

# 新型配电系统中分布式电源承载能力 多维度综合动态评估

詹惠瑜\*, 贾东梨, 叶学顺, 康田园

(中国电力科学研究院有限公司, 北京 海淀 100192)

**摘要:** 针对高比例分布式电源接入下配电系统承载能力的全面评估, 本文构建了考虑线路载流量、电压水平、网络损耗、谐波/三相不平衡、配变可开放容量等5大类18小类的配电系统承载能力多维度评估指标体系, 提出了基于层次分析法的配电系统综合评估量化计算方法。同时, 进一步考虑风险、故障不同运行状态对系统承载力的影响, 针对性提出指标权重动态修正策略, 有效提升了配电系统承载能力在线评估的准确性。最后, 建立了配电系统承载能力评价原则, 通过含分布式光伏接入的IEEE 33节点配电系统, 验证了本文所提配电系统承载力评估方法的有效性。

**关键词:** 分布式电源; 配电系统; 承载能力; 动态修正策略

中图分类号: TM73

DOI: 10.13882/j.cnki.ncdqh.2506A043

CSTR: 32400.14.ncdqh.2506A043

## Multi-dimensional Comprehensive Dynamic Evaluation of the Hosting Capacity of Distributed Generations in New Distribution System

ZHAN Huiyu\*, JIA Dongli, YE Xueshun, KANG Tianyuan

(China Electric Power Research Institute, Beijing Haidian 100192, China)

**Abstract:** To comprehensively evaluate the distribution system hosting capacity with high-penetration distributed generation, this paper establishes a multi-dimensional evaluation index system comprising five major categories (line ampacity, voltage level, network losses, harmonic/three-phase unbalance, and distribution transformer available capacity) and 18 sub-categories. A quantitative calculation method for the comprehensive evaluation of the distribution system, based on the Analytic Hierarchy Process (AHP), is proposed. Furthermore, considering the impact of different operational states, such as risk and fault conditions, on the system hosting capacity, a dynamic adjustment strategy for index weights is specifically introduced, effectively enhancing the accuracy of the online evaluation of the distribution system hosting capacity. Finally, evaluation criteria for the distribution system hosting capacity are established. The effectiveness of the proposed evaluation method is verified using an IEEE 33-bus distribution system with integrated distributed photovoltaic generation.

**Keywords:** distribution generation; distribution network; hosting capacity; dynamic amendments strategy

## 0 引言

随着大规模分布式电源接入, 配电系统 (distribution network, DN) 承载能力不足的问题日益突出<sup>[1]</sup>。如何全面评估配电系统对分布式电源的承载能力, 成为保障配电系统安全运行的重要任务<sup>[2-4]</sup>。

目前, 在承载力评估指标体系方面, 国内外关于分布式电源承载能力的评估多从某一方面或某几

个方面进行, 通常单纯就配电系统性能方面开展研究的较多<sup>[5-6]</sup>。文献 [7] 从电能质量、电网管理水平、经济性等 3 个维度出发, 构建了配电系统对分布式光伏的接纳能力指标体系; 文献 [8] 考虑电压越限、线路传输容量等指标约束, 结合有载分接开关和静态无功补偿器的鲁棒优化动作, 提出了配电系统最大接纳分布式电源能力的评估方法; 文献 [9] 从经济性出发, 基于分布式光伏与储能的投资与运行成本评估指标, 构建了配电系统承载能力评估模型; 文献 [10] 分析了分布式光伏的不确定性, 提出了区间电压波动的评估指标, 开展配电系统对光伏承载

**基金项目:** 国家电网公司科学技术项目 (新型配电系统源荷协同优化控制关键技术及示范) (5400-202455173A-1-1-ZN)。

**收稿日期:** 2025-06-17

能力的评估。可以看出，现有研究大多集中在安全运行、电能质量或经济性等方面，评估指标相对单一。高比例分布式电源接入对于配电系统电压运行水平、线路传输容量、经济运行、电能质量等存在多方面影响<sup>[11-12]</sup>，亟须更加全面的评估指标体系实现对配电系统承载能力的多维度评估。

在承载力评估方法方面，国内外现有研究更侧重于配电系统的极限承载能力，通过识别承载力指标体系中的最“短板”，确定分布式电源的最大接纳容量<sup>[13]</sup>。如文献[14]考虑分布式光伏空间相关性，以电压偏差、线路热极限为约束条件，以分布式光伏接纳能力最大化为目标，求解承载能力上限；文献[15]提出了基于两阶段鲁棒优化的配电系统光伏最大承载能力评估方法；文献[16]考虑电压越限约束，提出了基于机会约束的分布式电源最大容量计算方法。总体而言，现有研究更加适合规划阶段的评估，可直接服务于分布式电源报装、配变增容改造等业务<sup>[17-18]</sup>。针对分布式电源接入后配电系统的运行阶段，缺乏承载力水平的在线动态评估方法。

