

基于博弈论组合赋权和二维可分割云模型的 VPP运行安全风险评价研究

廖奕洋, 王晓彤, 郭 森

(华北电力大学 经济与管理学院, 北京 102206)

摘 要: 虚拟电厂(VPP)通过聚合多种资源进行运行, 面临内部与外部等多重风险。开展运行安全风险评价有助于防范潜在风险, 保障新型电力系统的安全稳定运行。基于内外部视角, 首先从系统安全风险、事故安全风险、数据安全风险和网络安全风险4个维度构建了VPP运行安全风险评价指标体系; 其次, 引入纳什均衡博弈思想, 提出一种结合熵权法(EWM)与贝叶斯最优最劣法的组合赋权方法, 并构建基于二维可分割云模型的风险评价模型; 最后, 对3个省份的VPP进行了实例评价。实证结果表明: 出力预测偏差、需求响应执行情况、设备故障率和人为操作事故属于关键风险指标; 位于J省的VPP运行安全风险等级较低, 而位于H省和S省的VPP则处于中等风险等级。所提模型可为VPP运营者的风险管理提供参考。

关键词: VPP; 运行安全; 风险评价; 博弈论组合赋权; 二维可分割云模型

中图分类号: TM732

文献标志码: A

DOI: 10.20204/j.sp.2025.10010

Research on Operational Security Risk Assessment of Virtual Power Plants Based on Game Theory Combination Weighting and Two-dimensional Divisible Cloud Model

LIAO Yiyang, WANG Xiaotong, GUO Sen

(School of Economics and Management, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Virtual power plants (VPPs), which operate by aggregating diverse resources, face multiple internal and external risks. Conducting operational security risk assessments helps prevent potential risks and ensures the secure and stable operation of new power systems. From an internal and external perspective, this study first constructs an operational security risk assessment index system for VPPs from four dimensions: system security risk, incident security risk, data security risk, and cyber security risk. Next, introducing the concept of Nash equilibrium game theory, a combination weighting method integrating the entropy weight method and the Bayesian best-worst method (BWM) is proposed, and a risk assessment model based on a two-dimensional divisible cloud model is established. Finally, an empirical evaluation of VPPs in three provinces was conducted. The results indicate that output prediction deviation, demand response execution, equipment failure rate, and human operational accidents are critical risk indicators. The VPP located in Province J exhibits a relatively low operational security risk level, while those in Provinces H and S are at a medium risk level. The proposed model can provide a reference for risk management by VPP operators.

Key words: VPP; operational security; risk assessment; game theory combination weighting; two-dimensional divisible cloud model

0 引言

在全球能源结构低碳化转型的大背景下, 虚拟电厂(Virtual Power Plant, VPP)作为一种新型的能

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(72472050)

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (72472050)

源管理与调度模式, 其全球规模不断扩大, 技术和市场应用逐步成熟, 正日益成为聚合分布式能源、提高电力系统灵活性和推进可再生能源利用的关键技术^[1]。然而, 随着VPP参与主体的多元化及运作过程的复杂化, 其安全运行面临多维挑战。2025年4月, 国家发展改革委和国家能源局联合发布中国首个VPP领域专项政策文件《关于加快推进虚拟电厂发展的指导意见》^[2], 明确提出加快推进VPP发展,

提升 VPP 参与电力系统运行的安全水平及自身安全水平。作为一种新型的电力调度与管理模式, VPP 的安全性问题已经引起了广泛关注。

国内外学者从多个方面开展了相关研究。在 VPP 风险识别研究方面, 文献[3]分析了风光出力不确定性对 VPP 带来的风险。文献[4]分析了 VPP 现阶段参与调峰交易存在的风险, 如交易经验有限、保障机制未完善以及外部市场风险等, 并提出 VPP 参与调峰产品交易可分为区域市场化起步、区域市场化成熟和资源配置扩大化 3 大阶段。文献[5]指出多个 VPP 参与全局优化调度时, 隐私数据保护问题较为突出。文献[6]提出 VPP 在规模、资源及架构等多方面情况较为复杂, 在网络安全方面, 相比微电网等其他系统面临更多攻击, 并归纳出 VPP 通信信道存在安全隐患、缺乏规范化安全运维管理措施、外部威胁防御能力较弱等多种潜在网络安全风险。文献[7]构建了 VPP 两阶段调度模型, 考虑了风力发电、日前能源价格与储备价格、决策风险、负荷需求与弹性等不确定性因素。

在 VPP 风险评价方法研究方面, 文献[8]从战略、技术等 8 个维度构建了 VPP 运营风险评价指标体系, 运用组合赋权-云模型方法评估了其风险水平。文献[9]选用有序加权平均-改进的层次分析法对 VPP 综合风险指标赋权, 进而通过贝叶斯反馈修正的云模型评价方法评价了其风险程度。文献[10]针对 VPP 网络安全风险, 提出了一种静态与动态评估相结合的多维动态网络安全风险评估指标体系, 并通过仿真实验进行了验证。文献[11]通过引入条件风险价值模型, 对 VPP 中风电出力的不确定性风险进行了量化分析。文献[12]充分考虑新能源出力和负荷不确定性, 基于 CVaR 模型度量了 VPP 的不确定性风险。

在 VPP 安全优化运行研究方面, 文献[13]构建了一种基于加权 K 最近邻和核极限学习机-高斯过程回归的 VPP 交互模型, 以优化 VPP 参与配电网调度。文献[14]考虑了新能源的生命周期碳排放量和绿证碳减排属性, 建立了 VPP 两阶段鲁棒优化调度模型, 以应对新能源大量接入带来的不确定性。文献[15]研究了多 VPP 应急调节能力评估方法及系统开发, 设计了 VPP 多层管控框架, 并通过模块化建模、总体架构和开放式交互界面设计, 开发了 VPP 参与电网应急调度仿真系统。文献[16]为规避新能源出力不确定性给 VPP 带来的潜在风险, 提出了 VPP 参与电能量和备用辅助服务市场的双层随机

