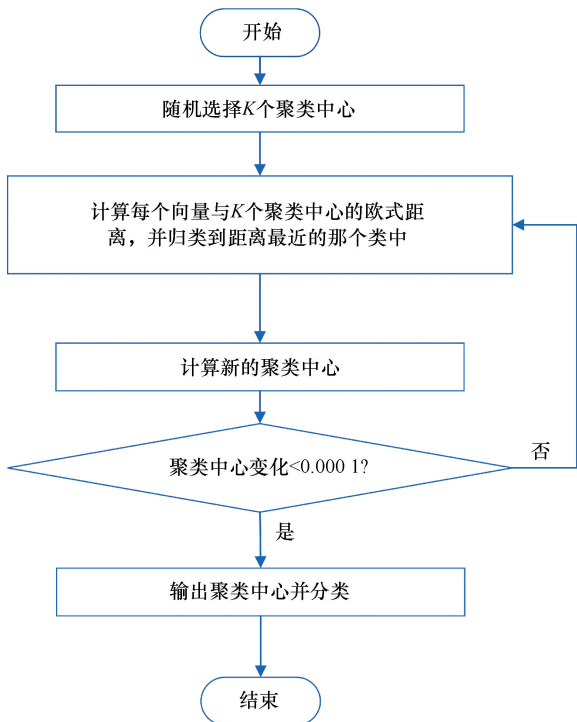


图2 K-means 算法流程

Fig. 2 Flowchart of K-means algorithm

法^[28], 其核心思想是将数据集划分为 K 个簇, 确保每个簇中的数据点尽可能接近其质心, 从而最小化所有簇内数据点到各自质心平方误差的总和。采用轮廓系数法^[29]来评价算法的分类效果, 计算公式为

$$Z_i = \frac{B_i - A_i}{\max\{A_i, B_i\}} \quad (5)$$

式中, A_i 表示第 i 个数据点 X_i 与同簇内其他数据点的平均距离; B_i 表示 X_i 到最近簇的质心的距离; Z_i 表示 X_i 的轮廓系数, 取值范围为 $[-1, 1]$, 越趋近于 1 说明分类效果越佳。

1.3 风光出力互补性评价指标

风光互补性对于构建稳定可靠的电力系统至关重要。波动互补率和爬坡互补率作为评估互补性的有效指标^[12], 能够揭示风光出力的互补特性, 为风光互补发电系统的规划与调度提供科学依据。

风光出力波动互补率是衡量风光互补发电系统出力波动性降低程度的指标。它通过比较风电和光电单独发电与联合发电时的波动量, 评估两者互补后波动性的降低程度。波动互补率介于 0 和 1 之间, 越趋近于 1, 说明风光出力波动互补性越强, 联合发电系统出力波动越小, 运行越稳定。其计算公式为

$$\eta_{CROF} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{n-1} |D_1 \gamma_{t,1} + D_2 \gamma_{t,2}|}{D_1 \sum_{t=1}^{n-1} |\gamma_{t,1}| + D_2 \sum_{t=1}^{n-1} |\gamma_{t,2}|} \quad (6)$$

式中, η_{CROF} 为风光出力波动互补率; D_1 和 D_2 分别为风电和光电在风光互补发电系统中所占的比例; $\gamma_{t,1}$ 和 $\gamma_{t,2}$ 分别为 t 时刻风电和光电出力波动量; n 为时刻总数。

风光出力爬坡互补率是衡量风光互补发电系统出力变化剧烈程度的指标。它通过比较风电和光电单独发电与联合发电时的平均爬坡率, 评估两者互补后爬坡幅度的降低程度。爬坡互补率介于 0 和 1 之间, 越趋近于 1, 说明风光出力爬坡互补性越强, 联合发电系统出力变化越平缓, 对电网的冲击越小。其计算公式为

$$\eta_{CROR} = 1 - \frac{(D_1 + D_2) O_R}{D_1 G_1 + D_2 G_2} \quad (7)$$

$$G_1 = \frac{1}{M_1} \sum_{i=1}^{M_1} \beta_{i,1} \quad (8)$$

$$G_2 = \frac{1}{M_2} \sum_{i=1}^{M_2} \beta_{i,2} \quad (9)$$

式中, η_{CROR} 为风光出力爬坡互补率; 对于需要进行互补性分析的时间段来说, G_1 和 G_2 分别为此时间段内风电和光电出力爬坡率标么值的绝对均值; M_1 和 $\beta_{i,1}$ 分别为此时间段内风电出力爬坡事件次数和第 i 次爬坡事件的爬坡率标么值, M_2 和 $\beta_{i,2}$ 分别为此时间段内光电出力爬坡事件次数和第 i 次爬坡事件的爬坡率标么值; O_R 为一段时间内风电和光电联合出力平均爬坡率; 本文定义 1 h 时间窗口内出力最大值和最小值的绝对差大于额定装机容量的 20% 为 1 次爬坡事件。

1.4 风光并网容量比例优化模型

在风光互补发电系统的运行阶段, 优化风光并网容量比例能够有效提升两者的互补效应, 降低联合发电系统出力的波动性, 从而增强系统的可靠性。为此, 本节将构建一个数学优化模型, 分别以最大化波动互补率和最大化爬坡互补率为目标函数, 采用蛇鹫优化算法和枚举法进行求解, 得出风光最佳并网容量比例, 即 $D_1 : D_2$, 以实现最佳互补效果。

