

新型电力系统风险抑制下分布式光伏承载力 概率评估方法

王方敏¹, 项佳宇², 苏宁¹, 牛焕娜³, 袁嘉兴³, 门盼龙³

(1. 北京电力经济技术研究院有限公司, 北京 100055; 2. 国网北京市电力公司, 北京 100031;
3. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘 要: 为了抑制新型电力系统背景下分布式光伏无序接入带来的安全稳定运行风险, 提出了基于历史场景统计的光伏承载力分层分级概率评估方法。该方法建立了基于反向负载率的光伏承载力分级概率评估模型以及安全校核概率评估模型, 给出了基于历史场景统计的光伏承载力薄弱环节分级概率评估流程, 并通过构建基于百分位数统计的光伏承载力评估模型, 最终形成了分布式光伏接入配电网承载力分层分级概率评估方法。通过改进导则算例和实际配电网案例验证了所提方法的有效性和普适性, 实验表明该方法能够科学展示不同百分位数下各供电区域的光伏可新增容量, 识别的光伏承载力薄弱程度更符合统计学意义。

关键词: 配电网; 光伏承载力; 历史场景统计; 分层分级

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202407042

0 引言

“双碳”背景下, 高比例分布式光伏接入配电网已成为必然趋势^[1-5]。当前分布式光伏接入呈现布局无序、局部并网密度过高的特点, 为了保证分布式光伏与负荷和电网的协调发展, 有必要评估各区域各节点未来可接入的分布式光伏容量裕度, 为分布式光伏和配电网协调发展、建设提供指导。

分布式光伏接入配电网承载力是指在满足配电设备和线路承载力不越限的条件下, 配电网最大可新增分布式光伏容量。在分布式光伏接入配电网承载力综合评估方面, 已有研究人员从反向过载、电压偏差、经济性等光伏承载力影响因素校核方面入手, 对分布式光伏接入容量展开计算研究^[6-8]。文献[9]基于配电网实际运行状态和安全边界, 提出了一种数据驱动的配电网分布式光伏承载力评估方法。文献[10-11]综合考虑了多个约束指标开展了光伏承载力评估分析。文献[12-

13]借助于PSCAD、OpenDSS等仿真软件, 实现光伏接入电网承载力影响因素的评估, 但评估场景具有局限性。在光伏承载力优化建模方面, 文献[14]提出了机会约束的分布式光伏承载能力的优化评估方法。文献[15]以配电网新能源接纳能力最大为目标函数建立新能源规划模型。为了全面客观评估分布式光伏接入配电网承载力, 文献[16]提出了一种兼顾经济品质的光伏承载力评估方法。文献[17]构建分布式光伏最大准入容量评估线性化模型, 提出考虑5G基站可调度潜力的配电网分布式光伏最大准入容量评估方法。文献[18]建立了新型电力系统的承载力总额评估体系, 分析了典型区域的网架薄弱环节。文献[16-18]主要是通过以光伏承载力最大为目标函数, 但具有建模及求解复杂、适用场景有限的不足。

总体而言, 目前常规研究的光伏承载力分析技术主要从分布式光伏并网对配电网造成的电能质量、继电保护等方面的影响分析出发, 给出最大或平均负荷场景下的承载力, 属于仅考虑极端时间断面或大致平均场景下的光伏接纳能力评估, 使得评估出的光伏承载力偏于保守或过于粗略, 限制了分布式光伏的可持续发展。为了科学合理的评估分布式光伏接入配电网各节点各区域承载力, 有必要利用统计学手段综合考虑待评估

收稿日期: 2024-07-08; **修回日期:** 2025-02-25。

基金项目: 北京电力经济技术研究院有限公司资助项目(SGBJJY00SJS2400033); 国家重点研发计划资助项目(2022YFE0129400)。

区域所有历史运行状态,从而定位承载力受限的小概率场景及其对应薄弱环节。本文在静态评估方法基础上提出光伏承载力薄弱环节分级概率评估方法和光伏承载力分层评估计算方法。通过DIgSIENT仿真软件对配电网案例进行计算,验证所提评估方法的有效性和普适性。

1 基于二分法的光伏承载力静态评估方法

在负荷消纳能力不足且太阳辐照度较强的情况下,部分线路和变压器将出现反向潮流,若继续增加光伏装机,将使得其传输功率和反向负载率大幅增加。为了将线路和变压器设备反向负载率控制在安全裕度内,本文将配电设备反向负载率裕度作为分布式光伏接入配电网承载力评估的基础。

线路以及变压器反向负载率为

$$\lambda(t) = \frac{P_G(t) - P_L(t)}{S_e} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $\lambda(t)$ 为时刻 t 线路以及变压器配电设备的反向负载率; $P_G(t)$ 为时刻 t 线路或变压器供电区域内分布式电源出力之和,分布式电源既包含分布式光伏,又包含分布式风机等其他类型电源; $P_L(t)$ 为线路或变压器供电区域内负荷功率之和; S_e 为线路或变压器最大实际运行限值。

在反向负载率裕度校核求取最大分布式光伏接入容量大小时,以此时刻的反向负载率为基础计算线路或变压器所对应供电区域内最大可接入容量,即

$$S_{M,k}(t) = \begin{cases} \frac{(\lambda_r - \lambda(t))S_e}{\eta_{PV}(t)}, & \lambda(t) < \lambda_r \\ 0, & \lambda(t) \geq \lambda_r \end{cases} \quad (2)$$

式中: $S_{M,k}(t)$ 为时刻 t 第 k 个线路或变压器供电区域内分布式光伏最大可新增容量; λ_r 为线路或变压器设备允许的反向负载率裕度; $\eta_{PV}(t)$ 为时刻 t 分布式光伏单位容量的实际功率,取值与当地的光伏发电效率有关。

光伏承载力除了受配电设备反向负载率越限影响,还与电压偏差越限、电能质量超标、保护失效等有关,即

$$\begin{cases} (\delta U_{H,i}(t) < \Delta U_H) \cup (\delta U_{L,i}(t) > \Delta U_L) \\ I_{xz,i} < I_m \\ I_{xb,h}(t) < I_{xh} \end{cases} \quad (3)$$

式中: ΔU_H 、 ΔU_L 分别为标准规定的最大正、负电压偏差限值; $\delta U_{H,i}(t)$ 、 $\delta U_{L,i}(t)$ 分别为时刻 t 在 i 母线上最大正、负电压偏差实际评估值; $I_{xz,i}$ 为根据标准和导则实际的母线 i 短路电流计算值; I_m 为短路电流规定限值; $I_{xb,h}(t)$ 为时刻 t 第 h 次的实际求得的谐波电流值; I_{xh} 为根据相关标准规定的谐波电流限值。

由于光伏承载力受多方面因素影响,因此在进行光伏承载力反向负载率计算前、模拟接入相应容量光伏后都需要进行光伏承载力影响因素安全校核^[19-20]。基本原理如下:首先,在安全校核的基础上,评估计算供电区域内可新增光伏容量 S_M ;其次,在评估区域接入 S_M 容量的光伏后再进行安全校核,若通过校核,则 S_M 为光伏承载力评估结果;若不通过校核则利用二分法思想获得最终光伏承载力评估结果。基于二分法的光伏承载力静态评估校核流程如下图 1 所示。

2 光伏承载力薄弱环节分级概率评估方法

在新型电力系统形势下,配电网中接入大量多元调节资源,进而助力分布式光伏的就地或就近消纳,从而提高光伏承载能力。在此情况下,供电线路流动的功率 P_{Net} 中将包含一部分可调功率如图 2 所示,设待评估区域最大负荷型可上调功率为 P_c ,其值可参照文献[21]中各灵活性资源可上调功率计算方法,由该区域内各可调控资源的最大可上调功率进行方向加和。最大负荷型可上调功率 P_c 在一定程度将降低线路或变压器反向负载率,可能使得待评估区域不再出现反向潮流,从而削弱光伏承载力薄弱程度。

