基于后悔理论-VIKOR法的微电网规划评价方法

李睿哲[1]，吴鸣[1,2]，刘诗语[1]
（1.上海电力大学 电子与信息工程学院，上海 200090；
2.中国电力科学研究院有限公司，北京 100192）

摘要：针对现有微电网规划评价方法在评价过程中未能充分考虑系统与环境中不确定因素对于评价结果影响的问题，提出一种基于后悔理论-多准则妥协解排序法（VIKOR）的微电网规划评价方法。首先，考虑微电网规划阶段的需求，构建了包含系统经济性、环保性与技术性等在内的微电网规划评价指标体系；而后，顾及专家主观经验与指标客观数据所包含的信息，采用层次分析法（AHP）-相关性定权法（CRITIC）对指标体系进行主客观组合赋权；最后，考虑不确定因素对评价结果的影响，基于后悔理论在评价过程中引入欣喜-后悔函数与状态变量对VIKOR法进行改进，建立了基于后悔理论-VIKOR法的微电网规划评价模型。算例分析表明，所提评价方法考虑系统与环境中不确定因素以及决策者心理预期对于规划方案评价结果的影响，贴近于实际的微电网的规划方案决策需求。

关键词：微电网；综合评价；后悔理论；VIKOR法
中图分类号：TM715　　**文献标识码：**A　　**DOI：**10.19457/j.1001-2095.dqcd24651

Evaluation Method for Microgrid Planning Based on Regret Theory VIKOR Method

LI Ruizhe[1]，WU Ming[1,2]，LIU Shiyu[1]
（1. *School of Electronics and Information Engineering*，*Shanghai University of Electric Power*，*Shanghai* 200090，*China*；2. *China Electric Power Research Institute*，*Beijing* 100192，*China*）

Abstract：To address the issue that existing microgrid planning evaluation methods do not adequately account for the influence of uncertainties in the system and environment on the evaluation results，a microgrid planning evaluation method based on regret theory-vlsekriterijumska optimizacija i kompromisno resenje（VIKOR）was proposed. Firstly，a microgrid planning evaluation index system was constructed，which includes system economics，environmental protection and technology，taking into account the needs of the microgrid planning stage. Then，the analytic hierarchy process（AHP）-criteria importance though intercrieria correlation（CRITIC）method was used to assign weights to the indicators，taking into account the subjective experience of experts and the information contained in the objective data of the indicators. Finally，considering the influence of uncertainties on the evaluation results，the VIKOR method was improved by introducing the euphoria-regret function and state variables in the evaluation process based on regret theory，and a microgrid planning evaluation model based on regret theory-VIKOR method was established. The analysis of the example shows that the proposed evaluation method consider the influence of uncertainties in the system and environment as well as the psychological expectations of decision-makers on the evaluation results of the planning scheme，and is close to the actual microgrid planning scheme decision needs.

Key words：microgrid；comprehensive evaluation；regret theory；VIKOR method

在日趋严峻的能源环境形势下，国家大力推动“双碳”战略的实施以及以新能源为主体的新型电力系统的建设来完善能源绿色低碳转型体制机制，微电网技术作为实现大规模可再生能源就地消纳的关键技术而日益普及。由于微电网运行效益受资源环境因素影响较大，随着其技术

基金项目：国家自然科学基金（51877201）
作者简介：李睿哲（1998—），男，硕士研究生，Email：li15516036523@outlook.com
通讯作者：吴鸣（1981—），男，博士，教授级高级工程师，Email：1091231276@qq.com

发展逐渐趋于成熟,如何有效衡量微电网项目的技术水平与其经济、社会效益以对微电网项目规划建设做出有效支撑成为了亟待解决的重要问题。

围绕微电网的评价问题,国内外学者已展开诸多探索。评价指标体系方面,现有研究多从微电网系统运行目标与运行特性考虑评价指标的选取,建立起表征系统经济环保[1-2]、可靠优质[3-5]与灵活协调[6-7]等属性的评价指标,并将其归纳构建为综合评价指标体系[8-9],实现对微电网系统的全面评估,同时依据不同类型微电网的特点提出对应增补指标[10],使得指标体系在评价不同微电网场景时更加精细化。然而,上述关于微电网评价指标体系的研究多面向已投运的微电网系统,所构建的评价指标涉及系统运行的实际参数,部分指标在规划阶段难以量化得出,对于指导微电网项目规划方案的决策存在一定的局限性。

微电网评价方法方面,以往研究通过单一方法完成微电网的评价[11],评价结果依赖专家经验水平,部分学者考虑指标信息间重叠交叉影响,通过网络分析法(analytic network process,ANP)-熵权法[12]、序关系分析法(order relation analysis method,G1)-熵权-独立性权法[13]等组合赋权方法避免了单一方法的局限性,现有研究多将评价过程分为指标赋权与综合评价两部分[14-15],通过组合赋权求取指标所占权重,利用决策模型完成方案的评价排序。然而,上述研究多未顾及实际项目中决策者心理与系统和环境中不确定因素对于决策的影响,部分研究考虑到决策者主观倾向和多重决策心理对于评价结果的影响[16-17],使得评价方法更具实践意义,但仍忽略了在评价过程中对系统和环境中不确定因素的考虑。

