

基于前景理论和 VIKOR 法的多能源微电网效益评价

梅文明^{1,2}, 李美成¹, 张宇威³, 杨军³

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206; 2. 国家电网有限公司, 北京 100031; 3. 武汉大学, 湖北 武汉 430072)

摘要:近年来,随着能源短缺以及生态环境问题不断加剧,考虑分布式新能源的多能源微电网作为一种新型供电模式,受到更多的关注。因此,科学、全面地评价考虑分布式新能源的多能源微电网的综合效益,可以为微电网的建设提供指导,具有较高的现实意义。提出了一种基于前景理论和VIKOR法的微电网效益评价方法。首先,根据微电网的发展特点和实际属性,构建了考虑经济性、能源利用效率和环境因素的微电网效益综合评价指标体系;考虑决策者的主观风险倾向,根据前景理论建立前景价值函数,采用改进AHP法和熵权法进行主客观综合赋权;然后采用VIKOR法对各种微电网方案进行分析与评价;最后,通过仿真验证了该方法具有较高的合理性和有效性,并且光伏微电网系统的年运行费用低,节能环保、综合效益相对较高。

关键词:分布式能源;微电网;综合效益;前景理论;VIKOR法

中图分类号:TM73 文献标志码:A DOI: 10.19421/j.cnki.1006-6357.2020.03.012

0 引言

近年来,随着经济的发展以及能源消耗不断增加,从而引发一系列的能源短缺和生态环境问题。分布式新能源具有较高的利用效率和环保性能,符合环保节能的要求。而多能源微电网作为一种新型供电模式,可以将不同分布式能源有机地组合在一起,从而具有较高的环保效益和能源利用率,但也承担着较高的一次性投资费用和维护费。因此,有必要建立考虑分布式新能源接入的多能源微电网效益评价模型,综合评价微电网的运行效益,从而为微电网的建设和发展提供指导。

目前已有不少文献开展了关于微电网综合效益评价方面的研究。文献[1]针对分布式能源系统的特点,结合专家评价系统和目的偏差权重,提出了一种基于熵权法的分布式能源系统综合评价方法,但计算综合评价值时只是将各指标按权重线性求和,未考虑综合评价值和各指标之间的非线性关系。文献[2]建立了复杂的安全、电能质量和经济评价指标,采用基于AHP赋权的模糊评价方法对配电网评价体系进行了综合评价,但传统的AHP法受专家打分影响较大,且AHP的判别矩阵可能无法通过一致性检验。文献[3]基于云模型理论,采用权重集云模型确定指标综合权重,在此基础上,考虑评

价模糊性和随机性,构建云模型综合评价模型,对分布式能源系统可靠性、经济性、环保性进行综合评价。文献[4]采用熵权法,结合专家评价方法,确定不同倾向的评价方案,综合评价分布式能源系统的效益,然而熵权法仅根据评价指标的数值来确定权重系数,不够全面。文献[5]综合考虑微电网的运行经济性、环保性和负荷特性等因素,构建微电网成本—效益评价体系,采用根据三标度法的层次分析法对方案进行评估,但只采用了各评价指标线性求和计算方案综合评价值。文献[6-7]考虑指标之间的相互影响关系,采用网络分析法确定指标的综合权重,但该方法同样受专家主观影响较大。文献[8]分别对能源、经济和环境多角度进行评价,提出一种基于熵权法的灰色关联评价方法,但权重的确定不够全面。文献[9-10]采用模糊层次分析法,以电价、降损、投资节约与节能减排为主要指标,但该评价方法具有较大的主观性。文献[11-13]采用TOPSIS法对各个方案进行综合排序,但TOPSIS法可能出现逆排序的现象。

综上所述:①上述评价模型建立在决策者是完全理性的基础上,但是实际决策中,决策者往往是依据其风险偏好进行决策的,有必要考虑决策者的有限理性对于决策的影响,使评估结果更具有合理性。②上述文献的多准则决策方法中,线性求和法未考虑综合评价值和指

[引文信息] 梅文明, 李美成, 张宇威, 等. 基于前景理论和VIKOR法的多能源微电网效益评价[J]. 供用电, 2020, 37(3): 71-77.

MEI Wenming, LI Meicheng, ZHANG Yuwei, et al. Benefit evaluation of multi energy microgrid based on prospect theory and VIKOR method[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(3): 71-77.

