

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241063

# 基于博弈论-改进云模型的新能源电力系统适应性评估

汤明润<sup>1</sup>, 李若暘<sup>2</sup>, 程晓钰<sup>3</sup>, 代馨尹<sup>1</sup>, 于雪丰<sup>1</sup>, 杨淑霞<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学, 北京 102206; 2. 国网北京电力公司, 北京 100054; 3. 北京国电通网络技术有限公司, 北京 100071)

**摘要:** 发展新能源电力系统是实现双碳目标的要求, 因此对一定状态下新能源电力系统适应性进行评估具有重要意义。首先, 分析了新能源电力系统适应性的影响因素, 基于新能源电力系统的特点, 建立了适应性评价指标体系, 包含电网结构、经济性和能源结构等3个一级指标及15个二级指标。其次, 基于博弈理论进行组合赋权, 综合了熵权法、CRITIC法及变异系数法3种客观赋权法, 得到最佳组合权重。然后, 提出了改进云模型, 以此克服指标本身的随机性, 并通过组合权重对云模型进行改进, 用以评价新能源电力系统的适应能力。最后, 选取我国A地区配电网进行算例分析, 验证了所提评估模型的准确性及有效性, 为识别新能源电力系统的脆弱性、提升新能源电力系统的适应能力提供可靠的建议。

**关键词:** 新能源电力系统; 适应性评估; 博弈论思想; 改进云模型; 综合评价

## Adaptability evaluation of new energy power systems based on game theory and an improved cloud model

TANG Mingrun<sup>1</sup>, LI Ruoyang<sup>2</sup>, CHENG Xiaoyu<sup>3</sup>, DAI Xinyin<sup>1</sup>, YU Xuefeng<sup>1</sup>, YANG Shuxia<sup>1</sup>

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100054, China; 3. Beijing Guodiantong Network Technology Co., Ltd., Beijing 100071, China)

**Abstract:** Developing new energy power systems is essential for achieving the dual-carbon goal. Therefore, it is of great significance to evaluate the adaptability of new energy power systems in specific conditions. First, the influencing factors of adaptability in new energy power systems are analyzed. Based on the characteristics of the systems, an adaptability evaluation index system is established, comprising three primary indicators, i.e., grid structure, economic efficiency, and energy structure, along with 15 secondary indicators. Second, a combination weighting method based on game theory is proposed, integrating three objective assignment methods: the entropy weight method, CRITIC method, and the coefficient of variation methods, to obtain the optimal combined weights. Third, an improved cloud model is proposed to overcome the randomness of the indicators. The cloud model is improved using the combined weights to evaluate the adaptability of new energy power systems. Finally, a case study is conducted on the distribution network in area A of China to verify the accuracy and validity of the proposed evaluation model. The findings provide reliable recommendations for identifying system vulnerability and improving the adaptability of new energy power systems.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 72074074).

**Key words:** new energy power system; adaptability evaluation; game theory; improved cloud model; comprehensive evaluation

## 0 引言

在“双碳”目标驱动下, 传统电力系统逐渐演变为以新能源为主体的新能源电力系统, 是清洁低碳、安全高效能源体系的重要组成部分<sup>[1]</sup>, 但由于新能源自身出力的随机性和波动性, 电力系统面临

着电源结构、电网形态、技术基础等方面的问题, 这些问题给电力系统的安全运行带来巨大挑战<sup>[2]</sup>。传统电力系统领域的评估理论和方法很难对新能源电力系统的适应能力进行全面准确的评估。因此, 亟需基于新能源电力系统的特点开展新能源电力系统适用性评价体系构建及适应能力评价研究。

近年来, 国内外学者就传统电力系统适应性评估展开的相关研究, 主要涉及可靠性与经济性两个

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(72074074)

角度<sup>[3-4]</sup>。文献[5]针对交直流混合电网的静态电压稳定性进行评价与研究,建立了相应的评估指标体系,并通过多种应用场景验证方法的有效性。文献[6]从安全性、可靠性和经济性3个角度出发,建立了配电网适应性的评价指标体系,为配电网的建设提供了决策依据。文献[7]从可靠性、电能质量等角度出发,对配电网的适应能力进行综合评估。文献[8]建立了包括经济效益等5个维度的综合评价指标体系,对项目的经济效益进行综合评价。然而,以往的评价体系忽略了高比例新能源接入对电力系统的影响,所建的综合评价体系还需要完善,反映新能源电力系统特征的评价指标还需要深入挖掘。

在指标权重计算方面,常见的方法为主客观组合赋权法。文献[9]采用变异系数法计算出主观评价和客观评价的综合权重。文献[10]运用层次分析法融合风险熵权法的主客观赋权法,采用基线网络法进行组合赋权。文献[11]基于乘积法对熵权法、独立性权系数法等方法进行组合赋权。文献[12]运用博弈论思想确定多种方法的组合权重。其中,利用博弈论思想确定的组合权重考虑到了不同权重确定方法间的相关性,更加精确有效。在综合评价方法方面,多准则决策分析方法得到了广泛使用<sup>[13-14]</sup>。文献[15]采用优劣解距离法对新能源功率预测进行了评价。文献[16]运用层次分析法,对配电网的适应性进行评估分析。文献[17]将改进反熵权法应用于屋顶光伏并网评估,并将其与改进逼近理想解法相结合进行评估。文献[13-18]采用的评价方法,无法有效解决部分指标存在模糊性和随机性的问题。文献[19]针对评价目标的模糊性和随机性,采用云模型进行评价,有效解决了这一问题,使评价结果更加准确可靠。

基于上述研究成果,本文提出一种基于博弈论和改进云模型的新能源电力系统的适应性评价模型。首先,考虑到新能源电力系统的特点,本文从电网结构、经济性和能源结构3方面建立了适应性评价指标体系。然后,运用博弈论结合3种客观赋权法得到最优组合权重。其次,采用改进云模型评价方法,克服了指标本身的随机性,使得评估结果更加符合实际情况。最后,以我国A地区配电网为例,验证模型的有效性与合理性,为识别新能源电力系统的脆弱性与提升其适应性提供可靠的方案。

## 1 适应性评估指标体系

### 1.1 适应性影响因素分析

在梳理适应性评估研究成果<sup>[20-21]</sup>的基础上,本文给出了新能源电力系统适应性的界定:面对新能

源的随机性和波动性等不确定性因素,电力系统能够利用自身结构特性达到抵抗不确定性扰动而保证系统稳定运行的能力。

在建立适应性评价指标体系的过程中,对影响适应性的因素进行研究分析是很有必要的,影响因素主要包括电源情况、电能质量、供电能力等方面。

#### 1) 电源情况

随着新能源电源装机规模的不断扩大和常规电源机组比重的不断降低,电力系统的调频能力将逐渐降低。新能源出力受地理位置、气象条件等因素的影响存在不确定性,难以准确预测新能源的出力,严重影响系统的安全可靠运行。

#### 2) 电能质量

由于新能源常通过电力电子元件接入电网,电压总谐波畸变率在谐波源处产生的不确定性最强,随着谐波源的增多,多个谐波叠加会加剧电网的谐波污染。同时,新能源的出力波动会引起电网电压的波动或闪变,从而影响电力系统的适应能力。

