

基于混合多属性决策方法的新能源电力系统灵活性资源调节能力综合评价

曹书仪¹, 陶洪铸², 王强³, 礼晓飞⁴, 王蕾报⁵, 郭森¹

(1. 华北电力大学经济与管理学院, 北京 102206; 2. 国家电网有限公司, 北京 100031; 3. 国网河北省电力有限公司, 河北石家庄 050021; 4. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192; 5. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北石家庄 050021)

摘要: 合理评估灵活性资源的调节能力, 对于提升电力系统的灵活性以及建设高比例新能源接入的新型电力系统具有重要意义。从经济性和技术性 2 个维度, 提出了新能源电力系统灵活性资源调节能力评价指标体系, 基于熵权法和 MARCOS 相结合的混合多属性决策方法构建了新能源电力系统灵活性资源调节能力综合评价模型, 并对 4 种典型的灵活性资源进行了评估, 结果表明: 爬坡速率、时间尺度调节能力、使用年限和机组调节范围是影响灵活性资源调节能力的关键因素; 电化学储能的调节能力最优, 气电调节能力最差。实证研究与敏感性分析验证了该模型的有效性和可行性。

关键词: 灵活性资源; 调节能力; 新能源电力系统; 熵权法; MARCOS 方法

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202504063

0 引言

能源结构转型是电力行业实现可持续发展的关键。在清洁低碳转型目标的驱动下, 中国新能源装机容量持续快速增长^[1-2]。根据国家能源局的统计数据, 中国发电装机容量在 2024 年 10 月底已达 31.9 亿 kW, 其中风电和太阳能发电装机容量分别同比增长 20.3% 和 48.0%。这一增长趋势标志着中国在能源结构转型方面取得了显著进展。

随着风电、光伏等新能源接入比例的提高以及传统化石能源机组的逐步退出, 电力系统面临的波动性和不确定性显著增加, 这对系统的安全稳定运行构成了巨大的挑战^[3]。为此, 中国政府在《加快构建新型电力系统行动方案(2024—2027)》中提出了“清洁低碳、安全充裕、经济高效、供需协同、灵活智能”的基本原则, 不仅指出了建设新型电力系统的重要性, 同时突出了提升电力系统灵活性的必要性。灵活性资源在适

应新能源接入、保障电力系统稳定运行方面正发挥着越来越重要的作用^[4-5]。这些资源包括能够快速调整输出功率的发电设备、储能设备及其他可响应电力需求的装置。例如, 抽水蓄能和电化学储能等灵活性资源, 具备应对分钟级负荷波动的响应能力, 可有效平抑短时电力供需波动, 促进可再生能源消纳, 降低电力系统运行成本。该方案还指出, 为了进一步提升电网对清洁能源的消纳、配置、调控能力, 中国政府计划在未来 3 年开展 9 项专项行动。这些行动旨在通过科学整合多种灵活性资源, 提升电力系统应对电源、电网和负荷随机波动的能力, 从而增强其灵活性^[6-8]。构建合理有效的电力系统灵活性资源综合评价体系与模型, 对于提升中国电力系统的整体调节能力、促进能源转型和实现电力系统可持续发展至关重要^[9]。

目前, 对于新能源电力系统灵活性资源进行评价的研究主要涉及评价指标的选取与评价模型的构建。文献^[10]在可再生能源发电比例提升的背景下, 提出了爬坡资源不足预期指标(IRRE), 评估了电力系统在高波动性时期的灵活性, 并讨论了运营政策变化和灵活资源增加所带来的相对

收稿日期: 2025-04-25; 修回日期: 2025-05-09。

基金项目: 国家社会科学基金资助项目(25BJY021); 国家电网有限公司科技项目(5108-202218280A-2-299-XG)。

影响。文献[11]对风电、光伏发电、负荷预测进行了不确定性建模，并将机组调峰、爬坡有效容量分布等指标与灵活性需求对比，得到爬坡资源不足的期望，同时考虑弃风对系统灵活性的影响，进一步完善了电力系统灵活性评估方法。文献[12]根据电力系统灵活性需求，通过发电最大出力、最小出力和调节速率等指标与火电机组实时运行数据，对火电机组的调节能力开展了在线评价。文献[13]基于聚合效应，构建了多点分布式储能系统的灵活性评价指标和模型，有效量化了其在应对系统不确定性变化时的调节能力。文献[14]针对3种需求响应资源在电网调频中的作用，从经济性和调频性能2个维度建立了综合评价体系，结合层次分析法与熵权法获得组合权重，最终构建了基于物元可拓法的综合评价模型，对不同需求响应资源的调频效果进行对比分析。文献[15-16]分别将熵权法与模糊聚类、TOPSIS-灰色关联度方法结合构建火电灵活性评价体系。文献[17]通过 MARCO 方法对配电网设备的风险程度进行评估，并基于算例分析与 TOPSIS 方法进行对比，验证了 MARCOS 方法的可靠性与优越性。文献[18]将 MARCOS 方法应用于低碳园区综合效益评估，对5个地区的低碳园区进行排序。灵活性资源在电力系统中的作用日益凸显，对确保电网的安全与稳定运行、推动能源转型具有重要意义。然而，当前灵活性资源的发展仍面临诸多挑战，现有研究多集中于单一资源的优化或对灵活性充裕度的评估，缺乏对不同灵活性资源满足电力系统灵活性需求能力的横向对比与选择。此外，现有评价指标体系的构建还有待完善，须进一步提升评价结果的准确性和客观性。

本文围绕新能源电力系统灵活性资源调节能力的量化评估问题展开系统性研究，核心创新点包括：1) 突破传统单一技术维度评价框架，从经济性与技术性2个维度构建了包含7个具体可量化指标的新能源电力系统灵活性资源调节能力评价指标体系，以此全面刻画灵活性资源的调节能力特征；2) 构建了基于熵权法和 MARCOS 法相结合的新能源电力系统灵活性资源调节能力综合评价模型，运用熵权法得到的评价指标权重仅取决于指标数据分布特征，不包含人为主观因素，采用 MARCOS 方法对灵活性资源调节能力综

合评价的效用函数计算采用相对比值形式，其线性聚合特性适配多类异质灵活性资源的混合决策场景。熵权法客观赋权特性与 MARCOS 方法在多准则排序上的优势形成方法互补，因此本文基于熵权法和 MARCOS 相结合的混合多属性决策方法对4种典型的新能源电力系统灵活性资源调节能力进行综合评估并开展敏感性分析，能够精准量化多类异质灵活性资源的综合调节能力，提升评价结果的科学性与决策适用性。

