

DOI: 10.19718/j.issn.1005-2992.2022-06-0028-11

# 基于机会约束规划的配电网分布式光伏承载能力评估

丁琦欣<sup>1,2</sup>, 覃洪培<sup>1</sup>, 万 灿<sup>1</sup>, 彭 琰<sup>3</sup>, 李昀熠<sup>1</sup>

(1.浙江大学电气工程学院,浙江 杭州 310027;2.浙江大学工程师学院,浙江 杭州 310015;3.国网浙江省电力有限公司电力科学研究院,浙江 杭州 310014)

**摘要:**近年来分布式光伏发展迅猛,其发电功率间歇性和不确定性给配电网运行安全带来巨大威胁,亟需对配电网分布式光伏进行承载能力量化分析,以指导其科学开发.为此,考虑光伏发电功率不确定性,提出了一种基于机会约束规划的配电网分布式光伏承载能力评估方法.首先,基于分布式光伏历史运行数据,采用高斯混合模型对其发电功率概率分布进行建模表征;其次,考虑线路热稳定约束、电压安全约束以及设备运行约束,将光伏出力视作随机变量,建立了基于机会约束规划的配电网分布式光伏承载能力评估模型;然后,推导建立了分布式光伏发电功率与线路潮流、节点电压等系统状态变量间的仿射关系,通过计算累积分布函数在给定置信度下的分位点实现机会约束的确定性转化;最后,在一个改进的测试系统上验证了所提方法的有效性.

**关键词:**承载能力分析;配电网;分布式光伏;不确定性;机会约束规划;高斯混合模型

**中图分类号:** TM615;TM73      **文献标识码:** A

随着全球能源危机持续恶化,中国提出“3060 双碳目标”,大力发展战略性新兴产业,推动电力系统低碳转型.以分布式光伏为代表的可再生能源发电功率具有显著的不确定性<sup>[1-4]</sup>,其大规模接入导致配电网电压分布不均、电压质量下降、电压越限以及潮流反向等问题<sup>[5-8]</sup>.亟需深入研究和量化分析配电网分布式光伏承载能力,为分布式光伏大规模开发与接入提供关键性、指导性信息,并保证配电网安全稳定运行和支撑新型电力系统构建.

分布式光伏承载能力表示在保证系统运行安全稳定的前提下,配电网最大可接入的分布式光伏容量<sup>[9]</sup>.在既往研究中,一般采用“接纳能力”<sup>[10]</sup>“消纳能力”<sup>[11]</sup>以及“最大接入容量”<sup>[12]</sup>等指标来表征配电网分布式光伏承载能力.文献[10]在定量分析系统资源功率调节范围的基础上,提出了一种基于系统灵活性充裕度的可再生能源消纳能力评估方法,以支撑可再生能源消纳.文献[11]考虑配电网电压质量、变压器及线路传输容量约束,基于随机场景模拟和定阶划分评估实现了配电网光伏消纳能力的评估.以上研究均通过优化模型得到分析结果,考虑的制约因素有限.为此,文献[13]和文献[14]构建了相关评估指标,可有效量化多重复杂约束下的配电网分布式光伏承载能力.然而,以上研究均以典型日运行曲线来模拟光伏出力,未深入考虑分布式光伏不确定性对配电网运行安全性的影响.计及负荷和分布式电源出力的随机性以及分布式电源接入容量和位置的不确定性,文献[15]通过将解析概率潮流嵌入到蒙特卡洛模拟中,提出了一种基于随机分析-概率的分布式电源承载能力分析方法.文献[7]考虑光伏和负荷的不确定性,提出了一种基于区间过电压概率的分布式电源承载能力分析方法,通过区间算法

收稿日期: 2022-09-15

基金项目: 国家电网公司科技项目(5108-202218280A-2-446-XG)

第一作者: 丁琦欣(2000-),女,在读硕士研究生,主要研究方向:新能源电力系统不确定性分析

通讯作者: 万 灿(1986-),男,博士,教授,主要研究方向:新能源电力系统不确定性预测、分析与控制

电子邮箱: qixin\_ding@zju.edu.cn(丁琦欣); qinhp@zju.edu.cn(覃洪培); canwan@zju.edu.cn(万灿); py6762467@yeah.net(彭琰); yunyi\_li@zju.edu.cn(李昀熠)

