

# 安全与能效约束下分布式光伏最大准入容量评估

陈 春<sup>1</sup>, 唐 熙<sup>1</sup>, 曹一家<sup>1</sup>, 李 勇<sup>2</sup>, 李 锰<sup>3</sup>

(1. 长沙理工大学电网防灾减灾全国重点实验室, 长沙 410114; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 长沙 410082;  
3. 国网河南省电力公司, 郑州 450052)

**摘要:** 分布式光伏无约束地接入配电网势必会影响电网安全。为此, 提出基于电压灵敏度改进的蒙特卡罗重要性抽样方法, 并考虑光伏和负荷时序特性, 评估安全与能效约束下分布式光伏的最大准入容量。建立计及系统能效的配电网安全域模型, 以馈线作为最小评估区域, 利用二分K-均值聚类法, 通过电压灵敏度指标和节点电压对光伏待接入节点进行聚类分析。依据聚类结果, 采用蒙特卡罗重要性抽样方法, 构造新的概率模型随机生成光伏部署场景, 实现安全域内所有区域光伏最大准入容量评估。仿真结果表明: 在采用计及系统能效的安全域模型后, 评估所得的光伏最大准入容量较常规安全域只减少0.39%, 系统能效却上升4.82%, 提升系统的运行效率; 所提方法的评估精度相较于解析优化算法提升12.41%, 在相同精度的情况下所需部署场景数较传统的蒙特卡罗模拟法减少近60%, 提高配电网的最大光伏准入容量评估的精度和效率。

**关键词:** 分布式光伏; 安全约束; 容量评估; 电压灵敏度; 蒙特卡罗重要性抽样

中图分类号: TM715

文献标志码: A

## 0 引言

随着光伏半导体价格下降、光电转化效率持续上升以及双碳战略的实施, 分布式光伏接入配电网比例不断提升。在配电网层面发展分布式光伏, 具有接近用户侧、降低输电损耗、低碳环保等优势<sup>[1-3]</sup>。然而, 分布式光伏无约束的持续接入也给配电网的安全经济运行带来诸多挑战, 包括电压上升, 网损增加, 反向功率流, 电能质量下降等<sup>[4-5]</sup>。

如何合理、有效确定配电网可接纳的最大光伏容量及其接入位置, 已然成为当前规划决策部门亟需解决的难题, 也是近年学术研究热点<sup>[6-7]</sup>。文献[8]在多重约束条件下, 采用粒子群算法求解分布式光伏最大准入容量的优化模型, 对配电网接纳分布式光伏的能力进行精准评估; 文献[9]提出一种考虑弃光约束的配电网光伏接纳能力评估方法, 将弃光约束纳入基于DistFlow方程的评估模型, 并将问题转化为不同弃光阈值下的二阶锥规划问题; 文献[10]从配电网安全运行的角度出发, 采用基于遗传算法的年时序仿真求解评估配电网各节点的光伏最大准入容量; 文献[11]提出一种以合理弃光率为约束的配电网光伏多点接入最大容量评估模型, 并对模型及海量场景进行了简化, 最终通过遗传算法实现了求解; 文献[12]基于Bass模型和蒙特卡洛模拟, 提出计算低压配电网分布式光伏最大准入容量的随机模型; 文献[13]建立

了多个时间尺度指标, 通过全年潮流计算来动态评估分布式光伏最大准入容量。

上述算法中解析优化算法每次只能针对特定的场景进行建模计算, 无法计及光伏与负荷在时序上的变化, 其最终只能得到一个或少数几个分布式光伏准入容量的近似最优解, 计算结果缺乏工程实用性和合理性。蒙特卡罗算法需要进行大量的非线性潮流迭代计算, 寻优速度很慢, 计算所需时间过长, 严重影响了高比例分布式光伏并网规划的工作效率。

为此, 针对配电网光伏最大准入容量评估, 建立计及系统能效的配电网安全域模型, 提出电压灵敏度指标, 以馈线作为最小评估区域, 利用二分K-均值聚类法, 依据节点电压和电压灵敏度指标划分光伏接入节点类型, 融合蒙特卡罗重要性抽样的思想, 构造光伏接入节点的重要性分布函数, 提高光伏准入容量最大值附近的抽样密度, 提升配电网光伏最大准入容量评估的精度和效率。

## 1 光伏最大准入容量的评估框架

安全与能效约束下分布式光伏最大准入容量评估框架如图1所示。根据配电网的馈线分布, 划分为若干区域, 分别求取光伏的最大准入容量; 综合考虑电压灵敏度和节点电压, 利用二分K-均值聚类法将光伏的待接入节点分为3

收稿日期: 2024-08-01

基金项目: 湖南省自然科学基金优秀青年项目(2023JJ20039); 国家自然科学基金(52007009); 南方电网公司科技项目(GDKJXM20231017)  
通信作者: 陈 春(1987—), 男, 博士、副教授、博士生导师, 主要从事智能配电网规划与自愈控制方面的研究。chch3266@126.com

