

# 基于云模型的新型配电系统灵活性评估方法

米伟铭<sup>1</sup>, 叶鹏<sup>1</sup>, 张明理<sup>2</sup>, 张娜<sup>2</sup>, 韩震焘<sup>2</sup>

(1. 沈阳工程学院电力学院, 辽宁省 沈阳市 110136;  
2. 国网辽宁省电力有限公司经济技术研究院, 辽宁省 沈阳市 110000)

## Novel Flexibility Evaluation for Distribution Systems Based on Cloud Models

MI Weiming<sup>1</sup>, YE Peng<sup>1</sup>, ZHANG Mingli<sup>2</sup>, ZHANG Na<sup>2</sup>, HAN Zhentao<sup>2</sup>

(1. Electric Power Faculty, Shenyang Institute of Engineering, Shenyang 110136, Liaoning Province, China;  
2. Economic and Technological Research Institute, State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110000, Liaoning Province, China)

**ABSTRACT:** A new distribution system flexibility evaluation based on cloud models is proposed to address the issue of the gradual expansion of the scale of flexible resource access into the new distribution system, making it difficult for the previous distribution network flexibility evaluation methods to adapt to the development status of the distribution system. Firstly, a distribution network flexibility evaluation system was constructed based on several indicators that affect the system flexibility; Secondly, the AHP entropy weight method, which combines the subjective and objective factors, was used to weight the constructed flexibility evaluation system; Finally, to address the issues of the difficulties in intuitively describing the flexibility status of the system and in fully characterizing the flexibility status of the system using the existing flexibility evaluation methods, a cloud model-based distribution system flexibility evaluation method was proposed. Simulation verification is conducted using the actual data from a distribution system operation in a certain region of China.

**KEY WORDS:** new distribution system; flexibility evaluation system; cloud model; static characteristic; supply and demand balance

**摘要:** 针对新型配电系统内灵活性资源接入规模逐渐扩大, 过往配电网灵活性评估方法难以适应配电系统发展状况的问题, 提出了基于云模型的新型配电系统灵活性评估方法。首先通过影响系统灵活性的数个指标构建了配电网灵活性评价体系; 其次采用了主客观结合的层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)-熵权法对构建的灵活性评价体系进行赋权; 最后针对系统灵活性状态难以直观描述、现有灵活

性评估方法难以完整表征系统灵活性状态的问题, 提出了基于云模型的配电系统灵活性评估方法, 并通过我国某地区配电系统运行实测数据进行了仿真验证。

**关键词:** 新型配电系统; 灵活性评价体系; 云模型; 静态特性; 供需平衡

**DOI:** 10.13335/j.1000-3673.pst.2023.0793

## 0 引言

随着化石能源开发与可持续发展战略的矛盾演化, 新能源作为能源行业的转型关键得到了长足发展。2020年5月, 国务院批准《关于促进新时代新能源高质量发展的实施方案》, 指出我国配电网应积极转型发展, 提升新能源消纳能力, 减少化石能源消耗<sup>[1]</sup>。新能源消纳需要电力系统有充足的灵活性。国际能源署(International Energy Agency, IEA)指出, 灵活性是表征电力系统承载、消纳新能源能力、提升电力系统的运行安全稳定程度与经济性的关键指标<sup>[2]</sup>。灵活性资源是电力系统内存在的一类提供灵活性运行能力的电力组成的集合, 如储能、可调负荷等。随着新型配电系统的不断发展, 配电系统内新能源机组与灵活性资源接入规模的逐渐增大, 配电网运行复杂程度显著增加, 以往针对配电网的灵活性评估方法难以适应当下配电系统的发展现状。在新型配电系统不断发展的趋势下, 如何评估大规模新能源及多元灵活性资源接入对配电系统灵活性的影响, 正成为配电网灵活性评估的研究热点。

现有研究表明, 灵活性不足风险事故特性通常表现为“短时大量”<sup>[3]</sup>, 说明在灵活性风险中应考虑两方面因素: 灵活性供给是否能对灵活性需求总量进行覆盖性响应; 在统一时间间隔内系统是否具

**基金项目:** 辽宁省自然科学基金资助计划项目(分布式储能聚合特性及与电网协同控制策略研究, 1600743366464)。

Project Supported by the Natural Science Foundation of Liaoning Province(Research on the Aggregation Characteristics of Distributed Energy Storage and Its Coordinated Control Strategy with Power Grid, 1600743366464).

有调用相应灵活性供给的爬坡/滑坡率的能力。文献[4]考虑了高比例风电系统运行不确定性,基于概率方法给出了高比例风电系统运行灵活性指标,但不足之处在于未能考虑系统爬坡能力影响;文献[5]针对输电网内存在的灵活性资源建立了灵活性评价指标;文献[6]在文献[5]基础上提出改进,提出了衡量系统爬坡能力的指标,但不足之处在于仍采用期望作为重要评估指标,难以体现灵活性风险的瞬时性;文献[3]基于灵活性供需平衡体系提出了灵活性评估指标,虽然考虑了灵活性风险的瞬时性,但不足之处在于对于系统在调度运行周期内的灵活性状态难以体现。综上,新型配电系统的运行复杂程度相较于传统配电系统有较大提升,灵活性评估指标既需要考虑在一定的调度周期内各时间节点系统所具有的灵活性状态,也需要考虑在调度周期内系统灵活性状态的变化过程。现有研究中鲜有同时考虑以上问题的评估方法。

现有灵活性评估方法中,较多研究着重于通过系统运行指标进行定量表述<sup>[7-8]</sup>,但未能充分考虑指标间的联系与指标对系统灵活性状态的综合影响。此外,系统灵活性难以通过现有灵活性指标全面、直观体现,仅通过灵活性指标判断系统的灵活性状态对电网运行调控人员的运行经验具有很高要求,当电网发生变动时灵活性状态随之改变,故需要统一标准来衡量当前配电系统的灵活性状态。

