

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231027

# 基于分级分类和改进 AHP-EW-TOPSIS 的电力系统 充裕性评估方法

张宇天<sup>1</sup>, 顾丹珍<sup>1</sup>, 李振坤<sup>1</sup>, 黄阮明<sup>2</sup>, 郭泉宇<sup>1</sup>

(1. 上海电力大学电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网上海市电力公司经济技术研究院, 上海 200120)

**摘要:** 电力系统充裕性评估对电力系统的规划建设具有重要的意义, 传统的单概率性指标评估方法已经不能满足随新能源渗透率不断提升、场景复杂化、短缺事件多样化趋势下电力系统充裕性评估的需求。首先, 对短缺事件以最大短缺功率等效化处理, 基于改进最小二乘法进行充裕性事件分区特征点拟合, 构建短缺事件集分级分类的充裕性多指标体系。然后, 基于蒙特卡洛法生成多组随机短缺样本数据集, 结合改进 AHP-EW-TOPSIS 法确定各分区指标的权重, 并得到综合评分降落曲线。最后, 根据评分降落曲线构建综合评价结果判断区间。算例以某市实际运行数据为基础进行仿真验证, 结果表明, 所提方法可结合主观要求和不同尺度充裕性事件的客观特性, 得到更加全面、透明的充裕性评估结果。

**关键词:** 电力系统充裕性; 充裕性指标; 综合评估方法; AHP-EW-TOPSIS

## A power system adequacy assessment method based on hierarchical classification and improved AHP-EW-TOPSIS

ZHANG Yutian<sup>1</sup>, GU Danzhen<sup>1</sup>, LI Zhenkun<sup>1</sup>, HUANG Ruanming<sup>2</sup>, GUO Xiaoyu<sup>1</sup>

(1. School of Electric Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. State Grid Shanghai Electric Power Economic and Technology Research Institute, Shanghai 200120, China)

**Abstract:** Power system adequacy assessment is of great significance to the planning and construction of a power system. The traditional single probabilistic indicator assessment method can no longer meet the needs of power system adequacy assessment with the increasing penetration rate of new energy, the complexity of scenarios, and the diversification of shortage events. First, the shortage events are equated to the maximum shortage of power, and based on an improved least squares method, the characteristic points of the shortage event partition are fitted, and a multi-indicator system for the shortage event set hierarchical classification of the adequacy is constructed. Then, multiple random shortage sample datasets are generated based on the Monte Carlo method. The global weights of the indicators in each partition are determined combined with the improved AHP-EW-TOPSIS method. Also a comprehensive score landing curve is obtained. Finally, the judgment interval of the comprehensive evaluation results is constructed according to the score landing curve. The algorithm is simulated and verified based on the actual operational data of a city, and the results show that the proposed method can combine the subjective requirements and the objective characteristics of different scales of adequacy events to obtain more comprehensive and transparent adequacy assessment results.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52177098).

**Key words:** power system adequacy; adequacy indicators; methods of comprehensive assessment; AHP-EW-TOPSIS

## 0 引言

电力系统充裕性评估对电力系统供给侧的合理

规划与调度、不同特性储能设备的容量配置, 以及安排相应充裕性事故应急处理措施等具有重要参考意义<sup>[1]</sup>。光伏、风能等新型电力能源具有出力不稳定, 出力曲线与负荷曲线错峰, 出力情况与时间、天气等不确定因素强相关等特点。现代电力系统中大规模可再生能源的波动性和随机性导致最严重的

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52177098); 国网上海市电力公司科技项目资助(SGSHJYGPJS00283)

系统工况未必发生在负荷需求最大的时刻<sup>[2]</sup>, 在新能源渗透率不断提升、场景复杂化、短缺事件多样化的趋势下, 现有的评估方法已经不能满足对电力系统充裕性多维度多角度的评估需求。

概率方法是客观全面评估大规模可再生能源接入条件下电力系统充裕性的有效手段。现阶段电力充裕性指标主要由概率性指标构成, 可分为以下几类: 缺电概率(loss of load possibility, LOLP)、缺电时间期望(loss of load expectation, LOLE)、缺电持续时间(loss of load duration, LOLD)、期望缺供功率(expected demand not supplied, EDNS)、期望缺供电量(expected energy not supplied, EENS)和缺电频率(loss of load frequency, LOLF)<sup>[3-4]</sup>。文献[5]从单个用户用电情况出发, 考虑异常用电用户数量与系统用户总数量比值系数, 提出系统平均中断频率、用户平均中断时间、客户平均中断频率等指标。文献[6]引入充裕性指标的概率分布函数, 利用中位数(P50)、第95百分位数(P95)描述了充裕性事件分布的偏态特性; 文献[7]在充裕性指标概率分布特性的基础上, 提出利用条件风险值提取极端充裕性事件特征并求取其加权平均值的方法。传统充裕性指标仅提供了一个研究期间内各类短缺单指标量的平均测量值, 新型指标、现有指标评估体系的改进, 需要反映并描述大规模新能源并网后可能发生的各类短缺事件的多维度特征<sup>[8]</sup>, 并尽可能直观地为充裕性提升提供依据<sup>[9]</sup>。

新型电力系统中由于短缺情况的多样性与不同类型充裕性指标的多维性, 需要引入对多充裕性指标的综合评估方法, 从而全面客观地评估系统的充裕性。在综合评价方法方面, 文献[10]基于多算子模糊的层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)对电力系统的网络安全与运行效益进行了多属性综合评估, 得到了各评估年份分指标以及综合评价的权重分数; 文献[11]结合最优最劣法、熵权法(entropy weight, EW)和逼近理想解法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS), 引入纳什均衡解作为协调优化目标, 对全国25个省份电网的16项指标进行了实例分析; 文献[12]结合模糊综合评价法和重心法对电网运行状态指标进行综合评价; 文献[13]运用物元可拓思想结合改进TOPSIS方法, 对可再生能源发电与传统电网协调发展中的发电、输电、配电3个环节形成的指标体系进行了综合评估; 文献[14]基于AHP-EW组合算法建立表征架空线路运行风险的评价模型。综合评估方法现已被广泛运用于电力系统各类型多指标的评估情形中, 但大多局限于对评估对象

不同场景的定性比较, 没有形成独立的综合评价指标评分, 从而难以适用于对电力系统充裕性的定量评估。

据此, 本文搭建了一种分级分类的充裕性拓展指标体系, 提出了一种结合构建标准样本和改进AHP-EW-TOPSIS法的充裕性多指标综合评估方法。首先, 根据最大短缺功率对短缺事件进行等效化处理, 参考主流储能、调峰措施的技术特征对短缺事件集按短缺功率和短缺时长进行分类, 并求取各分类区块短缺事件特征点, 构成充裕性分指标拓展体系; 其次, 运用蒙特卡洛法对被评估场景进行生产模拟仿真, 生成充裕性样本场景集, 采用改进AHP法和EW法确定各指标主客观权重, 结合TOPSIS法得到各个场景的综合评分, 并根据评分与场景实际各充裕性指标量的关系划分评分区间; 最后, 利用该方法对某市2030年充裕性情况进行综合评估, 验证了该方法的可行性。

