



基于模糊层次分析法熵权法逼近理想解排序法的虚拟电厂综合贡献度评估方法

曾晔 加鹤萍 杨菁 王伟 钟桦 韩金山 刘敦楠

Comprehensive Contribution Degree Evaluation Method of Virtual Power Plants Based on FAHP-EWM-TOPSIS Method

ZENG Ye, JIA Heping, YANG Jing, WANG Wei, ZHONG Hua, HAN Jinshan, LIU Dunnan

引用本文:

曾晔, 加鹤萍, 杨菁, 等. 基于模糊层次分析法熵权法逼近理想解排序法的虚拟电厂综合贡献度评估方法[J]. 现代电力, 2024, 41(1): 144–151. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0188

ZENG Ye, JIA Heping, YANG Jing, et al. Comprehensive Contribution Degree Evaluation Method of Virtual Power Plants Based on FAHP-EWM-TOPSIS Method[J]. Modern Electric Power, 2024, 41(1): 144–151. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0188

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0188>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

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

Comprehensive Evaluation of Power Grid Security and Benefit Based on BWM Entropy Weight TOPSIS Method

现代电力. 2021, 38(1): 60–68 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0212>

基于贝叶斯反馈修正云模型的虚拟电厂运营风险综合评价方法

A Comprehensive Evaluation Method for Operational Risk of Virtual Power Plants Based on Bayesian Feedback Modified Cloud Model

现代电力. 2023, 40(5): 715–723 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0098>

基于区间线性规划和可逼近理想解排序法的园区型综合能源系统投资决策

Application of Interval Linear Programming and TOPSIS to Investment Decision on Integrated Energy System of Industrial Parks

现代电力. 2021, 38(3): 297–306 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2020.0347>

基于综合权重优劣解距离法模型的配电网调度模式评估方法

An Evaluation Method of Distribution Network Scheduling Mode Based on Comprehensive Weight TOPSIS Model

现代电力. 2022, 39(4): 487–495 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0164>

计及风险的分布式电源与储能虚拟电厂鲁棒优化调度

Robust Optimal Scheduling of Distributed Power and Storage Virtual Power Plants Considering Risks

现代电力. 2023, 40(4): 570–576 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0367>

风电全消纳下虚拟电厂内部资源鲁棒调度策略

Robust Scheduling Strategy of the Internal Resources in VPP Based on Wind Power Completely Consumed

现代电力. 2019, 36(3): 80–87 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I3/80>

基于模糊层次分析法-熵权法-逼近理想解排序法的 虚拟电厂综合贡献度评估方法

曾晔^{1a,1b}, 加鹤萍^{1a,1b}, 杨菁², 王伟², 钟桦², 韩金山^{1a,1b}, 刘敦楠^{1a,1b}
(1. 华北电力大学 a. 新能源电力与低碳发展研究北京市重点实验室; b. 经济与管理学院, 北京市昌平区 102206;
2. 国网上海市电力公司, 上海市浦东新区 200122)

Comprehensive Contribution Degree Evaluation Method of Virtual Power Plants Based on FAHP-EWM-TOPSIS Method

ZENG Ye^{1a,1b}, JIA Heping^{1a,1b}, YANG Jing², WANG Wei², ZHONG Hua², HAN Jinshan^{1a,1b},
LIU Dunnan^{1a,1b}

(1. North China Electric Power University a. Beijing Key Laboratory of New Energy and Low-Carbon Development; b. School of
Economics & Management, Changping District, Beijing 102206, China; 2. State Grid Shanghai Municipal
Electric Power Company, Pudong New District, Shanghai 200122, China)

摘要: 为科学全面评估虚拟电厂内部资源的贡献度, 深度挖掘虚拟电厂内部资源潜力, 激发虚拟电厂内部聚合资源, 积极提升安全、可靠和经济性, 助力源、网、荷、储一体化的发展, 首先, 充分考虑虚拟电厂内部资源在电网安全运行、电力电量平衡以及新能源消纳等方面的贡献, 建立虚拟电厂内部资源“安全-可靠-经济”的综合贡献度指标评估体系; 其次, 构建基于模糊层次分析法-熵权法-逼近理想解排序法的虚拟电厂综合贡献度评估方法, 分析虚拟电厂内部分布式能源资源贡献度最优选择策略, 并将该方案进行灵敏度检验; 最后, 通过算例分析不同类型的分布式能源资源对虚拟电厂的综合贡献度及其灵敏度, 确定虚拟电厂内部资源最优选择策略, 为虚拟电厂内部资源配置提出参考性建议。