为了细化光伏承载力薄弱环节等级,本文定义待评估区域可调控裕度系数 λ_c 为

$$\lambda_c = \frac{P_c}{S_e} \quad (4)$$

式中: S_e 为待评估区域所属供电线路或变压器设备最大实际运行限值; P_c 为待评估区域最大负荷型可上调功率。

考虑到历史场景中线路以及变压器反向负载

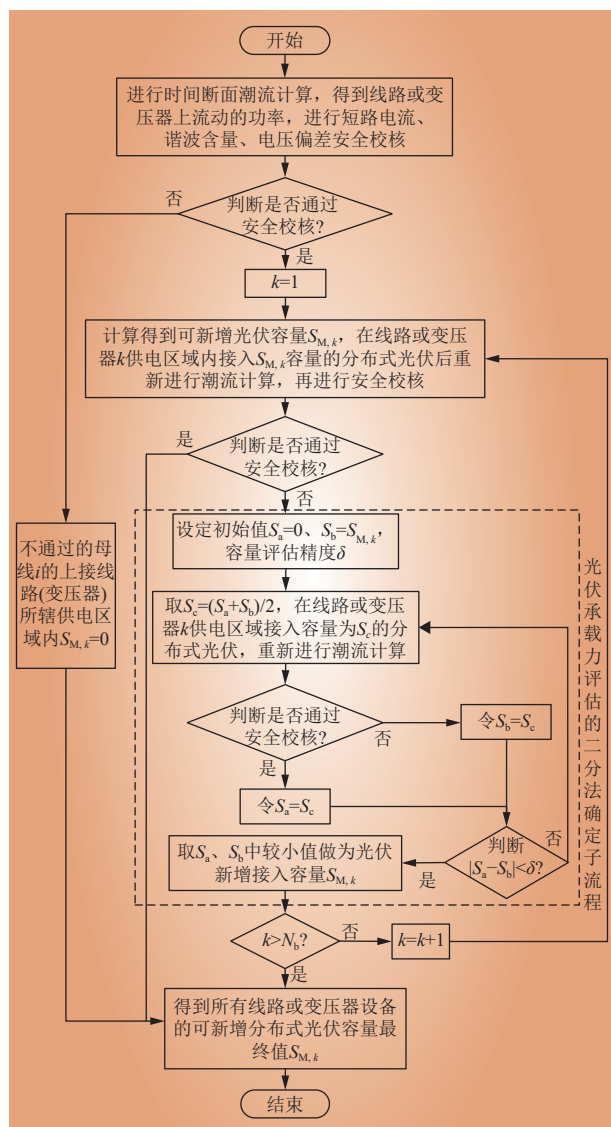


图 1 基于二分法的光伏承载力静态评估流程

Fig. 1 Static evaluation flow chart of photovoltaic carrying capacity based on binary method

率的值在各评估等级中表现出概率分布, 本文将在上一节承载力静态评估模型的基础上利用概率统计方法实现评估。本文将分布式光伏承载力评估分为 4 种评估等级, 分别为: I 级 (红色), II 级 (黄色), III 级 (蓝色), IV 级 (绿色)。不同等级对应不同的判定标准, 等级越高, 光伏承载力薄弱程度越小。光伏承载力薄弱环节 4 等级评估模型为

$$G_{B,k} = \begin{cases} \text{I 级, } \Pr\{\lambda_k(t) \geq \lambda_{r,k}\} > \varepsilon_1 \\ \text{II 级, } \Pr\{\lambda_{c,k} \leq \lambda_k(t) < \lambda_{r,k}\} > \varepsilon_2 \\ \text{III 级, } \Pr\{0 \leq \lambda_k(t) < \lambda_{c,k}\} > \varepsilon_3 \\ \text{IV 级, } \Pr\{\lambda_k(t) < 0\} > \varepsilon_4 \end{cases} \quad (5)$$

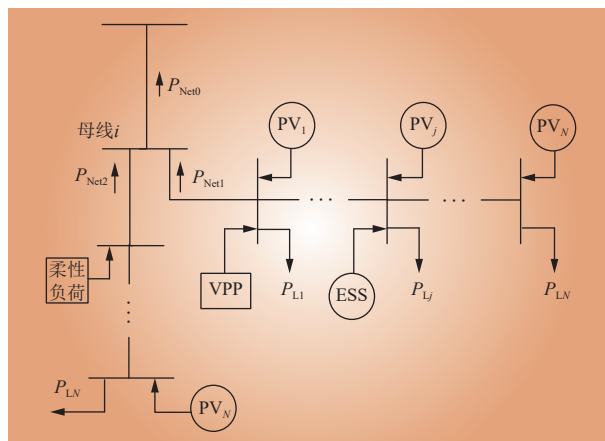


图 2 含多元负荷型可上调调节资源的分布式光伏接入配电网的典型结构

Fig. 2 Typical structure diagram of distributed photovoltaic access to distribution network with multi-load type up-regulation resources

且

$$\begin{cases} \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4 = 1 \\ \varepsilon_1 < \varepsilon_2 < \varepsilon_3 < 1\% \\ \varepsilon_4 > 99\% \end{cases} \quad (6)$$

式中： $G_{B,k}$ 为第 k 个线路或变压器设备光伏承载力薄弱环节评估等级； $\lambda_k(t)$ 为时刻 t 第 k 个线路或变压器设备的反向负载率值， t 在评估区域历史时间集中； $\lambda_{r,k}$ 第 k 个线路或变压器设备的允许反送裕度； $\lambda_{c,k}$ 为第 k 个线路或变压器设备的可调控裕度系数； $\Pr\{\cdot\}$ 为事件成立的概率； ε_1 、 ε_2 、 ε_3 、 ε_4 分别为4个评估等级的概率水平允许值，其中 ε_1 、 ε_2 、 ε_3 取小概率， ε_4 取大概率。

需要指出的是,承载力分级评估的等级越薄弱,则评估越严格,其判定的概率水平允许值越小。由于不同电压等级电网的运行稳定性以及维护成本有差异,所以电压等级越高,分级评估则越严格,概率水平允许值越小。实际工程中,电网企业对不同待评估区域的判定要求往往需根据实际情况而定,以下列出3种特殊情形。

1) 若待评估区域在调控前后皆不允许存在潮流倒送的情况, 那么将概率水平允许值设置为 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0$, 将评估等级分为两级: 红色、绿色。若 $\Pr\{\lambda_k(t) \geq 0\} > 0$, 则评估等级为 I, 反之评估等级为 IV。

2) 若仅在调控后不允许存在潮流倒送的情况, 那么将概率水平允许值设置为 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0$, 若 $\Pr\{\lambda_k(t) \geq \lambda_{rk}\} > 0$ 或 $\Pr\{\lambda_{rk} \leq \lambda_k(t) < \lambda_{lk}\} > 0$, 则评估

等级为 I。

3) 若不允许存在超过配电设备容量反向负载率裕度的情况, 那么概率水平允许值设置为 $\varepsilon_1 = 0$, 若 $\Pr\{\lambda_k(t) \geq \lambda_{r,k}\} > 0$, 则评估等级为 I。

本文采用统计所有历史场景安全校核通过的概率是否超过允许概率水平的形式实现光伏承载力安全校核, 即

$$\begin{cases} \Pr\{(\delta U_{H,i}(t) < \Delta U_H) \cup (\delta U_{L,i}(t) > \Delta U_L)\} > \varepsilon_V \\ \Pr\{I_{XZ,i}(t) < I_m\} > \varepsilon_I \\ \Pr\{I_{Xb,h}(t) < I_{Xh}\} > \varepsilon_X \end{cases} \quad (7)$$

式中: ε_V 、 ε_I 、 ε_X 分别为电压偏差、短路电流、谐波含量校核概率水平允许值。

在工程实际中, 电网企业对不同供电区域的电能质量往往有不同的要求, 因此本文对安全校核概率水平允许值给出指导性范围建议, 具体取值可根据该供电区域实际情况在指导性范围内取值。为了保证大部分场景下安全校核通过, 安全校核概率水平允许值 ε_V 、 ε_I 、 ε_X 要求取大概率值, 其中 $\varepsilon_V \geq 99\%$ 、 $\varepsilon_X \geq 99\%$; 由于出现短路故障现象将直接影响区域供电可靠性, 因此短路电流校核概率水平允许值 ε_I 可采用该区域供电可靠性指标。