1 新能源电力系统灵活性资源调节能力评价指标

1.1 评价指标选取思路

新能源电力系统的灵活性资源评价指标呈现多元化特征，合理选择综合评价指标是科学评估其调节能力的基础。本文着眼于电力系统供给侧灵活性资源，对灵活性火电、气电、抽水蓄能与电化学储能4种具有代表性的灵活性资源进行评价。这4种灵活性资源在技术特性上展现出显著差异，且各自在新能源电力系统中提供灵活性时的经济特性有所不同。针对新能源电力系统灵活性资源调节能力的综合评价，本文从2个维度进行深入研究：一方面考虑其技术特点，即调节速率、范围、启停时间等；另一方面，不同的灵活性资源移峰填谷、平抑系统波动时也会产生不同的经济成本，在实际应用中将对灵活性资源的选择产生影响。因此，构建新能源电力系统灵活性资源调节能力综合评价体系时，需要将上述技术特性和经济成本双重因素纳入考量范畴，以确保评估结果的全面性和准确性。

1.2 评价指标体系构建

本文评价指标选取标准主要遵循以下原则：1) 代表性，所选指标应充分反映灵活性资源的核心调节特性，并且各指标之间应当尽可能降低关联性，确保相互独立；2) 可操作性和易获取性，指标数据应易于获取和量化处理，以保证模型的实际应用价值和可操作性；3) 真实性，所有指标的数据来源于发电机组、储能等设备的真实运行情况，确保数据的真实可靠。基于此，本文从经济性和技术性2个方面构建新能源电力系统灵活性资源调节能力评价指标体系，如表1所示。

表 1 电力系统灵活性资源调节能力综合评价指标
Table 1 Comprehensive evaluation indicators for regulation capability of flexibility resources in power systems

目标层	一级指标	二级指标	类型	编号
灵活性资源调节能力	经济性指标	新建或改建投资成本	负向指标	S1
		可变成本	负向指标	S2
		使用年限	正向指标	S3
	技术性指标	爬坡速率	正向指标	S4
		启停时间	负向指标	S5
		机组调节范围	正向指标	S6
		调节时间尺度	正向指标	S7

经济成本作为决策分析的客观依据，能够全面反映灵活性资源的真实代价，帮助相关利益主体和政策决策者更全面地评估灵活性资源的调节能力，推动电力行业的持续健康发展。灵活性资源的经济成本构成包括固定成本、成本增量与机会成本 3 个方面，考虑到数据的可获得性，灵活性资源调节能力的经济成本主要通过以下 3 个经济性指标来反映。

1) 新建或改建投资成本 (S1)，是指该灵活性资源前期进行灵活性提升与改造的成本，或新建灵活性资源的固定成本。由于通常资源容量不等同于灵活性容量，该部分投入成本换算为单位灵活性容量对应成本。

2) 可变成本 (S2)，是指灵活性资源在运行时，由于发挥其调节能力所导致的成本增量。

3) 使用年限 (S3)，体现了各种灵活性资源设备寿命减损的折旧费用。

技术性指标能够通过评价机组的具体参数，全面了解灵活性资源在电力系统中的调节潜力和限制，为系统调度和优化提供重要依据。在新能源电力系统中，灵活性资源通过迅速调整出力范围、时间、速率，应对负荷快速波动、维持电力系统平稳运行。因此，灵活性资源调节能力的技术特性可以通过以下 4 个技术性指标来体现。

1) 爬坡速率 (S4)，是指机组从低负荷状态到额定负荷状态所需的时间，反映了灵活性资源的响应速度，本文以每分钟增加或减少的额定容量百分比来衡量。

2) 启停时间 (S5)，是指在系统及机组正常运行状态下，该资源从启动到并网发电（或从并网发电到停运）所需要的时间。

3) 机组调节范围 (S6)，是指灵活性资源在正常运行条件下，其输出功率或运行状态可以在一定范围内进行调整和变化的能力，调节范围越大，该资源的调节裕度越大，调节能力也就越强。

4) 调节时间尺度 (S7)，用来衡量灵活性资源能够响应并适应不同时间维度上灵活性需求的能力。划分调节时间为短时、中时与长时 3 个时间域范畴，每项资源若能有效适配某一时间维度（短时、中时或长时）的灵活性需求，则赋予相应分值（1 分），累积得分上限设定为 3 分，从而反映电力系统灵活性资源在时间尺度上的综合调节能力。

2 新能源电力系统灵活性资源调节能力综合评价模型

2.1 模型框架概述

在新能源电力系统灵活性资源调节能力评价指标体系的基础上，本文基于熵权法和 MARCOS 相结合的多属性决策方法构建新能源电力系统灵活性资源调节能力综合评价模型，如图 1 所示。

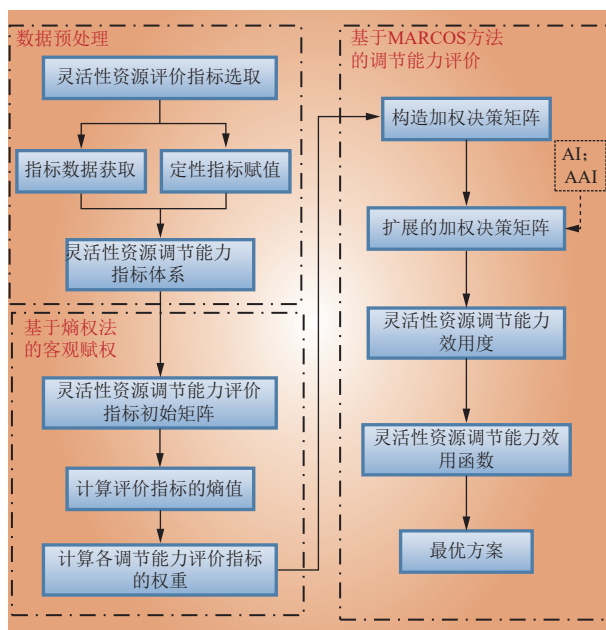


图 1 灵活性资源调节能力评价模型
Fig. 1 Evaluation model for flexibility resource regulation capability