1.4.1 目标函数

(1) 最大化波动互补率 η_{CROF}

$$\max \eta_{CROF} = 1 - \frac{\sum_{t=1}^{n-1} |D_1 \gamma_{t,1} + D_2 \gamma_{t,2}|}{D_1 \sum_{t=1}^{n-1} |\gamma_{t,1}| + D_2 \sum_{t=1}^{n-1} |\gamma_{t,2}|} \quad (10)$$

(2) 最大化爬坡互补率 η_{CROR}

$$\max \eta_{CROR} = 1 - \frac{(D_1 + D_2) O_R}{D_1 G_1 + D_2 G_2} \quad (11)$$

1.4.2 约束条件

(1) 风力发电所占比例 D_1 和光电发电所占比例 D_2 应满足

$$D_1 + D_2 = 1 \quad (12)$$

(2) 波动互补率 η_{CROF} 和爬坡互补率 η_{CROR} 应满足

$$\eta_{CROF} \in [0, 1] \quad (13)$$

$$\eta_{CROR} \in [0, 1] \quad (14)$$

1.4.3 优化算法

为了科学指导风光互补发电系统在运行过程的协同优化调度, 本文分别以波动互补率和爬坡互补率为优化目标构建风光并网容量比例优化模型。采用蛇鹫优化算法和枚举法相互参证的方式求解数学模型, 可以确保计算结果的合理性和可靠性, 得到不同天气类型下的风光最佳并网容量比例。

1.4.3.1 蛇鹫优化算法

蛇鹫优化算法 (Secretary Bird Optimization Algorithm, SBOA) 是由 FU 等^[30]于 2024 年提出的一种全新启发式优化算法, 灵感来源于蛇鹫在自然环境中的生存行为。算法通过模拟蛇鹫捕猎及逃生的策略, 进行全局搜索和局部开发, 最终找到全局最优解或接近最优解的解。本研究将蛇鹫优化算法应用于风光互补发电系统并网容量比例优化问题, 以最大化波动互补率和爬坡互补率为目标, 求解最佳并网容量比例, 以提高联合发电系统的互补性和稳定性。蛇鹫优化算法的具体步骤如下。

(1) 随机初始化, 即随机生成 i 个不同的解, 代表一组不同的风光并网容量比例。

(2) 捕猎策略 (探索阶段), 分为三个阶段。此阶段的风光并网容量比例计算公式为

$$X_i = \begin{cases} X_i^{new, Y_1}, & \text{if } F_i^{new, Y_1} < F_i \\ X_i, & \text{else} \end{cases} \quad (15)$$

式中, Y_1 表示探索阶段; X_i 表示当前状态的风光并网容量比例; F_i 为当前状态下互补性评价指标的值; X_i^{new, Y_1} 表示更新后的风光并网容量比例; F_i^{new, Y_1} 表示探索阶段下, 更新后的互补性评价指标的值。

第一阶段 (寻找猎物): 此阶段通过不断更新风光并网容量比例, 寻找能够最大化互补性评价指标的比例组合。这一阶段可以模拟蛇鹫在广阔的地域内搜索猎物的过程, 蛇鹫不断扩大搜索范围, 寻找潜在的猎物。此阶段的风光并网容量比例为

$$\begin{aligned} \text{while } t < \frac{1}{3}I, x_{i,j}^{new, Y_1} &= x_{i,j} + \\ &(x_{random_1} - x_{random_2}) \times Q_1 \end{aligned} \quad (16)$$

式中, t 表示当前迭代次数; I 表示最大迭代次数; $x_{i,j}$ 表示第 i 个风光并网容量比例在当前状态的第 j 维度值; $x_{i,j}^{new, Y_1}$ 表示第 i 个风光并网容量比例在探索阶段结束时的第 j 维度值; x_{random_1} 和 x_{random_2} 表示探索阶段迭代时随机选取的两个风光并网容量比例; Q_1 表示区间 $[0, 1]$ 中随机生成的维数为 $1 \times Dim$ 的数组, 其中 Dim 为解空间的维数。

第二阶段 (消耗猎物): 此阶段继续更新风光并网容量比例, 使互补性评价指标逐渐接近最优值。这一阶段模拟蛇鹫发现猎物后, 逐渐缩小搜索范围, 最终锁定猎物的过程。此阶段的风光并网容量比例为

$$\begin{aligned} \text{while } \frac{1}{3}I < t < \frac{2}{3}I, x_{i,j}^{new, Y_1} &= \\ x_{best} + \exp\left[\left(\frac{t}{I}\right)^4\right] \times (RB - 0.5) \times (x_{best} - x_{i,j}) \end{aligned} \quad (17)$$

$$RB = randn(1, Dim) \quad (18)$$

式中, $randn(1, Dim)$ 表示从标准正态分布中随机生成的维数为 $1 \times Dim$ 的数组; x_{best} 表示当前的最优风光并网容量比例。