关键词: 虚拟电厂; 分布式能源资源; 综合贡献度; TOPSIS 法

Abstract: To scientifically and comprehensively evaluate the contribution of the internal resources of virtual power plants (VPPs), deeply tap the potential of the internal resources of the VPPs, stimulate the internal aggregation of distributed energy resources (DERs), actively improve the safety, reliability and economy, and help the development of the integration of source, grid, load and storage, firstly, fully consider the contri-

butions of the internal DERs of the VPPs to the safe operation of the power grid, the balance of power and electricity, and the consumption of new energy, a comprehensive contribution index evaluation system of "safety, reliability and economy" for the internal DERs within the VPPs was established. Secondly, based on fuzzy analytic hierarchy process (FAHP)-entropy weight method (EWM)-technique for order preference by similarity to an ideal solution method (TOPSIS) method, a comprehensive contribution evaluation method of the VPPs was constructed to analyze the optimal selection strategy of contribution degree of distributed energy resources in the VPPs, and the sensitivity of the strategy was tested. Finally, by means of an example, the comprehensive contribution and sensitivity of different types of DERs to the VPPs is analyzed, the optimal selection strategy of internal resources of the VPPs is determined, and the reference suggestions for the internal DERs allocation of the VPPs is put forward.

Keywords: virtual power plants (VPPs); distributed energy resources (DERs); comprehensive contribution; TOPSIS method

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0188

0 引言

现阶段我国风电、光伏渗透率显著提高, 风、光自身的不稳定性和间歇性对电网系统安全稳定经济运行的影响逐年凸显^[1], 虚拟电厂应运而生。为保证电力系统的安全稳定运行, 虚拟电厂能够

基金项目: 国家自然科学基金项目(72171082)。
Project Supported by National Natural Science Foundation of China (72171082).

聚合风、光、储能等源、储、荷资源，实现可调资源的源、网、荷、储一体化发展。

随着大规模新能源发电设备的接入，虚拟电厂面临的挑战越来越多。虚拟电厂稳定运行方面，文献 [2] 认为可再生能源发电的不确定性体现在预测偏差、发电波动和新能源分布等方面；动态控制方面，文献 [3] 表明新能源的参与使得电力系统稳定安全控制更为复杂。现有文献对虚拟电厂内部聚合资源的安全性评估研究较少，难以支撑新型电网的运行安全。电力电量平衡是虚拟电厂安全稳定运行的前提。文献 [4] 指出，新型电力系统中风、光作为电源主力参与系统的电力电量平衡，需要更精确的模型来评估供电可靠性；目前电力系统规划运行中，文献 [5] 总结当前应对极端天气的措施集中在增加系统备用，提升输电网可靠性。而现有文献对虚拟电厂不同资源聚合方案的评估体系对可靠性的关注度不足。同时，文献 [6] 指出，随着虚拟电厂参与区域市场化交易的逐渐成熟，虚拟电厂的经济性将更大程度地得以体现，这意味着对虚拟电厂内部新能源消纳问题也亟需得到关注，以体现其高经济价值。

为充分考虑安全、可靠和经济，对虚拟电厂内部聚合资源综合贡献度的评估需设置多项指标综合评估。安全维度上，文献 [7] 构建考虑电动车动态充电模式的配电网可靠性评估模型，研究绿色交通对电网可靠性的影响；文献 [8] 提出了电力-燃气一体化网运行可靠性评估的新框架，研究了不同运营策略对运营可靠性指数的影响；可靠维度上，文献 [9] 提出长距离输电海缆可靠性评估方法，研究海上风电系统的可靠性；文献 [10] 基于关联分析-熵权法，提出有效评估火、储联合调频综合性能指标体系；在新型电力系统背景下，文献 [11] 提出了考虑风险评估的电动汽车光伏电站的需求响应优化方案。经济维度上，文献 [12] 将虚拟电厂综合经济收益作为经济性指标，构建虚拟电厂有功调度综合评价指标体系；文献 [13] 充分考虑不同风险导向下不同投资商的选择，基于成本效益分析，提出多投资商虚拟电厂容量配置模型；文献 [14] 从成本评价、投资效益和投资评价 3 个角度评价虚拟电厂经济效益，构建虚拟电厂效益评价指标体系。

在指标评价方法选择上，主观赋权法根据专家自身的经验进行打分，专业度高。在新型电力系统的评价方法中得到广泛运用。文献 [15] 基于直觉模糊多属性决策方法，从技术、经济和环境等方面提出可再生能源发电厂评估模型；文献 [16] 基于综合模糊理论提出核电站全生命周期评价体系。然而，主观赋权法的主观性强，学者们由此引入客观赋权法，以数据为基础，结合数学算法确定权重，减小主观影响。文献 [17] 为系统准确评估系统电能质量状况，提出主客观变异系数组合赋权综合评估方法；文献 [18] 采用层次分析法-风险熵权法建立多站融合综合能源系统评估方法。在评估体系的指标处理、赋权和方案排序基础上，文献 [19-20] 针对电能质量评估的灵敏度进行分析，为决策者选择控制灵敏度高的指标参数及方案提供参考依据。

现有文献主要关注虚拟电厂的经济效益评估，缺乏针对虚拟电厂内部资源综合贡献度的评估。本研究建立虚拟电厂综合贡献度评价方法，一方面弥补了针对虚拟电厂内部聚合资源综合贡献度评估体系研究的空白，从“安全-可靠-经济”角度综合评估内部聚合资源在虚拟电厂中的贡献。另一方面，提出的评价方法的指标权重计算兼顾主客观因素的影响，在方案排序的基础上，对评估结果进行灵敏度分析，使得虚拟电厂内部资源最优策略选择结果更为可靠，结合算例结果，为虚拟电厂内部资源配置提出参考性建议。