针对上述问题,本文提出一种基于后悔理论-VIKOR法的微电网规划评价方法。首先考虑规划阶段易于量化的评价指标,建立表征微电网综合性能的评价指标体系;而后通过AHP-CRITIC法完成组合赋权并基于后悔理论在VIKOR法决策模型中引入状态变量,实现对不确定状态下系统规划方案的综合评价;最后通过实际项目案例验证了本文所提方法的合理性与有效性。

1 微电网规划评价指标体系

建立规划阶段易于量化且相对全面、准确的评价指标体系对于指导微电网建设具有重要意义。本节围绕微电网运行目标与运行特性建立起表征微电网系统经济性、系统环保性、系统技术性、储能技术性以及电源技术性5类一级指标的微电网规划评价指标体系,二级指标皆选取规划阶段易于量化的系统参数,层次结构如图1所示。

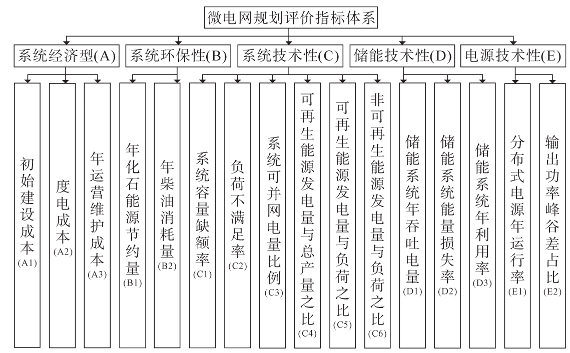


图1 微电网规划评价指标体系

Fig.1 Evaluation indicator system for microgrid planning

1.1 系统经济性指标

系统经济性指标表征微电网系统投资运营的经济性。初始建设成本 C_{IC} 为微电网内各设备购置安装成本的总和;度电成本为系统产生每kW·h电能的平均成本;年运营维护成本 C_{OM} 为系统各组件年营运维护成本的总和。

$$\begin{cases} C_{IC}=\sum_{i=1}^{N}(C_{AC,i}+C_{IN,i})\times K_i \\ C_{OM}=\sum_{i=1}^{N}C_{OM,i}\times K_i \end{cases} \tag{1}$$

式中:$C_{AC,i}$ 为第 i 种设备的单位购置成本;$C_{IN,i}$ 为第 i 种设备的单位安装成本;K_i 为第 i 种设备的数量;N 为设备的种类;$C_{OM,i}$ 为第 i 种设备的单位年运营维护成本。

为使指标间更具可比性,将初始建设成本以等年值形式表达:

$$C_{IC}^{*}=\frac{l(1+\tau)^Y}{(1+\tau)^Y-1}C_{IC} \tag{2}$$

式中:l 为贴现率;τ 为微电网建设投资的年利率;Y 为微电网建设资金收回年限。

1.2 系统环保性指标

系统环保性指标中,年一次能源节约量表征系统清洁能源利用相对于化石能源所产生的环保效益,量化为系统年清洁能源发电量的等效煤耗量;年柴油消耗量表征系统在一年内 CO_2,SO_2 与 NO_x 等温室气体的排放情况。

1.3 系统技术性指标

系统技术性指标表征系统供电可靠性、容量配置合理性与新能源利用情况。系统容量缺额

率为系统需求与实际运行容量间出现短缺的比例;负荷不满足率f_{unmet}为系统年度未满足负荷的比例;系统可并网电量比例为因不能为负载服务或为储能充电而必须并网(或削减)的电能比例。

$$f_{\mathrm{unmet}}=\frac{E_{\mathrm{unmet}}}{E_{\mathrm{demand}}}\times 100\% \tag{3}$$

式中:E_{unmet}为微电网未满足的总负荷;E_{demand}为微电网年总电力需求。

由于单一可再生能源发电量指标难以准确衡量系统可再生能源利用水平,故选取可再生能源发电量与系统总发电量之比、可再生能源发电量与负荷之比和非可再生能源发电量与负荷之比表征系统新能源利用情况。

1.4 储能与电源技术性指标

储能与电源技术性指标表征系统储能与电源配置的合理性。储能系统年吞吐量为储能年充放电量的总和;储能系统能量损失率为储能年放电与充电电量的差额占年充电电量的比例;储能系统年利用率θ_{A}指一年内储能的放电电量与其额定容量比值的平均值;分布式电源年运行率μ_{DG}为各分布式电源装机容量与年实际运行时间乘积的总和占微电网年总额定发电量的比例;输出功率峰谷差占比θ_{OP}为分布式电源年最大输出功率峰谷差与微电网最大负荷之比。

$$\begin{cases}\theta_{\mathrm{A}}=\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{E}}}\frac{E_i}{E_{\mathrm{N}}\times N_{\mathrm{E}}}\times 100\% \\ \mu_{\mathrm{DG}}=\frac{\sum_{i=1}^{M}(E_{\mathrm{SR},i}\times T_i)}{\sum_{i=1}^{M}E_{\mathrm{TR},i}}\times 100\% \\ \theta_{\mathrm{OP}}=\frac{P_{\mathrm{OPMAX}}-P_{\mathrm{OPMN}}}{L_{\mathrm{MAX}}}\times 100\%\end{cases} \tag{4}$$

式中:N_{E}为储能年放电次数;E_i为储能第i次放电释放的电量;E_{N}为储能系统额定容量;$E_{\mathrm{SR},i}$为第i台分布式电源的装机容量;T_i为第i台分布式电源的年实际运行时间;$E_{\mathrm{TR},i}$为微电网中第i台分布式电源的额定发电量;M为微电网中分布式电源的数量;P_{OPMAX}为微电网年输出功率最大值;P_{OPMIN}为微电网年输出功率最小值;L_{MAX}为负荷需求功率最大值。