为了实现对新能源电力系统灵活性资源调节能力的有效综合评估，需对各项评价指标进行赋权，本文采用熵权法这一客观方法确定指标权

重。熵权法可以有效避免主观因素的影响，并且客观、精确地体现各评价指标的相对重要性，能够提升评价结果的可靠性。

在确定指标权重后，本文采用 MARCOS 法对灵活性资源调节能力进行综合评价。MARCOS 法是一种新兴的多属性决策方法，能够将权重与各项指标的表现值相结合，综合评估灵活性资源的正向效用与逆向效用，最终确定其效用函数。该方法具有较好的稳健性和准确性，能够有效解决多维度、多属性决策问题，为新能源电力系统灵活性资源调节能力提供可靠的评价依据和最优方案选择。

2.2 基于熵权法的指标权重计算

熵权法^[19-20]是一种基于信息熵原理的权重分配方法，以计算各指标信息熵的方式来确定其权重。在多指标决策的情境下，熵值越小，表示系统的无序程度越低，因此在综合评价中该指标的信息价值越高，从而其权重也相应增加。在新能源电力系统灵活性资源评价中，熵权法能够有效地反映不同指标对系统灵活性的影响程度，避免人为主观因素对权重分配的干扰^[21-25]。基于熵权法的新能源电力系统灵活性资源调节能力综合评价指标权重计算流程包含以下步骤。

步骤 1：定义灵活性资源调节能力评价指标的初始数据矩阵。设待评估的 m 个灵活性资源样本，其调节能力量化涉及 n 个评价指标，建立初始矩阵 X 为

$$X = (x_{ij})_{m \times n}, \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式中： x_{ij} 为第 i 个灵活性资源在第 j 个调节能力评价指标上的参数值。

步骤 2：求解调节能力评价指标 j 的信息熵 H_j 为

$$H_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^m f_{ij} \ln f_{ij} \quad (2)$$

$$f_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (3)$$

式中：参数 f_{ij} 为第 i 个灵活性资源在第 j 个调节能力评价指标上的参数值占所有灵活性资源第 j 个调节能力评价指标参数值总和的比例。

步骤 3：确定各调节能力评价指标的权重。

第 j 个调节能力评价指标的权重 w_j 为

$$w_j = \frac{1 - H_j}{\sum_{j=1}^m (1 - H_j)} \quad (4)$$

2.3 基于 MARCOS 方法的灵活性资源调节能力综合评价

MARCOS 方法是一种多属性决策分析方法，通过构建决策矩阵和计算各属性的权重，实现对多个备选方案的排序和优选，该方法在能源、环境、经济等多个领域得到了广泛应用^[17-18,26-27]。在灵活性资源评价中，MARCOS 方法能够综合考虑灵活性资源的多个属性，充分利用各指标表征数据实际情况，为资源的选择和优化提供决策支持。

采用 MARCOS 方法对灵活性资源调节能力进行评价的具体计算步骤如下。

步骤 1：将正负理想解方案（AI 与 AAI）引入灵活性资源调节能力的初始评价矩阵 X ，生成扩展型评价矩阵 X' 为

$$X' = \begin{matrix} \text{AAI} \\ A_1 \\ A_2 \\ \vdots \\ A_m \\ \text{AI} \end{matrix} \begin{bmatrix} x_{\text{aai}1} & x_{\text{aai}2} & \cdots & x_{\text{aai}n} \\ x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \\ x_{\text{ai}1} & x_{\text{ai}2} & \cdots & x_{\text{ai}n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中： A_1 、 A_2 、 A_m 为第 1、2、 m 个灵活性资源； x_{ain} 为正理想解方案在第 n 个评价指标维度的参数； x_{aain} 为负理想解方案在第 n 个评价指标维度的参数。二者表达式分别为

$$x_{\text{ain}} = \begin{cases} \max x_{ij}, & j \in B \\ \min x_{ij}, & j \in C \end{cases} \quad (6)$$

$$x_{\text{aain}} = \begin{cases} \min x_{ij}, & j \in B \\ \max x_{ij}, & j \in C \end{cases} \quad (7)$$

式中：集合 B 、 C 分别为效益型、成本型指标组成的集合。

步骤 2：将灵活性资源调节能力的扩展型评价矩阵 X' 中的参数 x_{ij} 进行规范化处理，得到矩阵 $N = [n_{ij}]_{m \times n}$ ，具体可表示为

$$n_{ij} = \begin{cases} \frac{x_{\text{ai}}}{x_{ij}}, & j \in C \\ \frac{x_{ij}}{x_{\text{ai}}}, & j \in B \end{cases} \quad (8)$$

步骤 3: 将矩阵 N 与权重系数相乘, 构造灵活性资源调节能力的加权决策矩阵 $V = [v_{ij}]_{m \times n}$, 具体可表示为

$$v_{ij} = n_{ij} \times w_j \quad (9)$$

式中: v_{ij} 为第 i 个灵活性资源在第 j 个调节能力评价指标上的加权值; w_j 为采用熵权法确定的第 j 个调节能力评价指标的权重值。

步骤 4: 求解各灵活性资源调节能力指标相对于正、负理想解的效用度 K_i^+ 、 K_i^- 分别为

$$K_i^+ = \frac{s_i}{s_{ai}} \quad (10)$$

$$K_i^- = \frac{s_i}{s_{aai}} \quad (11)$$

式中: s_i 、 s_{ai} 、 s_{aai} 分别为加权决策矩阵 V 第 i 、 1 、 m 行的元素之和。

步骤 5: 计算各灵活性资源调节能力的效用函数 $f(K_i)$ 为

$$f(K_i) = \frac{K_i^+ + K_i^-}{1 + \frac{1 - f(K_i^+)}{f(K_i^+)} + \frac{1 - f(K_i^-)}{f(K_i^-)}} \quad (12)$$

式中: $f(K_i^+)$ 为第 i 个灵活性资源相对于正理想解的效用函数; $f(K_i^-)$ 为第 i 个灵活性资源相对于负理想解的效用函数, 二者表达式为

$$f(K_i^+) = \frac{K_i^+}{K_i^+ + K_i^-} \quad (13)$$

$$f(K_i^-) = \frac{K_i^-}{K_i^+ + K_i^-} \quad (14)$$

步骤 5: 排序与决策。

根据效用函数 $f(K_i)$ 的数值大小对灵活性资源的调节能力进行排序。 $f(K_i)$ 值最高的灵活性资源, 表明其调节能力最好。

3 实证研究

本文选取灵活性火电、气电、抽水蓄能和电化学储能 4 种灵活性资源作为研究对象进行实证分析。

3.1 实证结果分析

参考研究 [4, 28-32], 并通过实地调研收集各

$$X = \begin{bmatrix} 1.0000 & 1.0000 & 0.1176 & 0.0100 & 0.0100 & 0.0100 & 1.0000 \\ 0.6080 & 0.0100 & 0.2647 & 0.0316 & 0.5577 & 0.0769 & 0.0100 \\ 0.0100 & 0.8611 & 1.0000 & 0.1579 & 0.9101 & 1.0000 & 1.0000 \\ 0.8640 & 0.8889 & 0.0100 & 1.0000 & 1.0000 & 1.0000 & 0.0100 \end{bmatrix} \quad (15)$$

