

基于改进组合权重的高速公路微电网运维评价指标体系

霍千辰, 肖仕武, 黄一修

(华北电力大学 电气与工程学院, 北京 102206)

摘要: 高速公路能源自洽系统是构建新型能源交通系统的重要组成, 针对非常态下高速公路的微电网进行综合评价, 建立评价指标体系, 对高速公路微电网发展、运维和评估有重要意义。首先, 研究高速公路微电网组成结构, 建立高速公路微电网模型、高速公路非常态情景和能源自洽系统场景集; 结合高速公路微电网组成和传统评价指标, 建立考虑多场景下的高速公路微电网运维评价指标体系; 其次, 引入毕达哥拉斯犹豫模糊集, 提出一种结合熵权法、层次分析法和模糊综合评价法等组合权重计算方法, 计算高速公路微电网的各级评价指标权重; 最后, 得到各场景下的高速公路微电网最终评价结果, 并进行具体的影响因素分析。通过与其他方法对比, 验证了评价方法的有效性。

关键词: 高速公路微电网; 运维评价指标体系; 改进组合权重; 模糊综合评价; 毕达哥拉斯犹豫模糊集

中图分类号: TM732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2691 (2025) 06-0055-11

Highway Microgrid Operation and Maintenance Evaluation Index System Based on Improved Combination Weights

HUO Qianchen, XIAO Shiwu, HUANG Yixiu

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The highway energy self-sufficient system is an important component of constructing a new energy transportation system. Conducting a comprehensive evaluation of highway microgrids under abnormal conditions and establishing an evaluation index system are of great significance for highway microgrid development, operation, maintenance and evaluation. First, the composition structure of highway microgrids is analyzed, with highway microgrid models, abnormal scenarios and energy self-sufficient system scenario sets. Subsequently, a highway microgrid operation and maintenance evaluation index system is developed based on the composition of highway microgrid and traditional evaluation indexes. Then, the Pythagorean hesitant fuzzy set is introduced, and a combined weight calculation method integrating the entropy weight method, analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation method is proposed to calculate the weights of evaluation indexes at all levels for highway microgrids. Finally, the evaluation results of highway microgrids under different scenarios are obtained, followed by the detailed influencing factor analysis. Finally, the final evaluation results of the highway microgrid under each scenario are obtained and the specific influencing factors are analyzed. The effectiveness of the proposed evaluation method is verified by comparison with other methods.

Key words: highway microgrid; operation and maintenance evaluation index system; improved combination weights; fuzzy comprehensive evaluation; Pythagorean hesitant fuzzy set

0 引言

为了应对日益突出的全球气候变化威胁, 实

现“双碳”目标, 国家能源结构体系正朝着能源低碳型转型, 高速公路微电网是新型能源交通系统的重要组成, 高速公路作为关键交通基础设施, 高速公路新能源微网具有独特的负荷用能特性、新能源储能配置策略、评价需求和运维方案。考虑

这些因素,本文建立了高速公路微电网的评价指标体系,实现对高速公路能源自洽系统的综合评价,有助于能源交通系统发展。

国内外针对电网的综合评价在评价指标构建、权重计算方法等领域已经做了很多研究。指标构建方面,针对电网电能质量^[1,2]、电网可持续发展^[3]等具体内容提出评价指标;文献[4]从可靠性、经济性、市场运营和环保性方面建立评价指标;文献[5]建立考虑资源禀赋的评价指标,选取代表性城市分析资源禀赋对微电网产生的影响;文献[6]建立了低碳电网的评价指标,在全生命周期下对低碳电网进行综合量化评价;文献[7]提出微电网运行效果评价指标体系,从可靠、协调、经济、优质的角度建立评价指标;文献[8]建立“投入-产出”指标体系,对微电网的可再生能源发电综合效益进行评价;文献[9]研究配电网运维管控平台架构,讨论了与配电网运维相关指标。目前,针对新出现的高速公路新能源微电网的评价指标选择和构建尚未展开深入研究。

在指标权重计算方法上,常见的权重计算方法有:G1法、层次分析法、网络分析法、熵权法、优劣解距离法、灰色关联法、模糊综合评价、实验室分析法等。文献[10]基于 AHP 和改进熵权法计算指标权重,建立了 VIKOR 多准则评价体系;文献[11]将毕达哥拉斯犹豫模糊集引入到 DEMATEL 和信任网络中,计算决策者和评价指标的权重,最终得到最优方案;文献[12]提出属性关联的双极容度多属性决策 VIKOR 方法,能够综合决策者心理、区分不同方案差异;文献[13]给出拟加权几何集成算子和拟有序加权几何算子的概念,并将算子推广到毕达哥拉斯模糊决策环境,提出广义毕达哥拉斯模糊集成算子的决策方法;文献[14]对犹豫模糊决策方法做了研究,提出了广义犹豫模糊混合加权平均算子等;文献[15]研究基于语言距离测度的多属性决策方法,提出了多种犹豫模糊语言集的距离测度,证明了相关性质和定理。这些方法中,客观评价法易受到数据的影响;主观评价法缺少理论支撑。针对这些问题,本文引入了犹豫模糊集,采用主客观结合的计算方法。

关于交通网和配电网的耦合系统的研究,文献[16]提出了电力-交通协同应急框架,建立交通最优疏散模型,计算协同恢复方法;文献[17]提出

了交通-配电网故障场景,提出配电网的韧性恢复方法;文献[18]建立计及交通网延误的灾后滚动抢修策略,在配电网灾后抢修中考虑交通网延误影响。

本文在上述研究基础上,进一步开展评价体系与评价方法的研究。首先建立高速公路微电网模型,分析高速公路微电网的运行状态,构建能源自洽系统场景集。在此基础上,提出高速公路微电网运维评价指标体系,提出评价指标体系对应的改进组合权重计算方法,综合熵权法、层次分析法和模糊综合评价等方法计算指标体系的各级权重,最终完成高速公路微电网的综合评价。结合多种场景下高速公路微电网运行数据对评价模型进行算例分析,为能源自洽系统发展和运维提供决策参考。

1 高速公路微电网综合评价指标体系构建

对非常态高速公路微电网具体建模分析,提出非常态场景集、高速公路微电网场景集,提出具体评价指标,建立高速公路微电网的评价指标体系。

1.1 高速公路能源自洽系统微电网

1.1.1 高速公路微电网组成

通过收集信息,建立高速公路新能源微电网网架结构模型。建立固定长度的辐射型结构微电网,确定服务区的主要用电负荷、负荷分类和重要等级,设置变压器和换流器等装置。高速公路沿线铺设光伏发电设备,间隔固定长度设置光伏出力,设置服务区的风力和光伏发电设备,高速公路服务区、隧道和收费站配置储能设备。根据以上数据信息,建立高速公路新能源网架结构。