1 虚拟电厂综合贡献度评价指标体系

本文建立的虚拟电厂综合贡献度指标评价体系考虑电网安全运行、电力电量平衡以及新能源消纳等因素，从安全、可靠和经济 3 方面评估虚拟电厂各聚合资源在虚拟电厂中的综合贡献度。

1.1 综合贡献度指标选取及计算方法

1.1.1 安全维度

为了充分考虑分布式电源和储能等虚拟电厂内部资源对电网稳定运行和动态控制的影响，本文在安全维度选取电压合格率、有功曲线合格率和计划发/用电完成率 3 个指标，对虚拟电厂内部资源的发、用电安全进行综合考虑。指标具体内涵为：

1) 电压合格率是指分布式电源和储能设备等聚合资源在统计期内的电压合格率, 选定具有代表性的变压器作为电压质量考核点, 作为安全代表。计算公式为某一成员电压合格率= $[\sum(\text{点电压合格时间}/\text{点考核时间})\times 100\%]/\text{电压考核点数}\times 100\%$ 。

2) 有功曲线合格率指分布式电源和储能设备等聚合资源在统计期内有功曲线的合格率, 可体现现代电力系统安全运行状态下的电能质量。具体为某一成员有功曲线合格率= $(\text{统计期总小时数}-\text{偏离有功曲线正常浮动范围的小时数})/\text{统计期总小时数}\times 100\%$ 。

3) 计划发/用电完成率是指各聚合资源在统计期内发/用电计划完成情况, 可体现分布式电源对动态电网运行的相应情况。计算公式为某一成员计划发/用电完成率= $1-(\text{实际发/用电量}-\text{计划发/用电量})/\text{计划发/用电量}\times 100\%$ 。

1.1.2 可靠维度

针对新能源接入系统后的虚拟电厂内部聚合资源的电力电量平衡问题, 本文在可靠维度选取供电稳定性、供电持久率和响应及时性3个指标, 考核不同资源的稳定供电能力和需求响应水平, 反映其对虚拟电厂整体可靠程度的影响。具体内涵为:

1) 供电稳定性是指分布式电源、储能设备在统计期内故障停运次数。停运次数越少, 稳定性越高, 说明该成员在系统中供电可靠性越高。

2) 供电持久率是指该成员在统计期内对用户有效供电总小时与统计期间小时数的比值, 比值越高, 说明该成员在系统中越可靠。

3) 响应及时性是指用电负荷在统计期内未及时响应次数。未响应次数越少, 响应及时性越好, 说明该成员在系统中越可靠。

1.1.3 经济维度

为考虑分布式电源和储能等内部资源聚合对虚拟电厂整体产生的经济效益, 进一步研究虚拟电厂内部资源配置对自身新能源消纳的经济性影响, 本文在经济维度选择边际贡献值、平均贡献电量和可控容量3个评价指标。具体内涵及计算公式有:

1) 边际贡献值是指虚拟电厂内部某一成员在统计期内对虚拟电厂整体产生的经济效用, 计算公式为该成员边际贡献值= $(\text{虚拟电厂所获收益}$

$-\text{虚拟电厂除去该成员后所获收益})/\text{虚拟电厂所获收益}\times 100\%$ 。边际贡献率越大, 代表该成员在虚拟电厂中发挥的作用越大。

2) 平均贡献电量是指在统计期内分布式电源的平均发电量和储能设备转换后的等效发电量。虚拟电厂收益由量和价构成, 平均贡献电量越大, 代表该成员为虚拟电厂创造的价值越大。

3) 可控容量是指在统计期内可调机组可控用电负荷, 借助储能电池促进新能源消纳, 通过降低偏差考核成本, 体现其为虚拟电厂创造经济效益。

1.2 综合贡献度指标体系

综合贡献度分为安全、可靠和经济3个一级指标, 一级指标下又细分为电压合格率等9个二级指标。具体指标如图1所示。

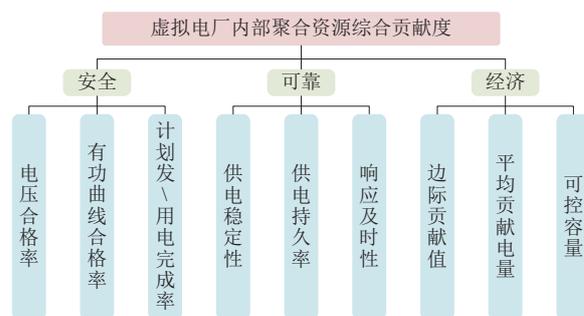


图1 虚拟电厂综合贡献度指标体系

Fig. 1 Contribution index framework of virtual power plants

2 虚拟电厂综合贡献度指标评价方法

本文在评估系统设置上综合运用主客观赋权法, 采用模糊层级分析法 (fuzzy analytic hierarchy process, FAHP) 和熵权法 (entropy weight method, EWM) 组合的赋权方法进行评估, 以便兼顾评估中的主观因素和客观因素。虚拟电厂内部聚合资源综合贡献度主客观组合赋权模型如图2所示。