#### 3) 供电能力

随着新能源并网比例的提高,电网对供电能力有着更高的要求。在某些经济发达的区域,在用电高峰时期主变压器总是满负荷或过载,导致失负荷现象。另外,电力系统自身的供电瓶颈使得各变电站间的负荷转移出现严重问题,导致系统的总体供电水平较低,无法满足客户的用电需求,使得电力系统的适应能力大大降低。

## 1.2 适应性评估指标体系建立

本文在新能源电力系统指标体系的构建过程中,基于上述对适应性影响因素的分析,考虑到新能源电力系统的特点,并在分析国内外学者研究成果后,挖掘出大量可采用指标。在充分考虑可行性、通用性、系统性和科学性<sup>[22-23]</sup>等原则后,对指标进行初步筛选。随后,对相关文献进行回顾,并向多位专家咨询后,对指标进行反复筛选和优化,从电网结构、经济性和能源结构3个维度出发,构建了适应性评估指标体系,如表1所示。

### 1.3 指标内涵及计算方法

#### 1.3.1 电网结构

##### 1) 电压合格率 $A_1$

电压合格率指在电网正常工作状态下,监测点电压在合格范围内的时间总和与总检测时间的百分比。

##### 2) 平均供电可用率 $A_2$

平均供电可用率为统计期间对用户有效供电时长占统计总时长的百分比<sup>[24]</sup>。

表 1 适应性评估指标体系  
Table 1 Adaptability evaluation index system

一级指标	二级指标
电网结构 $A$	电压合格率 $A_1$
	平均供电可用率 $A_2$
	站间联络率 $A_3$
	线路负载率 $A_4$
	变压器负载率 $A_5$
经济性 $B$	线路过载率 $B_1$
	变压器过载率 $B_2$
	容载比 $B_3$
	电网线损贡献率 $B_4$
	电力生产弹性系数 $B_5$
能源结构 $C$	新能源渗透率 $C_1$
	新能源消纳率 $C_2$
	新能源波动性 $C_3$
	净负荷波动率 $C_4$
	新能源减排量 $C_5$

### 3) 站间联络率 $A_3$

站间联络率指所有实现站间联络的线路与线路总数的比值<sup>[16]</sup>。

### 4) 线路负载率 $A_4$

线路负载率为电网日平均用电负荷与年度最大负荷之比，反映电网线路的载荷情况<sup>[16]</sup>。

### 5) 变压器负载率 $A_5$

变压器负载率为变压器承担的最大负荷与变压器总装机容量的比值<sup>[25]</sup>。

## 1.3.2 经济性

### 1) 线路过载率 $B_1$

线路过载率是指在正常条件下，负载率超过80%的线路数量与线路总数的比例，它的数值越小，说明线路的运行状态越好，对新能源接入的适应能力也越强<sup>[16]</sup>。

### 2) 变压器过载率 $B_2$

变压器过载率为负载率大于变压器额定容量80%的变压器数量占全部变压器数量的比例<sup>[16]</sup>。

### 3) 容载比 $B_3$

容载比是指在电网中的变压器总容量与同年峰值负荷之比，是衡量变压器的运行状况及利用效率的指标<sup>[26]</sup>。

### 4) 电网线损贡献率 $B_4$

电网线损贡献率是指接入高比例新能源造成的电网损耗与接入前的电网损耗之比<sup>[26]</sup>。

### 5) 电力生产弹性系数 $B_5$

电力生产弹性系数为国内生产总值和发电量

年均增长速度的比率<sup>[27]</sup>。

## 1.3.3 能源结构

### 1) 新能源渗透率 $C_1$

新能源渗透率表示新能源的装机容量与总装机容量的比值<sup>[25]</sup>。

### 2) 新能源消纳率 $C_2$

新能源消纳率为新能源电源的实际发电量与新能源所允许的最大发电量的比值<sup>[16]</sup>。

### 3) 新能源波动性 $C_3$

新能源波动性体现了新能源输出功率在时间尺度上的变动程度<sup>[27]</sup>。

### 4) 净负荷波动率 $C_4$

净负荷波动率指电网净负荷的单位时间变动率，体现了净负荷单位时间内的波动强度<sup>[25]</sup>。

### 5) 新能源减排量 $C_5$

新能源减排量指通过火电厂的碳排放量与火电厂发电量的比值，乘上新能源发电量所得到的指标，反映的是在产生相同电量的情况下，新能源发电厂比火力发电厂所减少的碳排放量<sup>[27]</sup>。

## 2 适应性评估模型

### 2.1 博弈论-改进云模型可行性分析

将多种赋权方法结合，能够充分发挥各方法的优点，但很容易出现权重失衡的问题<sup>[20-21]</sup>。为避免上述问题的出现，本文提出一种基于博弈论的组合赋权方法，通过对多种方法计算得到的权重进行线性组合，得到较为均衡的权重组合结果，从而得到较为有效的新能源电力系统适应性评价结果。同时，考虑到新能源电力系统较为复杂，获得的数据可能存在不确定性和不完全性，本文引入了云模型，通过3种云数字特性全面衡量新能源电力系统的复杂性和数据的不确定性，为新能源电力系统的适应性评价提供更灵活、准确的结果。

### 2.2 基于博弈论思想的指标权重设置

#### 2.2.1 指标权重计算方法

在计算指标权重时，常用的方法有层次分析法、熵值法、CRITIC 权重法等<sup>[22]</sup>。但上述计算方法均存在一定的不足，难以准确地计算指标权重，甚至可能出现严重偏差。为克服这一问题，本文将熵权法、变异系数法和 CRITIC 法结合起来，提出一种组合赋权模型，以实现各方法的优势互补、提高评价模型的准确性。CRITIC 法考虑了指标内的相关性，弥补了熵权法不足的同时，忽视了数据间的离散性。而熵权法、变异系数法却充分考虑了数据的离散性，能够反映指标的变异性，保障了评价结果的稳定、客观。同时，本文提出的适应性评估指标

体系涉及到的指标较为复杂, 而组合赋权模型通过对 3 种方法进行改良优化, 克服了单一方法的局限性, 得到的分析结果更为可靠。因此, 在计算指标权重时, 将采用熵权法-变异系数法-CRITIC 法综合赋权法。计算基本步骤如下。

1) 为了解决各指标量纲的不同而引起的评价结果误差, 首先将数据进行归一化处理<sup>[28]</sup>。步骤如下。

(1) 构建原始决策矩阵  $B_{ij}$

假设所需要评价的方案有  $m$  个, 评价指标有  $n$  个, 第  $i$  个评价对象的第  $j$  个评价指标值为  $b_{ij}$ ,  $1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$ , 则原始决策矩阵  $B_{ij}$  为

$$B_{ij} = (b_{ij})_{m \times n} = \begin{pmatrix} b_{11} & \cdots & b_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ b_{m1} & \cdots & b_{mn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

(2) 矩阵标准化处理

根据指标的变化方向不同, 可将指标分为正向指标与负向指标, 采取极差变化法, 对原始数据进行处理。

$$\text{正向指标: } x_{ij} = \frac{b_{ij} - b_{j\min}}{b_{j\max} - b_{j\min}} \quad (2)$$

$$\text{反向指标: } x_{ij} = \frac{b_{j\max} - b_{ij}}{b_{j\max} - b_{j\min}} \quad (3)$$