标间的非线性关系，TOPSIS法容易发生逆排序，都难以准确评价各方案的整体优劣程度。

综合上述背景，本文提出了一种基于前景理论的VIKOR评价方法，综合评价考虑分布式新能源的多能源微电网效益。首先，分别选择经济性指标、能源利用效率指标和环境指标作为微电网效益综合评价指标，构建微电网效益综合评价指标体系；其次，考虑决策者的主观风险倾向，将前景理论引入微电网效益评价中，建立前景价值函数，同时针对评价指标进行主客观综合赋权；然后，采用VIKOR法对各种微电网方案进行综合评价，得到合理有效的妥协解；最后，通过仿真验证了该方法具有较高的合理性和有效性。

1 微电网效益评价指标

为准确评价微电网的综合效益，需要建立全面而准确的综合评价指标体系，同时引入合适的评价标准和评价方法。智能微电网相对于传统电网，总投资成本相对较高，但能源输出效率高，同时具有较高的环境效益优势。建立如图1的综合评价指标体系，其中3个一级指标分别为经济性指标、能源利用效率指标和环境效益指标。其中经济性指标包括2个二级指标：总投资费用和年运行费用；能源利用效率指标包括2个二级指标：一次能源效率和节能率；环境效益指标包括3个二级指标：CO₂排放量、NO_x排放量和环境成本。所有二级指标中，一次能源效率和节能率是效益型指标，其他都是成本型指标。