## 1 充裕性指标体系拓展

### 1.1 单指标评估局限性

电力系统充裕性指标整体上可划分为先验性指标和后验性指标两大类, 如图1所示。

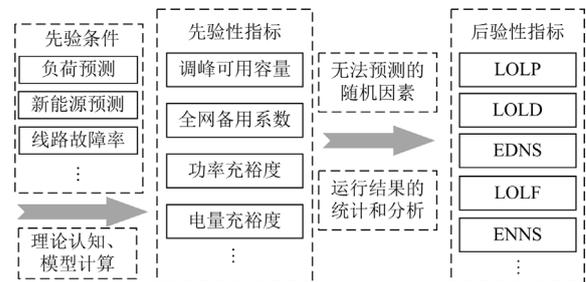


图1 先验性指标与后验性指标的联系

Fig. 1 Linkages between priori and posteriori indicators

综合能源系统大数据经过改进经典算法、深度学习等方法<sup>[15]</sup>计算, 可得到如供给侧、需求侧预测曲线以及线路各组成元件故障概率等各类先验条件, 再结合实际运行模型计算并量化得到先验性指标。其计算结果具有模糊性、不确定性的特征, 且由于其先验性本质, 常用于电力系统规划建设和生产运行计划等环节。后验性指标以对一定周期内的电力系统运行结果的分析为基础, 通过统计分析不同类型充裕性事件的关键技术特征, 从而量化评估系统充裕性的情况。后验性指标结果具有确定性、直观性、可信性的特点, 对电力系统充裕性的提升具有重要参考价值, 且更适用于用数理统计相关方法进行量化分析, 本文方法基于此展开。

传统后验性指标仅独立考虑充裕性一个维度上的量,按场景划分短缺事件的规模、频率、短缺电量和持续时间,如图2所示<sup>[16]</sup>,3个场景具有大致相同的LOLF,但在LOLP、EDNS、EENS指标量上却有很大的差异。同理,以任一单指标透视3个场景的充裕性,由于单指标维度的局限性,其均只能描述场景短缺事件集的某一个特征,难以得到客观全面的充裕性评价结果。

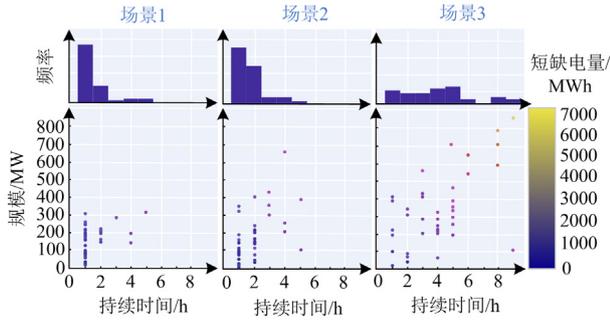


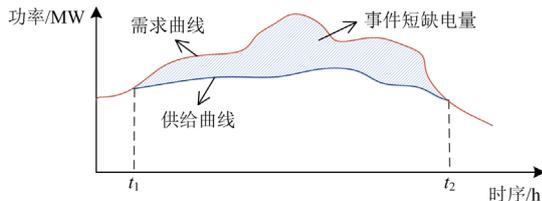
图2 按场景划分短缺事件的规模、频率、短缺电量和持续时间

Fig. 2 Dividing the scale, frequency, shortage capacity and duration of shortage events by scenarios

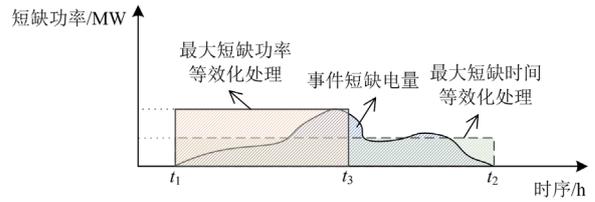
伴随新能源渗透率的不断提升,极端天气引起的类似于场景3短缺情况的概率将不断上升。为了满足新能源大规模并网后,考虑新能源出力不确定性情况下,对电力系统充裕性进行准确评估的要求,新型电力系统充裕性评估需要引入对短缺事件集的持续时间、规模、短缺容量等特征的综合分析,拓展并量化各类评估指标,使得评估结果更加精确、全面地反映短缺事件集的多维度特征。

### 1.2 基于分级分类的多级充裕性指标体系

新型电力系统充裕性的短缺事件集在时序、规模上呈现愈发多样化、复杂化的趋势,原始短缺事件的短缺规模随时序变化,如图3(a)所示,其时变性不利于横向统计并比较一个场景中多个短缺事件的情况,故对单个短缺事件按等短缺电量化方法进行等效处理。由于新型电力系统中,高比例新能源的随机波动会导致供给侧的功率裕度难以预测,短



(a) 电力系统短缺事件示意图



(b) 短缺事件等效处理示意图

图3 单个电力系统短缺事件等效处理示意图

Fig. 3 Schematic diagram of equivalent treatment of single power system shortage event

缺事件常体现为供电功率的不足而非供电量的不足,所以在对短缺事件作等效处理时,采取按短缺事件最大短缺功率的方式进行等效化,如图3(b)所示。

为了便于计算,将实际短缺事件的等效时间转化为在固定周期时序上的等效时间,处理后短缺事件持续时间的计算公式为

$$\begin{cases} \min F(\Delta t_m, \Delta t'_m) = |\Delta t_m - \Delta t'_m| \\ \text{s.t. } \Delta t'_m = \int_{t_1^m}^{t_2^m} (P_{\text{dem}} - P_{\text{sup}}) dt / \max(P_{\text{dem}} - P_{\text{sup}}) \\ \Delta t_m = n T_{\text{cyc}} \quad (n \geq 1, n \in \mathbf{Z}) \\ \Delta P_{\text{max}}^m = \int_{t_1^m}^{t_2^m} (P_{\text{dem}} - P_{\text{sup}}) dt / \Delta t_m \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\Delta t'_m$  表示第  $m$  个短缺事件实际等效后的持续时间;  $T_{\text{cyc}}$  表示时序基本周期长度,本文算例中取值为 1 h;  $\mathbf{Z}$  表示整数集;  $\Delta t_m$  表示第  $m$  个短缺事件在固定周期时序上距离  $\Delta t'_m$  最近的时间长度;  $\Delta P_{\text{max}}^m$  为第  $m$  个短缺事件在固定周期时序上等效后的短缺功率;  $t_1^m$ 、 $t_2^m$  分别表示第  $m$  个短缺事件的起始时间、结束时间;  $P_{\text{dem}}$  和  $P_{\text{sup}}$  分别表示需求侧和供给侧功率对时间的函数。等效后的短缺事件消除了其短缺功率的时变性,可用短缺容量和等效持续时间对其进行描述,多个短缺事件数据可在由其构成的二维平面中以坐标点形式表示。