针对上述问题,本文提出了基于云模型的配电网灵活性评估方法:首先,从灵活性供需平衡的角度出发,通过影响系统运行灵活性的数个指标,构建新型配电系统灵活性评价体系;其次,通过主客观相结合的层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)-熵权法对灵活性评价体系下评估指标进行赋权;最后通过云模型技术对配电系统灵活性进行分级评价,并通过我国某地区配电系统实测数据对本文所提灵活性评估方法的准确性进行了验证。

## 1 新型配电系统灵活性评价体系的构建

目前电力系统灵活性的研究对于灵活性的定义多以国际能源署(International Energy Agency, IEA)和北美电力可靠性委员会(North American Electric Reliability Council, NERC)所给出的灵活性概念作为基础,并结合不同问题进行讨论。但上述机构提出的灵活性概念具有一定的局限性,难以深入灵活性的本质,进而难以引入新型配电系统灵活性供需平衡问题。综合现有研究,本文给出配电网

统灵活性定义为:配电系统在应对电力能量供需不平衡时,通过调用系统所具有的能量管理方法,保持电力能量供需平衡的能力。

当电力需求产生波动时,这种能量需求的变化将被系统通过能量管理进行响应,以达到电力供需的再次平衡。这种能量需求的变化量与配电系统的能量响应能力称为配电系统的灵活性需求与灵活性供给。灵活性供需平衡即配电系统灵活性供给响应灵活性需求的过程。

随着新能源与灵活性资源的不断接入,影响配电系统灵活性的因素逐渐复杂。本节基于灵活性供需平衡理论,结合配电系统灵活性资源特性,考虑了影响配电系统灵活性的一系列指标,构建了新型配电系统灵活性评价体系,并给出了各级指标的计算方法。需要指出的是,由于配电系统灵活性供需平衡状态的衡量依赖于系统的运行状态,所以配电系统灵活性评价指标在计算前需要以统一时间尺度的划定作为前提。时间尺度将决定灵活性计算的精度与复杂度。本文所涉及指标取时间尺度为1h。

### 1.1 新型配电系统灵活性评价体系

图1所示为新型配电系统灵活性评价体系。由于配电系统灵活性评价需要考虑系统灵活性在“量”与“率”两方面的响应,所以一级指标 $U$ 考虑两方面内容,即净功率需求波动率 $u_1$ 与灵活性供给充裕度 $u_2$ ;其中,净负荷波动率 $v_1$ 表示系统净负荷所产生的爬坡/滑坡需求,净负荷最大允许波动率 $v_2$ 表示配电系统通过灵活性调度所具有的响应最大波动率的能力;系统灵活性供给充裕度指标 $u_2$ 是指配电系统灵活性供给相对于需求的富余程度,由于

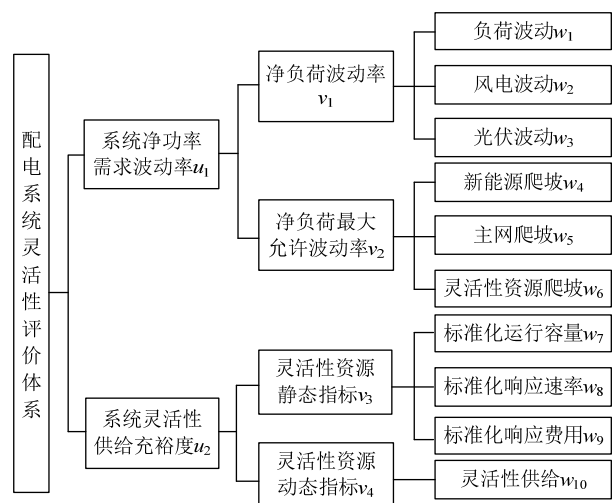


图1 新型配电系统灵活性评价体系

Fig. 1 Flexibility evaluation system for new distribution systems

系统稳态运行下，灵活性供给充裕度仅需考虑系统所具有的灵活性供给能力，故指标  $u_2$  仅含有系统端指标；由于新型配电系统灵活性资源的运行状态与系统灵活性状态相关，故指标  $u_2$  考虑两方面因素，即灵活性资源的静态指标  $v_3$  与灵活性资源的供给状态即灵活性资源动态指标  $v_4$ 。根据各指标的意义与影响因素，制定相应三级指标。

### 1.2 评估指标 $u_1$ 的计算

定义配电系统灵活性需求为

$$F(t) = L_p(t+1) - L_p(t) \quad (1)$$

式中： $F$  表示灵活性需求； $L_p$  表示净负荷。

对灵活性需求进行正负序列分解，即可得到两方向灵活性需求序列，即

$$\begin{cases} F_u(t) = \max\{L_p(t+1) - L_p(t), 0\} \\ F_d(t) = -\min\{L_p(t+1) - L_p(t), 0\} \end{cases} \quad (2)$$

定义配电系统净负荷波动率及配电系统最大允许波动率为

$$v_1(t) = \frac{L_p(t) - L_p(t-1)}{L_p(t)} \quad (3)$$

$$v_2(t) = \frac{\sum_{i=1}^I \sum_{m=1}^M r_{i,m} + \sum_{j=1}^J \sum_{n=1}^N r_{j,n} + R}{L_p(t)} \quad (4)$$

式中： $R$  为配电系统向主网购入功率的爬坡率； $r_{i,m}$  表示第  $i$  种灵活性资源中第  $m$  个接入的灵活性资源的爬坡率； $r_{j,n}$  为第  $j$  种新能源机组中第  $n$  个接入的新能源机组的爬坡率。

式(3)与式(4)的物理意义在于，当前配电系统的净负荷变化率是否在配电系统所能提供的最大爬坡/滑坡功率的范围内。当系统净负荷波动率小于最大允许波动率时，表示当前系统爬坡率与滑坡率均在系统爬坡率允许范围内，不会产生灵活性不足事故；反之则代表净负荷波动率超出系统可调范围，需要采取相应措施对净负荷波动率加以限制。

故一级指标  $u_1$  的计算方法为

$$u_1 = \begin{cases} v_2 - v_1, v_1 > 0 \\ v_1 - v_2, v_1 < 0 \end{cases} \quad (5)$$