第三阶段 (攻击猎物): 此阶段最终确定风光最佳并网容量比例, 使互补性评价指标达到最大值。这一阶段可以模拟蛇鹫发动攻击并捕获猎物的过程。此阶段的风光并网容量比例为

$$\begin{aligned} \text{while } t > \frac{2}{3}I, x_{i,j}^{new, Y_1} &= x_{best} + \\ \left[\left(1 - \frac{t}{I}\right)^{(2 \times \frac{t}{I})}\right] \times x_{i,j} \times RL \end{aligned} \quad (19)$$

$$RL = 0.5 \times Levy(Dim) \quad (20)$$

式中, $Levy(Dim)$ 表示 $Levy$ 飞行分布函数^[30]。

(3) 逃生策略 (开发阶段)。此阶段通过更新风光并网容量比例, 使风光互补发电系统在面临各种极端天气条件或突发事件时, 能够快速响应并保持稳定运行。这一阶段模拟蛇鹫利用环境伪装或通过飞行来躲避捕食者的过程。此阶段的风光并网容量比例为

$$X_i^{new, Y_2} = \begin{cases} C_1 : x_{best} + (2 \times RB - 1) \times \left(1 - \frac{t}{I}\right)^2 \times x_{i,j}, & \\ \text{if } rand < r & \\ C_2 : x_{i,j} + Q_2 \times (x_{random} - H \times x_{i,j}), & \text{else} \end{cases} \quad (21)$$

$$X_i = \begin{cases} X_i^{new, Y_2}, & \text{if } F_i^{new, Y_2} < F_i \\ X_i, & \text{else} \end{cases} \quad (22)$$

$$H = \text{round}[1 + \text{rand}(1, 1)] \quad (23)$$

式中, Y_2 表示开发阶段; X_i^{new}, Y_2 表示开发阶段结束后的风光并网容量比例; C_1 是指风光互补发电系统面临各种极端天气条件的情况; C_2 是指风光互补发电系统面临突发条件的情况; F_i^{new}, Y_2 表示开发阶段下, 更新后的互补性评价指标的值; r 为 0.5; Q_2 表示从正态分布中随机生成的维数为 $1 \times \text{Dim}$ 的数组; x_{random} 表示当前迭代随机选取的风光并网容量比例; H 表示整数 1 或 2 的随机选择; $\text{rand}(1, 1)$ 表示在 (0, 1) 之间随机生成一个随机数。

1.4.3.2 枚举法

枚举法是一种基本的算法思想, 也称为穷举法。它的原理是枚举所有可能的解, 逐一检查每个解是否符合问题的要求, 从中找到满足特定条件的最优解或全部解。枚举法通常适用于问题空间较小、问题结构简单或无法找到更高效算法的情况。采用枚举法对波动互补率和爬坡互补率进行优化, 可以直观看出最优解。

2 实例研究

2.1 研究区与数据

青海省位于中国西北部, 拥有丰富的风力资源, 特别是在青海湖周边、柴达木盆地等地区, 风速较高, 已建设多个大型风力发电项目。青海省日照充足, 适宜发展光电发电项目, 特别是在柴达木盆地和玛多等地区, 光照条件非常优越。

本文的数据来源于 National Solar Radiation Database, 采用青海省 2020 年的气象数据进行算例分析, 数据长度为 1 年, 时间分辨率为 1 h。通过对气象数据(太阳辐射、温度、风速)进行风光出力计算, 再进行归一化处理, 得到青海省 2020 年归一化后的出力, 据此构建维度为 365×48 的风光出力矩阵。2020 年青海省风电装机容量为 843 万 kW, 光电装机容量为 1 601 万 kW, $D_1 : D_2 = 34 : 66$ 。

2.2 风光出力长期互补性评价

对归一化后的逐时风电出力和光电出力取平均, 得到逐日风电出力和光电出力, 如图 3 所示。再对逐日风电出力和逐日光电出力取平均, 可得逐月风电出力和逐月光电出力, 如图 4 所示。由图 3、图 4 可

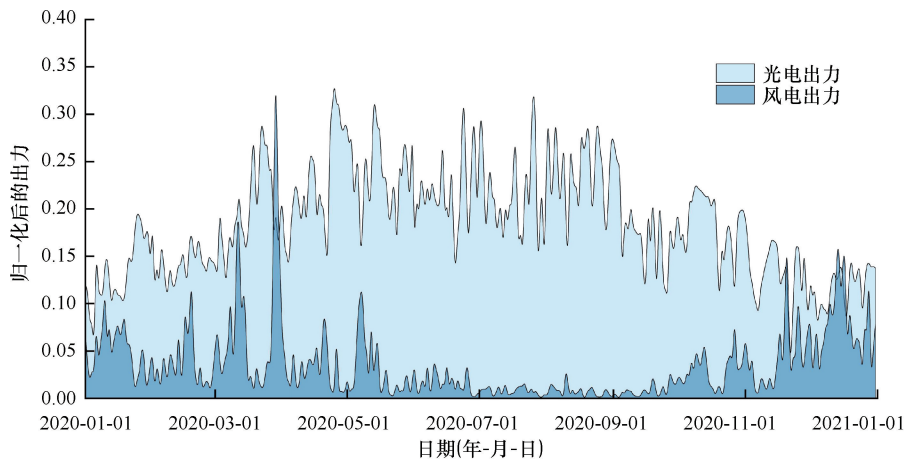


图 3 风光逐日出力过程曲线

Fig. 3 Daily wind and photovoltaic power output curves

知, 青海省夏秋季节风电出力标幺值的均值在 0.07 左右, 而光电出力标幺值的均值在 0.92 左右; 春冬季节风电出力标幺值的均值在 0.05 左右, 而光电出力标幺值的均值在 0.20 左右。表明青海省在夏秋季节太阳能资源更为丰富, 风力资源差别不大。风电出力和光电出力呈现出明显的季节性差异, 夏季和秋季风电出力小, 光电出力大, 说明两者在夏季和秋季具有良好的互补性, 理论上可形成有效的互补发电系统; 春季和冬季风电出力相对较高, 光电出力较低, 互补性较差。