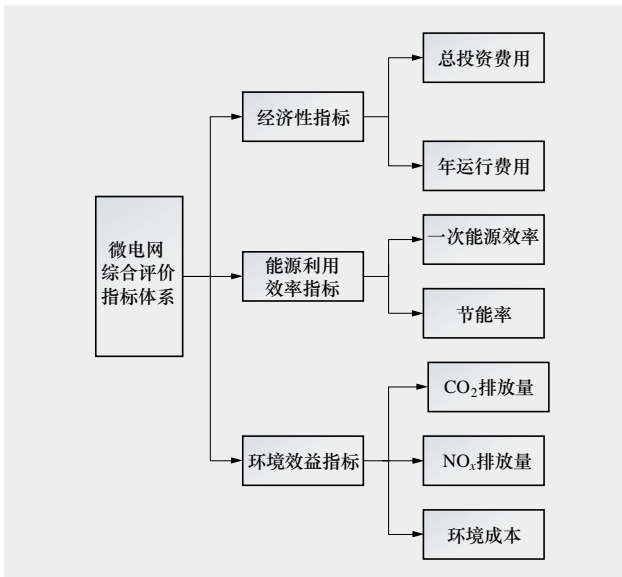


图1 微电网综合评价指标体系

Fig.1 Microgrid comprehensive evaluation index

1.1 经济性指标

1) 总投资费用。总投资费用 C_{ii} 为微电网所有设备

的采购费用、配套成本和人工费用的总和，其计算公式为：

$$C_{ii} = \sum (C_{pur} + C_{sup} + C_{ins}) \quad (1)$$

式中： C_{pur} 、 C_{sup} 、 C_{ins} 分别为各设备的采购费用、配套成本、对应的人工费用。

2) 年运行费用。系统年运行费用 C_{aoc} 包括设备全年的运行维护费用和燃料费用，其计算公式为：

$$C_{aoc} = C_{op} + C_{fuel} \quad (2)$$

式中： C_{op} 为设备运行费用； C_{fuel} 为燃料购置费用。

1.2 能源利用效率指标

1) 一次能源效率。一次能源效率 P_{ec} 表示微电网的总能量输出与所用的一次能源量的比值，是系统能源利用能力的表现，其计算公式为：

$$P_{ec} = (P + F_{h-out} + F_{c-out}) / F_{in} \quad (3)$$

式中： P 为系统输出功率； F_{h-out} 为系统单位时间输出热量； F_{c-out} 为系统单位时间输出冷却能量； F_{in} 为一次能源输入量。

2) 节能率。节能率 ζ 表示在满足综合能源负荷需求时，微电网系统相对于传统能源系统的一次能源消耗量之比，其计算公式为：

$$\zeta = (Q_t - Q_1) / Q_t \quad (4)$$

式中： Q_t 为传统能源系统的一次能源消耗量； Q_1 为微电网的一次能源消耗量。

1.3 环境效益指标

1) CO₂排放量。微电网系统的CO₂排放量 D_c 主要包括微电网设备的排放量及购电的排放量，其计算公式为：

$$D_c = E_g \cdot c_g + E_c \cdot c_c \quad (5)$$

式中： E_g 为设备发电量； c_g 为设备单位发电量对应的CO₂排放量； E_c 为从电网购电量； c_c 为电网单位发电量对应的CO₂排放量。

2) NO_x排放量。NO_x排放量 D_N 的计算公式与CO₂排放量的计算公式类似，为：

$$D_N = E_g \cdot n_g + E_c \cdot n_c \quad (6)$$

式中： n_g 为设备单位发电量对应的NO_x排放量； n_c 为电网单位发电量对应的NO_x排放量。

3) 环境成本。环境成本 C_{env} 包括污染物排放导致的环境污染成本和排放罚款，其计算公式为：

$$C_{env} = \sum_{i=1}^n Q_i (V_{ei} + V_i) \quad (7)$$

式中： n 为污染物的种类； Q_i 为排放量； V_{ei} 为环境污染成本； V_i 为排放罚款。

2 基于前景理论的评价模型

前景理论考虑决策者心理对决策结果的影响机制^[14-15],即认为决策者只具有有限理性。决策者具有自己的主观偏好,对于收益和风险的敏感程度不同。前景理论主要包括价值函数和权重函数。其中价值函数是决策者对于方案属性的心理感知价值,对照给定的参考点确定方案是属于收益还是损失。对于权重函数,为避免单一的主观或客观赋权导致评价结果不合理,采用改进AHP法确定主观权重,根据熵权法确定客观权重,最后将二者结合起来进行主客观赋权。

2.1 价值函数的确定

首先进行数据预处理。考虑到微电网效益评价指标中包括成本型指标和效益型指标,且各指标量纲不同,需要对评价模型的各个指标数值进行归一化和正向化。计算公式为:

$$x_{ij} = \begin{cases} (a_{ij} - a_{j\min}) / \Delta a_j, & \text{效益型指标} \\ (a_{j\max} - a_{ij}) / \Delta a_j, & \text{成本型指标} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $A=(a_{ij})_{m \times n}$ 为原始的评价矩阵;变换后的矩阵记为 $X=(x_{ij})_{m \times n}$; $a_{j\max}$ 、 $a_{j\min}$ 为矩阵A中第j列的最大值、最小值; $\Delta a_j = a_{j\max} - a_{j\min}$ 。

根据前景理论可以计算微电网方案的前景值。综合前景值 $V(f)$ 由价值函数和权重综合确定,具体计算公式为:

$$V(f) = V(f^+) + V(f^-) \quad (9)$$

$$V(f^+) = \sum_{i=1}^h \pi_i v(x_i) \quad (10)$$

$$V(f^-) = \sum_{i=h+1}^n \pi_i v(x_i) \quad (11)$$

式中: $V(f)$ 为综合前景值; (f^+) 为收益前景值; $V(f^-)$ 为损失前景值; h 为决策方案中相对于参考点为收益的指标值个数; n 为评价指标个数; π_i 为权重; $v(x_i)$ 为价值函数,如图2所示,其计算公式见式(12)。

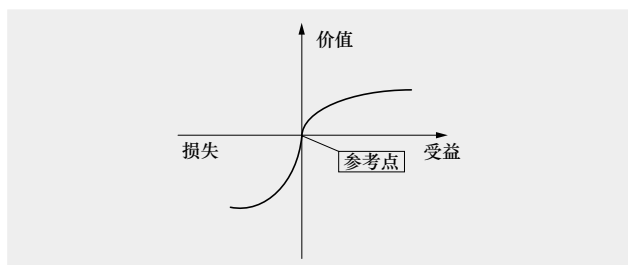


图2 价值函数曲线

Fig.2 Value function diagram

$$v(x) = \begin{cases} \Delta x^\alpha, & \Delta x \geq 0 \\ -\lambda(-\Delta x)^\beta, & \Delta x < 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: α 、 β 分别为风险偏好系数、风险厌恶系数, $0 < \alpha$

< 1 , $0 < \beta < 1$; λ 为损失规避系数,反映决策者对损失的厌恶程度; Δx 为决策方案 x_{ij} 相对于参考点 x^* 的差值, $\Delta x = x_{ij} - x^*$ 。

由图2可知,决策者的决策行为是有限理性的,其面对收益是风险规避的、面对损失是风险偏好的,且对于损失更加敏感。

2.2 权重的确定

传统的层次分析法(AHP)采用九标度法进行权重计算^[16],往往会因为无法通过一致性检验而使权重计算比较困难。本文采用改进AHP法^[10],依据专家意见和用户要求,对各个指标重要度进行比较并按照重要度排序,对相邻序列的指标进行两两重要度比较。依据改进AHP法建立对比矩阵R,矩阵元素满足以下条件:① $r_{ij} = 1/r_{ji}$; ② $r_{ij} > 0$; ③ $r_{ii} = 1$; ④ $r_{ij} = r_{ik} \cdot r_{kj}$ 。其中: r_{ij} 为第i个评价指标和第j个评价指标的对比标度,如表1所示。

