文章编号：1674-0629(2026)09-0109-10 中图分类号：TM715 文献标志码：A
DOI：10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2026.09.010

基于博弈综合赋权-VIKOR法的新型配电网规划评估方法

陈露东[1]，陈果[2]，郑飞[1]，王杰[1]，张鹏城[1]，刘金森[1]，陆之洋[2]
（1. 贵州电网有限责任公司电网规划研究中心，贵阳 550002；2. 贵州大学电气工程学院，贵阳 550025）

摘要：新型配电网规划是推进配电网向绿色低碳发展和数字化转型的重要技术手段。为向低碳发展目标下的新型配电网规划方案提供决策支持，在对现行配电网规划评估指标体系进行总结的基础上，构建了一套适用于新型配电网规划的以清洁低碳、安全充裕、供需协同、经济高效、灵活智能5大维度为核心的评价指标体系，共包括13个二级指标及56个三级指标；其次，为弥补单一赋权方法的不足，提出了一种基于博弈综合赋权-VIKOR法的综合评估方法，采用博弈论将DEMATEL法和CRITIC法相结合综合赋权来避免评价结果过于主观或过于客观，利用VIKOR多属性决策方法对规划方案进行评估，以确保评估结果更加稳定和可信。最后，以某配电网规划方案为例，验证了所提规划评估方法的可行性和实用性。

关键词：新型配电网；规划评估；指标体系；博弈综合赋权；VIKOR法

Planning Evaluation Method of New Distribution Network Based on Game Comprehensive Weighting-VIKOR Method

CHEN Ludong[1], CHEN Guo[2], ZHENG Fei[1], WANG Jie[1], ZHANG Pengcheng[1], LIU Jinsen[1], LU Zhiyang[2]
（1. Power Grid Planning & Research Center of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China; 2. College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China）

Abstract: New distribution network planning serves as a critical technical approach to promote the green-low-carbon development and digital transformation of distribution networks. To provide decision support for new distribution network planning schemes under the low-carbon development target, this paper summarizes the existing evaluation index systems for distribution network planning, and establishes an evaluation index system tailored to new distribution network planning. An evaluation indicator system is proposed taking five dimensions as the core, namely clean and low-carbon performance, security and adequacy, supply-demand coordination, economic efficiency, and flexibility and intelligence and covering 13 secondary indicators and 56 tertiary indicators. Furthermore, to address the drawbacks of single weighting methods, a comprehensive evaluation method combining game-theory integrated weighting and VIKOR is proposed. Game theory is adopted to integrate the DEMATEL method and CRITIC method for integrated weighting, preventing evaluation results from being overly subjective or objective. The VIKOR multi-attribute decision-making method is applied to assess planning schemes, so as to guarantee more stable and reliable evaluation results. Finally, a practical distribution network planning case is studied to verify the feasibility and practicality of the proposed planning evaluation method.

Key words: new distribution network; planning evaluation; indicator system; game comprehensive weighting; VIKOR method

基金项目：国家自然科学基金资助项目(52367005)；中国南方电网有限责任公司创新项目(GZKJXM20222468)。
Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China (52367005); the Innovation Program of China Southern Power Grid Co., Ltd. (GZKJXM20222468).

0 引言

随着“碳达峰、碳中和”进程加快推进，各种分布式新能源、电力电子设备、多元负荷大规模接入配电系统，数字化和智能化水平不断提升，如何构建新型配电网成为迫切需要关注的问题[1-3]。

新型配电网规划是引领配电系统向绿色低碳发展和数字化转型的重要前提[4-5]，需在传统配电网规划技术的基础上全面考虑高比例的可再生能源并网带来的源-荷不确定性和时空耦合特性[6-8]，结合碳排放机理、交直流互联、多能流协同运行、数字电网等新领域开展源网荷储协同规划及一二次融合规划，以满足新型配电网的发展需求，这给现有配电网规划评估提出了新的要求和挑战。

现阶段，国内外学者在新型电力系统指标体系方面进行了一定的探索和研究，文献[9]为适应新型电力系统发展形势构建了一套以清洁低碳、安全可靠、灵活智能、开放互动和经济高效五大维度为核心的统计指标体系。文献[10]结合新型电力系统“源-荷协同”的需求构建了一套计及“源-网-荷-储”各环节碳排放特征的指标体系，并采用理想解-灰色关联方法对规划方案进行评估。文献[11]构建了一套以电网满意度、时空资源、有效提升为核心的新型电力系统关键技术评价指标体系，并采用模糊综合评价方法进行了评估。上述文献分别从电网统计、风险评估、规划评估等方面构建了新型电力系统评价指标体系，但是由于侧重点不同，建立的指标体系不具备全面评价新型配电网规划方案的能力。

就评价方法而言，现有研究大多采用层次分析法、熵权法、模糊数学法、TOPSIS（technique for order preference by similarity to ideal solution）法等进行综合评价，文献[12]采用最优最劣法主观赋权，熵权法确定客观权重，主客观结合计算综合权重，并结合逼近理想解排序法进行电网安全与效益综合评价。文献[13]针对输电网规划评估构建了组合权重模糊数学评价方法评估方案整体优劣情况，同时使用雷达图分项评价展示各方面指标的直观结果。文献[14]结合德尔菲法主观赋权和熵权法客观赋权，通过融合计算得出综合权重，划分优先等级，对源网荷储一体化布局进行综合评价。目前评价方法通常结合指标权重进行全面综合评价排序，注重反映指标多数整体的优劣情况，忽略了少数极端指标数据的评价影响，且评价结果过分依赖指标数据和客观计算公式。

综上，本文首先针对新型电力系统“电力+算力”的突出特征，与国内外新型电力系统评价指标的研究成果相结合，构建了一套适用于评价新型配电网规划方案的指标体系；其次提出了一种基于博弈综合赋权-多准则妥协解排序方法（vlsekriterijumska optimizacija i kompromisno resenje，VIKOR）的综合评价模型，该方法采用博弈论将决策实验室分析法（decision-making trial and evaluation laboratory，DEMATEL）和客观赋权法（criteria importance through intercriteria correlation，CRITIC）相结合综合赋权，既结合了指标间的相互影响程度进行主观赋权，又充分考虑了指标的冲突性与相关性；并采用VIKOR法对规划方案进行综合评估，以兼顾指标体系的群体优劣情况和最小个体遗憾，为新型配电网规划提供决策支持，助力配电网清洁低碳发展和数字化转型。