需指明的是， $v_2$  表示爬坡速率时取正，表示滑坡速率时取负。

### 1.3 评估指标 $u_2$ 的计算

配电网内的灵活性资源种类繁多且具有不同的运行特性与灵活性供给潜力。在涉及灵活性资源的经济调度中，改变灵活性资源的调节潜力、响应费用及响应速率，均会对灵活性资源的响应

情况产生影响，进而影响调度结果。所以对灵活性资源对灵活性供给能力的评价应考虑其在参与灵活性响应前的数项固有指标。故本文通过动静结合的配电系统灵活性资源评价指标反映灵活性资源的灵活性供给状态：静态指标评价灵活性资源在灵活性调度中的固有响应参数；动态指标评价灵活性资源在灵活性调度中的灵活性供给情况。通过静态指标与动态指标的评价，有利于了解多元灵活性资源的灵活性供给特性，并掌握当前运行状态下灵活性资源的灵活性供给，进而考察当前系统灵活性状态。

#### 1.3.1 灵活性资源静态指标 $v_3$ 的计算

在灵活性资源响应灵活性经济调度前，具有 3 个共性指标：响应潜力、响应速率、响应费用。响应潜力越大，表明该灵活性资源在参与灵活性调度时的响应范围越大；响应速率越大，表明该灵活性资源具有在短时间内响应较大出力的能力；响应费用越低，表明该灵活性资源的响应经济性较好。同时为了解决同种类型但容量不同的灵活性资源在评价过程中出现不同评价结果的问题，引入标准化过程对评估指标进行修正。本文提出 3 种灵活性资源静态评估指标：标准化运行容量、标准化响应速率、标准化响应费用。在评价过程中忽略非线性因素在指标中的影响。

标准化运行容量表达式为

$$w_7 = P_B \frac{\sum_{i=1}^N (P_{i,\max} - P_{i,\min})}{\sum_{i=1}^N P_{i,\max}} \quad (6)$$

式中： $P_B$  表示标准容量； $P_{i,\max}$ 、 $P_{i,\min}$  分别表示第  $I$  类下第  $i$  个接入的灵活性资源的最大与最小容量。

标准化响应速率表达式为

$$w_8 = P_B \frac{\sum_{i=1}^N r_i}{\sum_{i=1}^N P_{i,\max}} \quad (7)$$

式中  $r_i$  表示第  $I$  类下第  $i$  个接入的灵活性资源的响应速率，其中  $I = \{i|1, 2, \dots, N\}$ 。

标准化响应费用表达式为

$$w_9 = \sum_{i=1}^N C_i \frac{P_{i,\max}}{P_B} \quad (8)$$

式中  $C_i$  表示第  $I$  类下第  $i$  个接入的灵活性资源的响应费用，其中  $I = \{i|1, 2, \dots, N\}$ 。

### 1.3.2 灵活性资源动态指标 $v_4$ 的计算

动态指标是指灵活性资源在灵活性调度过程中所具有的灵活性供给状态, 该状态直接影响系统的灵活性程度。由于配电网内灵活性资源种类较多, 特性各异, 难以有统一表达式既能体现灵活性资源的动态特性、又能体现灵活性资源在灵活性调度中的灵活性供给, 所以动态评估指标应针对不同类型的灵活性资源分别考虑。本文考虑4种灵活性资源: 储能装置、柔性负荷、燃气机组与P2X电站。

#### 1) 储能装置。

$$\begin{cases} w_{10,u}(t) = \min[P_{d,\max} - P_d(t), \eta_d \frac{E_{i,\max} - E_i(t)}{\Delta t} - P_d(t)] \\ w_{10,d}(t) = \min[P_{c,\max} - P_c(t), \frac{E_i(t) - E_{i,\min}}{\eta_c \Delta t} - P_c(t)] \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $w_{10,u}$ 、 $w_{10,d}$  分别表示向上、向下的灵活性供给能力;  $P_d$ 、 $P_c$  分别表示储能的放电、充电功率;  $E_i$  为储能的荷电量;  $\eta_d$ 、 $\eta_c$  分别表示储能的放电、充电效率。

#### 2) 柔性负荷。

本文所考虑柔性负荷为可平移负荷与可削减负荷。

$$\begin{cases} w_{10,u}(t) = -\min[P_{DRU,\max} - P_{DR}(t), 0] \\ w_{10,d}(t) = \max[P_{DRD,\max} - P_{DR}(t), 0] \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $P_{DRU,\max}$ 、 $P_{DRD,\max}$  表示可平移负荷向上与向下可调度总量;  $P_{DR}$  表示可平移已参与调度的功率。

$$\begin{cases} w_{10,u}(t) = \max[P_{LC}(t), 0] \\ w_{10,d}(t) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

式中  $P_{LC}$  表示经负荷削减合同约定后的负荷削减量。

#### 3) 燃气机组。

$$\begin{cases} w_{10,u}(t) = \min[\sum_{i=1}^N (P_{Gi,\max} - P_{Gi}(t)), \sum_{i=1}^N r_{Gi}] \\ w_{10,d}(t) = \min[\sum_{i=1}^N (P_{Gi}(t) - P_{Gi,\min}), \sum_{i=1}^N r_{Gi}] \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $P_{Gi}$ 、 $P_{Gi,\max}$  表示第  $i$  台燃气机组的出力与出力上限;  $r_{Gi}$  表示燃气机组的响应速率;  $\Delta t$  表示调度时长。

#### 4) P2X 电站。

P2X 电站泛指一类参与电力系统调度的负荷节点。此类电站通常具有价值转换功能, 即电力商品转化为其他商品的特性, 通常以工业负荷为主, 且容量较大, 从事工业生产的同时可参与电力调度, 承担灵活性调节工作的同时完成电站自身产品