和仿射计算求解模型获得评估结果。以上研究虽然考虑了光伏的不确定性,但均通过抽样生成大量随机场景,无法避免计算量大的问题。

为此,本文在深入分析分布式光伏出力不确定性的基础上,提出了基于机会约束规划的配电网分布式光伏承载能力分析方法。主要工作内容包括:

(1) 基于历史数据并采用高斯混合模型(Gaussian Mixture Model, GMM)构建分布式光伏发电功率概率分布,以有效量化光伏出力不确定性;

(2) 基于机会约束规划建立配电网分布式光伏承载能力计算模型,并通过推导光伏发电功率与系统状态变量间的仿射关系,实现模型确定性转化和求解;

(3) 通过在一个改进测试系统上的仿真验证了所提方法的有效性,并深入分析了负荷水平、储能接入容量等对配电网分布式光伏承载能力的影响。

## 1 基于机会约束规划的配电网分布式光伏承载能力计算模型

在保证配电网安全运行的前提下,承载能力指系统最大可接入的分布式光伏容量<sup>[9]</sup>。系统分布式光伏承载能力的制约因素主要包括线路传输容量约束、最大电压偏差约束以及短路容量约束等<sup>[14,16]</sup>。本节在传统承载能力分析模型<sup>[17]</sup>的基础上引入机会约束,建立了考虑不确定性的配电网分布式光伏承载能力计算模型。

### 1.1 考虑不确定性的配电网分布式光伏承载能力计算模型

本文在进行分布式光伏承载能力分析计算时,为简化流程和保证问题的可行性,忽略了配电网线路传输损耗,采用线性化 DistFlow 模型<sup>[18]</sup>描述配电网潮流。由于配网覆盖空间范围有限,各分布式光伏出力差异性较小,近似认为服从相同的分布<sup>[19]</sup>。基于上述条件,所提配电网分布式光伏承载能力分析机会约束规划模型简述如下。

#### 1.1.1 目标函数

所提配电网分布式光伏计算模型的目标函数为

$$\min f = - \sum_{i=1}^N S_i^{\text{PV}}, \quad (1)$$

公式中: $S_i^{\text{PV}}$  为节点  $i$  处接入的光伏容量;  $N$  为配电网节点数。

#### 1.1.2 约束条件

模型中约束条件可分为确定性约束和机会约束两类,其中确定性约束包括:

##### (1) 潮流约束

$$\begin{cases} P_{jk,t} = \sum_{l \in D_k} P_{kl,t} + P_{k,t}, \\ Q_{jk,t} = \sum_{l \in D_k} Q_{kl,t} + Q_{k,t}, \\ U_{k,t} = U_{j,t} - \frac{r_{jk} P_{jk,t} + x_{jk} Q_{jk,t}}{U_0}, \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} P_{k,t} = P_{k,t}^D + P_{k,t}^{\text{BU,in}} - P_{k,t}^{\text{DG}} - P_{k,t}^{\text{BU,out}} - P_{k,t}^{\text{PV}}, \\ Q_{k,t} = Q_{k,t}^D - Q_{k,t}^{\text{DG}} - Q_{k,t}^{\text{SVG}} - Q_{k,t}^{\text{PV}}, \end{cases} \quad (3)$$

公式中: $P_{jk,t}$  为支路  $(j,k)$  上的有功潮流; $Q_{jk,t}$  为无功潮流; $U_{k,t}$  为节点  $k$  的电压; $U_0$  为基准电压; $P_{k,t}$  为节点  $k$  注入的有功功率; $Q_{k,t}$  为无功功率; $r_{jk}$  为线路  $(j,k)$  的电阻; $x_{jk}$  为电抗; $D_k$  为与节点  $k$  存在直接线路连接关系的子节点集合; $P_{k,t}^{\text{DG}}$  为分布式电源(Distributed Generation, DG) 有功功率; $Q_{k,t}^{\text{DG}}$  为无功功率; $Q_{k,t}^{\text{SVG}}$

为静止无功发生器(Static Var Generator,SVG)的无功功率;  $P_{k,t}^{\text{PV}}$  为光伏发电系统有功功率预测值;  $Q_{k,t}^{\text{PV}}$  为光伏发电系统的无功功率.