图2 FAHP-EWM 组合主客观赋权模型

Fig. 2 Subjective and objective weighting model combined FAHP with EWM

2.1 主客观 FAHP-EWM 组合赋权模型确定指标权重

2.1.1 运用 FAHP 法计算指标权重

FAHP 法主要根据专家的主观经验作出评价，其主要步骤包括建立判断矩阵、确定隶属函数、进行单因素评价，最终确定权重向量。

1) 建立判断矩阵。

确定评价对象因素集和评语集，记为 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ 。评语集按照贡献度水平的高低分为 5 个等级，按照好、较好、一般、较差和差的顺序记作 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_5\}$ 。

2) 确定隶属函数。

经极差变换后使得各指标值均在 0 到 1 之间，用 $\{1, 0.75, 0.5, 0.25, 0\}$ 代表评语集中的好、较好、一般、较差和差，即 $V = \{1, 0.75, 0.5, 0.25, 0\}$ 。选取正态型隶属函数 $\mu_a = e^{-[(x-a)/\sigma]^2}$ 作为各评价指标对评语集的隶属函数，其中 σ 为评语集取值的标准差， $a = \{1, 0.75, 0.5, 0.25, 0\}$ 。

3) 单因素评价。

按照隶属度公式计算各指标值对好、较好、一般、较差和差 5 个评语的隶属度，并进行归一化处理得到矩阵 M ，计算公式为

$$y_{ij} = x_{ij} / \sum_{j=1}^n x_{ij} \quad (1)$$

式中： $1 \leq i \leq m = 9$ ， $1 \leq j \leq n = 3$ 。

4) 确定权重向量。

运用 FAHP 给出三级对二级指标的权重。收集专家打分，采用 1~9 标度法记录，将打分结果设为矩阵 B ，根据公式 (2) 计算得到权系数为 λ_{\max} ，计算公式为

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(BM)_i}{nM_i} \quad (2)$$

该方法受专家主观性影响，不能完全反映客观事实，因此下一步进行一致性检验。

5) 一致性检验。

根据公式 (3) 计算一致性指标 CI，设为 α ，其中 n 为判断矩阵的阶数，即指标总数，查表得随机一致性指标 RI，设为 β 。由公式 (4) 计算一致性比率 CR，设为 γ ，由此判断是否通过一致性检验。

$$\alpha = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1) \quad (3)$$

$$\gamma = \alpha / \beta \quad (4)$$

计算结果若满足 $\gamma < 0.1$ ，则表明通过一致性检验，可以认为判断矩阵被接受；反之，修改判断矩阵，直到满足 $\gamma < 0.1$ 为止。若一致性检验通过，则可计算权向量。三级指标分别对二级指标的权向量为 W ，最终得出所有三级指标的权重。记向量 W_{FAHP} 作为模糊判断矩阵的权向量。

2.1.2 运用 EWM 法修正指标权重

综合考虑 FAHP 法的主观性，本文采用 EWM 客观赋权法，充分考虑聚合资源数据的差异性，数据差异性小的指标将被赋予更小的权重，从而使得评估模型更具有针对性。其主要步骤包括数据标准化、信息熵计算，最终确定指标权重。

1) 数据标准化。

根据公式 (5) 对数据进行标准化处理，计算第 i 个评价对象的第 j 个指标值的比重 p_{ij} 。计算公式为

$$p_{ij} = y_{ij} / \sum_{i=1}^m y_{ij} \quad (5)$$

2) 计算信息熵。

根据公式 (6) 计算第 j 个指标的熵值，式中 $k = 1/\ln m$ ， m 为评价对象的个数。计算公式为

$$e_j = -k \sum_{i=1}^m (p_{ij} * \ln p_{ij}) \quad (6)$$

3) 确定指标权重。

根据公式 (7) 计算第 j 个指标的熵权 w_{ij} ，确定指标权重。计算公式为

$$w_{ij} = \frac{1 - e_j}{\sum_{j=1}^n (1 - e_j)} \quad (7)$$

式中 n 为评价指标的个数，记向量 W_{EMW} 作为 EWM 法求得的权重。

4) 修正指标权重。

FAHP 法具有一定的主观局限性，忽略了实际数据信息。而 EWM 法具有一定的客观局限性，忽略了主观偏向，因此需要将主客观评估方法进行组合赋权。设修正后最终权重为 W ，计算公式为

$$W = \frac{W_{FAHP} * W_{EMW}}{\sum_{j=1}^n (W_{FAHP} * W_{EMW})} \quad (8)$$

2.2 基于逼近理想解排序法判断最优选择策略

为保证研究结果更具有可靠性,本文采用逼近理想解排序法(technique for order preference by similarity to an ideal solution, TOPSIS)对各评价对象与理想值的接近程度进行排序,该方法用于多属性决策分析,操作性强,评估结果更为客观全面。