式中,  $b_{j\max}$  和  $b_{j\min}$  分别表示第  $j$  个指标的最大值和最小值。

(3) 形成数据的标准化矩阵  $X_{ij}$

$$X_{ij} = (x_{ij})_{m \times n} = \begin{pmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (4)$$

2) 熵权法根据指标中包含的信息量来计算指标权重。计算的具体步骤参考文献[29]。

3) CRITIC 法通过指标之间的对比和冲突性来表达信息量, 从而确定指标的权重。计算的具体步骤参考文献[30]。

4) 变异系数法根据数据的差异程度获取不同评价指标的客观信息权重。具体步骤参考文献[31]。

### 2.2.2 基于博弈论思想进行组合赋权

基于博弈论的组合赋权法是将采用不同方法获取的权重进行组合, 以寻求最合理的指标权重的过程。

本文采用博弈论组合赋权法, 协调 3 种客观赋权法之间的冲突并寻找三者之间的一致性。该方法一方面可以综合各种赋权方法的优势, 另一方面也可以克服各权重计算方法的局限, 以获得更准确合理的指标权重<sup>[32]</sup>。基本步骤如下。

1) 权重的线性组合

本文采用熵权法、CRITIC 法和变异系数法 3 种客观赋权法分别得到新能源电力系统适应性的权重, 构成权重向量集合:  $W = \{w_1, w_2, w_3\}$ 。因此, 3 个权重向量的线性组合为

$$W = \alpha_1 w_1 + \alpha_2 w_2 + \alpha_3 w_3 \quad (5)$$

式中:  $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$  分别代表熵权法、CRITIC 法和变异系数法得到的权重;  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  分别表示 3 种客观赋权法的线性组合系数。

2) 优化组合

根据博弈集结模型的思想, 对上述 3 个权重进行最优的线性组合, 以  $W$  与  $w_1$ 、 $w_2$ 、 $w_3$  的离差和最小化为目标, 对 3 个线性组合系数  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  进行优化, 得到最合理的权重, 由此确定目标函数, 如式(6)所示。

$$\begin{aligned} \min & (|W - w_1| + |W - w_2| + |W - w_3|) = \\ & \min \left( \left| \alpha_1 w_1^T + \alpha_2 w_2^T + \alpha_3 w_3^T - w_1 \right|_2 + \right. \\ & \left. \left| \alpha_1 w_1^T + \alpha_2 w_2^T + \alpha_3 w_3^T - w_2 \right|_2 + \right. \\ & \left. \left| \alpha_1 w_1^T + \alpha_2 w_2^T + \alpha_3 w_3^T - w_3 \right|_2 \right) \end{aligned} \quad (6)$$

3) 求解优化组合系数

根据矩阵微分特性, 得到与式(1)等价的最优化一阶导数条件的线性方程组, 如式(7)所示。

$$\begin{bmatrix} w_1 w_1^T & w_1 w_2^T & w_1 w_3^T \\ w_2 w_1^T & w_2 w_2^T & w_2 w_3^T \\ w_3 w_1^T & w_3 w_2^T & w_3 w_3^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} w_1 w_1^T \\ w_2 w_2^T \\ w_3 w_3^T \end{bmatrix} \quad (7)$$

4) 计算最优的组合权重

由式(7)得到最优化的线性组合系数  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\alpha_3$  并进行归一化处理, 最终得到基于博弈论组合赋权的组合权重  $W$  为

$$W = \alpha_1^* w_1 + \alpha_2^* w_2 + \alpha_3^* w_3 \quad (8)$$

$$\text{式中: } \alpha_1^* = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3}; \quad \alpha_2^* = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3};$$

$$\alpha_3^* = \frac{\alpha_3}{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3}。$$

## 2.3 基于改进云模型的适应性评估模型

### 2.3.1 云模型基本理论

云模型是一种反映概念模糊性与随机性的模型, 体现了定量与定性之间相互转化的映射关系<sup>[33]</sup>。云模型的基本数学表达如下。

记  $W'$  为论域,  $K$  是关联于  $W'$  的定性概念。设  $\alpha \in W'$  是定性概念  $K$  的一次随机实现, 并设随机数  $\mu(\alpha) \in [0, 1]$  为  $\alpha$  隶属于  $K$  的确定性程度函数, 即  $\alpha$  对  $K$  的隶属度, 满足:  $\mu(\alpha): W' \in [0, 1]$ ,

$\forall \alpha \in W'$ 。在论域  $W'$  上,  $\alpha$  服从  $K$  的分布称作云,  $\alpha$  称作云滴<sup>[33]</sup>。

云图由 3 种云数字特征组成, 即期望  $E_x$ 、熵  $E_n$  和超熵  $H_e$ , 云数字特征表现了定性概念的定量化特征。 $E_x$  反映出云滴的分布中心, 能够刻画出定量与定性之间的转化中心, 即对新能源电力系统适应性实际情况的预期;  $E_n$  表示云滴的分散范围, 其值越小, 评价结果的可信程度就越高;  $H_e$  表示云滴的稳定度, 即云的厚度, 其值越小, 评价结果的稳定性就越高。

云生成器是云模型理论实际应用的关键, 可按工作机制划分为正向云发生器和逆向云发生器两种。利用逆向云发生器实现云滴到 3 个云数字特征的转换, 从定量转化到定性概念<sup>[34]</sup>; 采用正向云发生器实现 3 个云数字特征到云滴的转换, 实现定性到定量概念的转化<sup>[35]</sup>。本文先进行逆向云算法, 再采用正向云发生器, 分别确定新能源电力系统适应性的云数字特征和评价云图。具体流程如图 1 所示。

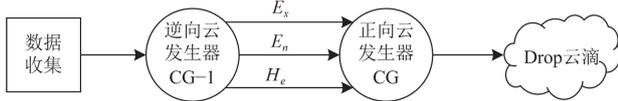


图 1 正、逆向云发生器流程

Fig. 1 Flow chart of positive and negative cloud generator

本文利用逆向云发生器计算评估的 3 个云数字特征<sup>[34]</sup>, 算法步骤如下。

1) 计算均值

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (9)$$

式中:  $\bar{x}$  为指标数据的平均值;  $x_i$  为指标中的第  $i$  个数据;  $n$  为指标中包含的数据个数。

2) 计算方差  $S^2$

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (10)$$

3) 计算 3 个云数字特征

$$\begin{cases} E_x = \bar{x} \\ E_n = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - \bar{x}| \\ H_e = \sqrt{S^2 - E_n^2} \end{cases} \quad (11)$$