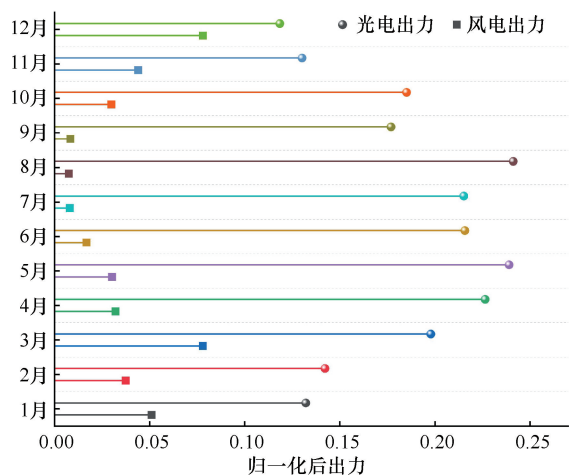


图 4 风光逐月出力过程

Fig. 4 Monthly wind and photovoltaic power output diagram

2.3 天气类型划分及典型日提取

采用轮廓系数法评价 K-means 聚类算法的分类效果, 由图 5 可知, 当聚类簇数 K 取 6 时, 轮廓系数达到最大值, 表明此时分类效果最佳。根据得到的 K 值, 采用 K-means 算法将风光出力数据划分为 6 个不

同的天气类型, 并对每种天气类型进行统计分析, 结果如表 1 所列。进一步地, 将每种天气类型包含的各样本相应时段出力取平均, 得到不同天气类型下典型日的 24 h 出力, 绘制成出力过程线, 如图 6 所示。

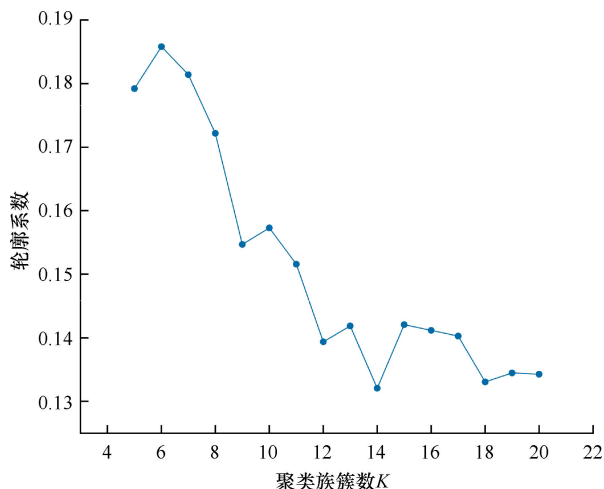


图 5 基于轮廓系数法的聚类结果

Fig. 5 Clustering results based on the silhouette coefficient method

表 1 不同天气类型统计

Table 1 Statistics of different weather types

天气类型	样本数量/d	出现概率/%	聚类中心日期
1	54	14.79	2020-10-29
2	65	17.81	2020-08-31
3	57	15.62	2020-01-23
4	52	14.25	2020-02-08
5	81	22.19	2020-09-09
6	56	15.34	2020-12-19

由图 6 可以看出, 由于不同天气条件对风光出力波动有不同的影响, 导致风光出力波动在不同天气类型下表现出不同的规律, 风电出力受天气条件的影响程度大于光电出力。青海省光电出力很大, 日照时间很长(早上 8 时—晚上 8 时), 大部分时间风电出力较小。青海省光电出力可以划分为两类: (1) 晴天(类型 1、2、4、5)占 66.67%, 出力曲线平滑, 无明显波动, 出力较为稳定且峰值较大; (2) 多云或突变天气(类型 3、6)占 33.33%, 这两种天气类型下光电出力存在局部时段的短时剧烈波动现象, 可能是多云或突变天气使得太阳辐射突然发生较大变化。青海省风电出力可以划分为: (1) 低出力(类型 1、2), 出力标幺值最大峰值在(0, 0.05] 范围内; (2) 中出力(类型 3、5、6), 出力标幺值在(0.05, 0.2] 范围内; (3) 高出力(类型 4), 出力标幺值在(0.2, 1] 范围内。该地区风电出力主要集中在低出力和中出力水平, 占