为反映不同短缺规模、持续时长的短缺事件与电力系统各类储能、调峰行为的关系,采用分类的方法对短缺事件集进行处理,分类边界值可参考现有各类型储能的放电时间区间与输出功率区间给定<sup>[17]</sup>。对分类后各个分区短缺事件进行区块特征点拟合,由于短缺点横纵坐标乘积隐含 EENS 这一量纲,直接对点集进行空间距离的拟合会造成样本信息的缺失,故采用等 EENS 方法进行处理,先得到符合条件的区块特征点构成的反比例曲线,再结合最小二乘法原理计算得到特征点的坐标值,表示为

$$\begin{cases} \min F(p_{i,j}, t_{i,j}) = \sum_{k \in K_{i,j}} [(\Delta P_{\max}^k - p_{i,j})^2 + (\Delta t_k - t_{i,j})^2] \\ \text{s.t. } p_{i,j} \cdot t_{i,j} = \frac{1}{K_{i,j}} \cdot \sum_{k \in K_{i,j}} (\Delta P_{\max}^k \cdot \Delta t_k) \\ P_{i,j}^{\text{down}} \leq p_{i,j} < P_{i,j}^{\text{up}} \\ T_{i,j}^{\text{down}} \leq t_{i,j} < T_{i,j}^{\text{up}} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $p_{i,j}$ 、 $t_{i,j}$  分别表示横向第  $i$  个、纵向第  $j$  个区块特征点的纵坐标、横坐标值;  $K_{i,j}$  表示该区块内短缺事件集合;  $\Delta P_{\max}^k$ 、 $\Delta t_k$  分别表示第  $k$  个短缺事件的等效短缺功率、等效持续时间;  $P_{i,j}^{\text{up}}$ 、 $P_{i,j}^{\text{down}}$  分别表示该区块划分时短缺功率的上、下边界;  $T_{i,j}^{\text{up}}$ 、 $T_{i,j}^{\text{down}}$  分别表示该区块划分时持续时长的上、下边界。最外层区块上边界  $P_{i,j}^{\text{up}}$ 、 $T_{i,j}^{\text{up}}$  的取值为无穷大值。区块短缺事件特征点拟合示意图如图 4 所示。

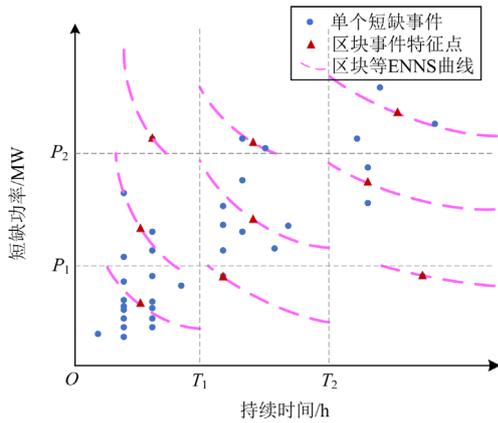


图 4 区块短缺事件特征点拟合示意图

Fig. 4 Schematic diagram of fitting characteristic points of block shortage events

为了更清楚地表示各区块短缺事件的信息, 定义区块次级指标量如式(3)所示。

$$\begin{cases} T_{i,j}^{\text{LOLDSB}} = t_{i,j} \\ P_{i,j}^{\text{EDNSSB}} = p_{i,j} \\ F_{i,j}^{\text{LOLFSB}} = K_{i,j} \end{cases} \quad (3)$$

式中,  $T_{i,j}^{\text{LOLDSB}}$ 、 $P_{i,j}^{\text{EDNSSB}}$ 、 $F_{i,j}^{\text{LOLFSB}}$  分别表示横向第  $i$  个、纵向第  $j$  个区块的短缺事件等效短缺时长、等效短缺功率和发生频次。这 3 个指标量是对特征点属性的直接描述, 隐含了区块的 EENS、LOLP 等指标量信息, 故将其作为综合评估参考的次级指标量。

### 1.3 后验性指标体系构建

充裕性综合评价后验性指标的选择对评估结果

的合理性和参考价值有重要影响, 本文按照系统性、层次性、独立性和可比性原则对充裕性指标进行筛选<sup>[18-19]</sup>, 选取 LOLD、EDNS、LOLF 作为一级指标, 考虑实际充裕性事件划分所需的精度和计算量, 将短缺事件按持续时间和短缺功率划分为 3 个区段, 共形成 9 个事件子区域, 按 1.2 节所述方法构成共 3 类 27 个二级指标, 指标树如图 5 所示。

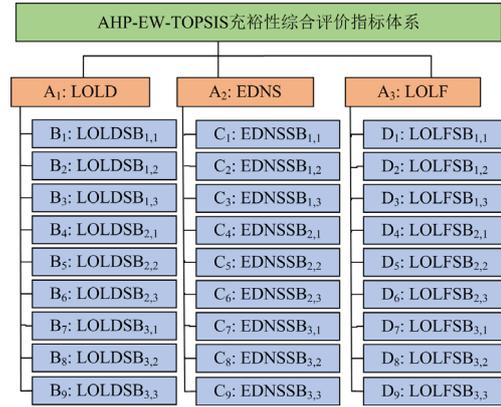


图 5 后验性充裕性综合评估指标树

Fig. 5 Index tree for comprehensive evaluation of posterior adequacy

## 2 基于改进 APH-EW-TOPSIS 的充裕性综合评估方法

### 2.1 基于评价基准样本的综合评估流程

一般综合评估算法的机理导致该应用情境下各指标量的权重是相对值, 不同场景组合下各指标的权重以及加权后分数也会不同, 导致不同组合下单个场景的综合评分也无法直接进行对比。本文通过生成评价基准样本, 基于样本数据集特征对被评估对象进行标准化, 并根据其生成通用、统一的指标综合权重向量和评分判定区间, 进一步计算得到被评估对象可横向对比的综合评分。整体流程如图 6 所示。由于该方法对于基准样本的依赖性, 本文中基准样本的选择遵循以下原则。

1) 随机性: 样本负荷、风光出力时序的生成应符合实际情况, 确保各类型短缺事件的概率分布与实际情况保持一致。

2) 代表性: 随机样本应能够代表整体情况, 即样本应尽可能包含总体中所有短缺类型的特征和变化。

3) 独立性: 每个样本的生成都与其他样本无关, 避免重复或关联存在。

4) 样本量应当足够充分: 样本的大小应根据总体的大小和变异程度来确定, 以确保样本的可靠性和精确性。

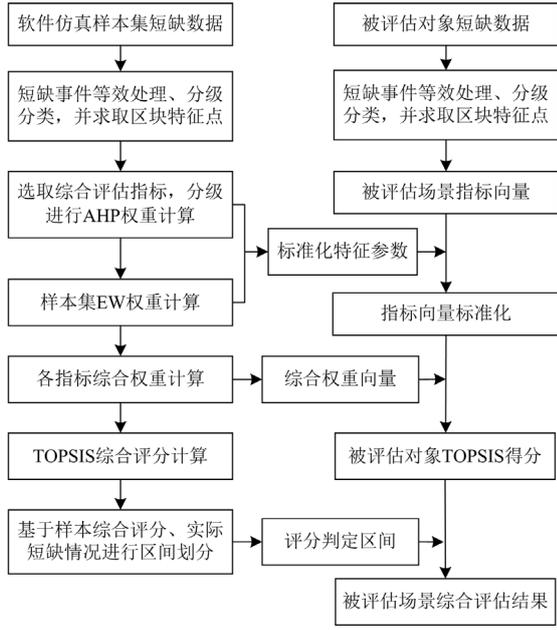


图 6 基于评价基准样本和改进 AHP-EW-TOPSIS 的综合评估流程

Fig. 6 Comprehensive evaluation process based on evaluation benchmark samples and improved AHP-EW-TOPSIS

### 2.2 分级 AHP 主观权重计算

AHP 是一种主观赋权方法, 由于本文二级指标为一级指标的垂直延伸且分指标数量均相同, 先按层次分别对一级、二级指标进行 AHP 权重计算, 再结合修正权重计算二级指标全局 AHP 权重。设有  $\beta$  个评价指标, 具体流程如下。

1) 设有  $Y$  位专家对参考的  $M$  个评价指标根据两两比较判断原理, 依据 1-9 标度法<sup>[20]</sup>对其进行打分, 得到判断矩阵, 并进行一致性指标值判断, 符合要求后, 采用特征向量法求各指标 AHP 权重值, 计算最大特征根  $\lambda_{\max}$  对应的特征向量  $L$ , 并归一化。