类,并通过蒙特卡罗重要性抽样方法,构造新的概率模型并不断迭代更新,以生成光伏部署场景。建立计及系统能效

的配电网安全域模型,筛选统计得到系统的光伏最大准入容量。

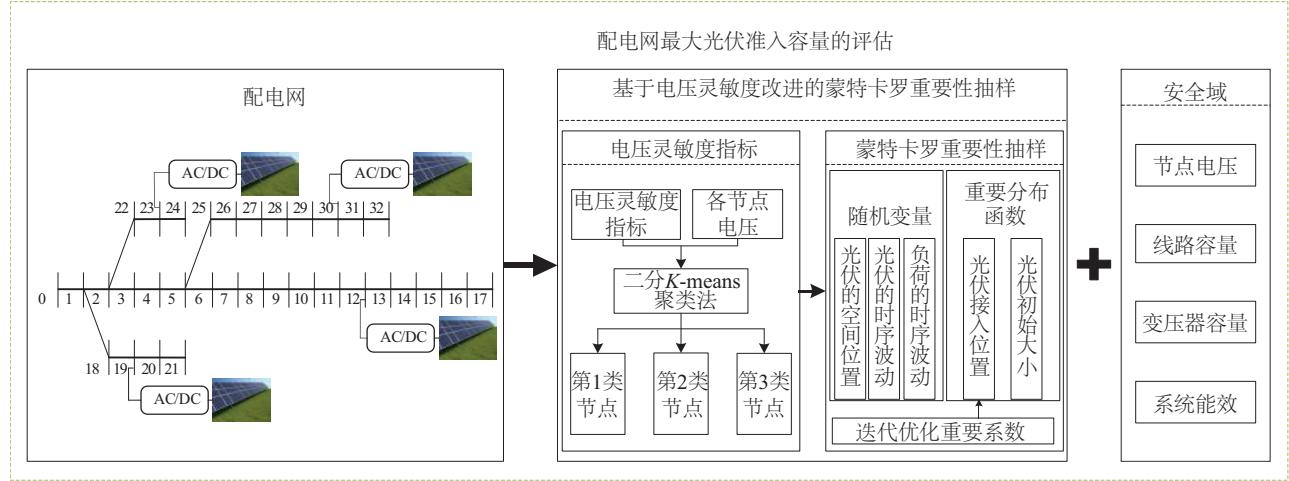


图1 分布式光伏最大准入容量评估框架

Fig. 1 Framework for evaluating the maximum access capacity of distributed photovoltaics

## 2 基于电压灵敏度的重要性抽样

蒙特卡罗模拟法是利用概率分布的随机样本及其相应概率表征待求问题的后验分布。当样本数目趋近于无穷大时,蒙特卡罗方法所求的结果将无限接近最优解。但传统蒙特卡罗算法存在寻优速度慢,采样效率低的问题,为此,提出基于电压灵敏度改进的蒙特卡罗重要性抽样方法,通过电压灵敏度实现光伏的待接入节点分类,采用蒙特卡罗重要性抽样,增大电压灵敏度较小节点的采样密度,抑制系统的节点电压越限,提高抽样的效率。

### 2.1 电压灵敏度

配电网节点注入功率的变化会影响各节点的电压分布,电压灵敏度即为电压幅值改变量与节点接入功率变化之间比值的微分关系;分为有功电压灵敏度和无功电压灵敏度<sup>[14]</sup>。电压灵敏度矩阵给出了发电和负载参数( $P$ 和 $Q$ )变化对系统电压的影响信息。以图2所示的5总线配电系统为例,图中 $V_i$ 为节点*i*的电压, $V_{ij}$ 为支路 $ij$ 的电压降。

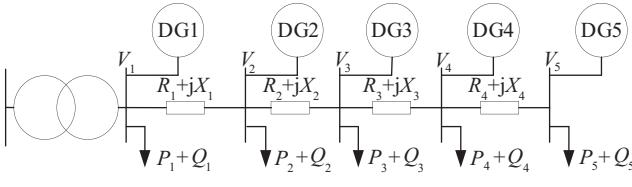


图2 接入分布式电源的配电网接线示意

Fig. 2 Schematic diagram of distribution network wiring with distributed generation access

接入分布式电源后,对于任意节点*i*有:

$$V_1 - V_i = \frac{R_{1i} \sum_{k \in G_i} (P_k - P_{DGk}) + X_{1i} \sum_{k \in G_i} (Q_k - Q_{DGk})}{V_N} \quad (1)$$

式中: $G_i$ ——节点1和节点*i*之间的关联拓扑。

如果在分布式电源的出力发生改变时,负荷吸收的功率保持不变,即 $\Delta P_k = \Delta P_{DGk}$ , $\Delta Q_k = \Delta Q_{DGk}$ ,则节点*i*的电压幅值 $V_i$ 可表示为:

$$V_i = f(P_{DG1}, P_{DG2}, \dots, P_{DG5}, Q_{DG1}, Q_{DG2}, \dots, Q_{DG5}) \quad (2)$$

在分布式电源的输出功率 $P_{DGk}$ 和 $Q_{DGk}$ 改变后,节点*i*的电压变化可表示为:

$$\begin{aligned} \Delta V_i &= \frac{\partial V_i}{\partial P_{DG1}} \Delta P_{DG1} + \frac{\partial V_i}{\partial P_{DG2}} \Delta P_{DG2} + \dots + \frac{\partial V_i}{\partial P_{DG5}} \Delta P_{DG5} + \\ &\quad \frac{\partial V_i}{\partial Q_{DG1}} \Delta Q_{DG1} + \frac{\partial V_i}{\partial Q_{DG2}} \Delta Q_{DG2} + \dots + \frac{\partial V_i}{\partial Q_{DG5}} \Delta Q_{DG5} \quad (3) \\ &= \sum_{k=1}^5 (S_{pik} \Delta P_{DGk} + S_{qik} \Delta Q_{DGk}) \end{aligned}$$

式中: $S_{pik}$ ——*i*节点的电压 $V_i$ 关于节点*k*的有功电压灵敏度; $S_{qik}$ ——*i*节点的电压 $V_i$ 关于节点*k*的无功电压灵敏度,可由雅可比矩阵求得。对于*N*个节点的系统,式(3)可用矩阵形式表示为:

$$\begin{pmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial V_1}{\partial P_{DG1}} & \frac{\partial V_1}{\partial Q_{DG1}} & \dots & \frac{\partial V_1}{\partial P_{DGN}} & \frac{\partial V_1}{\partial Q_{DGN}} \\ \frac{\partial V_2}{\partial P_{DG1}} & \frac{\partial V_2}{\partial Q_{DG1}} & \dots & \frac{\partial V_2}{\partial P_{DGN}} & \frac{\partial V_2}{\partial Q_{DGN}} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial V_N}{\partial P_{DG1}} & \frac{\partial V_N}{\partial Q_{DG1}} & \dots & \frac{\partial V_N}{\partial P_{DGN}} & \frac{\partial V_N}{\partial Q_{DGN}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta P_{DG1} \\ \Delta Q_{DG1} \\ \vdots \\ \Delta P_{DGN} \\ \Delta Q_{DGN} \end{pmatrix} \quad (4)$$