为解决该问题，本文构建了考虑线路载流量、电压水平、网络损耗、谐波/三相不平衡、配变可开放容量等5大类18小类的配电系统承载能力多维度评估指标体系，提出了基于层次分析法的综合量化评估方法，并考虑在线动态运行过程中配电系统风险/故障状态造成的评估指标“信息淹没”问题，提出了风险与故障运行状态下不同指标权重的动态惩

罚修正策略，从而实现配电系统中分布式电源承载能力在线多维度综合评估。

## 1 配电系统承载能力指标体系构建

在考虑上述风险因素的基础上，本文配电系统对负荷、分布式电源接入的承载能力，提出差异化评估指标，构建大规模分布式电源接入场景下的配电系统承载能力评估指标体系。

### 1.1 承载能力评估指标体系构建

大规模分布式电源接入下的配电系统承载能力评估指标体系的一级指标包括线路载流、电压限额、网络损耗、电能质量、短路电流等5个方面，每个一级指标均包含若干个具体的二级指标，见图1。

### 1.2 承载能力评估关键指标计算方法

#### 1.2.1 线路载流指标 $A_1$

日最大负载率  $A_{11}$ 。在局部上，首先考虑支路最大负载率。作为系统所有支路中负载率最大值，可反映整个系统中负载状况最恶劣支路的重过载状况，当面临分布式电源接入、负荷波动、系统故障等情况时更容易过载或加重过载状况，承载能力势必受到影响。定义线路  $ij$  的负载率为：

$$w_{ij} = \left| \frac{F_{ij}}{F_{ij}^{\max}} \right|, \quad ij \in N_{ij} \quad (1)$$

定义支路日最大负载率指标为：

$$w_{ij}^{\max} = \max(w_{ij,h}), \quad ij \in N_{ij}, \quad h = \{1, 2, \dots, 24\} \quad (2)$$

式中： $F_{ij}$  为线路  $ij$  的实际传输功率； $F_{ij}^{\max}$  为线路

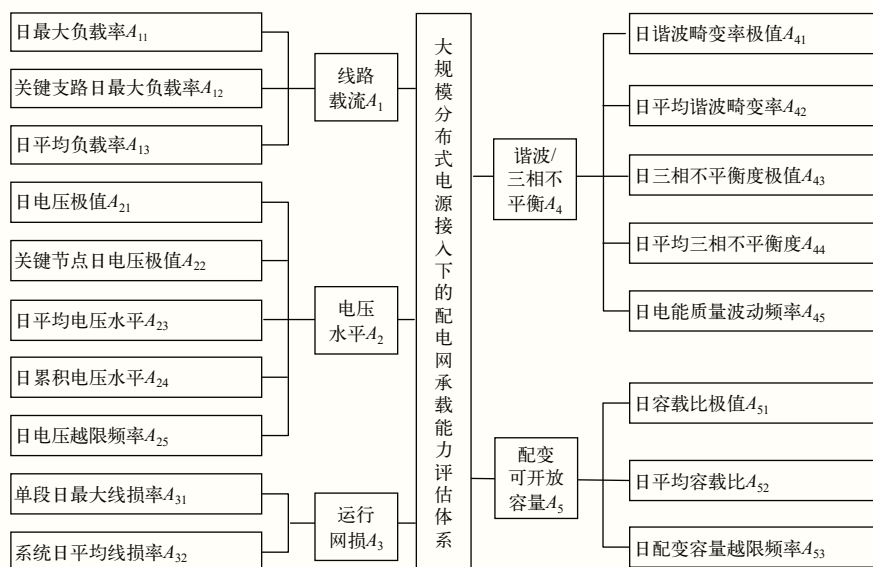


图1 配电系统承载能力评估指标体系

$ij$  的额定传输功率； $w_{ij,h}$  为线路  $ij$  在  $h$  时刻的负载率； $N_{ij}$  为配电系统传输线集合。

关键支路日最大负载率  $A_{12}$ 。局部风险中除了潮流特征最为清晰的最大负载率支路外，还须着重关注系统关键支路负载率可能对系统承载力造成的影响。如何寻找并保障这些关键线路的安全运行对配电系统的承载能力具有重要意义。因此，本文通过定义支路重要度对系统关键支路进行筛选，构建了关键支路负载率评估指标。定义支路重要度为：

$$\varepsilon_{ij} = 1 - \frac{C_{N,ij}}{TC_{N,0}} \quad (3)$$

式中： $\varepsilon_{ij}$  为传输线  $ij$  的重要度，是一个 0~1 之间的数； $C_{N,ij}$ 、 $C_{N,0}$  分别为在相同运行条件下传输线  $ij$  故障与正常运行状态下系统的供电量。

日平均负载率  $A_{13}$ 。上述指标仅针对单一支路，而指标体系的评估对象为配电系统。为综合反映配电系统的运行效率和负载水平，本文基于传输线重要度  $\varepsilon_{ij}$  对线路负载率进行加权，并归一化得到平均负载率，支路日平均负载率指标如下：

$$Wt = \frac{\sum_{h=1}^{24} \sum_{ij \in N_{ij}} \varepsilon_{ij} w_{ij,h}}{24 \sum_{ij \in N_{ij}} \varepsilon_{ij}} \quad (4)$$