2 基于后悔理论-VIKOR法的综合评价方法

系统与环境中的某不确定因素可以表示为多种可能出现的状态的集合,针对传统VIKOR法难以建立多状态系统评价模型的缺陷,本文引入后悔理论对上述问题进行改进。

2.1 基于AHP-CRITIC法的组合赋权

考虑到微电网规划评价指标体系包含多个维度的信息,且部分二级指标间的信息存在关联性,为准确地对不同指标在评价时所占权重进行衡量,充分考虑专家实践经验并减少各指标间客观信息的重叠,本节采用基于AHP-CRITIC的组合赋权方法确认指标的综合权重。

2.1.1 数据规范化

由于不同二级指标类型存在差异,为使指标间具备可比性,需通过归一化处理消除指标原始数据间的量纲,使数据正向化并归于[0,1]之间。

由指标原始数据构造出原始数据矩阵$\boldsymbol{B}^*$。对于包含m个规划设计方案、n个评价指标的微电网,记第i个方案下第j个指标值为b_{ij}^*。效益型与成本型指标归一化后的指标值分别表示为

$$\begin{cases}b_{ij}^{+}=\frac{b_{ij}^{*}-b_j^{\min}}{b_j^{\max}-b_j^{\min}} \\ b_{ij}^{-}=\frac{b_j^{\max}-b_{ij}^{*}}{b_j^{\max}-b_j^{\min}}\end{cases} \tag{5}$$

式中:$b_j^{\min}$为原始数据中第j个指标的最小值;$b_j^{\max}$为原始数据中第j个指标的最大值。

原始数据经归一化构造为标准数据矩阵$\boldsymbol{B}$。

2.1.2 基于AHP法的主观赋权

AHP法通过定性与定量分析相结合的方式对决策目标进行分析,通过对不同指标赋予不同等级的重要性标度构造出判断矩阵,进而以判断矩阵的特征向量等参数求得各指标所占权重。AHP法的计算步骤如下:

1)由领域内专家参考重要性标度对所构建微电网规划评价指标体系中各指标的重要性进行比较,构造出判断矩阵$\boldsymbol{A}$:

$$\boldsymbol{A}=(a_{ij})_{n\times n}=\begin{bmatrix}\frac{a_1}{a_1} & \frac{a_1}{a_2} & \cdots & \frac{a_1}{a_n} \\ \frac{a_2}{a_1} & \frac{a_2}{a_2} & \cdots & \frac{a_2}{a_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{a_n}{a_1} & \frac{a_n}{a_2} & \cdots & \frac{a_n}{a_n}\end{bmatrix} \tag{6}$$

式中:a_{ij}为指标i与指标j重要性的比值。

2)由下式求得判断矩阵$\boldsymbol{A}$的最大特征值λ和

特征向量 $\boldsymbol{W}_S=[w_{s_1},w_{s_2},\cdots,w_{s_n}]$。

$$\boldsymbol{A}\boldsymbol{W}_S=\lambda\boldsymbol{W}_S \tag{7}$$

3）由下式检验判断矩阵$\boldsymbol{A}$的一致性。

$$\begin{cases} C.I.=\dfrac{\lambda-n}{n-1} \\ C.R.=\dfrac{C.I.}{R.I.} \end{cases} \tag{8}$$

式中：$C.I.$为一致性指标；$R.I.$为随机指标；$C.R.$为一致性比率。

当$C.R.<0.1$时，认为判断矩阵符合一致性检验，此时特征向量$\boldsymbol{W}_S$即为权向量。

2.1.3　基于CRITIC法的客观赋权

CRITIC法通过数据自身所包含的信息生成对比强度与冲突性两项指标来对决策目标进行分析，确定的客观权重由对比强度与冲突性计算得出，可以有效减少不同指标客观信息的重叠交叉。CRITIC法的计算步骤如下：

1）由标准数据矩阵$\boldsymbol{B}$经下式计算得出各指标的标准差以表示其对比强度，对比强度数值高则该指标所包含信息较多，应分配更高的权重。

$$\sigma_j=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}(b_{ij}-\bar{b}_j)}{m-1}} \tag{9}$$

式中：σ_j为指标j的对比强度。

2）由标准数据矩阵$\boldsymbol{B}$经下式计算各指标与其他指标间的相关性以表现其冲突性，冲突性数值高则该指标与其他指标所包含的信息有较多重复，应降低权重的分配。

$$\begin{cases} f_j=\sum_{j=1}^{m}(1-r_{ij}) \\ r_{ij}=\dfrac{\sum_{h=1}^{m}(b_{hi}-\bar{b}_i)(b_{hj}-\bar{b}_j)}{\sqrt{\sum_{h=1}^{m}(b_{hi}-\bar{b}_i)^2\sum_{h=1}^{m}(b_{hj}-\bar{b}_j)^2}} \end{cases} \tag{10}$$

式中：f_j为指标j与其他指标的冲突性；r_{ij}为指标i与指标j的皮尔逊相关系数。

3）由下式计算各指标对比强度与冲突性的乘积以表示其信息承载量，并求得所占权重：

$$\begin{cases} C_j=\sigma_j f_j \\ w_{o_j}=\dfrac{C_j}{\sum_{j=1}^{n}C_j} \end{cases} \tag{11}$$