比超过 80%, 说明该地区风资源条件有待进一步开发, 但该地区风电出力较为稳定, 波动性较小。

2.4 风光出力互补性分析

青海省不同天气类型下风光出力波动互补率和爬坡互补率的对比情况如图 7 所示。由图 7 可知, 不同天气类型下的风光出力互补程度存在明显差异。晴朗天气下风光出力互补性较弱, 波动互补率均值为 1.81%, 爬坡互补率均值为 19.86%; 多云或突变天气下风光出力互补性相比于晴朗天气较强, 波动互补率均值上升至 1.89%, 爬坡互补率均值上升至 22.49%。不同天气类型下, 爬坡互补率的差异大于波动互补率, 且爬坡互补率均值为 20.74%, 而波动互补率均值为 1.84%, 这意味着天气类型对风光出力爬坡特性的影响更为显著。从爬坡性角度看, 除天气类型 1 和 5 以外, 其余各天气类型的爬坡互补率均保持在 10% 以上, 说明风光联合出力可以有效降低出力爬坡率, 提高系统的稳定性。

2.5 不同天气类型下的最佳风光容量并网比例

本节以最大化波动互补率和最大化爬坡互补率为目标, 分别采用蛇鹫优化算法和枚举法对青海省不同天气类型下的风光并网容量比例进行优化, 优化前, 风光并网容量比例为 $D_1 : D_2 = 34 : 66$ 。

两种算法得到的不同天气类型下风光最佳并网容量比例及最佳波动互补率和最佳爬坡互补率的结果如表 2 和表 3 所示。由上述结果可知, 蛇鹫优化算法与枚举法得到的最佳并网容量比例以及对应的最佳互补性指标高度一致, 验证了优化结果的可靠性。同时发现两种方法下, 不同天气类型的最佳并网容量比例均呈现出风力发电占比更高的特点。这表明, 在青海省的气候条件下, 风光互补性主要体现为风电出力在波动性和爬坡性方面的作用更为显著, 因此需要配置更多的风电容量才能实现最佳互补效果。

表 2 蛇鹫优化算法得到的风光最佳并网容量比例

Table 2 Optimal wind and photovoltaic grid-connected capacity ratios obtained from secretary bird optimization algorithm

天气类型	波动互补性		爬坡互补性	
	最佳并网容量比例	最佳波动互补率/%	最佳并网容量比例	最佳爬坡互补率/%
1	97 : 3	10.90	95 : 5	100
2	97 : 3	7.42	93 : 7	100
3	91 : 9	8.67	100 : 0	55.84
4	72 : 28	9.35	84 : 16	20.75
5	94 : 6	8.06	92 : 8	8.51
6	90 : 10	11.25	100 : 0	40.48