1 新型配电网规划评估指标体系构建

对配电网规划方案进行评估可以发现问题、改善薄弱环节，为规划方案决策提供科学依据，而科学合理的指标体系则是进行配电网规划方案评估的前提[15-17]。现行配电网规划评估指标体系包括网架结构、负荷供应、装备技术、安全可靠、经济高效、智能水平共6个一级指标，缺乏对清洁低碳、灵活资源和数字赋能等新型电力系统特征的评估[18-19]。

本文结合新型电力系统的特征和内涵，在现有规划评估指标的基础上充分考虑可行性、通用性、系统性和科学性等原则，针对新型电力系统“电力+算力”的突出特征加入了数字赋能指标，从而构建了一套体系科学、指标完备的新型配电网规划评估指标体系，该指标体系包括清洁低碳、安全充裕、经济高效、供需协同、灵活智能共5个一级指标，以及13个二级指标和56个三级指标，具体内容如图1所示。

与现行规划评估指标相比，新增指标主要集中在清洁低碳、供需协同、灵活智能方面，本文对新增指标的定义和计算方法进行阐述说明如下。

1）区域碳排放因子

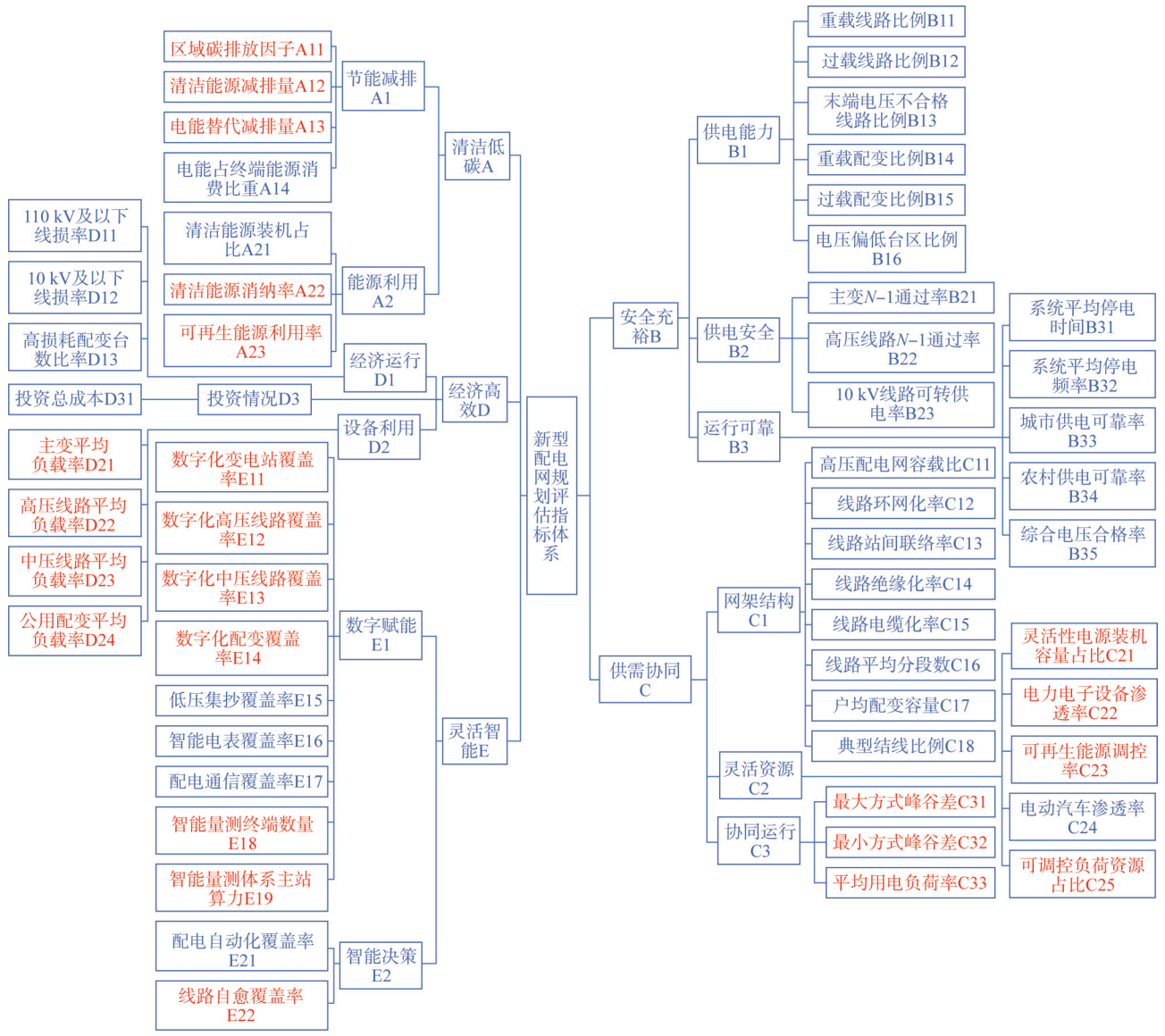


图 1　新型配电网规划评估指标体系

Fig. 1　New distribution network planning evaluation index system

区域碳排放因子指标用于表征生产单位电量的碳排放量，如式(1)所示。

$$A_{11}=\frac{C_{\mathrm{G}}+E_{\mathrm{H}}}{E_{\mathrm{G}}+E_{\mathrm{H}}} \tag{1}$$

式中：A_{11}为区域碳排放因子；C_0为向供电区域送入电量的上级电网平均碳排放因子；E_{H}为上级电网向供电区域净送入的电量；C_{G}为供电区域发电产生的碳直接排放量；E_{G}为供电区域年度总发电量[20]，其中不同类型化石燃料的碳排放因子可参考我国或IPCC颁布的数值[21]。