本文利用正向云发生器来生成评价云图<sup>[35]</sup>, 算法步骤如下。

1) 生成随机数  $E'_n$ , 且  $E'_n \sim N(E_n, H_e^2)$ 。

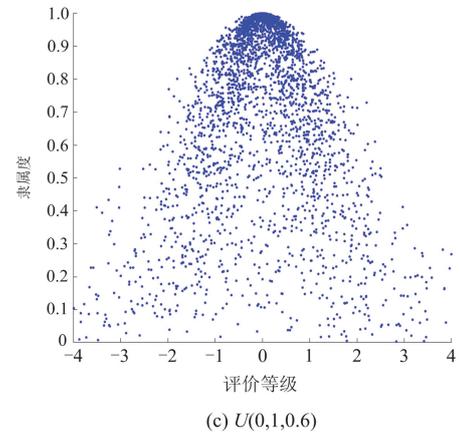
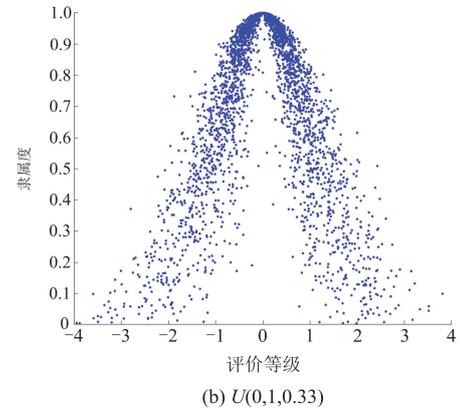
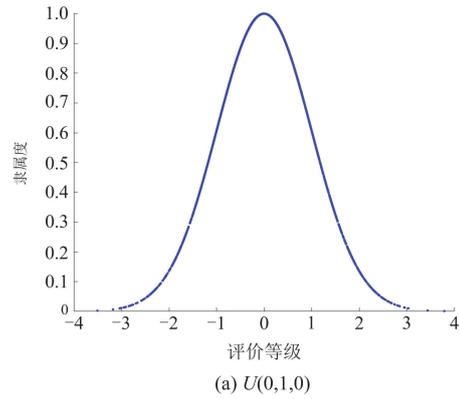
2) 生成随机数  $x$ , 且  $x \sim N(E_x, E_n'^2)$ 。

3) 求云滴  $e(x, \mu(x))$ , 且  $\mu(x) = e^{-\frac{(x-E_x)^2}{2(E_n')^2}}$ 。

采用 MATLAB2022b 软件来完成正向云发生器的计算, 以云模型图的形式直观地呈现了新能源电力系统的适应性评价结果。

### 2.3.2 云模型的 $3E_n$ 准则

云的数字特征  $U(E_x, E_n, H_e)$  决定了云图像的基本特性。当  $H_e = 0$  时, 云图像的云滴完全服从于高斯曲线, 呈正态分布, 当  $H_e$  逐渐增大时, 云滴的凝聚度减小, 云滴也随之散开, 此过程称为雾化, 过程见图 2。



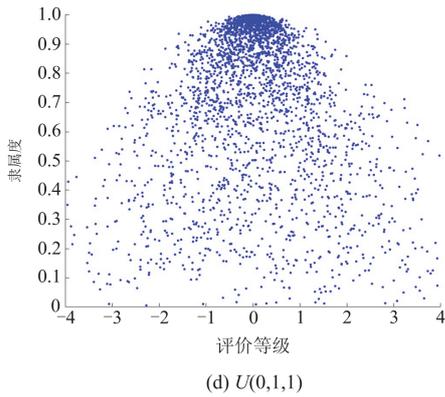


图2 云雾化过程

Fig. 2 Process of cloud atomization

在云模型中, 由于论域上的元素对定性概念的

贡献为  $C = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot E_n} \int_{E_n - 3H_e}^{E_n + 3H_e} e^{-\frac{(x-E_n)^2}{2E_n^2}} dx = 99.74\%$ , 即对

于论域  $X$  的定性概念  $T$  有贡献的定量值主要落在区间  $[E_n - 3H_e, E_n + 3H_e]$ , 区间以外的云滴元素是小概率事件, 一般可忽略。因此, 云滴落在曲线

$y = e^{-\frac{(x-E_n)^2}{2(E_n+3H_e)^2}}$  和  $y = e^{-\frac{(x-E_n)^2}{2(E_n-3H_e)^2}}$  范围内是大概率事件, 并且上述两条曲线服从高斯分布, 期望为  $E_n$ , 方差为  $H_e^2$ , 论域  $X$  的条件概率密度函数为

$f(s) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot H_e} e^{-\frac{(s-E_n)^2}{2H_e^2}}$ ,  $\forall s \in X$ , 则  $P\{E_n - 3H_e <$

$E'_n < E_n + 3H_e\} = 0.997$ , 即当  $H_e < E_n/3$  时, 落在两条曲线内的云滴对定性概念  $T$  的贡献最大。因此, 云模型在使用中要求满足雾化特性要求, 即满足  $H_e < E_n/3$ 。

### 2.3.3 确定评价标准云

评价标准云是适应性评估的基准对照图。将适应性的评价等级划分为: “低”、“较低”、“中”、“较高”与“高”。本文使用黄金比例法来划分评语集, 邻近评价等级的参数比为 0.618, 且越靠近论域  $[0,1]$  的中心区域, 评价等级的  $E_n$  和  $H_e$  就越小<sup>[36]</sup>。将论域  $[0,1]$  的中心点 0.5 作为中间评价等级, 其参数取作  $E_x = 0.500$ ,  $E_n = 0.003$ , 标准云模型的参数见表 2, 标准云模型图见图 3。

### 2.3.4 评价综合云

为了精准评估新能源电力系统的适应性, 需进行综合云的运算, 进而计算出一级和二级指标的云特征值。

表 2 标准云模型参数

评价等级	云数字特征
低	(0.000,0.103,0.00)
较低	(0.309,0.064,0.00)
中	(0.500,0.039,0.00)
较高	(0.691,0.064,0.00)
高	(1.000,0.103,0.00)

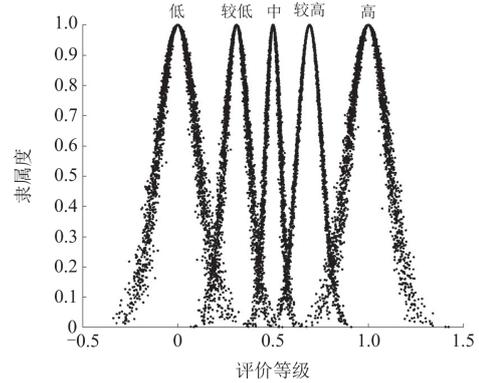


图3 标准云模型图

Fig. 3 Standard cloud model diagram

1) 当指标之间的关联程度较低时, 采用浮动云算法来求解, 利用指标权重和云数字特征来计算, 计算公式如式(12)所示。

$$\begin{cases} E_x = \frac{E_{x1}w_1 + E_{x2}w_2 + \dots + E_{xa}w_a}{w_1 + w_2 + \dots + w_a} \\ E_n = \frac{E_{n1}w_1^2 + E_{n2}w_2^2 + \dots + E_{na}w_a^2}{w_1^2 + w_2^2 + \dots + w_a^2} \\ H_e = \frac{H_{e1}w_1^2 + H_{e2}w_2^2 + \dots + H_{ea}w_a^2}{w_1^2 + w_2^2 + \dots + w_a^2} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $w_a$  为第  $a$  个指标的综合权重;  $a$  为评估指标的总个数;  $E_{xa}$ 、 $E_{na}$  和  $H_{ea}$  分别为第  $a$  个指标的期望值、熵值和超熵值。