指标初始数据, 整理后如表 2 所示。需要说明的是, 灵活性火电选取灵活性改造后的常规煤电机组数据; 灵活性火电与气电的可变成本通过核算机组在低负载运行下提供灵活调节服务时的运行成本增量计算得出; 抽水蓄能与电化学储能的可变成本通过机组转化效率与充电电价计算得出; 通过计算机组最大出力与最小出力差值, 从而将机组调节范围的区间值转化为具体数值; 时间尺度调节能力根据实际情况赋值给出。

由于选取的灵活性资源评价指标的单位不尽相同, 为避免量纲差异对权重计算的影响, 采用极值法对原始数据进行归一化处理。该方法能保留指标间的变异程度, 归一化结果如表 3 所示。

表 2 灵活性资源评价指标初始数据
Table 2 Initial data of flexibility resource evaluation indicators

指标	灵活性火电	气电	抽水蓄能	电化学储能
固定成本/(元·kW ⁻¹)	650	3100	6900	1500
可变成本/(元·(kW·h) ⁻¹)	0.2095	0.5700	0.2619	0.2465
使用年限/年	20	30	80	12
爬坡速率/(Pn·min ⁻¹)	5%	8%	20%	100%
启停时间/h	4.500	2.000	0.420	0.017
机组调节范围/%	70	80	200	200
时间尺度调节能力	2	1	2	1

表 3 灵活性资源指标归一化
Table 3 Normalization of flexibility resource indicators

指标	灵活性火电	气电	抽水蓄能	电化学储能
固定成本	1.0000	0.6080	0.0000	0.8640
可变成本	1.0000	0.0000	0.8546	0.8974
使用年限	0.1176	0.2647	1.0000	0.0000
爬坡速率	0.0000	0.0316	0.1579	1.0000
启停时间	0.0000	0.5577	0.9101	1.0000
机组调节范围	0.0000	0.0769	1.0000	1.0000
调节时间尺度	1.0000	0.0000	1.0000	0.0000

参考文献 [33-35], 为避免归一化后数据中的零值导致熵值计算失效, 选取极小值 0.01 对零值进行非负平移, 得到调节能力评价指标的参数值 x_{ij} , 建立初始矩阵 X 为

通过熵权法客观赋权，根据式 (1) ~ (4) 计算得到 4 种灵活性资源调节能力评价指标的权重，如表 4 所示。其中，爬坡速率的熵值最小，表明该指标的信息贡献度最高，因此其指标权重也最大。

表 4 灵活性资源调节能力指标的权重及排序
Table 4 Weights and rankings of flexibility resource regulation capability indicators

编号	指标	熵值	权重	排序
S1	固定成本	0.7938	0.0831	6
S2	可变成本	0.8054	0.0784	7
S3	使用年限	0.5753	0.1710	3
S4	爬坡速率	0.3998	0.2417	1
S5	启停时间	0.7877	0.0855	5
S6	机组调节范围	0.6148	0.1551	4
S7	调节时间尺度	0.5401	0.1852	2

在获取灵活性资源调节能力评价指标权重的基础上，运用 MARCOS 方法对 4 种灵活性资源的调节能力进行综合评价，结果如表 5 所示。

表 5 基于 MARCOS 模型的灵活性资源调节能力评价结果
Table 5 Evaluation results of flexibility resource regulation capability based on the MARCOS model

方案	K^+	K^-	$f(K_i)$	排序
灵活性火电	0.456	2.058	0.438	3
气电	0.285	1.286	0.274	4
抽水蓄能	0.634	2.862	0.610	2
电化学储能	0.702	3.169	0.675	1

$f(K_i)$ 值表示第 i 个方案的最终效用值， $f(K_i)$ 值越大，表示该方案的综合得分越好，离正理想解越近，优先级越高。由表 4 可以看出，4 种调节资源中，电化学储能的 $f(K_i)$ 值最大，表明该灵活性资源的调节能力最好；抽水蓄能、灵活性火电的调节能力次之；气电的 $f(K_i)$ 值最小，表明该灵活性资源的调节能力最差。基于指标归一化值的 4 种灵活性资源各指标表现情况如图 2 所示。

从经济性指标维度来看，对于固定成本 (S1)，灵活性火电表现最好，电化学储能次之；对于可变成本 (S2)，灵活性火电、电化学储能、抽水蓄能与气电相比有较大优势；对于使用年限 (S3)，抽水蓄能表现突出，这意味着其在长期运营中可能更具经济性。

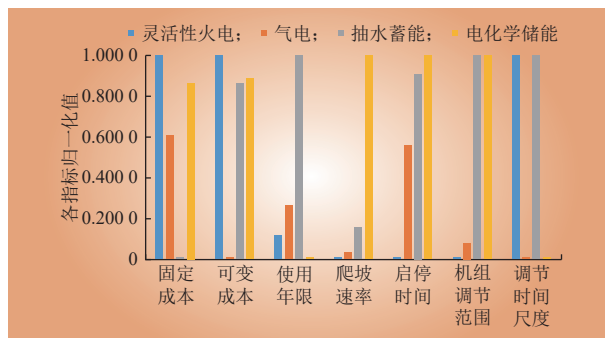


图 2 灵活性资源各调节能力指标表现对比情况
Fig. 2 Performance comparison of flexibility resource regulation capability indicators

从技术性指标维度来看，对于爬坡速率 (S4)、启停时间 (S5)，电化学储能表现最好，优势明显，显示出其在快速响应电网需求变化方面的优越性；对于机组调节范围 (S6)，电化学储能与抽水蓄能表现较好；对于调节时间尺度 (S7)，抽水蓄能与灵活性火电表现较好，使得它们在短期和长期调节中都具有较强应用价值。

