

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240536

计及终端模式差异的微电网可靠性评估方法

闫群民¹, 肖冬雪¹, 王磊¹, 宋潇¹, 叶向锋²

(1. 陕西理工大学电气工程学院, 陕西 汉中 723001; 2. 国网铜川供电公司, 陕西 铜川 727031)

摘要: 针对微电网终端模式多元化对其可靠性评估带来的问题, 提出了计及终端模式参与度的加权秩和比综合评估方法。首先, 从主维度和交互维度建立可靠性评估指标体系, 并提出“负荷风光比”和“负荷储能容量比”两个新指标。然后, 引入博弈论将网络分析法(analytic network process, ANP)与熵权法(entropy weight method, EWM)结合, 得出各指标的组合最优权重。为更好体现出不同终端对微电网可靠性的影响, 根据指标类型引入不同终端模式下各指标参与度函数。最后, 基于微电网终端模式和指标类型的差异, 提出基于终端模式参与度的加权秩和比法(participation-weighted rank-sum ratio, PWRSR)计算综合评价价值。以某市的实际数据进行仿真验证。结果表明, 所提方法可以充分考虑在不同终端模式下微电网内部的交叉影响, 得到更全面、准确的评估结果。

关键词: 微电网; 可靠性; 加权秩和比; 终端模式; 综合评估

Microgrid reliability evaluation methods accounting for terminal mode differences

YAN Qunmin¹, XIAO Dongxue¹, WANG Lei¹, SONG Xiao¹, YE Xiangfeng²

(1. School of Electrical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China;

2. State Grid Tongchuan Power Supply Company, Tongchuan 727031, China)

Abstract: In order to address the issues on microgrid reliability assessment brought by the diversification of terminal modes, a comprehensive evaluation method based on the participation-weighted rank-sum ratio (PWRSR) is proposed. Firstly, the reliability assessment index system is established from the main dimension and interactive dimension, and two new indicators, “load-wind-PV ratio” and “load-storage capacity ratio”, are proposed. Then, game theory is used to combine analytical network process (ANP) with entropy weight method (EWM) to obtain the optimal combined weights of each indicator. To better reflect the impact of different terminals on the reliability of the microgrid, participation functions of each indicator under different terminal modes are introduced according to the indicator types. Finally, based on the differences in microgrid terminal modes and indicator types, the PWRSR method is proposed to calculate the comprehensive evaluation value. Simulation verification is carried out using actual data from a certain city. The results show that the proposed method can fully consider the cross-impact within the microgrid under different terminal modes, resulting in a more comprehensive and accurate assessment.

This work is supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (No. 62176146).

Key words: microgrid; reliability; participation-weighted rank-sum ratio; terminal mode; integrated assessment

0 引言

随着“碳中和、碳达峰”目标的提出, 构建清洁高效、安全低碳的能源体系是成为实现可持续发展的重要途径之一^[1-2]。微电网具有提高可再生能源就地消纳率、实现能源互补、互通互联等优势, 其

规划建设作为能源转型的必经之路, 有着不可忽视的地位^[3-5]。微电网的终端模式逐渐趋于多样化, 供电可靠性仍是规划建设的重点之一。微电网供电可靠性评估指标普遍仅从单一层面选取, 随着微电网的发展, 传统评估体系的局限性愈发明显。传统一维评估指标体系无法体现各种终端模式对可靠性的影响, 使得评估结果与用户真实感受有较大偏差。

对于微电网可靠性评估指标的研究已有许多成

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(62176146)

果, 文献[6]选取了失负荷概率、平均供电可用率、系统平均停电时间(system average interruption duration index, SAIDI)、系统平均停电频率(system average interruption frequency index, SAIFI)和用户平均停电持续时间指标。将这些指标分为概率类指标、频率类指标及持续时间类指标, 客观地反映了各类负荷的需求。文献[7]引入 SAIFI、SAIDI、平均系统可用性指标以及期望缺供电量。文献[8]采用改进后的最小路法计算直流配电网可靠性指标, 系统可靠性指标包括 SAIFI、SAIDI、系统平均供电可用率以及用户侧的用户平均停电持续时间。但上述评估可靠性的传统指标大多是从系统层面进行描述的, 具有一定的局限性, 微电网内源侧、网侧、负荷侧及储能侧可靠性对整体的影响同样至关重要。文献[9]建立了从用户侧对可靠性的评估。文献[10]分别从源侧、荷侧及储侧三个方面定义了可靠性指标。文献[11]从系统层面出发选取了可靠性指标。上述文献在定义可靠性评估指标时, 主要侧重于单一维度, 而对于终端与其他维度的交叉影响则考虑得不够充分。针对终端模式对电网可靠性的影响, 文献[12]建立以考虑微网负荷优先级的供电可靠性为优化目标。可见大多文献均是进行特征提取, 未对终端模式差异具体影响进行研究。由于终端的多样化与不同可靠性指标的多维性, 需要引入对可靠性指标的综合评估方法全面客观地评估微电网的可靠性。文献[13]应用算法将网络分析法(analytic network process, ANP)进行优化计算主观权重。文献[14]仅采用熵权法(entropy weight method, EWM)计算客观权重。上述研究均只计算了主观或客观权重, 导致最终评估结果主观性过强或过分依赖客观数据。文献[15-16]通过层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)计算主观权重, 采用 EWM 计算客观权重, 利用模糊综合评价法计算最终评分。文献[17]利用 EWM 与关联度计算指标综合权重, 采用灰色关联度法对供电可靠性评估。文献[18]提出了 ANP 与改进相关权重法相结合计算组合权重, 利用改进逼近理想点进行综合评估。综上, 多元终端模式微电网的复杂度相较传统单一终端微电网有明显提升, 微电网可靠性评估指标需要根据其终端模式的差异建立, 可靠性评估方法也需要考虑不同终端的参与度, 现有研究中鲜有同时考虑以上问题的评估体系。

针对上述问题, 提出一种计及终端模式差异的微电网可靠性综合评估方法。在现行已有的系统整体层面、源侧、网侧、负荷侧及储能侧指标体系下, 将可靠性指标延伸至交互侧, 建立微电网可靠性二

维评估指标体系, 即从主维度与交互维度提出一套综合反映微电网可靠性的指标体系; 为更准确综合评估不同终端微电网的可靠性, 根据指标类型, 引入各指标在不同类型终端模式下的参与度函数, 设计一种基于不同终端参与度的加权秩和比(rank sum ratio, RSR)综合评估方法; 最后以某市 5 个微电网为例, 验证本文可靠性指标体系及所提评估方法的合理性和适用性。

1 微电网可靠性评估二维指标体系构建

在参考国内外经典可靠性评估指标的基础上, 按照微电网的构成及特点, 形成基于系统整体层面、源侧、网侧、负荷侧和储能侧五个方面的一级指标, 即主维度, 从而全面评估微电网的基本可靠性; 在传统评估指标体系中, 往往会忽略不同终端模式对微电网运行的复杂影响, 本文充分考虑不同终端模式对微电网可靠性的影响, 建立交互侧指标, 即交互维度, 以准确描述不同终端模式对微电网可靠性的相互影响。为保证新能源更好地就地消纳, 选取最能反映每个一级指标特点的二级指标, 建立微电网可靠性评估指标体系, 见表 1。