优化模型, 以提高其参与市场的利润。文献[17]通过改进区块链技术, 构建了 VPP 结构模型, 以解决 VPP 信息安全和调度运行效率低等问题。

综上所述, 已有的相关成果主要针对 VPP 特定风险及防控措施、安全优化运行等方面展开研究, 缺乏从内外双维度对 VPP 运行安全风险进行系统性评价。因此, 为积极响应国家政策, 保障 VPP 在高速发展过程中能够高效、安全地运行, 本文从 VPP 参与电力系统运行安全水平及自身运行安全水平两方面, 构建内外部多维指标体系, 结合纳什均衡博弈论思想, 利用基于 EWM 和贝叶斯最优最劣法的组合赋权方法求得指标组合权重, 再通过二维可分割云模型对 VPP 运行安全风险进行综合评价, 最后通过实例分析验证模型的合理性和有效性。

1 VPP 运行安全风险评价指标体系构建

国家发展改革委和国家能源局联合发布《关于加快推进虚拟电厂发展的指导意见》, 提出要分别从内外 2 个维度提高 VPP 安全运行水平^[2]。从外部来看: 一方面, VPP 运行与电力系统密切相关, 近年来随着电力系统的发展, 发电侧、负荷侧及线路阻塞等多方面风险威胁着电网的安全稳定, 进而使得 VPP 参与电力系统运行时风险加剧; 另一方面, VPP 运行过程中, 设备突发故障、人为操作失误、不可抗力环境因素及应急机制不足等外部事故风险也会带来安全隐患。从内部来看: 一方面, VPP 运行高度依赖多源异构数据的实时采集、传输与融合分析, 数据链路的任一环节异常均可引发系统性风险; 另一方面, VPP 广泛应用信息技术, 尤其是在数据采集、分析和调度过程中对互联网和云平台的依赖, 使其网络安全问题愈加突出。因此, 本文从内外 2 个维度构建 VPP 运行安全风险评价指标。

1.1 外部维度风险

外部维度风险包括系统安全风险和事故安全风险 2 个一级指标。

1) 系统安全风险指 VPP 因电力系统运行过程中存在的潜在风险而引发的安全威胁。该风险主要通过以下二级指标体现: (1) 出力预测偏差, 表示实际输出功率与预测值之间的差异。该指标为定量指标, 以比值形式表示, 计算公式为:

$$\text{出力预测偏差} = \frac{\text{实际出力值} - \text{预测出力值}}{\text{实际出力值}} \times 100\% \quad (1)$$

(2)需求响应执行情况,指电力用户根据电网调度或价格信号实际调整用电负荷的效果,为定性指标;(3)线路阻塞风险,指电力传输中因线路容量不足导致过载或供电中断的可能性,为定性指标。

2)事故安全风险指由设备故障风险、人为操作风险、自然灾害风险、应急事故风险等事故造成VPP运行的安全隐患,选取以下二级指标予以体现:(1)设备故障率,指设备在一段时间内发生故障的频率。该指标为定量指标,计算公式为:

$$\text{设备故障率} = \frac{\text{故障停机时间}}{\text{计划开机时间}} \times 100\% \quad (2)$$

(2)人为操作事故,指因人员操作失误或违规导致的安全事件数量,以客观数据表示,为定量指标;(3)自然灾害风险,指天气导致分布式电源或通信网络受损,影响其正常运行的可能性,为定性指标;(4)应急响应能力,指面临故障或突发事件中快速调节分布式资源以维持稳定的能力,为定性指标。

1.2 内部维度风险

内部维度风险包括数据安全风险和网络安全风险2个一级指标。

1)数据安全风险涵盖数据泄露风险、数据窃取风险或数据篡改风险等方面,可通过以下二级指标予以体现^[18]:(1)隐私数据脱敏率,指经过脱敏处理的敏感数据占总数据的比例。该指标为定量指标,计算公式为:

$$\text{隐私数据脱敏率} = \frac{\text{脱敏后的数据量}}{\text{原始数据量}} \times 100\% \quad (3)$$

(2)数据加密程度,指数据通过加密技术受到保护的比例或强度,为定性指标;(3)数据完整性,指数据在存储或传输过程中保持准确、一致且未被篡改的特性,为定性指标。

2)网络安全风险涵盖物理设备风险、接入控制风险、通信链路风险、运维管理风险等方面,通过以下二级指标予以体现^[6]:(1)设备固件漏洞数量,指设备底层系统中存在的可被利用的安全缺陷总数,以客观数据表示,为定量指标;(2)通信链路风险,指数据传输过程中因中断、窃听或篡改导致信息丢失或泄露的潜在威胁,为定性指标;(3)未授权访问次数,指用户或系统凭合法权限成功访问资源的累计次数,以客观数据表示,为定量指标;(4)运维管理风险,指因操作失误、流程缺陷或监控不足导致系统故障或安全漏洞的可能性,为定性指标。

VPP运行安全风险评价指标体系如图1所示。

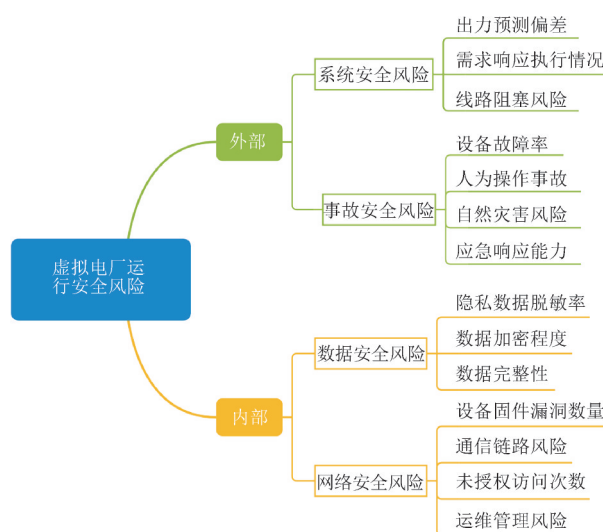


图1 VPP运行安全风险评价指标体系

Fig.1 VPP operational security risk assessment indicator system

2 VPP运行安全风险评价模型构建

在构建VPP运行安全风险评价指标的基础上,构建VPP运行安全风险评价模型,主要包括2部分:(1)VPP运行安全风险评价指标权重的确定;(2)基于多指标的VPP运行安全风险综合评价。