电化学储能调节能力较优的主要原因在于：一方面，电化学储能可在可变成本、爬坡速率、启停时间、机组调节范围指标下都有较好的表现；另一方面，在所有评价指标中爬坡速率的权重最大，且电化学储能在这一指标下的表现远优于灵活性火电、气电和抽水蓄能。这一显著优势对模型的评价结果产生了重大影响，是电化学储能在本文综合评价结果中占据优势的关键因素。由于在多个关键指标上的出色表现，电化学储能被评为调节能力最优的资源类型。在电力系统实际运行过程中，以锂离子电池为代表的电化学储能能够提供毫秒到分钟级别的调节能力，快速响应电网需求，提供或吸收过剩电量，这种快速响应能力有助于电网的频率调节和负荷平衡，确保新能源电力系统的稳定运行。

此外，抽水蓄能在多个评价指标下表现良好，尤其在使用年限和机组调节范围方面，显示出其在长期运营和向上、向下调节电力需求的潜力。这些特点使得抽水蓄能成为一种具有较好调节能力的能源类型。相比之下，气电在使用年限和启停时间指标上表现较好，但在其他调节能力评价指标上并不具备明显优势，这导致气电调节能力相对较差。

3.2 敏感性分析

本文进一步通过敏感性分析，验证熵权法和 MARCOS 混合多属性决策方法在新能源电力系统

灵活性资源调节能力评价中的应用性。当灵活性资源调节能力各指标的权重分别变动正负 10%、20% 和 30% 时，综合评价结果的变动如图 3 所示。

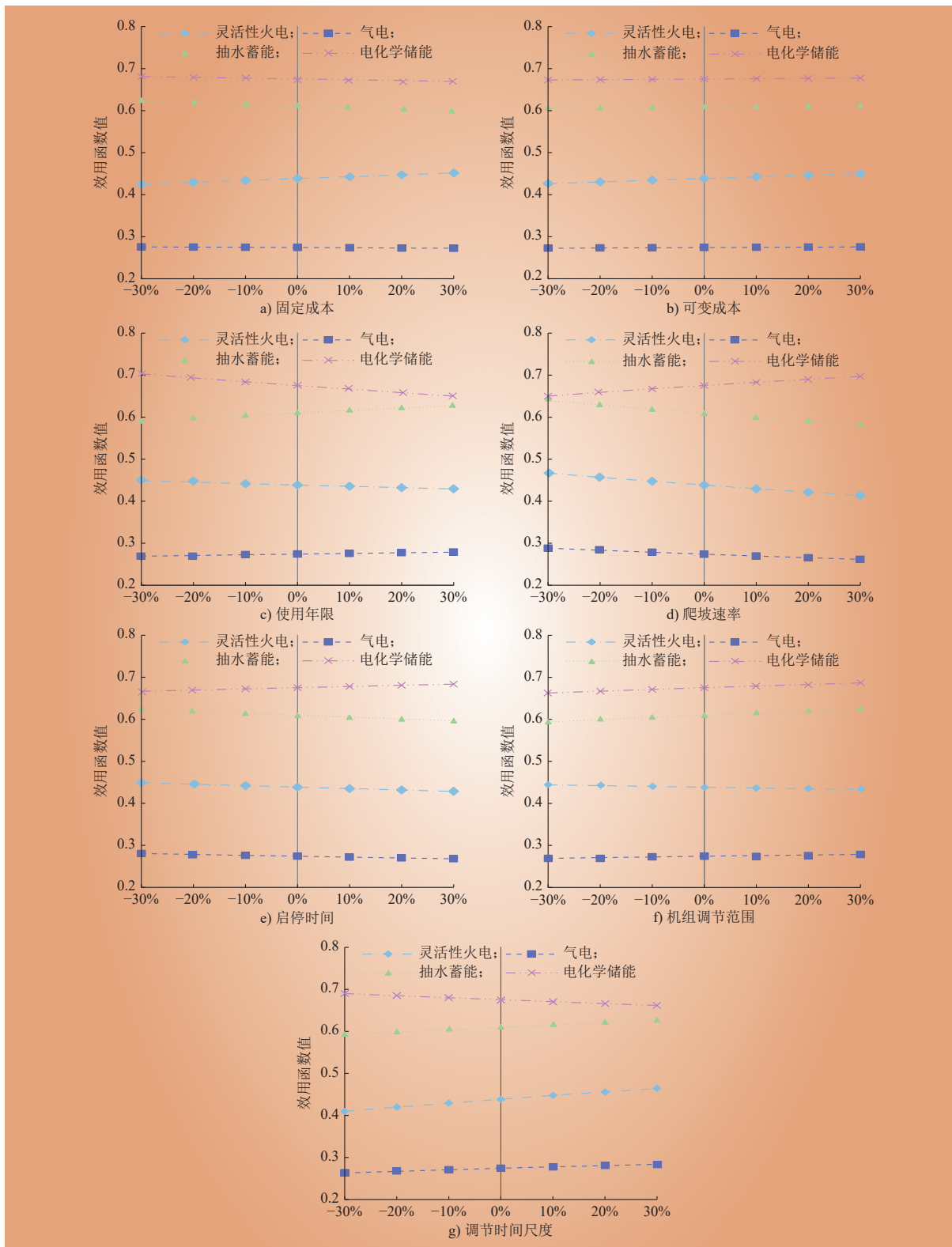


图 3 敏感性分析结果

Fig. 3 Sensitivity analysis results

从图 3 敏感性分析结果可以看出，所有指标的权重变化对不同方案的效用系数影响相对稳定，未出现极端的波动情况，表明该模型在新能源电力系统灵活性资源调节能力综合评价中具有较好的稳定性和适用性。

具体而言，根据经济性指标的敏感性分析结果可以得出，固定成本指标的变动对于灵活性火电和抽水蓄能的影响更加明显。这是由于固定成本的增加，导致其在市场中的竞争力下降、延长投资回收期，从而降低机组的经济性。机组使用年限是更为重要的经济性指标，且其对抽水蓄能和电化学储能调节能力的影响更为显著。因此，对抽水蓄能和电化学储能进行定期维护和技术升级，延长设备使用寿命，可以摊薄经济成本，提高机组的调节能力。

基于技术性指标的敏感性分析结果可以得出，爬坡速率、调节时间尺度是影响本文 4 种灵活性资源调节能力中最重要的指标。因此，应当重点聚焦提升机组的爬坡速率、提高机组在不同时间维度上提供灵活性的能力，从而有效增强机组的调节能力，为新能源电力系统提供灵活性。