在直角坐标系中的潮流方程可表示为:

$$\begin{pmatrix} \Delta P_1 \\ \Delta Q_1 \\ \Delta P_2 \\ \Delta Q_2 \\ \vdots \\ \Delta P_N \\ \Delta Q_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11} & N_{11} & H_{11} & N_{12} & \cdots & H_{1N} & N_{1N} \\ J_{11} & L_{11} & J_{11} & L_{12} & \cdots & J_{1N} & L_{1N} \\ H_{21} & N_{21} & H_{22} & N_{22} & \cdots & H_{2N} & N_{2N} \\ J_{21} & L_{21} & J_{22} & L_{22} & \cdots & J_{2N} & L_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ H_{N1} & N_{N1} & H_{N2} & N_{N2} & \cdots & H_{NN} & N_{NN} \\ J_{N1} & L_{N1} & J_{N2} & L_{N2} & \cdots & J_{NN} & L_{NN} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta f_1 \\ \Delta e_1 \\ \Delta f_2 \\ \Delta e_2 \\ \vdots \\ \Delta f_N \\ \Delta e_N \end{pmatrix} \quad (5)$$

令,

$$J = \begin{pmatrix} H_{11} & N_{11} & H_{11} & N_{12} & \cdots & H_{1N} & N_{1N} \\ J_{11} & L_{11} & J_{11} & L_{12} & \cdots & J_{1N} & L_{1N} \\ H_{21} & N_{21} & H_{22} & N_{22} & \cdots & H_{2N} & N_{2N} \\ J_{21} & L_{21} & J_{22} & L_{22} & \cdots & J_{2N} & L_{2N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ H_{N1} & N_{N1} & H_{N2} & N_{N2} & \cdots & H_{NN} & N_{NN} \\ J_{N1} & L_{N1} & J_{N2} & L_{N2} & \cdots & J_{NN} & L_{NN} \end{pmatrix} \quad (6)$$

由  $V_i = \sqrt{e_m^2 + f_m^2}$  可得:

$$\partial V_i = \frac{e_k \partial e_k}{\sqrt{e_k^2 + f_k^2}} + \frac{f_k \partial f_k}{\sqrt{e_k^2 + f_k^2}} = \frac{e_k \partial e_k + f_k \partial f_k}{V_i} \quad (7)$$

即:

$$\begin{pmatrix} \Delta V_1 \\ \Delta V_2 \\ \vdots \\ \Delta V_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{e_1}{f_1} & \frac{f_1}{V_1} \\ & \frac{e_2}{f_2} & \frac{f_2}{V_2} \\ & & \vdots \\ & & \frac{e_N}{f_N} & \frac{f_N}{V_N} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta e_1 \\ \Delta f_1 \\ \Delta e_2 \\ \Delta f_2 \\ \vdots \\ \Delta e_N \\ \Delta f_N \end{pmatrix} \quad (8)$$

令,

$$B = \begin{pmatrix} \frac{e_1}{f_1} & \frac{f_1}{V_1} \\ & \frac{e_2}{f_2} & \frac{f_2}{V_2} \\ & & \vdots \\ & & \frac{e_N}{f_N} & \frac{f_N}{V_N} \end{pmatrix} \quad (9)$$

则有:

$$(S_p \quad S_q) = BJ^{-1} \quad (10)$$

分布式光伏变流器的功率因数极高,可忽略无功功率注入,即  $\Delta Q_{DGk}=0$ ,只考虑有功电压灵敏度。光伏的最大准入容量不仅跟电压灵敏度相关,还跟系统初始电压有关。根据各节点的初始电压和有功电压灵敏度,建立电压灵敏度指标,以筛选系统的光伏待接入节点,节点  $i$  的电压灵敏度指标如式(11)所示。

$$S_{pi} = \sum_{k=1}^N \frac{S_{pki}}{V_{max} - V_{k0}} \quad (11)$$

式中: $S_{pki}$ ——节点  $k$  的电压对节点  $i$  注入有功功率的灵敏度; $V_{max}$ ——系统允许的电压上限,pu; $V_{k0}$ ——节点  $k$  未接入光伏前的电压,pu。当节点的电压灵敏度指标越小,表示该

节点接入光伏发生电压越限的风险越小,更适合接入分布式光伏。

## 2.2 蒙特卡罗重要性抽样

在建模之前,首先确定模型中的随机变量;在时间上,考虑负荷的时序波动,光伏出力随天气变化而产生的随机性;在空间上,考虑光伏接入网络位置的随机性和数量的随机性。在算例中,负荷先确定其位置大小,即忽略负荷的空间特性,只考虑其时序波动。

重要性抽样是为了提高特定区域的抽样密度,实现最大值位置的有效捕捉。为找到对光伏准入容量影响较大的节点,基于电压灵敏度指标和节点电压,利用二分  $K$ -均值聚类法,对所有节点进行分类。

在  $K$ -均值算法中有两个步骤。第 1 步用户从给定的数据中随机选择质心,第 2 步根据欧几里得距离,将目标分配到距离较近的聚类中。算法的效率取决于初始质心的选择和  $k$  的值。二分  $K$ -均值聚类法对初始质心的选择进行了改进:

1)首先计算数据点之间的欧氏距离,并根据计算出的距离对数据点进行排序;

2)再将数据集分成两半,即初始质心的相等分区;

3)继续将每个分区进一步分成两个,直到创建  $k$  个分区;

4)计算每个分区的平均值,作为初始质心进行聚类分析。

结合实际情况需要,以及遍历合理的聚类数后,最终确定  $k$  为 3,即将节点划分为 3 个等级:第 1 类节点为对配电网电压影响大的节点,第 2 类节点为对配电网电压影响较大的节点,第 3 类节点为对配电网电压影响较小的节点。

根据节点的聚类结果,建立光伏待接入节点的重要分布函数的表达式如式(12)所示。

$$P(X=X_i) = \begin{cases} \alpha_i \lambda, & X_i=1 \text{(第 } i \text{ 类节点接入分布式光伏)} \\ 1 - \alpha_i \lambda, & X_i=0 \text{(第 } i \text{ 类节点不接入分布式光伏)} \end{cases} \quad (12)$$