生产需求<sup>[9]</sup>。

考虑 P2X 电站全程并网运行并参与负荷峰谷调度, 且电站自身具有一定工业生产能力, 需要消耗功率, 所以电站在灵活性调节中具有“逆向储能”特性, 即: 若提高自身生产效率则为系统提供向下灵活性, 若降低自身生产效率则为系统提供向上灵活性, 在供给方式上与储能恰好相反。故 P2X 电站对系统灵活性供给能力可表示为

$$\begin{cases} w_{10,u}(t) = \min[\sum_{i=1}^N (P_{Xi}(t) - P_{Xi,\min}), \sum_{i=1}^N r_{Xi}] \\ w_{10,d}(t) = \min[\sum_{i=1}^N (P_{Xi,\max} - P_{Xi}(t)), \sum_{i=1}^N r_{Xi}] \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $P_{Xi}$ 、 $P_{Xi,\min}$ 、 $P_{Xi,\max}$  分别表示 P2X 电站的运行功率、上限运行功率与下限运行功率;  $r_{Xi}$  表示该电站的爬坡/滑坡率。

综上, 评估指标  $v_4$  的计算方法为

$$\begin{cases} v_{4,u} = \sum_{k=1}^K S_{u,k}(t) - \sum_{m=1}^M F_{u,m}(t) \\ v_{4,d} = \sum_{k=1}^K S_{d,k}(t) - \sum_{m=1}^M F_{d,m}(t) \end{cases} \quad (14)$$

式中:  $v_{4,u}$ 、 $v_{4,d}$  分别表示系统向上、向下灵活性供给充裕度;  $S_{u,k}$ 、 $S_{d,k}$  分别表示第  $k$  种灵活性资源的向上、向下供给;  $F_{u,m}$ 、 $F_{d,m}$  分别表示第  $m$  种电力组成对灵活性的向上、向下需求。当某个方向上灵活性供给充裕度大于 0 时, 说明此时灵活性充裕; 当灵活性供给充裕度小于 0 时, 说明此时灵活性不足。

## 2 基于 AHP-熵权法的评价体系赋权

现有评价体系赋权法通常分为主观赋权法与客观赋权法。主观赋权法为通过对相关专家进行意见采集, 通过多轮打分制对专家意见进行统一以达到对某种评价体系的主观评估, 其优点在于得出的结论通常符合直觉且符合系统运行的基本经验。客观赋权法为通过系统运行指标的相关数字特征对系统的运行状态进行评价, 优点在于通常更加贴合系统实际运行情况。本文通过 AHP-熵权法对评价体系进行组合赋权, 以期主观-客观评价方法优势与缺陷互补, 使评价体系权重更加符合工程实践<sup>[10-11]</sup>。

AHP-熵权法的赋权步骤如下:

1) 通过多轮征集相关专家意见, 通过问卷调查方式确定对指标体系权重及灵活性等级划分  $[\omega_{\min}, \omega_{\max}]$  的相对统一意见。

2) 根据相关指标的制定情况, 通过指标数据转化, 对数值越大越优及越小越优指标进行归一化

处理，并通过线性映射将指标得分折算至灵活性等级划分范围内。

越大越优型指标归一化：

$$y = (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \cdot \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (15)$$

越小越优型指标归一化：

$$y = (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \cdot \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (16)$$

3) 通过指标自身的物理含义及其特性，结合实际配电系统运行历史数据，采用熵权法计算指标体系的客观权重。

4) 通过主客观权重结合，完成对指标体系中三级指标的赋权。

其中，AHP-熵权法的权重评估计算方法为

$$\eta = a\eta_1 + b\eta_2 \quad (17)$$

式中  $\eta_1, \eta_2$  分别表示经过 AHP 与熵权法计算得到得权重向量。式中  $a, b$  满足

$$a, b > 0, a + b = 1 \quad (18)$$

5) 根据指标体系的结构以及步骤 4) 中确定的三级指标权重，计算二级、一级指标权重，计算方法如下：

$$\eta_{u,i} = \sum_j \eta_{v,j}, \eta_{v,i} = \sum_j \eta_{w,j} \quad (19)$$

式中： $\eta_u$  为一级指标权重； $\eta_v$  为二级指标权重； $\eta_w$  为三级指标权重。

### 3 基于云模型的新型配电系统灵活性评估方法

#### 3.1 云模型的基本概念

云模型是一种基于概率理论与模糊数学理论的映射理论，用以实现定性概念与其定量数值的不确定性转换。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： $\mu(\alpha):W \in [0,1], \forall \alpha \in W$ 。进而，论域  $K$  上  $\alpha$  的分布称作云， $\alpha$  称作云滴<sup>[12-14]</sup>。

云分布图通过期望  $E_x$ 、熵  $E_n$ 、超熵  $H_e$  三个特征参数反映概念的分布特征。其中， $E_x$  反映了云滴的分布中心，能够显著表征定性-定量转化中心； $E_n$  表征云滴的分散性程度，表征所转化定性概念的模糊性与随机性； $H_e$  表征云滴稳定性程度，表征熵的不确定性。云指标示意图如图 2 所示。

由于云参数间特殊的数学联系，使得云模型的特殊结构仅需输入相较于模糊集合理论宽松的约束，便可得到描述不确定性问题能力更强、更具有

普适性的隶属度函数。考虑到配电系统灵活性评价实际需求以及定性-定量评价转化过程中的模糊性与随机性，且基于云模型理论的优势在于考虑了评价过程的随机特征，故引入云模型理论的配电系统灵活性评价能够使得评价过程克服以往模糊评价的缺陷，更加符合工程实践<sup>[15-16]</sup>。

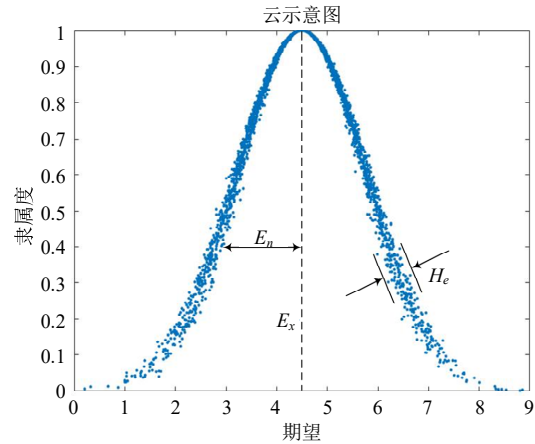


图 2 云指标示意图

Fig. 2 Schematic diagram of cloud indicators

#### 3.2 评估方法与评估流程

本文采用逆向云发生器，根据前文所制定的灵活性评价指标对云模型的数字特征进行计算，进而得出云评估结果。逆向云发生器的基本原理详见文献[17]，结合逆向云发生器的配电系统灵活性评估流程如下：