2) 由于在计算不同类型二级指标的 AHP 权重时, 无法考虑到不同类型二级指标的相对重要程度, 故在各一级指标下任意选取一个二级指标构成一组修正指标集, 利用修正指标的权重对二级指标 AHP 权重进行修正。对一、二级指标和修正指标分别按上述流程计算权重值, 以 LOLD 指标的二级指标为基准, 修正后二级指标 AHP 权重向量表示为

$$\begin{cases} L'_{LOLD,2} = \omega_{LOLD} \cdot L_{LOLD,2} \cdot \frac{\omega'_{LOLD}}{\omega_{LOLD} \cdot \omega'_{LOLD,2}} \\ L'_{EDNS,2} = \omega_{EDNS} \cdot L_{EDNS,2} \cdot \frac{\omega'_{EDNS}}{\omega_{LOLD} \cdot \omega'_{LOLD,2}} \\ L'_{LOLF,2} = \omega_{LOLF} \cdot L_{LOLF,2} \cdot \frac{\omega'_{LOLF}}{\omega_{LOLD} \cdot \omega'_{LOLD,2}} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $\omega_{LOLD}$ 、 $\omega_{EDNS}$ 、 $\omega_{LOLF}$  为一级指标的 AHP 权重值;  $L_{LOLD,2}$ 、 $L_{EDNS,2}$ 、 $L_{LOLF,2}$  分别为各一级指标下二级指标的 AHP 权重向量;  $\omega'_{LOLD}$ 、 $\omega'_{EDNS}$ 、 $\omega'_{LOLF}$  分别为所选修正指标在修正指标集的权重值;  $\omega'_{LOLD,2}$  为 LOLD 指标下所选二级指标的权重值;  $L'_{LOLD,2}$ 、 $L'_{EDNS,2}$ 、 $L'_{LOLF,2}$  为修正后二级指标的 AHP 权重向量, 标准化后分别为  $L''_{LOLD,2}$ 、 $L''_{EDNS,2}$ 、 $L''_{LOLF,2}$ , 进而得到修正后所有二级指标的 AHP 权重向量  $L_{AHP,2}$ , 如式(5)所示。

$$L_{AHP,2} = [L''_{LOLD,2}; L''_{EDNS,2}; L''_{LOLF,2}] \quad (5)$$

3) 由于本文中各二级指标与一级指标间是耦合的, 二级指标的 AHP 权重分配可能会很大程度上改变一级指标与最终评价结果的相关度, 为了综合考虑一、二级指标对综合评估的影响, 将标准化后一、二级指标权重向量组合, 最终构成 AHP 权重向量  $L_{AHP,all}$ , 如式(6)所示。

$$L_{AHP,all} = \left[ \frac{L_{AHP,2}}{2}; \frac{L_{AHP,1}}{2} \right] = [\omega_1^{ahp}, \omega_2^{ahp}, \dots, \omega_\beta^{ahp}, \dots, \omega_M^{ahp}]^T \quad (6)$$

式中:  $L_{AHP,1}$  表示一级指标的 AHP 权重向量;  $\omega_\beta^{ahp}$  表示第  $\beta$  个指标标准化后的 AHP 权重。

### 2.3 基于样本集的 EW 客观权重计算

对样本集采用 EW 法确定指标量的客观重要程度, 进一步修正 AHP 法主观赋权产生的偏差<sup>[21]</sup>, 同时利用样本集决策矩阵对被评估场景各指标进行标准化。设样本集有  $J$  个对象、 $M$  个评价指标, 其初始决策矩阵  $B$  为

$$B = \begin{bmatrix} b_{1,1} & b_{1,2} & \dots & b_{1,M} \\ b_{2,1} & b_{2,2} & \dots & b_{2,M} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{J,1} & b_{J,2} & \dots & b_{J,M} \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中,  $b_{\alpha,\beta}$  表示初始决策矩阵  $B$  中第  $\alpha$  个对象的第  $\beta$  个评价指标的值。

1) 指标标准化处理, 所有指标均为正值的极小型指标, 通过式(8)转换为极大型指标, 表示为

$$c_{\alpha,\beta} = (\max(b_\beta) - b_{\alpha,\beta}) / \sqrt{\sum_{\alpha=1}^J (\max(b_\beta) - b_{\alpha,\beta})^2} \quad (8)$$

式中:  $\max(b_\beta)$  为第  $\beta$  个评价指标列的最大值;  $c_{\alpha,\beta}$  为第  $\alpha$  个对象第  $\beta$  个评价指标标准化后的值。

2) 计算样本集各指标信息熵, 第  $\beta$  个评价指标的信息熵  $e_\beta$  为

$$e_\beta = -\frac{1}{\ln J} \sum_{\alpha=1}^J q_{\alpha,\beta} \cdot \ln(q_{\alpha,\beta}) \quad (9)$$

$$q_{\alpha,\beta} = \frac{c_{\alpha,\beta}}{\sum_{\alpha=1}^J c_{\alpha,\beta}} \quad (10)$$

式中,  $q_{\alpha,\beta}$  为第  $\beta$  个评价指标列中, 第  $\alpha$  个对象所占的比重。

3) 由于本文方法需要对大量对象进行 EW 权重计算, 且涉及的二级指标其边界为主观划分, 可能导致部分指标离散度过小, EW 权重分配相差几个数量级, 严重弱化了 AHP 主观权重的作用, 不符合实际应用需要。故对传统 EW 权重计算方法进行改进以适应本文的应用场景, 以第  $\beta$  个评价指标权重  $\omega_{\beta}^{\text{ew}}$  为例, 有

$$\begin{cases} \omega_{\beta}^{\text{ew}} = \frac{\tau - e_{\beta}}{\sum_{\beta=1}^J (\tau - e_{\beta})}, \tau \geq 1 \\ \text{s.t. } \frac{\max(\omega_{\beta}^{\text{ew}})}{\min(\omega_{\beta}^{\text{ew}})} \leq \varepsilon \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $\tau$  为信息熵冗余度修正系数, 其值越大, EW 权重的离散度越小;  $\varepsilon$  为常数, 用以限制指标离 EW 权重的离散度, 本文算例中  $\varepsilon$  取值为 2, 即表示指标中 EW 权重最大值不超过最小值的 2 倍。

#### 2.4 综合权重及 TOPSIS 评分计算

结合 AHP 权重、EW 权重计算综合权重, 根据综合权重值对评价对象进行 TOPSIS 法排序。根据最小鉴别信息原理<sup>[22]</sup>得到目标函数及其约束如式 (12) 所示。

$$\begin{cases} \min J(\omega) = \sum_{\beta=1}^M \left( \omega_{\beta}^{\text{all}} \cdot \ln \frac{\omega_{\beta}^{\text{all}}}{\omega_{\beta}^{\text{ahp}}} + \omega_{\beta}^{\text{all}} \cdot \ln \frac{\omega_{\beta}^{\text{all}}}{\omega_{\beta}^{\text{ew}}} \right) \\ \text{s.t. } \sum_{\beta=1}^M \omega_{\beta}^{\text{all}} = 1, \omega_{\beta}^{\text{all}} \geq 0 \end{cases} \quad (12)$$