## (2) 设备运行约束

$$P_{i,t}^{\text{PV}} \tan \theta_i^{\text{PV},\min} \leq Q_{i,t}^{\text{PV}} \leq P_{i,t}^{\text{PV}} \tan \theta_i^{\text{PV},\max}, \quad (4)$$

$$P_i^{\text{DG},\min} \leq P_{i,t}^{\text{DG}} \leq P_i^{\text{DG},\max}, Q_i^{\text{DG},\min} \leq Q_{i,t}^{\text{DG}} \leq Q_i^{\text{DG},\max}, \quad (5)$$

$$R_i^{\text{d}} \Delta t \leq P_{i,t+1}^{\text{DG}} - P_{i,t}^{\text{DG}} \leq R_i^{\text{u}} \Delta t, \quad (6)$$

$$Q_i^{\text{SVG},\min} \leq Q_{i,t}^{\text{SVG}} \leq Q_i^{\text{SVG},\max}, \quad (7)$$

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{BU,in}} \leq \pi_{i,t} P_i^{\text{BU,in,max}}, 0 \leq P_{i,t}^{\text{BU,out}} \leq (1 - \pi_{i,t}) P_i^{\text{BU,out,max}}, \quad (8)$$

$$E_{i,t+1}^{\text{BU}} = E_{i,t}^{\text{BU}} + \left[ (\eta^{\text{in}} P_{i,t}^{\text{BU,in}} - P_{i,t}^{\text{BU,out}} / \eta^{\text{out}}) \Delta t \right] / C_i^{\text{BU}}, E_{i,t}^{\text{BU,min}} \leq E_{i,t}^{\text{BU}} \leq E_{i,t}^{\text{BU,max}}, \quad (9)$$

公式中:  $\theta_i^{\text{PV},\max}$  为光伏发电系统功率因数角上限;  $\theta_i^{\text{PV},\min}$  为下限;  $P_i^{\text{DG},\max}$  为分布式电源有功出力上限;  $P_i^{\text{DG},\min}$ , 为下限;  $Q_i^{\text{DG},\max}$  为分布式电源无功出力上限;  $Q_i^{\text{DG},\min}$  为下限;  $R_i^{\text{u}}$  为分布式电源向上爬坡率;  $R_i^{\text{d}}$  为向下爬坡率;  $Q_i^{\text{SVG},\max}$  为 SVG 无功出力上限;  $Q_i^{\text{SVG},\min}$  为下限;  $\pi_{i,t}$  为充放电状态指示变量, 1 表示充电, 0 表示放电;  $P_i^{\text{BU,in,max}}$  为储能系统最大充电功率;  $P_i^{\text{BU,out,max}}$  为放电功率;  $E_{i,t}^{\text{BU}}$  为储能系统荷电状态;  $\eta^{\text{in}}$  为储能系统充电效率;  $\eta^{\text{out}}$  为放电效率;  $C_i^{\text{BU}}$  为储能系统容量;  $E_{i,t}^{\text{BU,max}}$  为储能系统最大;  $E_{i,t}^{\text{BU,min}}$  为最小荷电状态;  $\Delta t$  为时间间隔.

在所构建模型中, 将光伏发电系统出力视为随机变量, 则支路有功潮流  $\tilde{P}_{jk,t}$ 、节点电压  $\tilde{U}_{j,t}$  等状态变量也为随机变量, 需以机会约束形式给出潮流和电压约束, 表示为

$$\begin{cases} \Pr \left[ P_{jk}^{\min} \geq \tilde{P}_{jk,t} \right] \leq \alpha_l, \Pr \left[ \tilde{P}_{jk,t} \leq P_{jk}^{\max} \right] \geq \alpha_u, \\ \Pr \left[ U_j^{\min} \geq \tilde{U}_{j,t} \right] \leq \alpha_l, \Pr \left[ \tilde{U}_{j,t} \leq U_j^{\max} \right] \geq \alpha_u, \end{cases} \quad (10)$$

公式中:  $\Pr[\cdot]$  为括号内不等式成立的概率; 上标 max 为对应支路潮流和节点电压约束的上限值; min 为下限值;  $\alpha_l$  和  $\alpha_u$  为预设的置信水平.