基于历史场景统计的光伏承载力分级概率评估方法流程如下图 3 所示。

3 分布式光伏接入配电网承载力分层分级概率评估方法

各电压等级母线上最大光伏承载力将等于各配电设备供电区域内光伏承载力, 即

$$S'_{M,i} = S_{M,k} \quad (8)$$

式中: $S_{M,k}$ 为第 k 个线路或变压器供电区域内光伏承载力; $S'_{M,i}$ 为线路或变压器 k 正向潮流下相邻的母线 i 光伏承载力评估值。

对于多电压等级的配电系统^[21-28], 需要依据拓扑关系, 由高电压到低电压进行承载力分层评估, 得到的各母线承载力大小应与正向潮流下相邻上一层级母线承载力大小做比较, 然后以对比后较小值作为本级的分层评估结果, 即

$$S_{M,i} = \min(S'_{M,i}, S_{M,i-1}) \quad (9)$$

式中: $S_{M,i}$ 为各电压等级母线 i 光伏承载力评估结果; $S_{M,i-1}$ 为母线 i 正向潮流下相邻上一层级母线

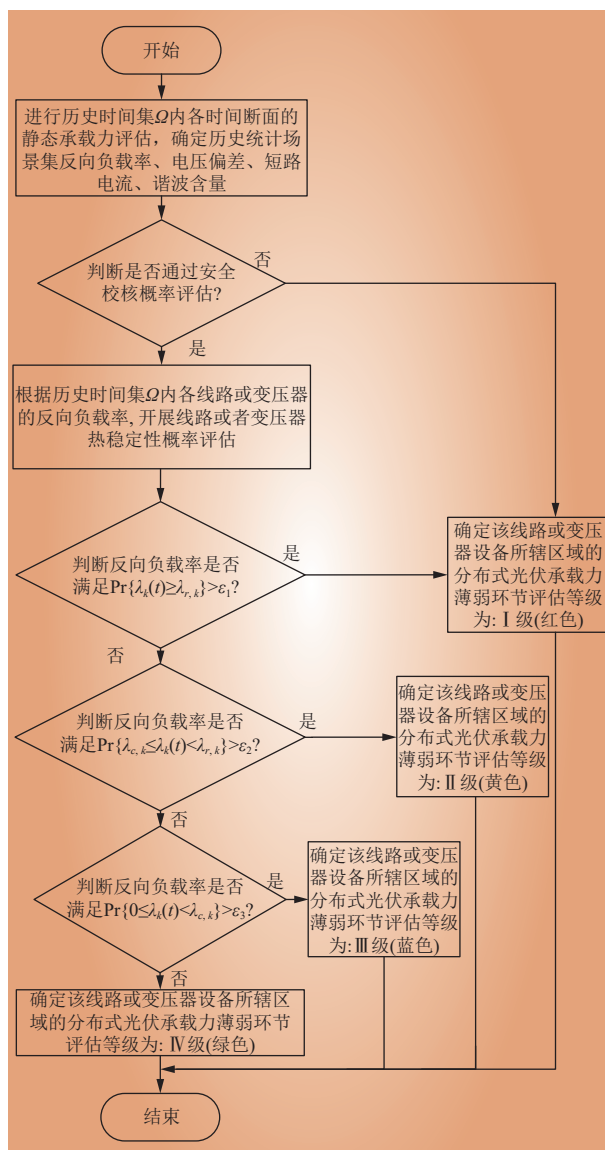


图 3 基于历史场景统计的光伏承载力分级概率评估流程

Fig. 3 Flowchart of PV bearing capacity grading probability evaluation based on historical scenario statistics

$i-1$ 的光伏承载力评估结果。

本文将利用分位数的统计计算思想, 求得各百分位数光伏承载力的大小。该统计方法综合考虑历史所有场景工况, 将光伏承载力值从大到小排序, 提供基于概率分布的承载力统计值。通过评估分布式光伏在不同百分位数下的承载力, 能够客观科学的对实际数据进行量化分析, 避免极端情况的偏差, 提高历史场景集下承载力评估的可信度, 即

$$S_{\varepsilon,i} = \max\{S_{\alpha} | \Pr\{S_{\alpha} \leq S_{M,i}(t)\} \geq \varepsilon_{\alpha}\} \quad (10)$$

式中: ε_{α} 为分布式光伏接入配电网承载力评估的

百分位数； $S_{\varepsilon,i}$ 为母线 i 在百分位数为 ε_α 时的最大承载力。

本文将考虑多电压等级的分层分级概率评估，由高电压等级到低电压等级依次分层进行分级概率评估，根据拓扑连接关系来计算承载力大小，其方法总流程如图 4 所示。

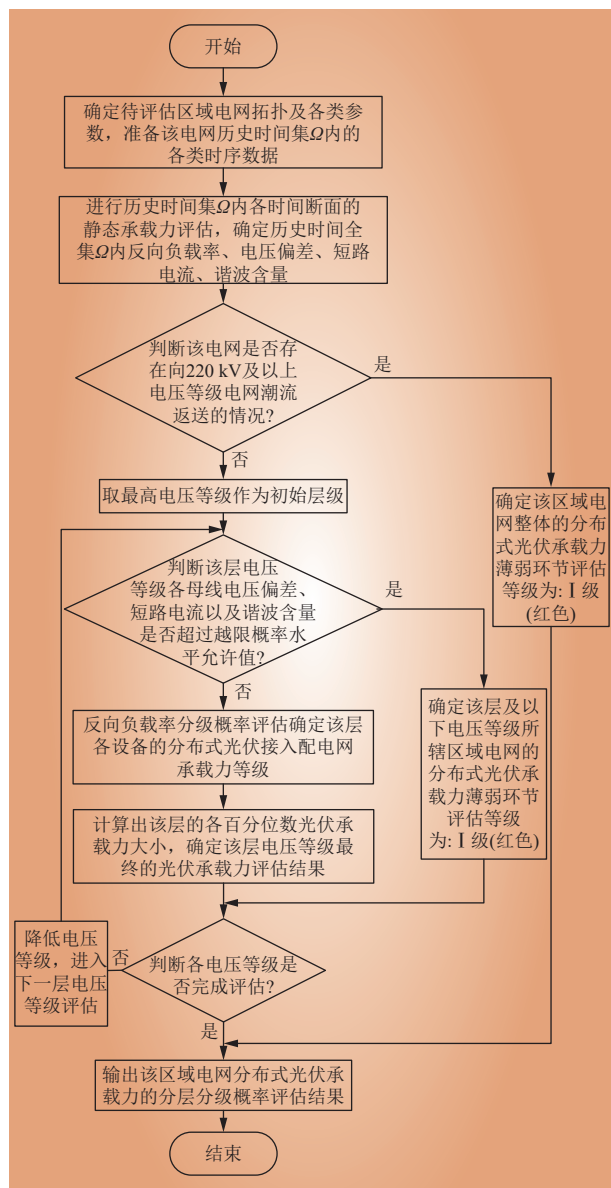


图 4 分布式光伏接入配电网承载力分层分级概率评估方法流程

Fig. 4 Flow chart of the hierarchical probability evaluation method of the carrying capacity of distributed photovoltaic access distribution network

4 算例分析

为了测试本文所提基于历史场景统计的光伏

接入配电网承载力分层分级概率评估方法的有效性与普适性，本文分别针对基于 DL/T 2041—2019《分布式电源接入电网承载力评估导则》中的经典算例加以适当改进以及北京某实际区域配电网案例开展计算分析，从而验证所提方法在不同规模配电网应用的有效性。

4.1 导则中改进算例系统分析

参考文献 [2] 导则中典型案例为 220 kV 变电站辖区，包含 220 kV、110 kV、35 kV、10 kV、380 V 多个电压等级，案例拓扑如图 5 所示。本算例以北京地区某年份 8760 小时的辐射强度、温度等气象参数为基础，采用 TRNSYS 软件模拟了北京某地区一整年光伏出力系数时序数据，进而结合容量得到光伏出力运行数据，再以一整年典型中大型负荷时序数据作为负荷运行数据。