组合权重  $\omega_{\beta}^{\text{all}}$  和综合权重向量  $\mathbf{L}_{\text{all}}$  分别表示为

$$\omega_{\beta}^{\text{all}} = \frac{\sqrt{\omega_{\beta}^{\text{ahp}} \cdot \omega_{\beta}^{\text{ew}}}}{\sum_{\beta=1}^M \sqrt{\omega_{\beta}^{\text{ahp}} \cdot \omega_{\beta}^{\text{ew}}}} \quad (13)$$

$$\mathbf{L}_{\text{all}} = [\omega_1^{\text{all}}, \omega_2^{\text{all}}, \dots, \omega_M^{\text{all}}]^T \quad (14)$$

对任意评估对象的  $M$  个评价指标值  $y_1, y_2, \dots, y_M$ , 根据样本集决策矩阵  $\mathbf{B}$  进行标准化, 得到评估对象第  $\beta$  个指标标准化后的值  $z_{\beta}$  为

$$z_{\beta} = (\max(b_{\beta}) - y_{\beta}) / \sqrt{\sum_{\alpha=1}^J (\max(b_{\beta}) - b_{\alpha,\beta})^2} \quad (15)$$

结合综合权重向量  $\mathbf{L}_{\text{all}}$  计算, 得到该评估对象基于样本集的最优、最劣理想解的欧式距离  $D^+$ 、 $D^-$ ,

分别表示为

$$D^+ = \sqrt{\sum_{\beta=1}^M \omega_{\beta}^{\text{all}} \cdot (z_{\beta} - \max\{c_{1,\beta}, c_{2,\beta}, \dots, c_{J,\beta}\})^2} \quad (16)$$

$$D^- = \sqrt{\sum_{\beta=1}^M \omega_{\beta}^{\text{all}} \cdot (z_{\beta} - \min\{c_{1,\beta}, c_{2,\beta}, \dots, c_{J,\beta}\})^2} \quad (17)$$

计算综合评价分  $S$  并进行排序, 评价得分越大表明其与最优理想解的距离越近, 其评价结果越好, 综合评价分  $S$  表示为

$$S = \frac{D^-}{D^- + D^+} \quad (18)$$

### 3 算例仿真

#### 3.1 短缺数据生成

在 Antares8.2 软件中, 以 1 h 为间隔导入某市 2021 年光伏、风电、直流、常规机组和负荷的全年时序数据, 进行时序分析, 得到 2030 年的预测数据, 然后根据各类型供给侧、需求侧实际预测时序数据进行随机生产模拟。基于蒙特卡洛法分别对某市 2030 年和样本年进行 1000 次生产模拟仿真, 依据样本选取原则选取样本年 1000 次仿真充裕性数据构成样本集, 各年 1000 次蒙特卡洛仿真年份等效处理后的短缺事件数据如图 7、图 8 所示。

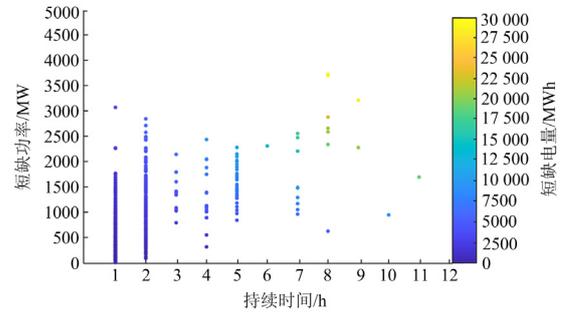


图 7 某市 2030 年 1000 次生产模拟短缺事件

Fig. 7 1000 simulated production shortages in a city in 2030

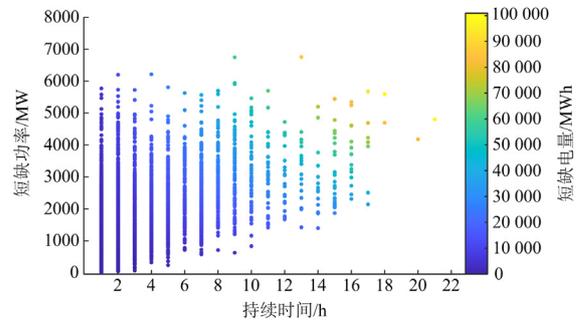


图 8 某市样本年 1000 次生产模拟短缺事件

Fig. 8 1000 production simulation shortage in a city in a sample year

本文方法中短缺事件时间颗粒度的大小不改变评估结果的相对值，但需要考虑该时间颗粒度下，样本是否符合间歇性、随机性等特点。样本仿真年短缺数据在 1 h 间隔上，不同持续时长事件的数量和其短缺功率的分布密度符合一般规律，且样本点数量足够大，满足基准样本选择原则。在实际运用中，可根据应用场景需求进一步减小时间间隔，从而更好地提升评估结果的精度。

参考现有主要储能、调峰措施响应时长和功率等技术特征对短缺事件进行区块划分<sup>[17,23-26]</sup>，更好地为充裕性提升提供参考，主要储能、调峰措施关键技术特征如图 9 所示。中短时短缺事件可由电化学储能、快速调峰机组、抽水储能发电等措施进行响应，较长期短缺事件需要在运行调度上进行调整优化，短缺功率方面可由同类型或不同类型措施进行叠加，同时结合算例仿真年短缺事件分布情况，对短缺时长按  $T_1 = 2\text{ h}$ 、 $T_2 = 5\text{ h}$  划分为  $(0, T_1]$ 、 $(T_1, T_2]$ 、 $(T_2, +\infty)$  3 个时间分区；同理对短缺事件的规模按  $P_1 = 1750\text{ MW}$ 、 $P_2 = 3500\text{ MW}$  划分为  $(0, P_1]$ 、 $(P_1, P_2]$ 、 $(P_2, +\infty)$  3 个规模分区。对 9 个分区所有仿真年的全部短缺事件进行特征点拟合，以对比 2030 年、样本年各个区块短缺事件的特征点坐标和频次，整体拟合结果如图 10 所示，仿真年份中 2030 年整体充裕性显著优于样本年，且短缺事件主要集中于短中小规模区块，长时间、大规模短缺事件发生概率极低，但其造成的影响较大，故进行综合评估时需要着重考虑。

### 3.2 综合评估模型计算

对于一、二级指标体系 AHP 权重，根据本文方法构建判断矩阵并求特征向量，得到一级指标的权重向量  $L_{AHP,1} = [0.5499\ 0.2402\ 0.2098]^T$ ，一致性指标值为 0.0158；二级分指标权重向量  $L_{LOLD,2} = [0.1750\ 0.0729\ 0.1190\ 0.0571\ 0.1367\ 0.1337\ 0.0443$

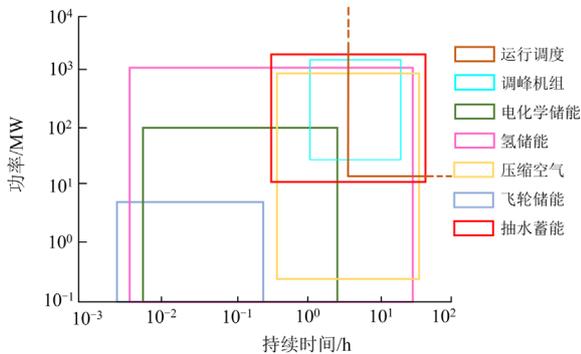


图 9 主要储能、调峰措施关键技术特征

Fig. 9 Key technical characteristics of main energy storage and peak shaving measures