表1 对比标度

Table1 Scale values

标度值	含义	标度值	含义
1.0	同等重要	1.6	明显重要
1.2	稍微重要	1.8	绝对重要
1.4	强烈重要		

假设指标的重要性排序为 $x_1 \geq x_2 \geq \dots \geq x_n$, 其中 x_i 对比 x_{i+1} 的标度为 t_i , 得到对比矩阵R为:

$$R = \begin{bmatrix} 1 & t_1 & t_1 t_2 & \dots & \prod_{i=1}^{n-1} t_i \\ \frac{1}{t_1} & 1 & t_2 & \dots & \prod_{i=2}^{n-1} t_i \\ \frac{1}{t_1 t_2} & \frac{1}{t_2} & 1 & \dots & \prod_{i=3}^{n-1} t_i \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{1}{\prod_{i=1}^{n-1} t_i} & \frac{1}{\prod_{i=2}^{n-1} t_i} & \frac{1}{\prod_{i=3}^{n-1} t_i} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

可知该矩阵具有一致性,可直接计算指标权重:

$$w_i = \frac{\sqrt[n]{\prod_{j=1}^n r_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n r_{ij}}} \quad (14)$$

式中: w_i 为改进AHP法求得的第i个评价指标的权重。

熵权法通过评价指标提供的信息量大小来确定权重系数^[4],该方法的计算流程如下。

1) 计算第j项指标的熵值:

$$I_j = -k \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}) \quad (15)$$

式中: k 为常数, 通常取 $k=1/\ln n$; p_{ij} 为第 i 个被评价对象的第 j 项指标的特征比重, $p_{ij} = x_{ij} / \sum_{i=1}^n x_{ij}$ 。

2) 计算第 j 项指标的差异系数:

$$r_j = 1 - I_j \quad (16)$$

3) 计算第 j 项指标的权重系数:

$$w_j = r_j / \sum_{k=1}^m r_k \quad (17)$$

由上述方法分别得到主观权重和客观权重。以综合权重与原始权重之间的差异最小为目标, 基于最小鉴别信息原理, 建立优化模型:

$$\begin{cases} \min j(w) = \sum_{i=1}^n \left(w_i \ln \frac{w_i}{w_{1i}} + w_i \ln \frac{w_i}{w_{2i}} \right) \\ s.t. \sum_{i=1}^n w_i = 1, w_i \geq 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中: w_i 为指标 i 的综合权重; w_{1i} 为指标 i 的主观权重; w_{2i} 为指标 i 的客观权重。

4) 构建拉格朗日函数求解, 可以得到各指标的综合权重:

$$w_i = \frac{\sqrt{w_{1i} w_{2i}}}{\sum_{j=1}^n \sqrt{w_{1j} w_{2j}}} \quad (19)$$

综合权重矩阵为: $w = [w_1, w_2, \dots, w_n]^T$ 。

3 基于前景理论的VIKOR评价方法

VIKOR为一种基于理想点解的多指标评价方法^[17-18], 其根据最大化群体效用和最小化个体遗憾的方法对方案进行综合排序, 基本方法是将待评价方案与理想方案比较, 根据二者之间的差异大小进行优先排序, 从而得到合理有效的妥协解, 能够有效避免逆序的产生, 得出的结果更具有合理性, 易被决策者接受。

VIKOR法的基本原理是基于LP-metric聚合函数^[19], 可表示为:

$$L_p = \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\frac{w_i (f_i^+ - f_{ij})}{f_i^+ - f_i^-} \right]^p \right\}^{1/p} \quad (20)$$

式中: L_p 为评价方案到理想解的距离; f_i^+ 为正理想解; f_i^- 为负理想解; f_{ij} 为方案 j 第 i 个指标值; p 为评价指标的个数, $1 < p < \infty$ 。

基于前景理论的VIKOR方法采用前景值代替指标初始评价价值, 进行方案的综合评价, 其步骤如下。

步骤1: 求取各决策方案指标值的前景值 f_{ij} , 并求得各指标前景值的正、负理想值 f_i^+ 、 f_i^- 。

步骤2: 计算最大化群体效用 S_j 、最小化个体遗憾度

R_j , 即:

$$S_j = \sum_{i=1}^n \left(w_i \frac{f_i^+ - f_{ij}}{f_i^+ - f_i^-} \right) \quad (21)$$

$$R_j = \max_i \left(w_i \frac{f_i^+ - f_{ij}}{f_i^+ - f_i^-} \right) \quad (22)$$