1) 微电网系统整体层面可靠性指标

根据国家能源局 2012 年颁布的《供电系统用户可靠性评价规程》, 设置了一系列指标, 供电可靠性指标普遍选取频率、持续时间等指标。由于微电网具备独立运行的能力, 因此微电网系统层面可靠性指标选取 SAIDI 和 SAIFI。

(1) 系统平均停电时间 t_{SAIDI} , 定义为统计时间内, 所有负荷停电总时间与负荷总数的比值, 其计算公式为

$$t_{SAIDI} = \frac{\sum U_i n_i}{\sum N_i} \quad (1)$$

式中: U_i 表示微电网运行在终端模式 i 下, 在统计时间内的平均停电时间, ($i=1,2,3$, 其中 1 为工业型, 2 为居民型, 3 为商业型); n_i 表示微电网在运行终端模式 i 下的停电负荷数; N_i 表示微电网内的负荷数。

(2) 系统平均停电频率 f_{SAIFI} , 定义为统计时间内, 所有负荷经历停电次数与负荷总数的比值, 其计算公式为

$$f_{SAIFI} = \frac{\sum \lambda_i n_i}{\sum N_i} \quad (2)$$

式中, λ_i 表示微电网在统计时间内运行于终端模式 i 下的平均停电次数。

表 1 微电网可靠性指标体系
Table 1 Microgrid reliability index system

一级指标	二级指标	指标意义
系统层面指标 C_1	系统平均停电时间 E_{11}	表示系统的平均历经停电时间
	系统平均停电频率 E_{12}	表示系统的平均历经停电次数
源侧指标 C_2	新能源互补率 E_{21}	衡量系统中不同新能源之间互相补充程度
网侧指标 C_3	输电损耗率 E_{31}	衡量系统输电线路中电能损耗程度
荷侧指标 C_4	负荷峰谷差异率 E_{41}	衡量系统负荷波动程度
	最大负荷利用小时数 E_{42}	反映系统中负荷曲线情况
储侧指标 C_5	储能系统容量系数 E_{51}	衡量储能系统对电网容量支撑程度
	储能系统平均放电深度 E_{52}	衡量储能系统在运行过程中平均放电深度
交互侧指标 C_6	负荷风光比 E_{61}	对比系统新能源出力与负荷需求
	电压合格率 E_{62}	反映不同负荷对网侧的要求
	负荷储能容量比 E_{63}	对比储能系统容量与负荷需求

2) 微电网源侧可靠性指标

文献[19]引入能源利用率和互补性指标, 本文考虑新能源尽可能就地消纳, 因此提出源侧指标: 新能源互补率(renewable energy complementarity rate, RECR)。

新能源互补率 r_{RECR} , 定义为风光出力之和与两者中较大值的比值, 如式(3)所示。 r_{RECR} 值越接近 1, 表明风力和光伏出力之间的互补性越好。

$$r_{\text{RECR}} = \frac{\sum(P_{\text{WT}} + P_{\text{PV}})}{\max(P_{\text{WT}}, P_{\text{PV}})} \quad (3)$$

式中, P_{WT} 和 P_{PV} 分别为光伏机组和风力机组的出力功率。

3) 微电网网侧可靠性指标

微电网网侧在外部作为微电网与主网相连的关键部分, 在内部连接源侧与荷侧, 因此在能量传输中不可避免会产生输电损耗。本文在传统指标中选取输电损耗率(transmission loss ratio, TLR)作为微电网网侧的可靠性指标。

输电损耗率 r_{TLR} , 定义为统计时间内, 输电损耗总量与总发电量的比值, 其计算公式为

$$r_{\text{TLR}} = \frac{\sum P_{\text{loss}}}{\sum(P_{\text{WT}} + P_{\text{PV}})} \times 100\% \quad (4)$$

式中, P_{loss} 为统计时间内的输电损耗总量。

4) 微电网荷侧可靠性指标

考虑到负荷波动对微电网可靠性的影响, 荷侧指标包括负荷峰谷差异率(load peak-valley ratio, LPVR)和最大负荷利用小时数(maximum load utilization hours, MLUH)。

(1) 负荷峰谷差异率 r_{LPVR} , 定义为统计时间内, 负荷峰谷差与平均负荷的比值, 其计算公式为

$$r_{\text{LPVR}} = \frac{P_{\text{Lmax}} - P_{\text{Lmin}}}{\bar{P}_{\text{L}}} \quad (5)$$

式中: P_{Lmax} 、 P_{Lmin} 分别表示统计时间内最大、最小负荷; \bar{P}_{L} 表示统计时间内的平均负荷。

(2) 最大负荷利用小时数 T_{max} , 定义为当负荷始终以峰值负荷运行时, 所消耗的电能恰好等于实际负荷运行一年消耗的电能, 其计算公式为

$$T_{\text{max}} = \frac{\int_0^T P_{\text{L}} dt}{P_{\text{Lmax}}} \quad (6)$$

式中, $\int_0^T P_{\text{L}} dt$ 表示统计 T 时间内所有负荷消耗的电能。

5) 微电网储侧可靠性指标

当微电网处于孤岛运行时, 储能系统起到平衡能源供应和电力需求的重要作用, 本文全面考虑储能系统的容量利用率和电池寿命两方面的因素, 储能侧指标包括储能系统容量系数(energy storage system capacity factor, ESSCF)和储能系统平均放电深度(depth of discharge, DoD)。

(1) 储能系统容量系数 f_{CF} , 定义为储能系统容量 S_{ESS} 与统计时间内总发电量之比, 其计算公式如式(7)所示。

$$f_{\text{CF}} = \frac{S_{\text{ESS}}}{\sum(P_{\text{WT}} + P_{\text{PV}})} \quad (7)$$

(2) 储能系统平均放电深度 d_{ess} , 定义为储能系统平均每次放电量 S_{ad} 与系统容量之比, 其计算公式如式(8)所示。

$$d_{\text{ess}} = \frac{S_{\text{ad}}}{S_{\text{ESS}}} \times 100\% \quad (8)$$

6) 微电网交互侧可靠性指标

考虑到不同终端对源侧、网侧及储能侧可靠性

的影响各有不同, 本文从荷-源交互角度及荷-储交互角度分别定义了两个新指标——负荷风光比(load-wind-photovoltaic-ratio, LWPR)和负荷储能容量比(load-energy storage capacity-rati, LESCR)。LWPR 反映了微电网中风光发电对负荷需求的匹配程度, 通过计算风力和光伏发电覆盖负荷用电的比例, 可以评估微电网在不同终端模式下对可再生能源的利用率和可靠性; LESCR 则评估了微电网中储能系统对负荷的支持能力, 考虑到不同终端模式下的储能系统容量与负荷需求之比, LESCR 可以准确描述储能系统在微电网中平衡功率波动和提升供电可靠性的实际应用效果。从传统指标中选取电压合格率(voltage qualified rate, VQR)作为荷-网交互指标^[20]。通过综合考虑引入的交互侧指标, 可以全面评估微电网在不同运行模式下的可靠性。