4 结论

本文提出了 1 种基于熵权法和 MARCOS 多属性决策方法的新能源电力系统灵活性资源调节能力评价模型，通过经济性和技术性 2 个维度对 4 种典型灵活性资源进行了综合评价，证实了该模型的有效性，得出以下结论。

1) 在经济层面，各机组的使用年限和固定成本对灵活性资源综合调节能力的影响较为明显；在技术层面，爬坡速率、调节时间尺度、机组调节范围是需要重点关注的指标，通过优化上述指标的性能值，能够增强灵活性资源调节能力的综合表现。

2) 综合经济性和技术性，电化学储能在调节能力方面最优，其在未来电力系统中具有广阔的应用前景，其次为抽水蓄能和灵活性火电，而气电的综合调节能力最差。

随着中国新能源的发展和新型电力系统的建设，在未来研究中，可考虑更多样且有可实施性的灵活性资源类型，并结合新的形势对灵活性资

源调节能力评价指标体系进行动态调整，进一步提升模型的适应性和准确性，提供科学化、实用化的决策支撑。

参考文献：

- [1] 孙怡文, 邢海军, 施怡沁, 等. 新型电力系统多时间尺度充裕性评估及量化分析 [J]. 智慧电力, 2025, 53(6): 35–42.
SUN Yiwen, XING Haijun, SHI Yiqin, *et al.* Multi-time scale adequacy assessment and quantitative analysis of new-type electric power systems[J]. Smart Power, 2025, 53(6): 35–42.
- [2] 张爱军, 刘石川, 慕腾, 等. 新能源发电富集地区输电系统规划方案的综合评价 [J]. 智慧电力, 2025, 53(2): 16–24.
ZHANG Aijun, LIU Shichuan, MU Teng, *et al.* Comprehensive evaluation of transmission system planning schemes in renewable energy generation enrichment region[J]. Smart Power, 2025, 53(2): 16–24.
- [3] 董昱, 孙大雁, 许丹, 等. 新型电力系统电力电量平衡的挑战、应对与展望 [J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(6): 2039–2057.
DONG Yu, SUN Dayan, XU Dan, *et al.* Challenges, response and prospects for power balance in new power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(6): 2039–2057.
- [4] 张凯, 袁家海, 丁保迪, 等. 新型电力系统灵活性资源提升效益评估 [J]. 气候变化研究进展, 2024, 20(3): 316–326.
ZHANG Kai, YUAN Jiahai, DING Baodi, *et al.* Evaluation of flexibility enhancement benefits for the new power system[J]. Climate Change Research, 2024, 20(3): 316–326.
- [5] ZHANG Y Q, CHEN Z W, ZHOU J H, *et al.* Reliability analysis of power system considering flexibility resources[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2532(1): 012011.
- [6] AKRAMI A, DOOSTIZADEH M, AMINIFAR F. Power system flexibility: an overview of emergence to evolution[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(5): 987–1007.
- [7] GHARIBVAND H, GHAREHPETIAN G B, ANVARI-MOGHADDAM A. A survey on microgrid flexibility resources, evaluation metrics and energy storage effects[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 201: 114632.
- [8] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 9–20.
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017,

- 37(1): 9–20.
- [9] MA J J, LIU Y K, ZHANG S H, *et al.* Comprehensive probabilistic assessment on capacity adequacy and flexibility of generation resources[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2023, 145: 108677.
- [10] LANNNOYE E, FLYNN D, O'MALLEY M. Evaluation of power system flexibility[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(2): 922–931.
- [11] 杨策, 孙伟卿, 韩冬. 考虑新能源消纳能力的电力系统灵活性评估方法[J]. *电网技术*, 2023, 47(1): 338–349.
- YANG Ce, SUN Weiqing, HAN Dong. Power system flexibility evaluation considering renewable energy accommodation[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(1): 338–349.
- [12] 周策, 闫俊, 王浩霖, 等. 火电机组调节能力在线评估技术应用分析[J]. *山西电力*, 2023(1): 61–64.
- ZHOU Ce, YAN Jun, WANG Haolin, *et al.* Application analysis of on-line evaluation technology for regulating capacity of thermal power units[J]. *Shanxi Electric Power*, 2023(1): 61–64.
- [13] 施涛, 司学振, 饶宇飞, 等. 考虑聚合效应的多点分布式储能系统灵活性评价方法研究[J]. *电网与清洁能源*, 2019, 35(12): 67–73.
- SHI Tao, SI Xuezheng, RAO Yufei, *et al.* Research on flexibility evaluation method of multi-point distributed energy storage system considering aggregation effect[J]. *Power System and Clean Energy*, 2019, 35(12): 67–73.
- [14] 黄鸣宇, 王鹏宇, 张庆平, 等. 计及调节性能及经济性的需求响应资源参与电网调频综合评价[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2022, 55(8): 822–832.
- HUANG Mingyu, WANG Pengyu, ZHANG Qingping, *et al.* Comprehensive evaluation of power grid frequency regulation with the participation of demand response resources in consideration of control performance and economy[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2022, 55(8): 822–832.
- [15] 王志杰, 陈文, 朱晓星, 等. 基于数据驱动的火电机组灵活性综合评价方法及应用[J]. *现代电力*, 2024, 41(4): 667–672.
- WANG Zhijie, CHEN Wen, ZHU Xiaoxing, *et al.* Comprehensive evaluation method for thermal power unit flexibility based on data-driven and its application[J]. *Modern Electric Power*, 2024, 41(4): 667–672.
- [16] 董军, 彭诗程, 包阿茹汗, 等. 新型电力系统火电综合价值分析与评估[J]. *重庆理工大学学报(自然科学)*, 2022, 36(12): 259–268.
- DONG Jun, PENG Shicheng, BAO Aruhan, *et al.* Analysis and evaluation of comprehensive value of thermal power in the new power system[J]. *Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science)*, 2022, 36(12): 259–268.
- [17] 王敏, 邹婕, 王惠琳, 等. 基于改进的 AHP-CRITIC-MARCOS 配电网设备风险评估方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(3): 164–172.
- WANG Min, ZOU Jie, WANG Huilin, *et al.* Improved AHP-CRITIC-MARCOS-based risk assessment method for distribution network equipment[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(3): 164–172.
- [18] 陈星彤, 张宁, 王轶楠, 等. 基于混合赋权和 MARCOS 模型的低碳园区综合效益评价研究[J]. *智慧电力*, 2024, 52(5): 23–30.
- CHEN Xingtong, ZHANG Ning, WANG Yinan, *et al.* Comprehensive benefit evaluation of low-carbon industrial parks based on combination weighting and MARCOS model[J]. *Smart Power*, 2024, 52(5): 23–30.
- [19] 李勇, 吴含欣, 李婵斌, 等. 考虑多维气象指标的配电网短期负荷预测[J]. *智慧电力*, 2025, 53(6): 116–123.
- LI Yong, WU Hanxin, LI Chanxiao, *et al.* Short-term load forecasting for distribution networks considering multidimensional meteorological indicators[J]. *Smart Power*, 2025, 53(6): 116–123.
- [20] 章穗, 张梅, 迟国泰. 基于熵权法的科学技术评价模型及其实证研究[J]. *管理学报*, 2010, 7(1): 34–42.
- ZHANG Sui, ZHANG Mei, CHI Guotai. The science and technology evaluation model based on entropy weight and empirical research during the 10th five-year of China[J]. *Chinese Journal of Management*, 2010, 7(1): 34–42.
- [21] 付忠广, 刘炳含, 刘璐, 等. 融合熵权 TOPSIS 法与灰色关联度法的火电机组综合评价方法[J]. *华北电力大学学报(自然科学版)*, 2018, 45(6): 68–75,83.
- FU Zhongguang, LIU Binghan, LIU Lu, *et al.* Comprehensive evaluation method of thermal power unit on basis of entropy weight TOPSIS method and grey relational grade method[J]. *Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition)*, 2018, 45(6): 68–75,83.
- [22] 艾欣, 秦珺晗, 胡寰宇, 等. 基于最优最劣法-熵权-逼近理想解排序法的电网安全与效益综合评价[J]. *现代电力*, 2021, 38(1): 60–68.
- AI Xin, QIN Junhan, HU Huanyu, *et al.* Comprehensive evaluation of power grid security and benefit based on BWM entropy weight TOPSIS method[J]. *Modern Electric Power*, 2021, 38(1): 60–68.
- [23] 郭杉, 田苗, 田智, 等. 基于改进 TOPSIS 模型的配电台区电压质量评估方法[J]. *内蒙古电力技术*, 2023, 41(1): 45–51.
- GUO Shan, TIAN Miao, TIAN Zhi, *et al.* Evaluation method of voltage quality in distribution station area based on improved