2)清洁能源减排量

清洁能源减排量A_{12}用于表征该区域在生产相同电量的情况下清洁能源发电比化石能源发电减少的碳排放量，tCO_2。

$$A_{12}=a\times Q_{\mathrm{G}} \tag{2}$$

式中：a为发电碳排放因子；Q_{G}为清洁能源发电量。

3)电能替代减排量

电能替代减排量A_{13}用于表征该区域所属空间范围内通过电能替代促进节能减排的情况，tCO_2。

$$A_{13}=a\times Q_{\mathrm{C}} \tag{3}$$

式中Q_{C}为电能替代电量，指通过电能替代增加的电能消费量。

4)清洁能源消纳率

清洁能源消纳率A_{22}用于表征该区域在统计期间内清洁能源实际发出的电量占总发电量的比例，其高低可以用来反映可再生能源的实际利用效率以及对环境的积极影响。

$$A_{22}=\frac{Q_{\mathrm{G}}}{G}\times 100\,\% \tag{4}$$

式中G为总发电量。

5)可再生能源利用率

可再生能源利用率A_{23}用于表征该区域在统计期间内可再生能源的利用比例，其高低可以用来衡量系统有效利用可再生能源的程度。

$$A_{23}=\frac{\sum P^{\mathrm{w-pass}}}{\sum P^{\mathrm{pv}}+\sum P^{\mathrm{wt}}}\times 100\,\% \tag{5}$$

式中：$P^{\mathrm{w\text{-}pass}}$为输送通道的最大负荷；$P^{\mathrm{pv}}$为光伏电站最大出力；$P^{\mathrm{wt}}$为风力发电最大出力。

6)灵活性电源装机容量占比

灵活性电源装机容量占比C_{21}为新型配电网中灵活性电源装机容量占清洁能源总装机的比例。灵活性电源包括抽水蓄能、储能、气电装机等。

$$C_{21}=\frac{L_{\mathrm{G}}}{G_{\mathrm{C}}}\times 100\,\% \tag{6}$$

式中：L_{G}为灵活性电源装机容量；G_{C}为清洁能源装机容量。

7)电力电子设备渗透率

电力电子设备渗透率C_{22}为新型配电网中电力电子设备额定容量占系统总容量的比例。

$$C_{22}=\frac{C_{\mathrm{Z}}}{C}\times 100\,\% \tag{7}$$

式中：C_{Z}为电力电子设备额定容量之和，C为系统总容量。

8)可再生能源调控率

可再生能源调控率占比C_{23}为新型配电网中参与调控的可再性能源装机容量占清洁能源总装机的比例，其高低可以用来衡量系统弹性承受能力。

$$C_{23}=\frac{C_{\mathrm{K}}}{C_{\mathrm{Q}}}\times 100\,\% \tag{8}$$

式中：C_{K}为可被控的可再生能源装机容量；C_{Q}为清洁能源装机容量。

9)可调节负荷资源比例

可调节负荷资源比例C_{25}表示新型配电网中可调节负荷资源占最大负荷的比例，可调节负荷资源包括可中断负荷、虚拟电厂、微电网、综合能源等。

$$C_{25}=\frac{C_{\mathrm{T}}}{P_{\mathrm{max\,p}}}\times 100\,\% \tag{9}$$

式中：C_{T}为可调节负荷资源容量之和；$P_{\mathrm{max\,p}}$为最大负荷。

10)最大方式峰谷差

最大方式峰谷差C_{31}为该区域最大方式下年/典型日负荷曲线的峰谷差。

$$C_{31}=P_{\mathrm{max\,1}}-P_{\mathrm{min\,1}} \tag{10}$$

式中：$P_{\mathrm{max\,1}}$为最大方式下负荷曲线最大值；$P_{\mathrm{min\,1}}$为最大方式下负荷曲线最小值。

11)最小方式峰谷差

最小方式峰谷差C_{32}为该区域最小方式下年/典型日负荷曲线的峰谷差。

$$C_{32}=P_{\mathrm{max\,2}}-P_{\mathrm{min\,2}} \tag{11}$$

式中：$P_{\mathrm{max\,2}}$为最大方式下负荷曲线最大值；$P_{\mathrm{min\,2}}$为最大方式下负荷曲线最小值。

12)平均用电负荷率

平均用电负荷率C_{33}为统计期内该区域每日用电负荷率的平均值。

$$C_{33}=\frac{\sum L_{\mathrm{D}}}{N_{\mathrm{D}}}\times 100\,\% \tag{12}$$

式中：L_{D}为日用电负荷率等于该区域日平均用电负荷除以该日最大用户负荷；N_{D}为统计天数。

13)主变平均负载率

主变平均负载率D_{21}为该区域主变平均负载率，衡量该区域主变的利用水平。

$$D_{21}=\frac{\sum P_{\mathrm{T}}/P_{\mathrm{M}}}{\sum N_{\mathrm{T}}}\times 100\,\% \tag{13}$$

式中：P_{T}为主变平均负荷；P_{M}为最大负荷；N_{T}为主变数量。

14)线路平均负载率

高压线路平均负载率D_{22}、中压线路平均负载率D_{23}为该区域高压/中压线路平均负载率，衡量该区域线路的利用水平。

$$D_{22}=\frac{\sum P_{\mathrm{GT}}/P_{\mathrm{M}}}{\sum N_{\mathrm{G}}}\times 100\,\% \tag{14}$$

$$D_{23}=\frac{\sum P_{\mathrm{ZT}}/P_{\mathrm{M}}}{\sum N_{\mathrm{Z}}}\times 100\,\% \tag{15}$$

式中：P_{GT}为高压线路平均负荷；P_{M}为最大负荷；N_{G}为高压线路数量；P_{ZT}为中压线路平均负荷；P_{M}为最大负荷；N_{Z}为中压线路数量。

15)公用配变平均负载率

公用配变平均负载率 D_{24} 为该区域公用配变平均负载率，衡量该区域公用配变的利用水平。

$$D_{24}=\frac{\sum P_{\mathrm{T1}}/P_{\mathrm{M}}}{\sum N_{\mathrm{T1}}}\times 100\,\% \tag{16}$$