2.1 VPP运行安全风险评价指标权重的确定

主观赋权方法受决策者主观意愿的影响容易导致结果失真^[19],客观赋权方法主要依靠指标数据信息,不能充分考虑决策者需求,且权重可解释性较弱^[20]。为寻求克服单一赋权方法的不足,兼顾主观赋权和客观赋权方法的优点,保证评价的稳健性,学者们考虑使用主客观组合赋权方法。考虑到VPP运行安全风险评价指标的特点,为体现VPP运行安全风险评价过程中指标客观数据所反映的信息和实际工作者对各指标重要程度的经验认识,本文采用主客观组合赋权方法对指标进行赋权,其中客观赋权法采用熵权法(Entropy Weight Method, EWM),主观赋权法采用贝叶斯最优最劣法(Bayesian Best-Worst Method, BBWM),并基于纳什均衡博弈思想求得指标的组合同权重。

2.1.1 EWM

EWM根据指标现有数据提供的有用信息确定指标权重,能够避免赋权过程中的主观性,是一种有效的赋权方法^[21]。采用EWM确定VPP运行安全风险评价指标权重的具体步骤如下^[22]。

1)构建VPP运行安全风险评价指标的标准矩

阵。假设对 m 个 VPP 的运行安全风险进行评价,评价指标共有 n 个,则所构建的初始矩阵为 $\mathbf{X}$,即:

$$\mathbf{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}_{m \times n} \quad (4)$$

式中: x_{ij} 为第 i 个 VPP 第 j 个运行安全风险评价指标的值, $i=1,2,\cdots,m,j=1,2,\cdots,n$ 。

为去除不同指标间量纲差异的影响,需要对指标数据进行归一化处理。处理时需要区分正向指标和负向指标,其界定依据为指标数值与评价结果的相关性:数值越大评价结果越优的指标为正向指标,数值越小评价结果越优的指标为负向指标。

正向指标归一化公式为:

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (5)$$

式中: x'_{ij} 为归一化后的指标值; x_{ij} 为原始指标值; $x_{\min}, x_{\max}$ 分别为所有样本该指标的最小值和最大值。

负向指标归一化公式为:

$$x'_{ij} = \frac{x_{\max} - x_{ij}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (6)$$

归一化后得到 VPP 运行安全风险评价指标的标准矩阵 $\mathbf{X}'$ 为:

$$\mathbf{X}' = (x'_{ij})_{m \times n} \quad (7)$$

2)计算运行安全风险评价指标 j 的信息熵 e_j ,即:

$$e_j = -\frac{1}{\ln m} \sum_{i=1}^n f_{ij} \ln f_{ij} \quad (8)$$

$$f_{ij} = \frac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^n x'_{ij}} \quad (9)$$

式中: f_{ij} 为第 i 个 VPP 第 j 个运行安全风险评价指标值占有 VPP 第 j 个运行安全风险评价指标值之和的比重。

3)计算各运行安全风险评价指标的权重 ω_j^e ,即:

$$\omega_j^e = \frac{1e_j}{\sum_{j=1}^n (1e_j)} \quad (10)$$

2.1.2 贝叶斯最优最劣法

贝叶斯最优最劣法 BBWM 由 Mohammadi M 和 Rezaei J 于 2019 年提出,通过结合贝叶斯层次模型与最优最劣法 (Best-Worst Method, BWM) 构建而成^[23]。BWM 仅适用于计算单个专家的赋权结果,需通过均值法得到多位专家赋权后的最终权重,受异常值影响较为明显^[24-25]。相比之下,BBWM 能够满足群体决策,同时分析多位专家的赋权结果,进而一次性求得各指标权重,使赋权结果更加稳健^[26]。

具体步骤如下。

1)假设有 k 位专家对 m 个 VPP 运行安全风险指标进行主观判断,在 VPP 运行安全风险评价指标 $\{c_1, c_2, \cdots, c_n\}$ 中,每位专家确定其评价的最优指标 c_k^B 和最劣指标 c_k^W ,以进行指标间的对比。

2)确定最优比较向量。用数字 1—9 表示 c_k^B 相比于 c_k^j 的重要程度。第 k 位专家的评价结果以最优比较向量 $\mathbf{A}_k^B$ 的形式表示,即:

$$\mathbf{A}_k^B = (a_{k1}^B, a_{k2}^B, \cdots, a_{kj}^B, \cdots, a_{kn}^B) \quad (11)$$

式中: a_{kj}^B 为第 k 位专家针对最优指标相对于第 j 个指标重要程度的打分值。

3)确定最劣比较向量。用数字 1—9 表示 c_k^W 相比于 c_k^j 的重要程度。第 k 位专家的评价结果以最劣比较向量 $\mathbf{A}_k^W$ 的形式表示,即:

$$\mathbf{A}_k^W = (a_{k1}^W, a_{k2}^W, \cdots, a_{kj}^W, \cdots, a_{kn}^W) \quad (12)$$

式中: a_{kj}^W 为第 k 位专家针对第 j 个指标相较于最劣指标重要程度的打分值。

4)确定第 k 位专家最优指标权重 ω 。以最小化最优、最劣指标和其他指标之间的距离为目标,通过非线性约束优化方程对指标权重进行求解,即:

$$\begin{cases} \min \xi \\ \text{s.t.} \begin{cases} \left| \frac{\omega_k^B}{\omega_k^j} - a_{kj}^B \right| \leq \xi \\ \left| \frac{\omega_k^j}{\omega_k^W} - a_{kj}^W \right| \leq \xi \\ \sum_{j=1}^n \omega_k^j = 1 \\ \omega_k^j \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $\omega_k^j, \omega_k^B, \omega_k^W$ 分别为指标 j 、最优指标、最劣指标的权重; ξ 为绝对误差。