(1) 荷-源交互指标

负荷风光比 R_{LWPR} , 定义为统计时间内, 负荷消耗的能量与风光总出力的比值, 其计算公式为

$$R_{LWPR} = \frac{\int_0^T P_L dt}{\sum (P_{WT} + P_{PV})} \quad (9)$$

该指标衡量了微电网中风光发电对负荷需求的贡献程度, 能够反映出风光资源在满足负荷电能需求方面的有效性。

(2) 荷-网交互指标

电压合格率 R_{vqr} , 定义为统计周期内, 针对用户进线单元, 计算其电压处于合格范围内的时长 T_{vq} 与总供电时长 T_s 的比值, 如式(10)所示。

$$R_{vqr} = \frac{T_{vq}}{T_s} \quad (10)$$

(3) 荷-储交互指标

负荷储能容量比 R_{LESCR} , 定义为统计时间内, 负荷消耗的电能与储能系统容量的比值, 其计算公式为

$$R_{LESCR} = \frac{\int_0^T P_L dt}{S_{ESS}} \quad (11)$$

该指标反映了储能系统容量与负荷电能需求之间的关系, 即储能系统能否有效地支持负荷需求并提高微电网的整体可靠性。

2 基于 ANP-EWM 的博弈组合赋权方法

2.1 基于 ANP 的主观赋权方法

ANP 是一种主观确定权重的方法, 较传统的 AHP, 用网络结构替代了层次结构, 同时兼顾指标

之间的相关性^[21]。在指标数量较多且关联性高时, ANP 可以快速准确地确定指标权重。考虑到本文选取的指标互不独立, 存在交叉影响, 采用 ANP 作为主观赋权方法。

ANP 将系统所评估的元素划分成两大类, 分别是控制层和网络层, 利用超矩阵的原理计算指标权重值。本文将微电网可靠性评估作为 ANP 控制层的唯一问题目标, ANP 控制层为指标体系中的一级指标(系统整体层面、源侧、网侧、负荷侧、储能侧和交互侧), 即准则层, 指标体系中的各个二级指标为 ANP 网络层元素。ANP 的具体确定权重步骤如下所述。

1) 建立微电网可靠性评估 ANP 网络结构。由于网络层中各个元素组之间存在相互关系, 在已建立的可靠性评估指标体系的基础上, 根据网络层元素的相互关系构建 ANP 网络结构, 如图 1 所示。

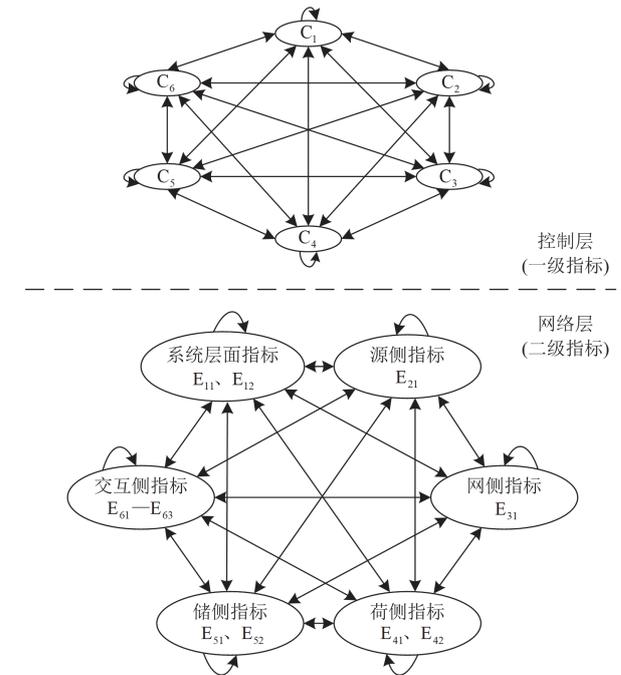


图 1 微电网可靠性评估网络拓扑

Fig. 1 Microgrid reliability assessment network topology

2) 确定控制层加权矩阵 W 。首先邀请微电网领域专家利用德尔菲法和九标度法(参照表 2), 基于准则层各元素之间的关联性和优先级, 构建了比较判断矩阵。随后, 为确保判断矩阵的合理性, 进行一致性检验, 防止诸如“a 相较于 b 更重要, b 相较于 c 更重要, 而 c 又相较于 a 更重要”的逻辑矛盾现象的出现。最终得到归一化特征向量, 并组成加权矩阵 W 。

3) 建立网络层加权超矩阵 C 。首先, 基于图 1 所展示的网络层结构, 依次确定相同网络层与不同网络层下各指标的权重系数向量。随后, 依据网络层各指标之间的内在联系, 计算得到网络层的初始超矩阵。通过对初始超矩阵中对应的指标权重块与加权矩阵的权重进行乘法运算, 进而得到了所需的加权超矩阵 C 。

表 2 九标度法

Table 2 Nine-scale method

量化值	定义(指标 r 相较于指标 j)
1	r 指标与 j 指标同等重要
3	r 指标与 j 指标稍微重要
5	r 指标与 j 指标较强重要
7	r 指标与 j 指标强烈重要
9	r 指标与 j 指标极端重要
2,4,6,8	1、3、5、7、9 判断值的中间值
倒数	$a_{rj} = 1 / a_{jr}$

4) 确定加权极限矩阵并得到权重。通过式(12)得到加权极限超矩阵 ω^{ANP} , 即主观权重。

$$\omega^{ANP} = \lim_{k \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N C^k \right) \quad (12)$$

2.2 基于 EWM 的客观赋权方法

EWM 是一种计算指标客观权重的方法。该方法基于数据的信息熵来分配权重, 指标的信息熵值越大, 反映该指标在决策中的不确定性越高, 进而赋予其较大的权重。通过这种方法, 能够确保数据的客观性和准确性在权重分配中得到充分体现^[22-23]。由于终端模式的差异, 导致所建立的二维可靠性指标体系内不同指标波动幅度较大, EWM 法中指标波动大小与信息熵成正比, 故本文采用 EWM 作为确定客观权重的方法。EWM 具体计算步骤如下所述。

1) 计算标准化矩阵 S 。根据指标的属性, 分别对正向型指标和逆向型指标进行标准化, 得到标准化矩阵 S 。

正向型指标:

$$s_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}\}}{\max\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}\}} \quad (13)$$

逆向型指标:

$$s'_{ij} = \frac{\max\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}\} - x_{ij}}{\max\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}\}} \quad (14)$$

式中: x_{ij} 表示第 i 个微电网的第 j 个指标的值; n 表示待评估微电网的个数; s_{ij} 表示正向型指标标准化后的值; s'_{ij} 表示逆向型指标标准化后的值。

2) 计算信息熵。利用式(15)计算得到信息熵归一化 e_j 。

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n (s_{ij} / \sum_{i=1}^n s_{ij}) \ln(s_{ij} / \sum_{i=1}^n s_{ij}) \quad (15)$$