步骤3: 确定各评价对象的综合值:

$$Q_j = \theta \frac{S_j - S^*}{S^- - S^*} + (1 - \theta) \frac{R_j - R^*}{R^- - R^*} \quad (23)$$

式中: $S^* = \max S_j$; $S^- = \min S_j$; $R^* = \max R_j$; $R^- = \min R_j$; Q_j 为第 j 个评价方案的VIKOR综合评价价值; θ 为决策机制系数, 若 $\theta > 0.5$, 则按照最大化群体效用制定决策; 若 $\theta < 0.5$, 则依据最小化个体遗憾进行决策; 若 $\theta = 0.5$, 则按照均衡原则综合制定决策, 本文取 $\theta = 0.5$ 。其中, S 、 R 、 Q 值越小, 决策方案的评价结果越好。

步骤4: 根据 Q_j 值从小到大对各个评价方案进行排序。设方案 A_i 为综合值排名第 i 的微电网方案, 若综合值最小的方案 A_1 满足2个条件: ① $Q_{A_2} - Q_{A_1} \geq 1/(1+m)$; ② A_1 按照 S_j 或 R_j 排序时同样排名第1, 则 A_1 为最优方案; 否则, 分为2种情况: 若不满足条件①, 则可以得到妥协解, 选择 A_1, A_2, \dots, A_i 中的任意一个, 其中 A_i 为最后一个满足 $Q_{A_i} - Q_{A_{i-1}} < 1/(m-1)$ 的微电网方案; 若不满足条件②, 则选择方案 A_1 或 A_2 。

4 算例分析

4.1 评价结果分析

本文采用类似文献[4]的上海某综合智能楼宇5种不同设计方案的多能源微电网系统作为仿真算例, 其能源组成如表2所示。该楼宇总建筑面积约为9 600 m², 屋顶面积为1 600 m², 其中光伏、内燃机、燃料电池以及燃气轮机的发电容量均为150 kW, 其他设备参数同文献[4]。各评价指标具体数值如表3所示。

表2 微电网系统结构

Table2 Microgrid system structure

方案编号	系统类型	能源组成
S ₁	传统系统	电网 + 电空调 + 燃气锅炉
S ₂	光伏系统	电网 + 光伏电池板 + 电空调 + 燃气锅炉
S ₃	燃料电池系统	电网 + 燃料电池 + 电空调
S ₄	燃气轮机系统	电网 + 燃气轮机 + 吸收式制冷 + 燃气锅炉
S ₅	内燃机系统	电网 + 内燃机 + 吸收式制冷 + 燃气锅炉

表3 微电网指标数据
Table3 Microgrid indicator data

评价指标	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5
总投资费用 / 万元	277	597	829	329	310
年运行费用 / 万元	189	137	159	159	153
一次能源效率 / %	66.6	134.2	116.3	75.1	77.9
节能率 / %	17.6	59.0	52.7	26.8	29.4
CO ₂ 排放量 / t	153.84	73.60	51.10	96.30	88.30
NO _x 排放量 / t	4.21	1.97	1.52	1.54	1.33
环境成本 / 万元	3.821	1.792	1.368	1.505	1.313

1) 确定前景理论的价值函数。选取指标均值作为参考点 $x_j^* = \sum_{i=1}^n x_{ij} / n$ ，采用平均利润型参考点进行微电网最优方案评价。通过式(12)可以得到价值函数 $v(x_i)$ ，式中的参数取值可参考文献[20]，即 $\alpha=0.88$ ， $\beta=0.88$ ， $\lambda=1.5$ 。分别得到平均利润型参考点下的价值矩阵：

$$V_1 = \begin{bmatrix} 0.394 & -0.914 & -0.678 & -0.773 & -0.951 & -1.134 & -1.154 \\ -0.416 & 0.477 & 0.633 & 0.571 & 0.227 & 0.072 & 0.093 \\ -1.031 & 0.014 & 0.377 & 0.424 & 0.451 & 0.249 & 0.281 \\ 0.298 & 0.014 & -0.489 & -0.441 & -0.080 & 0.242 & 0.223 \\ 0.333 & 0.158 & -0.425 & -0.341 & 0.062 & 0.318 & 0.303 \end{bmatrix}$$

2) 确定各个指标的综合权重。采用改进AHP法确定主观权重。参考文献[4]的指标重要度对比，结合专家意见确定各指标之间的重要度排序：总投资费用 > 年运行费用 > 一次能源效率 > 节能率 > 环境成本 > CO₂排放量 = NO_x排放量。指标的对比度为： $r_{12}=r_{23}=r_{34}=r_{45}=r_{56}=1.2$ ， $r_{67}=1$ ，从而得到矩阵R，并确定主观权重。根据表3的数据，通过熵权法确定所有指标的客观权重。微电网评价指标的主观权重和客观权重如表4所示。