### 1.2.2 电压水平指标 $A_2$

配电系统电压水平随着分布式电源接入及其渗透率的不断提升而变化。电压水平不仅影响电能质量，还将影响分布式新能源在配电系统中的承载能力。

日电压极值  $A_{21}$ 。与功率过载指标类似，首先考虑节点日电压极值。该指标定义如下：

$$\begin{cases} U_{\max} = \max(U_{i,h}) \\ U_{\min} = \min(U_{i,h}), i \in n, h = \{1, 2, \dots, 24\} \end{cases} \quad (5)$$

式中： $n$  为配电系统节点个数； $U_{\max}$  为系统节点电压日最大值； $U_{\min}$  为系统节点电压日最小值。

关键节点日电压极值  $A_{22}$ 。支路节点中除了节点电压最大值最小值外，还须关注关键节点的电压极值。关键节点是指配电系统中遭受各种故障灾变的冲击并失效后，会引发大面积停电或电网解列的系统节点。因此我们提出了综合考虑节点电压脆弱性与节点所接负荷特性的节点重要度来筛选关键节点，并对关键节点电压分布水平进行等级评定。

定义节点重要度如下：

$$\theta_i = \frac{a_{\text{inode}}}{\max(a_{\text{inode}})} \quad (6)$$

$$f_i = \begin{cases} 0.5, & a_{\text{grade}} = 1 \\ 0.1, & a_{\text{grade}} = 2 \\ 0.01, & a_{\text{grade}} = 3 \\ 0, & a_{\text{grade}} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\gamma_i = \alpha \theta_i + (1 - \alpha) f_i \quad (8)$$

式中： $a_{\text{inode}}$  为节点  $i$  的电压脆弱性； $\theta_i$  为根据度数得到的节点  $i$  的重要度； $a_{\text{grade}}$  为与节点相连负荷的负荷等级所代表的重要度，其中一级负荷数值为 1，二级为 0.1，三级为 0.01，若无直连负荷则为 0； $f_i$  为根据所接负荷等级得到的节点  $i$  的重要度； $\gamma_i$  为综合考虑节点度数与负荷等级下节点  $i$  的综合加权重度。本文将度数和负荷等级 2 种因素视为同等重要，设定  $\alpha$  的值为 0.5。选定关键节点后，定义关键节点的电压安全裕量百分比如下：

$$S = \left\{ \min \frac{\{U_i - U_l, U_u - U_i\}}{U_n} \right\} \times 100\%, i \in N \quad (9)$$

式中： $N$  为关键节点集合； $U_l$  为电压偏差下界； $U_u$  为电压偏差上界； $U_{i,h}$  为节点  $i$  在  $h$  时刻的电压； $U_n$  为系统电压额定值。

日平均电压水平  $A_{23}$ 。该指标是在考虑节点重要性的条件下，通过  $\gamma_i$  值对各节点电压进行线性加权并归一化构建得到，反映了全局空间尺度上的电压情况。其公式如下：

$$U_t = \frac{\sum_{h=1}^{24} \sum_i^n \gamma_i * U_{i,h}}{24 \sum_i^n \gamma_i} \quad (10)$$

日累积电压水平  $A_{24}$ 。该指标是在考虑配电系统运行的时间尺度特性基础上，通过对各断面节点电压水平进行累加求和得到，反映了全局时间尺度上的电压情况。其公式如下：

$$U_{c,i} = \sum_{h=1}^{24} \sum_i^n \gamma_i U_{i,h} \quad (11)$$

日累积电压水平  $A_{25}$ 。该指标定义如下：

$$U_f = \frac{n_{u \notin [u, \bar{u}]}}{N_{u,m}} \quad (12)$$

式中： $n_{u \notin [u, \bar{u}]}$  为日电压超限次数； $N_{u,m}$  为日电压测量次数。

### 1.2.3 运行网损指标 $A_3$

单段日最大线损率  $A_{31}$ 。该指标反映了系统中线

路电能传输效率最差的情况，同时可通过对比其他支路的线损率，若该段线损率明显大于其余线路的线损率，则考虑该支路是否存在较大安全隐患，作为事故预防的参考依据。定义支路  $ij$  的线损率为：

$$\Delta P_{ij}\% = \frac{d_{P_{ij}}}{P_{ij}} \times 100\%, \quad ij \in N_{ij} \quad (13)$$

定义单段支路日最大线损率为：

$$\Delta P_{\max}\% = \max\{\Delta P_{ij,h}\% \}, \quad h = \{1, 2, \dots, 24\} \quad (14)$$