1.1.2 高速公路微电网常态与非常态场景

高速公路除一般正常运行外有大量非常态运行时间,且由于高速公路的封闭性,当高速公路中间一段进入非常态情况时,整条高速都将受到影响。高速公路的非常态情况可归纳为4类:节假日、突发情况、特殊天气和自然灾害。节假日属于计划内可预测的非常态事件,突发事件、特殊天气与自然灾害的发生难以预测。

表1为一段高速公路一年中的突发事件数量与占比统计。分析高速公路一年中受节假日影响的天数,出行需求变化的时间段在30天左右。由

表中数据分析得,非常态情况在高速公路微电网运行中并非突发偶然事件。将高速公路微电网运行状态区分为常态和非常态,分析非常态下高速公路微电网影响,提出评价指标,相较传统微电网评价方法更能反映高速公路微电网特点,更好地指导微电网运维。

表 1 年高速公路非常态情况占比

Tab. 1 Proportion of abnormal conditions on highways					
事件	车辆交通事故	车辆故障	气象灾害	地质灾害	其他因素
数量	2 921	94	136	357	374
占比	75.24%	2.42%	3.5%	9.20%	9.63%

1.1.3 非常态对高速公路微电网的影响

非常态情况在高速公路微电网运行的各环节均有影响:

- 1) 风力、光伏出力受天气干扰,自洽系统的新能源发电会受到影响。
- 2) 恶劣天气和交通事故影响下,设备元件的故障率提升,引起微电网的可靠性降低。
- 3) 非常态影响高速公路交通流量的变化以及电动汽车充电的意愿下降,进而引起电动汽车充电负荷下降。
- 4) 地震等极端灾害对微电网带来直接损伤。
- 5) 微电网的可靠性、元件故障率、高速公路的通行能力等受到影响,微电网的运维方案也会受影响。

非常态下,高速公路微电网在“源”端,新能源发电和能源自洽程度受到明显影响;在“荷”端,受到电动汽车充电带来影响,需要较高的满足负荷用能需求和负荷波动的能力。维持源-荷的平衡可通过储能设备的充放电实现能量的最优调控。面临微电网可靠性下降的问题,亟需提高运行维护水平和故障应急响应能力。

1.1.4 高速公路微电网用能场景

高速公路是我国重要交通基础设施,覆盖范围广,跨越不同地区地形,不同季节下交通出行方式也有不同,这些都引起一条高速公路微电网在电网强度、负荷多少、资源禀赋高低上存在不同变化。

分析这一问题,提出高速公路微电网的用能场景集,如表 2 所示。

1.2 高速公路微电网运维评价指标体系

总结微电网运维评价指标体系构建方法,分析高速公路微电网的评价需求和各场景下微电网受影响程度,建立三层的高速公路微电网运维综

合评价指标体系。针对各种场景,分别从高速公路微电网的电源指标(C1)、电网指标(C2)、负荷指标(C3)、储能指标(C4)、经济性指标(C5)、可靠性指标(C6)和故障及恢复指标(C7)七个属性进行评价,根据高速公路微电网具体运行结果计算各属性得分,指标体系如表 3 所示。

表 2 高速公路微电网用能场景集

Tab. 2 Sets of energy consumption scenarios for highway microgrids			
序号	电网强度	负荷	资源禀赋
S1	弱电网	少负荷	丰度低
S2	强电网	少负荷	丰度低
S3	弱电网	多负荷	丰度低
S4	强电网	多负荷	丰度低
S5	弱电网	少负荷	丰度高
S6	强电网	少负荷	丰度高
S7	弱电网	多负荷	丰度高
S8	强电网	多负荷	丰度高

表 3 高速公路微电网评价指标体系

Tab. 3 Evaluation system of highway microgrid			
一级指标		二级指标	
编号	名称	编号	名称
C1	电源指标	C11	高速公路能源自洽率
		C12	新能源消纳能力
		C13	新能源发电效率
		C14	高速公路发电设备易损性
C2	电网指标	C21	高速公路电能质量
		C22	电压合格率
		C23	电压畸变率
		C24	输电线路易损性
C3	负荷指标	C21	EV 充电预测满足率
		C22	交通用能需求满足率
		C23	负荷削减率
		C24	负荷波动率
		C25	负荷恢复率
C4	储能指标	C26	服务区充电桩易损性
		C41	储能可用率
		C42	电池健康损失
		C43	储能平均放电深度
		C44	储能平均荷电状态
C5	经济性指标	C45	储能设备易损性
		C51	高速公路电网损耗
		C52	高速公路低碳水平
		C53	运行成本占比
C6	可靠性指标	C54	微电网建设恢复成本
		C61	平均供电可靠率
		C62	平均缺供电量
		C63	平均切负荷概率
C7	故障及恢复类指标	C71	故障维修效率
		C72	故障运维间隔时间
		C73	各元件故障率
		C74	运维检修计划与故障隔离

2 改进组合权重计算方法

2.1 数据归一化处理

获取实际运行中产生的二级指标的基础数据,原始数据在单位、量级等方面有不同,对每种指标进行无量纲的标准化处理。

效益型指标:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \quad (1)$$

成本型指标:

$$\bar{x}_{ij} = \frac{\max(x) - x_{ij}}{\max(x) - \min(x)} \quad (2)$$

式中: $\bar{x}_{ij}$ 为经过处理后得到标准化的原始数据矩阵中的元素。

经过处理后的二级评价指标原始数据均转化为越高越好的(0~1)之间的数值,进行后续计算。

2.2 二级指标权重计算

得到归一化处理后的数据仍是基础的具体评价指标,通过熵权层次分析法计算二级指标权重,得到一级指标的评价结果。

2.2.1 熵权法

熵权法根据指标数据的离散程度来决定客观权重,首先计算各指标值得分,然后进行标准化,将由式(1)和(2)标准化后的数据填入矩阵 $X = \{x_{ij}\}$ 。

计算指标的概率矩阵 $P = \{p_{ij}\}$:

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

计算指标对应的信息熵:

$$S_j = - \sum_{i=1}^m (p_{ij} \times \ln(p_{ij})) / \ln(n) \quad (4)$$

最后计算得到熵权法的二级指标权重值:

$$\omega_j = (1 - S_j) / (n - \sum_{j=1}^n S_j) \quad (5)$$

式中: p_{ij} 反映第 j 个指标变异程度的大小, S_j 为信息熵, ω_j 为熵权法权重。

2.2.2 层次分析法

由专家按照“1-9”标度规则对评价体系中任意两个指标的重要程度对比进行打分,根据层次结构得到判断矩阵 $B = \{b_{ij}\}$ 。

$$B = \begin{pmatrix} b_{11} & b_{12} & \cdots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \cdots & b_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & b_{nn} \end{pmatrix} \quad (6)$$

式中: b_{ij} 与 b_{ji} 为倒数关系,即 $b_{ij} = 1/b_{ji}$ 。

用方根法计算矩阵 B 特征向量,对应非零特征值特征向量,归一化后就得到层次分析法指标权重:

$$W_i = \sqrt[n]{b_{i1} \ b_{i2} \ \cdots \ b_{in}} \quad (7)$$

$$\omega_i = (W_1 \ W_2 \ \cdots \ W_n) / \sum_{j=1}^n W_j \quad (8)$$

2.2.3 融合计算

由公式(5)和(8)得到熵权法与层次分析法权重。将两者权重结合得到熵权层次分析法综合权重:

$$\omega_i = k_1 \alpha_i + k_2 \beta_i \quad (9)$$

式中: ω_i 为第 i 个指标的综合权重; k_1 为评价体系对层次分析法倾向程度; α_i 为层次分析法指标权重; k_2 为评价体系对熵权法倾向程度; β_i 为熵权法指标权重。

融合计算最终结果:

$$\mu = \sum_{i=1}^n \omega_i x_i \quad (10)$$

式中: μ 为一级指标综合评价分数; ω_i 为第 i 二级指标的对应权重; x_i 为第 i 二级指标指标分数。

2.3 考虑多场景的模糊综合评价

计算得到高速公路微电网的一级指标得分,进一步融合即可得到最终微电网评价结果。采用传统指标计算方法会受到数据干扰或人为影响,高速公路微电网的非常态情况十分重要。通过引入犹豫模糊集改进评价方法,综合各场景的影响和重要程度大小,将常态与非常态场景下一级指标的得分数据分别处理,能够更准确地利用非常态下的数据信息,更好地描述微电网运行情况,建立了考虑各场景的模糊综合评价体系。

2.3.1 毕达哥拉斯犹豫模糊集

设 X 为论域,则该论域上的毕达哥拉斯犹豫模糊集可表示为 $P = \{x, \mu_p(x), v_p(x) \mid x \in X\}$; $\mu_A(x)$ 为元素 x 属于 X 的隶属度; $v_A(x)$ 为元素 x 属于的 X 的非隶属度。犹豫度为

$$\pi_p(x) = \sqrt{1 - (\mu_A(x))^2 - (v_A(x))^2} \quad (11)$$

设 $A = P(\mu, v)$ 为毕达哥拉斯犹豫模糊数,之后用 PHFE 表示,则 A 的得分函数为

$$\tilde{S}(A) = (\mu_p)^2 - (v_p)^2 + \frac{(\mu_p)^2 - (v_p)^2}{1 + (\pi_p)^2} \quad (12)$$

2.3.2 PHFE 决策矩阵构建

犹豫模糊集同时考虑了元素属于集合的隶属

度和非隶属度。将通过公式(10)指标融合计算得到的各场景一级指标各项分数作为犹豫模糊集的隶属度,再根据场景重要程度的参考给出非隶属度,得到 PHFE 形式的决策矩阵 $\mathbf{P} = [p_{ij}]_{M \times N}$:

$$p_{ij} = \langle \mu, \nu \rangle = \langle \{\mu_{ij}^1, \mu_{ij}^2, \mu_{ij}^3, \mu_{ij}^4, \mu_{ij}^5\}, \{\nu^1, \nu^2, \nu^3, \nu^4, \nu^5\} \rangle \quad (13)$$

式中: p_{ij} 表示用能场景 i 的指标 j 的评估值, μ_{ij}^k 和 ν^k 表示 5 种常态或非常态下的隶属度与非隶属度, M 为用能场景数, N 为评价指标个数。

2.3.3 计算差异矩阵

通过 PHFE 得分距离测度计算得到方案间的差异矩阵。计算不同场景在各一级指标下的差

$$d = \frac{1}{2m} \sum_{m=1}^i \sum_{m=1}^j \sqrt{(\mu_A(x_i) + \mu_A^2(x_i)M_A - \mu_B(x_i) - \mu_B^2(x_i)M_B)^2 + (\nu_A(x_i) + \nu_A^2(x_i)M_A - \nu_B(x_i) - \nu_B^2(x_i)M_B)^2} \quad (15)$$

式中: $M_N = \sqrt{1 - \mu_N^2 - \nu_N^2} / (3(\mu_N^2 - \nu_N^2))$ 。

2.3.4 一级指标权重计算

使用决策实验室 (DEMATEL) 方法计算一级指标权重,以图论和矩阵方法表示出指标之间相互影响关系。由专家对各指标相互影响关系给出评价,得到直接关系矩阵 $\mathbf{T}$ 。通过归一化方法,将直接关系矩阵 $\mathbf{T}$ 转换为综合关系矩阵 $\mathbf{H}$:

$$\mathbf{H} = \mathbf{T}(\mathbf{I} - \mathbf{T} / \max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n t_{ij}) / \max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n t_{ij} \quad (16)$$

式中: t_{ij} 表示第 j 指标对第 i 指标的影响程度。

根据模糊综合关系矩阵,计算指标系统中每个指标的影响度 $\mathbf{D}$ 、被影响度 $\mathbf{R}$,最后计算主观权重的权重值,归一化处理后得到的即为具体指标权重。

$$\mathbf{D} = [\sum_{j=1}^n h_{ij}]_{n \times 1}, \mathbf{R} = [\sum_{j=1}^n h_{ij}]_{n \times 1} \quad (17)$$

$$W_i = \sqrt{(D_i - R_i)^2 - (D_i + R_i)^2} \quad (18)$$

$$w_i = W_i / \sum_{i=1}^n W_i \quad (19)$$

2.3.5 一级指标组合权重计算

由 DEMATEL 计算得到一级指标权重后,还需要计算指标组合的重要度大小, λ -模糊测度用于描述两集合之间的相互关系,满足条件:

$$\mu(A \cup B) = \mu(A) + \mu(B) + \lambda \mu(A) \mu(B) \quad (20)$$

式中:对于 $\forall A, B \in P(X)$ 且 $A \cap B \neq \emptyset$ 。

设 $X = \bigcup_{i=1}^n x_i$, 其 λ -模糊测度的具体表达式为

值,差值由 PHFE 的距离测度来表示,得到各一级指标的相对差异矩阵 $\mathbf{Y}_c = [y_{ij}^c]_{M \times M}, i, j \in M$,计算方法为

$$y_{ij}^c = \begin{cases} d(p_{ic}, p_{kc}) & \tilde{S}(p_{ic}) > \tilde{S}(p_{kc}) \\ 0 & \tilde{S}(p_{ic}) = \tilde{S}(p_{kc}) \\ -d(p_{ic}, p_{kc}) & \tilde{S}(p_{ic}) < \tilde{S}(p_{kc}) \end{cases} \quad (14)$$