表4 指标权重
Table4 Indicator weight

评价指标	主观权重	客观权重	评价指标	主观权重	客观权重
总投资费用	0.227 7	0.126 0	CO ₂ 排放量	0.091 5	0.116 0
年运行费用	0.189 7	0.117 5	NO _x 排放量	0.091 5	0.106 4
一次能源效率	0.158 1	0.241 0	环境成本	0.109 8	0.106 0
节能率	0.131 7	0.187 1			

由式(19)可以得到综合赋权的权重 $w = [0.172 7, 0.152 3, 0.199 1, 0.160 1, 0.105 1, 0.100 6, 0.110]$ 。

3) 采用基于前景理论的VIKOR法，可以分别得到各微电网方案的S、R、Q值，如表5所示。可以看出，各方案按Q值的综合排序为：方案2 > 方案5 > 方案3 > 方案4 > 方案1。方案2与方案5的差距较大，通过 $Q_{A_2} - Q_{A_5} < 1 / (1 + m)$ 的检验，且方案2的S值和R值也是最优，同时满足条件①、②，故方案2的光伏微电网方案为最优方案。

表5 基于前景理论的VIKOR法评价结果
Table5 Evaluation results of VIKOR method based on prospect theory

计算值	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5
S	0.827 2	0.147 9	0.286 4	0.404 4	0.340 7
R	0.199 1	0.098 2	0.172 7	0.170 4	0.160 6
Q	1.000 0	0.000 0	0.471 1	0.546 7	0.451 3

对所有方案的评价结果进行分析，其中方案2的光伏系统排名第一，虽然其总投资建设费用略高于传统系统，但由于光伏的接入，降低了其年运行费用，且极大地提高了一次能源利用效率，减少污染气体的排放。方案5的内燃机系统总评分第二，相对于其他微电网系统，其投资造价较低，环境效益好，但一次能源利用效率较低。方案3虽然具有较高的能源利用效率和环境效益，但其总投资费用远高于其他方案。方案4的能源利用效率和经济性与方案5基本相同，但环境效益显著低于方案5。方案1的传统系统相对于其他微电网系统，投资费用最低，但能源利用效率较低，环境效益较低，故综合评分最低。

4.2 与其他评价方法的比较

采用同样基于改进AHP—熵权综合赋权的VIKOR方法对微电网方案进行评价，但该评价方法不采用前景价值作为指标值，得到评价结果如表6所示。

表6 基于非前景值的VIKOR法评价结果
Table6 Evaluation results of VIKOR method without prospect theory

计算值	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5
S	0.827 2	0.166 5	0.323 3	0.441 3	0.375 5
R	0.199 1	0.100 1	0.172 7	0.174 1	0.165 8
Q	1.000 0	0.000 0	0.485 3	0.581 5	0.490 0

该方法得到的评价结果相较于本文采用的基于前景理论的VIKOR方法所得的评价结果有所不同。其排序结果为：方案2 > 方案3 > 方案5 > 方案4 > 方案1。两类评价

方法中, 方案2均为最优方案, 方案1均为最劣方案, 但方案3、方案5的排序有所不同。这是因为方案5的个体遗憾度指标较低, 即方案5在各个指标间比较均衡, 而方案3在权重较高的经济性指标上得分最低。在基于初始指标值的VIKOR的评价方法中, 方案3的劣势指标容易被好的指标补偿。而在基于前景理论的VIKOR的评价方法, 由于前景理论中, 决策者面对损失比收益更加敏感, 劣势指标更难被好的指标补偿, 故其中各指标相对均衡, 无明显劣势指标的方案5更优, 这也与实际工程情况相符。可见, 前景理论综合考虑决策者的有限理性对决策结果的影响, 提高了评价结果的准确性和可靠性。

5 结语

本文针对考虑分布式新能源的多能源微电网, 提

出了一种基于前景理论和VIKOR法的微电网效益评价方法, 对不同微电网方案的效益进行综合评价。通过某综合性智能楼宇的微电网系统进行仿真分析, 结果表明:

1) 采用前景理论, 考虑决策者的有限理性对于决策的影响, 提高了评价结果的合理性和有效性。

2) 考虑分布式新能源的多能源微电网系统的综合效益优于传统微电网系统, 其优越性集中体现在能源利用效率以及环境效益上, 但总投资费用相对较高。所有的微电网方案中, 光伏接入的微电网系统年运行费用最低, 能源利用效率最高, 有害气体排放较少, 综合评价最优。