式中： $d_{P_{ij}}$  为支路  $ij$  上的损耗功率； $P_{ij}$  为支路  $ij$  首端输送功率。

系统日平均线损率  $A_{32}$ 。该指标从全局上反映了电网运行状态下的线损率平均水平，对系统运行的安全性和经济性评定具有良好的参考价值。定义系统日平均线损率为：

$$\Delta P_a\% = \frac{\sum_{h=1}^{24} \sum_{ij=1}^n \Delta P_{ij,h}\%}{24n} \quad (15)$$

#### 1.2.4 谐波/三相不平衡指标 $A_4$

日谐波畸变率极值  $A_{41}$ 。总谐波畸变因数 (Total Harmonic Distortion, THD) 可表示为：

$$T = \frac{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \quad (16)$$

日谐波畸变率极值指标定义如下：

$$\begin{cases} T_{\max} = \max(T_{i,h}) \\ T_{\min} = \min(T_{i,h}), \quad i \in n, h = \{1, 2, \dots, 24\} \end{cases} \quad (17)$$

日平均谐波畸变率  $A_{42}$ 。该指标定义如下：

$$T_t = \frac{\sum_{h=1}^{24} \sum_{i=1}^n \gamma_i T_{i,h}}{24 \sum_{i=1}^n \gamma_i} \quad (18)$$

电压三相不平衡度极值  $A_{43}$ 。本文针对电压三相不平衡度的计算采用了一种近似算法：

$$\begin{cases} \varepsilon_{U_i} = \frac{\max\{|U_i^A - U_{\text{jave}}|, |U_i^B - U_{\text{jave}}|, |U_i^C - U_{\text{jave}}|\}}{U_{\text{jave}}} \\ U_{\text{jave}} = \frac{(U_i^A + U_i^B + U_i^C)}{3} \end{cases} \quad (19)$$

式中： $U_i^A$ 、 $U_i^B$ 、 $U_i^C$  分别为节点  $i$  的三相电压； $U_{\text{jave}}$  为节点  $i$  三相电压均值。

日三相不平衡度极值指标定义如下：

$$\begin{cases} \varepsilon_{U_{\max}} = \max(\varepsilon_{U_{i,h}}) \\ \varepsilon_{U_{\max}} = \max(\varepsilon_{U_{i,h}}), \quad i \in n, h = \{1, 2, \dots, 24\} \end{cases} \quad (20)$$

日平均三相不平衡度  $A_{44}$ 。该指标定义如下：

$$\varepsilon_{U_t} = \frac{\sum_{h=1}^{24} \sum_{i=1}^n \gamma_i \varepsilon_{U_{i,h}}}{24 \sum_{i=1}^n \gamma_i} \quad (21)$$

日电能质量波动频率  $A_{45}$ 。该指标定义如下：

$$\varepsilon_f = \frac{n_{\varepsilon \in [\underline{\varepsilon}, \bar{\varepsilon}]}}{N_{\varepsilon,m}} \quad (22)$$

式中： $n_{\varepsilon \in [\underline{\varepsilon}, \bar{\varepsilon}]}$  为日电能质量（包括谐波、三相不平衡）越限次数； $N_{\varepsilon,m}$  为日电能质量（包括谐波、三相不平衡）总测量次数。

#### 1.2.5 配变容量指标 $A_5$

日容载比极值  $A_{51}$ 。该指标可按式估算：

$$R_{s,h} = \frac{\left\{ \left[ \begin{array}{l} (K_1 K_4) \\ (K_2 K_3) \end{array} \right] P_{s,h} \right\}}{S_{s,h}} \quad (23)$$

式中： $R_{s,h}$  为第  $s$  个配电变压器的容载比，kW/kV·A； $P_{s,h}$  为第  $s$  个配电变压器第  $h$  时刻的功率； $S_{s,h}$  为第  $s$  个配电变压器的额定容量； $K_1$  为负荷分散系数； $K_2$  为变压器安全运行率； $K_3$  为变压器运行率； $K_4$  为储备系数。 $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $K_4$  根据变压器性质和经验取值。

日平均容载比  $A_{52}$ 。基于每个时段的配变容载比，可以定义一天 24 h 内的日平均容载比，可按式估算：

$$R_t = \frac{\sum_{h=1}^{24} R_{s,h}}{24} \quad (24)$$

日配变容量越限频率  $A_{53}$ 。该指标定义如下：

$$R_f = \frac{n_{R \in [\underline{R}, \bar{R}]}}{N_{R,m}} \quad (25)$$

式中： $n_{R \in [\underline{R}, \bar{R}]}$  为日配变容量越限次数； $N_{R,m}$  为日配变容量总测量次数。

## 2 配电系统承载力综合评估方法

针对上节大规模分布式电源接入的配电系统承载能力分析提出的多个指标，这些指标的量纲、单位各不相同，每个指标所体现的承载能力大小也不尽相同，直接观察难以对不同配电系统网络形态的承载能力进行综合评判。因此，本节针对所提出的指标体系提出综合评估方法，得到多维度指标下配电系统承载力的综合评估结果。