2) 当指标之间的关联程度较高时, 则采用综合云算法来求解, 计算公式如式(13)所示。

$$\begin{cases} E_x = \frac{E_{x1}E_{n1}w_1 + E_{x2}E_{n2}w_2 + \dots + E_{xa}E_{na}w_a}{E_{n1}w_1 + E_{n2}w_2 + \dots + E_{na}w_a} \\ E_n = E_{n1}w_1 + E_{n2}w_2 + \dots + E_{na}w_a \\ H_e = \frac{H_{e1}E_{n1}w_1 + H_{e2}E_{n2}w_2 + \dots + H_{ea}E_{na}w_a}{E_{n1}w_1 + E_{n2}w_2 + \dots + E_{na}w_a} \end{cases} \quad (13)$$

基于以上分析, 总结出新能源电力系统适应性的评估流程, 如图 4 所示。

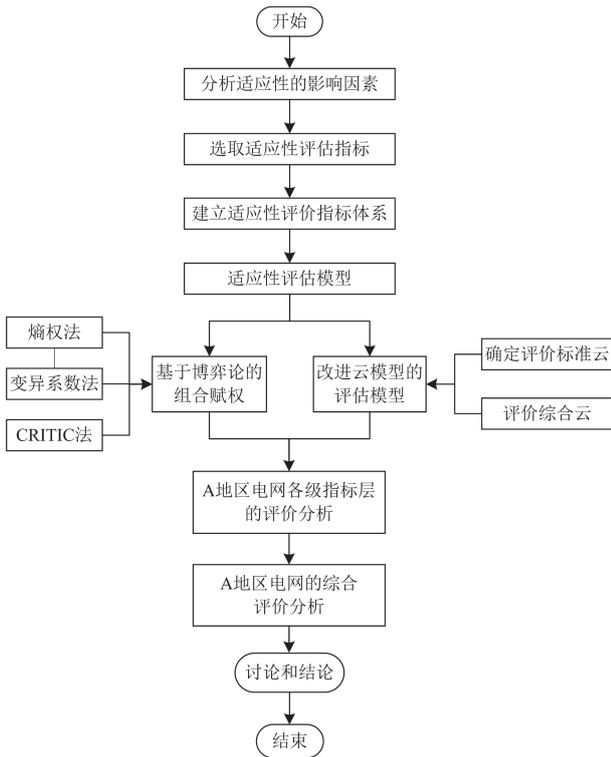


图 4 新能源电力系统适应性评估流程

Fig. 4 Adaptability evaluation process of the new energy power system

### 3 算例分析

#### 3.1 基础数据和场景设定

本文以我国 A 地区电网为例，选取 2020—2022 年 3 年的数据进行分析。该地区电网的供电面积为 1067 km<sup>2</sup>，供电人口约为 41.86 万人。A 地区为 110 kV 电网结构，以单环网结构为主，存在部分辐射和 T 接形式。110 kV 变电站共 9 座，变压器共 24 台，总容量为 1100 MVA。110 kV 线路共 270 条，总长度为 2600 km，其中架空线长度为 1257.36 km，电缆线长度为 854 km。

在不同时间段等条件下，电网的各种参数和相应指标值都会有很大的差异，因此，本文选择一个典型场景来计算相应的评估指标，每年都选择一个负荷实测的典型时间段，即 13:00—14:00，对这 3 年典型日的数据进行处理与分析。表 3 展示了 3 个典型日的数据，以为后续研究提供参考。

#### 3.2 指标权重计算

1) 熵权法权重结果。对指标数据进行统一化处理，计算指标的熵值，再根据求出的熵值得出指标的权重，如表 4 所示。

2) 变异系数法权重结果。使用 Matlab 软件求出指标间的离散程度和指标权重，如表 4 所示。

表 3 典型日数据

Table 3 Typical daily data

二级指标	典型日 1	典型日 2	典型日 3
$A_1$	97%	89%	81%
$A_2$	95.12%	97.86%	99.97%
$A_3$	69%	58%	51%
$A_4$	58%	65%	39%
$A_5$	80%	75%	72%
$B_1$	90%	86%	67%
$B_2$	90%	88%	55%
$B_3$	80%	97%	52%
$B_4$	72%	64%	50%
$B_5$	87%	80%	61%
$C_1$	39.20%	46.80%	53.80%
$C_2$	47%	57%	61%
$C_3$	1%	1.5%	2%
$C_4$	10.18%	160%	300%
$C_5$	0.33 t	0.23 t	0.45 t

表 4 适应性指标权重

Table 4 Evaluation index weights for adaptation

指标	熵权法	变异系数法	CRITIC 法	组合权重
$A_1$	0.0676	0.0679	0.0458	0.0607
$A_2$	0.0665	0.0668	0.0456	0.0599
$A_3$	0.0728	0.0730	0.0474	0.0647
$A_4$	0.0800	0.0794	0.0500	0.0702
$A_5$	0.0673	0.0676	0.0458	0.0605
$B_1$	0.0605	0.0600	0.0512	0.0574
$B_2$	0.0612	0.0608	0.0474	0.0566
$B_3$	0.0656	0.0658	0.0521	0.0613
$B_4$	0.0642	0.0643	0.0454	0.0582
$B_5$	0.0610	0.0605	0.0480	0.0567
$C_1$	0.0681	0.0684	0.1193	0.0846
$C_2$	0.0608	0.0603	0.1078	0.0757
$C_3$	0.0647	0.0648	0.1188	0.0821
$C_4$	0.0680	0.0684	0.1193	0.0846
$C_5$	0.0717	0.0720	0.0561	0.0668

3) CRITIC 法权重结果。将数据代入到 Matlab 软件求出指标间的冲突程度，以此求出指标权重，如表 4 所示。

4) 组合权重结果。根据式(5)一式(8)求出各二级指标的组合权重为(0.0607,0.0599,0.0647,0.0702,0.0605,0.0574,0.0566,0.0613,0.0582,0.0567,0.0846,0.0757,0.0821,0.0846,0.0668)，如表 4 所示。熵权法、变异系数法、CRITIC 法以及组合权重对比如图 5 所示。

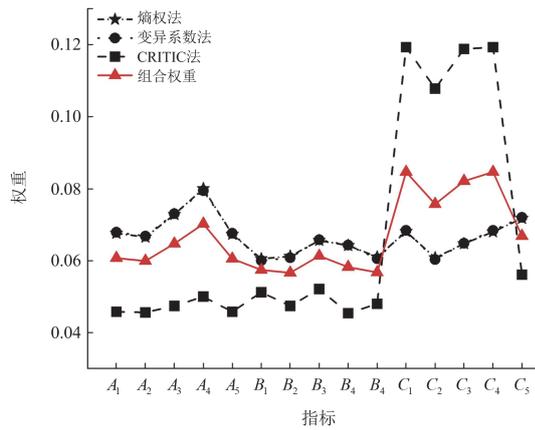


图 5 不同方法权重结果对比

Fig. 5 Comparison of weight results of different methods

通过观察表 4 与图 5 不难发现：熵权法与变异系数法的权重趋势重合度较高，由于二者分别侧重于数据的离散程度、变异性，两种方法在某种程度上相互验证，增加了结果的可靠性；CRITIC 法关注指标内在的变异性 and 冲突性，因此其权重值、权重趋势变化与另外两种方法不同；通过博弈论赋权法得到的权重能够将熵权法、变异系数法、CRITIC 法 3 种方法的权重升降规律结合起来，对单个方法的缺陷进行了弥补，有效避免了单个指标权重不合理的问题，从而提升了评价的准确性和有效性。