## 1.2 机会约束转化与模型求解

上述分布式光伏承载能力分析模型中包含随机变量, 难以直接优化求解. 假设光伏发电功率的概率密度函数 (Probability Density Function, PDF) 为  $f_{k,t}^{\text{PV}}(x)$ , 其累积分布函数 (Cumulative Distribution Function, CDF) 表示为公式(11),  $(f_{k,t}^{\text{PV}})^{-1}(\cdot)$  表示其反函数, 则可通过一系列变换实现公式(10)中机会约束的确定性转化.

$$f_{k,t}^{\text{PV}}(x) = \int_{-\infty}^x f_{k,t}^{\text{PV}}(w) dw, \quad (11)$$

针对线路有功潮流, 其机会约束处理过程如下. 根据公式(2)、公式(3) 所述潮流关系, 可得到线路有功潮流与各节点设备运行功率、负荷间的线性关系

$$\tilde{P}_{jk,t} = \sum_{i \in C_k} (P_{i,t}^{\text{D}} - P_{i,t}^{\text{DG}} + P_{i,t}^{\text{BU,in}} - P_{i,t}^{\text{BU,out}}) - \sum_{i \in C_k} \tilde{P}_{i,t}^{\text{PV}}, \quad (12)$$

公式中:  $C_k$  为节点  $k$  的所有子节点集合.

进一步地, 公式(12) 可表示为如下仿射关系

$$\tilde{P}_t = \begin{bmatrix} \tilde{P}_{j=1,k=2,t} \\ \cdots \\ \tilde{P}_{j=N-1,k=N,t} \end{bmatrix} = A_t \begin{bmatrix} \tilde{P}_{2,t}^{\text{PV}} \\ \cdots \\ \tilde{P}_{N,t}^{\text{PV}} \end{bmatrix} + B_t = A_t \tilde{P}_t^{\text{PV}} + B_t, \quad (13)$$

公式中: $A_t$ 为元素为0或者-1的常数矩阵,其逆矩阵为 $A_t^{-1}$ ; $B_t$ 为与各节点设备运行功率以及负荷有关的确定性变量; $\tilde{P}_t$ 为各条支路有功潮流组成的列向量; $\tilde{P}_t^{\text{PV}}$ 为各个节点(不包括始节点)光伏发电系统有功出力组成的列向量.

则公式(10)中有功潮流机会约束可通过如下方法进行确定性转化<sup>[20]</sup>.

$$\begin{cases} \Pr \left[ P^{\min} \geq ; \tilde{P}_t \right] \leq \alpha_l \Leftrightarrow \Pr \left[ ; \tilde{P}_t^{\text{PV}} \leq A_t^{-1}(P^{\min} - B_t) \right] \leq \alpha_l \Leftrightarrow A_t^{-1}(P^{\min} - B_t) \leq (f_t^{\text{PV}})^{-1}(\alpha_l), \\ \Pr \left[ ; \tilde{P}_t \leq P^{\max} \right] \geq \alpha_u \Leftrightarrow \Pr \left[ ; \tilde{P}_t^{\text{PV}} \leq A_t^{-1}(P^{\max} - B_t) \right] \geq \alpha_u \Leftrightarrow A_t^{-1}(P^{\max} - B_t) \geq (f_t^{\text{PV}})^{-1}(\alpha_u), \end{cases} \quad (14)$$

公式中: $P^{\max}$ 为各条支路有功潮流上限组成的列向量; $P^{\min}$ 为下限组成的列向量.