3) 采用基于前景理论的VIKOR法, 综合考虑群体效用最大化以及个体遗憾最小, 得到合理有效的妥协解, 从而使决策更具合理性和可靠性。

DU

参考文献

- [1] TANG Yanmei, HE Guixiong, LIU Kaicheng, et al. Study on method of comprehensive energy efficiency evaluation for distributed energy system [C] // 2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). 26-28 Nov, 2018, Beijing, China: IEEE.
- [2] LIU Haitao, WANG Peng, REN Zhiyong, et al. Operational evaluation method of distribution network considering distributed generators [C] // 2016 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE). 19-22 Oct, Chengdu, 2016, China: IEEE.
- [3] 钟嘉庆, 赵楠, 张晓辉, 等. 含间歇性电源的电源规划方案综合评价[J]. 电网技术, 2015, 39 (12): 3529-3535.
ZHONG Jiaqing, ZHAO Nan, ZHANG Xiaohui, et al. Comprehensive evaluation of generation planning scheme involving intermittent generation [J]. Power System Technology, 2015, 39 (12): 3529-3535.
- [4] 张涛, 朱彤, 高乃平, 等. 分布式冷热电能源系统优化设计及多指标综合评价方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35 (14): 3706-3713.
ZHANG Tao, ZHU Tong, GAO Naiping, et al. Optimization design and multi-criteria comprehensive evaluation method of combined cooling heating and power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35 (14): 3706-3713.
- [5] 周二雄, 李凤婷, 朱贺. 基于改进层次分析法(AHP)的微网成本-效益评估[J]. 电力建设, 2013, 34 (3): 1-6.
ZHOU Erxiong, LI Fengting, ZHU He. Cost-benefit evaluation of microgrid based on analytic hierarchy process (AHP) [J]. Electric Power Construction, 2013, 34 (3): 1-6.
- [6] 朱兰, 杨淑红, 唐陇军, 等. 微网规划综合评价精细化指标体系研究[J]. 现代电力, 2018, 35 (3): 54-61.
ZHU Lan, YANG Shuhong, FANG Longjun, et al. Study on fine index system for comprehensive evaluation of microgrid planning [J]. Modern Electric Power, 2018, 35 (3): 54-61.
- [7] 焦丰顺, 肖健夫, 王若愚, 等. 一种基于组合权重的智能电网综合评估模型应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2017, 29 (11): 143-150.
JIAO Fengshun, XIAO Jianfu, WANG Ruoyu, et al. Application of comprehensive evaluation model to smart grid based on combination weight [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29 (11): 143-150.
- [8] 韩中合, 祁超, 向鹏, 等. 分布式能源系统效益分析及综合评价[J]. 热力发电, 2018, 47 (2): 31-36.
HAN Zhonghe, QI Chao, XIANG Peng, et al. Benefit analysis and comprehensive evaluation for distributed energy system [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47 (2): 31-36.
- [9] 洪林, 杨俊华, 曾君, 等. 含风光柴储的孤岛微电网运行性能综合评价方法研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54 (5): 22-28.
HONG Lin, YANG Junhua, ZENG Jun, et al. Research on a comprehensive evaluation method of the operation performance of standalone micro-grid with PV-wind-diesel-battery hybrid [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54 (5): 22-28.
- [10] 彭丽霖. 主动配电网下分布式能源系统规划运行及效益评价研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- [11] 赵书强, 汤善发. 基于改进层次分析法、CRITIC法与逼近理想解排序法的输电网规划方案综合评价[J]. 电力自动化设备, 2019, 39 (3): 143-148, 162.
ZHAO Shuqiang, TANG Shanfa. Comprehensive evaluation of transmission network planning scheme based on improved analytic hierarchy process, CRITIC method and TOPSIS [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39 (3): 143-148, 162.
- [12] 徐斌, 马骏, 陈青, 等. 基于改进AHP-TOPSIS法的经济开发区配电网综合评价指标体系和投资策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47 (22): 35-44.
XU Bin, MA Jun, CHEN Qing, et al. Research on comprehensive evaluation index system and investment strategy of economic development zone distribution network based on improved AHP-TOPSIS method [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47 (22): 35-44.
- [13] 黄虎, 苑吉河, 张曦, 等. 基于综合指标TOPSIS法的电网节点脆弱性评估[J]. 电测与仪表, 2019, 56 (2): 59-63, 82.
HUANG Hu, YUAN Jihe, ZHANG Xi, et al. Node vulnerability assessment of power grid based on TOPSIS method and composite indexes [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56 (2): 59-63, 82.
- [14] 谭阳红, 张婧, 李肖. 基于复杂网络理论的电网节点重要度评估[J]. 计算机工程, 2019, 45 (11): 281-286, 297.
TAN Yanghong, ZHANG Jing, LI Xiao. Importance evaluation of power grid nodes based on complex network theory [J]. Computer Engineering, 2019, 45 (11): 281-286, 297.
- [15] 王昭聪, 潘学萍, 马倩. 基于“奖优罚劣”线性变换改进前景理论的电网建设项目多属性投资排序方法[J]. 电网技术, 2019, 43 (6): 2154-2162.
WANG Zhaocong, PAN Xueping, MA Qian. Multi-attribute investment ranking method for power grid project construction based on