### 3.3 改进云模型评价

运用改进云模型来评估 A 地区新能源电力系统的适应性，基于国家相关标准及规定<sup>[37]</sup>和专家意见，得出各个指标的评分曲线。之后，对 3 年数据进行预处理，再利用逆向云发生器，根据式(9)一式(11)求出二级指标的云数字特征值，具体的结果如表 5 所示。

根据浮动云的计算方法，基于二级指标的权重及其 3 个云数字特征，由式(12)计算出各一级指标的 3 个特征值，结果如表 6 所示，并通过正向云发生器分别得到 3 个一级指标的评价云图，结果如图 6 所示。

由图 6 得出：电网结构的评价等级最高，期望值为 0.646，其次是经济性，其评价水平为“较高”，其中电压合格率和线路负载率的适应性水平较高，这是由于高比例新能源的接入可优化电网线路负载率、容载比等指标，新能源在电网起到削峰填谷作用，减小了电网负荷峰值。然而，能源结构的评价等级为“中”，说明电网在此方面的适应能力有待提升，这是因为高比例新能源以及电力电子元件的接入方式会使电压出现波动或闪烁，从而影响新能源波动性、净负荷波动率等指标。为减少此类问题，

应重视电力电子元件的改进与改造。

表 5 二级指标的云数字特征

Table 5 Cloud digital features for secondary indicators

二级指标	$E_x$	$E_n$	$H_e$
$A_1$	0.890	0.077	0.024
$A_2$	0.603	0.047	0.014
$A_3$	0.593	0.081	0.026
$A_4$	0.640	0.075	0.021
$A_5$	0.510	0.142	0.042
$B_1$	0.627	0.114	0.033
$B_2$	0.617	0.133	0.04
$B_3$	0.747	0.153	0.055
$B_4$	0.537	0.071	0.024
$B_5$	0.683	0.103	0.032
$C_1$	0.660	0.053	0.018
$C_2$	0.623	0.056	0.017
$C_3$	0.477	0.048	0.016
$C_4$	0.563	0.061	0.021
$C_5$	0.530	0.037	0.012

表 6 一级指标的云数字特征

Table 6 Cloud digital features for primary indicators

一级指标	云数字特征 ( $E_x, E_n, H_e$ )
A	(0.646, 0.084, 0.027)
B	(0.643, 0.089, 0.029)
C	(0.570, 0.052, 0.017)

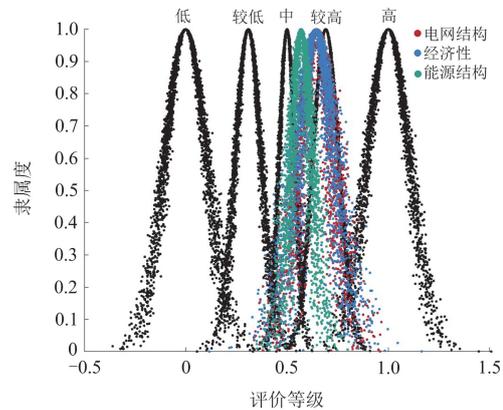


图 6 一级指标评价云图

Fig. 6 Evaluation cloud images of primary indicators

根据一级指标的云数字特征和一级指标的权重，由式(13)求出综合评价的云数字特征为  $U(0.624, 0.073, 0.024)$ ，综合评价云图如图 7 所示。

由图 7 可知，该电力系统适应能力的综合评价结果更靠近“较高”水平，与这一区域的实际发展状况相符，可见本文所提模型可以更加直观地展示适应能力的评估结果。由于该电力系统在能源结构

方面的适应性有待提高，应重视电力电子元件的改进和改造，以减少新能源高比例并网带来的弊端。因此，本文所提评价模型能够更清晰地识别电力系统的脆弱性，从而全面提升新能源电力系统的适应能力。

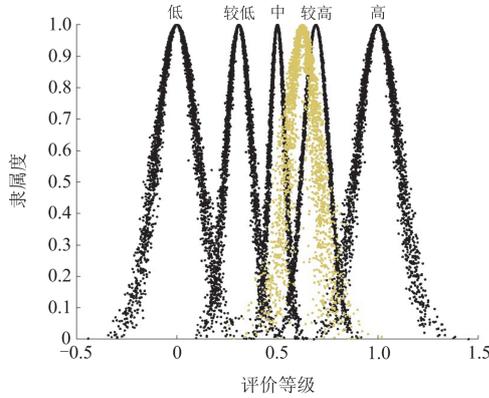


图7 综合评价云图

Fig. 7 Comprehensive evaluation cloud image

### 3.4 对比和分析

为验证改进云模型的优越性，本文增加了传统云模型、信息量法云模型、模糊综合评价法云模型进行对比。首先按照传统云模型来进行定义，电网结构、经济性和能源结构3个一级指标及综合评估的数字特征参数分别为 $U_A^*$ 、 $U_B^*$ 、 $U_C^*$ 和 $U^*$ 。之后按照传统云模型理论来计算指标云，传统云模型在使用时会默认每个指标的权重是相同的，计算得出一级指标的评估指标云分别为： $U_A^* = (0.647, 0.084, 0.027)$ ， $U_B^* = (0.642, 0.087, 0.028)$ ， $U_C^* = (0.570, 0.050, 0.017)$ ，很明显得出能源结构的评估参数不满足 $H_e < E_n/3$ 。最后将3个一级指标的评估指标云合成综合评估指标云， $U^* = (0.628, 0.073, 0.025)$ ，绘制的评价云图如图8所示。

由图8可知，虽然传统云模型综合评估结果也为“较高”水平，与改进云模型的评估结果一致，但是传统云模型在使用时会默认指标的权重是相同的，并不能有效地考虑差异性，当指标权重之间差异性过大时会导致超熵 $H_e$ 过大，使得云模型雾化特性差，即不满足 $H_e < E_n/3$ ，从而使评价结果无法直接使用。但是，改进云模型在不影响最终评估结果的基础上，兼顾指标之间的差异性，进一步改善了传统云模型的雾化特征，验证了改进云模型的有效性及其优越性。

为增强结果的说服力，本文引入了信息量法与模糊综合评价法来计算各级指标权重，并根据权重结果计算云模型的云数字特征。信息量法一级指标

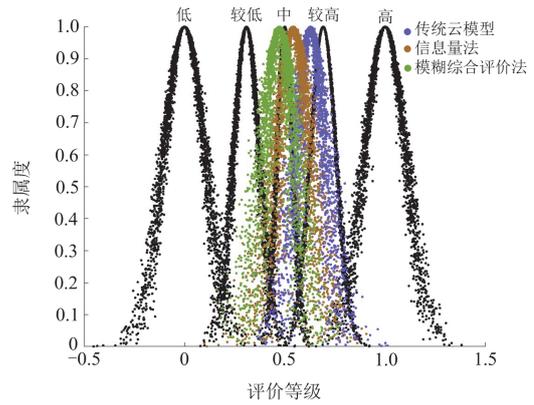


图8 传统云模型、信息量法、模糊综合评价法的综合评价云图

Fig. 8 Comprehensive evaluation cloud image of traditional cloud model, informativeness method, and fuzzy comprehensive evaluation method