5)在 BBWM 中,将指标视为随机事件,权重对应其发生概率。因此,引入 $\mathbf{A}_k^B$ 和 $\mathbf{A}_k^W$ 的多项概率分布函数确定输入和输出。以最劣比较向量 $\mathbf{A}_k^W$ 的多项概率分布函数为例:

$$P(\mathbf{A}_k^W | \omega) = \frac{\left(\sum_{j=1}^n a_{kj}^W \right)!}{\left(\prod_{j=1}^n a_{kj}^W \right)!} \prod_{j=1}^n \omega_k^{a_{kj}^W} \quad (14)$$

式中: $\omega_k^{a_{kj}^W}$ 为事件 a_{kj}^W 的发生概率。

随机事件(指标) j 发生的概率与该事件发生的次数成正比,即:

$$\frac{\omega_k^B}{\omega_k^j} \propto a_{kj}^B \quad (15)$$

$$\frac{\omega_k^j}{\omega_k^w} \propto a_{kj}^w \quad (16)$$

通过对最优、最劣权重向量的多项式分布建模,将权重确定的问题转化为概率分布估计问题,利用贝叶斯层次模型求解。假设第 k 位专家确定的各指标权重表示为 ω^k ,则所有专家确定的综合权重 ω_{all}^k 由每位专家的权重求得, $k=1,2,\dots,K$, K 为专家总数。遵循贝叶斯规则的联合概率分布表示为:

$$P(\omega_{\text{all}}^k | \omega^k | A_{1:k}^B, A_{1:k}^W) = P(\omega_{\text{all}}^k) \prod_{k=1}^K P(A_{1:k}^W | \omega^k) P(A_{1:k}^B | \omega^k) P(\omega^k | \omega_{\text{all}}^k) \quad (17)$$

式中: $1:k$ 为各指标权重均服从该分布。

6)根据指标间的 Credal 排序值进行一致性检验,判断不同专家意见的一致程度。通过计算指标间的重要性对比概率,判断指标间的 Credal 排序值大小,该值取值范围为 $[0,1]$,取值越趋近于 1,表明各专家在权重确定上的一致性越高。参考 Mohammadi M 和 Rezaei J 等学者设定的 Credal 排序阈值标准,当排序值小于 0.5 时,需要专家重新对指标进行重要性对比^[23]。

2.1.3 基于纳什均衡博弈思想的权重组合方法

常见的加法合成法与乘法合成法计算出的指标组合权重缺乏合理性和可解释性^[27],因此本文引入纳什均衡博弈思想^[28],通过构建博弈论模型求解指标最优主客观组合权重 ω_j^* ,即:

$$\min \left(\|\omega_j - \omega_j^e\|^2 + \|\omega_j - \omega_{\text{all}}^k\|^2 \right) \quad (18)$$

式中: ω_j 为指标 j 的组合权重值。

基于纳什均衡博弈思想,式(18)将指标组合权重与通过 EWM 和 BBWM 法所得权重的离差最小化作为目标,采用序列最小二乘规划法进行求解。最终所得的纳什均衡解即为指标最优主客观组合权重。

2.2 基于二维可分割云模型的 VPP 运行安全风险评价模型

云模型通过期望、熵、超熵 3 个参数反映其整体性和定量性的概念特征^[24]。利用云模型进行风险评价时,3 个参数的含义分别为:风险等级、风险等级界线的模糊度、风险评价指标的随机性^[29]。二维可分割云模型在一维云模型的基础上将评价维度扩展为风险发生的概率和风险发生后造成的影响,并通过设立分割面快速读取符合条件的云滴群。因此,本文选用二维可分割云模型对 VPP 运行安全风险进行评价。

假设在二维正态分布随机函数 $F \sim (\mu, \sigma^2)$ 中, E_x 和 E_y 为期望值, $E_{n,x}$ 和 $E_{n,y}$ 为熵, $H_{e,x}$ 和 $H_{e,y}$ 为超熵,其中 x 和 y 是对应的云滴横坐标和纵坐标。则云滴 $\text{drop}(x_i, y_i, \mu_i)$ 构成的二维可分割云模型为:

$$\begin{cases} (x_i, y_i) = F(E_x, E_y, E_{n,x}, E_{n,y}) \\ (R_{x,i}, R_{y,i}) = F(E_{n,x}, E_{n,y}, H_{e,x}, H_{e,y}) \\ \mu_i = \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\frac{(x_i - E_x)^2}{2R_{x,i}^2} + \frac{(y_i - E_y)^2}{2R_{y,i}^2} \right] \right\} \end{cases} \quad (19)$$

式中: (x_i, y_i) 为构成第 i 个 VPP 运行安全风险云的云滴坐标; $R_{x,i}, R_{y,i}$ 为基于云滴坐标生成的随机数; μ_i 为隶属度。

1)建立二维标准云。建立 VPP 运行安全风险评价的二维标准云时,需先构建评语集和对应的等级区间,以量化专家对 VPP 运行安全风险评价指标的评估打分。将 VPP 运行安全风险按照 0—10 分划分 5 个风险等级区间, $I_{\min}$ 和 $I_{\max}$ 分别表示风险等级区间的下限和上限,具体如表 1 所示。

表 1 风险等级划分
Table 1 Risk level classification

风险评价等级	评分区间 $[I_{\min}, I_{\max}]$	描述
无风险	$[0, 2)$	无风险或风险可忽略
风险较低	$[2, 4)$	风险可接受,可常规监管
风险中等	$[4, 6)$	风险不可接受,需针对性监管
风险较高	$[6, 8)$	风险较为显著,需密切关注并采取风险管理策略来降低风险
风险极高	$[8, 10]$	风险极高,需采取紧急措施降低风险保障运营

根据表 1 所定义的风险等级区间,云滴横坐标与纵坐标所对应的数字特征值计算公式相同。因此,下文将以云滴横坐标(代表风险发生概率)对应的数字特征值计算公式为例进行说明。对应二维标准云 C_s 的数字特征为^[29]:

$$\begin{cases} E_{x,s} = \frac{I_{\min} + I_{\max}}{2} \\ E_{n,s} = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{6} \\ H_{e,s} = 0.1E_{n,s} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $E_{x,s}$ 为二维标准云的期望值; $E_{n,s}$ 为二维标准云的熵; $H_{e,s}$ 为二维标准云的超熵。