式中：C_j为指标j的信息承载量；w_{o_j}为指标j所占权重。

通过上述计算过程，得出指标体系的客观权向量$\boldsymbol{W}_O=[w_{o_1},w_{o_2},\cdots,w_{o_n}]$。

2.1.4　组合赋权

为了综合专家主观评价意见与微电网各指标原始数据所包含的客观信息，通过主客观组合赋权的方式得出各指标最终权重。微电网综合评价的组合权重$\boldsymbol{W}$可表示为

$$\boldsymbol{W}=[w_1,w_2,\cdots,w_n]=\left[\frac{w_{s_j}+w_{o_j}}{2}\right]_{1\times n} \tag{12}$$

2.2　后悔理论

后悔理论考虑决策者会对不同状态下或主观难以决策时的决策结果进行预期，进而做出令后悔值更低的决策。根据后悔理论，决策者对方案的感知效用函数由此方案的效用函数与相应的欣喜-后悔函数两部分构成。状态φ时决策者对于方案i下指标j的感知效用U_{ij}^{φ}可表示为

$$\begin{aligned} U_{ij}^{\varphi} &= v(b_{ij}^{\varphi*})+R[v(b_{ij}^{\varphi*})-v(B_{ij}^{\varphi*})]\cdot \\ &\quad R[v(b_{ij}^{\varphi*})-v(B_{ij}^{\varphi*})] \\ &=1-\exp\{\beta[v(b_{ij}^{\varphi*})-v(B_{ij}^{\varphi*})]\} \end{aligned} \tag{13}$$

式中：$v(b_{ij}^{\varphi*})$为状态φ时方案i下指标j的效用值，可用归一化后的指标值b_{ij}表示；$v(B_{ij}^{\varphi*})$为状态φ时指标j的最大效用值；$R[v(b_{ij}^{\varphi*})-v(B_{ij}^{\varphi*})]$为状态$\varphi$时方案$i$下指标$j$的后悔值；$\beta$为后悔规避系数，一般取为0.3。

综合考虑所有状态时，方案i下指标j的综合感知效用V_{ij}可表示为

$$V_{ij}=\sum_{t=1}^{f}\gamma_t\times R[v(b_{ij}^{\varphi*})-v(B_{ij}^{\varphi*})] \tag{14}$$

式中：f为状态数量；γ_t为状态φ出现概率。

2.3　基于后悔理论的改进VIKOR评价方法

传统VIKOR法考虑方案的群体效用值与个体后悔值，以各方案相对正负理想方案的距离对其进行排序来求取妥协折衷解，难以对考虑不确定因素的规划方案决策问题进行合理决策。通过后悔理论对VIKOR法改进，在决策过程引入状态变量与决策者的主观预期，可使决策者在存在不确定状态的决策中做出后悔值最小的决策。基于后悔理论的改进VIKOR法综合评价流程如图2所示，具体步骤如下：

步骤1：由式（5）对敏感因素在各状态的方案指标原始数据规范化，得到标准数据矩阵$\boldsymbol{B}$；

步骤2：将标准数据矩阵$\boldsymbol{B}$作为效用值矩阵，由式（13）求得各状态下的欣喜-后悔函数矩阵，进而由式（14）求得综合感知效用矩阵；

步骤3：由式(6)~式(12)计算微电网评价指标体系各状态下的加权客观权重与组合权重；

步骤4：由下式求取综合感知效用值的正、负理想解 V_{ij}^+ 与 V_{ij}^-：

$$\begin{cases} V_{ij}^+ = \{V_1^+, V_2^+, V_3^+, \cdots, V_n^+\} \\ \quad = \{\max V_{i1}, \max V_{i2}, \max V_{i3}, \cdots, \max V_{in}\} \\ V_{ij}^- = \{V_1^-, V_2^-, V_3^-, \cdots, V_n^-\} \\ \quad = \{\min V_{i1}, \min V_{i2}, \min V_{i3}, \cdots, \min V_{in}\} \end{cases} \tag{15}$$

步骤5：由下式求取各方案的群体效用值 S_i、个体后悔值 R_i 和利益比率值 Q_i：

$$\begin{cases} S_i = \sum_{j=1}^{n} w_i \dfrac{V_j^+ - V_{ij}}{V_j^+ - V_j^-} \\ R_i = \max_j \left(w_i \dfrac{V_j^+ - V_{ij}}{V_j^+ - V_j^-} \right) \\ Q_i = t\left(\dfrac{S^+ - S_i}{S^+ - S^-} \right) + (1-t)\left(\dfrac{R^+ - R_i}{R^+ - R^-} \right) \end{cases} \tag{16}$$

式中：t 为风险系数，趋近于1时决策结果趋于群体效用值最大，趋近于0时决策结果趋于个体后悔值最小，本文中取0.5；S^+ 为最大 S_i 值；S^- 为最小 S_i 值；R^+ 为最大 R_i 值；R^- 为最小 R_i 值。