4.1.1 光伏承载力薄弱环节分级结果分析

1) 220 kV 反向潮流判定。为了评估出 220 kV 及以上母线是否出现功率倒送的情况，本算例利用软件 DigSILENT 对待评估模型进行 220 kV 母线反向潮流判定。首先对 4 个待评估区域进行 220 kV 母线反向潮流判定，仿真得到一年中 4 个区域 220 kV 主变压器上流动的功率，其中，三绕组 220 kV 主变 4 高压侧有功功率出现负值，在一年中出现 220 kV 反向潮流的概率大于 1%，所以区域 4 所有评估对象的评估等级划分为：I 级。

2) 安全校核结果。设定安全校核概率水平允许值为 $\varepsilon_V = 99\%$ ， $\varepsilon_X = 99\%$ ， $\varepsilon_I = 99.99\%$ ，对四个区域评估对象进行安全校核概率评估，仿真结果得出 10 kV 母线 4 以及 35 kV 母线 5 电压偏差较大。由此得出 10 kV 母线 4 电压在一年中越限概率较大，超过 1%，所以 10 kV 母线 4 评估等级划分为：I 级，在承载力影响因素未改善之前不建议新增分布式光伏容量。

3) 光伏承载力薄弱环节评估结果。在 220 kV 反向潮流判定以及越限约束校核结果的基础上，将评估对象分为 4 个区域，进行反向负载率校核评估。由于区域 4 出现 220 kV 反向潮流的情况，区域 4 的所有评估对象的评估等级划分为 I 级；由于 10 kV 母线 4 电压偏差评估校核不通过，所以其评估等级划分为 I 级。本文设定区域可调控系数 $\lambda_{c,k}$ 为 15%，线路或变压器最大裕度系数为 80%，设定 ε_1 为 0.2%、 ε_2 为 0.3%、 ε_3 为 0.45%，

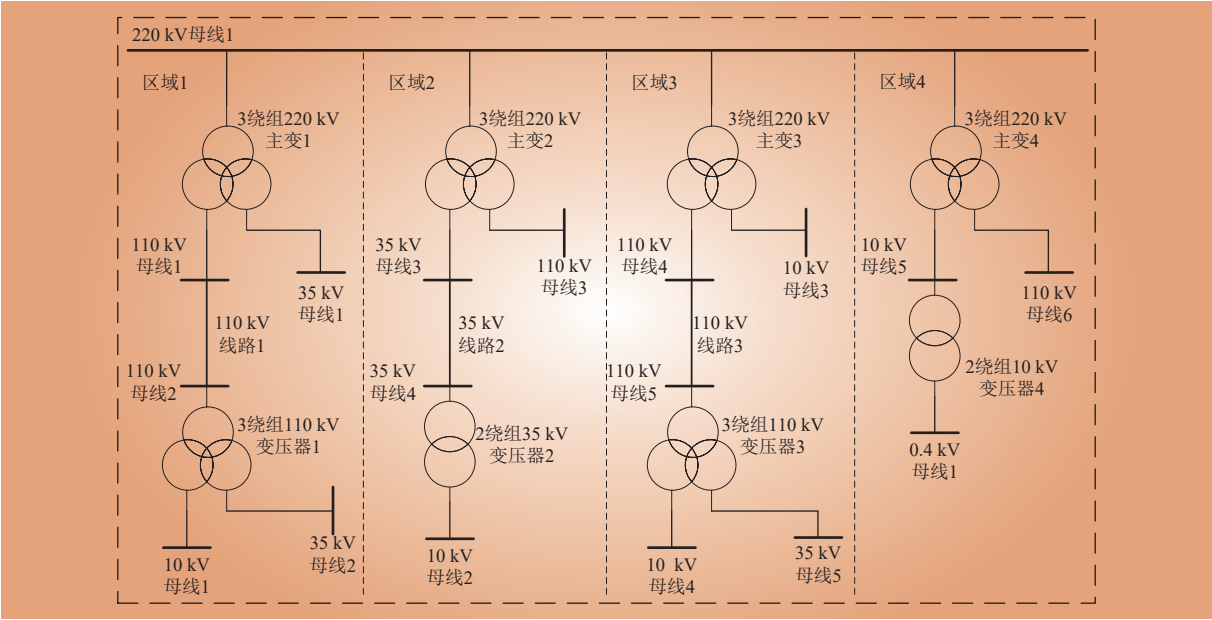


图 5 待评估区域拓扑
Fig. 5 Topology map of the area to be evaluated

ε_4 为 99.05%。得出各评估区域分布式光伏接入配电网承载力薄弱环节分级概率评估结果如下表 1~4 所示。

表 1 评估区域 1 承载力分级评估等级结果
Table 1 Assessment area 1 bearing capacity grading evaluation grade result table

评估对象	安全校核评估	反向负载率分级概率	评估等级划分
3绕组220 kV主变1 (110 kV母线1)	通过	$\Pr\{\lambda_{c,k} \leq \lambda_k(t) < \lambda_{r,k}\}$ 为 3.11%	Ⅱ级
3绕组220 kV主变1 (35 kV母线1)	通过	$\Pr\{\lambda_k(t) < 0\}$ 为 100%	Ⅳ级
110 kV线路1 (110 kV母线2)	通过	$\Pr\{\lambda_{c,k} \leq \lambda_k(t) < \lambda_{r,k}\}$ 为 13.86%	Ⅱ级
3绕组110 kV主变1 (35 kV母线2)	通过	$\Pr\{\lambda_k(t) < 0\}$ 为 100%	Ⅳ级
3绕组110 kV主变1 (10 kV母线1)	通过	$\Pr\{\lambda_{c,k} \leq \lambda_k(t) < \lambda_{r,k}\}$ 为 15.02%	Ⅱ级

表 2 评估区域 2 承载力分级评估等级结果
Table 2 Assessment area 2 bearing capacity grading evaluation grade result table

评估对象	安全校核评估	反向负载率分级概率	评估等级划分
3绕组220 kV主变2 (110 kV母线3)	通过	$\Pr\{0 \leq \lambda_k(t) < \lambda_{c,k}\}$ 为 48.76%	Ⅲ级 (蓝色)
3绕组220 kV主变2 (35 kV母线3)	通过	$\Pr\{\lambda_k(t) < 0\}$ 为 100%	Ⅳ级 (绿色)
35 kV线路2 (35 kV母线4)	通过	$\Pr\{\lambda_{c,k} \leq \lambda_k(t) < \lambda_{r,k}\}$ 为 17.77%	Ⅱ级 (黄色)
35 kV变压器2 (10 kV母线2)	通过	$\Pr\{\lambda_{r,k} \leq \lambda(t)\}$ 为 0.23%	Ⅰ级 (红色)

表 3 评估区域 3 承载力分级评估等级结果
Table 3 Assessment area 3 bearing capacity grading evaluation grade result table

评估对象	安全校核评估	反向负载率分级概率	评估等级划分
3绕组220 kV主变3 (110 kV母线4)	通过	$\Pr\{\lambda_k(t) < 0\}$ 为 99.08%	Ⅳ级
3绕组220 kV主变3 (10 kV母线3)	通过	$\Pr\{\lambda_k(t) < 0\}$ 为 100%	Ⅳ级
110 kV线路3 (110 kV母线5)	通过	$\Pr\{\lambda_{c,k} \leq \lambda_k(t) < \lambda_{r,k}\}$ 为 10.50%	Ⅱ级
3绕组110 kV主变3 (35 kV母线5)	通过	$\Pr\{\lambda_{c,k} \leq \lambda_k(t) < \lambda_{r,k}\}$ 为 7.47%	Ⅱ级
3绕组110 kV主变3 (10 kV母线4)	电压偏差校核不通过	—	Ⅰ级

表 4 评估区域 4 承载力分级评估等级结果表
Table 4 Assessment area 4 bearing capacity grading evaluation grade result table