- TOPSIS model[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2023, 41(1): 45–51.
- [24] 贾开华, 于云霞, 范秀波, 等. 基于 AHP-EWM 综合赋权和 TOPSIS 法的多能互补系统综合评价 [J]. 中国电力, 2023, 56(7): 228–238.
JIA Kaihua, YU Yunxia, FAN Xiubo, *et al.* Multi-criteria comprehensive evaluation of multi-energy complementary system based on AHP-EWM and TOPSIS method[J]. Electric Power, 2023, 56(7): 228–238.
- [25] 赵源上, 林伟芳. 基于皮尔逊相关系数融合密度峰值和熵权法典型场景研究 [J]. 中国电力, 2023, 56(5): 193–202.
ZHAO Yuanshang, LIN Weifang. Research on typical scenarios based on fusion density peak value and entropy weight method of Pearson's correlation coefficient[J]. Electric Power, 2023, 56(5): 193–202.
- [26] STEVIĆ Ž, PAMUČAR D, PUŠKA A, *et al.* Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to COmpromise solution (MARCOS)[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 140: 106231.
- [27] 梁小侠, 谢军, 田永川, 等. 基于组合权重和改进的 MARCOS 配电网设备风险评估方法 [J]. 电工技术, 2024(5): 117–121.
LIANG Xiaoxia, XIE Jun, TIAN Yongchuan, *et al.* Assessment of distribution network equipment risks based on combined weighting and modified MARCOS[J]. Electric Engineering, 2024(5): 117–121.
- [28] 许宗鑫, 崔杨, 岳飞, 等. 考虑等效寿命损耗及多维度效益的电网侧储能系统容量优化配置 [J]. 东北电力大学学报, 2025, 45(1): 73–82.
XU Zongxin, CUI Yang, YUE Fei, *et al.* Optimal capacity configuration of grid-side energy storage system considering equivalent life loss and multi-dimensional benefits[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2025, 45(1): 73–82.
- [29] 林毅, 林威, 吴威, 等. 电化学储能和抽水蓄能电站参与多市场联合运行价值分析 [J]. 中国电力, 2023, 56(7): 175–185.
LIN Yi, LIN Wei, WU Wei, *et al.* Analysis on operation value of electrochemical energy storage and pumped storage participating in a joint market[J]. Electric Power, 2023, 56(7): 175–185.
- [30] 徐若晨, 张江涛, 刘明义, 等. 电化学储能及抽水蓄能全生命周期度电成本分析 [J]. 电工电能新技术, 2021, 40(12): 10–18.
XU Ruochen, ZHANG Jiangtao, LIU Mingyi, *et al.* Analysis of life cycle cost of electrochemical energy storage and pumped storage[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(12): 10–18.
- [31] 文军, 刘楠, 裴杰, 等. 储能技术全生命周期度电成本分析 [J]. 热力发电, 2021, 50(8): 24–29.
WEN Jun, LIU Nan, PEI Jie, *et al.* Life cycle cost analysis for energy storage technology[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(8): 24–29.
- [32] 张大海, 孙锴, 史一茹, 等. 考虑灵活资源及模数驱动方法的电力系统调度方法综述 [J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 42–54.
ZHANG Dahai, SUN Kai, SHI Yiru, *et al.* Overview of power system dispatching methods considering flexible resources and model-data driven[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 42–54.
- [33] 冷仙, 曾源, 周键, 等. 基于熵权 TOPSIS 法的西南自然保护区景观保护成效评价 [J]. 生态学报, 2023, 43(3): 1040–1053.
LENG Xian, ZENG Yuan, ZHOU Jian, *et al.* Landscape conservation effectiveness assessment of nature reserves based on entropy weight-TOPSIS in Southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 1040–1053.
- [34] 张家明, 赵迪斐, 郭英海, 等. 基于模糊变异熵权法的页岩气藏多参数评价: 以四川盆地武隆地区 F-2 井为例 [J]. 河南理工大学学报 (自然科学版), 2024, 43(6): 57–68, 81.
ZHANG Jiaming, ZHAO Difei, GUO Yinghai, *et al.* Multiple parameter evaluation of shale gas reservoirs based on a fuzzy entropy weight and coefficient variation method: a case of well F-2 in Wulong Area, Sichuan Basin[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2024, 43(6): 57–68, 81.
- [35] 李梓嘉, 周佳, 彭方旭. 基于熵权 TOPSIS 法的抽水蓄能电站与光伏配套开发综合评价 [J]. 水电能源科学, 2025, 43(3): 205–209, 195.
LI Zijia, ZHOU Jia, PENG Fangxu. Comprehensive evaluation of integrated development of pumped storage power stations and photovoltaic systems based on entropy weight TOPSIS method[J]. Water Resources and Power, 2025, 43(3): 205–209, 195.