2)建立指标评价云。基于风险评价等级区间,邀请 k 位专家对 n 个 VPP 运行安全风险评价指标

进行打分,据此构建各指标的评价云 C_j 。以云滴横坐标(风险发生的概率)对应数字特征计算为例,说明其数字特征的计算方法,具体如下:

$$\begin{cases} E_{xj} = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K g_{kj} \\ E_{nj} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K |g_{kj} - E_{xj}| \\ S_j^2 = \frac{\sum_{k=1}^K (g_{kj} - E_{xj})^2}{K-1} \\ H_{ej} = \sqrt{|S_j^2 - E_{nj}^2|} \end{cases} \quad (21)$$

式中: E_{xj} 为指标 j 评价云的期望值; E_{nj} 为指标 j 评价云的熵; H_{ej} 为指标 j 评价云的超熵; g_{kj} 为第 k 位专家对第 j 个评价指标的打分; S_j^2 为样本方差。

3) 建立综合云。计及指标间的相关性,通过指标权重 ω_j^* 与指标评价云 C_j 建立综合云,以云滴横坐标(风险发生的概率)对应数字特征计算为例,给出其数字特征值的具体计算方法:

$$\begin{cases} E_x = \sum_{j=1}^n (E_{xj} \times \omega_j^*) \\ E_n = \sqrt{\sum_{j=1}^n (E_{nj}^2 \times \omega_j^*)} \\ H_e = \sum_{j=1}^n (H_{ej} \times \omega_j^*) \end{cases} \quad (22)$$

式中: E_x 为综合云的期望值; E_n 为综合云的熵; H_e 为综合云的超熵。

4) 设定分割面并绘制对比云图。分割面为在三维空间中设定的一个平面,用于将空间划分为2个不同区域以表示相异的定义。通过隐藏位于分割面一侧的云滴群,可快速识别目标云图所在的区域。在完成前述3个步骤的基础上,通过合理设置分割面,可实现对代表不同风险的云滴群进行有效划分,进而快速区分不同类型的风险指标。同时,绘制标准云与综合云的二维可分割对比云图,用于判定 VPP 运行安全风险所处的等级。

基于博弈思想的组合赋权法得到的结果可解释强,二维可分割云模型能够相对更好地将定性概念转换为定量数值^[30],并且克服评价中的模糊性和随机性问题,通过加入分割面来隐藏分割面一侧的云滴群,从而快速识别风险等级。运用博弈论组合赋权和二维可分割云模型对 VPP 运行安全风险进行评价的整体流程如图2所示。

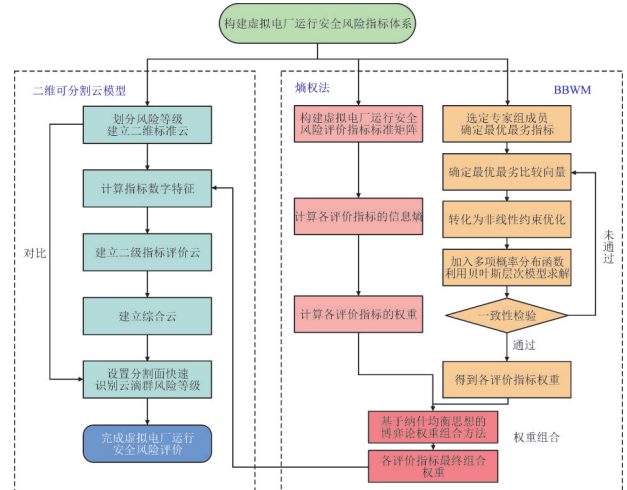


图2 VPP运行安全风险评价模型流程图

Fig.2 Flowchart of VPP operational security risk assessment model

3 实例分析

本文选取位于J省、H省、S省的3个VPP作为实例分析对象,对本文提出的VPP运行安全风险评价模型进行验证。3个VPP分别标记为VPP I, VPP II, VPP III。

3.1 确定指标组合权重

基于式(4)一式(10),结合相关数据得出EWM赋权结果。邀请5位VPP方面的专家组成专家组,包括1位VPP系统运维人员、2位VPP方向的研究员、1位高校教授、1位企业主管,对所构建的VPP运行安全风险评价指标体系的二级指标进行打分。专家组确定的最优最劣指标如表2所示。将最优最劣指标与其他指标进行对比打分,确定各个指标的相对重要程度,进而得到5位专家各自的最优比较向量和最劣比较向量。随后,根据式(11)一式(17),通过MATLAB计算出BBWM法赋权结果,且指标间的Credal排序值均大于0.5。

表2 专家组确定的最优与最劣指标

Table 2 The optimal and worst indicators identified by expert group

项目	最优指标	最劣指标
专家1	设备故障率	隐私数据脱敏率
专家2	需求响应执行情况	数据加密程度
专家3	设备故障率	隐私数据脱敏率
专家4	出力预测偏差	设备固件漏洞数量
专家5	设备故障率	未授权访问次数

在获得客观与主观赋权结果后,基于式(18)所建立的博弈模型,通过Python软件求解得出最优组

合权重,全部权重结果汇总于表 3。根据组合权重大小排序可知,出力预测偏差、需求响应执行情况、设备故障率以及人为操作事故是 VPP 运行安全风险评价中的 4 个关键风险指标。

表3 VPP 运行安全风险评价指标权重
Table 3 Weight of VPP operational security risk assessment indicators

指标	EWM 权重	BBWM 法权重	组合权重
出力预测偏差	0.081 6	0.115 3	0.098 5
需求响应执行情况	0.070 6	0.113 6	0.092 1
线路阻塞风险	0.032 5	0.081 7	0.057 1
设备故障率	0.109 8	0.128 9	0.119 3
人为操作事故	0.181 5	0.089 8	0.135 6
自然灾害风险	0.019 9	0.058 4	0.039 2
应急响应能力	0.095 0	0.049 0	0.072 0
隐私数据脱敏率	0.054 5	0.034 3	0.044 3
数据加密程度	0.087 7	0.037 5	0.062 6
数据完整性	0.109 8	0.067 7	0.088 7
设备固件漏洞数量	0.023 7	0.042 6	0.033 2
通信链路风险	0.017 6	0.081 5	0.049 6
未授权访问次数	0.067 8	0.051 7	0.059 8
运维管理风险	0.048 0	0.048 0	0.048 0