式中：P_{T1} 为公用配变平均负荷；N_{T1} 为公用配变数量。

16)数字变电站覆盖率

数字变电站覆盖率 E_{11} 为数字变电站占全部变电站的比例。

$$E_{11}=\frac{N_{\mathrm{S}}}{N}\times 100\,\% \tag{17}$$

式中：N_{S} 为数字变电站数量；N 为变电站数量。

17)数字化线路覆盖率

数字化高压线路覆盖率 E_{12}、数字化中压线路覆盖率 E_{13} 分别为数字化高压/中压线路、数字化中压线路占全部高压/中压线路的比例。

$$E_{12}/E_{13}=\frac{N_{\mathrm{SGL}}/N_{\mathrm{SZL}}}{N_{\mathrm{GL}}/N_{\mathrm{ZL}}}\times 100\,\% \tag{18}$$

式中：N_{SGL} 为数字化高压线路数量；N_{SZL} 为数字化中压线路数量；N_{GL} 为高压线路数量；N_{ZL} 为中压线路数量。

18)数字化配变覆盖率

数字化配变覆盖率 E_{14} 为数字化配变占全部配变的比例。

$$E_{14}=\frac{N_{\mathrm{S}}}{N_{\mathrm{T1}}}\times 100\,\% \tag{19}$$

19)智能量测终端覆盖率

智能量测终端覆盖率 E_{18} 为智能量测终端占全部量测终端的比例[22]。

$$E_{18}=\frac{N_{\mathrm{Z}}}{N_{\mathrm{C}}}\times 100\,\% \tag{20}$$

式中：N_{Z} 为智能量测终端数量；N_{C} 为量测终端数量。

20)智能量测体系主站算力

智能量测体系主站算力 E_{19} 用于表征配电网智能量测体系主站的算力水平，为主站服务器每秒执行的浮点运算次数，TFLOPs。

$$E_{19}=\sum K \tag{21}$$

式中 K 为主站服务器每秒执行的浮点运算数量。

21)线路自愈覆盖率

线路自愈覆盖率 E_{22} 用于表征具有自愈功能的配电线路占其总数的比例。

$$E_{22}=\frac{\sum L_{\mathrm{Z}}}{L}\times 100\,\% \tag{22}$$

式中：L_{Z} 为自愈线路数量；L 为线路数量。

2　新型配电网规划评估方法研究

本文针对新型配电网规划进行综合评价，构建了基于博弈综合赋权-VIKOR 法的评估模型，首先通过 DEMATEL 法对指标主观赋权，同时使用 CRITIC 法对指标客观赋权，其次基于博弈论思想线性优化主客观权重计算更为科学合理的组合权重，最后结合 VIKOR 法对规划方案进行评估，其具体流程如图 2 所示。

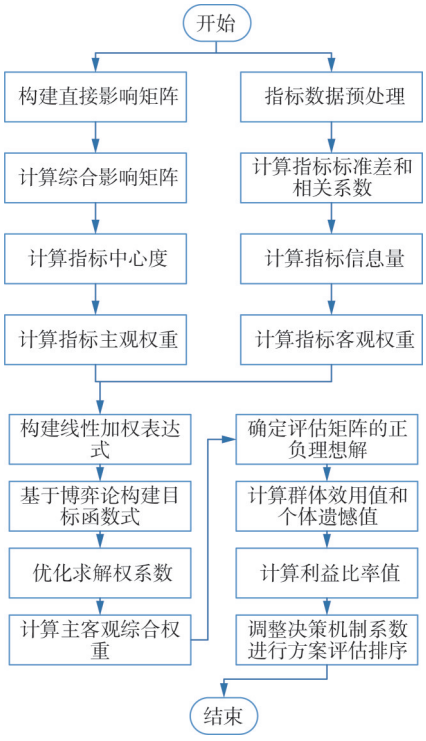


图 2　基于博弈综合赋权-VIKOR 评估模型流程图

Fig. 2　Flowchart of the game-based comprehensive weighting-VIKOR evaluation model

2.1　DEMATEL 法主观赋权

决策实验与评价实验法 DEMATEL（decision making trial and evaluation laboratory）[23-24]通过分析系统中各要素之间的逻辑关系和直接影响关系揭示系统的内在因果关系并识别关键因素，并通过计算中心度的大小决定指标权重的高低。

首先需要通过专家分析指标体系确定出各个指标相互间的直接影响程度，从而构建规范化影响矩

阵$\boldsymbol{X}$。

$$\boldsymbol{X}=\begin{bmatrix}0 & a_{12} & \cdots & a_{1n}\\ a_{21} & 0 & \cdots & a_{2n}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & 0\end{bmatrix}/\max\left(\sum_{i=1}^{n}a_{ij}\right) \tag{23}$$

式中：$\boldsymbol{X}$中元素a_{ij}表示指标i对指标j的影响程度，其取值为｛0，1，2，3，4｝，取值越大影响程度越大；max(·)表示按行求和的最大值，目的是为了规范化影响矩阵；n为指标数量。

通过式(24)矩阵变换计算综合影响矩阵$\boldsymbol{Y}$，其中$\boldsymbol{E}$为单位矩阵。

$$\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{X}(\boldsymbol{E}-\boldsymbol{X})^{-1}=\begin{bmatrix}0 & b_{12} & \cdots & b_{1n}\\ b_{21} & 0 & \cdots & b_{2n}\\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots\\ b_{n1} & b_{n2} & \cdots & 0\end{bmatrix} \tag{24}$$

式中$\boldsymbol{Y}$中元素b_{ij}表示指标i对指标j的综合影响程度，i=1，2，…，n，j=1，2，…，n。

由综合影响矩阵计算指标i的影响度D_i、被影响度C_i、中心度M_i和原因度R_i。

$$D_i=\sum_{j=1}^{n}b_{ij} \tag{25}$$

$$C_i=\sum_{j=1}^{n}b_{ji} \tag{26}$$

$$M_i=D_i+C_i \tag{27}$$

$$R_i=D_i-C_i \tag{28}$$

最后由中心度计算第i个指标的DEMATEL法主观权重w_{si}。

$$w_{si}=\frac{M_i}{\sum_{i=1}^{n}M_i} \tag{29}$$

2.2 CRITIC法客观赋权

CRITIC法[25-26]在采用熵权法考虑指标数据差异性的基础上同时考虑指标间的冲突性，对指标之间进行横向分析，充分提取指标信息量，赋权结果更加合理准确。

首先需要对效益型指标、成本型指标、居中型指标进行数据预处理，得到一个$n\times m$维的标准化数据矩阵(n为指标数量，m为方案样本数量)，以便于对指标进行有效合理的比较与分析。