曹书仪

作者简介:

曹书仪 (1999), 女, 硕士研究生, 从事新型电力系统灵活性、电碳市场研究, E-mail: caoshuyi99@163.com;

郭森 (1987), 通信作者, 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 教研室主任, 从事新型电力系统灵活性、电

碳市场研究, E-mail: guosen324@163.com。

(责任编辑 于静茹)

(下转第 87 页)

- TOPSIS model[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2023, 41(1): 45–51.
- [24] 贾开华, 于云霞, 范秀波, 等. 基于 AHP-EWM 综合赋权和 TOPSIS 法的多能互补系统综合评价 [J]. 中国电力, 2023, 56(7): 228–238.
JIA Kaihua, YU Yunxia, FAN Xiubo, *et al.* Multi-criteria comprehensive evaluation of multi-energy complementary system based on AHP-EWM and TOPSIS method[J]. Electric Power, 2023, 56(7): 228–238.
- [25] 赵源上, 林伟芳. 基于皮尔逊相关系数融合密度峰值和熵权法典型场景研究 [J]. 中国电力, 2023, 56(5): 193–202.
ZHAO Yuanshang, LIN Weifang. Research on typical scenarios based on fusion density peak value and entropy weight method of Pearson's correlation coefficient[J]. Electric Power, 2023, 56(5): 193–202.
- [26] STEVIĆ Ž, PAMUČAR D, PUŠKA A, *et al.* Sustainable supplier selection in healthcare industries using a new MCDM method: Measurement of alternatives and ranking according to COmpromise solution (MARCOS)[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 140: 106231.
- [27] 梁小侠, 谢军, 田永川, 等. 基于组合权重和改进的 MARCOS 配电网设备风险评估方法 [J]. 电工技术, 2024(5): 117–121.
LIANG Xiaoxia, XIE Jun, TIAN Yongchuan, *et al.* Assessment of distribution network equipment risks based on combined weighting and modified MARCOS[J]. Electric Engineering, 2024(5): 117–121.
- [28] 许宗鑫, 崔杨, 岳飞, 等. 考虑等效寿命损耗及多维度效益的电网侧储能系统容量优化配置 [J]. 东北电力大学学报, 2025, 45(1): 73–82.
XU Zongxin, CUI Yang, YUE Fei, *et al.* Optimal capacity configuration of grid-side energy storage system considering equivalent life loss and multi-dimensional benefits[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2025, 45(1): 73–82.
- [29] 林毅, 林威, 吴威, 等. 电化学储能和抽水蓄能电站参与多市场联合运行价值分析 [J]. 中国电力, 2023, 56(7): 175–185.
LIN Yi, LIN Wei, WU Wei, *et al.* Analysis on operation value of electrochemical energy storage and pumped storage participating in a joint market[J]. Electric Power, 2023, 56(7): 175–185.
- [30] 徐若晨, 张江涛, 刘明义, 等. 电化学储能及抽水蓄能全生命周期度电成本分析 [J]. 电工电能新技术, 2021, 40(12): 10–18.
XU Ruochen, ZHANG Jiangtao, LIU Mingyi, *et al.* Analysis of life cycle cost of electrochemical energy storage and pumped storage[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2021, 40(12): 10–18.
- [31] 文军, 刘楠, 裴杰, 等. 储能技术全生命周期度电成本分析 [J]. 热力发电, 2021, 50(8): 24–29.
WEN Jun, LIU Nan, PEI Jie, *et al.* Life cycle cost analysis for energy storage technology[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(8): 24–29.
- [32] 张大海, 孙锴, 史一茹, 等. 考虑灵活资源及模数驱动方法的电力系统调度方法综述 [J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 42–54.
ZHANG Dahai, SUN Kai, SHI Yiru, *et al.* Overview of power system dispatching methods considering flexible resources and model-data driven[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 42–54.
- [33] 冷仙, 曾源, 周键, 等. 基于熵权 TOPSIS 法的西南自然保护区景观保护成效评价 [J]. 生态学报, 2023, 43(3): 1040–1053.
LENG Xian, ZENG Yuan, ZHOU Jian, *et al.* Landscape conservation effectiveness assessment of nature reserves based on entropy weight-TOPSIS in Southwest China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 1040–1053.
- [34] 张家明, 赵迪斐, 郭英海, 等. 基于模糊变异熵权法的页岩气藏多参数评价: 以四川盆地武隆地区 F-2 井为例 [J]. 河南理工大学学报 (自然科学版), 2024, 43(6): 57–68, 81.
ZHANG Jiaming, ZHAO Difei, GUO Yinghai, *et al.* Multiple parameter evaluation of shale gas reservoirs based on a fuzzy entropy weight and coefficient variation method: a case of well F-2 in Wulong Area, Sichuan Basin[J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2024, 43(6): 57–68, 81.
- [35] 李梓嘉, 周佳, 彭方旭. 基于熵权 TOPSIS 法的抽水蓄能电站与光伏配套开发综合评价 [J]. 水电能源科学, 2025, 43(3): 205–209, 195.
LI Zijia, ZHOU Jia, PENG Fangxu. Comprehensive evaluation of integrated development of pumped storage power stations and photovoltaic systems based on entropy weight TOPSIS method[J]. Water Resources and Power, 2025, 43(3): 205–209, 195.



曹书仪

作者简介:

曹书仪 (1999), 女, 硕士研究生, 从事新型电力系统灵活性、电碳市场研究, E-mail: caoshuyi99@163.com;

郭森 (1987), 通信作者, 男, 博士, 副教授, 博士生导师, 教研室主任, 从事新型电力系统灵活性、电

碳市场研究, E-mail: guosen324@163.com。

(责任编辑 于静茹)

(下转第 87 页)