1) 基于灵活性评价等级对评价分数  $[\omega_{\min}, \omega_{\max}]$  进行分级，并根据分级生成标准云图及其云数字特征。

2) 通过多次采集系统实际运行数据形成一定规模的样本，根据配电网运行实际运行中指标允许范围，将采集样本进行正向化及线性映射，使评分落在  $[\omega_{\min}, \omega_{\max}]$  区间内，并计算各三级指标的均值与方差，计算方法如下：

$$E_{xj} = \bar{x}_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{j,i} \quad (20)$$

$$S_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_{j,i} - E_{xj})^2 \quad (21)$$

3) 计算云模型内三级指标数字特征，计算方法如下：

$$\begin{cases} E_{xj} = \bar{x}_j \\ E_{nj} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_{j,i} - \bar{x}_j| \\ H_{ej} = \sqrt{S_j^2 - E_{nj}^2} \end{cases} \quad (22)$$

4) 通过三级指标的数字特征及所赋权重，计算二级指标及一级指标的综合云模型数字特征，计算方法如下：

$$\begin{cases} E_{xj,k-1} = \sum_{j=1}^n E_{xj,k} \theta_{j,k} \\ E_{nj,k-1} = \sqrt{\sum_{j=1}^n E_n^2 \theta_{j,k}} \\ H_{ej,k-1} = \sum_{j=1}^n H_{ej,k} \theta_{j,k} \end{cases} \quad (23)$$

式中  $\theta_j$  代表指标的组合权重。

5) 通过已计算的综合云模型数字特征及标准云模型数字特征进行比对, 形成当前配电系统灵活性评价结果。

评估流程图如图 3 所示。

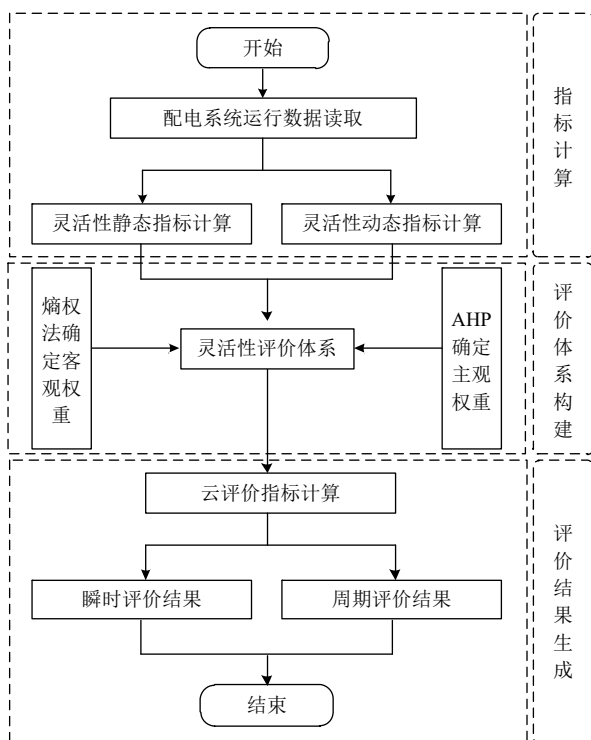


图 3 新型配电系统灵活性评价流程  
Fig. 3 Flexibility evaluation process for new distribution systems

### 4 算例分析

本文以改进的 IEEE 33 节点标准配电系统为基础, 结合我国某地区配电网实测数据进行建模分析。网络拓扑结构如图 4 所示。配电系统运行数据获取具体步骤如下:

- 1) 确定待考察配电系统与灵活性资源静态参数。
- 2) 确定待考察系统在一个调度周期内的负荷与新能源运行数据。
- 3) 确定待考察灵活性资源的静态指标。
- 4) 以配电系统运行总费用最小为调度目标对系统进行优化调度, 目标函数如下:

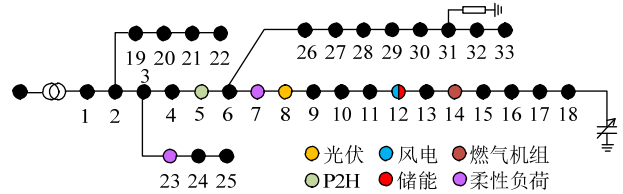


图 4 改进 IEEE 33 节点拓扑结构  
Fig. 4 Improved IEEE 33 node topology

$$\text{obj: } \min c_1 + c_2 + c_3 + c_4$$

式中  $c_1$ 、 $c_2$ 、 $c_3$ 、 $c_4$  分别为网损费用、主网购电费用、新能源弃电惩罚成本与灵活性资源响应成本。

在上述优化调度模型中, 考虑二阶锥松弛的有功、无功潮流约束<sup>[18]</sup>, 灵活性资源出力范围及自身特性约束, 无功调节元件出力约束, 系统节点电压约束, 线路最大允许电流约束对系统进行优化调度。