3) 计算各指标的熵权 ω_j^{EWM} , 即客观权重。

$$\omega_j^{EWM} = (1 - e_j) / \sum_{j=1}^n (1 - e_j) \quad (16)$$

2.3 基于博弈论的主客观组合赋权法

若仅使用 ANP 法对可靠性指标赋权, 受专家的主观影响, 导致最终权重缺乏客观性; 若仅使用 EWM 法对其进行赋权, 虽考虑了指标间的相互影响, 但太过依赖客观数据, 忽略了指标的主观分析。因此, 综合权重相较于主客观权重更全面, 本文引入博弈论计算综合权重, 使 ANP 主观赋权法与 EWM 客观赋权法相结合, 利用纳什均衡协调两者之间的冲突并寻找其均衡点^[24-27]。

1) 设组合权重 ω 由主观权重 ω^{ANP} 与客观权重 ω^{EWM} 的线性加权得到, 如式(17)所示。

$$\omega = \lambda_1 \omega^{ANP} + \lambda_2 \omega^{EWM} \quad (17)$$

式中, λ_1 、 λ_2 分别为主、客观权重的线性加权系数。

2) 在优化过程中借鉴博弈论的思想, 通过构建目标函数来合理调整系数 λ_1 、 λ_2 。以最小化组合权重 ω 与主、客观权重 (ω^{ANP} 、 ω^{EWM}) 之间的离差和为目标, 从而确保各指标权重分配的合理性和稳定性, 使组合赋权更精准, 偏差更小, 即为纳什均衡点。目标函数和约束条件为

$$\begin{cases} \min \left(\left\| \lambda_1 \omega^{ANP} + \lambda_2 \omega^{EWM} - \omega^{ANP} \right\|_2 + \left\| \lambda_1 \omega^{ANP} + \lambda_2 \omega^{EWM} - \omega^{EWM} \right\|_2 \right) \\ \text{s.t. } \lambda_1 + \lambda_2 = 1, \lambda_1, \lambda_2 \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

3) 对式(18)中的目标函数求一阶导数, 得到主客观权重的最优组合, 其导数条件为

$$\begin{cases} \lambda_1 \omega^{ANP} (\omega^{ANP})^T + \lambda_2 \omega^{ANP} (\omega^{EWM})^T = \omega^{ANP} (\omega^{ANP})^T \\ \lambda_1 \omega^{EWM} (\omega^{ANP})^T + \lambda_2 \omega^{EWM} (\omega^{EWM})^T = \omega^{EWM} (\omega^{EWM})^T \end{cases} \quad (19)$$

4) 求得权重系数 λ_1 、 λ_2 后对系数进行归一化处理, 得到最优权重系数 λ_1^* 、 λ_2^* , 如式(20)所示。

$$\begin{cases} \lambda_1^* = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 + \lambda_2} \\ \lambda_2^* = \frac{\lambda_2}{\lambda_1 + \lambda_2} \end{cases} \quad (20)$$

5) 最终确定最优组合综合权重 ω^* 如式(21)所示。

$$\omega^* = \lambda_1^* \omega^{ANP} + \lambda_2^* \omega^{EWM} \quad (21)$$

3 基于参与度的加权秩和比可靠性综合评估方法

3.1 微电网主流终端模式分析及其指标参与度函数

依据现行工业分类体系, 电力负荷被细分为大型企业用户、商业服务用户、工业制造用户、农业活动用户、居民日常生活用户, 以及市政设施与建筑领域的电力需求用户。本文从中选取了典型的三类终端模式, 根据微电网的主流终端模式对微电网进行区分, 分别是工业园区微电网、商业园区微电网和居民住宅微电网。

各指标类型在终端模式差异的影响下对微电网可靠性贡献度不同, 将上述选取的可靠性指标划分为两个类型, 分别为可靠性贡献类指标和可靠性损失类指标。(1) 可靠性贡献类指标为新能源互补率、最大负荷利用小时数、储能系统容量系数、储能系统平均放电深度、电压合格率。(2) 可靠性损失类指标为系统平均停电时间、系统平均停电频率、输电损耗率、负荷峰谷差异率、负荷风光比、负荷储能容量比。

随着微电网终端模式的变动, 这两类指标的参与度也呈现出动态的变化, 因此, 有必要针对各种终端模式确定其对应的指标参与度函数, 以确保准确反映其影响程度^[28]。

1) 工业园区微网

本文将大型工业负荷界定为第一类负荷, 鉴于其对供电可靠性的极高要求, 损失类指标在此类负荷中的参与度相较于贡献类指标而言, 具有更为显著的重要性。

各类属性指标的参与度表现为

$$\begin{cases} c_{\psi 1} = \frac{p_1}{P} \times 100\% \\ c_{\gamma 1} + c_{\psi 1} = 1 \end{cases} \quad (22)$$

式中: $c_{\psi 1}$ 表示工业园区微电网可靠性损失类指标的参与度; $c_{\gamma 1}$ 表示贡献类指标的参与度; p_1 表示在特定的统计时间范围内, 该微电网园区内工业用户的总耗电量; P 表示统计时间内该微电网园区内所有用户的总用电量。

2) 商业园区微网

商业用户对供电可靠性要求没有工业用户严格, 本文将商业用户归类为第二类负荷, 因此在参与度中主要考虑贡献类指标对其影响。不同属性指标的参与度为

$$\begin{cases} c_{\gamma 2} = \frac{P_R}{P} \times 100\% \\ c_{\gamma 2} + c_{\psi 2} = 1 \end{cases} \quad (23)$$

式中: $c_{\gamma 2}$ 和 $c_{\psi 2}$ 分别表示商业园区微电网中可靠性贡献类指标和损失类指标的参与度; P_R 表示统计时间段内该微电网园区内商业用户的累计总用电量。

3) 居民住宅微网

居民住宅负荷在供电可靠性方面并无特殊要求, 相较于工业和商业园区, 将其划分为第三类负荷。由于贡献类指标和损失类指标对其供电可靠性影响较小, 因此本文设定两种属性的指标在居民住宅微电网中的参与度相等。具体为, $c_{\gamma 3}$ 和 $c_{\psi 3}$ 分别表示居民住宅微电网中可靠性贡献类指标和损失类指标的参与度, 统一设定为 0.5。

3.2 基于终端模式参与度的加权 RSR 综合评估方法

秩和比(rank-sum ratio, RSR)法作为一种多指标综合评估方法, 运用非整次 RSR 确定评估对象的秩次, 得到无量纲统计量。随后, 基于各指标的权重, 对秩次进行加权处理, 得到加权秩和比(weight rank-sum ratio, WRSR)值。最终, 通过比较 WRSR 值, 对评估对象进行优劣排序。根据所建立指标体系的特点, RSR 可以将不同维度的指标转化为秩次进行对比^[29]。本文提出一种考虑微电网终端模式参与度的改进加权秩和比法(participation-weighted rank-sum ratio, PWRSR), 可得到 PWRSR 值, 该值反映了在不同终端模式下微电网的可靠性。基于终端模式参与度的加权秩和比法不仅对各指标进行加权处理, 还根据终端模式的特性, 调整各指标在评估中的权重或秩次。最终得到的 PWRSR 值可以用来对微电网进行优劣排序, 以确定不同微电网的相对可靠性水平。基于终端模式参与度的加权 RSR 法可以更准确地反映不同终端模式对微电网可靠性的贡献和影响, 从而提高评估的准确性和实用性。图 2 为基于终端模式参与度的加权 RSR 微电网可靠性综合评估方法流程图, 计算步骤如下所述。