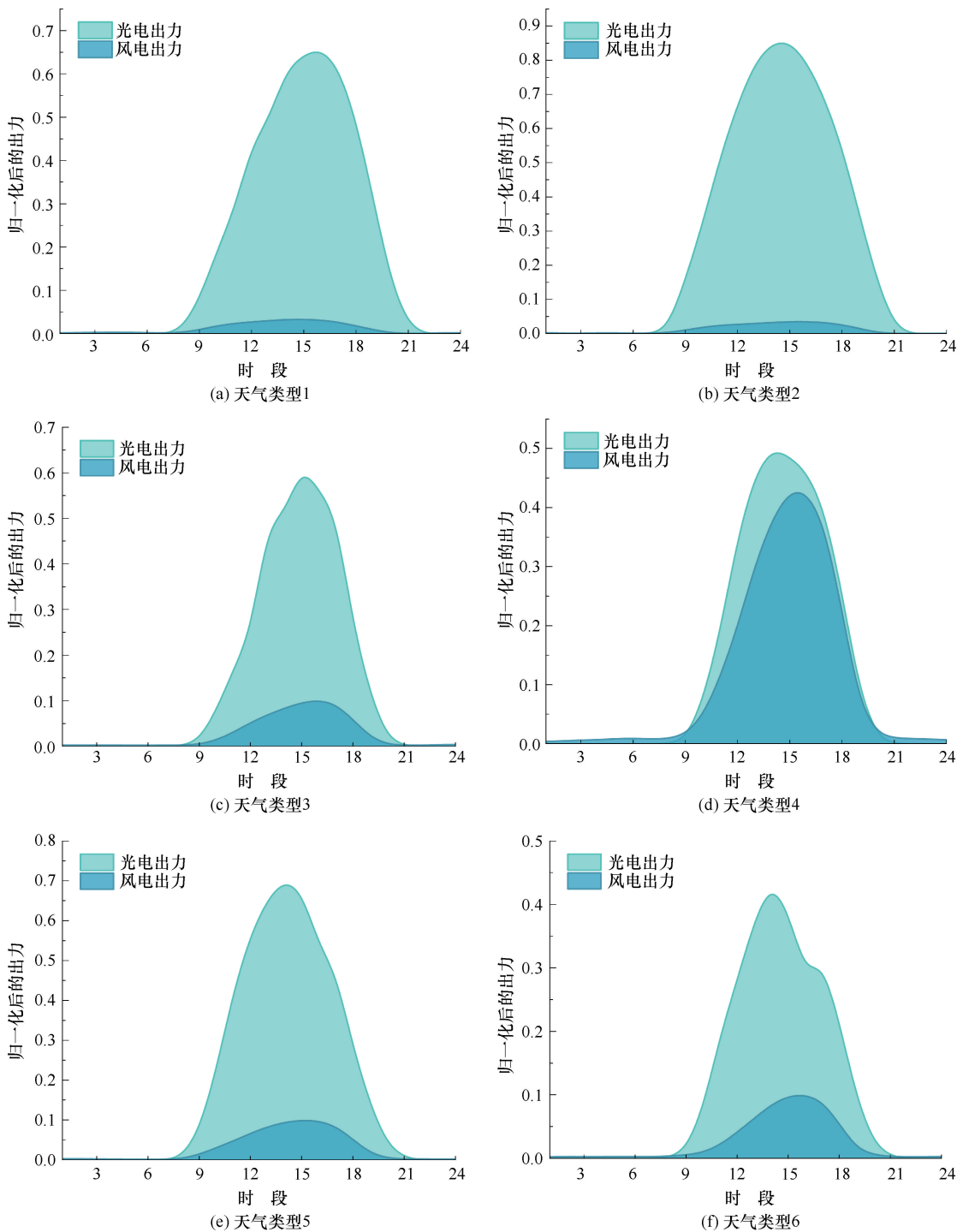


图 6 6 种不同天气类型下相应典型日的 24h 出力过程曲线

Fig. 6 24-hour power output curves for typical days under six different weather types

从波动互补率方面分析, 每种天气类型下优化后的波动互补率均大于优化前的波动互补率, 但提升幅度相对较小。例如天气类型 1 优化前的波动互补率为 0.61%, 优化后的波动互补率为 10.90%, 提升了 10.29%。这表明风光联合出力能够在一定程度上降低出力波动性。从爬坡互补率方面分析, 除了天气类

型 4 以外, 其他天气类型下, 优化后的爬坡互补率均大于优化前的爬坡互补率, 且提升幅度相对较大。例如天气类型 2 优化前的爬坡互补率为 40.65%, 优化后爬坡互补率为 100%, 这表明风光联合出力能够有效降低出力爬坡率, 减少功率爬坡事件的发生概率, 从而提高系统的稳定性。

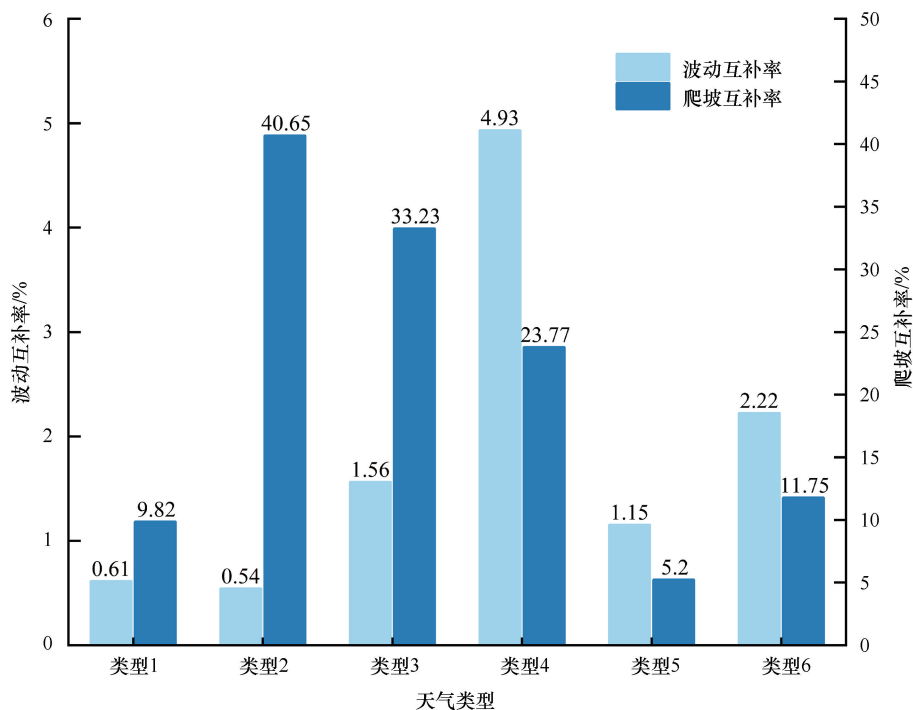


图 7 不同天气类型下风光出力波动互补率和爬坡互补率

Fig. 7 Complementary volatility rates and ramp rates of wind and photovoltaic power output under different weather types

表 3 枚举法得到的风光最佳并网容量比例

Table 3 Optimal wind and photovoltaic grid-connected capacity ratios obtained from enumeration method

天气类型	波动互补性		爬坡互补性	
	最佳并网容量比例	最佳波动互补率/%	最佳并网容量比例	最佳爬坡互补率/%
1	97 : 3	10.86	86 : 14	100
2	97 : 3	7.42	87 : 13	100
3	91 : 9	8.67	95 : 5	56.25
4	73 : 27	9.35	80 : 20	20.80
5	94 : 6	8.06	91 : 19	7.07
6	90 : 10	11.25	100 : 0	40.48

3 结论

本研究提出了基于天气分型的区域风光出力互补规律评价与并网容量优化方法。由于不同天气条件对风电和光电的出力波动有不同的影响,导致风光出力互补在各种天气类型下表现出不同的规律,本文选取 K-means 算法对天气类型进行划分。再基于波动互补率和爬坡互补率两个评价指标,分别从波动性和爬坡性两个层面定量分析不同天气类型下的风光出力互补特性。为了科学指导风光互补发电系统在运行阶段的协同调度,分别以上述两个评价指标为优化目标构建风光并网容量比例优化模型。为了确保计算结果的合