## 2.1 基于层次分析法的综合评估

本文采用层次分析法 (analytic hierarchy process, AHP), 获得配电系统承载力指标体系中每一层次的相对重要程度, 从而得到各个指标的权重系数。在图 1 中的指标体系中, 除目标层外, 每个一级指标层都有多个评价指标, 每个指标的权重就指该指标对上一层元素的影响程度。

假设其中一个一级指标与所属的二级层的  $n$  个指标  $A = [A_1, A_2, \dots, A_n]$  有关联, 并假设权重为  $W = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 。两两比较  $A_i$  和  $A_j$  对上层指标的影响程度, 以  $D_{ij} = \frac{A_i}{A_j}$  表示,  $D_{ij}$  的值用数字 1~9 及其倒数表示。即 AHP 中的标度, 标度含义见表 1。

表1 AHP 标度含义

$M_{ij}$ 值	含义
1	$A_i$ 与 $A_j$ 同等重要
3	$A_i$ 比 $A_j$ 稍重要
5	$A_i$ 比 $A_j$ 明显重要
7	$A_i$ 比 $A_j$ 强烈重要
9	$A_i$ 比 $A_j$ 及其重要
2, 4, 6, 8	表示上述相邻判断的中间值

通过层次分析法, 可以根据不同指标的重要性对其权重赋值。最后将各单项指标的量化值进行加权就得到一个综合指标, 该指标就是综合量化评估结果, 即配电系统承载力综合得分。最后构成判断矩阵  $D$ , 矩阵中各元素定义为:

$$\begin{cases} D_{ij} = \frac{A_i}{A_j}, & i \neq j \\ D_{ji} = \frac{A_j}{A_i}, & i \neq j \\ 1, & i = j \end{cases} \quad (26)$$

式中:  $D_{ij} > 0$ ;  $j = 1, 2, \dots, n$ 。

## 2.2 风险与故障运行状态下指标权重的动态惩罚修正策略

2.1 节中的承载力综合评估方法中, 各指标权重一旦使用某种方法确定后便保持不变, 然而, 当某项评价指标超过安全运行阈值时, 若该指标分配的权重较小, 经评估后得到的配电系统承载力仍可能显示为正常状态, 导致异常信息被淹没, 这样是不符合实际运行情况的。因此, 在对配电系统承载力进行动态评估时, 应充分考虑异常信息被淹

没的情况, 根据运行状态对指标权重进行动态调整, 使异常信息能够在动态综合评估结果中得到体现。

### 2.2.1 风险运行场景下权重的惩罚修正机制

本文提出的配电系统承载力评估指标体系中, 每项评估指标都有一定的正常运行范围阈值。在评估某一配电系统当前承载能力时, 若某一项评估指标的计算值超过对应的范围阈值, 应相应提高该评估指标在当前指标体系中的重要程度, 使其成为综合评估配电系统承载能力的关键指标。即对该评估指标的权重进行修正, 凸显其对配电系统承载能力的重要影响, 便于运维人员关注配电系统承载力评估指标的趋势变化。

假设配电系统承载力评估指标中有  $n$  个指标的计算值超过了其正常运行阈值, 记下标集合为  $A$ 。风险指标的权重按下式进行修正:

$$w_i = w_{i0} + \left| \frac{(i - \beta_0)}{(\alpha_0 - \beta_0)} \right| w_{i0} \quad (27)$$

式中:  $w_i$  为第  $i$  个风险指标调整后的权重;  $w_{i0}$  为第  $i$  个风险指标调整前的初始权重;  $i$  为风险指标计算值;  $\alpha_0$ 、 $\beta_0$  分别为正常运行阈值的上下限。

### 2.2.2 故障运行场景下权重的惩罚修正机制

当配电系统承载能力的某些评估指标计算值不仅超过正常运行范围的阈值, 还超过配电系统规定的安全运行范围时, 表明当前配电系统的承载能力十分脆弱, 且配电系统处于一定程度的危险状态。为避免因初始指标权重较小, 故障信息在综合评估时造成信息淹没, 必须对初始权重进行必要修正, 充分凸显系统的故障运行状态。

设配电系统承载力评估指标中有  $j$  个指标的计算值超过了其安全运行的报警值, 记下标集合为  $B$ 。故障指标的权重按下式进行修正:

$$w_j = e^{w_{j0} \left| \frac{(j - \beta_1)}{(\alpha_1 - \beta_1)} \right|} \quad (28)$$

式中:  $w_j$  为第  $j$  个故障指标调整后的权重;  $w_{j0}$  为第  $j$  个故障指标调整前的初始权重;  $j$  为故障指标的计算值;  $\alpha_1$ 、 $\beta_1$  分别为安全运行报警值的上下限。