式中: c 为矩阵对应的一级指标种类, i 和 k 对应相比较的两个场景。

对于两个犹豫模糊数 $A = (\mu_A(x_i), \nu_A(x_i))$ 和 $B = (\mu_B(x_i), \nu_B(x_i))$, A 和 B 的距离测度为

$$\mu(X) = \begin{cases} \frac{1}{\lambda} (\prod_{i=1}^n ([1 + \lambda \mu(x_i)] - 1)), \lambda \neq 0 \\ \sum_{i=1}^n \mu(x_i) \end{cases} \quad (21)$$

式中: $x_i \cap x_j \neq \emptyset, i, j = 1, 2, \dots, n$, 且 $i \neq j$ 。

对于指标集 $C = \{C1, C2, \dots, C7\}$ 的组合集有 2^7 种组合方案,通过 λ -模糊测度计算指标组合的权重, $P(C)$ 为一级指标的组合集,计算组合 U 的重要程度。首先,根据 $\mu(X) = 1$ 确定 λ 的大小:

$$\lambda + 1 = \prod_{i=1}^n [1 + \lambda \mu(x_i)] \quad , \quad -1 \leq \lambda \leq \infty, \lambda \neq 0 \quad (22)$$

根据公式(21)计算指标集合的权重:

$$\mu(U) = \frac{1}{\lambda} (\prod_{C_j \in U} [1 + \lambda \mu(C_j)] - 1), U \in P(C) \quad (23)$$

式中: U 为组合集中的任意元素。

2.3.6 计算方案优势度

得到指标间的差异矩阵和指标组合的权重大小,结合两者进一步计算方案之间优势度。将方案 x_i 对另一方案 x_k 的各指标下距离测度 y_{ik}^c 由小到大排序,得到:

$$y_{ik}^{\sigma(1)} \leq \dots \leq y_{ik}^{\sigma(q)} \leq 0 \leq y_{ik}^{\sigma(q+1)} \leq \dots \leq y_{ik}^{\sigma(N)}$$

式中: $\sigma(i)$ 表示升序排序中的第 i 个差异元素,对应的属性为 $C(\sigma(i))$ 。

利用 Choquet 积分对 λ -模糊测度得到的指标集合权重和指标得分结果进行集结,分别计算方案的优势度 $\psi_P = (\varphi_{ik}^p)$ 和劣势度矩阵

$\psi_N = (\varphi_{ik}^n)$:

$$\varphi_{ik}^p = \sum_{i=q+1}^N \sqrt{y_{ik}^{\sigma(i)} (\mu(U_{\sigma(i)}) - \mu(U_{\sigma(i+1)}))}$$

(24)

$$\varphi_{ik}^n = \delta_n \sum_{i=1}^q \sqrt{-y_{ik}^{\sigma(i)} / (\mu(U_{\sigma(i)}) - \mu(U_{\sigma(i+1)}))}$$

(25)

式中: δ_n 为损失因子,表示对规避损失的期望。

最后得到综合优势度矩阵:

$$\psi = \psi_P - \psi_N$$

(26)

2.3.7 综合评价结果

最终得到 ψ 矩阵中元素 φ_{ik} 表示方案 i 对方案 k 的综合优劣差值, ψ 矩阵的行和代表方案与其他方案对比后的综合评价结果。

$$O_A(x_i) = \sum_{k=1}^M \varphi(i, k)$$

(27)

计算每一方案的综合评价结果,以中间场景为良好状态,将得到的综合评价结果进行归一化,得到各个方案的最终评价结果。

2.4 改进组合权重计算方法

通过上述方法结合,改进组合权重的方法实现对高速公路微网各场景和指标数据更准确的描述,得到评价结果:首先,数据归一化处理并通过熵权层次分析法权重融合得到一级指标得分。通过得分和场景影响程度评价得到 PHFE 决策矩阵,计算差异矩阵。通过专家评价和模糊测度得到一级指标的权重值,利用 Choquet 积分集结差异矩阵和指标权重值,计算优势度和综合优势度,最终得到评价得分。计算过程如图 1。

3 算例分析

通过数据收集和仿真计算,对 8 种用能场景下的非常态高速公路微电网的运行情况进行评价,得到评价结果进行分析,检验评价体系的合理性,对几种高速公路微电网运行状态评价结果对比,分析高速公路微电网运维水平。