评估对象	安全校核评估	反向负载率分级概率	评估等级划分
3绕组220 kV主变4 (110 kV母线6)	—	—	Ⅰ级
3绕组220 kV主变4 (10 kV母线5)	—	—	Ⅰ级
10 kV变压器4 (0.4 kV母线1)	—	—	Ⅰ级

110 kV 母线 1、110 kV 母线 2、10 kV 母线 1、35 kV 母线 4、110 kV 母线 5、35 kV 母线 5 存在反送电情况，且反向负载率低于 80% 的概率大于设定的评估约束概率水平，所以评估等级划分为

Ⅱ级，建议评估对象在新增分布式光伏时开展专项分析；110 kV 母线 3 可以通过区域调控手段使评估区域不再出现反向潮流，所以评估区域等级划分为Ⅲ级（蓝色）。其中 35 kV 母线 1、35 kV 母线 2、35 kV 母线 3、110 kV 母线 4、10 kV 母线 3 不存在反送电情况或反送电概率水平极低，所

以评估区域等级划分为Ⅳ级（绿色），建议评估区域增加分布式光伏的接入；其中 10 kV 母线 2、10 kV 母线 4 以及区域 4 所有母线评估等级结果为Ⅰ级（红色），建议在承载力影响因素改善前不新增分布式光伏的接入。4 个区域完成承载力薄弱环节分级概率评估结果拓扑如图 6 所示。

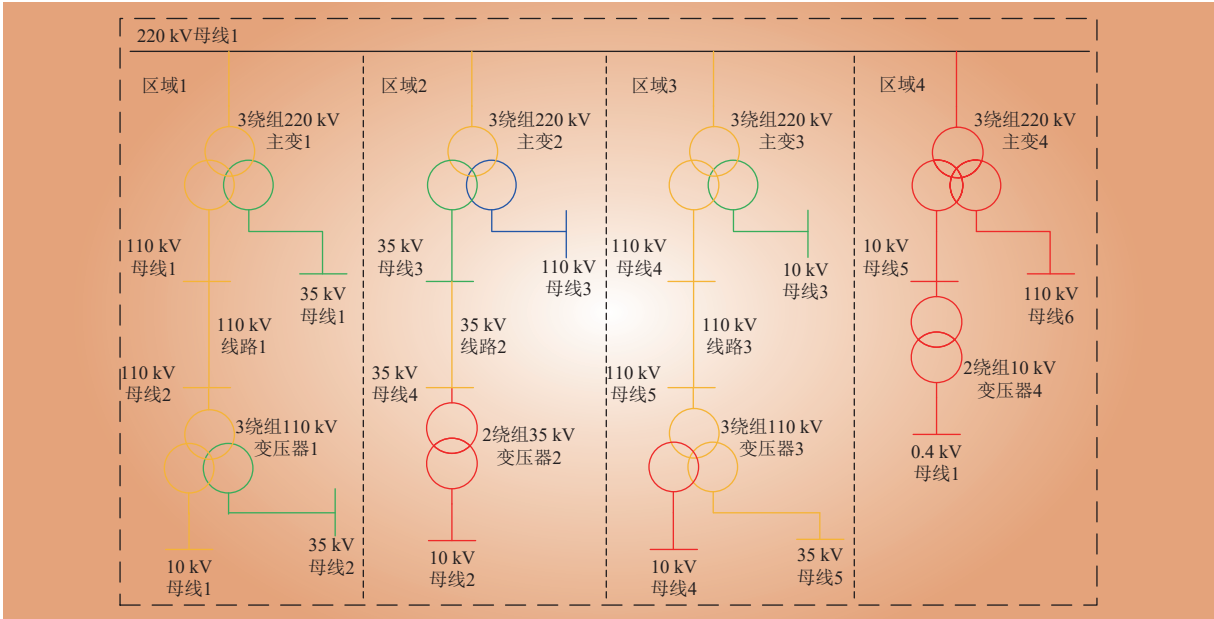


图 6 评估区域光伏承载力薄弱环节分级评估结果拓扑

Fig. 6 Topology diagram of the grading assessment results of the weak links in the evaluation of regional photovoltaic carrying capacity

4.1.2 不同百分位数下的光伏承载力评估结果分析

在完成 4 个区域承载力薄弱环节分级概率评估后，进行光伏承载力分层概率评估，评估计算出各区域不同百分位数的承载力大小，本文分别以 100%、98%、95%、90% 4 组百分位数对评估对象进行统计，其 3 个区域承载力评估结果如图 7~9 所示。承载力评估计算过程中下一级母线需要与上一级母线承载力计算结果做对比，当下一级承载力高于上一级时，下一级母线计算结果应以上一级为准，图中区域 1 中 35 kV 母线 2 和区域 3 中 35 kV 母线 5 的计算结果与上一级相同。从图 7~9 中各母线光伏承载力评估结果可以看出，随着百分位（可等效于置信水平）由低至高对应的光伏承载力由大变小。在高置信水平下，随着置信水平百分位的降低，对应的光伏承载力增长速率较大，如区域 1 的 110 kV 母线 1 由置信水平百分位 100% 降低到 95% 时，其光伏承载力从

266 MW 增长至 277 MW，增长了 11 MW；在低置信水平下，随着置信水平百分位的降低，对应的

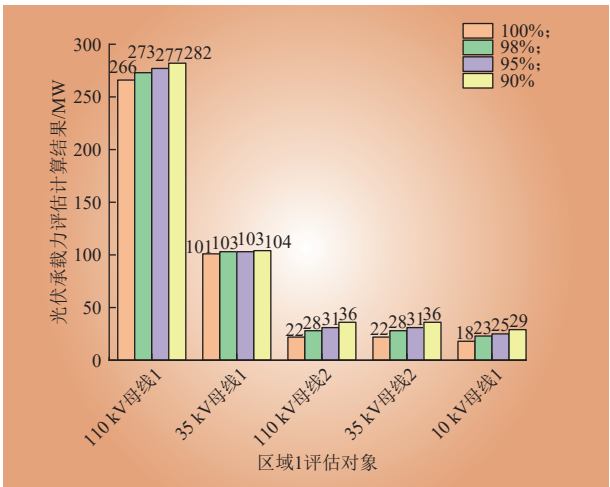


图 7 区域 1 各母线不同百分位数下光伏承载力结果

Fig. 7 Results of photovoltaic capacity at different percentiles of each bus in region 1

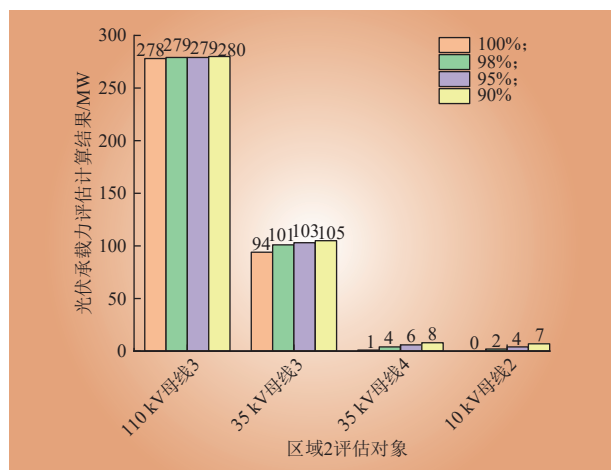


图 8 区域 2 各母线不同百分位数下光伏承载力结果

Fig. 8 Results of photovoltaic capacity at different percentiles of each bus in region 2

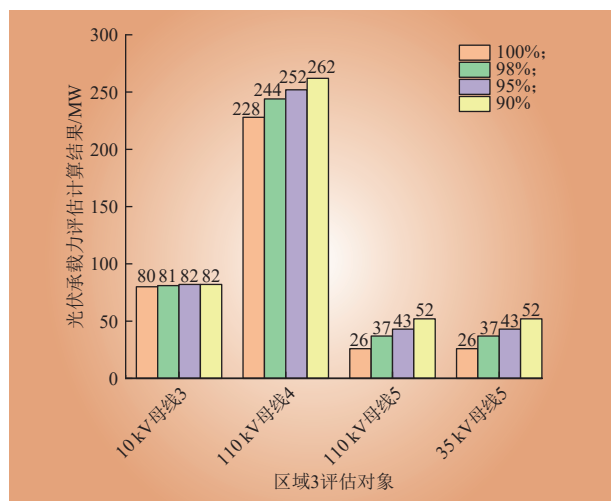


图 9 区域 3 各母线不同百分位数下光伏承载力结果

Fig. 9 Results of photovoltaic capacity at different percentiles of each bus in region 3