效益型指标处理式为：

$$x_{ij}^{*}=\frac{x_{ij}-\min(x_i)}{\max(x_i)-\min(x_i)} \tag{30}$$

成本型指标处理式为：

$$x_{ij}^{*}=\frac{\max(x_i)-x_{ij}}{\max(x_i)-\min(x_i)} \tag{31}$$

居中型指标处理式为：

$$\begin{cases}x_{ij}^{*}=\begin{cases}\dfrac{2(x-m)}{M-m}, m\leqslant x\leqslant\dfrac{M+m}{2}\\ \dfrac{2(M-x)}{M-m}, \dfrac{M+m}{2}\leqslant x\leqslant M\end{cases}\\ m=\min(x_i), M=\max(x_i)\end{cases} \tag{32}$$

式中：x_{ij}为原始指标值第j个规划方案下第i项指标的实测数值；x_{ij}^{*}为经归一化之后第j个方案第i项指标的标准化值；x_i为第i项指标全部方案下的原始指标集合；min(·)为求最小值算子；max(·)为求最大值算子。

计算每个指标的标准差S_i以反映指标数据的差异性。

$$\bar{x}_i=\frac{1}{m}\sum_{j=1}^{m}x_{ij}^{*} \tag{33}$$

$$S_i=\sqrt{\frac{\sum_{j=1}^{m}(x_{ij}^{*}-\bar{x}_i)^2}{m-1}} \tag{34}$$

式中$\bar{x}_i$为归一化后第i项指标在全部评价方案下的算术平均值。

同时计算指标间的相关系数反映指标间的冲突性R_i。

$$r_{ij}=\operatorname{cov}(x_i^{*},x_j^{*})/(S_i\times S_j) \tag{35}$$

$$R_i=\sum_{j=1}^{m}(1-r_{ij}) \tag{36}$$

式中：x_i^{*}为归一化处理后的第i项指标全部方案样本序列；x_j^{*}为归一化处理后的第j项指标全部方案样本序列；cov()为x_i^{*}与x_j^{*}之间的样本协方差，表征两组指标序列共同波动程度；S_i为第i项归一化指标的样本标准差；S_j为第j项归一化指标的样本标准差；r_{ij}为指标i与j之间的皮尔逊相关系数。

通过指标差异性和冲突性计算指标信息量C_i。

$$C_i=S_i\times R_i=S_i\times\sum_{j=1}^{m}(1-r_{ij}) \tag{37}$$

式中R_i为第i项指标的冲突性值，该指标与其他指标相关性越强，则冲突性越弱。

最后计算指标客观权重w_{oi}。

$$w_{oi}=\frac{C_i}{\sum_{i=1}^{n}C_i} \tag{38}$$

2.3　基于博弈论的综合赋权

仅采用DEMATEL法主观赋权会受到主观随意性偏差的影响，仅采用CRITIC法客观赋权将依赖大量数据，缺乏对指标主观的侧重分析。为避免单一赋权的不足，本文引入博弈论思想对主客观权系数进行优化后线性加权[27-28]，使评估结果更准确、合理。

$$\boldsymbol{w} = \lambda_1 \boldsymbol{w}_{\mathrm{s}} + \lambda_2 \boldsymbol{w}_{\mathrm{o}} \tag{39}$$

式中：$\boldsymbol{w}$为组合权重；$\boldsymbol{w}_{\mathrm{s}}$为主观权重；$\boldsymbol{w}_{\mathrm{o}}$为客观权重；$\lambda_1$为主观权重的组合分配系数；$\lambda_2$为客观权重的组合分配系数。

基于博弈论数学模型构建目标函数如式(40)所示，对其求导后可解出两个权系数，并归一化权系数，如式(41)所示。

$$\begin{cases} \min \left\| \lambda_1 \boldsymbol{w}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{T}} + \lambda_2 \boldsymbol{w}_{\mathrm{o}}^{\mathrm{T}} - \boldsymbol{w}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{T}} \right\|_2 \\ \min \left\| \lambda_1 \boldsymbol{w}_{\mathrm{s}}^{\mathrm{T}} + \lambda_2 \boldsymbol{w}_{\mathrm{o}}^{\mathrm{T}} - \boldsymbol{w}_{\mathrm{o}}^{\mathrm{T}} \right\|_2 \\ \text{s.t. } \lambda_1, \lambda_2 \in [0, 1] \end{cases} \tag{40}$$

$$\lambda_k^* = \frac{\lambda_k}{\lambda_1 + \lambda_2}, k = 1, 2 \tag{41}$$

式中：上标T为向量转置算子，将列向量转换为行向量；$\min\| \ \|_2$为最小化优化算子；λ_k为优化求解输出的未归一化原始系数；λ_k^*为经归一化处理后的最优组合分配系数。

最后代入优化求解的权系数，即可得到组合赋权权重$\boldsymbol{w}$。

$$\boldsymbol{w} = \lambda_1^* \boldsymbol{w}_{\mathrm{s}} + \lambda_2^* \boldsymbol{w}_{\mathrm{o}} \tag{42}$$

2.4　VIKOR法综合评价排序

VIKOR法[29-30]全称为多准则妥协解排序法，类似于TOPSIS法，根据指标数据计算规划方案与理想解方案的距离以反映规划方案的优劣差距，在此基础上融入决策专家的主观判断，同时考虑群体效用最大值和个体遗憾值，所得评价排序结果具有更高的稳定性和可靠度。

首先对原始指标数据矩阵通过式(30)—(32)进行归一化处理得到归一化矩阵$\boldsymbol{X}$。在归一化矩阵里正负理想解方案指标的最优值、最劣值就是指标数据的最大值、最小值。

$$\boldsymbol{X} = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & \cdots & x_{nm} \end{bmatrix} \tag{43}$$