的评估指标云为： $U_{A'}^* = (0.646, 0.084, 0.025)$ ， $U_{B'}^* = (0.643, 0.115, 0.037)$ ， $U_{C'}^* = (0.145, 0.051, 0.017)$ ，其中电网结构、经济性的评估参数不满足 $H_e < E_n/3$ ；综合评估指标云为： $U'' = (0.542, 0.082, 0.029)$ ，也不满足 $H_e < E_n/3$ 。形成的评价云图如图8所示。模糊综合评价法的一级指标的评估指标云为： $U_{A''}^* = (0.647, 0.084, 0.026)$ ， $U_{B''}^* = (0.642, 0.115, 0.036)$ ， $U_{C''}^* = (0.103, 0.054, 0.018)$ ，其中能源结构的评估参数不满足 $H_e < E_n/3$ ；综合评估指标云为： $U''' = (0.472, 0.079, 0.028)$ ，同样不满足 $H_e < E_n/3$ 。如图8所示，通过观察各项指标云的数据和云图可知，使用信息量法与模糊综合评价法对本文所研究对象进行评价时，熵值和超熵值较低，无法对指标的变化进行精确描述，且评价水平为“中”，远低于本文所提评价模型，存在一定的局限。本文所提模型具有一定程度的敏感性，能够较好地处理新能源电力系统复杂的情况，对新能源接入的电网的适应性进行评估时具备一定的优越性。

由于熵权法、CRITIC法及变异系数法本身的局限性，本文提出的组合赋权方法在对新能源接入的电网的适应性进行评价时，需要大量的数据作为支撑，且需要较大的计算资源。此外，博弈论赋权法将所有参与者都假设为理性的，在现实中这种假设可能不会总是成立。

## 4 结论

本文建立了基于博弈论和改进云模型的新能源

电力系统适应性评价方法, 并结合算例分析, 得到了以下结论。

1) 构建了反映新能源电力系统特点的评估指标体系, 提出了包含新能源有效利用率、新能源承载系数、新能源减排量等的新指标, 构建了包含 3 个一级指标、15 个二级指标的适应性评价指标体系, 完善了评价指标体系。

2) 采用 3 种客观赋权方法计算指标权重, 避免了评价结果的主观性与偏差性, 之后运用博弈论进行组合赋权, 确保了组合权重的精确度与可靠性。

3) 改进后的云模型可通过评价等级、综合云图和云数字特征全面直观地反映新能源电力系统的适应性, 也可以反映出新能源电力系统的脆弱性。

4) 对 A 地区电网进行适应性评价, 更好地反映了区域内的实际情况, 验证了方法的可行性。同传统的云模型相比, 本文所提模型的超熵值提高了 41.76%, 说明本文提出的模型能够更好地处理数据的变异性。

5) 同信息量分析法、模糊综合评价法相比, 本文所提模型的期望值分别提高了 15.1%、32.2%, 熵值分别减少了 0.009、0.006, 说明本文模型的整体评估结果更为可靠、精确。

6) 结果表明, 本文所提方法可以识别适应性的脆弱性, 从而为新能源电力系统适应性能力的评估与提升提供可靠建议。

## 参考文献

- [1] 赵冉. 构建以新能源为主体的新型电力系统[N]. 中国电力报, 2021-04-01(002).  
ZHAO Ran. Constructing new power system with new energy as the main body[N]. China Electric Power News, 2021-04-01(002).
- [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] 徐玉韬, 谈竹奎, 袁旭峰, 等. 计及分布式电源接入的不平衡配电网潮流计算[J]. 电测与仪表, 2019, 56(13): 27-32, 80.  
XU Yutao, TAN Zhukui, YUAN Xufeng, et al. Power flow calculation for unbalanced distribution networks considering distributed generations[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(13): 27-32, 80.
- [4] 刘凯诚, 钟鸣, 曾平良, 等. 考虑分布式可再生电源和储能智能配电网可靠性评估综述[J]. 电测与仪表, 2021, 58(7): 1-11.  
LIU Kaicheng, ZHONG Ming, ZENG Pingliang, et al. Review on reliability assessment of smart distribution networks considering distributed renewable energy and energy storage[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(7): 1-11.
- [5] 郑雯元. 交直流混合电网静态电压稳定性评估体系研究[D]. 沈阳: 沈阳工程学院, 2021.  
ZHENG Wenyuan. Research on static voltage stability evaluation system of AC-DC hybrid power grid[D]. Shenyang: Shenyang Institute of Engineering, 2021.
- [6] 李文汗, 赵冬梅, 王心, 等. 考虑分布式电源并网的配电网适应性评价方法[J]. 电网与清洁能源, 2017, 33(2): 117-123.  
LI Wenhao, ZHAO Dongmei, WANG Xin, et al. Adaptability evaluation for the distribution equipment considering distributed generations[J]. Power System and Clean Energy, 2017, 33(2): 117-123.
- [7] 何英静, 李帆, 沈舒仪, 等. 新能源及分布式电源接入浙江配电网适应性研究[J]. 浙江电力, 2018, 37(1): 32-36.  
HE Yingjing, LI Fan, SHEN Shuyi, et al. Adaptability research on integration of new energy and distributed generation into Zhejiang distribution networks[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(1): 32-36.
- [8] 杨冰峰. 省级重大电网工程投资项目后评审评价体系构建及应用[J]. 财经界, 2022, 34: 72-74.
- [9] 张明, 夏若平, 徐诗露, 等. 主客观变异系数组合赋权的电能质量综合评估方法[J]. 现代电力, 2023, 40(4): 441-447.  
ZHANG Ming, XIA Ruoping, XU Shilu, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on variation coefficient synthetic weighting of subjective and objective weights[J]. Modern Electric Power, 2023, 40(4): 441-447.
- [10] 朱晔, 刘欣, 慕小斌, 等. 基于层次分析和风险熵权的多站融合综合能源系统多指标综合评估[J]. 电测与仪表, 2022, 59(4): 128-136, 143.  
ZHU Ye, LIU Xin, MU Xiaobin, et al. Multi-index comprehensive evaluation of multi-station integrated energy system based on analytic hierarchy process and risk entropy weight[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(4): 128-136, 143.
- [11] 艾欣, 赵旭州, 胡寰宇, 等. G1-熵权-独立性权法在电网发展态势感知中的应用[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3481-3490.  
AI Xin, ZHAO Xuzhou, HU Huanyu, et al. G1-entropy-independence weight method in situational awareness of power grid development[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3481-3490.