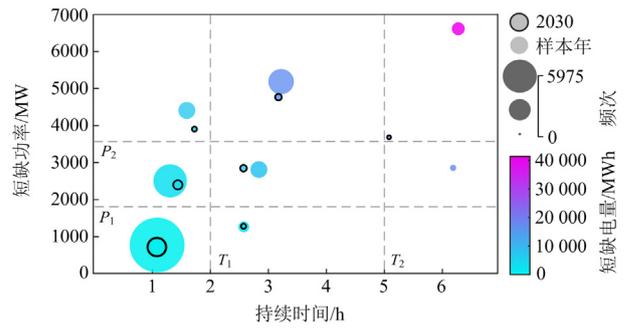


图 10 多级指标下各分区短缺事件特征点求取

Fig. 10 Calculation of characteristic points of shortage events in each district under multi-level index

$0.0865\ 0.1748]^T$ ，一致性指标值为 0.0219； $L_{EDNS,2} = [0.0965\ 0.0897\ 0.0680\ 0.1053\ 0.0697\ 0.1022\ 0.1240\ 0.1388\ 0.2058]^T$ ，一致性指标值为 0.0865； $L_{LOLF,2} = [0.1565\ 0.0731\ 0.0977\ 0.0671\ 0.1159\ 0.0817\ 0.0661\ 0.1357\ 0.2061]^T$ ，一致性指标值为 0.0411；选取指标  $B_1$ 、 $C_1$ 、 $D_1$  构成修正指标集，计算得到  $[\omega'_{LOLD}\ \omega'_{EDNS}\ \omega'_{LOLF}]^T = [0.1692\ 0.4434\ 0.3874]^T$ ，一致性指标值为 0.0158。根据样本年数据进行 EW 权重计算，取  $\varepsilon$  值为 2，在 0.01 的精度下计算得到  $\tau$  值为 1.04。根据上述权重向量计算 AHP 权重，并结合改进后 EW 权重计算各指标综合权重。根据综合权重对样本年的 1000 个仿真年标准化后的数据进行 TOPSIS 评分计算并排序，根据短缺数据样本集对 2030 年短缺数据进行标准化，并计算各个仿真年的综合评分，如图 11 所示。

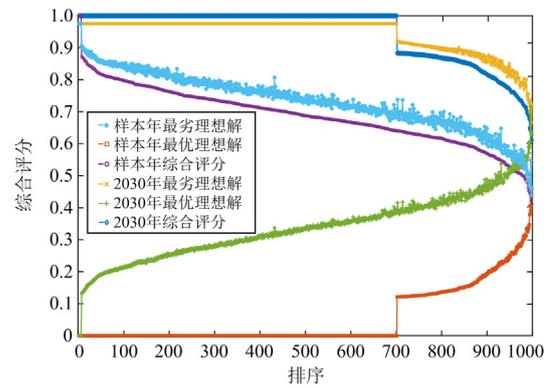


图 11 样本年、2030 年的 1000 个蒙特卡洛年充裕性综合评分及排序

Fig. 11 Comprehensive scoring and ranking of abundance of 1000 Monte Carlo years in sample year and 2030

样本年充裕性综合评分整体分布呈反“S”型，即较高评分与较低评分仿真年份数量较少，除去极少数完全不存在短缺事件的仿真年，其余仿真年评

分呈平滑降落趋势, 故可更加完整充分地反映不同程度充裕性的综合评分。2030 年各仿真年综合评分中, 70.1%的仿真年不存在短缺事件, 其余年综合评分呈平滑降落趋势, 且排名越靠近末尾, 小概率极端场景导致的评分降落速度越快。

根据样本年各仿真年综合评分, 考虑各评分下实际短缺单指标量, 对该样本集下综合评分按充裕性由好到坏划分为 5 个区间, 如图 12 所示。在该评级划分下, 2030 各仿真年中 92.1%的仿真年满足充裕性综合评价需求, 6.6%的年份充裕性一般, 1.3%的年份充裕性评级为差。通过评分区间可快速直接确定被评估对象的综合充裕性情况, 且通过同一场景下多个对象评分在各区间的占比, 可在整体上评估该场景可能出现的不同程度充裕性的概率。区间临界点综合评分的划分可根据样本集和实际充裕性指标要求作灵活调整, 以适应不同场景下的评估需求。

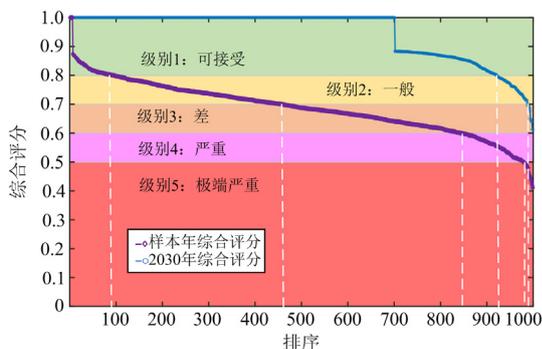


图 12 基于某市样本集的充裕性综合评分区间划分

Fig. 12 Division of comprehensive scoring interval of adequacy based on Shanghai sample set

分析样本年综合评价排序下各仿真年单指标变化情况, 如图 13 所示。由图 13 可知, 充裕性单指标值与综合评估下严重程度级别整体呈正相关, 满足对评价结果的基本要求。综合评分排序下 LOLF 指标排序的离散度最大, 原因是 LOLF 仅能代表短缺事件的频次, 而不能表示其单次事件的严重程度, 新型电力系统中新能源的不确定性出力会导致小概率大影响短缺事件的发生, 降低 LOLF 指标的评估可信度。

### 3.3 不同方法对比分析

以不采用样本集的方式对 2030 年进行综合评价, 综合评估结果如图 14 所示。在不采用样本集单独对 2030 年仿真结果进行评分时, 各个评价对象的标准化条件受自身整体数据集最大值、最小值影响, 导致存在短缺事件的仿真年整体评分较本文方法偏低。若此时仍以本文样本年评分区间为基准对其结

果进行评价, 则会导致相同综合评价得分下的充裕性较本文样本年更好, 评价结果产生误差, 即得不到可通用、固定的评价区间, 且不采用样本集方法时, 被评估对象的数量会对整体数据集的标准化产生影响, 进一步导致评分结果变化。

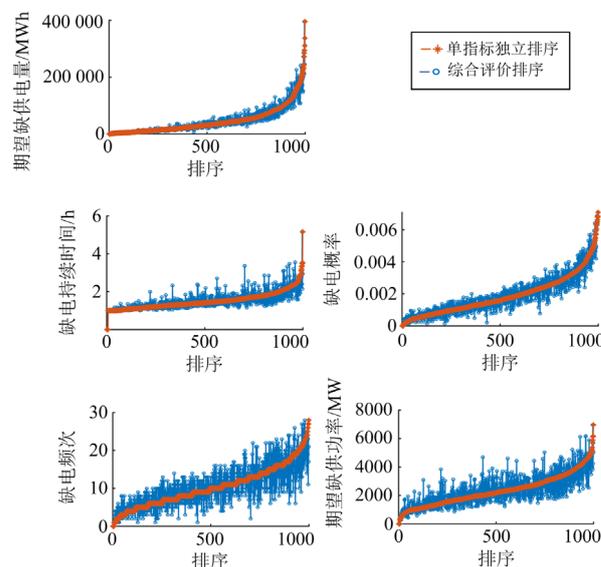


图 13 样本年各仿真年综合评分排序与单指标排序对比

Fig. 13 Comparison between comprehensive score ranking and single index ranking in each simulation year of sample year