同理,各节点电压与光伏发电功率也可表示成如下仿射关系

$$\tilde{U}_t = \begin{bmatrix} \tilde{U}_{2,t} \\ \cdots \\ \tilde{U}_{N,t} \end{bmatrix} = M_t \begin{bmatrix} \tilde{P}_{2,t}^{\text{PV}} \\ \cdots \\ \tilde{P}_{N,t}^{\text{PV}} \end{bmatrix} + N_t = M_t \tilde{P}_t^{\text{PV}} + N_t, \quad (15)$$

公式中: $M_t$ 为与线路阻抗有关的常数矩阵,其逆矩阵为 $M_t^{-1}$ ; $N_t$ 为与各节点设备运行功率、负荷有关的确定性变量; $\tilde{U}_t$ 为各个节点(不包括始节点)电压组成的列向量.故模型中所有机会约束均可按照公式(14)所示方法进行确定性转化.至此,所提配电网分布式光伏承载能力分析模型中的机会约束已全部转换为确定性约束,可直接采用现有优化方法进行求解.

## 2 分布式光伏发电功率不确定性分析与建模

如前所述,受日照、风速、气温等气象因素的影响,分布式光伏等可再生能源发电功率随机性强,难以准确预测<sup>[21-22]</sup>,因此需要对分布式光伏发电功率不确定性进行刻画.本文基于光伏发电系统一年的历史运行数据,对每一小时内的发电功率数据进行统计分析,得到对应时段分布式光伏发电功率的PDF.多数研究采用典型单峰分布(如正态分布、Gamma分布等)对光伏出力的不确定性进行刻画.但研究表明光伏出力具有非对称、多峰值的特点,以上分布并不具备表示多峰分布的能力<sup>[23]</sup>,因此不可避免地引入由模型缺陷所导致的统计误差.而高斯混合模型,作为一种有效描述概率分布的非参数模型,通过多个相互独立的高斯分布的叠加,能够拟合任意形式的概率分布<sup>[24]</sup>.因此本文基于高斯混合模型建立分布式光伏发电功率的非参数概率模型,以量化其不确定性.

### 2.1 高斯混合模型

针对任意随机变量 $x$ ,其高斯混合概率密度函数 $f_{\text{GMM}}(x)$ 可表示为

$$f_{\text{GMM}}(x) = \sum_{i=1}^n \omega_i f_N(x; \mu_i, \sigma_i^2), \quad (16)$$

公式中: $n$ 为高斯分量的个数; $\omega_i$ 为第 $i$ 个高斯分量的权重; $\mu_i$ 为均值; $\sigma_i^2$ 为标准差; $f_N(x; \mu_i, \sigma_i^2)$ 为第 $i$ 个高斯分量.

公式(15)中: $\{\omega_i, \mu_i, \sigma_i\}_{i=1}^n$ 为待估计参数,一般通过最大期望算法<sup>[25]</sup>(Expectation Maximization, EM)进行迭代估计.理论上高斯混合模型能够拟合逼近任意随机变量的PDF.EM迭代主要步骤为:E-step依据当前参数值计算数据来自各个高斯分量的概率,M-step在E-step所得结果的基础上,根据参数估计问题的最大似然法,计算待求参数的估计值,重复两步迭代直至待求参数结果收敛,得到高斯混合模型参数的最大似然解.

在应用EM算法估计高斯混合模型参数时,需预先给定高斯分量的个数 $n$ ,再根据实际拟合效果进

一步调整.一般  $n$  越大,对目标概率分布的拟合精度越高,但同时也会增加模型的复杂度,带来过拟合的风险<sup>[26]</sup>.可以引入 Akaike 信息准则(Akaike Information Criterion, AIC)和 Bayesian 信息准则(Bayesian Information Criterion, BIC)辅助确定合适的高斯分量个数.在实际应用中,可给定不同高斯分量的个数,并构造相应的 GMM 模型,若 AIC 和 BIC 值越小,则模型拟合效果越优<sup>[20]</sup>.