3.1 评价结果

1) 原始数据处理

将通过数据收集^[17,19]和建模计算^[20]等方法收集得到原始数据,节假日部分数据如表 4 所示。

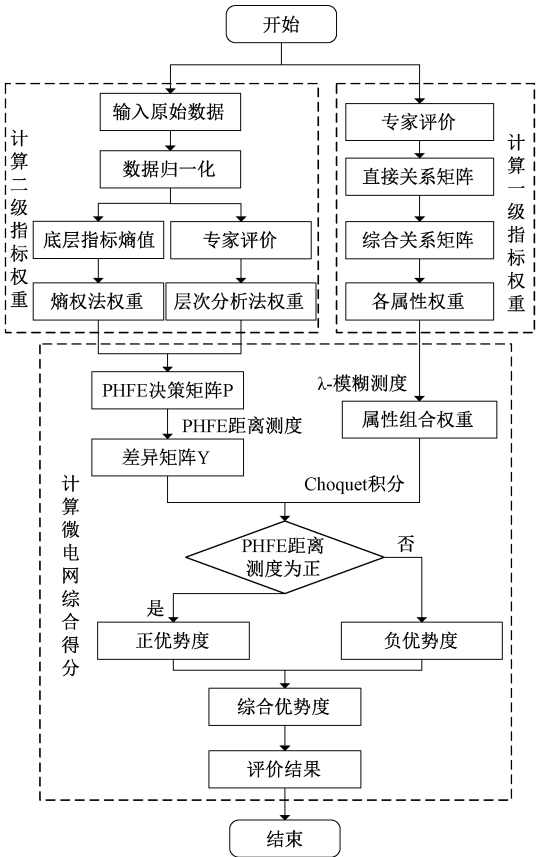


图 1 计算流程图

Fig. 1 Calculation flow chart

表 4 节假日下微电网部分运行数据

Tab. 4 Partial operation data of microgrid under holidays		S1	S2	S3	S5	S6
C1	C11	48.22	49.4	29.56	56.39	58.34
	C12	88.2	87.9	100	89	87
C2	C21	93.69	96.93	91.33	95.72	98.8
	C22	84	80	94	84	80
	C23	66.2	80.4	66.2	66.2	80.4
C3	C31	95.96	99.68	95.13	95.96	99.68
	C32	85	95	55	85	95
	C33	29.74	23.87	36.94	31.52	24.78
C4	C41	83.53	99.94	83.53	83.53	99.94
	C43	68.13	75.12	48.61	70.64	81.82
	C44	30.3	24.56	50.58	31.35	19.86
C5	C51	0.66	0.36	1.33	0.63	0.33
	C52	45.73	47.56	43.27	87.7	89.1
	C53	64.34	62.38	82.38	38.71	35.54
C6	C61	99.44	99.927	99.44	99.44	99.927
	C62	3 395	3 157	4 473	3 321	3 944
	C63	1.42	1.08	1.57	1.26	0.94

对于极大型、适中型和极小型指标,分别处理,得到归一化的评价指标得分。再根据熵权-层次分析法计算得到各评价角度下每一具体指标的综合权重,将数据进行融合得到各评价指标的结果。

2) 对每种运行状态进行计算,以节假日场景

为例,熵权法计算结果:

$\omega_{\text{EWM}} = \{0.417, 0.583; 0.174, 0.3, 0.526; 0.426, 0.3, 0.273; 0.539, 0.223, 0.237; 0.328, 0.447, 0.244; 0.541, 0.232, 0.227; 0.627, 0.373\}$

节假日场景下的层次分析法计算结果:

$\omega_{\text{AHP}} = \{0.667, 0.333; 0.4, 0.3, 0.3; 0.267, 0.4, 0.333; 0.231, 0.385, 0.485; 0.368, 0.368, 0.263; 0.438, 0.313, 0.25; 0.5, 0.5\}$

节假日场景下综合权重为

$\omega_{\text{AE}} = \{0.604, 0.396; 0.344, 0.301, 0.356; 0.307, 0.375, 0.318; 0.308, 0.344, 0.358; 0.353, 0.388, 0.258; 0.464, 0.292, 0.244; 0.532, 0.468\}$

节假日下的评价指标融合结果如表 5 所示。

表 5 节假日下数据融合结果

Tab. 5 Data fusion results in holiday scenarios								
节假日	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
C1	0.44	0.45	0.42	0.40	0.63	0.60	0.58	0.62
C2	0.32	0.91	0.00	0.58	0.42	1.00	0.11	0.68
C3	0.51	1.00	0.00	0.66	0.47	0.98	0.00	0.66
C4	0.43	0.88	0.00	0.56	0.45	1.00	0.05	0.72
C5	0.36	0.49	0.00	0.18	0.86	1.00	0.61	0.74
C6	0.30	0.95	0.00	0.71	0.38	0.83	0.10	0.82
C7	0.12	1.00	0.00	0.88	0.12	1.00	0.00	0.88

3)评价指标权重计算

根据决策实验室方法计算各一级指标权重,由专家评估各评价指标间相互关系结果如表 6 所示。

表 6 一级指标专家评价

Tab. 6 Expert evaluation of first-level indicators							
	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
C1	0	0.4	0.25	0.7	0.8	0.3	0.1
C2	0.1	0	0.8	0.3	0.4	0.25	0.4
C3	0.1	0.8	0	0.8	0.8	0.2	0.2
C4	0.1	0.25	0.8	0	0.6	0.4	0.3
C5	0.1	0.1	0.1	0.1	0	0.1	0.1
C6	0.4	0.6	0.1	0.4	0.2	0	0.8
C7	0.4	0.6	0.1	0.3	0.6	0.8	0

将直接关系矩阵转换为综合关系矩阵,再根据综合关系矩阵计算各一级指标权重值:

$\omega_d = \{0.114, 0.152, 0.153, 0.149, 0.143, 0.144, 0.145\}$

4)计算各评价指标下不同评价场景之间的差异矩阵,电源指标差异矩阵 Y_1 为

$$Y_1 = \begin{bmatrix} 0 & -0.050 & 0.003 & -0.046 & -0.097 & -0.203 & -0.073 & -0.181 \\ 0.050 & 0 & 0.053 & 0.016 & -0.075 & -0.153 & -0.050 & -0.130 \\ -0.003 & -0.053 & 0 & -0.047 & -0.100 & -0.206 & -0.075 & -0.183 \\ 0.046 & -0.016 & 0.047 & 0 & -0.091 & -0.169 & -0.066 & -0.146 \\ 0.097 & 0.075 & 0.100 & 0.091 & 0 & -0.111 & 0.025 & -0.090 \\ 0.203 & 0.153 & 0.206 & 0.169 & 0.111 & 0 & 0.130 & 0.03 \\ 0.073 & 0.050 & 0.075 & 0.066 & -0.025 & -0.130 & 0 & -0.108 \\ 0.181 & 0.130 & 0.130 & 0.146 & 0.090 & -0.03 & 0.108 & 0 \end{bmatrix}$$

5)计算各方案优势度

得到各级方案的感知优势度 ψ :

$$\psi = \begin{bmatrix} 0 & -58.624 & 3.354 & -50.550 & -27.935 & -77.296 & -4.606 & -69.034 \\ -0.964 & 0 & 6.866 & 4.374 & -5.176 & -53.088 & -2.966 & -5.985 \\ -21.064 & -59.599 & 0 & -52.858 & -52.513 & -81.875 & -34.056 & -70.243 \\ -1.144 & -33.242 & -1.086 & 0 & -7.123 & -65.286 & -4.728 & -49.133 \\ -13.861 & -36.621 & 2.587 & -37.188 & 0 & -60.658 & 3.593 & -52.460 \\ 5.997 & -2.375 & 6.313 & 3.912 & -0.469 & 0 & 7.122 & 4.554 \\ -22.657 & -32.621 & -2.191 & -33.034 & -26.902 & -73.377 & 0 & -54.900 \\ 4.495 & -29.413 & 5.452 & -2.116 & -0.820 & -36.956 & -0.393 & 0 \end{bmatrix}$$