3.2 二维可分割云模型风险评价

首先,基于表 1 和式(20)构建二维标准云。其次,依据式(21)生成各二级指标的评价云,并进一步基于式(22)融合形成一级指标评价综合云。鉴于论文篇幅限制,本文以 VPP I 为例展开详细分析。VPP I 一级指标的数字特征值如表 4 所示,据此绘制其一级指标风险评价二维云图,如图 3 所示。

表4 一级指标数字特征值
Table 4 Digital characteristic values of first-level indicators

一级指标	(E_x, E_y)	$(E_{n,x}, E_{n,y})$	$(H_{e,x}, H_{e,y})$
X_1	(3.01, 3.55)	(0.503 5, 0.739 9)	(0.197 7, 0.263 4)
X_2	(2.20, 5.11)	(0.250 2, 0.677 2)	(0.114 4, 0.236 4)
X_3	(3.81, 4.05)	(0.561 9, 0.584 0)	(0.200 4, 0.177 7)
X_4	(4.03, 4.59)	(0.321 2, 0.672 9)	(0.122 7, 0.220 6)

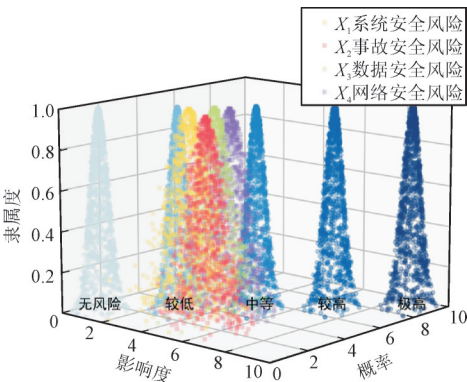


图3 VPP I 一级指标评价二维云图
Fig.3 Two-dimensional cloud chart for evaluating first-level indicators of VPP I

从图 3 可以看出,在 VPP I 的运行安全风险一

级指标中,网络安全风险 X_4 接近中等风险等级,需采取针对性监管措施,防范其对运行安全造成的潜在危害。具体应包括完善通信链路体系、定期扫描设备固件漏洞、部署网络安全监测系统、阻断非法访问等,以全面提升网络安全的风险防控能力。事故安全风险 X_2 虽发生概率较低,但后果影响较大,应在常规监管基础上制定应急处理预案,并定期组织多场景演练,加强人员安全意识和应急处置能力。数据安全风险 X_3 介于较低风险与中等风险之间,除常规监管外,宜建立数据备份机制并定期更新加密密钥,以防风险进一步扩大。系统安全风险 X_1 处于较低风险等级,可在维持常规监管的同时,积极推动需求响应政策落实,激励用户侧调整负荷行为。

参照 VPP I 评价步骤,对 VPP II 和 VPP III 的运行安全风险评价指标进行处理,得到 VPP 运行安全风险综合云图,如图 4 所示。

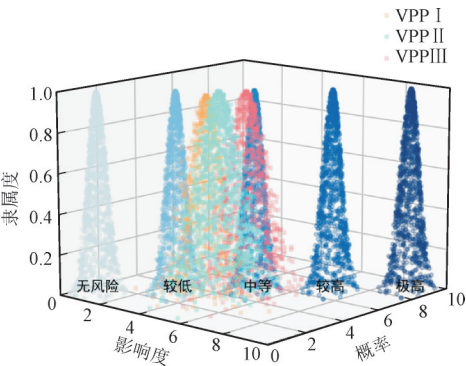


图4 VPP 运行安全风险综合云图
Fig.4 Comprehensive cloud chart of VPP operational security risks

由图 4 可知,除了 VPP III 运行安全风险处于中等风险等级以外,VPP I 和 VPP II 的风险等级是否高于“较低风险”无法直接判定。传统二维云模型仅提供如图 4 的可视化结果,判断 VPP I 和 VPP II 的风险等级需依赖隶属度计算;而二维可分割云模型在此基础上引入了分割面设置步骤,实现了风险等级的可视化区分,省去了复杂的隶属度计算,效率更高。

为直接判断 VPP I 和 VPP II 的运行安全风险等级,本研究在云图中设置了一个风险发生概率等级评分固定为 4 的平面作为分割面,隐藏所有评分低于 4 的云滴(即风险等级低于“中等”的云滴群),对 VPP 运行安全风险综合云图进行分割,得到如图 5 所示的二维分割云图。从图 5 可明确看出,VPP I 的运行安全风险处于“较低等级”,而 VPP II 处于“中等级”。

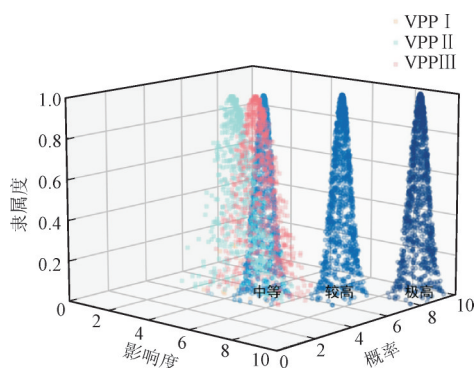


图5 VPP运行安全风险二维分割云图
Fig.5 Two-dimensional segmentation cloud chart of VPP operational security risks

为提升 VPP 运行安全整体防控能力,建议从以下方面着手:(1)部署智能化调度系统,降低电力系统运行中的潜在风险,避免其对 VPP 运行安全产生进一步影响;(2)加强应急管理能力,定期开展人员安全培训,完善灾后恢复机制,提升对突发事件的应对能力;(3)采用动态脱敏技术,保障数据在传输、存储和共享过程中的隐私安全,并引入区块链校验与数据备份机制,确保数据的完整性与可恢复性;(4)建立网络安全动态监测体系,实时识别并自动隔离外来攻击与风险节点,加强对接入设备的安全审查,保障 VPP 网络的安全稳定运行。