## 2.2 求解 CDF 分位点

如前所述,所提配电网分布式光伏承载能力计算模型中机会约束转化需要利用一定置信度下的分位点,而在高斯混合形式下,难以直接获得对应置信水平下的分位点,这给承载能力计算模型的转化和求解带来巨大困难.在本文中,通过选择适当阶数的多项式对前文基于高斯混合模型生成的光伏发电功率 CDF 曲线进行多项式拟合<sup>[20]</sup>,得到 CDF 的近似解析表达式.并通过求解对应多项式的根,方便快速地获得给定置信水平下的近似分位点,求解过程如下

$$f_{k,t}^{\text{PV}}(x) = \int_{-\infty}^x f_{k,t}^{\text{PV}}(w) dw \approx \text{poly}_{k,t}^{\text{PV}}(x) q_\alpha = (f_{k,t}^{\text{PV}})^{-1}(\alpha) \approx (\text{poly}_{k,t}^{\text{PV}})^{-1}(\alpha), \quad (17)$$

公式中: $\alpha$  为置信水平; $q_\alpha$  为给定置信水平下的分位点.

## 3 配电网分布式光伏承载能力计算流程

所提配电网分布式光伏承载能力分析计算框架如图 1 所示,主要由以下三步骤构成:

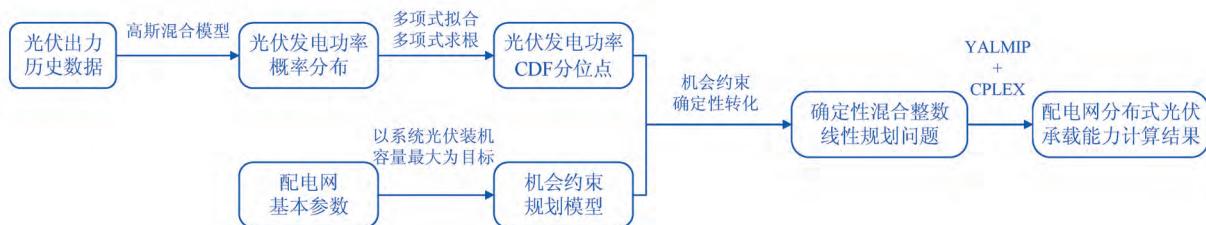


图 1 配电网分布式光伏承载能力分析框架

(1) 对光伏出力历史数据进行统计分析,并基于高斯混合模型建立各个时间段内光伏发电功率的非参数概率分布,包括 PDF 和 CDF 曲线;

(2) 对(1)中得到的 CDF 曲线进行多项式拟合,用多项式的解析表达式来近似 CDF 的解析表达式.通过求解多项式的根,获得给定置信水平下 CDF 的分位点;

(3) 根据配电网网络拓扑结构和元件基本参数等,以系统光伏装机容量最大为目标建立机会约束规划模型,并利用(2)中得到的分位点将机会约束转化为确定性约束,最后通过商业求解器 CPLEX 进行求解.

## 4 算例分析

### 4.1 测试系统配置

为验证所提方法的有效性,在修改后的 15 节点测试系统上进行了仿真分析和计算.15 节点测试系统<sup>[27]</sup>如图 2 所示,其中 1 节点与上层电网相连,不接入任何发用电设备;2 节点接入一个容量为 4 000 kW

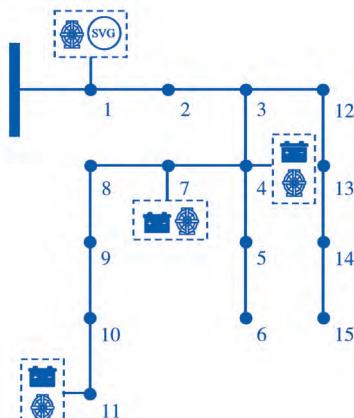


图 2 15 节点测试系统图

的 DG 和一个容量为 2 500 kVar 的 SVG;4 节点、7 节点和 11 节点依次接入容量为 100 kWh、300 kWh 和 600 kWh 的储能设备和容量为 1 200 kW、1 000 kW 和 2 500 kW 的 DG. 其他具体数据可参考文献[28,29].

#### 4.2 分布式光伏出力不确定性量化结果分析

将一年的光伏出力数据分为夏季(6月、7月、8月)、冬季(1月、2月、12月)和过渡季(3月、4月、5月、9月、10月、11月)三个典型季节,对每个季节的数据划分至 24 个时间段(1 小时为 1 个时间段)内,并归一化到区间 [0,1] 后,用高斯混合模型拟合每一时间段光伏发电功率概率分布. 三个季节 13:00–14:00 光伏发电功率的 PDF 和 CDF 曲线如图 3 所示,同时使用高斯模型进行对比.