6)计算综合优势度

$O = [-287.5 \quad -63.9 \quad -360.8 \quad -162.1 \quad -195.3 \quad 24.5 \quad -249.1 \quad -59.1]$

7)评价结果

计算得到各场景最后评价分数,如表 7 所示。

表 7 各用能场景评价得分

场景	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8
得分	73.7	87.1	68.5	80.9	79.0	92	76.0	86.9

8)高速公路场景对比分析

以 S1 和 S8 为例,研究几种常态和非常态场景下高速公路微电网各项指标得分如图 2、图 3 所示,分析非常态对微电网影响。

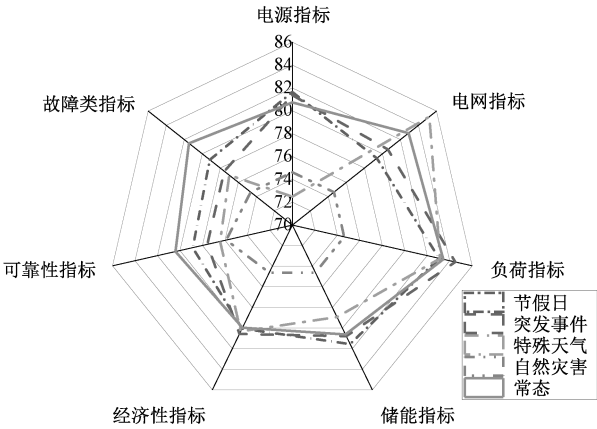


图 2 S1 指标评价得分雷达图

Fig. 2 Radar chart of the evaluation score for S1

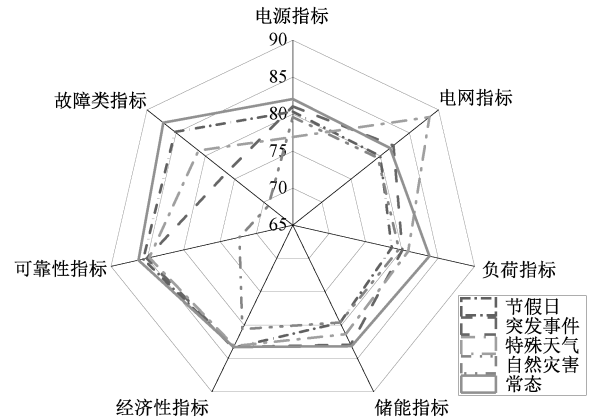


图 3 S8 指标评价得分雷达图

Fig. 3 Radar chart of the evaluation score for S8

几种微电网运行状态中,常态下微电网各项的评价得分最高,节假日场景下,微电网的负荷指标受到影响最大;突发事件中,故障类指标受到影响最大;特殊天气下,微电网电源指标受到影响最大,电网指标好于其他几种场景,这是由特殊天气下高速公路交通流量减少,电网压力较小的原因造成的。可靠性指标是几种状态之间差距最小的指标。

S1 与 S8 两个雷达图存在一定差距,自然灾害下,S8 各项指标得分高于 S1,说明 S8 对抵抗自然灾害的能力较强;特殊天气下 S1 电源指标得分明显低于 S8,这是因为。

3.2 影响因素分析

将各场景评价得分归一化后,计算各指标和主客观权重对评价指标造成的影响,得到结果如图 4;图 4(a)至图 4(c)分别选取电源(C1)、负荷(C3)、可靠性(C6)指标变化对最终评估值的影响变化,图 4(d)为评价方法中主客观权重占比对最终得分的影响结果。

分析评价结果受各指标影响程度,对运维起到参考,并验证评价体系的合理性。

1)单指标影响因素分析

各指标对最终评价结果的影响程度大小如表 8 所示。仅考虑电源指标情况下,得分在(0.25~0.625)区间内受影响程度较高。分析变化趋势:电源指标主要受资源禀赋高低的影响。指标得分上升,S2 和 S8、S1 和 S3 得分差距加大,说明对于微电网,负荷影响大于资源禀赋影响。

考虑负荷指标情况下,S4 与 S5 评价结果相近,且评价结果变化稳定,平均在 0.227,说明负荷指标是影响评价得分的关键指标,负荷指标可作为运维的关键指标。

可靠性指标是微电网安全和运行维护的重要指标,评价结果受可靠性的影响程度在中间区域较高。(0.7~0.8)区间内可靠性对微电网产生更大影响,实际运维中可靠性指标得分也集中在此区间内。

表 8 各指标平均影响程度大小

指标	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7
影响程度	0.17	0.19	0.23	0.20	0.15	0.19	0.20

分析可知在 7 类指标中,负荷指标对微电网评价得分的影响最大,储能类和故障类指标次之。储能指标跟负荷和电源指标密不可分,故障类指标在非常态下受到影响较大;经济性指标影响最小,这是因为微电网的网损整体都保持在较低范围,经济性没有明显波动。运行维护时可将与负荷指标相关内容作为重点,储能指标与其他指标关系紧密,可作为反映微电网运维水平的参考。