光伏承载力增长速率较小，如区域 1 的 110 kV 母线 1 由置信水平百分位 95% 降低到 90% 时，其光伏承载力从 277 MW 增长至 282 MW，增长了 5 MW。随着置信水平的降低，光伏承载力具有增长速率放缓的趋势，这是由于配电网长期运行下大部分运行数值基于正态分布，即远离均值的极端场景为偶发小概率事件，也表明小概率的极端最劣场景会迅速拉低光伏承载力评估值，使得光伏承载力偏于保守。

4.1.3 与常规最劣场景下确定性评估方法对比分析

常规光伏承载力评估方法通过典型日或最劣场景下的光伏接纳能力确定性计算来分析，常规

最劣场景下确定性评估方法的承载力计算结果包含于本文所提基于历史场景统计的光伏承载力分层分级概率评估方法所得的不同百分位数下光伏承载力评估结果中，实际上对应于 100% 百分位下的光伏承载力值，即经过统计历史场景集中有 100% 的场景评估出的承载力值不小于最劣场景下的承载力值。

从图 7~9 可以看出，本文所提光伏承载力概率评估方法比常规最劣场景下确定性评估方法（对应于 100% 百分位下确定性光伏承载力值）能够科学展示不同置信水平下各节点各供电区域的光伏可新增容量。如区域 3 中 35 kV 母线 5 在 90%、95%、98% 百分位下（等效于置信水平）的光伏承载力分别为 52 MW、43 MW、37 MW，而常规最劣场景下确定性评估方法得到光伏承载力为 26 MW，可见常规方法评估出的光伏承载力偏于保守，限制了分布式光伏的可持续发展。而本文所提方法通过定量展示不同置信水平下各节点光伏可新增容量，通过对历史场景集下结果分析可以定位出承载力受限的小概率场景及其对应薄弱环节，将对采取调控措施消除这些小概率受限条件，减少盲目的变压器扩容、线路更换等投资具有重要的现实意义。

4.2 实际配电网案例分析

以北京某实际区域配电网作为验证本文方法的实际案例，该配电网有两座 110 kV 变电站，包含 110 kV、10 kV、380 V 多个电压等级，重点针对 1 号开闭站下辖的配电网展开分析，系统如图 10 所示。该配电网左右两区域线路、电压等级及额定功率见附录表 A2。获取到该配电网 2024 年 4 月实际运行数据作为典型历史场景集评估光伏承载力。

4.2.1 光伏承载力薄弱环节分级结果分析

1) 110 kV 反向潮流判定。该区域配电网最高电压等级为 110 kV，其运行管理部门规定 110 kV 级不允许出现潮流倒送情况。经对两座 110 kV 变电站辖区配电网 2024 年 4 月构成的历史场景集潮流分析计算，得到两台 110 kV 主变压器流动功率。2 台 110 kV 主变压器流动功率未出现负值，即未发生潮流倒送情况。

2) 安全校核结果分析。由于运行管理部门对该配电网电能质量要求较高，因此设定安全校核

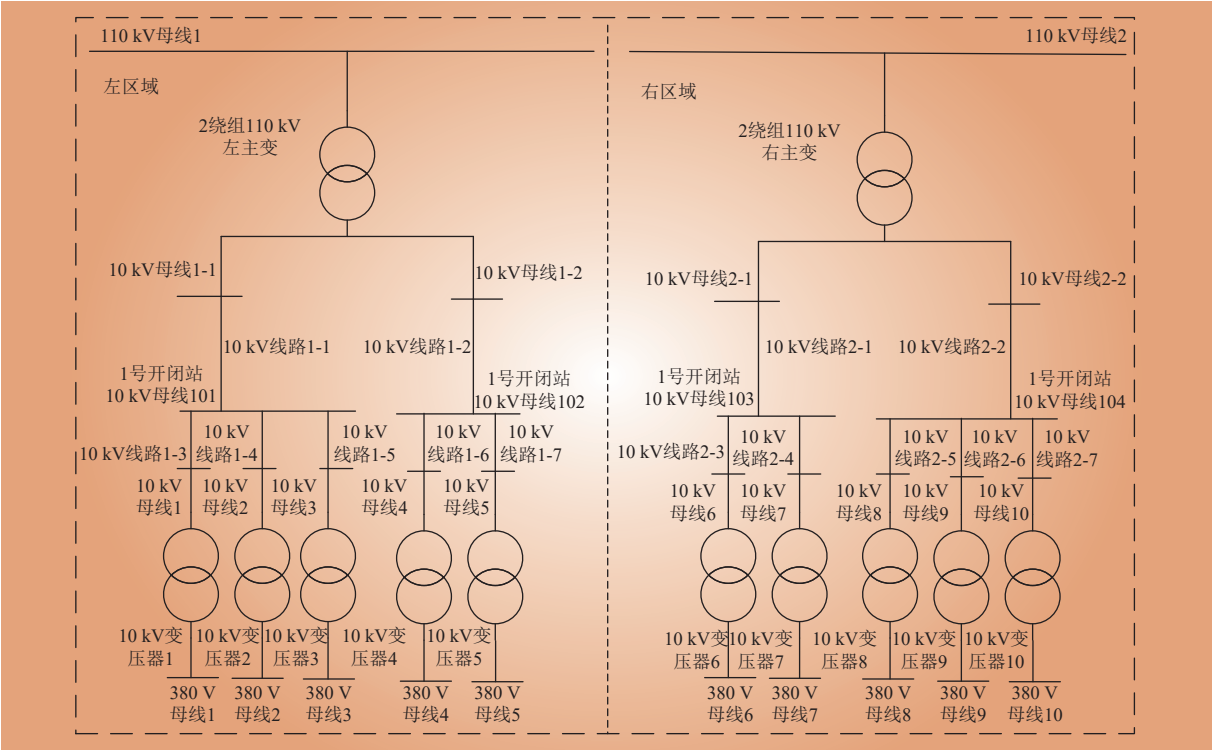


图 10 某实际配电网案例网络拓扑

Fig. 10 Network topology of an actual distribution network case

概率水平允许值为 $\varepsilon_V = \varepsilon_x = \varepsilon_l = 100\%$ ，对该区域评估对象进行安全校核概率评估，电压偏差、短路电流、谐波含量校核概率水平均未超过允许值，因此安全校核通过。

3) 光伏承载力薄弱环节评估结果。考虑到该配电网实际运行中常进行两台变压器（线路）间倒闸转供负荷调整，因此将线路、变压器允许最大反向负载率设置为 50%；根据该区域配电网可调资源情况得到可调控系数 $\lambda_{c,k}$ 为 10%；为保证该片区高质量供电，设定 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon_3 = 0\%$ ， $\varepsilon_4 = 100\%$ 。经评估计算得出该区域各评估对象处光伏承载力薄弱环节分级概率评估结果均为绿色。

4.2.2 不同百分位数下的光伏承载力评估结果分析

在完成光伏承载力薄弱环节分级概率评估后，分别以 100%（最劣场景）、95%、90% 三组百分位数对该区域进行光伏承载力分层评估，重点分析 1 号开闭站下辖各评估对象不同百分位数的承载力大小，左、右区域部分典型 10 kV、380 V 母线光伏承载力评估结果如图 11~12 所示。