1) 对原始数据编秩。假定现有 m 个微电网, 有 n 个可靠性指标构成了原始矩阵 $S = (s_{ij})_{m \times n}$, 首先将各指标按照其属性(极大型或极小型)进行统一化处理, 确保数据的一致性。随后, 根据数值大小, 按照从小到大的顺序对每个指标进行编秩, 最终得到秩矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ 。

2) 通过主客观赋权方法得到各指标权重值, 根据微电网不同终端模式分别计算贡献类指标和损失类指标的参与度 $c_{\gamma x}$ 和 $c_{\psi x}$, 其中 x 表示微电网运行的终端模式(1 为工业型; 2 为居民型; 3 为商业型)。

3) 计算基于参与度的加权秩和比。由于各个评估指标的权重不同, 则计算加权秩和比 W_{RSR_i} 为

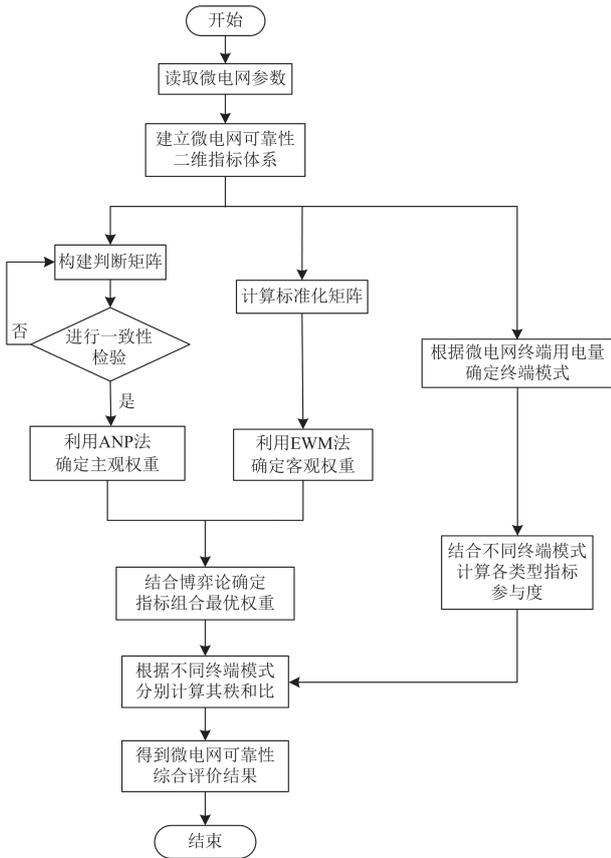


图2 基于终端模式参与度的加权RSR微电网可靠性综合评价方法

Fig. 2 Flowchart of the weighted RSR microgrid reliability comprehensive evaluation method based on terminal mode involvement

$$W_{RSRi} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^n \omega_j R_{ij} \quad (24)$$

式中： R_{ij} 为第 i 行第 j 列元素的秩值； ω_j 为第 j 类指标的权重，且 $\sum_{j=1}^n \omega_j = 1$ 。

根据式(24)可得基于参与度的加权秩和比为

$$P_{WRSRi} = \frac{1}{m} \left(\sum_{j=1}^n \omega_j^{\text{con}} R_{ij}^{\text{con}} c_{\gamma x} + \sum_{j=1}^n \omega_j^{\text{los}} R_{ij}^{\text{los}} c_{\phi x} \right) \quad (25)$$

式中： ω_j^{con} 和 ω_j^{los} 分别表示贡献类指标和损失类指标的综合权重； R_{ij}^{con} 和 R_{ij}^{los} 分别表示贡献类指标和损失类指标的秩值。

4) 计算 Probit 值。对各个指标的 P_{WRSRi} 进行排序，统计并列出的各组的频数，计算各组的累计频数，参照《百分数与概率单位对照表》为每组累计频数确定相应的 Probit 值。

5) 计算回归方程。以 Probit 值为自变量，

PWRSR 值为因变量，生成回归方程。

$$P_{WRSR} = a + b \times P_{\text{robit}} \quad (26)$$

6) 进行分档排序。按照式(26)回归方程计算得出的 PWRSR 值对微电网进行排序。

4 算例分析

基于上述建立的微电网可靠性指标体系和综合评估方法，选取了某市 5 个园区微网为研究对象，分别记为 $M_1 - M_5$ ，终端用户信息如表 3 所示。图 3 为 5 个微电网原始指标与平均水平对比雷达图。表 4 给出了微电网可靠性评估原始指标数据，通过雷达图将归一化指标值与平均水平对比，可直观地体现各个微电网可靠性。

表3 微电网终端用户规模与耗电量

Table 3 Microgrid end-user size and power consumption

对象	终端用户数量			终端用户用电量/kWh		
	工业	商业	居民	工业	商业	居民
M_1	7	20	53	5	1.41	3.16
M_2	10	11	89	3.11	0.66	4.22
M_3	7	9	30	3.26	0.52	4.15
M_4	6	12	96	3	0.5	4.51
M_5	8	10	44	1.77	3.44	1.2

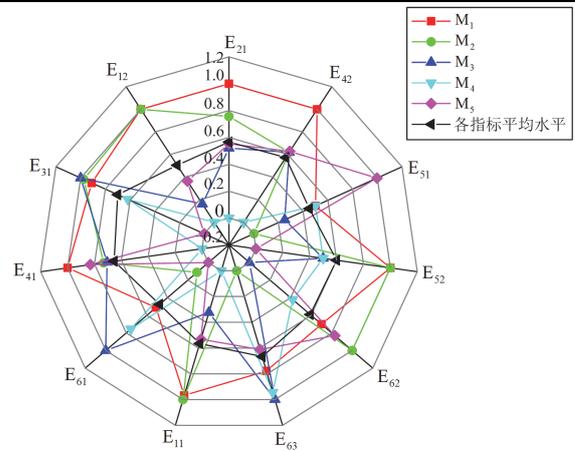


图3 原始指标与平均水平对比雷达图

Fig. 3 Radar chart of raw indicators versus the average

4.1 新旧指标体系横向对比

对比工业园区微电网、居民住宅微电网和商业园区微电网的可靠性指标，工业园区微电网的系统层面指标普遍低于居民住宅微电网和商业园区微电网，工业园区微电网和商业园区的源侧指标普遍大于居民住宅微电网，商业园区的网侧指标也表现较好，而商业园区的储能侧指标则较低。可见，终端用户的差异对微电网各个环节的可靠性影响较大，只有将指标衍生至交互侧，建立二维指标体系才能真切地反映出微电网可靠性。