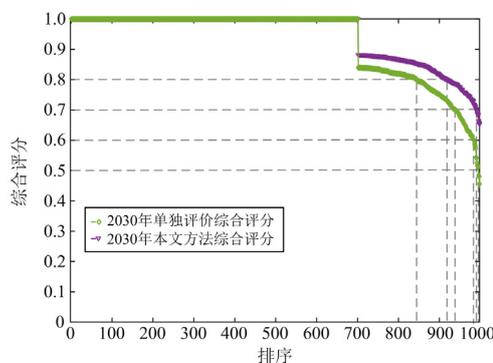


图 14 不采用样本集和本文方法综合评估结果对比

Fig. 14 Comparison of comprehensive evaluation results without sample set and methodology of this paper

以本文方法 2030 年中评分为 0.8472 的仿真年为例, 在被评估对象数量从 2 增加至 1000 的情况下, 对比本文方法、增加 2030 仿真年和增加样本年 3 种情形下该仿真年的评分变化, 结果如图 15 所示。除本文方法评分不受被评估对象数量的影响外, 其他方法单一对象的综合评分均受到被评估对象数量影响。当被评估对象数量较少时, 由于新增加的仿真年会较大概率改变评估整体指标量的边界

范围,增加 2030 仿真年、增加样本仿真年这两种方法的评分变动幅度较大。当不采用样本年数据集作为基准时,各指标 EW 权重因受到被评价对象短缺事件分布的影响,会动态变化,且当被评价对象较少时,短缺事件的分布可能严重偏离实际分布概率,进一步导致其 EW 权重的可信度降低。

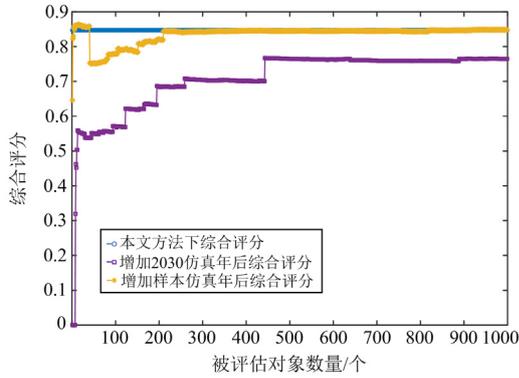


图 15 被评估对象数量对不同方法结果的影响

Fig. 15 Influence of the number of evaluated objects on the results of various evaluation methods

分别以仅考虑一级指标、利用改进前 EW 权重法两种方法进行综合评估,并与本文方法对比。以本文方法 2030 年中评分为 0.8472 的仿真年为例,在区块  $\{(T_2, +\infty), (0, P_1)\}$  中增加 1 个短缺事件,将其 EDNS 从 600 MW 均匀增长至 1600 MW,并将该仿真年得分与样本集进行排序,对比 3 种方法对小概率大影响事件变化的灵敏度,结果如图 16 所示。改进前 EW 法由于未能对区块分指标合理赋权,导致其对小概率区块事件的反映不灵敏,随短缺事件变化,其分数排名从第 376 位下落到第 819 位,综合评分整体偏高,不符合评估需求。仅考虑一级指标时,评分排名从第 594 位下落到第 876 位,本文方

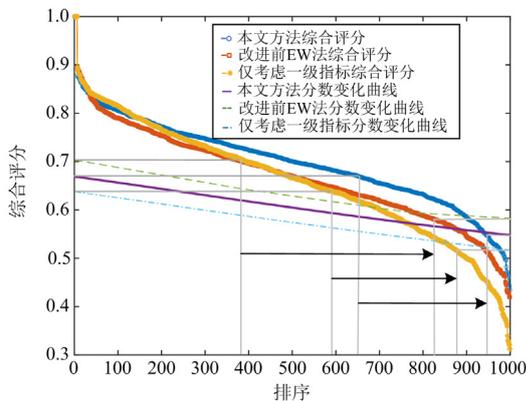


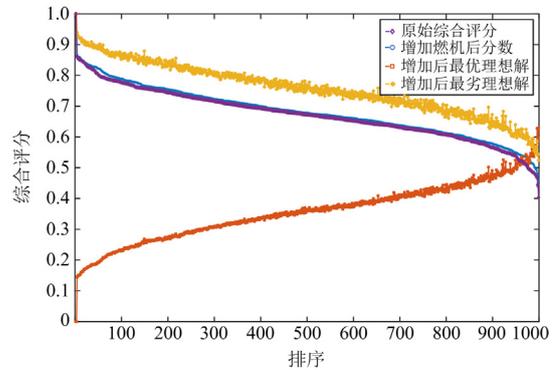
图 16 3 种方法对小概率大影响事件的灵敏度对比

Fig. 16 Comparison of sensitivity of three methods to small probability and large impact events

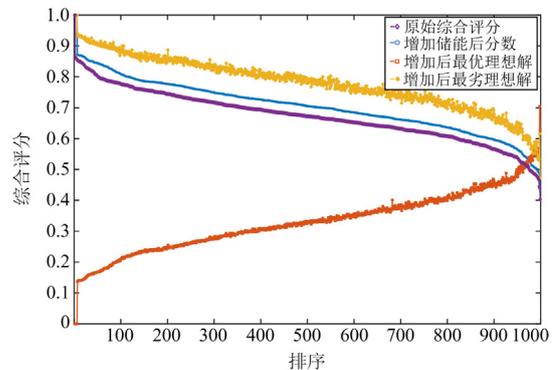
法由于考虑了短缺事件分区分级权重,初始排名降至第 654 位,并随事件变化下降至 945 位,对小概率大影响事件的响应灵敏度更高,在该类型场景下得到了更加合理的综合评分。

### 3.4 充裕性提升方法对比分析

在某市样本年仿真基础上,当总投资相同时,比较增加燃气调峰机组容量和增加储能两种方式对系统充裕性的提升效果。依据现有数据,在本文储能最大功率放电 3 h 的条件下,增加相同功率储能与燃气机组的投资费用的比例为 1:4.05。在样本年预测数据的基础上,根据等投资条件分别采用增加 405 MW 储能与 100 MW 燃气机组两种措施,以提升前仿真年作为基准样本,对比两种措施对充裕性的提升情况,结果如图 17 所示。



(a) 样本年增加燃机100 MW



(b) 样本年增加储能405 MW

图 17 增加燃机和增加储能对充裕性的提升对比

Fig. 17 Comparison between increasing gas turbine and increasing energy storage on the improvement of adequacy

分析可知,未提升充裕性前样本年 1000 个仿真年的综合评分平均分数为 0.673,增加燃气调峰机组的情况下综合评分平均分数为 0.682,增加储能的情况下综合评分平均分数为 0.705。按综合评分的排序,分别计算两种措施下仿真年充裕性综合评分较样本年提升幅度,再取平均值。计算得到增加燃气

调峰机组情况下评分提升幅度为 1.39%，增加储能情况下评分提升幅度为 4.77%，在投资相同的情况下增加储能对充裕性的提升显著优于增加燃气机组。

## 4 结论

本文提出了一种基于短缺事件分级分类和改进 AHP-EW-TOPSIS 的电力系统充裕性评估方法，并运用某市实际数据进行生产模拟仿真，对所提方法进行多方面验证，得出以下结论。

1) 提出一种多维多级的后验性充裕性指标体系制定方法，参考各类型储能设备的技术特性，对不同规模、不同时间尺度的短缺事件进行划分并进行特征提取，相对传统单指标更加细致综合地反映了短缺事件集的时序、规模等特征，并为后期备用配置提供更直接的参考依据。