所提模型在 MATLAB2021 下 YALMIP 工具箱建模, 并调用 CPLEX12.9 求解器对模型进行求解。

5) 根据运行调度模型计算灵活性资源在调度周期内的实际运行状况, 并计算相应动态指标。

根据该地区配电网建设情况, 该系统新能源渗透率为 22.37%, 其中光伏电站位于节点 8, 风电机组位于节点 12; 系统内接入额定功率为 150kW, 容量为 300kW·h 的储能电站, 充放电效率为 90%, 位于节点 12; 装机容量为 200kW 的燃气机组, 位于节点 14, 保持常态开机且最小运行功率为 0.75pu<sup>[19]</sup>; 柔性负荷可调度容量占接入节点负荷容量的 5%, 其中可平移负荷占比 3%, 接入节点 23, 可中断负荷占比 2%, 接入节点 7; 系统内接有一组电转氢调峰电厂, 最大运行功率为 400kW, 运行基荷为 100kW, 位于节点 5, 制成氢产品的市场行为数据来源于文献[9]; 此外系统内 31 节点接入 SVC, 最大可调无功功率 500kvar, 18 节点接入无功电容器组, 共 500kvar。系统电压偏差范围 0.95~1.05pu。取标准容量  $P_B = 1000\text{kW}$ 。

#### 4.1 风险评价标准云图的形成

根据所评估地区配电系统实际运行需要, 取云标准评价区间  $\omega_{\min} = 0, \omega_{\max} = 10$ , 根据四级标度法对评价区间进行划分, 分别为严重、风险、关注、正常。评价区间划分方式如表 1 所示。

表 1 标准云参数		
Table 1 Standard cloud parameters		
评价等级	区间划分	标准云参数
严重	[0,3)	(1.5,1.27,0.06)
风险	[3,6)	(4.5,1.27,0.06)
关注	[6,8)	(7.0,85,0.06)
良好	[8,10)	(9.0,585,0.06)

根据评价区间划分，得出灵活性评价标准云图如图 5 所示。

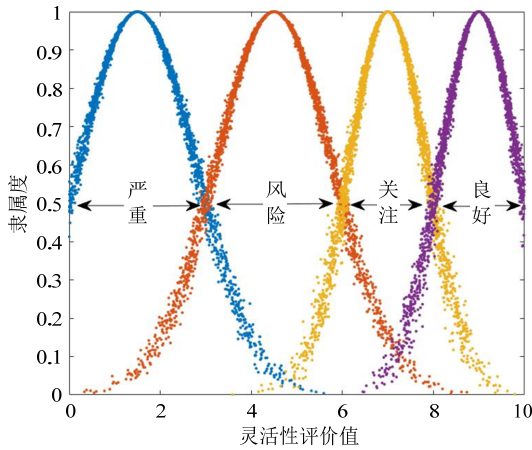


图 5 灵活性评价标准云图

Fig. 5 Cloud chart of flexibility evaluation criteria

### 4.2 灵活性评价体系指标权重的确定

本文采用AHP-熵权法确定灵活性评价体系指标权重。通过多轮征集相关专家意见、指标转化与计算，得出灵活性评价体系三级指标权重如表 2 所示。

在本次评估中，式(18)取  $a = b = 0.5$ 。

表 2 灵活性评价体系三级指标权重  
Table 2 Weights of tertiary indicators

指标	主观权重	客观权重	组合权重
$\eta_{w,1}$	0.0087	0.0273	0.0180
$\eta_{w,2}$	0.0330	0.0578	0.0454
$\eta_{w,3}$	0.0208	0.0554	0.0381
$\eta_{w,4}$	0.0236	0.0240	0.0238
$\eta_{w,5}$	0.0780	0.0924	0.0852
$\eta_{w,6}$	0.0859	0.1311	0.0995
$\eta_{w,7}$	0.0804	0.0736	0.0770
$\eta_{w,8}$	0.0804	0.0736	0.0770
$\eta_{w,9}$	0.0268	0.0342	0.0305
$\eta_{w,10}$	0.5625	0.4563	0.5094

在确定评价体系三级指标权重后，可根据式(19)给出的计算方法计算相应二级指标与一级指标的权重。计算结果如表 3 所示。

表 3 灵活性评价体系一级与二级指标权重  
Table 3 Weights of primary and secondary indicators

指标	主观权重	客观权重	组合权重
$\eta_{v,1}$	0.0625	0.1405	0.1015
$\eta_{v,2}$	0.1875	0.2475	0.2085
$\eta_{v,3}$	0.1876	0.1814	0.1845
$\eta_{v,4}$	0.5625	0.4563	0.5094
$\eta_{u,1}$	0.2500	0.3880	0.3100
$\eta_{u,2}$	0.7501	0.6377	0.6939

### 4.3 系统灵活性评价结果分析

为了验证本文所提方法的有效性，根据该地区

配电系统建设现状及远景目标，设定 3 种运行场景进行灵活性分析，为该地区配电系统规划与运行提供参考。

场景 1：保持系统运行参数不变，对系统进行优化调度。

场景 2：系统内其他电力组成不变，将新能源渗透率提升至原渗透率 2 倍。

场景 3：系统内其他电力组成不变，将系统内灵活性资源除响应费用外其他静态参数提升至原灵活性资源静态参数 2 倍。

根据对该地区新能源出力及负荷需求现状的分析，选择向上灵活性与向下灵活性需求最高的数个时刻进行瞬时灵活性评价。

#### 4.3.1 系统瞬时灵活性评价结果

1) 向上灵活性评价结果。

图 6 为 3 种场景下系统向上灵活性评价结果。由于在系统评估结果完成前，二级指标  $v_2 \sim v_3$  保持相对固定，则系统评估结果由指标  $v_1$ 、 $v_4$  的相对大小决定。图 6 中评价结果分别来自于系统运行 02:00、08:00、17:00。由于云图生成结果较为集中，认为评价结果相对稳定。由于该地区夜间风电资源相对充裕，且夜间负荷较低且相对稳定，向上灵活性需求较小，故向上灵活性充裕度较为理想；上午 08:00 开始该地区风电逐渐减弱、光伏逐渐增强，此时负荷需求开始逐渐上升，但风电减弱幅度相对光伏提升幅度较大，导致系统向上灵活性需求增加，系统内灵活性资源所具备的灵活性供给相对减弱；晚间 17:00 该地区负荷需求开始大幅度上升，光伏开始较大程度下降，风电出力开始提升，但此时风电出力提升幅度远小于光伏出力滑坡，此时系统灵活性资源均处于较高出力状态，以维持系统激增的电力缺口，导致系统内向上灵活性相对不足。