再计算规划方案的群体效用值S_j和个体遗憾值R_j。

$$S_j = \sum_{i=1}^{n} w_i \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \tag{44}$$

$$R_j = \max_i \left(w_i \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \right) \tag{45}$$

式中w_i为第i项评价指标的综合权重。

计算折衷决策值Q_i，其中u为决策机制系数，取值范围为[0，1]，需要专家通过实际规划评价方案设定，以权衡最大化群体效用值和最小化个体遗憾值的重要程度。

$$Q_i = \frac{u(S_i - \min(S_i))}{\max(S_i) - \min(S_i)} + \frac{(1-u)(R_i - \min(R_i))}{\max(R_i) - \min(R_i)} \tag{46}$$

最后通过所得折衷决策值Q_i进行方案评价优选排序，按从小到大排序，Q_i值最小的即为最优方案。

3　新型配电网规划评估算例应用分析

为验证本文所述的新型配电网规划评估方法的实用性和有效性，首先对文献[23]中园区评价案例进行综合评价对比，其次选取某县域4个新型配电网规划方案作为评估对象进行综合评价及分析。

3.1　不同方法评价分析

文献[23]中采用DEMATEL法主观赋权、熵权法客观赋权，基于最小鉴别信息原理组合赋权，并结合云物元模型进行综合评价。采用本文所提方法对文献[23]中的5个园区评价方案进行综合评价，并与文献[23]评价结果进行对比，取值u=0.8时，得分结果如表1所示。

表1　不同方法综合评价结果

Tab. 1　Comprehensive evaluation results of different methods

方案	文献[18]	本文方法
1	[3.958, 4.012]	0.000
2	[3.672, 3.778]	0.300
3	[3.464, 3.386]	1.000
4	[2.872, 2.898]	0.845
5	[3.312, 3.458]	0.713

通过评价结果对比分析，本文方法与文献[23]方法所得评价排序结果基本一致，方案1、2评估结果较优，方案3、4评估结果较差，且各方案评价结果优劣情况均相差不大，验证了本文所提的基

于博弈综合赋权-VIKOR综合评价模型的准确性。

3.2 新型配电网规划方案评估分析

为进一步验证本文所提评估模型在新型配电网规划方案评估中的实用性，选取某县域4个新型配电网规划方案作为评估对象，采用基于博弈综合赋权-VIKOR法进行综合评价，新型配电网规划方案指标数据如表2所示。

表2 新型配电网规划方案指标数据

Tab. 2 Index data of new distribution network planning scheme

三级指标	方案1	方案2	方案3	方案4
区域碳排放因子/($tCO_2 \cdot kWh^{-1}$)	0.5	0.56	0.51	0.46
清洁能源减排量/tCO_2	130	322	229	199
电能替代减排量/tCO_2	0.395	0.329	0.468	0.567
电能占终端能源消费比重	100	100	100	100
清洁能源装机占比/%	95.1	88.1	82.9	73.8
可再生能源消纳率/%	92	93	98	94
可再生能源利用率/%	93	91	97	96
重载线路比例/%	0	0	6	0

3.2.1 指标赋权结果分析

通过分析新型配电网的特征，查阅相关规划评价技术规范及专家咨询，确定指标间的相互直接影响程度，由式(23)—(29)计算指标主观权重。同时根据指标定义及计算方法获取指标原始数据，由式(30)—(32)对指标数据进行标准化处理，通过式(33)—(38)计算指标客观权重。

基于博弈论结合主客观权重由式(39)—(42)求解得出优化权系数$\lambda_1^* = 0.5269$及$\lambda_2^* = 0.4731$，组合权重结果如图3所示，进一步可得一级指标的组合权重如图4所示。

根据图3权重结果可知，基于博弈综合赋权充分结合了主客观赋权的优势，同时考虑了决策的专家的主观侧重点和指标数据的波动信息量，所得权重结果分布合理有效，数据波动起伏未出现明显波动偏差。

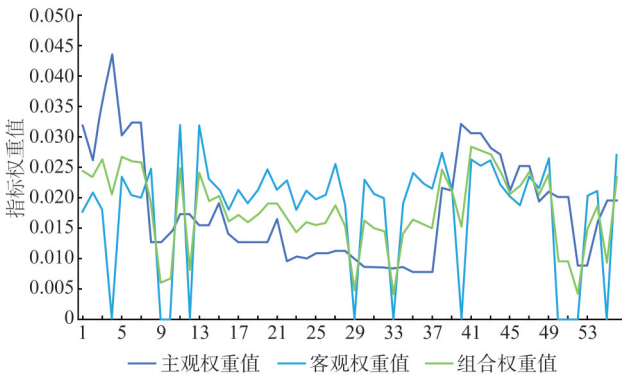


图3 指标赋权结果

Fig. 3 Index weighting results

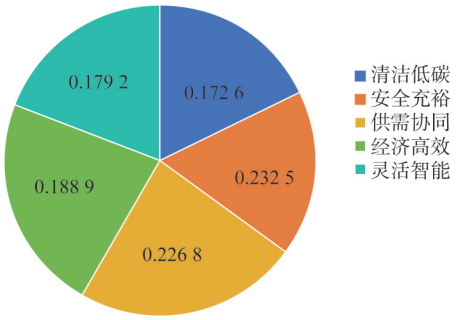


图4 一级指标组合权重

Fig. 4 First-level index weights

根据图4一级指标权重结果，安全裕度所占权重最大，为0.2325，清洁低碳所占权重最小，为0.1726。其中，清洁低碳中清洁能源装机占比指标权重最大，为0.0266；安全裕度中重载配变比例指标权重最大，为0.0249；供需协同中线路平均分段数指标权重最大，为0.0188；经济高效中主变平均负载率指标权重最大，为0.0283；灵活智能中数字化高压线路覆盖率指标权重最大，为0.0242。

3.2.2 综合评估结果分析

由式(30)—(32)标准化后的指标数据确定方案正负理想解，通过VIKOR法由式(43)—(46)计算得出4个方案的最终评分排序结果如表3所示。

据表3评估排序结果所示，本文所构建方法评价排序结果与TOPSIS法结果基本吻合，方案3、4

表3 新型配电网规划方案综合评价排序结果对比

Tab. 3 Comparison of comprehensive evaluation ranking results of new distribution network planning schemes