与以最劣场景（对应于 100% 百分位）下的光伏承载力常规确定性评估方法对比，在置信水平

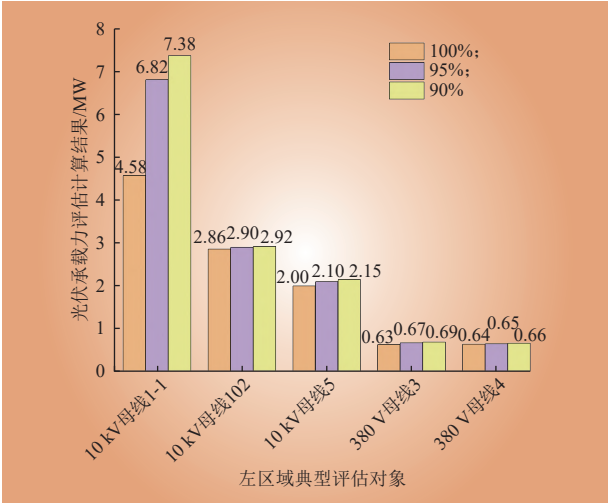


图 11 左区域不同百分位数下典型母线光伏承载力结果

Fig. 11 Results of photovoltaic capacity of typical bus under different percentiles in the left region

为 95% 时，与左、右区域主变低压侧 4 段 10 kV 母线光伏承载力共增大了 9.16 MW；而置信水平从 95% 变化到 90% 时，该 4 段 10 kV 母线光伏承载力共增大了 3.72 MW，这也从实际案例角度验证了随着置信水平的降低，光伏承载力具有增长速率放缓的趋势这一结论。

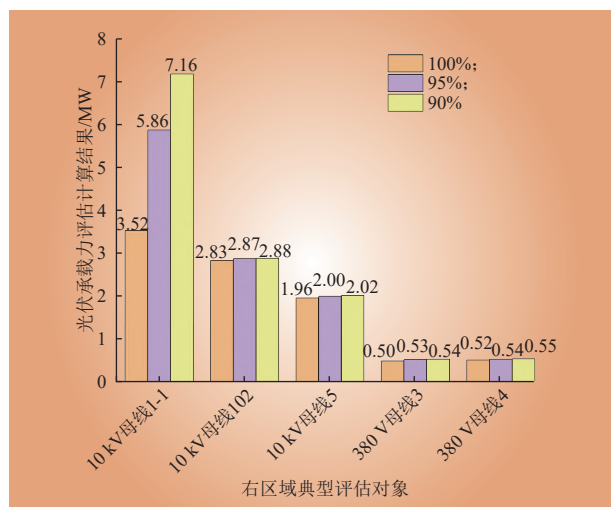


图 12 右区域不同百分位数下典型母线光伏承载力结果
Fig. 12 Results of photovoltaic capacity of typical bus under different percentiles in the right region

5 结论

为了抑制新型电力系统中分布式光伏无序接入带来的安全稳定运行风险,本文提出了基于历史场景统计的光伏承载力分层分级概率评估方法,并用导则中算例和实际配电网案例进行验证,主要结论如下。

1) 通过光伏承载力薄弱环节分级概率评估,能够统计识别出配电网中光伏承载力较小的薄弱区域及节点,为规划协调分布式光伏接入方案提供指导,也将使得后续配电网源网荷储调控实现光伏承载力的提升更具针对性。

2) 相较于常规最劣场景下的评估方法,本文所提方法能够科学展示不同置信水平下各节点各供电区域的光伏可新增容量,克服常规方法评估出的光伏承载力偏于保守或过于粗略的缺点,对减少盲目的变压器扩容、线路更换等投资具有重要的现实意义。

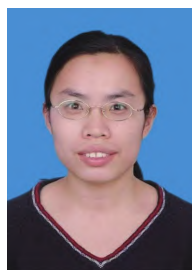
参考文献:

- [1] 孙通, 张沈习, 曹毅, 等. 计及 5G 基站可调节特性的配电网分布式光伏准入容量鲁棒优化 [J]. 中国电力, 2025, 58(2): 140–146.
SUN Tong, ZHANG Shenxi, CAO Yi, *et al.* Robust optimization of hosting capacity of distributed photovoltaics in distribution network considering adjustable characteristics of 5G base station[J]. Electric Power, 2025, 58(2): 140–146.
- [2] 分布式电源接入电网承载力评估导则: DL/T 2041—2019[S].
Guidelines for the evaluation of the carrying capacity of distributed power generation connected to the power grid: DL/T 2041—2019[S].
- [3] 周洋, 黄德志, 李培栋, 等. 考虑平衡端点相位不对称及光伏接入的低压配电网三相潮流模型 [J]. 中国电力, 2024, 57(10): 190–198.
ZHOU Yang, HUANG Dezhi, LI Peidong, *et al.* A three-phase power flow model for low-voltage distribution networks considering balanced bus phase asymmetry and photovoltaic access[J]. Electric Power, 2024, 57(10): 190–198.
- [4] 易建波, 胡猛, 王泽宇, 等. 提升光储充电站运行效率的多目标优化配置策略 [J]. 电力系统自动化, 2024, 48(14): 100–109.
YI Jianbo, HU Meng, WANG Zeyu, *et al.* Multi-objective optimal configuration strategy for improving operation efficiency of photovoltaic energy storage charging stations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(14): 100–109.
- [5] 呼斯乐, 于源, 王渊, 等. 考虑灵活性分析的典型光伏日出力率曲线提取方法 [J]. 内蒙古电力技术, 2024, 42(3): 20–27.
HU Sile, YU Yuan, WANG Yuan, *et al.* Method for extracting typical PV daily output curves considering flexibility analysis[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2024, 42(3): 20–27.
- [6] 凡鹏飞, 李宝琴, 侯江伟, 等. 配电网分布式电源经济可承载力评估 [J]. 中国电力, 2024, 57(7): 196–202.
FAN Pengfei, LI Baoqin, HOU Jiangwei, *et al.* Economic capacity assessment of renewables in distribution networks[J]. Electric Power, 2024, 57(7): 196–202.
- [7] 康渭滨, 寇明鑫, 张文文, 等. 光伏储能电站不同储能形式经济性对比分析 [J]. 电力科技与环保, 2024, 40(3): 276–285.
KANG Weibin, KOU Mingxin, ZHANG Wenwen, *et al.* Economic comparison analysis of different energy storage forms for photovoltaic energy storage power stations[J]. Electric Power Technology and Environmental Protection, 2024, 40(3): 276–285.
- [8] 马成廉, 李闯, 薛冰, 等. 含高比例光伏配电网分区电压协调控制策略 [J]. 东北电力大学学报, 2024, 44(4): 77–85.
MA Chenglian, LI Chuang, XUE Bing, *et al.* Voltage coordination control strategy for zoning in distribution network with high proportion of photovoltaic[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2024, 44(4): 77–85.
- [9] 梁志峰, 夏俊荣, 孙檬檬, 等. 数据驱动的配电网分布式光伏承载力评估技术研究 [J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2430–2439.
LIANG Zhifeng, XIA Junrong, SUN Mengmeng, *et al.* Data driven assessment of distributed photovoltaic hosting capacity in distribution network[J]. Power System Technology, 2020, 44(7): 2430–2439.