1) 建立加权决策矩阵。

根据公式(9),采用倒数法将低优指标转化为高优指标 X_{ij}' ,计算公式为

$$X_{ij}' = 1/X_{ij} \quad (9)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, m$; $j = 1, 2, \dots, n$ 。

根据公式(10),对指标值进行归一化处理得到 y_{ij} ,计算公式为

$$y_{ij} = x_{ij}' / \sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}'^2} \quad (10)$$

式中: $1 \leq i \leq m$; $1 \leq j \leq n$ 。

2) 确定正理想解和负理想解。

根据公式(11)和公式(12)计算评估目标的正理想解 A^+ 和负理想解 A^- 。计算公式为

$$A^+ = (a_1^+, \dots, a_j^+, \dots, a_n^+) \quad (11)$$

$$A^- = (a_1^-, \dots, a_j^-, \dots, a_n^-) \quad (12)$$

3) 计算各指标与最优、最差向量的距离。

根据公式(13)和公式(14)计算各指标与最优向量的距离 D_i^+ 与最差向量的距离 D_i^- ,计算公式为

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (a_{ij}^+ - a_{ij})^2} \quad (13)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^m \omega_j (a_{ij}^- - a_{ij})^2} \quad (14)$$

4) 计算相对贴近度。

根据公式(15)计算各评价对象与最优方案的接近程度,使用最优向量和最差向量计算相对贴近度可以更好地比较聚合资源贡献度的优劣,按照 C_i 值从大到小排列, C_i 值越大,表明与最优方案的相对距离越近,即聚合资源贡献度越高。计算公式为

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (15)$$

2.3 灵敏度分析

鲁棒性是描述系统稳定性的概念,体现参数

变化对系统稳定性的影响。本文综合贡献度评价方法中涵盖主观评价方法,因此有必要进行灵敏度分析。

已知 C_m 和 C_n 分别为方案 x_m 和 x_n 的综合评价值,当给定方案 x_m 的权重值 w_m 扰动 Δw_m 时,新属性值和新评价值分别为 w_m^* 和 C_m^* 、 C_n^* ,使得 C_m 和 C_n 的排序关系改变的扰动范围成为灵敏度区间。其中 $w_m^* = w_m + \Delta w_m$, $C_m^* = f_m(r_{m1}, r_{mh}, \dots, r_{mn}; w_1, w_h + \Delta w_h, \dots, w_n) = C_m + h_m(\Delta w_h)$, $C_n^* = C_n + h_n(\Delta w_h)$, h_m 和 h_n 是关于扰动变化 Δw_h 的函数。

如果方案 x_m 和 x_n 在属性 u_h 的权重变化量是可行的,且当 w_h 变为 $w_h^* = w_h + \Delta w_h$ 时, x_m 和 x_n 的排序发生改变,则称 Δw_h 为属性 u_h 的权重 w_h 的最小变化量。基于此可计算指标权重值 w_h 的最小相对变化量 Δw_{mnh}^* ,计算公式为

$$\Delta w_{mnh}^* = \Delta w_{mnh}' / \Delta w_h \quad (16)$$

定义指标属性的灵敏度为 $S(u_h)$,计算公式为

$$S(u_h) = \frac{1}{\min_{1 \leq m \leq n \leq 4} \{|\Delta w_{mnh}^*|\}} \quad (17)$$

式中: $m, n = 1, 2, 3, 4$, $m \neq n$ 。根据计算结果可判断评价鲁棒性。当灵敏度 $S(u_h)$ 低时,说明评价结果稳定,评价鲁棒性好;反之评价鲁棒性差。

2.4 综合贡献度指标体系评估方法步骤

虚拟电厂内部聚合资源综合贡献度评估步骤共分为5步。第1步,采用公式(1)—(4)求取聚合资源综合贡献度主观赋权法权重值;第2步,采用公式(5)—(7)求取聚合资源综合贡献度客观赋权法权重值;第3步,采用公式(8)修正主客观权重值;第4步,采用公式(9)—(15)判断虚拟电厂内部资源最优选择策略;第5步,采用公式(16)和公式(17)对虚拟电厂综合贡献度评估方法进行灵敏度分析。

3 算例分析

本文采用某虚拟电厂一段时间内光伏、风电、储能和燃气轮机在某段时间内9个评价指标实测数据进行算例分析,进行计算结果讨论。

3.1 实测数据

某虚拟电厂光伏、风电、储能和燃气轮机9个指标的实测数据如表1所示。

表 1 某虚拟电厂各聚合资源实测数据

Table 1 Measured data of aggregated distributed energy resources in a virtual power plant

指标	光伏	风电	储能	燃气轮机
电压合格率/%	90	95	99	85
有功曲线合格率/%	95	89	97	80
计划发/用电完成率/%	95	90	98	85
供电稳定性/次数	25	50	100	75
供电持久率/%	95	90	98	85
响应及时性/次数	30	35	10	120
边际贡献值(比值)	0.2	0.3	0.4	0.1
平均贡献电量/(MW·h)	492.5	810	400	80
可控容量/MW	0	0	3	2