步骤6：由利益比率值 Q_i 对各方案进行排序，Q_i 值越小，则方案越优。

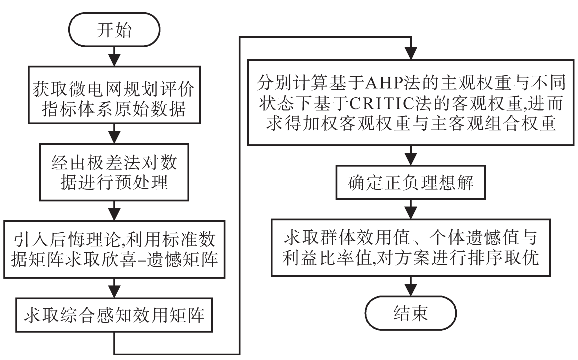
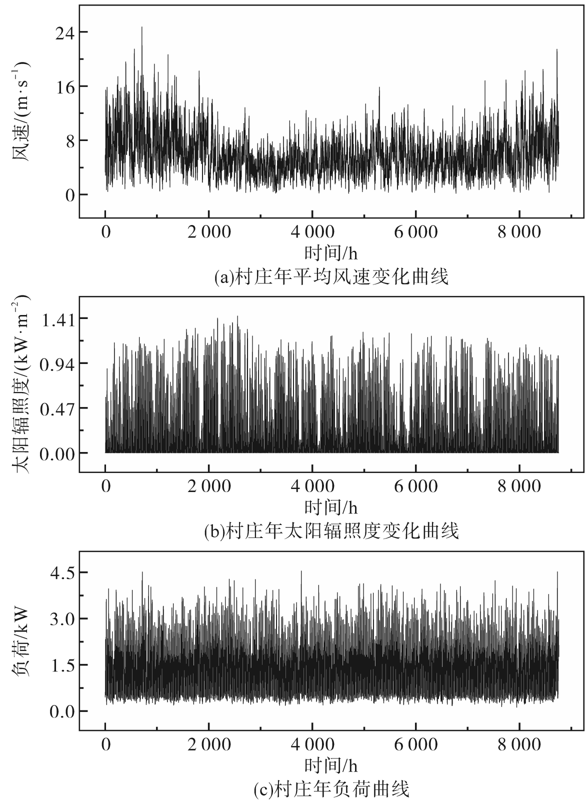


图2　基于改进VIKOR法的综合评价流程

Fig.2　Flow chart of comprehensive evaluation based on the improved VIKOR method

3　算例分析

选取菲律宾巴拉望海岛某村庄离网型微电网项目对本文所提方法进行验证。该村庄年均气温27.57 ℃，由于地理位置偏僻仅有照明等基本生活负荷需求，年最大负荷4.5 kW，日均水平太阳辐射5.42 kW·h/m²，平均风速5.98 m/s，近5 a平均风光资源及负荷数据如图3所示。基于HOMER软件依据该村庄风光资源及负荷数据对微电网规划方案进行配置，系统硬件成本与参数选取软件默认值，项目服务年限设置为20 a。



(a)村庄年平均风速变化曲线

(b)村庄年太阳辐照度变化曲线

(c)村庄年负荷曲线

图3　村庄年风光资源及负荷曲线

Fig.3　Annual wind and light resources and load curves for villages

由于该村庄总负荷较小且微电网系统组成较为简单，影响微电网运行效益的主要不确定因素为环境资源因素，且村庄所在地风资源较之光资源季节分布差异性更大，故选取风资源禀赋作为敏感因素进行分析。考虑村庄所在地区年平均风速约为6 m/s，设置状态 φ_1 为风速低于6 m/s，状态 φ_2 为风速高于6 m/s，两种状态出现的概率按照月平均风速统计值分别设置为7/12与5/12。在满足村庄全年负荷需求的基础上进行微电网方案配置，所选取的规划方案配置情况与仿真所得各二级指标原始数据分别如表1、表2所示。

表1　微电网规划配置方案

Tab.1　Microgrid configuration schemes

方案	系统配置
1	4 kWp光伏+3 kW风机+2 kW柴油发电机+30 kW·h铅酸蓄电池
2	2 kWp光伏+10 kW风机+2 kW柴油发电机+20 kW·h铅酸蓄电池
3	4 kWp光伏+10 kW风机+2 kW柴油发电机+20 kW·h铅酸蓄电池
4	6 kWp光伏+6 kW风机+2 kW柴油发电机+30 kW·h铅酸蓄电池
5	2 kWp光伏+6 kW风机+2 kW柴油发电机+30 kW·h铅酸蓄电池

表2 各方案二级指标原始数据

Tab.2 Raw data for secondary indicators of the configuration schemes

指标编号	状态 φ_1					状态 φ_2				
	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5
A1/$	46 366	50 966	56 566	60 966	46 966	46 366	50 966	56 566	60 966	46 966
A2/$	0.57	0.63	0.65	0.64	0.63	0.51	0.53	0.60	0.58	0.51
(A3·$·a^{-1})	968	968	948	1 065	1 200	847	749	897	970	962
B1/t	2.88	3.40	4.50	4.67	2.48	4.32	8.13	9.23	7.52	5.32
B2/L	1 402	1 958	1 857	1 519	2 207	968	969	1 505	1 017	1 161
C1/%	1.46	3.58	0.67	0.15	4.61	0.19	0.37	0.28	0.05	0.43
C2/%	0.92	2.14	0.33	0.10	2.80	0.12	0.22	0.08	0.03	0.25
C3/%	8.24	19.83	31.44	30.21	7.62	22.87	53.46	60.35	50.20	34.01
C4/%	57.09	56.21	59.30	64.70	50.68	70.09	77.73	68.82	76.45	73.39
C5/%	74.70	89.10	116.00	120.00	65.50	111.00	209.00	237.00	193.00	137.00
C6/%	63.50	67.10	74.00	77.30	57.10	78.70	90.40	88.40	89.10	83.70
D1/(kW·h·a^{-1})	2 796	1 988	2 350	2 886	1 887	2 677	2 047	1 535	2 155	2 324
D2/%	18.03	16.85	22.56	16.24	17.87	17.65	18.47	21.49	16.89	17.65
D3/%	53.82	40.55	72.12	79.48	31.30	76.26	79.23	90.28	89.79	73.09
E1/%	51.51	56.37	56.79	55.61	55.03	63.28	65.94	66.36	65.70	65.13
E2/%	1.14	1.29	1.69	1.82	0.93	1.40	2.37	2.73	2.35	1.55