方法	方案1	方案2	方案3	方案4	排序结果(从优到劣)
博弈综合赋权-TOPSIS法	0.5033	0.4794	0.5320	0.5554	方案4、方案3、方案1、方案2
本文方法(u=0.8)	0.5417	1.0000	0.2657	0.2000	方案4、方案3、方案1、方案2
本文方法(u=0.7)	0.4740	1.0000	0.2325	0.3000	方案3、方案4、方案1、方案2
本文方法(u=0.6)	0.4062	1.0000	0.1993	0.4000	方案3、方案4、方案1、方案2

整体评分都较优，方案1、2评分排序结果较差。但TOPSIS法仅仅考虑了指标整体优劣情况，得分结果客观单一。当决策专家进行VIKOR法排序，结合不同的规划场景，决策机制系数u取值不同时，排序结果稍有浮动变化，整体排序结果时方案3、4变化较大。从指标情况来看，方案3在传统指标上稍有欠缺，如重载线路比例、$N-1$通过率等指标水平有待提升，但新型指标水平都很高，而方案4则重在传统指标上最优，总的来说，方案3、4都是可以推行的评价优秀方案，侧重点各有不同，决策专家可以在不同规划场景选取最优合适方案。结论表明本文所构建的基于博弈综合赋权-VIKOR评估模型可以对配电网进行合理准确评价排序。

综上所述，本文所叙述的新型配电网规划评估方法对不同方案能够进行一定程度评价，以获得不同方案整体的差异情况，能评估得出规划方案各个方面优劣情况，为新型配电网的规划和发展提供有效的支持和保障。

4　结论

为准确评估新型配电网规划方案，本文在对现行规划评估指标体系进行总结的基础上与国内外新型电力系统评价指标的研究成果相结合，构建了一套适用于评价新型配电网规划方案的指标体系，提出了基于博弈综合赋权-VIKOR法的综合评估模型，并结合4个规划方案实例进行了分析，结论如下。

1）本文构建的新型配电网规划评估指标体系以清洁低碳、安全充裕、供需协同、经济高效、灵活智能5大维度为核心，包括13个二级指标和56个三级指标，能全面反映新型配电网“电力+算力”的特点和内涵，体现出该指标体系的科学性、先进性。

2）本文采用DEMATEL法主观赋权，充分考虑决策专家的主观意向确定指标间的相互影响关系，同时结合指标数据的差异性和冲突性采用CRITIC法进行客观赋权，通过博弈论优化权系数计算主客观组合权重，避免了单一赋权的劣势，并结合VIKOR法构建完整的综合评估排序模型，可以对新型配电网规划方案进行科学合理地评估排序。

3）本文对某配电网4个规划方案，采用基于博弈综合赋权-VIKOR评估模型进行综合评价，对比分析了不同赋权方法的权重结果，基于博弈综合赋权能有效结合主客观赋权的优势，评估排序结果反映了各个方案在不同指标层面的优劣情况，以便于对规划方案提供科学准确的指导意见，验证了本文新型配电网规划评估方法的科学合理性。

在后续研究中，将进一步完善新型配电网规划评估指标体系中的指标定义和指标计算方法，并根据新型配电网建设情况，结合智能算法和知识图谱，完善规划评估指标体系的灵活构建方法、差异化数字化评估方法以及规划方案评估结果的展示，继续提升规划评估方法的通用性和实用性。

参考文献

[1] 何洋，杜忠明，谭洪江，等. 新型电力系统发展蓝皮书[M]. 北京：中国电力出版社，2023.

[2] 任大伟，肖晋宇，侯金鸣，等. 双碳目标下我国新型电力系统的构建与演变研究[J]. 电网技术，2022，46(10)：3831－3839.
REN Dawei，XIAO Jinyu，HOU Jinming，et al. Construction and evolution of China’s new power system under dual carbon goal[J]. Power System Technology，2022，46(10)：3831－3839.

[3] 刘吉臻，王庆华，胡阳，等. 新型电力系统的内涵、特征及关键技术[J]. 新型电力系统，2023，1(1)：49－65.
LIU Jizhen，WANG Qinghua，HU Yang，et al. Connotation，characteristics and key technologies of new power systems[J]. New Type Power Systems，2023，1(1)：49－65.

[4] 韩肖清，李廷钧，张东霞，等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3036－2046.
HAN Xiaoqing，LI Tingjun，ZHANG Dongxia，et al. New issues and key technologies of new power system planning under double carbon goals[J]. High Voltage Engineering，2021，47(9)：3036－3046.

[5] 范伟，王东杰，张智远，等. 基于区块链的配电网能效自动化管理方法[J]. 电测与仪表，2024，61(3)：124－131.
FAN Wei，WANG Dongjie，ZHANG Zhiyuan，et al. Automatic management method for energy efficiency of distribution network based on block chain[J]. Electrical Measurement & Instrumentation，2024，61(3)：124－131.

[6] 蔡新雷，董锴，孟子杰，等. 考虑源荷可调节资源参与的电网风险评估指标体系及方法[J]. 广东电力，2024，37(1)：27－38.
CAI Xinlei，DONG Kai，MENG Zijie，et al. Index system and method of power grid risk assessment with participation of adjustable source and load resource[J]. Guangdong Electric Power，2024，37(1)：27－38.

[7] 闫宇露，程瑜，陈熙. 适应光伏高渗透接入的配电网拓扑及储荷资源协同规划[J]. 广东电力，2024，37(12)：50－60.
YAN Yulu，CHENG Yu，CHEN Xi. Distribution network topology and coordinated planning of storage and load resources adapted to photovoltaic high penetration access[J]. Guangdong Electric Power，2024，37(12)：50－60.

[8] 李海涛，崔树春，尹华，等. 基于随机森林算法的综合能源配电网电能质量评估方法与网架优化模型[J]. 电测与仪表，

2024，61(5)：17－23.
LI Haitao，CUI Shuchun，YIN Hua，et al. Power quality evaluation method and grid optimization model of integrated energy distribution network based on stochastic forest algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation，2024，61(5)：17－23.