3.2 基于 FAHP 法的评估体系主观赋权

3.2.1 确定评价对象因素集和评语集

将实测数据输入综合贡献度指标体系中,得到指标集 $U=\{\text{电压合格率, 有功曲线合格率, } \dots, \text{可控容量}\}=\{u_1, u_2, \dots, u_9\}$ 。评语集按照专家评分结果分为 5 个等级, 得到评语集 $V=\{\text{好, 较好, 一般, 较差, 差}\}=\{v_1, v_2, \dots, v_5\}$ 。

3.2.2 建立判断矩阵并进行主观赋权

以 1~9 标度法建立专家打分判断矩阵, 根据公式 (2)~(4), 计算得到基于 FAHP 主观权重法的虚拟电厂内部资源综合贡献度评估体系内各指标权向量 W_{FAHP} , 计算结果为 $W_{FAHP}=(0.333, 0.570, 0.097, 0.366, 0.102, 0.532, 0.211, 0.240, 0.549)^T$ 。

3.3 基于 FAHP-EWM 法的评估体系权重修正

3.3.1 基于 EWM 法的客观赋权

根据式 (5)~(7), 计算得到基于 EMW 客观权重法的虚拟电厂内部资源综合贡献度评估体系内各指标的客观权重 $W_{EMW}=(0.078, 0.074, 0.074, 0.107, 0.074, 0.171, 0.095, 0.109, 0.217)^T$ 。

3.3.2 综合贡献度主客观权重修正结果

按照式 (8) 求得 EWM 法对 FAHP 法修正后的最终权重, 得到基于 FAHP-EWM 法的虚拟电厂内部聚合资源综合贡献度评估模型结果, 如图 3 所示。

3.4 最优选择策略及灵敏度分析

3.4.1 基于 TOPSIS 法计算最优选择策略结果

根据式 (9)~(10), 采用倒数法对数据进行归一化, 再根据式 (11)、(12), 计算得到最优向量 A^+ 和最差向量 A^- 。根据式 (13)~(15), 计算各评

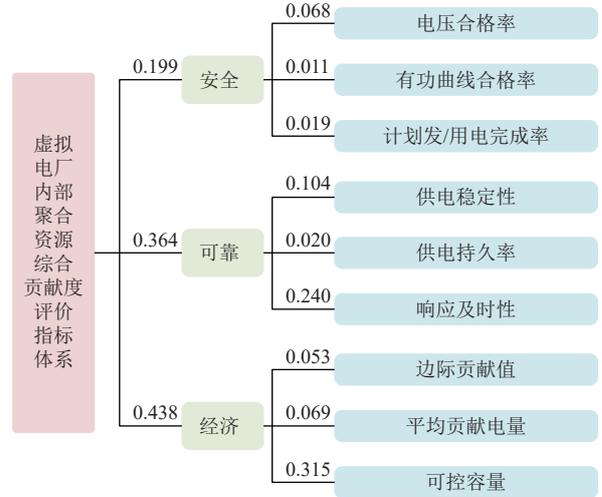


图 3 虚拟电厂内部聚合资源综合贡献度评估模型结果

Fig. 3 The results of the comprehensive contribution evaluation model for the aggregated distributed energy resources within a virtual power plant

价对象与最优方案的接近程度, 可得虚拟电厂内部聚合资源最优策略排序结果, 如表 2 所示。

表 2 虚拟电厂内部聚合资源最优策略排序结果

Table 2 Optimal strategy ranking results of aggregated distributed energy resources within a virtual power plant

评价对象	最优向量距离 D_i^+	最差向量距离 D_i^-	接近程度 C_i	排序
光伏	50.0055	5.4353	0.0980	4
风电	33.3375	6.2555	0.1580	3
储能	20.1831	6.5772	0.2458	1
燃气轮机	22.0000	5.5168	0.2005	2

根据 TOPSIS 原理, 接近程度 C_i 的值越接近于 1, 表明结果越接近最优值。结果显示, 虚拟电厂各聚合资源的综合贡献度排序为储能>燃气轮机>风电>光伏。

3.4.2 灵敏度分析

根据式 (16)、(17) 计算灵敏度, 可求得各方案关于评价维度的灵敏度如表 3 所示。

表 3 各方案关于评价维度的灵敏度

Table 3 Sensitivity of each strategy on the index attribution

光伏	风电	储能	燃气轮机
10.4123	6.3930	3.8746	4.8897

由表 3 可得, 各方案关于评价维度的灵敏度大小的排序为光伏>风电>燃气轮机>储能。其中, 光伏的灵敏值最大, 说明光伏的排序结果对指标维度变化的敏感性较强, 即某些评价维度的微小

变化可以引起该方案排序的改变。储能的灵敏度值最小,表明储能的排序结果对指标维度值变化的敏感性较弱,即该方案的评估结果较为稳定。因此,在本算例的方案决策中,基于TOPSIS法及灵敏度分析结果,储能排序靠前,灵敏度小,说明该方案稳定。