所建立的微电网可靠性指标能够较好地反映系统层面、源侧、网侧、负荷侧、储能侧的可靠性,同时兼顾各个部分与负荷侧的交叉影响。微电网M₄中新能源互补率最低,系统平均停电时间最高,同时电压合格率也较低,表明该微电网能源供应不可靠,由电压质量引发的系统停电事故较常发生,在网荷交互方面仍需改善。微电网M₅的系统平均停电频率和储能系统平均放电深度较低,而输电损耗率最高,即反映出微电网停电次数偏高,也反映其网侧、储能侧可靠性更加薄弱,需要进一步改善。

相较于传统的微电网一维可靠性指标体系,所建立的二维指标体系能更好地反映出微电网的薄弱环节以及各个部分的相互耦合关系,更具有参考价值 and 实用意义。

表 4 微电网可靠性评估原始指标数据

Table 4 Raw metrics data for microgrid reliability assessment

对象	E ₁₁	E ₁₂	E ₂₁	E ₃₁	E ₄₁	E ₄₂	E ₅₁	E ₅₂	E ₆₁	E ₆₂	E ₆₃
M ₁	7.24	1.58	7.83	14.8	0.76	17.16	0.14	80	1.18	96.78	0.35
M ₂	6.99	1.58	7.53	13.5	1.30	13.52	0.12	80	1.36	97.84	0.49
M ₃	12.24	4.52	7.24	13	1.35	13.52	0.13	75	0.96	94.29	0.31
M ₄	14.76	5.09	6.60	20.7	2.77	7.60	0.14	75	1.07	95.78	0.32
M ₅	10.63	3.81	7.28	33.1	1.10	13.60	0.16	70	1.41	97.24	0.38

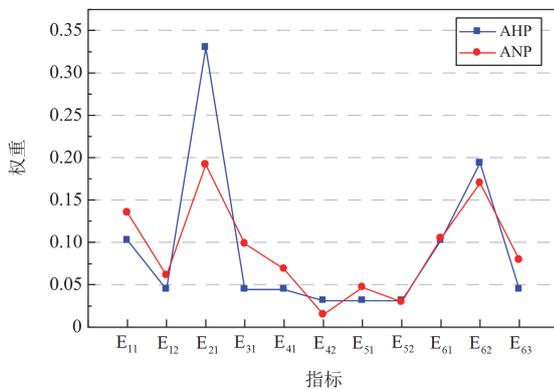


图 4 AHP 法和 ANP 法主观权重对比

Fig. 4 Comparison of AHP-ANP subjective weights

图 5 为微电网主观、客观以及最优组合权重的结果对比图,其中指标 E₂₁ 和 E₆₂ 的主观权重远大于其客观权重;指标 E₁₂、E₄₂、E₅₁ 和 E₅₂ 的客观权重远大于其主观权重,这种情况会直接影响微电网的最终评估。因此本文利用博弈论思想对主客观权重进行最优组合,弥补了仅使用主客观权重计算的缺陷。

4.3 新旧综合评估方法结果纵向对比

根据微电网不同终端用电量将其分为 3 种类型,并按照各个指标的参与度将指标划分为贡献类指标和损失类指标,分别计算不同终端模式下各类

4.2 确定各指标权重

根据图 1 构建的微电网 ANP 网络模型,结合表 4 的原始数据以及 2.1 节的 ANP 法计算公式,计算各指标的主观权重。图 4 为本文方法和 AHP 法得到的权重结果,验证了本文方法的优越性。ANP 法与 AHP 法所得主观权重数值虽总体趋势变化不大,但 AHP 法得到的主观权重存在个别极大数值,导致评估结果的可靠性大幅下降,而 ANP 法得到的主观权重更加平稳,更适应随机性强、波动性大的模型评估。以指标 E₂₁ 的权重分析为例,AHP 法与 ANP 法得到的主观权重分别为 0.044 42 和 0.060 921,ANP 法得到的指标权重较低,这是由于 AHP 法仅考虑准则层与指标层之间的重要性,而 ANP 法还需考虑各个准则层和每个指标层间的关联程度。

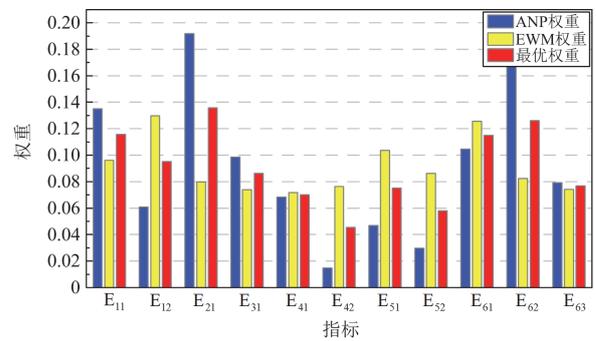


图 5 微电网主观、客观、最优组合权重对比

Fig. 5 Comparison of primary, objective and optimal combination weights for microgrids

型指标参与度,其中 M₁—M₅ 的贡献类指标和损失类指标参与度分别为(0.478; 0.444; 0.5; 0.5; 0.537)和(0.522; 0.556; 0.5; 0.5; 0.463)。按照 3.2 节的评估方法计算各指标 WRSR 值和 PWRSR 值,如表 5 所示。根据计算出的 PWRSR 值计算秩次累积频次 p,并根据《百分数与概率单位对照表》得到 Probit 值,如表 6 所示。将上述计算结果代入回归方程式(26),得到 a = -0.0073, b = 0.0637,根据最佳分档法得到分档排序临界值和分档排序结果,分别如表 7、表 8 所示。

由表 8 的排序结果可以看出,案例中 5 个园区

表 5 各指标的 WRSR 值及 PWSR 值

Table 5 WRSR value and PWSR value for each indicator

对象	WRSR											PWSR	排序
	E ₁₁	E ₁₂	E ₂₁	E ₃₁	E ₄₁	E ₄₂	E ₅₁	E ₅₂	E ₆₁	E ₆₂	E ₆₃		
M ₁	4.871	5.000	5.000	4.642	5.000	5.000	3.000	5.000	3.044	3.806	4.110	0.438	1
M ₂	5.000	5.000	4.024	4.900	3.925	3.477	1.010	5.000	1.445	5.000	1.002	0.371	2
M ₃	2.297	1.696	3.081	5.000	3.826	3.477	2.005	3.000	5.000	1.000	5.000	0.311	3
M ₄	1.000	1.000	1.000	3.468	1.000	1.000	3.000	3.000	4.022	2.679	4.776	0.233	5
M ₅	3.126	2.459	3.211	1.000	4.323	3.510	4.990	1.000	1.000	4.324	3.444	0.305	4

表 6 PWSR 值分布表

Table 6 Distribution of PWSR values

对象	PWSR	频数 f	累积频数 $\sum f$	平均秩次	$p/\%$	Probit
M ₄	0.233	1	1	1	20	4.1584
M ₅	0.305	1	2	2	40	4.7467
M ₃	0.311	1	3	3	60	5.2533
M ₂	0.371	1	4	4	80	5.8416
M ₁	0.438	1	5	5	95	6.6449