式中: $\alpha_i$ ——第  $i$  类节点的重要系数。

可先设定一个初值,再根据先前模拟结果的反馈,动态调整  $\alpha_i$ ,集中在有可能包含最大值的区域进行更密集的采样。 $\alpha_i$  的值可根据文献[15]先设定初值,然后再进行抽样,重复迭代修正最终确定。

$$\alpha_i = \frac{B - \sqrt{B^2 - AC}}{A} \quad (13)$$

$$\begin{cases} A = \frac{n_{i0}}{n_{i0} + n_{i1}} \bar{\lambda} - \left(1 - \frac{n_{i1}}{n_{i0} + n_{i1}}\right) \bar{\lambda} (1 - \bar{\lambda}) \\ B = \frac{n_{i1}}{n_{i0} + n_{i1}} \bar{\lambda} \\ C = \frac{n_{i1}}{n_{i0} + n_{i1}} \\ \bar{\lambda} = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \lambda_i \end{cases} \quad (14)$$

式中: $n_{ii}$ ——第*i*类节点接入光伏的节点数量; $n_{i0}$ ——第*i*类节点不接入光伏的节点数量; $\bar{\lambda}$ ——3类节点接入光伏概率的平均值。

### 3 计及系统能效的安全域和评估流程

#### 3.1 计及系统能效的安全域模型

分布式光伏渗透率的提高势必造成系统电压越限和线路输送容量过载,影响配电网的供电安全。因此,有必要对配电网在静态下的供电极限做出约束,分析特定拓扑结构的光伏极限接入容量。常规安全约束条件包括潮流约束、节点电压约束、线路传输容量约束、变压器输送容量约束<sup>[16-17]</sup>。分布式光伏的高比例接入会引起配电网潮流倒送,增大系统网络损耗,影响配电网的经济运行。为此,建立计及系统能效的配电网安全域模型,如式(15)所示。

$$\Omega = \begin{cases} U_{i\min} \leq U_i \leq U_{i\max}, & \forall i \\ \sqrt{(P_{PV,k} - P_{L,k})^2 + Q_{L,k}^2} \leq S_L, & \forall k \\ \sqrt{P_m^2 + Q_m^2} \leq S_m, & \forall m \\ \eta \geq T & \end{cases} \quad (15)$$

式中: $U_{i\max}$ ——节点*i*允许的电压上限,pu; $U_{i\min}$ ——节点*i*允许的电压下限,pu; $P_{PV,k}$ ——第*k*个公共连接点接入的光伏功率,MW; $P_{L,k}$ ——公共连接点负荷的有功功率,kW; $Q_{L,k}$ ——公共连接点负荷的无功功率,kvar; $S_L$ ——所在线路的极限传输容量,kVA; $P_m$ ——第*m*个变压器传输的有功功率,kVA; $Q_m$ ——第*m*个变压器传输的无功功率,kvar; $S_m$ ——第*m*个变压器的额定容量,kVA; $\eta$ ——光伏接入后系统能效; $T$ ——预设的系统能效阈值。

配电网的系统损耗主要包括各支路和变压器的损耗,定义的能效为考虑线路损耗、变压器损耗及光伏接入所需变流器损耗的系统平均传输效率,计为:

$$\eta = \frac{\sum_{i=1}^n E_{load,i}}{\sum_{i=1}^n E_{load,i} + \sum_{k=1}^m E_{loss,L,k} + \sum_{b=1}^o E_{loss,trans,b} + \sum_{h=1}^o E_{loss,vsc,h}} \quad (16)$$

式中: $E_{load,i}$ ——系统中节点*i*负荷在一段时间内的耗电量总和,kWh; $E_{loss,L,k}$ ——系统在一段时间内支路*k*耗电量总和,kWh; $E_{loss,trans,b}$ ——系统在一段时间内变压器*b*的耗电量总和,kWh; $E_{loss,vsc,h}$ ——系统在一段时间内变流器*h*的耗电量总和,kWh。

#### 3.2 光伏最大准入容量评估流程

基于电压灵敏度改进的蒙特卡罗重要性抽样方法,实现光伏最大准入容量评估的流程如图3所示。

步骤1:根据馈线将配电网模型划分为几个区域,分别评估每个区域的光伏最大准入容量。

步骤2:求取各节点的电压灵敏度指标,并结合节点电压,利用二分K-means聚类法将所有节点聚类为对系统电压影响不同的3类节点;再依据节点的聚类结果,采用蒙特卡罗重要性抽样,生成节点的重要分布函数。

步骤3:确定光伏部署方案数和光伏接入节点数量,根据光伏待接入节点的重要性分布函数,随机生成光伏部署场景,并随机分配光伏的初始大小。

步骤4:以上的随机场景建立完成之后,进行时域潮流计算,判断各潮流分量是否在安全域内。如若在安全域内,则说明此时该系统还能容纳更多光伏,可进一步增加光伏容量;如果不满足以上的任何一个限制条件,则说明本系统光伏已到饱和点或超出饱和点,再增大光伏可能会导致配电网的不正常运行,从而发生严重的安全事故。