3.5 对策和建议

相较于虚拟电厂中光伏、风电和燃气轮机,储能虚拟电厂中表现突出,综合贡献度排在首位。基于此,本文针对虚拟电厂内部资源配置提出以下参考性建议:

1) 加快布局虚拟电厂内部的分布式储能建设。随着风电、光伏等灵活性资源的不断接入,虚拟电厂应对极端天气的难度将不断加大。因此,在虚拟电厂内部布局分布式储能,能够有效降低极端天气对虚拟电厂整体带来的负面影响,从而提高虚拟电厂整体的安全、稳定、可靠水平。

2) 优先虚拟电厂内部储能装置的配置。风电、光伏等新能源的间歇性、波动性和随机性特性,给虚拟电厂内部的新能源消纳带来挑战。优先储能装置在虚拟电厂中的配置,优先满足虚拟电厂内分布式新能源的消纳需要,从而降低虚拟电厂的弃风弃光率,提高虚拟电厂整体的经济性和可靠性。

4 结论

本文采用基于FAHP-EWM-TOPSIS法的虚拟电厂内部资源“安全-可靠-经济”的综合贡献度指标评估体系,从安全、可靠和经济评估光伏、风电、储能和燃气轮机等聚合资源在虚拟电厂中的综合贡献度,得出储能为虚拟电厂内部资源的最优选择策略的结论。经灵敏度分析,该结论稳定。在此基础上,本文提出加快布局虚拟电厂内部的分布式储能建设,优先虚拟电厂内部储能装置的配置,为虚拟电厂内部资源配置提出参考性建议。

参考文献

- [1] 罗春辉,瞿纲举,邹同华,等.基于层次分析法和云模型的风电场运行性能多维评价模型[J].现代电力,2021,38(06):601-612.
LUO Chunhui, QU Gangju, ZOU Tonghua, et al. Multi-dimensional evaluation model of wind farm operation performance based on AHP and Cloud Model[J]. Modern Electric Power, 2021, 38(06): 601-612(in Chinese).
- [2] 任曦骏,朱刘柱,谢道清,等.可再生能源参与电力现货市场关键问题的研究[J].现代电力,2022,39(02):203-211.
REN Xijun, ZHU Liuzhu, XIE Daoqing, et al. Discussion on key issues of renewable energy participation in the electricity spot market and its application on a case study[J]. Modern Electric Power, 2022, 39(02): 203-211(in Chinese).
- [3] 唐程辉,张凡,张宁,等.考虑可再生能源随机性和需求响应的电力系统日前经济调度[J].电力系统自动化,2019,43(15):18-25,63.
TANG Chenghui, ZHANG Fan, ZHANG Ning, et al. Day-ahead economic dispatch of power system considering renewable power uncertainty and demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(15): 18-25, 63(in Chinese).
- [4] 余潇潇,宋福龙,李隽,等.含高比例新能源电力系统极端天气条件下供电安全性的提升[J/OL].现代电力:1-11[2022-05-30].DOI:10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0321.
YU Xiaoxiao, SONG Fulong, LI Jun, et al. Power supply security improvement of power grid with high proportion of renewable energy under extreme weather events[J/OL]. Modern Electric Power: 1-11[2022-05-30]. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0321.
- [5] 程浩忠,李隽,吴耀武,等.考虑高比例可再生能源的交直流输电网规划挑战与展望[J].电力系统自动化,2017,41(09):19-27.
CHENG Haozhong, LI Jun, WU Yaowu, et al. Challenges and prospects for AC/DC transmission expansion planning considering high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(09): 19-27(in Chinese).
- [6] 曾鸣,马嘉欣,许彦斌,等.“双碳”目标下虚拟电厂参与调峰产品交易的机制与路径探索[J].价格理论与实践,2021(10):9-14.
ZENG Ming, MA Jiaxin, XU Yanbin, et al. Mechanism and path exploration of virtual power plant participating in peaking product trading under carbon peaking and carbon neutrality goal[J]. Price Theory & Practice, 2021(10): 9-14(in Chinese).
- [7] KAMRUZZAMAN M, BHUSAL N, BENIDRIS M. A convolutional neural network-based approach to composite power system reliability evaluation [J]. 2022, International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2022, 135, 1-10.
- [8] ANSARI O A, CHUNG C. Y., ZIO E. , A novel framework for the operational reliability evaluation of integrated electric power-gas networks[J]. 2021, IEEE Transactions on Smart Grid, 12 (5) , art. no. 9416283 , pp. 3901-3913.
- [9] 王邦彦,王秀丽,王碧阳,等.海上风电变频送出系统可靠性评估模型及方法[J/OL].电网技术:1-10[2022-05-31].DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2021.2448.
WANG Bangyan, WANG Xiuli, WANG Bivang, et al. reliability evaluation model and method of offshore wind power fractional frequency delivery system[J/OL]. Power