3.1 指标权重计算

首先，基于二级指标原始数据完成规范化处理，由式(13)~式(14)先后计算得出两种状态下的后悔值矩阵、感知效用矩阵与综合感知效用矩阵，以电源技术性指标为例，所得综合效用感知矩阵为

$$\boldsymbol{A}_{\mathrm{E}}=\begin{bmatrix}0.154 & 0.209 & 0.215 & 0.202 & 0.194\\ 0.266 & 0.397 & 0.497 & 0.476 & 0.249\end{bmatrix} \tag{17}$$

依据2.1节基于AHP-CRITIC法的组合赋权计算方法分别计算出微电网规划评价指标体系的主客观权重，进而得到主客观组合权重。各一级指标权重计算结果及二级指标权重对比分别如表3、图4所示。

表3 一级指标权重计算结果

Tab.3 Results of weights calculation for primary indicators

编号	主观权重	状态 φ_1 客观权重	状态 φ_2 客观权重	加权客观权重	组合权重
A	0.135	0.232	0.227	0.218	0.176
B	0.087	0.094	0.140	0.151	0.119
C	0.365	0.416	0.313	0.326	0.346
D	0.178	0.187	0.203	0.182	0.180
E	0.235	0.071	0.116	0.123	0.179

观察图4各二级指标可知，由AHP法所得的主观权重由于依赖专家的经验水平，存在较多指标项相较于客观权重存在较大差异，整体的波动性较大；基于CRITIC法所得的客观权重由于两种不同状态的存在同样有所偏差，体现出系统运行状态很大程度上受到风资源禀赋差异的影响，

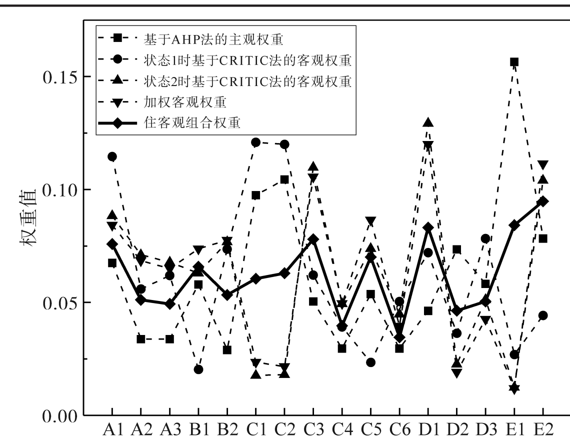


图4 二级指标权重计算结果对比

Fig.4 Comparison of the results of the calculation of secondary indicator weights

由两种不同状态下的系统数据信息所得的客观权重进行加权得到各指标间变化相对平缓的加权客观权重，指标间的差异对其影响较小。主客观组合权重介于主观权重与加权客观权重之间，既包含专家的经验判断，又充分顾及指标客观数据信息，更具合理性。

观察表3各一级指标可知，整体指标权重赋予符合项目供电可靠且兼具经济性的基本需求。组合权重赋予系统技术性指标最高的权重值，体现出合理利用可再生能源保障村庄供电可靠性是微电网效益的重要体现；其次是系统经济性、储能技术性与电源技术性指标，三者权重值相当且紧密相关，微电网系统效益受到储能与电源的

运行情况的制约，储能与电源的配置情况同样对系统整体经济性造成影响；对于村庄微电网其环保性并不是项目建设的主要需求，故系统环保性指标所占权重最低。

3.2　评价结果分析

由式（15）~式（16）分别求取综合感知效用值的正、负理想解V_{ij}^{+}，V_{ij}^{-}与各方案的群体效用值S_i、个体后悔值R_i和利益比率值Q_i，风险系数取0.5时得出的最终评价结果如表4所示。

表4　基于后悔理论-VIKOR法的综合评价结果

Tab.4　Comprehensive evaluation results based on the regret theory-VIKOR method

方案	S_i值	R_i值	Q_i值	方案（Q_i值）排名
1	0.495	0.089	0.684	4
2	0.475	0.071	0.222	2
3	0.347	0.071	0.107	1
4	0.240	0.086	0.367	3
5	0.771	0.091	1.000	5