improved prospect theory of "rewarding good and punishing bad" linear transformation [J]. Power System Technology, 2019, 43 (6): 2154-2162.

[16] 周依希, 李晓明, 瞿合祚, 等. 基于AHP-灰色关联度的复杂电网节点综合脆弱性评估 [J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46 (23): 86-93. ZHOU Yixi, LI Xiaoming, QU Hezuo, et al. Node integrated vulnerability assessment of complex power grid based on AHP-gray relational degree method [J]. Power System Protection and Control, 2018, 46 (23): 86-93.

[17] 高山, 王深哲, 李海峰, 等. 基于前景理论的电网规划方案综合决策方法 [J]. 电网技术, 2014, 38 (8): 2029-2036. GAO Shan, WANG Shenzhe, LI Haifeng, et al. Prospect theory based comprehensive decision-making method of power network planning schemes [J]. Power System Technology, 2014, 38 (8): 2029-2036.

[18] 黄雄峰, 翁杰, 张宇娇. 微电网建设规划方案评估与选择 [J]. 电工技术学报, 2015, 30 (21): 76-81.

HUANG Xiongfeng, WENG Jie, ZHANG Yujiao. Evaluation and selection of microgrid construction planning schemes [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30 (21): 76-81.

[19] 蔡东军, 王迪, 房鑫炎, 等. 基于主客观赋权VIKOR法的电网应急能力评价方法 [J]. 水电能源科学, 2019, 37 (7): 180-182, 61. CAI Dongjun, WANG Di, FANG Xinyan, et al. Power grid emergency management capability evaluation method based on subjective and objective weighted VIKOR method [J]. Water Resources and Power, 2019, 37 (7): 180-182, 61.

[20] 张华一, 文福拴, 张璨, 等. 基于前景理论的电网建设项目组合多属性决策方法 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40 (14): 8-14. ZHANG Huayi, WEN Fushuan, ZHANG Can, et al. Prospect theory based multiple-attribute decision-making method for determining portfolio of construction projects in power systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40 (14): 8-14.

收稿日期: 2019-12-30; 修回日期: 2020-02-05

作者简介:

梅文明 (1983—), 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为能源互联网、可再生能源与清洁能源技术。
李美成 (1973—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为可再生能源与清洁能源、电力系统分析等技术。

张宇威 (1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能电网技术。
杨军 (1977—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统分析、综合能源技术。

Benefit Evaluation of Multi Energy Microgrid Based on Prospect Theory and VIKOR Method

MEI Wenming^{1, 2}, LI Meicheng¹, ZHANG Yuwei³, YANG Jun³

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Beijing 102206, China; 2. State Grid Corporation, Beijing 100031, China; 3. Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In recent years, with the shortage of energy and the growing problem of ecological environment, multi-energy microgrid has received more attention as a new power supply mode. Therefore, the scientific and comprehensive evaluation of the comprehensive benefits of the multi-energy microgrid considering the access of distributed new energy can provide guidance for microgrid investment and has high practical significance. Under the above background, a micro-network benefit evaluation method based on prospect theory and VIKOR method was proposed. Firstly, according to the development characteristics and actual attributes of the microgrid, a comprehensive evaluation index system of microgrid benefit considering economics, energy utilization efficiency and environmental factors is constructed. Considering the subjective risk preference of decision makers, the prospect value function is established according to the prospect theory. The AHP method and the entropy weight method are used to carry out the subjective and objective comprehensive weighting; then the VIKOR method is used to analyze and evaluate various microgrid schemes. Finally, the simulation proves that the VIKOR evaluation method based on prospect theory has higher rationality and effectiveness. Moreover, the photovoltaic microgrid system has low annual operating cost, energy saving and environmental protection, and the comprehensive benefits are relatively high.

Key words: distributed energy; microgrid; comprehensive benefit; prospect theory; VIKOR method