步骤5:多次重复步骤3和步骤4,不断迭代更新光伏待接入节点的重要性分布函数,得到各种场景下的光伏接入方案,直到所有设定的方案结束为止。

步骤6:对所用方案得到的光伏准入容量进行筛选统计,得到每个区域可接入的最大光伏容量和具体的接入节点位置,配电网的光伏最大准入容量即为各个区域的总和。

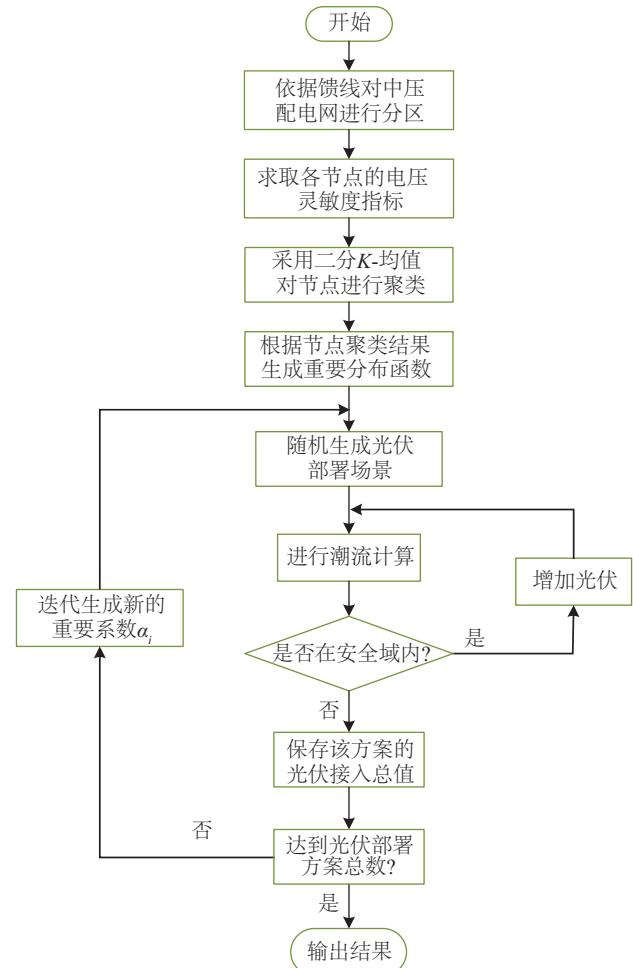


图3 光伏最大准入容量评估流程

Fig. 3 Process of evaluating the maximum access capacity of PV

## 4 算例仿真

### 4.1 33 节点配电网

为验证所提出方法的准确性和合理性,采用 IEEE 33 总线系统,计算分布式光伏发电系统的极限容量。IEEE 33 总线系统的额定电压为 12.66 kV,首节点电压为 1.04 pu,各母线电压偏差为 $\pm 7\%$ ,各支线传输容量极限为 8000 kVA。选择 7、20、24、26 节点接入光伏,求得光伏最大准入容量,与文献[18]所提基于鱼群算法的配电网光伏极限容量评估方法、文献[19]新型鲁棒综合光伏发电容量评估模型以及文献[20]的多种群遗传算法进行对比,如表 1 所示。

表 1 IEEE 33 光伏最大准入容量

Table 1 Maximum access capacity of PV in IEEE 33

采用方法	文献[18] 所提方法	文献[19] 所提方法	文献[20] 所提方法	本文 方法
光伏最大准入容量/MW	7.49	7.82	5.87	8.79
最大节点电压/pu	1.0711	1.0708	1.0640	1.0704

由表 1 可知,本文所提方法评估所得的最大光伏准入容量为 8.79 MVA,较文献[18]、文献[19]和文献[20]分别提升 17.36%、12.41% 和 49.74%。且所提方法还能在不固定光伏接入节点、考虑负荷和光伏时序特性的情况下,进行光伏最大准入容量的评估,适用性更强。为验证所提方法,求得该系统接入最大光伏容量时各节点电压和支路潮流如图 4 所示。

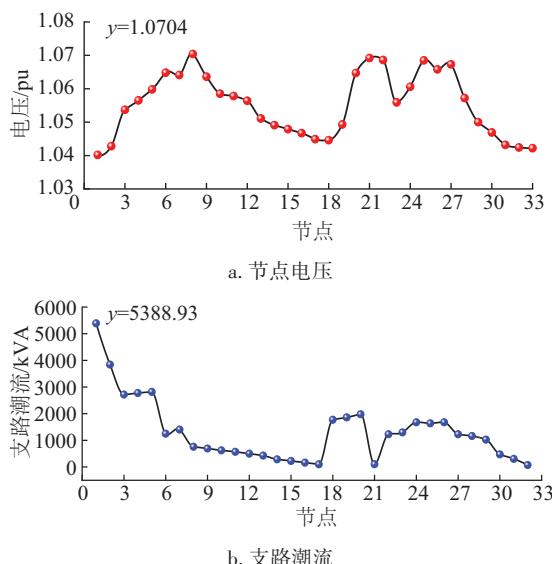


图 4 IEEE 33 系统的节点电压和支路潮流

Fig. 4 Node voltage and branch power flow for IEEE 33

由图 4 可知,当 IEEE 33 节点系统接入光伏最大准入容

量时,系统首端支路的功率流动最大,其值为 5388.93 kVA,但没有超过传输容量极限;节点 8 电压达到 1.0704 pu,刚发生节点电压越限,验证所提方法的有效性。

### 4.2 119 节点配电网

以 119 节点配电系统作为实验算例<sup>[21]</sup>,将该配电系统根据馈线,划分为以节点 2、66 和 105 为首端节点的 3 个区域。总功率负荷为 22709.7 kW,17041.1 kvar。在此算例中,配电系统的电压等级为 11 kV,首节点电压设为 1.04 pu,配电系统的电压安全域范围取 [0.93, 1.07];区域 1 节点负荷较多,与节点 1 相连的主馈线的最大传输容量为 15000 kVA,其他馈线的最大传输容量为 10000 kVA,系统能效阈值取 90%。

仿真选取的时间段为一个典型日,仿真步长为 1 h,典型日下分布式光伏和负荷的出力曲线如图 5 所示。以区域 1 为例进行分析,基于图 5 的日光伏负荷时序曲线,应用所提方法,依据区域 1 各节点的电压灵敏度指标和电压对所有节点进行聚类,得到的结果如图 6 所示。

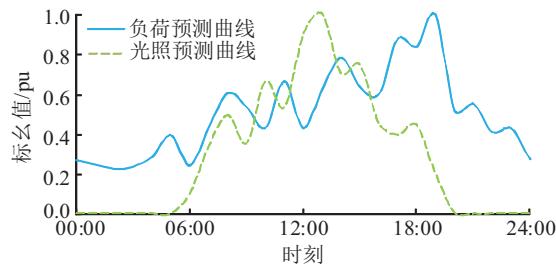


图 5 典型日光伏和负荷出力曲线

Fig. 5 Typical daily PV and load output curves

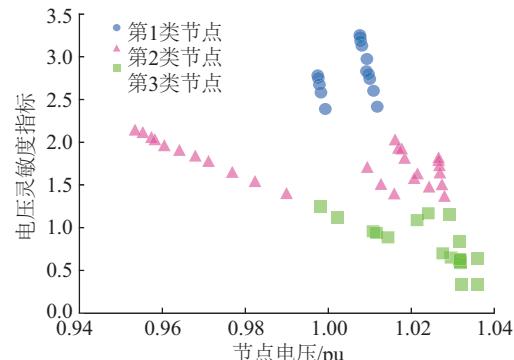


图 6 区域 1 光伏接入节点聚类结果

Fig. 6 Clustering results of PV access nodes in zone 1

据图 6 所示,节点 44、45、46 等馈线中段节点为第 1 类节点,光伏大量接入发生电压越限的风险很大;节点 12、13、14 等馈线末端节点及一部分馈线中段节点为第 2 类节点,光伏大量接入发生电压越限的风险较大;节点 2、3、4 等馈线起始节点为第 3 类节点,光伏大量接入发生电压越限的风险较小,更适合大量接入分布式光伏。