[9] 李聚聪，李荣敏，荀超，等. 新型电力系统指标体系研究[J]，电气工程学报，2025，20(3)：188－198.
LI Jucong，LI Rongmin，XUN Chao，et al. Research on the new power system index system [J]. Journal of Electric Engineering，2025，20(3)：188－198.

[10] ZHANG J，GAO C，WANG T，et al. A dynamic evaluation method for high-permeability new energy distribution network planning cosidering multistage development trends [J]. Frontiers in Energy Research，2022（10）：958892.1－958892.9.

[11] FAN W，LIU D，YANG Z，et al. A multidimensional adaptive assessment model for innovative technologies in new-type power system [C]//2023 5th Asia Energy and Electrical Engineering Symposium（AEEES），March 23－26，2023，Chengdu，China. New York：IEEE，2023：1－4.

[12] 艾欣，秦珺晗，胡寰宇，等. 基于最优最劣法-熵权-逼近理想解排序法的电网安全与效益综合评价[J]. 现代电力，2021，38(1)：60－68.
AI Xin，QIN Junhan，HU Huanyu，et al. Comprehensive evaluation of power grid security and benefit based on BWM entropy weight TOPSIS method[J]. Modern Electric Power，2021，38(1)：60－68.

[13] 宣文博，李慧，柳璐，等. 考虑深度嵌入聚类多场景的城市输电网规划综合评估方法[J]. 智慧电力，2023，51(5)：36－43.
XUAN Wenbo，LI Hui，LIU Lu，et al. Comprehensive evaluation method for urban transmission power grid planning considering multi-scenarios based on deep embedding clustering [J]. Smart Power，2023，51(5)：36－43.

[14] 康俊杰，赵春阳，周国鹏，等. 基于熵权-德尔菲法的源网荷储多能互补项目布局评估方法研究[J]. 中国电力，2024，57(12)：120－131.
KANG Junjie，ZHAO Chunyang，ZHOU Guopeng，et al. Research on the layout evaluation method of source-network-load-storage and multi-energy complementary projects based on Entropy weight and Delphi method[J]. Electric Power，2024，57(12)：120－131.

[15] 李响，牛赛. 双碳目标下源-网-荷多层评价体系研究[J]. 中国电机工程学报，2021，41(S1)：178－184.
LI Xiang，NIU Sai. Study on Multi-layer evaluation system of source-grid-load under carbon-neutral goal[J]. Proceedings of the CSEE，2021，41(S1)：178－184.

[16] 李娜，佟春生. 基于DPSIR模型的城市配电网规划评价指标体系研究[J]. 电气工程学报，2016，11(2)：28－32.
LI Na，TONG Chunsheng. Study of assessment index system of urban distribution network planning based on DPSIR model [J]. Journal of Electric Engineering，2016，11(2)：28－32.

[17] 易俊，林伟芳，任萱，等. 新型电力系统发展水平指标体系构建及综合评价方法研究[J]. 电网技术，2024，48(9)：3758－3768.
YI Jun，LIN Weifang，REN Xuan，et al. Research on construction of index system and comprehensive evaluation method of development level of new power sys-tem [J]. Power System Technology，2024，48(9)：3758－3768.

[18] 江霖，王灿彬，仇炜，等. 基于电-碳协同优化的柔性互联配电网可靠性评估[J]. 南方电网技术，2026，20(6)：125－135.
JIANG Lin，WANG Canbin，QIU Wei，et al. Reliability assessment of flexible interconnected distribution networks based on electricity-carbon synergistic optimization[J]. Southern Power System Technology，2026，20(6)：125－135.

[19] 杨占杰，谢虎，张伟，等. 基于多区域全分布算法的主动配电网动态经济调度方法[J]. 电测与仪表，2024，61(8)：143－149.
YANG Zhanjie，XIE Hu，ZHANG Wei，et al. Dynamic economic dispatching method of active distribution network based on multi-region full distribution algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation，2024，61(8)：143－149.

[20] 张宁，李姚旺，黄俊辉，等. 电力系统全环节碳计量方法与碳表系统[J]，电力系统自动化，2023，47(9)：2－12
ZHANG Ning，LI Yaowang，HUANG Junhui，et al. Carbon measurement method and carbon meter system for whole chain of power system[J]. Automation of Electric Power Systems，2023，47(9)：2－12.

[21] IPCC. 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories[M]. Geneva，Switzerland：Intergovenmental Panel on Climate Change，2006.

[22] DU W，HAN T，HU S. Research on the evaluation of multi-energy microgrid under the background of new power system [J]. Mathematical Problems in Engineering，2022(1)：1－14.

[23] 黄悦华，王朔浩，杨楠，等. 基于综合赋权与云熵优化的园区综合能源系统评价[J]. 电力科学与技术学报，2024，39(4)：201－214.
HUANG Yuehua，WANG Shuohao，YANG Nan，et al. Evaluation of park integrated energy system based on comprehensive weighting and cloud entropy optimization [J]. Journal of Electric Power Science and Technology，2024，39(4)：201－214.

[24] 林炜翰，孙建军，唐钰政，等. 有源型电能质量治理设备电网适应性评估方法[J]. 电力自动化设备，2023，43(4)：185－191.
LIN Weihan，SUN Jianjun，TANG Yuzheng，et al. Evaluation method of power grid adaptability of active power quality control equipment[J]. Electric Power Automation Equipment，2023，43(4)：185－191.

[25] 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.

[26] 王敏，邹婕，王惠琳，等. 基于改进的AHP-CRITIC-MARCOS配电网设备风险评估方法[J]. 电力系统保护与控制，2023，51(3)：164－172.
WANG Min，ZOU Jie，WANG Huilin，et al. Improved AHP-CRITIC-MARCOS-based risk assessment method for distribution network equipment [J]. Power System Protection and Control，2023，51(3)：164－172.

[27] 肖白，杨士伟，王宵雅，等. 基于博弈论组合赋权的GRA-TOPSIS-BS电能质量综合评估[J]. 电气应用，2024，43(1)：77－85.

（下转第 129 页 Continued on Page 129）