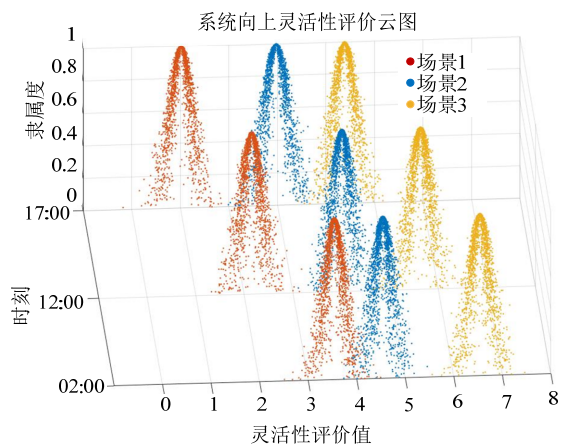


图 6 系统向上灵活性评价结果

Fig. 6 Evaluation results of system upward flexibility

## 2) 向下灵活性评价结果。

图7为该配电系统在3种运行场景下02:00、08:00、17:00的向下灵活性评价结果。云图评价结果分布较为集中,评价结果较为稳定。由于新型配电系统灵活性资源所具有的灵活性供给能力与其静态特性有关,当系统灵活性资源静态特性保持不变时,其在灵活性调度中所具有的向上、向下两个方向上所具有的灵活性供给能力之和应为一固定值。由此可见,当系统处于某一方向上灵活性供给倾向性时,另一方向上灵活性供给则呈现疏离性。如该地区在02:00的评价结果,当系统内灵活性资源处于向上灵活性供给高峰期时,说明此时灵活性资源运行状态相对处于其出力下限,导致系统向下灵活性相对不足。

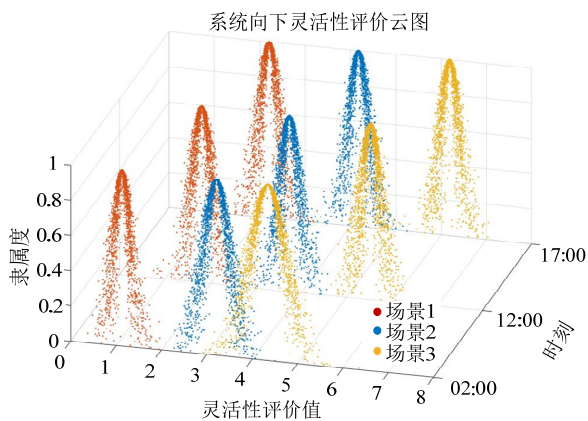


图7 系统向下灵活性评价结果

Fig. 7 System downward flexibility evaluation results

对比图6与图7可知,当该系统新能源渗透率增加至原系统渗透率2倍时,系统向上与向下灵活性需求激增,在灵活性资源提供的供给潜力保持不变时,灵活性供给充裕度将急剧下降。当该系统灵活性资源静态指标增加至2倍时,系统向上与向下灵活性在调度周期内灵活性需求保持不变,可调度的灵活性供给大幅度提升,灵活性供给充裕度提升,系统灵活性调节能力充足,灵活性评分较高。评估结果的对比说明了本文所提出的基于动静结合的灵活性资源评估指标的有效性。

### 4.3.2 系统调度周期灵活性评价结果

图8为3种情景下系统在调度周期内的灵活性综合评价结果。由图8可见,在调度周期内,配电系统灵活性在两个方向上的评分走势大致相反;对比情景1与情景2,情景2在原配电系统内仅增大新能源渗透率,将导致灵活性需求相比于情景1大幅度提升,进而情景2在两个方向上灵活性评分相较于情景1具有较大幅度下降,且大多数调度时刻内,系统运行于“严重”等级;对比情景2与

情景3,将原配电系统灵活性资源静态参数提升至原来2倍,将有效提升系统内灵活性资源在灵活性调度中的响应能力,进而提升配电系统灵活性充裕度,提高系统灵活性。此外,评估结果也在一定程度上表征了未来该地区配电系统建设方向:在新能源逐渐扩大的趋势下,系统向下灵活性受到的影响程度较高,在较多时刻系统向下灵活性相对于向上灵活性严重不足。所以,该地区配电系统在灵活性资源规划方面应适当提升供给向下灵活性的灵活性资源,以提高配电系统消纳富余电量的能力。

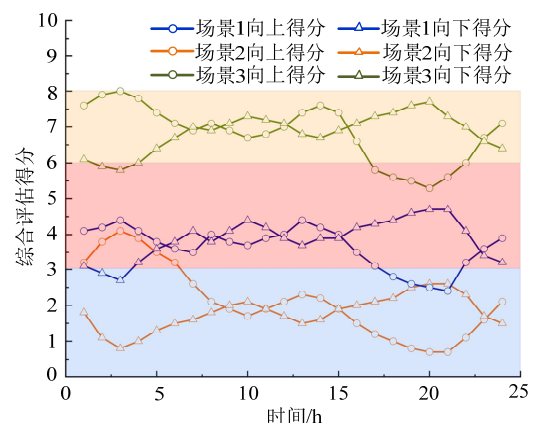


图8 调度周期内系统灵活性评价结果

Fig. 8 System flexibility evaluation results during the scheduling cycle

## 5 结论

针对现有灵活性评估研究中指标与评估方法难以全面、直观反映配电系统灵活性情况的问题,本文提出了基于云模型的新型配电系统灵活性评估方法:首先,通过影响新型配电系统灵活性的数个关键指标构建了配电系统灵活性评价体系;其次,通过主客观结合的AHP-熵权法对配电系统灵活性评价体系进行赋权;最后,通过云模型理论对配电系统灵活性状态进行评价,通过我国某地区配电系统实测数据进行了仿真验证。经过实测数据仿真分析,本文所提模型与方法能够反映配电系统的实际灵活性状态,并得出直观的配电系统灵活性评价结果与灵活性变化情况。后续课题组将继续对模型和方法进行研究与改进,将进一步丰富所提评估体系,提升评估方法的准确性与实用性。