根据图 6 分类结果,采用蒙特卡罗重要性抽样,生成光伏接入节点的重要性分布函数。其中第 1 类节点的  $\alpha$  设为 1.0,

第2类节点的 $\alpha$ 初值取1.2,第3类节点的 $\alpha$ 初值取1.5。在Matlab仿真环境下,采用本文所提方法,随机部署10000个场景,在典型日下进行时域潮流计算,得到不同光伏部署场景

数量下,在所提计及系统能效安全域内,区域1的光伏最大准入容量、平均光伏准入容量和各类节点的重要系数,并与传统的蒙特卡罗模拟法对比,结果如表2所示。

表2 不同光伏部署场景数量下两种方法对比

Table 2 Comparison of two methods under different numbers of PV deployment scenarios

光伏部署 场景数量	本文方法			传统蒙特卡罗算法	
	最大光伏 接入容量/kW	平均光伏 接入容量/kW	重要系数	最大光伏 接入容量/kW	平均光伏 接入容量/kW
2000	23530.76	16188.75	$\alpha_2=1.54, \alpha_3=1.22$	23162.70	14735.29
4000	23559.82	16515.03	$\alpha_2=1.58, \alpha_3=1.25$	23402.78	14694.16
6000	23614.87	16756.93	$\alpha_2=1.61, \alpha_3=1.26$	23402.78	14753.68
8000	23614.87	16909.64	$\alpha_2=1.62, \alpha_3=1.28$	23474.73	14753.97
10000	23617.12	16930.71	$\alpha_2=1.63, \alpha_3=1.29$	23555.03	14779.35

由表2可知,在部署场景数量相同的情况下,本文方法评估所得的最大光伏接入容量均大于传统蒙特卡罗算法,平均光伏接入容量提升14.26%,且在逐步增加,表明所提方法能更有效地捕捉到光伏准入容量最大的位置,对系统最大光伏准入容量的评估的精度更高。随着部署场景数量的增加,两种方法的精度逐渐相近;在相同精度下,所提方法较传统的蒙特卡罗模拟法所需部署场景数缩短近60%。所提计及系统能效安全域内,评估所得的光伏最大准入容量及其系统能效与常规安全域对比如表3所示。

表3 两种安全域下光伏最大准入容量及能效

Table 3 Maximum access capacity of PV and energy efficiency under two security region

安全域	计及系统能效的安全域	常规安全域
光伏接入节点	3、5、6、9、10、11、12、13、15、17、18、21、32、34、35、38、40、42、43、49、52、60、61、64、65	2、13、19、20、32、51
光伏最大 准入容量/kW	23617.12	23710.64
系统能效/%	92.84	88.02

由表3可知,在计及系统能效安全域内,光伏呈分散式接入,实现光伏的就地消纳,降低线路的功率损耗和载流压カ。评估所得的光伏最大准入容量较常规安全域只减少0.39%,系统能效却上升4.82%,系统的运行效率更高,对指导光伏的接入具有重要意义。本文方法与传统的蒙特卡罗算法的光伏部署场景越限类型比例如图7所示。

由图7可知,在本文所提方法的光伏部署场景中,发生线路传输容量的场景比例最高,达到48.5%的占比;发生节点电压越限的场景占比次之,为47.7%;发生系统能效越限的

场景最少,只占总场景的3.8%。在采用电压灵敏度改进后,系统发生节点电压越限的场景比例由72.8%下降至47.7%,充分说明了该方法对抑制系统的节点电压越限起到了有效作用;如果增大线路极限传输容量,可进一步提升系统的光伏接纳能力。

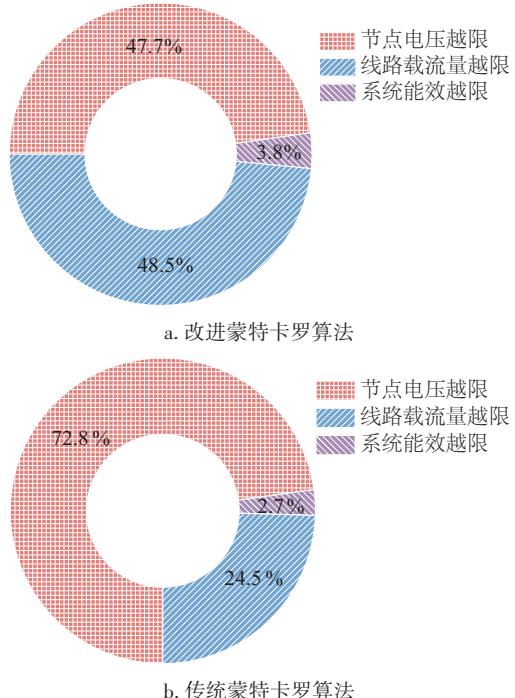
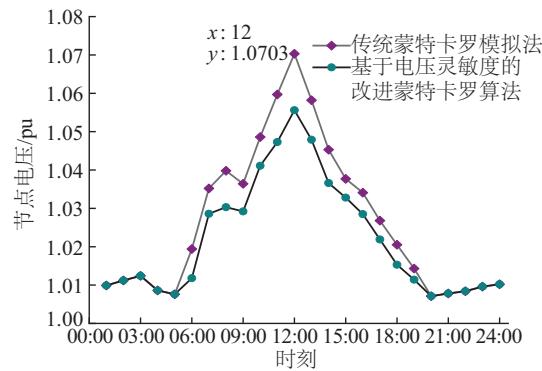


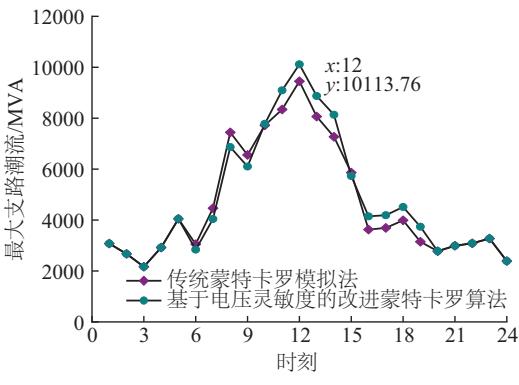
图7 两种方法下光伏部署场景的越限类型比例

Fig. 7 Proportion of out-of-limit types in PV deployment scenarios under two methods