- [10] 陈奇芳, 李若凡, 夏明超, 等. 计及多维性能评估的新型配电网光伏选址定容方法[J]. 中国电力, 2024, 57(10): 172–178, 207.
CHEN Qifang, LI Ruofan, XIA Mingchao, *et al.* Photovoltaic site selection and capacity determination method for new distribution network considering multidimensional performance evaluation[J]. Electric Power, 2024, 57(10): 172–178, 207.
- [11] 刘志文, 董旭柱, 黄豫, 等. 考虑多种约束的分布式电源最大渗透率计算方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(6): 85–92.
LIU Zhiwen, DONG Xuzhu, HUANG Yu, *et al.* Calculation method for maximum penetration of distributed generations considering multiple constraints[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2019, 31(6): 85–92.
- [12] 杨乔丹, 唐岚, 刘乾晖. 考虑分布式光伏的三相不平衡优化方法[J]. 电源技术, 2020, 44(10): 1522–1524.
YANG Qiaodan, TANG Lan, LIU Qianhui. Three phase unbalanced optimization method considering distributed photovoltaic[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(10): 1522–1524.
- [13] 欧阳森, 梁伟斌, 苏为健, 等. 基于电气外特性的大型光伏电站建模及电能质量预评估方法[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(5): 51–57.
OUYANG Sen, LIANG Weibin, SU Weijian, *et al.* Modeling and power quality pre-evaluation method of large photovoltaic power station based on electric external characteristics[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(5): 51–57.
- [14] 丁琦欣, 覃洪培, 万灿, 等. 基于机会约束规划的配电网分布式光伏承载力评估[J]. 东北电力大学学报, 2022, 42(6): 28–38.
DING Qixin, QIN Hongpei, WAN Can, *et al.* Chance-constrained optimization-based distributed photovoltaic hosting capacity assessment of distribution networks[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2022, 42(6): 28–38.
- [15] 王利利, 王皓, 任洲洋, 等. 计及灵活资源调节潜力的高压配电网新能源接纳能力评估[J]. 中国电力, 2022, 55(10): 124–131.
WANG Lili, WANG Hao, REN Zhouyang, *et al.* Evaluation of renewable energy accommodation capacity of high voltage distribution networks considering regulation potential of flexible resources[J]. Electric Power, 2022, 55(10): 124–131.
- [16] 李利, 李征, 王文宾, 等. 兼顾经济品质的配电网分布式光伏承载力评估方法[J]. 燕山大学学报, 2024, 48(2): 110–119.
LI Li, LI Zheng, WANG Wenbin, *et al.* Evaluation method of distributed photovoltaic hosting capacity of distribution network considering economic quality[J]. Journal of Yanshan University, 2024, 48(2): 110–119.
- [17] 段瑶, 高崇, 程苒, 等. 考虑 5G 基站可调度潜力的配电网分布式光伏最大准入容量评估[J]. 中国电力, 2023, 56(12): 80–85, 99.
DUAN Yao, GAO Chong, CHENG Ran, *et al.* Evaluation of distributed photovoltaic maximum hosting capacity for distribution network considering dispatchable potential of 5G base station[J]. Electric Power, 2023, 56(12): 80–85, 99.
- [18] 屈高强, 王诚良, 靳盘龙, 等. 新型负荷及分布式电源接入配网承载能力综合评估[J]. 电测与仪表, 2019, 56(19): 37–45, 113.
QU Gaoqiang, WANG Chengliang, JIN Panlong, *et al.* Comprehensive evaluation of carrying capacity in distribution network with new load and distributed generation[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(19): 37–45, 113.
- [19] 林沛昕. 面向园区最优用能的分布式光伏及储能容量配置方法[J]. 东北电力大学学报, 2024, 44(5): 50–56.
LIN Peixin. Distributed photovoltaic and energy storage capacity allocation method for the optimal use of energy in the park[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2024, 44(5): 50–56.
- [20] 王文倬, 谢丁, 谢醉冰, 等. 考虑集群划分的分布式光伏无功电压控制策略[J]. 浙江电力, 2024, 43(7): 64–75.
WANG Wenzhuo, XIE Ding, XIE Zuibing, *et al.* A reactive voltage control strategy for distributed PV based on cluster segmentation[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(7): 64–75.
- [21] NIU H N, YANG L, ZHAO J X, *et al.* Flexible-regulation resources planning for distribution networks with a high penetration of renewable energy[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(18): 4099–4107.
- [22] 王振国, 康丽莉, 李特, 等. 浙江沿海地区台风灾害风险区域划分研究[J]. 浙江电力, 2024, 43(3): 28–37.
WANG Zhenguo, KANG Lili, LI Te, *et al.* A study on typhoon disaster risk zoning in Zhejiang coastal areas[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(3): 28–37.
- [23] 继雅, 刘嘉丽, 张伟, 等. 电力用户碳排放指标评价体系与方法[J]. 内蒙古电力技术, 2024, 42(5): 44–51.
JI Ya, LIU Jiali, ZHANG Wei, *et al.* Evaluation system and method for carbon emission indicators of electricity users[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2024, 42(5): 44–51.
- [24] 杨彪, 颜伟, 莫静山. 考虑源荷功率随机性和相关性的主导节点选择与无功分区方法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(11): 61–67.
YANG Biao, YAN Wei, MO Jingshan. Pilot-bus selection and network partitioning method considering randomness and correlation of source-load power[J]. Automation of Electric Power Systems,

- 2021, 45(11): 61–67.
- [25] 杨军, 王楠楠, 王江, 等. 基于潮流追踪的有源配电网碳排放流分析方法[J]. 浙江电力, 2024, 43(6): 80–87.
- YANG Jun, WANG Nannan, WANG Jiang, *et al.* A method for carbon emission flow analysis in active distribution networks based on power flow tracking[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(6): 80–87.
- [26] 朱朝阳, 景栋盛, 李荷婷, 等. 多源数据驱动的中低压配电网通用拓扑辨识框架[J]. 中国电力, 2025, 58(5): 137–143.
- ZHU Chaoyang, JING Dongsheng, LI Heting, *et al.* A topology identification framework for medium and low voltage distribution networks driven by multiple source data[J]. Electric Power, 2025, 58(5): 137–143.
- [27] 范仲鸣, 纪陵, 张晓瑞. 配电系统电力设备数字孪生底座系统设计[J]. 综合智慧能源, 2023, 45(3): 50–56.
- FAN Zhongming, JI Ling, ZHANG Xiaorui. Design of a base system for power equipment in a distribution system based on digital twin[J]. Integrated Intelligent Energy, 2023, 45(3): 50–56.
- [28] 王奎, 余梦, 张海静, 等. 面向光伏消纳和冰蓄冷空调群低碳需求响应的新型配电系统多时间尺度优化策略[J]. 发电技术, 2025, 46(2): 284–295.
- WANG Kui, YU Meng, ZHANG Haijing, *et al.* Multi-time scale

optimization strategy for new distribution system oriented to photovoltaic consumption and low carbon demand response of ice storage air conditioning groups[J]. Power Generation Technology, 2025, 46(2): 284–295.



王方敏

作者简介:

王方敏(1978), 女, 高级工程师, 从事电网规划设计、新能源并网接入研究, E-mail: wangfm2024@163.com;

项佳宇(1992), 女, 博士, 工程师, 从事分布式光储规划配置与协同控制研究, E-mail: xuzy321@163.com;

苏宁(1983), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统规划设计及新能源并网研究, E-mail: jyysuning@163.com;

牛焕娜(1976), 女, 博士, 副教授, 从事主动配电网/微电网能量管理、综合能源系统规划与运行、用户侧能效管理研究, E-mail: nhn@cau.edu.cn

(第二十七届中国科协年会学术论文“配微储协同的低碳高品质新型配电系统”专题)。

(责任编辑 杨彪)

Probability Evaluation Method of Distributed Photovoltaic Carrying Capacity under Risk Suppression in New Power System

WANG Fangmin¹, XU Jiayu², SU Ning¹, NIU Huanna³, YUAN Jiaxing³, MEN Panlong³

(1. Beijing Electric Power Economic Research Institute Co., Ltd., Beijing 100055, China; 2. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China; 3. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: In order to suppress the safety and stable operation risks brought by the disorderly integration of distributed photovoltaics in the context of the new power system, a hierarchical probability evaluation method based on historical scene statistics is proposed. This method establishes a grading probability evaluation model of PV bearing capacity based on reverse load ratio and a safety check probability evaluation model. The grading probability evaluation process of PV bearing capacity weaknesses based on historical scene statistics is given. By constructing a PV bearing capacity evaluation model based on percentile statistics, a hierarchical probability evaluation method for the capacity of distributed PV access distribution network is finally formed. The effectiveness and universality of the proposed method are verified by the improved guideline example and the actual distribution network case. Experiments show that the method can scientifically show the new PV capacity of each power supply area under different percentiles, and the identified PV capacity weakness is more in line with statistical significance.

This work is supported by Beijing Electric Power Economic Research Institute Co., Ltd. Technology Project (No.SGBJJY00SJJS-2400033), National Key Research and Development Program of China (No.2022YFE0129400).

Keywords: distribution grid; photovoltaic carrying capacity; historical scene statistics; hierarchical grading