综上所述, 配电系统承载力综合评估指标的动态权重修正方法可总结如下:

$$w_x = \begin{cases} w_{x0}, & x \notin A \cup B \\ w_{i0} + \left| \frac{(i - \beta_0)}{(\alpha_0 - \beta_0)} \right| w_{i0}, & i \in A \\ e^{w_{j0} \left| \frac{(j - \beta_1)}{(\alpha_1 - \beta_1)} \right|}, & j \in B \end{cases} \quad (29)$$

上述指标权重修正模型仅对超过阈值或报警值的指标权重进行调整，这种惩罚机制能够充分凸显风险或故障运行场景下评估指标所反映的异常信息。虽然调整后所有评价指标权重之和大于1，但这种权重调整机制能有效避免配电系统承载能力崩溃场景的发生。配电系统风险与故障运行限值见表2。

表2 配电系统风险与故障运行限值

目标层	准则层	风险运行阈值	故障运行报警值	
大规模分布式电源接入下的配电系统承载能力	线路载流 $A_1$	$A_{11}$	[80%, 100%]	>100%
		$A_{12}$	[50%, 80%]	>80%
		$A_{13}$	[50%, 80%]	>80%
	电压水平 $A_2$	$A_{21}$	[0.93, 0.97]或[1.03, 1.07]	<0.93或>1.07
		$A_{22}$	[0.95, 0.97]或[1.03, 1.05]	<0.95或>1.05
		$A_{23}$	[0.95, 0.97]或[1.03, 1.05]	<0.95或>1.05
		$A_{24}$	[22.8, 23.28]或[24.72, 25.2]	<22.8或>25.2
		$A_{25}$	>8.33%	>16.67%
	运行网损 $A_3$	$A_{31}$	[10%, 20%]	>20%
		$A_{32}$	[5%, 10%]	>10%
	谐波与三相不平衡 $A_4$	$A_{41}$	[3%, 5%]	>5%
		$A_{42}$	[3%, 5%]	>5%
		$A_{43}$	[2%, 4%]	>4%
		$A_{44}$	[1.3%, 2%]	>2%
		$A_{45}$	>6.94%	>13.89%
配变容量 $A_5$	$A_{51}$	[80%, 100%]	>100%	
	$A_{52}$	[50%, 80%]	>80%	
	$A_{52}$	>8.33%	>16.67%	

表3 AHP 标度含义

等级	评分	含义
I	[95, 100]	可完全承载分布式电源就地接入，且具备容量冗余
II	(90, 95]	可完全承载分布式电源就地接入
III	(85, 90]	就地消纳 + 上送，无异常情况
IV	(80, 85]	无法正常消纳分布式电源，电网运行存在风险
V	[0, 80]	无法消纳分布式电源，电网运行存在危险

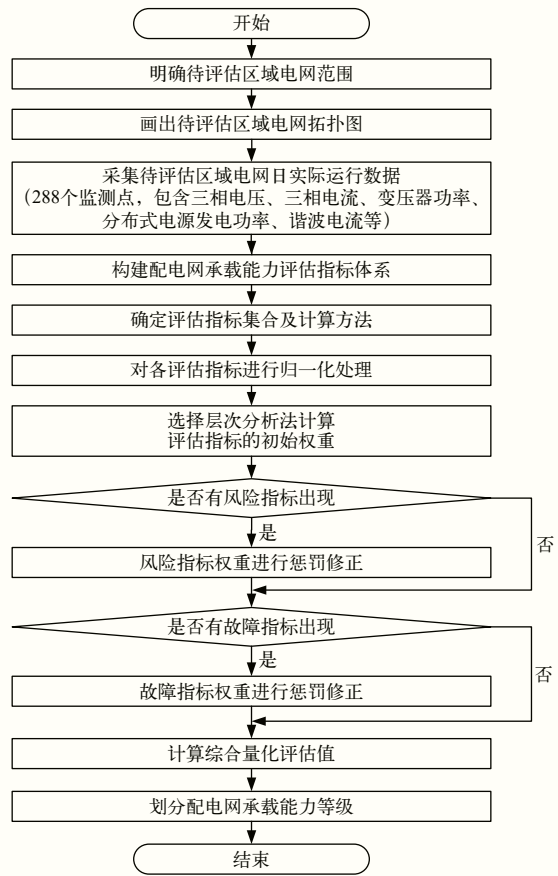


图2 配电系统承载力综合评估流程

### 2.3 配电系统承载能力等级划分

本文将配电系统的承载能力分为5个等级：I级、II级、III级、IV级、V级，各等级从高到低依次表示高、较高、中等、较低和低承载能力。相应等级的配电系统承载能力评分区间和含义见表3。