以光伏准入容量最大的部署场景为例,对影响限制光伏接入的因素进行具体分析。两种方法得到的最大光伏接入场景,在典型日内的最高节点电压和除主馈线外的最大支路潮流如图8所示。



a. 最高节点电压



b. 最大支路潮流

图 8 最大光伏容量接入场景典型日内最高节点电压和最大支路潮流

Fig. 8 Highest node voltage and maximum branch power flow during a typical day in maximum PV access scenario

由图 8a 可知,两种方法评估的最大光伏接入场景在 12:00 时光伏满出力情况下的节点电压最高,在采用传统蒙特卡罗模拟法评估的最大光伏接入场景中,最高节点电压达到 1.0703 pu,出现电压越限的情况,说明限制该光伏部署场景的主要因素是节点电压,而在采用改进蒙特卡罗算法评估的最大光伏接入场景中,电压最高为 1.0584 pu,未出现越限。由图 8b 可知,在本文方法的最大光伏接入场景中,除主馈线外的最大支路潮流在 12:00 达到 10113.76 kVA,超过传输容量极限,说明该场景发生了线路传输容量的越限,如果增大线路的传输容量可以接纳更多的光伏。

同理可得区域 2 和 3 的光伏最大准入容量和接入节点,评估 119 节点配电网中各区域在 24 h 内时刻允许注入的最大光伏容量,光伏接入的容量和位置如图 9 所示。

由图 9 可知,119 节点配电网光伏最大准入容量为 52669.55 kW,区域 1、2 和 3 可接入的最大光伏容量分别为 23617.12、14450.80 和 14601.63 kW。3 个区域选择的光伏接入节点大多为第 3 类节点,对系统电压影响较小,有利于分布式光伏接入。且所有区域皆为多点接入分布式光伏,实现分布式光伏就地消纳,可以更好地利用线路电压安全裕度,避免系统运行达到限值。

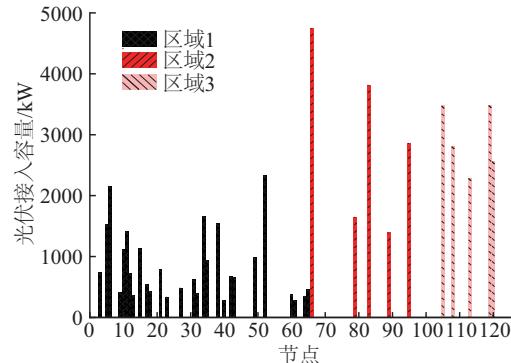


图 9 119 节点配电网最大光伏接入场景下各节点接入的光伏容量

Fig. 9 PV capacity of each node in distribution network of 119 nodes in maximum PV access scenario

## 5 结 论

本文建立计及系统能效的安全域模型,提出电压灵敏度指标,结合蒙特卡罗重要性抽样,对配电网的光伏最大准入容量进行评估。先通过电压灵敏度指标和电压,对光伏接入节点进行聚类,对每类节点都构造重要性分布函数,再通过蒙特卡罗模拟法生成各类光伏接入场景,在典型日下评估配电网在计及能效的安全域下的最大光伏准入容量,为配电网的光伏接入提供指导。得到以下结论:

1) 提出基于电压灵敏度的改进蒙特卡罗算法,系统发生节点电压越限的场景比例由 72.8% 下降至 47.7%,有效抑制分布式光伏接入节点电压越限,充分利用线路的电压安全裕度,实现分布式光伏的最大容量接入。

2) 建立计及系统能效的安全域模型,相较于常规的安全域模型,评估结果在牺牲 0.39% 光伏接入容量的前提下提升 4.82% 的系统能效,系统的运行效率更高。

3) 所提方法根据先前模拟结果的反馈,动态调整采样策略,实现在有可能包含最大值的区域更密集的采样,对配电网的最大光伏准入容量评估的精度相比较于解析优化算法提升 12.41% 以上,所需部署场景数量对比传统的蒙特卡罗模拟法缩短近 60%。

## [参考文献]

- [1] 董逸超,王守相,闫秉科.配电网分布式电源接纳能力评估方法与提升技术研究综述[J].电网技术,2019,43(7): 2258-2266.  
DONG Y C, WANG S X, YAN B K. Review on evaluation methods and improvement techniques of DG hosting capacity in distribution network [J]. Power system technology, 2019, 43(7): 2258-2266.
- [2] 王成山,李鹏.分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J].电力系统自动化,2010,34(2): 10-14.  
WANG C S, LI P. Development and challenges of