## 参考文献

- [1] 国务院办公厅. 国务院办公厅转发国家发展改革委国家能源局关于促进新时代新能源高质量发展实施方案的通知[J]. 中华人民共和国国务院公报, 2022(17): 24-27.  
General Office of the State Council of the People's Republic of China. Circular of the General Office of the State Council on transmitting and issuing the implementation plan of the national



- development and reform commission and the national energy administration for promoting the high-quality development of new [J]. Gazette of the State Council of the People's Republic of China, 2022(17): 24-27(in Chinese).
- [2] IEA. Status of power system transformation 2018[R]. Paris: International Energy Agency, 2018.
- [3] 李则衡, 陈磊, 路晓敏, 等. 基于系统灵活性的可再生能源接纳评估[J]. 电网技术, 2017, 41(7): 2187-2194.  
LI Zeheng, CHEN Lei, LU Xiaomin, et al. Assessment of renewable energy accommodation based on system flexibility analysis[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2187-2194(in Chinese).
- [4] 李海波, 鲁宗相, 乔颖, 等. 大规模风电并网的电力系统运行灵活性评估[J]. 电网技术, 2015, 39(6): 1672-1678.  
LI Haibo, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. Assessment on operational flexibility of power grid with grid-connected large-scale wind farms[J]. Power System Technology, 2015, 39(6): 1672-1678(in Chinese).
- [5] 郇政林, 刘杰, 徐沈智, 等. 面向高比例新能源接入的源-荷-储灵活性资源协调规划[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(7): 107-117.  
HUAN Zhenglin, LIU Jie, XU Shenzhi, et al. Source-load-storage flexibility resource coordinated planning for high proportion of renewable energy[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(7): 107-117(in Chinese).
- [6] 杨策, 孙伟卿, 韩冬. 考虑新能源消纳能力的电力系统灵活性评估方法[J]. 电网技术, 2023, 47(1): 338-346.  
YANG Ce, SUN Weiqing, HAN Dong. Power system flexibility evaluation considering renewable energy accommodation[J]. Power System Technology, 2023, 47(1): 338-346(in Chinese).
- [7] 赵福林, 俞啸玲, 杜诗嘉, 等. 计及需求响应的含大规模风电并网下电力系统灵活性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 42-51.  
ZHAO Fulin, YU Xiaoling, DU Shijia, et al. Assessment on flexibility of a power grid with large-scale wind farm integration considering demand response[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 42-51(in Chinese).
- [8] 王洪坤, 王守相, 潘志新, 等. 含高渗透分布式电源配电网灵活性提升优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 86-93.  
WANG Hongkun, WANG Shouxiang, PAN Zhixin, et al. Optimized dispatching method for flexibility improvement of distribution network with high-penetration distributed generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 86-93(in Chinese).
- [9] 李鹏, 韩建沛, 殷云星, 等. 电转氢作为灵活性资源的微网容量多目标优化配置[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 28-35, 139.  
LI Peng, HAN Jianpei, YIN Yunxing, et al. Multi-objective optimal capacity configuration of microgrid with power to hydrogen as flexible resource[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 28-35, 139(in Chinese).
- [10] 张懿议, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 基于云理论的电力变压器绝缘状态评估方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 13-20.  
ZHANG Yiyi, LIAO Ruijin, YANG Lijun, et al. An assessment method for insulation condition of power transformer based upon cloud model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 13-20(in Chinese).
- [11] 竺炜, 尹军, 路广才, 等. 基于线路负载率特征的主网“源-网-荷”协调性评估[J]. 电网技术, 2022, 46(1): 265-273.  
ZHU Wei, YIN Jun, LU Guangcai, et al. Line load rate characteristics[J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 265-273(in Chinese).
- [12] GU Haifei, JIE Yu, 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.
- [13] LI Deyi, LIU Changyu, GAN Wenyan. A new cognitive model: cloud model[J]. International Journal of Intelligent Systems, 2009, 24(3): 357-375.
- [14] 姚龙飞, 何利力. 基于云模型理论的群体用户画像模型[J]. 计算机系统应用, 2018, 27(6): 53-59.  
YAO Longfei, HE Li. Model of group user portrait based on cloud model theory[J]. Computer Systems & Applications, 2018, 27(6): 53-59(in Chinese).
- [15] WANG Pei, XU Xuanhua, HUANG Shuai, et al. A linguistic large group decision making method based on the cloud model[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2018, 26(6): 3314-3326.
- [16] XIANG Jie, HUANG Bowen, XIAO Guojun, et al. Power system flexibility enhancement with energy storages considering charging characteristics[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2023, 2474: 012076.
- [17] 何永贵, 刘江. 基于组合赋权-云模型的电力物联网安全风险评估[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4302-4309.  
HE Yonggui, LIU Jiang. Electric internet of things security risk assessment based on combined weighting-cloud model[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4302-4309(in Chinese).
- [18] 陈昌, 姜彤, 万凯遥. 考虑相关不确定性的环网静态电压稳定极限二阶锥优化迭代算法[J]. 电网技术, 2023, 47(4): 1682-1691.  
CHEN Chang, JIANG Tong, WAN Kaiyao. Conic optimization iterative algorithm for static voltage stability limit of ring network under related uncertainties[J]. Power System Technology, 2023, 47(4): 1682-1691(in Chinese).
- [19] 高庆忠, 赵琰, 穆昱壮, 等. 高渗透率可再生能源集成电力系统灵活性优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3761-3768.  
GAO Qingzhong, ZHAO Yan, MU Yuzhuang, et al. Electric internet of things security risk assessment based on combined[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3761-3768(in Chinese).



米伟铭

在线出版日期: 2023-08-03。

收稿日期: 2023-05-12。

作者简介:

米伟铭(1998), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为新型配电系统灵活性, E-mail: 752240728@qq.com;

叶鹏(1974), 男, 教授, 博士, 研究方向为电力系统分析、新能源并网等, E-mail: yepeng\_126@sina.com。

(编辑 李健一)