### 2.4 配电系统承载力动态评估流程

综合上述方法，本文提出的配电系统承载力动态评估流程见图2。

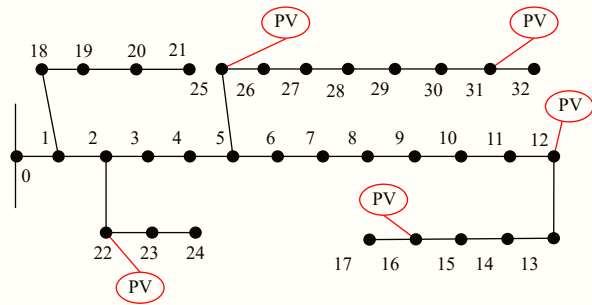


图3 分布式光伏接入下 IEEE 33 节点算例

表4 光伏接入位置与容量

接入节点	容量/kW
12	500
16	1 800
22	1 000
25	800
31	1 000

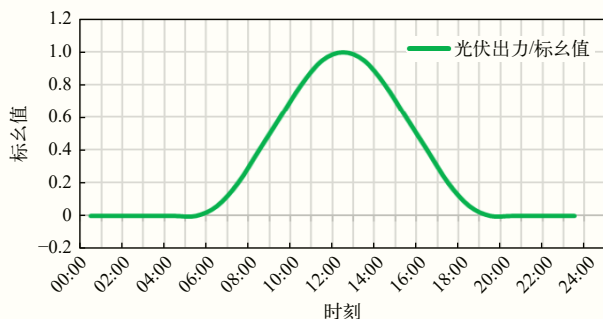


图4 光伏出力曲线

表5 配电系统承载力评估指标权重排序

目标层	准则层		指标层		初始权重
	指标	权重	指标	权重	
大规模分布式电源接入下的配电系统承载能力	线路载流 $A_1$	0.246	$A_{11}$	0.075 0	0.075 0
			$A_{12}$	0.022 0	0.034 0
			$A_{13}$	0.150 0	0.150 0
	电压水平 $A_2$	0.369	$A_{21}$	0.145 0	0.279 0
			$A_{22}$	0.031 0	0.043 0
			$A_{23}$	0.049 0	0.049 0
			$A_{24}$	0.048 0	0.048 0
			$A_{25}$	0.097 0	0.097 0
	运行网损 $A_3$	0.176	$A_{31}$	0.058 0	0.058 0
			$A_{32}$	0.118 0	0.118 0
	谐波与三相不平衡 $A_4$	0.070	$A_{41}$	0.017 5	0.017 5
			$A_{42}$	0.017 5	0.017 5
			$A_{43}$	0.010 5	1.000 4
			$A_{44}$	0.010 5	0.015 9
			$A_{45}$	0.014 0	0.014 0
配变容量 $A_5$	0.140	$A_{51}$	0.046 2	0.046 2	
		$A_{52}$	0.046 2	0.046 2	
		$A_{53}$	0.046 2	0.046 2	

### 3 算例验证

为了验证所提出的承载能力评估指标体系的正确性和有效性，基于 IEEE 33 bus 算例进行指标计算，如图 3 所示。计算环境说明如下：1) 基准电压为 12.66 kV，最高与最低电压幅值设为 1.07 p.u.和 0.93 p.u.，各节点的额定电压为 1.0 p.u.；2) 分布式光伏接入位置及容量见表 4。

由于光伏发电主要受光照强度的影响，其随时间的变化关系如图 4 所示。光伏出力在夜间基本为 0，随着时间接近正午，光伏出力逐渐增大。

#### 3.1 配电系统承载力评估指标初始权重计算

运用层次分析法，构建配电系统承载能力层次分析模型，建立线路载流、电压水平、网络损耗、电能质量、配变容量 5 个一级指标以及 18 个相应二级指标，构建判断矩阵，计算指标权重，通过一致性检验得出指标层各指标所占初始权重值并进行排序，见表 5。

#### 3.2 风险、故障运行场景下评估指标的动态修正

根据风险、故障运行场景下权重的惩罚修正机

表6 配电系统承载力评估指标权重排序

指标	初始权重	修正权重
$A_{11}$	0.075 0	0.075 0
$A_{12}$	0.022 0	0.034 0
$A_{13}$	0.150 0	0.150 0
$A_{21}$	0.145 0	0.279 0
$A_{22}$	0.031 0	0.043 0
$A_{23}$	0.049 0	0.049 0
$A_{24}$	0.048 0	0.048 0
$A_{25}$	0.097 0	0.097 0
$A_{31}$	0.058 0	0.058 0
$A_{32}$	0.118 0	0.118 0
$A_{41}$	0.017 5	0.017 5
$A_{42}$	0.017 5	0.017 5
$A_{43}$	0.010 5	1.000 4
$A_{44}$	0.010 5	0.015 9
$A_{45}$	0.014 0	0.014 0
$A_{51}$	0.046 2	0.046 2
$A_{52}$	0.046 2	0.046 2
$A_{53}$	0.046 2	0.046 2

制对权重进行更新,更新后的权重见表6。

### 3.3 配电系统承载能力综合评估结果对比

根据3种不同的评估指标权重计算方法,计算得到的配电系统承载能力评估结果见表7所示。可以看出,动态修正后的评估结果能更准确地反映配电系统的运行状态,更符合实际运行需求。