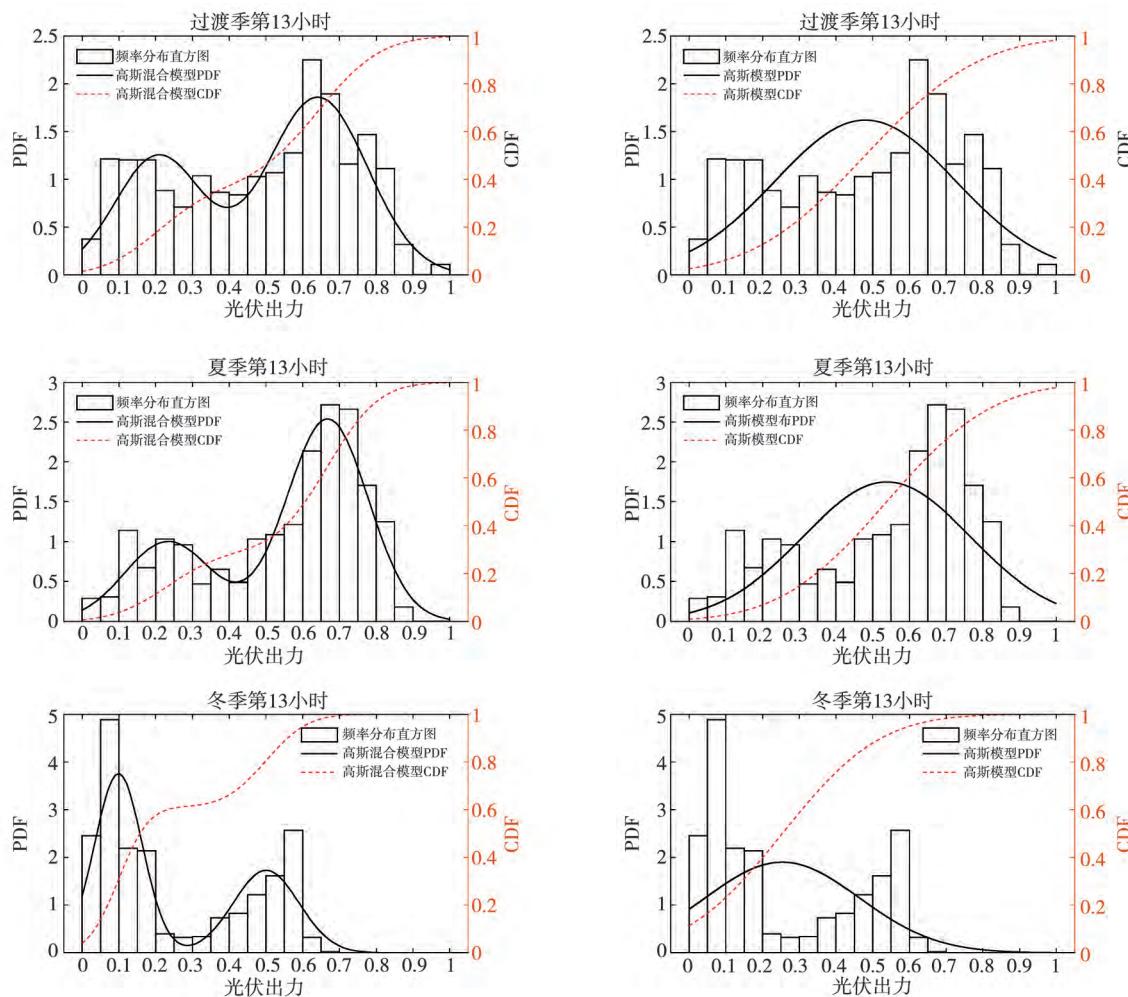


图 3 过渡季、夏季和冬季 13:00–14:00 光伏发电功率概率分布

可直观看出,光伏出力的季节性较强: 夏季出力多, 数据集中在 [0.5, 1], 冬季出力少, 数据集中在 [0, 0.5]. 且无论在哪个季节, 分布式光伏出力概率分布均呈现双峰性. 过渡季光伏出力数据更为分散, 不如夏季、冬季集中. 因此相比夏、冬, 过渡季节光伏出力波动性更强. 高斯混合模型准确刻画了分布式光伏出力概率特性, 而高斯模型的拟合结果则存在较大误差, 不能反映数据的真实分布情况. 例如, 在对夏季数据的拟合中, 使用高斯混合模型得到的 AIC 值为 -584.786 6, BIC 值为 -559.753 1, 而使用高斯模型得到的 AIC 值为 -147.127 8, BIC 值为 -137.114 4, 说明高斯混合模型准确性更高.

本文选取 7 阶多项式对得到的 CDF 曲线进行多项式拟合, 以方便求解对应置信水平下的分位点. 设置信水平为  $\alpha_l=0.05, 0.10, 0.15$  和  $\alpha_u=0.85, 0.90, 0.95$ , 分别令  $poly_{k,l}^{PV}(x)=\alpha_u$  和  $poly_{k,l}^{PV}(x)=\alpha_l$ , 求得多项式在 [0,1] 区间内的有理数解, 即为该置信水平下 CDF 的分位点. 以夏季为例, 不同置信水平下, 利用所提方法计算得到的 CDF 分位点如表 1 所示. 根据三个典型季节在不同置信度下的 CDF 分位点, 可将线

路潮流和节点电压的机会约束转化为确定性约束,以进行后续模型求解.

表 1 不同置信度下 CDF 分位点

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$\alpha_l = 0.05$	0	0	0	0	0	0	0	0.0208	0.0497	0.0901	0.0756	0.1063
$\alpha_l = 0.10$	0	0	0	0	0	0.0076	0.0588	0.0976	0.1361	0.1703	0.1766	
$\alpha_l = 0.15$	0	0	0	0	0	0.0159	0.0825	0.1434	0.1807	0.2209	0.2272	