表 7 分档排序临界值

Table 7 Critical values for binning and sorting

档次	百分位数临界值 e	Probit 临界值 h	PWSR 临界值 g
1 档	$e < 6.681$	$h < 3.5$	$g < 0.2156$
2 档	$6.681 \leq e < 50.000$	$3.5 \leq h < 5$	$0.2156 \leq g < 0.3112$
3 档	$50.000 \leq e \leq 93.319$	$5 \leq h \leq 6.5$	$0.3112 \leq g \leq 0.4068$
4 档	$e > 93.319$	$h > 6.5$	$g > 0.4068$

表 8 分档排序结果

Table 8 Sorting results by grade

对象	PWSR	PWSR 排名	Probit	PWSR 临界值	分档等级
M ₁	0.438	1	6.6449	0.416	4
M ₂	0.371	2	5.8416	0.365	3
M ₃	0.311	3	5.2533	0.334	3
M ₄	0.233	5	4.1584	0.258	2
M ₅	0.305	4	4.7467	0.295	2

微电网的供电可靠性水平平均处于中等偏上，从表 3 可以明显看出 M₁、M₂ 中工业用户用电量占比较大，隶属于工业园区微电网，评估等级为 4 档和 3 档，在 5 个微电网可靠性中排名靠前，由于工业的行业特殊化，工业园区微电网可靠性需求较高。M₅ 的终端用户用电量占比大的为商业用户，在可靠性评估中处于第 3 档，不能够满足较高需求的用户。而居民住宅微电网的可靠性明显低于其他两类，处于第 2 档。

传统方法与本文方法评估结果对比如图 6 所示。在传统微电网可靠性评估中，仅通过一维指标体系进行评估，5 个微电网可靠性水平从高到低依

次为 M₁、M₂、M₅、M₃、M₄。其中 M₃ 和 M₄ 的综合评估结果较差。而采用本文二维指标体系，并考虑不同终端用户参与度时，5 个微电网可靠性水平从高到低依次为 M₁、M₂、M₃、M₅、M₄。

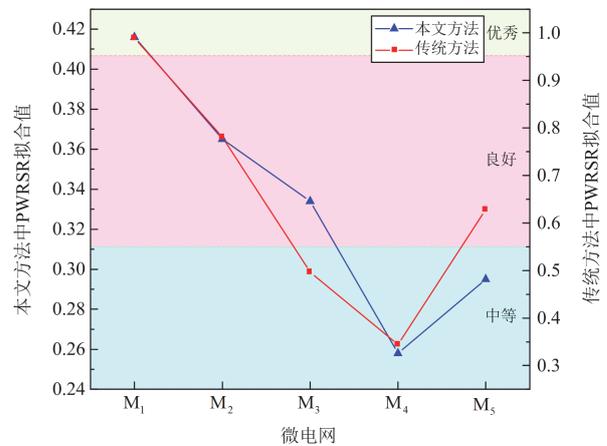


图 6 传统方法与本文方法评估结果对比

Fig. 6 Comparison of the assessment results between the traditional method and the method of this paper

由此可见，传统一维指标体系的评估方法只能大致反映微电网供电可靠性，而本文建立的评估方法既可以反映出不同终端用户对各部分的交互影响，又可以考虑不同类型指标参与度的影响，充分弥补了传统评估方法的不足，具有较强的适用性。

5 结论

随着微电网终端模式日益多元化，传统微电网

可靠性评估方法逐渐暴露出其局限性。不同终端模式对微电网可靠性需求各不相同,为此开展了以下研究工作。

1) 针对传统微电网可靠性评估指标的不足,建立了微电网可靠性二维评估指标体系,包括主维度和交互维度。主维度用于在整体层面上评估微电网各部分的可靠性。引入的交互维度用于描述不同终端模式对微电网各个部分的交互影响,针对微电网特定需求设计提出了“负荷风光比”和“负荷储能容量比”两个新指标,分别衡量了微电网中风光出力与储能系统对负荷的支撑度。弥补了传统评估指标的单一性,全面准确地从两个维度评估了微电网。

2) 基于所建立的微电网可靠性二维评估指标体系,根据指标类型,引入了不同终端模式下各指标的参与度函数,通过指标放大了终端差异对微电网可靠性的影响。

3) 提出了基于参与度的加权 RSR 综合评估方法,通过加权处理更好地表达了不同终端模式下微电网可靠性的需求,保证了微电网可靠性评估的准确性。该方法的创新点在于加权 RSR 法和终端模式参与度的有效结合,使得评估结果更贴近微电网实际运行情况,更能指导微电网的设计和优化,对于处理终端模式多样化、新能源消纳等现实挑战具有重要意义。

参考文献

- [1] 王轶楠, 卢静, 陈星彤, 等. 考虑多重因素叠加情景的能源清洁低碳转型风险评估[J]. 中国电力, 2024, 57(3): 183-189.
WANG Yinan, LU Jing, CHEN Xingtong, et al. Risk assessment of clean and low-carbon energy transformation considering superimposed scenario of multiple factors[J]. Electric Power, 2024, 57(3): 183-189.
- [2] 李锦煜, 刘锐剑, 周朝阳, 等. 我国能源安全形势技术分析[J]. 电力工程技术, 2023, 42(6): 249-255.
LI Jinyu, LIU Ruijian, ZHOU Chaoyang, et al. Technical analysis of China's energy security situation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(6): 249-255.
- [3] MORTEZAPOUR V, GOLSHANNAVAZ S, POURESMAEIL E, et al. A new hybrid control technique for operation of DC microgrid under islanded operating mode[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(4): 646-656.
- [4] 王大兴, 宁妍, 汪敬培, 等. 构建新型电力系统背景下的微电网鲁棒简化建模[J]. 中国电力, 2024, 57(1): 148-157.
WANG Daxing, NING Yan, WANG Jingpei, et al. Robust simplified modeling of microgrid in the context of constructing new power systems[J]. Electric Power, 2024, 57(1): 148-157.
- [5] 魏梅芳, 黎跃龙, 胡国峰, 等. 考虑多主体互动的光储充微电网运行模式分析[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(2):133-140.
WEI Meifang, LI Yuelong, HU Guofeng, et al. Analysis of operating mode of photovoltaic-energy storage-charging station microgrid considering multi-agent interaction[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(2): 133-140.
- [6] 周京华, 翁志鹏, 宋晓通. 兼顾可靠性与经济性的孤岛型光储微电网容量配置方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 166-174.
ZHOU Jinghua, WENG Zhipeng, SONG Xiaotong. Capacity configuration method of islanded microgrid with photovoltaic and energy storage system considering reliability and economy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 166-174.
- [7] TAMOOR M, ABU BAKAR TAHIR M, ZAKA M A, et al. Photovoltaic distributed generation integrated electrical distribution system for development of sustainable energy using reliability assessment indices and levelized cost of electricity[J]. Environmental Progress & Sustainable Energy, 2022, 41(4): 13815.
- [8] 马钰, 韦钢, 李扬, 等. 考虑孤岛源-荷不确定性的直流配电网可靠性评估[J]. 电工技术学报, 2021, 36(22): 4726-4738.
MA Yu, WEI Gang, LI Yang, et al. Reliability evaluation of DC distribution network considering islanding source-load uncertainty[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(22): 4726-4738.
- [9] 唐巍, 李嘉, 张璐, 等. 考虑用户侧微能网能量支援的电-气-热耦合系统可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(9): 3444-3458.
TANG Wei, LI Jia, ZHANG Lu, et al. Reliability evaluation of electricity-gas-heat coupled system considering the energy support of user-side micro-energy network[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(9): 3444-3458.
- [10] 李建林, 郭兆东, 马速良, 等. 新型电力系统下“源网荷储”架构与评估体系综述[J]. 高电压技术, 2022, 48(11): 4330-4342.