- System Technology: 1-10[2022-05-31]. DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2021.2448.
- [10] 刘志成, 彭道刚, 赵慧荣, 等. 基于改进权重因子的火储联合调频综合性能评估[J/OL]. 电力系统自动化: 1-10 [2022-05-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20220325.1402.012.html>.
- LIU Zhicheng, PENG Daogang, ZHAO Huirong, *et al.* Comprehensive Performance evaluation of combined thermal-energy storage frequency modulation based on improved weight factors[J/OL]. Automation of Electric Power Systems: 1-10[2022-05-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20220325.1402.012.html>
- [11] 颜勤, 涂晓帆. 天气影响下基于风险评估的电动汽车光伏充电站需求响应[J/OL]. 重庆大学学报: 1-10[2022-05-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20220303.2108.002.html>
- YAN Qin TU Xiaofan. Demand response of photovoltaic electric vehicle charging stations based on weather-impact risk assessment[J/OL]. Journal of Chongqing University: 1-10[2022-05-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1044.N.20220303.2108.002.html>
- [12] 徐佳敏, 孙英云, 孙芊, 等. 虚拟电厂有功调度综合评价指标体系[J]. 电工电能新技术, 2020, 39(03): 32-39.
- XU Jiamin, SUN Yingyun, SUN Qian, *et al.* A comprehensive evaluation index system of VPP participating in active power dispatching[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2020, 39(03): 32-39(in Chinese).
- [13] 栗然, 丁星, 孙帆, 等. 风险导向下基于成本效益分析的多投资商虚拟电厂容量配置模型[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(01): 145-153.
- LI Ran, DING Xing, SUN Fan, *et al.* Risk-oriented capacity configuration model for multi-investor virtual power plant based on cost-benefit analysis[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2021, 41(01): 145-153(in Chinese).
- [14] 毛田, 黄宁馨, 程韧利, 等. 虚拟电厂效益评价指标体系构建及其范例分析[J/OL]. 南方电网技术: 1-8[2022-05-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20220308.1426.002.html>.
- MAO Tian, HUANG Ningxin, CHEN Renli, *et al.* Construction of the benefit evaluation index system of virtual power plant and its example analysis[J/OL]. Southern Power System Technology: 1-8[2022-05-31]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20220308.1426.002.html>.
- [15] TURGUT Z K, TOLGA A C. Sustainable and renewable energy power plants evaluation by fuzzy VIKOR technique[J]. 2017, Lecture Notes in Engineering and Computer Science, 2228, pp. 774-779.
- [16] XIE L, SUN Y. Post evaluation system of nuclear power plant construction based on comprehensive fuzzy theory[C]. 2019, Proceedings of the 31st Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2019, art. no. 8833059, pp. 4078-4082.
- [17] 张明, 夏若平, 徐诗露, 等. 主客观变异系数组合赋权的电能质量综合评估方法[J/OL]. 现代电力: 1-7[2022-05-31]. DOI:10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0372.
- ZHANG Ming, XIA Ruoping, XU Shilu, *et al.* Comprehensive evaluation of power quality based on variation coefficient synthetic weighting of subjective and objective weights[J/OL]. Modern Electric Power: 1-7[2022-05-31]. DOI:10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0372.
- [18] 朱晔, 刘欣, 慕小斌, 等. 基于层次分析和风险熵权的多站融合综合能源系统多指标综合评估[J]. 电测与仪表, 2022, 59(4): 128-136, 143.
- ZHU Ye, LIU Xin, MU Xiaobin, *et al.* Multi-index comprehensive evaluation of multi-station integrated energy system based on analytic hierarchy process and risk entropy weight[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2022, 59(4): 128-136, 143(in Chinese).
- [19] 袁桂丽, 张健华, 王田宏, 等. 基于TOPSIS灰色关联投影法的火电厂节能综合评价与权重灵敏度分析[J]. 动力工程学报, 2015, 35(5): 404-411.
- YUAN Guili, ZHANG Jianhua, WANG Tianhong, *et al.* Comprehensive energy-saving evaluation of thermal power planis based on TOPSIS gray relational projection and the weight sensitivity analysis[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2015, 35(5): 404-411(in Chinese).
- [20] 荆朝霞, 胡仁. 电能质量评估灵敏度分析及在改进密切值法中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 60-66.
- JING Zhaoxia, HU Ren. Sensitivity analysis for power quality evaluation and its application in modified close value method[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(9): 60-66(in Chinese).

收稿日期: 2022-06-03

作者简介:

曾晔(1998), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力市场, E-mail: zengye213@163.com;

加鹤萍(1992), 女, 博士, 副教授, 通信作者, 研究方向为电力市场, E-mail: jiaheping@ncepu.edu.cn;

杨菁(1977), 男, 学士, 高级工程师, 研究方向为电力规划、电力市场, E-mail: yang-jing@sh.sgcc.com.cn;

王伟(1966), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行、电力市场, E-mail: wangwei@sh.sgcc.com.cn;

钟桦(1977), 男, 学士, 高级工程师, 研究方向为电力市场, E-mail: zhonghua@sh.sgcc.com.cn;

韩金山(1967), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力市场, E-mail: hanjinshan@2911.net;

刘敦楠(1979), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力市场, E-mail: liundunnan@163.com。