2)主客观权重影响因素分析

图 4(d)中改变熵权-层次分析法权重,由 0-1 依次增加层次分析法权重,降低熵权法权重。分

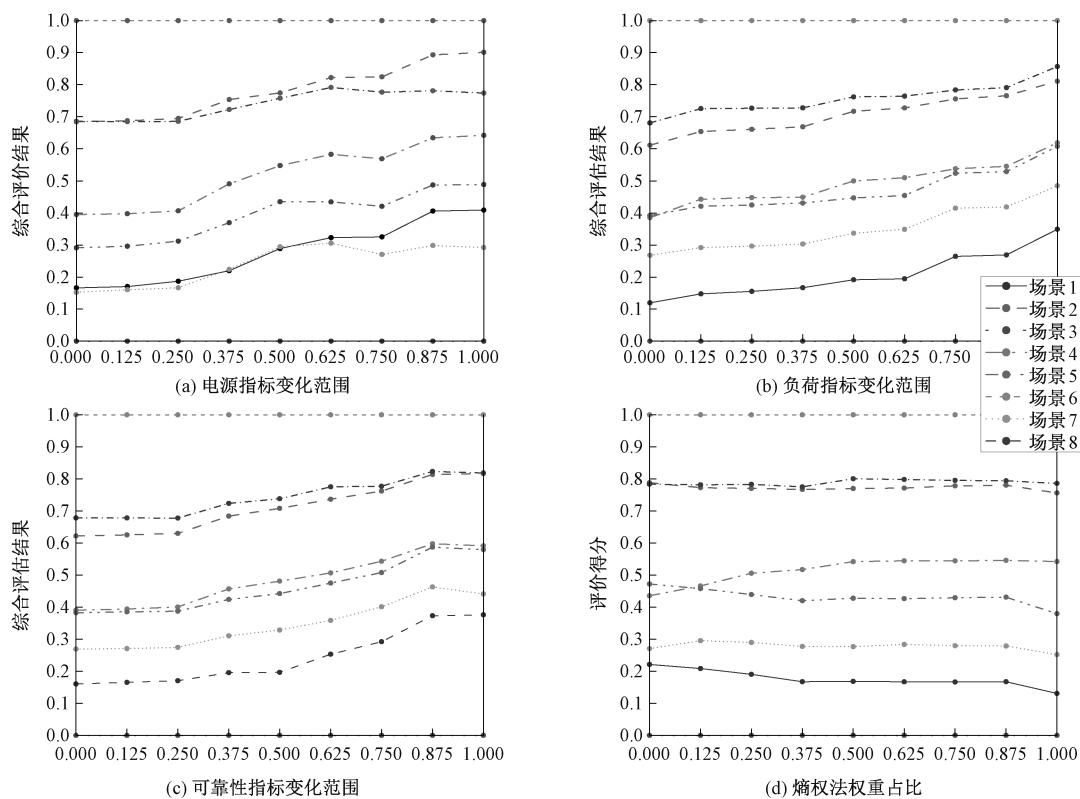


图 4 指标与权重影响因素分析

Fig. 4 Influencing factors of indicators and weights

析评价曲线变化,得分曲线存在交叉;在仅采用主观赋权法时,多负荷、多资源禀赋场景(S4)微弱优于少负荷、少资源禀赋场景(S5);强电网、多负荷、低丰度场景(S8)明显劣于弱电网、少负荷、高丰度场景(S2)。第二组场景的评价结果存在明显不合理,在评价中电网资源禀赋的差异被过度考虑。在考虑嫡权法后得到的评价结果更合理。

3.3 评价结果对比分析

将根据传统评价方法:嫡权法、层次分析法、DEMATEL方法得到的结果与文章中组合权重方法对比,结果如图 5 所示。

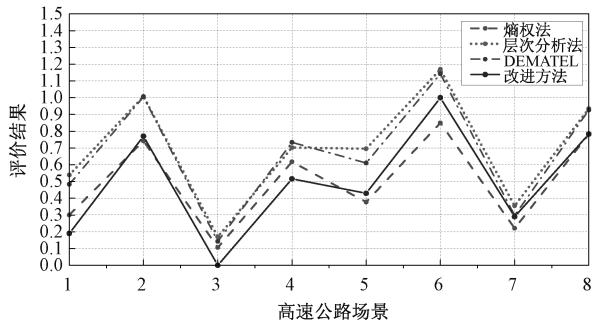


图 5 不同评价方法结果对比

Fig. 5 Comparison of results in different evaluation methods

由图 5 可知:使用不同权重计算方法得到各方案的评价结果不同,层次分析法和 DEMATEL 方法的评价得分均值高于本文方法,且采用不同方法产生的各用能场景得分高低也不同。

DEMATEL、层次分析法和嫡权法得到的结果与本文结论对比:S2 与 S8、S1 与 S7 得分大小关系不同,在 DEMATEL 评价方法下弱电网、高资源禀赋场景优于强电网、低资源禀赋场景;层次分析法下还存在 S4 和 S5 得分相近,评价结果难以区分;嫡权法下 S4 和 S5 评价结果差距过大,认为弱电网、少负荷场景优于强电网、多负荷场景。三种方法得到的结论均存在与正常观点相悖部分,本文所用方法能偶更好地完成对高速公路微电网的评价。

4 结 论

本文基于改进组合权重的方法建立了高速公路微电网运维评价指标体系。

1)建立了非常态高速公路微电网评价指标体系,考虑高速公路微电网的场景集合,包括用能场景集和非常态集合,基于具体指标计算得到评价属性得分,最终得到高速公路微电网的各项综合

评价结果。

2) 将毕达哥拉斯犹豫模糊集引入评价指标计算方法, 不同步骤使用不同的权重计算方法, 利用犹豫模糊数距离测度描述不同场景间差异, 结合 λ -模糊测度得到指标集合的重要度, 最后经过综合评价方法得到高速公路微电网评价结果。

3) 通过分析多种用能场景下的微电网各指标和评价权重的影响因素, 识别不同指标对于评价体系影响大小, 分析得到影响运维的关键指标。使用不同方法对各场景微电网进行评价, 并将各场景评价结果分析验证, 与其他方法相比采用组合权重的计算方法得到更合理的评价结果, 验证了评价方法的可行性。

参考文献:

[1] 李泓泽, 郭森, 唐辉, 等. 基于改进变权物元可拓模型的电能质量综合评价 [J]. 电网技术, 2013, 37 (3): 653-659.

LI Hongze, GUO Sen, TANG Hui, et al. Comprehensive evaluation on power quality based on improved matter-element extension model with variable weight [J]. Power System Technology, 2013, 37 (3): 653-659 (in Chinese).

[2] 沈阳武, 彭晓涛, 施通勤, 等. 基于最优组合权重的电能质量灰色综合评价方法 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (10): 67-73.

SHEN Yangwu, PENG Xiaotao, SHI Tongqin, et al. A grey comprehensive evaluation method of power quality based on optimal combination weight [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36 (10): 67-73 (in Chinese).

[3] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34 (29): 4999-5008.

ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34 (29): 4999-5008 (in Chinese).

[4] 杨琦, 马世英, 唐晓骏, 等. 微电网规划评价指标体系构建与应用 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (9): 13-17.

YANG Qi, MA Shiying, TANG Xiaojun, et al. Evaluation index system construction and application of microgrid planning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36 (9): 13-17 (in Chinese).

[5] 许龙, 王庆刚, 杨谋存, 等. 计及资源禀赋的全可

再生能源多能互补系统评价指标体系 [J]. 电网技术, 2022, 46 (10): 4012-4019.