- LI Jianlin, GUO Zhaodong, MA Suliang, et al. Overview of the “source-grid-load-storage” architecture and evaluation system under the new power system[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4330-4342.
- [11] 王辉东, 高晋坤, 黄佳斌, 等. 考虑数据中心负载灵活性的电力系统运行可靠性评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21): 96-105.
- WANG Huidong, GAO Jinkun, HUANG Jiabin, et al. Power system operational reliability evaluation method considering data center load flexibility[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 96-105.
- [12] 邓思成, 郑天文, 陈来军, 等. 提高关键负荷供电可靠性的交直流微网分布式能量优化管理策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 55-62.
- DENG Sicheng, ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, et al. Optimal management strategy for distributed energy with enhanced power supply reliability of critical loads for AC/DC hybrid microgrids[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 55-62.
- [13] 朱兰, 杨淑红, 蒋红进, 等. 基于改进 ANP 的微网规划综合评价研究[J]. 太阳能学报, 2020, 41(3): 140-148.
- ZHU Lan, YANG Shuhong, JIANG Hongjin, et al. Study on comprehensive evaluation of microgrid planning based on improved ANP[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2020, 41(3): 140-148.
- [14] 胡润泽, 吕世轩, 张灿, 等. 基于状态熵权和双轨制 TOPSIS 的电能质量实时综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(23): 102-114.
- HU Runze, LÜ Shixuan, ZHANG Can, et al. Real time comprehensive evaluation method of power quality based on state entropy and dual track TOPSIS[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(23): 102-114.
- [15] 陈凡, 张继聪, 赵美莲, 等. 考虑负荷重分配攻击的电力系统运行可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(8): 160-168.
- CHEN Fan, ZHANG Jicong, ZHAO Meilian, et al. Operational reliability evaluation for power systems considering load redistribution attack[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8): 160-168.
- [16] 李响, 武海潮, 王文雪, 等. 基于电网承载能力的新能源并网适应性评估[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(增刊 1): 107-113.
- LI Xiang, WU Haichao, WANG Wenxue, et al. Adaptability assessment of new energy connected to the power grid based on the carrying capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(S1): 107-113.
- [17] 程军照, 徐敏, 冯磊, 等. 基于 GRA-K-means++算法的配电网供电可靠性水平评价[J]. 南方电网技术, 2023, 17(8): 113-122.
- CHENG Junzhao, XU Min, FENG Lei, et al. Evaluation of distribution network power supply reliability level based on GRA-K-means++ algorithm[J]. Southern Power System Technology, 2023, 17(8): 113-122.
- [18] 欧阳森, 杨墨缘. 考虑负荷恢复过程的配电网用电可靠性评估指标与方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(3): 33-40.
- OUYANG Sen, YANG Moyuan. Reliability assessment indexes and methods of distribution network for power consumer considering load recovery process[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 33-40.
- [19] RIBÓ-PÉREZ D, BASTIDA-MOLINA P, GÓMEZ-NAVARRO T, et al. Hybrid assessment for a hybrid microgrid: a novel methodology to critically analyse generation technologies for hybrid microgrids[J]. Renewable Energy, 2020, 157: 874-887.
- [20] KAYTEZ F. Evaluation of priority strategies for the expansion of installed wind power capacity in Turkey using a fuzzy analytic network process analysis[J]. Renewable Energy, 2022, 196: 1281-1293.
- [21] 张哲亮, 夏沛, 张晓星, 等. 源-网-荷-储一体化环境下复杂电网投资决策指标体系的研究[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(3): 1-13.
- ZHANG Zheliang, XIA Pei, ZHANG Xiaoxing, et al. Research on the complex grid investment decision indexes system under the integrated source-grid-load-storage environment[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(3): 1-13.
- [22] WANG C, CHU S, YING Y, et al. Underfrequency load shedding scheme for islanded microgrids considering objective and subjective weight of loads[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(2): 899-913.
- [23] ZHANG L, WU J, ZHANG J, et al. A dynamic and integrated approach of safety investment decision-making for power grid enterprises[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2022, 162: 301-312.
- [24] 于浩, 张大海, 赵轩, 等. 基于 Apriori-ANP 的电动汽车充电站并网性能综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 121-133.

- YU Hao, ZHANG Dahai, ZHAO Xuan, et al. Comprehensive evaluation method of the grid-connected performance of an electric vehicle charge and discharge station based on an Apriori-ANP[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 121-133.
- [25] 程志友, 刘荡荡, 吴吉, 等. 基于集对分析与可变模糊集的电能质量综合评估[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1950-1956.
- CHENG Zhiyou, LIU Dangdang, WU Ji, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on set pair analysis and variable fuzzy sets[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1950-1956.
- [26] 赵会茹, 李兵抗, 苏群, 等. 基于博弈论组合赋权和改进 TOPSIS 的新能源发电商信用风险评价模型研究[J]. 现代电力, 2023, 40(4): 514-524.
- ZHAO Huiru, LI Binghang, SU Qun, et al. Research on credit risk evaluation model of new energy power producers based on game theory combination weights and improved TOPSIS[J]. Modern Electric Power, 2023, 40(4): 514-524.
- [27] 陆易凡, 刘达, 张洋, 等. 基于博弈论组合赋权和改进优劣解距离法的输变电工程建设时序规划[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(10): 4124-4131.
- LU Yifan, LIU Da, ZHANG Yang, et al. Construction sequence planning of power transmission and transformation projects based on game theory combined weighting and improved technique for order preference by similarity to ideal solution[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(10): 4124-4131.
- [28] 李鹏, 赵亚汝, 范须露, 等. 适用于规划-运行两阶段的配电网可靠性等级划分及评估方法[J]. 高电压技术, 2024, 50(5): 2042-2051.
- LI Peng, ZHAO Yaru, FAN Xulu, et al. Reliability classification and evaluation method of distribution network suitable for planning-operation two stages[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(5): 2042-2051.
- [29] 何常红. 基于加权秩和比法的接触网质量评价方法[J]. 铁道工程学报, 2023, 40(2): 84-88.
- HE Changhong. Evaluation method of catenary quality based on weighted rank sum ratio method[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2023, 40(2): 84-88.
-
- 收稿日期: 2024-05-05; 修回日期: 2024-08-10
- 作者简介:
- 闫群民(1980—), 男, 博士研究生, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统分析与电能质量控制; E-mail: yanqunm@163.com
- 肖冬雪(2000—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与微电网规划; E-mail: xddxue@163.com
- 王磊(1972—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为人工智能与智能算法。E-mail: Wanglei_sut@163.com
- (编辑 张颖)