理性,本文同时采用蛇鹫优化算法和枚举法相互参证的方式求解数学模型,得到不同天气类型下的风光最佳并网容量比例。所得结论如下。

(1)青海省夏秋季节风电出力标幺值的均值在 0.05 左右,略微高于冬春季节;而光电出力标幺值的均值在 0.90 以上,远高于冬春季节。说明青海地区风光出力季节差异显著,夏秋季节风光互补性强,理论上可形成有效的互补发电系统,提高发电系统的效率和稳定性。

(2)青海省不同天气类型对风光出力互补性影响显著。晴朗天气下风光互补性较弱,波动互补率为 1.81%,爬坡互补率为 19.86%;多云或突变天气下互补性相对较强,波动互补率上升至 1.89%,爬坡互补率上升至 22.49%。此外,所有天气类型的爬坡互补率均值为 20.74%,远高于波动互补率的均值 1.84%,表明风光联合出力可以有效降低出力爬坡率,提高系统的稳定性。

(3)不同天气类型下,通过调整风光并网容量比例,可以有效提升风光互补发电系统的互补性,降低联合出力的波动性和爬坡性,使波动互补率和爬坡互补率达到最大值。在青海省,优化后的最佳风电容量比例均超过 70%,最佳光电容量比例均低于 30%,体现出风电在平抑系统波动性和爬坡性方面的关键作

用。相较于优化前,波动互补率和爬坡互补率均得到提升,尤其是爬坡互补率提升幅度更为显著,有效增强了系统的稳定性和可靠性。

(4)以上研究局限于风光两能源的互补特性,因此在今后的研究中,可以建立适合水风光三能源互补特性评价的指标体系,揭示水风光三能源互补特性规律。未来还可以将负荷需求纳入风光互补发电系统优化模型,考虑负荷特性以及风光出力与负荷需求的匹配程度,以实现源荷协调,提高系统的供电可靠性。

参考文献 (References):

[1] 古雨. 中国可再生能源发展趋势预测及应用前景分析[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2021.
GU Y. Prediction of Development Trends and Analysis of Application Prospects of Renewable Energy in China[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2021.

[2] 李国英. 为以中国式现代化全面推进强国建设、民族复兴伟业提供有力的水安全保障: 在 2024 年全国水利工作会议上的讲话[J]. 水利发展研究, 2024, 24(1): 1-10.
LI G Y. Improved water security for China's efforts to build itself into a stronger country and rejuvenate the Chinese nation on all fronts by pursuing Chinese modernization: Speech at the 2024 National Water Conservancy Work Conference [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(1): 1-10.

[3] 舒印彪, 陈国平, 贺静波, 等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 61-69.
SHU Y B, CHEN G P, HE J B, et al. Research on building a new power system framework with new energy as the main body [J]. Chinese Engineering Science, 2021, 23(6): 61-69.

[4] MA S K, GENG H, YANG G, et al. Clustering-based coordinated control of large-scale wind farm for power system frequency support [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(4): 1555-1564.

[5] REN G R, LIU J F, WAN J, et al. Overview of wind power intermittency: Impacts, measurements, and mitigation solutions[J]. Applied Energy, 2017, 20: 47-65.

[6] CARVALHO D B, GUARDIA E C, LIMA J W. Technical-economic analysis of the insertion of PV power into a wind-solar hybrid system [J]. Solar Energy, 2019, 191: 530-539.

[7] BEKIRSKY N, HOICKA C E, BRISBOIS M C, et al. Many actors amongst multiple renewables: A systematic review of actor involvement in complementarity of renewable energy sources[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 161: 112368.

[8] LIU W F, ZHU F L, ZHAO T, et al. Optimal stochastic scheduling of hydropower-based compensation for combined wind and photovoltaic power outputs[J]. Applied Energy, 2020, 276: 115501.

[9] COSTOYA X, DECASTRO M, CARVALHO D, et al. Assessing the complementarity of future hybrid wind and solar photovoltaic energy resources for North America[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 173: 113101.

[10] REN G R, WANG W, WAN J, et al. A novel metric for assessing wind and solar power complementarity based on three different fluctuation states and corresponding fluctuation amplitudes [J]. Energy Conversion and Management, 2023, 278: 116721.

[11] 田露, 明波, 张玮, 等. 金沙江下游水风光资源多时间尺度互补性分析[J]. 水力发电学报, 2023, 42(10): 40-49.
TIAN L, MING B, ZHANG W, et al. Multi time scale complementarity analysis of water, wind, and solar resources in the lower reaches of the Jinsha River[J]. Journal of Hydroelectric Power, 2023, 42(10): 40-49.

[12] 朱非林, 樊宇堃, 刘为锋, 等. 龙羊峡地区水-风-光出力互补特性研究[J]. 中国农村水利水电, 2023(3): 181-185.
ZHU F L, FAN Y K, LIU W F, et al. Study on the complementary characteristics of water wind solar power output in Longyangxia area [J]. China Rural Water Resources and Hydropower, 2023(3): 181-185.

[13] MONFORTI F, HULD T, BÓDIS K, et al. Assessing complementarity of wind and solar resources for energy production in Italy. A Monte Carlo approach[J]. Renewable Energy, 2014, 63: 576-586.