本文所提评价方法对各配置方案的评价结果为方案3>方案2>方案4>方案1>方案5。结合各方案配置情况与图5进一步分析可知，方案5与方案1通过削减项目整体可再生能源装机容量来降低项目初始建设成本的投入，以配置大容量储能来实现电力资源在时间上的转移。前者侧重于风电，由于风资源季节性分布差异较大，导致项目整体供电过度依赖于柴发，除经济性上稍具优势，其余一级指标均劣势明显；后者侧重于光电，由于光照资源年分布相对均匀，项目整体以光电为主，风电、柴发为辅，较好地满足了村庄负荷需求，储能系统发挥出应有的削峰填谷作用，项目整体具备较好的经济性与环保性，但受限于成本技术性不具优势。方案4以高昂的初始投资成本配置了大容量的分布式电源与储能，除经济性指标排名最次外，其余指标均较为优异，但由于技术性指标均与系统配置情况相关性较高，考虑项目实际需求该配置仍有些过剩，整体性价比较低。方案2与方案3均考虑大容量风机配以光伏和柴发，同时通过适当降低储能容量来削减系统初始成本，在满足项目需求的情况下性价比优于方案4。两者间的差异在于光伏容量配置的不同，方案2相较于方案3光伏配置容量更低，在系统稳定出力上对比方案3有一定差距，故在三项技术性指标评分均落后于方案3；方案3在具备经济性优势的基础上余下指标均取得较好排名，更符合项目实际需求。

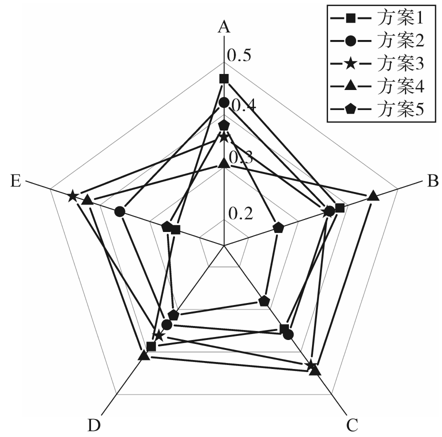


图5　一级指标综合评分雷达图

Fig.5　Comparison of composite scores for primary indicators

当决策者风险偏好不同时所得评价结果有所差异，不同风险系数与利益比率的对比如图6所示。

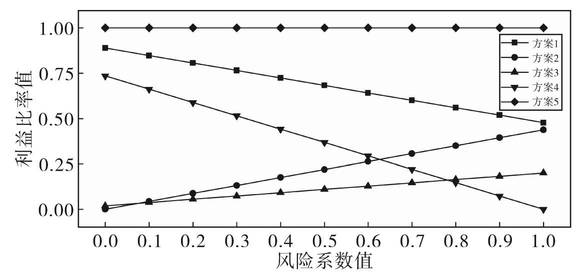


图6　风险系数与利益比率对比

Fig.6　Comparison of Q_i with risk factor values

当对风资源禀赋的预期偏向保守时，各方案的综合评价排名为方案3>方案2>方案4>方案1>方案5；当对风资源禀赋的预期偏向激进时，评价结果变化较大，极端风速条件下各方案的排名为方案4>方案3>方案2>方案1>方案5。

方案5源储配置不合理，虽然建设初期具有较高经济性，但在不同预期下各项指标对比其他方案都不具优势。方案2与方案3的差异仅在于光伏配置容量，故在不同风险系数下整体排名差距不大，在保守资源预期下具有较高的综合评分，由于大功率风机运行收益受限于储能与消纳水平，系统收益随着风险系数的增大而减小。方案1与方案4由于配置了大容量光伏、储能与小容量风机，在风速期望较高时两者收益较之于低风速情况下提升较大，但方案1因考虑经济性整体系统配置容量偏低，随着风险系数的增大其收益对比方案4劣势明显。风险系数在[0.6，0.8]时，各方案评价排名差异较大，这是由于当对风资源禀赋的期望稍微激进时，部分方案由于系统配置较高，受到风资源禀赋收益较大，而部分方案配

置情况顾及系统经济性，在高资源禀赋期望下收益较小。

3.3 评价结论比较

为验证本文所提方法的有效性，基于传统VIKOR法对两种状态下各方案进行综合评价，评价结果如表5所示。

表5 VIKOR法评价结果

Tab.5 Evaluation results of the VIKOR method

方案	状态 φ_1 Q_i值	状态 φ_1 方案（Q_i值）排名	状态 φ_2 Q_i值	状态 φ_2 方案（Q_i值）排名
1	0.488	3	0.963	5
2	0.504	4	0	1
3	0.089	1	0.652	3
4	0.282	2	0.361	2
5	1	5	0.863	4

可见所得方案排名结果皆与本文所提综合评价方法具有一定差异，这是由于传统VIKOR法仅能考虑低风资源禀赋与高风资源禀赋两种单一状态，系统配置情况受到资源因素限制，对方案的评价结果都与实际情况有一定偏离，评价过程忽略了其余可能出现的状态对当前状态下评价过程的影响，从而无法做出合理决策。相较而言，基于后悔理论改进的VIKOR法由于顾及了敏感因素的状态变量，做出的决策更为折衷，面对不确定状态下的决策问题更具有效性。

逼近理想解排序法（technique for order preference by similarity to ideal solution，TOPSIS）同为基于距理想方案距离对方案进行排序的评价方法，为验证本文所提方法合理性，基于后悔理论对TOPSIS进行改进以解决不确定状态下的决策问题，算例评价结果如表6所示。

表6 基于后悔理论-TOPSIS法的综合评价结果

Tab.6 Comprehensive evaluation results based on regret theory-TOPSIS method

方案	D^+值	D^-值	C值	方案排名
1	0.169	0.114	0.404	4
2	0.098	0.212	0.684	2
3	0.071	0.232	0.764	1
4	0.138	0.168	0.549	3
5	0.241	0.06	0.198	5