2) 基于改进 AHP-EW-TOPSIS 法对充裕性指标体系进行综合评估，可适用于多指标 AHP 权重的灵活调整，避免了样本集数量过大可能造成的 EW 权重失衡问题，同时提高评估模型对小概率、大影响事件的灵敏度，提升了综合评估结果的准确性与客观性。

3) 利用随机生产模拟构建综合评估样本集并生成通用、固定的评分判定区间，通过样本集得到指标标准化公式和权重向量，弥补了传统综合评估方法指标权重、得分结果随评估对象数量变化的不足，使得不同场景下综合评分可直接进行比较，增强了综合评估方法的普适性。

## 参考文献

- [1] 马燕峰, 骆泽榕, 赵书强, 等. 基于改进蒙特卡洛混合抽样的含风光电力系统风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 75-83.  
MA Yanfeng, LUO Zerong, ZHAO Shuqiang, et al. Risk assessment of a power system containing wind power and photovoltaic based on improved Monte Carlo mixed sampling[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 75-83.
- [2] SHEEHY S, EDWARDS G, DENT C J, et al. Impact of high wind penetration on variability of unserved energy in power system adequacy[C]// 2016 International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), October 16-20, 2016, Beijing, China: 1-6.
- [3] HEYLEN E, DECONINCK G, VAN HERTEM D. Review and classification of reliability indicators for power systems with a high share of renewable energy sources[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 22(17): 554-568.
- [4] 黎博, 陈民铀, 钟海旺, 等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(2): 555-581.  
LI Bo, CHEN Minyou, ZHONG Haiwang, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 555-581.
- [5] IEEE Standards Association, IEEE Std. IEEE guide for electric power distribution reliability indices[S]. IEEE, 2012: 1-43.
- [6] 何剑. 泛欧电力系统概率充裕性评估应用及启示[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2681-2686.  
HE Jian. Application of Pan-European power system probabilistic adequacy assessment and its inspiration[J]. Power System Technology, 2018, 42(8): 2681-2686.
- [7] BRITO-PEREIRA P, MASTROPIETRO P, RODILLA P, et al. Adjusting the aim of capacity mechanisms: Future-proof reliability metrics and firm supply calculations[J]. Energy Policy, 2022, 50(5): 1-13.
- [8] STENCLIK D, BLOOM A, COLE W, et al. Quantifying risk in an uncertain future: the evolution of resource adequacy[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2021, 19(6): 29-36.
- [9] KRUPENEV D, LEBEDEVA L, KOVALEV G, et al. Analysis of the reserve generating capacity in unified power system of Russia in terms of adequacy assessment[J]. E3S Web of Conferences, EDP Sciences, 2017, 4(13): 1-6.
- [10] 穆永铮, 鲁宗相, 乔颖, 等. 基于多算子层次分析模糊评价的电网安全与效益综合评价指标体系[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 23-28.  
MU Yongzheng, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. A comprehensive evaluation index system of power grid security and benefit based on multi-operator fuzzy hierarchy evaluation method[J]. Power System Technology, 2015, 39(1): 23-28.
- [11] 艾欣, 秦璐晗, 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.
- [12] 吕朋蓬, 赵晋泉, 李端超, 等. 电网运行状态评价指标体系与综合评价方法[J]. 电网技术, 2015, 39(8): 2245-2252.  
LÜ Pengpeng, ZHAO Jinquan, LI Duanchao, et al. An assessment index system for power grid operation status and corresponding synthetic assessment method[J]. Power System Technology, 2015, 39(8): 245-2252.

- [13] XU Xiaomin, NIU Dongxiao, QIU Jinpeng, et al. Comprehensive evaluation of coordination development for regional power grid and renewable energy power supply based on improved matter element extension and TOPSIS method for sustainability[J]. Sustainability, 2016, 8(2): 1-17.
- [14] 邓红雷, 戴栋, 李述文. 基于层次分析-熵权组合法的架空输电线路综合运行风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 28-34.  
DENG Honglei, DAI Dong, LI Shuwen. Comprehensive operation risk evaluation of overhead transmission line based on hierarchical analysis-entropy weight method[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(1): 28-34.
- [15] 朱继忠, 董瀚江, 李盛林, 等. 数据驱动的综合能源系统负荷预测综述[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(23): 7905-7924.  
ZHU Jizhong, DONG Hanjiang, LI Shenglin, et al. Review of data-driven load forecasting for integrated energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23): 7905-7924.
- [16] STENCLIK D, BLOOM A, COLE W, et al. Quantifying risk in an uncertain future: the evolution of resource adequacy[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2021, 19(6): 29-36.
- [17] 谢小荣, 马宁嘉, 刘威, 等. 新型电力系统中储能应用功能的综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 158-169.  
XIE Xiaorong, MA Ningjia, LIU Wei, et al. Functions of energy storage in renewable energy dominated power systems: review and prospect[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(1): 158-169.
- [18] 马凯强. 区域电网发展综合评估指标体系与方法研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.  
MA Kaiqiang. Research on comprehensive evaluation index system and method of regional power grid development[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.
- [19] 王正阳. 电网发展综合性诊断模型研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2018.  
WANG Zhengyang. Research on comprehensive diagnostic model of power grid development[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2018.
- [20] YAN Liu, ECKERT C M, ERAL C. A review of fuzzy AHP methods for decision-making with subjective judgements[J]. Expert Systems with Applications, 2020, 31(23): 1-30.
- [21] CHEN Pengyu. Effects of the entropy weight on TOPSIS[J]. Expert Systems with Applications, 2021, 32(6): 1-27.
- [22] 赵书强, 汤善发. 基于改进层次分析法、CRITIC 法与逼近理想解排序法的输电网规划方案综合评价[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 143-148.  
ZHAO Shuqiang, TANG Shanfa. Comprehensive evaluation of transmission network planning scheme based on improved analytic hierarchy process, CRITIC method and TOPSIS[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 143-148.
- [23] 王新宝, 葛景, 韩连山, 等. 构网型储能支撑新型电力系统建设的思考与实践[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 172-179.  
WANG Xinbao, GE Jing, HAN Lianshan, et al. Theory and practice of grid-forming BESS supporting the construction of a new type of power system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 172-179.
- [24] 李建林, 武亦文, 王楠, 等. 吉瓦级电化学储能电站研究综述及展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 2-14.  
LI Jianlin, WU Yiwen, WANG Nan, et al. Review and prospect of Gigawatt-level electrochemical energy storage power station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 2-14.
- [25] 文劲宇, 周博, 魏利岫. 中国未来电力系统储电网初探[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 1-10.  
WEN Jinyu, ZHOU Bo, WEI Lishen. Preliminary study on an energy storage grid for future power system in China[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 1-10.
- [26] LI Junhui, MU Gang, ZHANG Jiahui, et al. Dynamic economic evaluation of hundred megawatt-scale electrochemical energy storage for auxiliary peak shaving[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(3): 851-868.

收稿日期: 2023-08-09; 修回日期: 2023-10-13

作者简介:

张宇天(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源电力系统仿真与优化; E-mail: zhangyutiandt@foxmail.com

顾丹珍(1971—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究生导师, 研究方向为电力系统建模、规划和优化; E-mail: gudanzen@shiep.edu.cn

李振坤(1982—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为配电网规划及运行控制、分布式电源并网及微电网、主动配电网技术等。E-mail: lzk021@163.com

(编辑 许威)