- [12] 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 Bingkang, 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.
- [13] 肖峻, 李航, 王博, 等. 分布式电源接入城市配电网的综合匹配评价方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(15): 44-51.  
XIAO Jun, LI Hang, WANG Bo, et al. Comprehensive matching evaluation method for integration of distributed generator into urban distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(15): 44-51.
- [14] 林俐, 王腾志, 吕奕波, 等. 基于组合权重-灰云聚类模型的配电网调度运行管理水平综合评价[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2022, 49(2): 31-40, 80.  
LIN Li, WANG Tengzhi, LÜ Yibo, et al. Comprehensive evaluation of dispatching operation management level of distribution network based on combined weight and gray cloud clustering model[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2022, 49(2): 31-40, 80.
- [15] 尹瑞, 时珉, 王铁强, 等. 基于灵活性矩阵与优劣解距离的新能源功率预测评价方法[J]. 电力建设, 2021, 42(2): 35-42.  
YIN Rui, SHI Min, WANG Tieqiang, et al. An evaluation method for new energy power prediction based on flexibility matrix and TOPSIS method[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(2): 35-42.
- [16] 项佳宇, 李伟, 宋宝同, 等. 分布式光伏接入配电网适应性评估[J/OL]. 电测与仪表: 1-8[2024-08-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220602.1656.006.html>.  
XU Jiayu, LI Wei, SONG Baotong, et al. Adaptability evaluation of distributed photovoltaic access to distribution network[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: 1-8[2024-08-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20220602.1656.006.html>.
- [17] 武家辉, 张强, 王维庆, 等. 太阳能冷热电联供系统的综合性能评价与研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(21): 179-186.  
WU Jiahui, ZHANG Qiang, WANG Weiqing, et al. Evaluation and research on the comprehensive performance of a PV/T-CCHP system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(21): 179-186.
- [18] 欧阳森, 彭志豪, 张晋铭, 等. 考虑源荷匹配特性的屋顶光伏接入配电网的综合排序方法[J/OL]. 南方电网技术: 1-11[2024-10-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20240620.1758.006.html>.  
OUYANG Sen, PENG Zhihao, ZHANG Jinming, et al. Comprehensive sorting method for rooftop photovoltaic access to distribution network considering source-load matching characteristics[J/OL]. Southern Power System Technology: 1-11[2024-10-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1643.TK.20240620.1758.006.html>.
- [19] 邹阳, 林锦茹, 李安娜, 等. 基于灰色关联分析和聚类云模型的变压器油纸绝缘状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(21): 35-43.  
ZOU Yang, LIN Jinjia, LI Anna, et al. Evaluation of transformer oil-paper insulation status based on grey relational analysis and a cluster cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(21): 35-43.
- [20] 陈伟, 刘莹, 刘晓宇. 考虑网架对短路电流适应性的输电网扩展规划[J]. 四川电力技术, 2018, 41(1): 74-77, 82.  
CHEN Wei, LIU Ying, LIU Xiaoyu. Transmission expansion planning considering adaptability of grid to short-circuit current[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2018, 41(1): 74-77, 82.
- [21] 杜明坤, 黄媛, 刘俊勇, 等. 考虑梯级电站开发规划接入的电网适应性综合评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(9): 1-8, 16.  
DU Mingkun, HUANG Yuan, LIU Junyong, et al. Comprehensive evaluation on grid adaptability considering the access of cascaded power stations under planning and development[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(9): 1-8, 16.
- [22] 周仁和. 高比例新能源电力系统灵活性资源价值评价模型及应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2021.  
ZHOU Renhe. Flexible resources value evaluation model and application of high proportion new energy power system[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.
- [23] 戴子楸. 基于熵值法与 AHP 法的安徽省民营经济发展水平综合评价与分析[D]. 安庆: 安庆师范大学, 2020.  
DAI Ziqiu. Comprehensive evaluation and analysis of private economy development level in Anhui province based on entropy method and AHP method[D]. Anqing: Anqing Normal University, 2020.
- [24] 国家能源局. 电力变压器运行规程: DL/T 572—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [25] 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 system[J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3758-3768.
- [26] 李世新, 周步祥, 唐浩, 等. 偏远地区配电网容载比的

- 算法改进模型[J]. 电测与仪表, 2016, 53(10): 27-31.  
LI Shixin, ZHOU Buxiang, TANG Hao, et al. The improved algorithm model of capacity-load ratio in distribution network of remote areas[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(10): 27-31.
- [27] 李聚聪, 李荣敏, 荀超, 等. 新型电力系统指标体系研究[J/OL]. 电气工程学报: 1-11[2024-10-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1289.TM.20231012.1633.014.html>.  
LI Jucong, LI Rongmin, XUN Chao, et al. Research on the new power system index system[J/OL]. Journal of Electrical Engineering: 1-11[2024-10-12]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1289.TM.20231012.1633.014.html>.
- [28] 陈晨, 闫向阳, 齐桓若, 等. 基于 FAHP-改进 CRITIC 组合赋权的屋顶光伏接入配网评价方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(15): 97-108.  
CHEN Chen, YAN Xiangyang, QI Huanruo, et al. An evaluation method of a roof photovoltaic access distribution network based on the weight of FAHP-improvement CRITIC combination[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(15): 97-108.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 严康, 陆艺丹, 覃芳璐, 等. 配电网用户侧异构电力物联设备网络风险量化评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(11): 64-76.  
YAN Kang, LU Yidan, QIN Fanglu, et al. Network security risk assessment of UPIDs in the distribution system[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(11): 64-76.
- [32] 李天宏, 薛晶, 夏炜, 等. 组合赋权法-木桶综合指数法在长江生态航道评价中的应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(1): 36-49.  
LI Tianhong, XUE Jing, XIA Wei, et al. Application of combination weighting method and comprehensive index method based on cask theory in ecological waterway assessment of Yangtze River[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27(1): 36-49.
- [33] GU Haifei, YU Jie, LI Yang, et al. Optimal economic dispatch for an industrial park with consideration of an elastic energy cloud model with integrated demand response uncertainty[J]. IEEE Access, 2021, 9: 52485-52508.
- [34] 阎洁, 李宁, 刘永前, 等. 短期风电功率动态云模型不确定性预测方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3): 17-23.  
YAN Jie, LI Ning, LIU Yongqian, et al. Short-term uncertainty forecasting method for wind power based on real-time switching cloud model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3): 17-23.
- [35] 杨茂, 张罗宾, 崔杨, 等. 基于混合半云模型的风速-功率曲线建模方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(5): 106-114.  
YANG Mao, ZHANG Luobin, CUI Yang, et al. Wind speed-power curve modeling method based on hybrid half-cloud model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(5): 106-114.
- [36] CHENG Jiatang, DUAN Zhimei. Cloud model based sine cosine algorithm for solving optimization problems[J]. Evolutionary Intelligence, 2019, 12(4): 503-514.
- [37] 北京市电力公司. 配电网技术标准: 设备选用分册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

收稿日期: 2024-08-07; 修回日期: 2024-12-06

作者简介:

汤明润(1983—), 男, 博士研究生, 工程师, 研究方向为管理科学与工程; E-mail: tangmingrun@163.com

李若暘(1992—), 女, 博士研究生, 工程师, 研究方向为能源经济; E-mail: bjlry62120626@126.com

杨淑霞(1962—), 女, 通信作者, 博士, 教授, 博导, 研究方向为管理科学与工程。E-mail: bjysx216@126.com

(编辑 周金梅)