后悔理论-TOPSIS法所得评价结果与本文所提方法评价结果一致，由于算例中风速低于6 m/s的状态出现概率较风速高于6 m/s的概率更大，故基于后悔理论-TOPSIS法得出的方案排名与折衷情况下基于后悔理论-VIKOR法得出的方案排名相符，可见所提综合评价方法具有一定合理性。但由于TOPSIS模型缺少对于决策者主观思维的考虑，所得出的评价结果仅有一组。相较而言，本文所提方法弥补了上述缺陷，在决策过程中纳入主观因素，更符合实际决策需求。

4 结论

本文考虑系统与环境中不确定因素对微电网规划方案决策过程的影响，提出了一种基于后悔理论-VIKOR法的微电网规划综合评价方法。通过建立包含5个评价维度的微电网规划评价指标体系、基于AHP-CRITIC法的主客观组合赋权方法与基于后悔理论-VIKOR法的综合评价模型，实现对微电网规划方案的科学评价。

算例结果表明，所提评价方法在微电网规划阶段可以顾及不确定状态对于决策结果的影响，使决策者可以更加直观地衡量系统在不确定状态下的综合水平，相较于传统VIKOR模型，更符合实际决策需求。本文算例以单一敏感因素进行分析，由于考虑多敏感因素分析时数据维度将会成倍增加，后续研究可以围绕优化计算方法进一步展开。

参考文献

[1] ONAOLAPO A K，CARPANEN R P，DORRELL D G，et al. Reliability evaluation and financial viability of an electricity power micro-grid system with the incorporation of renewable energy sources and energy storage：case study of KwaZulu-Natal，South Africa[J].IEEE Access，2021：159908-159924.

[2] YANG P，SUN K，ZHANG H，et al. Evaluation indices for quantifying the efficacy of cabon-constrained power system development[C]//2021 International Conference on Power System Technology（POWERCON），IEEE，2021：62-67.

[3] SULTANA G，KESHAVAN B K. Evaluation of performance and reliability indices of a micro-grid with distributed generation[C]//2020 IEEE Region 10 Conference（TENCON），IEEE，2020：341-346.

[4] 姜田田. 微电网短路故障诊断与电能质量评价[D]. 济南：山东大学，2014.
JIANG Tiantian. Microgrid short circuit fault diagnosis and power quality evaluation[D]. Jinan：Shandong University，2014.

[5] 欧阳静，潘国兵，陈金鑫，等. 基于节点电压灵敏度的微电网电能质量综合动态评价方法[J]. 高技术通讯，2021，31(2)：199-206.
OUYANG Jing，PAN Guobing，CHEN Jinxin，et al. A comprehensive dynamic evaluation method for microgrid power quality based on node voltage sensitivity[J]. Chinese High Technology Letters，2021，31(2)：199-206.

[6] 鲁宗相，李海波，乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报，2017，37（1）：9-20.
LU Zongxiang，LI Haibo，QIAO Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE，2017，37（1）：9-20.

[7] 杨运国，侯健生，边晓燕，等. 面向高比例新能源配电网的灵活性资源综合评价[J]. 供用电，2021，38（11）：68-76.
YANG Yunguo，HOU Jiansheng，BIAN Xiaoyan，et al. Comprehensive evaluation of flexible resources for high penetration of renewable energy sources integrated to the distribution network [J]. Distribution & Utilization，2021，38（11）：68-76.

[8] 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.

[9] 李瞳. 并网型微电网项目的综合评价研究[D]. 北京：华北电力大学，2020.
LI Tong. Comprehensive evaluation study of grid-connected microgrid projects[D]. Beijing：North China Electric Power University，2020.

[10] 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，TANG Longjun，et al. Study on fine index system for comprehensive evaluation of microgrid planning[J]. Modern Electric Power，2018，35（3）：54-61.

[11] 王炜，刘宇，夏荣臻. 基于改进AHP的配电网规划评价体系研究[J]. 电子测量技术，2019，42（9）：24-28.
WANG Wei，LIU Yu，XIA Rongzhen. Research on the evaluation system of distribution network planning based on improved AHP[J]. Electronic Measurement Technology，2019，42（9）：24-28.

[12] 赵鹏翔，范莹，周喜超，等. 面向园区综合能源系统的评价方法[J]. 电源技术，2020，44（9）：1379-1382，1390.
ZHAO Pengxiang，FAN Ying，ZHOU Xichao，et al. Evaluation method for park integrated energy system[J]. Chinese Journal of Power Sources，2020，44（9）：1379-1382，1390.

[13] 季宇，牛耕，曲雪原，等. 计及多能互补的海岛群微网系统规划评价方法[J]. 智慧电力，2021，49（6）：24-31.
JI Yu，NIU Geng，QU Xueyuan，et al. Planning evaluation method of islands microgrid system considering multi-energy complementary[J]. Smart Power，2021，49（6）：24-31.

[14] 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（1）：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（1）：4012-4019.

[15] 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）：2431-2439.
ZHANG Shixiang，LÜ Shuaikang. Evaluation method of park-level integrated energy system for microgrid[J]. Power System Technology，2018，42（8）：2431-2439.

[16] 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.

[17] 曹宇，李国杰. 考虑多重决策心理的海岛孤网调度综合评价[J]. 控制与决策，2022，37（6）：1591-1600.
CAO Yu，LI Guojie. Comprehensive evaluation of island isolated microgrid dispatch considering multiple decision psychology[J]. Control and Decision，2022，37（6）：1591-1600.

收稿日期：2022-09-29
修改稿日期：2022-12-03