- distributed generation, the micro-grid and smart distribution system [J]. *Automation of electric power systems*, 2010, 34(2): 10-14.
- [3] 王志群, 朱守真, 周双喜, 等. 分布式发电对配电网电压分布的影响[J]. *电力系统自动化*, 2004, 28(16): 56-60.  
WANG Z Q, ZHU S Z, ZHOU S X, et al. Impacts of distributed generation on distribution system voltage profile [J]. *Automation of electric power systems*, 2004, 28(16): 56-60.
- [4] 张立梅, 唐巍, 赵云军, 等. 分布式发电接入配电网后对系统电压及损耗的影响分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2011, 39(5): 91-96, 101.  
ZHANG L M, TANG W, ZHAO Y J, et al. Analysis of DG influences on system voltage and losses in distribution network [J]. *Power system protection and control*, 2011, 39(5): 91-96, 101.
- [5] 裴玮, 盛鵠, 孔力, 等. 分布式电源对配网供电电压质量的影响与改善[J]. *中国电机工程学报*, 2008, 28(13): 152-157.  
PEI W, SHENG K, KONG L, et al. Impact and improvement of distributed generation on distribution network voltage quality [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2008, 28(13): 152-157.
- [6] WANG S X, DONG Y C, WU L, 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.
- [7] 王一波, 李晶, 许洪华. 考虑电网安全稳定约束的光伏电站最大安装容量计算与分析[J]. *太阳能学报*, 2008, 29(8): 971-975.  
WANG Y B, LI J, XU H H. Analysis of the maximum installed capacity of PV station constrained by power system security and stability [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2008, 29(8): 971-975.
- [8] 张锐, 饶欢, 徐睿烽, 等. 多运行目标下的分布式光伏接入配电网极限容量多模型评估方法[J]. *电力科学与技术学报*, 2023, 38(4): 143-150.  
ZHANG R, RAO H, XU R F, et al. An evaluation method for the maximum distributed photovoltaic power capacity absorbed in the distribution networks considering multiple operation targets [J]. *Journal of electric power science and technology*, 2019, 38(4): 143-150.
- [9] 张家安, 高晓东, 王铁成, 等. 计及弃光约束的配电网光伏接纳能力评估[J]. *电力工程技术*, 2023, 42(6): 14-21.  
ZHANG J A, GAO X D, WANG T C, et al. Evaluate the hosting capacity of PV in distribution network: considering PV curtailment constraints [J]. *Electric power engineering technology*, 2023, 42(6): 14-21.
- [10] 李振坤, 管琰玲, 张代红, 等. 基于年时序曲线的配电网节点光伏接纳能力评估及最佳容量研究[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(4): 200-208.  
LI Z K, GUAN Y L, ZHANG D H, et al. Photovoltaic hosting ability evaluation and optimum capacity research of distribution networks node based on annual time-series curve[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2021, 42(4): 200-208.
- [11] 张嘉澍, 吕泉, 郭雪丽, 等. 考虑合理弃光的配电网光伏最大接入容量研究[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(2): 418-426.  
ZHANG J S, LYU Q, GUO X L, et al. Research on maximum PV access capacity in distribution network considering proper power curtailment [J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2023, 44(2): 418-426.
- [12] ABUD T P, CATALDO E, MACIEL R S, et al. A modified Bass model to calculate PVDG hosting capacity in LV networks [J]. *Electric power systems research*, 2022, 209: 107966.
- [13] JAIN A K, HOROWITZ K, DING F, et al. Dynamic hosting capacity analysis for distributed photovoltaic resources: framework and case study [J]. *Applied energy*, 2020, 280: 115633.
- [14] 陈春, 汪沨, 刘蓓, 等. 一种智能配电网安全运行控制方法[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(12): 357-366.  
CHEN C, WANG F, LIU B, et al. A method of safe operation control of smart distribution system [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(12): 357-366.
- [15] LI N, ZHU Z H, LI M, et al. Research on reliability evaluation of power system including improved Monte Carlo and parallel calculation [C]//2017 2nd International Conference on Power and Renewable Energy (ICPRE). Chengdu, China, 2017: 534-538.
- [16] 刘浩, 王丹, 肖峻, 等. 考虑碳流约束的电力系统能碳安全域模型与计算方法[J]. *电力系统自动化*, 2024, 48(3): 10-21.  
LIU H, WANG D, XIAO J, et al. Model and calculation method of energy-carbon security region for power system considering carbon flow constraints [J]. *Automation of electric power systems*, 2024, 48(3): 10-21.
- [17] 裴蕾, 卫志农, 陈胜, 等. 计及光伏出力波动的交直流混合配电网安全域模型[J]. *电网技术*, 2021, 45(10): 4084-4093.  
PEI L, WEI Z N, CHEN S, et al. Security region of variable photovoltaic generation in AC-DC hybrid distribution power networks [J]. *Power system technology*, 2021, 45(10): 4084-4093.
- [18] 李滨, 潘国超, 陈碧云, 等. 满足电能质量限值的分布式光伏极限峰值容量计算[J]. *电力系统自动化*, 2016,

- 40(14): 43-50.
- LI B, PAN G C, CHEN B Y, et al. Limit peak capacity calculation of distributed photovoltaic with power quality constraints [J]. Automation of electric power systems, 2016, 40(14): 43-50.
- [19] 刘科研, 盛万兴, 马晓晨, 等. 基于多种群遗传算法的分布式光伏接入配电网规划研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(6): 146-155.
- LIU K Y, SHENG W X, MA X C, et al. Planning research of distributed photovoltaic source access distribution network based on multi-population genetic algorithm [J]. Acta energiae solaris sinica, 2021, 42(6): 146-155.
- [20] ESAU Z, RYOICHI H, HIROYUKI K. A flexible stochastic PV hosting capacity framework considering network over-voltage tolerance [J]. Energy reports, 2023, 9: 529-538.
- [21] ZHANG D, FU Z C, ZHANG L C. An improved TS algorithm for loss-minimum reconfiguration in large-scale distribution systems [J]. Electric power systems research, 2007, 77(5/6): 685-694.

## EVALUATION OF MAXIMUM ACCESS CAPACITY OF DISTRIBUTED PHOTOVOLTAIC SYSTEM UNDER SECURITY AND ENERGY EFFICIENCY CONSTRAINTS

Chen Chun<sup>1</sup>, Tang Xi<sup>1</sup>, Cao Yijia<sup>1</sup>, Li Yong<sup>2</sup>, Li Meng<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention & Reduction for Power Grid, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

3. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** The unconstrained access of distributed PV to the distribution network inevitably affect the security of the power grid. Therefore, a Monte Carlo importance sampling method based on voltage sensitivity is proposed, which considers the timing characteristics of PV and load to evaluate the maximum access capacity of distributed PV under security and energy efficiency constraints. A distribution network security domain model considering the energy efficiency of the system is established, and taking the feeder as the minimum evaluation zone. Then the bisecting K-means is used to perform cluster analysis on the PV nodes to be connected based on the voltage sensitivity index and node voltage. According to the clustering results, a Monte Carlo importance sampling method is used to construct a new probabilistic model to randomly generate PV deployment scenarios, which realizes the evaluation of the maximum access capacity of PV in all zones in the security region. The simulation results show that after adopting the security region considering system energy efficiency, the maximum access capacity of PV is only reduced by 0.39% compared to the conventional security region, while the system energy efficiency increases by 4.82%, which improves the system operational efficiency. The evaluation accuracy of the proposed method is improved by 12.41% compared with the analytical optimization algorithm, and the number of deployment scenarios required is reduced by nearly 60% compared to the traditional Monte Carlo simulation method under the same accuracy, which improves the accuracy and efficiency of the evaluation of the maximum PV access capacity of the distribution network.

**Keywords:** distributed photovoltaic; security constraint; capacity assessment; voltage sensitivity; Monte Carlo importance sampling