[14] 乔延辉, 韩爽, 许彦平, 等. 基于天气分型的风光出力互补性分析方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(2): 82-88.
QIAO Y H, HAN S, XU Y P, et al. A complementary analysis method for wind and solar power output based on weather classification [J]. Power System Automation, 2021, 45(2): 82-88.

[15] 李昕阳, 刘为锋, 郭旭宁, 等. 流域风光水电出力互补特性[J]. 浙江大学学报(工学版), 2024, 58(7): 1505-1515.
LI X Y, LIU W F, GUO X N, et al. Complementary characteristics of wind, solar and hydropower output in river basins [J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Edition), 2024, 58(7): 1505-1515.

[16] 吴晓刚, 阎洁, 葛畅, 等. 基于改进 GRU-CNN 的风光水一体化超短期功率预测方法[J]. 中国电力, 2023, 56(9): 178-186.
WU X G, YAN J, GE C, et al. A wind solar water integrated ultra short term power prediction method based on improved GRU-CNN [J]. China Electric Power, 2023, 56(9): 178-186.

[17] WANG Z L, ZHU H Y, ZHANG D D, et al. Modelling of wind and photovoltaic power output considering dynamic spatio-temporal correlation. Applied Energy, 2023, 352: 121948.

[18] FAN J L, HUANG X, SHI J, et al. Complementary potential of wind-solar-hydro power in Chinese provinces: Based on a high temporal resolution multi-objective optimization model [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 184: 113566.

[19] HAN S, ZHANG L N, LIU Y Q, et al. Quantitative evaluation method for the complementarity of wind-solar-hydro power and optimization of wind-solar ratio [J]. Applied Energy, 2019, 236: 973-984.

[20] 成驰, 陈正洪, 孙朋杰, 等. 基于典型气象条件的风光互补系统容量优化[J]. 太阳能学报, 2021, 42(2): 110-114.
CHENG C, CHEN Z H, SUN P J, et al. Capacity optimization of wind solar complementary systems based on typical meteorological conditions [J]. Journal of Solar Energy, 2021, 42(2): 110-114.

- [21] 赵振宇, 解冰清. 计及风光互补特性的风光容量优化配置模型[J]. 太阳能学报, 2023, 44(8): 149-156.
ZHAO Z Y, XIE B Q. Wind solar capacity optimization configuration model considering wind solar complementary characteristics [J]. Journal of Solar Energy, 2023, 44(8): 149-156.
- [22] 李翠萍, 卓君武, 李军徽, 等. 光伏发电与风光联合发电系统输出特性分析[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(1): 95-102.
LI C P, ZHUO J W, LI J H, et al. Analysis of output characteristics of photovoltaic power generation and wind solar combined power generation system[J]. Power Grid and Clean Energy, 2017, 33(1): 95-102.
- [23] 侯慧, 徐焘, 肖振锋, 等. 基于重力储能的风光储联合发电系统容量规划与评价[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(17): 74-84.
HOU H, XU T, XIAO Z F, et al. Capacity planning and evaluation of wind solar energy storage combined power generation system based on gravity energy storage[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(17): 74-84.
- [24] LIU W F, ZHU F L, CHEN J, et al. Multi-objective optimization scheduling of wind-photovoltaic-hydropower systems considering riverine ecosystem[J]. Energy Conversion and Management, 2019, 196: 32-43.
- [25] 申建建, 王月, 程春田, 等. 水风光互补系统灵活性需求量化及协调优化模型[J]. 水利学报, 2022, 53(11): 1291-1303.
SHEN J J, WANG Y, CHENG C T, et al. Quantification and coordination optimization model for flexibility requirements of hydro-solar-wind complementary system[J]. Journal of Water Resources, 2022, 53(11): 1291-1303.
- [26] 张振东, 唐海华, 覃晖, 等. 风光水互补系统发电效益-稳定性多目标优化调度[J]. 水利学报, 2022, 53(9): 1073-1082.
ZHANG Z D, TANG H H, QIN H, et al. Multi objective optimization scheduling of power generation efficiency stability of wind solar water complementary system[J]. Journal of Water Resources, 2022, 53(9): 1073-1082.
- [27] 明波, 李研, 刘攀. 嵌套短期弃电风险的水光互补中长期优化调度研究[J]. 水利学报, 2021, 52(6): 712-722.
MING B, LI Y, LIU P, et al. Research on medium and long term optimization scheduling of water photovoltaic complementary systems with nested short term abandoned electricity risks [J]. Journal of Water Resources, 2021, 52(6): 712-722.
- [28] AHMED M, SERAJ R, ISLAM S. The K-means Algorithm: A Comprehensive Survey and Performance Evaluation[J]. Electronics, 2020, 9(8): 1295.
- [29] 孙林, 刘梦含, 徐久成. 基于优化初始聚类中心和轮廓系数的K-means 聚类算法[J]. 模糊系统与数学, 2022, 36(1): 47-65.
SUN L, LIU M H, XU J C. K-means clustering algorithm based on optimizing initial clustering centers and contour coefficients[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2022, 36(1): 47-65.
- [30] FU Y F, LIU D, CHEN J D, et al. Secretary bird optimization algorithm: A new metaheuristic for solving global optimization problems[J]. Artificial Intelligence Review, 2024, 57(5): 1-102.

(责任编辑 王海锋)