4 结论

本文基于内部与外部视角,从系统安全、事故安全、数据安全及网络安全四个维度构建了 VPP 运行安全风险评价指标体系,采用博弈论组合赋权法(结合 EWM 与 BBWM)与二维可分割云模型建立了风险评价模型,并对中国 3 个地区的 VPP 开展了实证分析。主要结论如下:

1)构建了涵盖 14 个指标的多维度 VPP 运行安全风险评价体系。

2)提出基于纳什均衡的指标赋权方法,识别出出力预测偏差、需求响应执行、设备故障率及人为操作事故为主要风险指标。

3)依托二维云模型实现风险可视化与快速定级。实证显示,VPP I 属低风险,VPP II 和 III 处于中等风险,需采取针对性管理措施。

未来可拓展该模型至多场景应用,动态更新指标体系,并结合智能算法实现风险智能评估。

参考文献

[1] 黄宇翔,陈皓勇,牛振勇,等.基于“能量-信息-价值”三层网络的虚拟电厂架构及运行关键技术综述[J].电力系统保护与控制,2024,52(24):169-187.

HUANG Yuxiang, CHEN Haoyong, NIU Zhenyong, et al. A review of virtual power plant architecture and key operational technologies based on a “energy-information-value” three-layer network[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(24): 169-187.

[2] 田旭,张祥成,齐鑫,等.考虑需求侧阶梯碳交易的虚拟电厂两阶段调度优化模型及效益分配策略[J].供用电,2025,42(8):88-98.

TIAN Xu, ZHANG Xiangcheng, QI Xin, et al. A two-stage scheduling optimization model and benefit allocation strategy for virtual power plants considering demand-side tiered carbon trading [J]. Distribution & Utilization, 2025, 42(8): 88-98.

[3] 程雪婷,暴悦爽,金龙,等.考虑新能源出力不确定性风险的 VPP 双层调度策略[J].现代电力,2023,40(6):967-975.

CHENG Xueting, BAO Yueshuang, JIN Yulong, et al. Bi-level scheduling strategy for virtual power plants considering the risk of new energy output uncertainty[J]. Modern Electric Power, 2023, 40(6): 967-975.

[4] 曾鸣,马嘉欣,许彦斌,等.“双碳”目标下 VPP 参与调峰产品交易的机制与路径探索[J].价格理论与实践,2021,41(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, 41(10): 9-14.

[5] 杨挺,张剑,蔡绍堂,等.计及隐私数据保护的多 VPP 协同调度方法[J].天津大学学报(自然科学与工程技术版),2024,57(8):836-846.

YANG Ting, ZHANG Jian, CAI Shaotang, et al. Collaborative scheduling method for multivirtual power plants considering privacy data protection[J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2024, 57(8): 836-846.

[6] 胡金炜,张玉健,蔡莹,等.VPP 网络安全研究综述及展望[J].中国电机工程学报,2025,45(8):2876-2899.

HU Jinwei, ZHANG Yujian, CAI Ying, et al. Review and prospect on cyber security of virtual power plant[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(8): 2876-2899.

[7] 丁建顺,尤佳,周永刚,等.考虑需求响应和风险规避的 VPP 最优调度[J].智慧电力,2023,51(3):79-86.

DING Jianshun, YOU Jia, ZHOU Yonggang, et al. Optimal scheduling of virtual power plants considering demand response and risk aversion[J]. Smart Power, 2023, 51(3): 79-86.

[8] 侯琳娜,蒙莹枝,苏菊宁,等.VPP 运营风险评价研究[J].价格理论与实践,2023,43(6):156-161.

HOU Linna, MENG Yingzhi, SU Juning, et al. Research on risk assessment of virtual power plant operation[J]. Price: Theory & Practice, 2023, 43(6): 156-161.

[9] 曾鸣,潘婷,贺薪颖,等.基于贝叶斯反馈修正云模型的 VPP 运营风险综合评价方法[J].现代电力,2023,40(5):715-723.

ZENG Ming, PAN Ting, HE Xinying, et al. A comprehensive evaluation method for operational risk of virtual power plants based on Bayesian feedback modified cloud model[J]. Modern Electric Power, 2023, 40(5): 715-723.

[10] 杨珂,王栋,李达,等.VPP 网络安全风险评估指标体系构建及量化计算[J].中国电力,2024,57(8):130-137.

YANG Ke, WANG Dong, LI Da, et al. Network security risk assessment index system and calculation for virtual power plant[J]. Electric Power, 2024, 57(8): 130-137.

[11] 葛成扬,林顺富,谭津,等.含多个产消者的 VPP 日前协调优化运行策略[J].电网技术,2025,49(6):2521-2532.

GE Chengyang, LIN Shunfu, TAN Jin, et al. A day-ahead optimal coordination strategy for a VPP with multiple prosumers[J]. Power System Technology, 2025, 49(6): 2521-2532.