表7 配电系统承载能力综合评估结果

权重计算	评估分数	评估等级	承载力评价
固定权重	87.32	III	中等
风险指标权重动态修正	83.89	IV	较低
风险/故障指标权重动态修正	76.52	V	低

## 4 结论

本文聚焦分布式电源接入对配电系统的影响,综合考虑配电系统线路载流、电压水平、运行网损、谐波与三相不平衡、配电容量等多维度,构建了大规模分布式电源接入下的有源配电系统评估指标体系,并针对有源配电系统多种运行状态和典型场景,提出了承载能力评估指标的动态权重修正方法。实验结果表明,该方法可有效避免传统评估方法中由于权重固定导致的异常信息淹没问题,准确反映系统承载能力的动态变化情况,契合运行阶段承载力在线评估的实际需求。

## 参考文献

- [1] 潘美琪,贺兴,艾芊,等.新型配电系统分布式资源调度研究现状与展望[J].电网技术,2024,48(3):933-949.
- [2] F. Ding and B. Mather. On Distributed PV Hosting Capacity Estimation, Sensitivity Study, and Improvement[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 08(3):1010-1020.
- [3] 李春锋,刘广朋,李宝琴,等.配网分布式电源经济可承载力评估[J/OL].中国电力,1-8[2024-05-14].
- [4] 明萌,周楠西,高丽媛,等.有源配电系统分布式光伏承载力分析评估与应用[J].供用电,2023,40(11):35-44.
- [5] 但扬清,王蕾,郑伟民,等.高比例可再生能源接入背景下电网承载能力鲁棒提升策略[J].中国电力,2023,56(9):104-111.
- [6] 董昱,董存,于若英,等.基于线性最优潮流的电力系统新能源承载能力分析[J].中国电力,2022,55(3):1-8.
- [7] 张昆,赵倩宇,王守相,等.综合反映配电系统分布式光伏接纳能力的评估指标构建及计算方法[J].供用电,2024,41(2):3-11.
- [8] S. WANG, S. CHEN, L. GE, L. WU. Distributed generation hosting capacity evaluation for distribution systems considering the robust optimal operation of OLTC and SVC[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 07(3):1111-1123.
- [9] B. SUN, R. JING, L. GE, et al. Quick hosting capacity evaluation based on distributed dispatching for smart distribution network planning with distributed generation[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2024, 12(1):128-140.
- [10] S. WANG, Y. DONG, L. WU, et al. Interval overvoltage risk based PV hosting capacity evaluation considering PV and load uncertainties[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(3):2709-2721.
- [11] A. S. A. Awad, D. Turcotte, T. H. M. El-Fouly. Impact assessment and mitigation techniques for high penetration levels of renewable energy sources in distribution networks: voltage-control perspective[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2022, 10(2):450-458.
- [12] M. R. Feizi, M. E. Khodayar, B. Chen. Feasible dispatch limits of PV generation with uncertain interconnection of EVs in the unbalanced distribution network[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(3):2267-2280.
- [13] J. M. Home-Ortiz, L. H. Macedo, R. Vargas, R. Romero, J. R. S. Mantovani and J. P. S. Catalão. "Increasing RES Hosting Capacity in Distribution Networks Through Closed-Loop Reconfiguration and Volt/VAr Control," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 58, no. 4, pp. 4424-4435, July-Aug. 2022.
- [14] H. WU, Y. YUAN, J. ZHU, et al. Potential assessment of spatial correlation to improve maximum distributed PV hosting capacity of distribution networks[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(4):800-810.
- [15] S. ZHANG, Y. FANG, H. ZHANG, et al. Maximum hosting capacity of photovoltaic generation in SOP-based power distribution network integrated with electric vehicles[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(11):8213-8224.
- [16] M. S. S. Abad, J. Ma, D. Zhang, et al. Probabilistic assessment of hosting capacity in radial distribution systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(4):1935-1947.
- [17] 王强强,姚良忠,盛万兴,等.基于机会约束规划的配电系统分布式光伏承载力提升方法[J].电力系统自动化,2023,47(18):132-141.
- [18] 郝文斌,孟志高,张勇,等.新型电力系统下多分布式电源接入配电系统承载力评估方法研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(14):23-33.

## 作者简介

詹惠瑜(1994—),女,硕士,工程师,研究方向为配电网数据处理、运行状态分析、故障诊断等, E-mail: zhanhy@epri.sgcc.com.cn。

贾东梨(1982—),女,硕士,教授级高级工程师,主要从事配电系统运行分析与控制的研究工作, E-mail: jiadl@epri.sgcc.com.cn。

叶学顺(1985—),男,硕士,高级工程师,从事虚拟电厂建模分析、分布式能源并网控制等方面的研究工作, E-mail: yexueshun@epri.sgcc.com.cn。

康田园(1989—),女,硕士,高级工程师,研究方向为配电网运行状态分析、城市电网建模仿真、分布式电源并网仿真等, E-mail: ktyzzu@163.com。

(责任编辑:袁航)