XU Long, WANG Qinggang, YANG Moucun, et al. Evaluation index system of fully renewable energy multi-energy complementary system considering renewable resource endowment [J]. Power System Technology, 2022, 46 (10): 4012-4019 (in Chinese).

[6] 孙彦龙, 康重庆, 陈宋宋, 等. 低碳电网评价指标体系与方法 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38 (17): 157-162.

SUN Yanlong, KANG Chongqing, CHEN Songsong, et al. Low-carbon power grid index system and evaluation method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38 (17): 157-162 (in Chinese).

[7] 吴鸣, 赵婷婷, 赵凤展, 等. 微电网运行效果评价指标体系及评价方法 [J]. 电网技术, 2018, 42 (3): 690-697.

WU Ming, ZHAO Tingting, ZHAO Fengzhan, et al. Evaluation index system of microgrid operation effect and corresponding evaluation method [J]. Power System Technology, 2018, 42 (3): 690-697 (in Chinese).

[8] 李鹏, 文森, 董存, 等. 基于模糊 DEMATEL-超效率 DEA 的可再生能源发电技术综合效益评估方法 [J]. 电网技术, 2024, 48 (6): 2346-2355.

LI Peng, WEN Miao, DONG Cun, et al. Comprehensive benefits evaluation of renewable energy development based on fuzzy DEMATEL-super-efficiency DEA [J]. Power System Technology, 2024, 48 (6): 2346-2355 (in Chinese).

[9] 史常凯, 张波, 盛万兴, 等. 配电网运维管控平台功能架构探讨 [J]. 电网技术, 2016, 40 (7): 2206-2211.

SHI Changkai, ZHANG Bo, SHENG Wanxing, et al. Discussion on functional architecture for distribution network operation and maintenance management platform [J]. Power System Technology, 2016, 40 (7): 2206-2211 (in Chinese).

[10] 张世翔, 吕帅康. 面向园区微电网的综合能源系统评价方法 [J]. 电网技术, 2018, 42 (8): 2431-2419.

ZHANG Shixiang, LV Shuaikang. Evaluation method of park-level integrated energy system for microgrid [J]. Power System Technology, 2018, 42 (8): 2431-2419 (in Chinese).

[11] 赵敬华, 荣海迎, 吕锡婷, 等. 基于 DEMATEL 和信任网络的毕达哥拉斯模糊多属性应急决策方法 [J]. 计算机应用研究, 2023, 40 (1): 165-171.

ZHAO Jinghua, RONG Haiying, LV Xiting, et al. Py-

thagorean fuzzy multi-attribute emergency decision-making method based on DEMEL and trust network [J]. Application Research of Computers, 2023, 40 (1): 165-171 (in Chinese).

[12] 林萍萍,李登峰,江彬倩,等. 属性关联的双极容量多属性决策 VIKOR 方法 [J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41 (8): 2147-2156.

LIN Pingping, LI Dengfeng, JIANG Binqian, et al. Bipolar capacities multi-attribute decision making VIKOR method with interaction attributes [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2021, 41 (8): 2147-2156 (in Chinese).

[13] 刘卫锋,常娟,何霞. 广义毕达哥拉斯模糊集成算子及其决策应用 [J]. 控制与决策, 2016, 31 (12): 2280-2286.

LIU Weifeng, CHANG Juan, HE Xia, et al. Generalized Pythagorean fuzzy aggregation operators and applications in decision making [J]. Control and Decision, 2016, 31 (12): 2280-2286 (in Chinese).

[14] 张小路. 基于犹豫模糊信息的多属性决策方法研究 [D]. 南京:东南大学, 2015.

ZHANG Xiaolu. Research on multiple attribute decision making methods with hesitant fuzzy information [D]. Nanjing: Southeast University, 2015 (in Chinese).

[15] 廖虎昌, 蔡迅杰, 徐泽水. 基于犹豫模糊语言集的决策理论与方法综述 [J]. 系统工程理论与实践, 2017, 37 (1): 35-48.

LLAO Huchang, GOU Xunjie, XU Zeshui. A survey of decision making theory and methodologies of hesitant fuzzy linguistic term set [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2017, 37 (1): 35-48 (in Chinese).

[16] 王颖,和敬涵,许寅,等. 考虑疏散需求的城市电力-交通系统协同应急恢复方法 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47 (3): 68-76.

WANG Ying, HE Jinghan, XU Yin, et al. Coordinated emergency restoration method for urban power and transportation systems considering evacuation demand [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47 (3): 68-76 (in Chinese).

[17] 颜文婷,杨隆,李长城,等. 考虑地震攻击交通网影响的配电网韧性评估及提升策略 [J]. 上海交通大学学报, 2023, 57 (9): 1165-1175.

YAN Wenting, YANG Long, LI Changcheng, et al. Resilience evaluation and enhancement strategy of distribution network considering impact of seismic attack on transportation networks [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2023, 57 (9): 1165-1175 (in Chinese).

[18] 陈潇瑞,李晓露,林顺富. 考虑交通网延误的配电网灾后滚动抢修策略优化 [J]. 现代电力, 2023, 40 (5): 807-816.

CHEN Xiaorui, LI Xiaolu, LIN Shunfu, et al. Optimization of post-disaster rolling emergency repair strategy for distribution network considering transportation network delay [J]. Modern Electric Power, 2023, 40 (5): 807-816 (in Chinese).

[19] 林才华,张逸,邵振国,等. 基于模糊 DEA 的长时间尺度电能质量综合评估 [J]. 高电压技术, 2021, 47 (5): 1751-1761.

LIN Caihua, ZHANG Yi, SHAO Zhenguo, et al. Comprehensive evaluation of power quality on long-term scale based on fuzzy DEA [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47 (5): 1751-1761 (in Chinese).

[20] 安孟林,肖仕武,刘博昊. 考虑时变因素的高速公路新能源微网可靠性评估 [J]. 华北电力大学学报 (自然科学版), 2024, 51 (1): 39-48.

AN Menglin, XIAO Shiwu, LIU Bohao. Reliability evaluation of expressway energy self-reliance system considering time-varying factors [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2024, 51 (1): 39-48 (in Chinese).

作者简介:

霍千辰(2000),男,硕士研究生,研究方向为新能源微电网综合评价,E-mail: hqc8051@163.com;

肖仕武(1974),男,副教授,通信作者,研究方向为新能源电力系统故障分析与继电保护、电力系统分析与控制,E-mail: xsw@ncepu.edu.cn;

黄一修(1999),男,硕士研究生,研究方向为能源互联网,E-mail: naigaidudu@163.com。