[12] 王宇坤,陈皓勇,黄宇翔,等.多重不确定性下的 VPP 参与电能

- 和需求响应市场鲁棒优化调度策略[J].发电技术,2024,45(6):1173-1185.
- WANG Yushen, CHEN Haoyong, HUANG Yuxiang, et al. Robust optimal scheduling strategy for virtual power plant participation in electric energy and demand response markets under multiple uncertainties[J]. Power Generation Technology, 2024, 45(6): 1173-1185.
- [13] 郝瑞鑫,樊艳芳,侯俊杰,等.基于WKNN和KELM-GPR的VPP交互模型构建方法[J].太阳能学报,2024,45(12):637-649.
- HAO Ruixin, FAN Yanfang, HOU Junjie, et al. Construction method of virtual power plant interaction model based on WKNN and KELM-GPR[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2024, 45(12): 637-649.
- [14] 吴迟绿,杨晓辉,万钊,等.计及碳-绿证互联交易的VPP两阶段鲁棒优化调度[J].智慧电力,2025,53(5):16-23.
- WU Chilu, YANG Xiaohui, WAN Zhao, et al. Two-stage robust optimal scheduling for virtual power plants considering carbon-green certificate interlinked trading[J]. Smart Power, 2025, 53(5): 16-23.
- [15] LIU X. Research on the evaluation method and system development of emergency regulation capacity for multiple virtual power plants[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 153: 109318.
- [16] 王俊,徐箭,王晶晶,等.基于条件风险价值的VPP参与能量及备用市场的双层随机优化[J].电网技术,2024,48(6):2502-2510.
- WANG Jun, XU Jian, WANG Jingjing, et al. Bi-level stochastic optimization for a virtual power plant participating in energy and reserve market based on conditional value at risk[J]. Power System Technology, 2024, 48(6): 2502-2510.
- [17] 刘雨佳,樊艳芳,白雪岩,等.基于优化计算型区块链系统的VPP模型与调度策略[J].电工技术学报,2023,38(15):4178-4191.
- LIU Yujia, FAN Yanfang, BAI Xueyan, et al. Virtual power plant model and scheduling strategy based on optimized computing block-chain system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(15): 4178-4191.
- [18] 全霞,程鹏申,李雪城,等.数字化电力计量智慧实验室构建与关键技术探讨[J].电测与仪表,2025,62(1):89-100.
- TONG Xia, CHENG Pengshen, LI Xuecheng, et al. Construction and key technology discussion of digital electric power measurement smart laboratory[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(1): 89-100.
- [19] 张明泽,栾文鹏,艾欣,等.基于边缘计算的低压配电网健康状态评价方法[J].电测与仪表,2024,61(5):91-97.
- ZHANG Mingze, LUAN Wenpeng, AI Xin, et al. A health status assessment method for low-voltage distribution network based on edge computing[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(5): 91-97.
- [20] 奚增辉,王卫斌,陆嘉铭,等.运用电力大数据构建企业污染指数及监测分析[J].西安工程大学学报,2024,38(6):83-89.
- XI Zenghui, WANG Weibin, LU Jiaming, et al. Constructing enterprise pollution index and monitoring analysis using electricity big data[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2024, 38(6): 83-89.
- [21] 陈浩宇,林俊杰,江昌旭,等.基于熵权理想度排序法的配电网PMU多目标优化配置[J].电网与清洁能源,2024,40(8):36-45.
- CHEN Haoyu, LIN Junjie, JIANG Changxu, et al. Multi-objective optimal placement of PMU in distribution networks based on entropy weight ideal ranking method[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(8): 36-45.
- [22] 刘小康,张菁,张延迟.基于改进层次-权法的含PVES配电网负荷转供优化模型研究[J].电网与清洁能源,2023,39(8):55-63.
- LIU Xiaokang, ZHANG Jing, ZHANG Yanchi. Research on optimization models of load transfer for the distribution network containing PVES based on FDAHP-IEW algorithm[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(8): 55-63.
- [23] 杨振奥,陈俊儒,刘雨珊,等.基于博弈论和改进TOPSIS的跟网型和构网型场站并网性能对比及评估[J].电力科学与技术学报,2025,40(2):206-216.
- YANG Zhenao, CHEN Junru, LIU Yushan, et al. Comparison and evaluation of grid-connected performance of grid-following and grid-forming stations based on game theory and improved TOPSIS[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(2): 206-216.
- [24] 杨雍琦,薛万磊,赵昕,等.基于贝叶斯最优最劣法和云模型的售电公司信用风险评价模型研究[J].现代电力,2022,39(4):449-459.
- YANG Yongqi, XUE Wanlei, ZHAO Xin, et al. Research on credit risk evaluation model of electricity selling company based on Bayesian best worst method and cloud model[J]. Modern Electric Power, 2022, 39(4): 449-459.
- [25] 赵会茹,赵一航,王路瑶,等.基于贝叶斯最优最劣和改进物元可拓的特高压输电工程综合效益评价[J].中国电力,2022,55(6):161-171.
- ZHAO Huiru, ZHAO Yihang, WANG Luyao, et al. Comprehensive performance evaluation of UHV power transmission project based on Bayesian Best-Worst method and improved matter-element extension model[J]. Electric Power, 2022, 55(6): 161-171.
- [26] 董朝武,肖智宏,辛培哲,等.新型配电网多元业务与多模通信适配性评估方法[J].电力建设,2024,45(1):1-12.
- DONG Chaowu, XIAO Zhihong, XIN Peizhe, et al. Evaluation method of multiple service and multi-mode communication adaptability of new distribution networks[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(1): 1-12.
- [27] 汤明润,李若旻,程晓钰,等.基于博弈论-改进云模型的新能源电力系统适应性评估[J].电力系统保护与控制,2025,53(7):40-51.
- TANG Mingrun, LI Ruoyang, CHENG Xiaoyu, et al. Adaptability evaluation of new energy power systems based on game theory and an improved cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2025, 53(7): 40-51.
- [28] 董文杰,田廓,陈云斐,等.能源互联网下基于博弈与证据理论的综合能源系统评价方法研究[J].智慧电力,2020,48(7):73-80.
- DONG Wenjie, TIAN Kuo, CHEN Yunfei, et al. Evaluation method of comprehensive energy system based on game theory & evidence theory under energy internet[J]. Smart Power, 2020, 48(7): 73-80.
- [29] 石天琛,杨烨,刘明光,等.基于有限信息的电动汽车用户充电行为特征识别[J].电力建设,2024,45(10):69-77.
- SHI Tianchen, YANG Ye, LIU Mingguang, et al. Identification of charging behavior characteristics of electric vehicle users based on limited information[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(10): 69-77.
- [30] 魏新迟,董佳,时珊珊,等.基于云模型和随机森林的韧性城市电网风险预警模型[J].电力建设,2024,45(5):19-28.
- WEI Xinchu, DONG Jia, SHI Shanshan, et al. Enhanced risk warning model for resilient urban power grid using cloud model and random forest[J]. Electric Power Construction, 2024, 45(5): 19-28.

(责任编辑 付小平)

收稿日期:2025-05-14; 修改日期:2025-07-30

作者简介:廖奕洋(2003),男,江西吉安人,硕士研究生,主要研究方向为能源经济与环境、电力市场。E-mail:lyy369874@126.com

郭森(1987),男,通信作者,辽宁沈阳人,博士,副教授,从事电力低碳转型、电碳市场研究。E-mail:guosen@ncepu.edu.cn