$\alpha_u = 0.85$	0	0	0	0	0.0494	0.1503	0.3306	0.4809	0.6616	0.7437	0.7773	
$\alpha_u = 0.90$	0	0	0	0	0.0601	0.1674	0.3602	0.5152	0.6901	0.7690	0.8047	
$\alpha_u = 0.95$	0	0	0	0	0.0747	0.1895	0.4007	0.5855	0.7251	0.8016	0.8448	
	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
$\alpha_l = 0.05$	0.1223	0.1099	0.0915	0.0621	0.0363	0.0010	0	0	0	0	0	0
$\alpha_l = 0.10$	0.1792	0.1677	0.1249	0.1009	0.0738	0.0140	0	0	0	0	0	0
$\alpha_l = 0.15$	0.2298	0.2159	0.1605	0.1373	0.0969	0.0248	0	0	0	0	0	0
$\alpha_u = 0.85$	0.7585	0.7292	0.6352	0.5123	0.3317	0.1654	0	0	0	0	0	0
$\alpha_u = 0.90$	0.7848	0.7540	0.6621	0.5389	0.3585	0.1824	0	0	0	0	0	0
$\alpha_u = 0.95$	0.8190	0.7842	0.6949	0.5703	0.3944	0.2042	0	0	0	0	0	0

### 4.3 配电网分布式光伏承载能力计算结果分析

在本节中,利用所提方法对测试系统分布式光伏承载能力进行了计算和分析.为说明所提方法的有效性,分别基于高斯模型和高斯混合模型的不确定性量化结果进行承载能力计算,计算结果如表 2 所示,其中置信水平分别设置为  $\alpha_l = 0.10$  和  $\alpha_u = 0.90$ .可以看出,不确定性量化的准确性对承载能力计算结果有着显著影响.虽然在夏季和过渡季,基于高斯模型所获得的承载能力计算结果更高,但由于高斯模型对分布式光伏出力概率分布特性刻画不够准确,导致计算结果可信度不高.因此,选择合适的模型来描述光伏发电功率概率特征,是提高分布式光伏承载能力计算结果可信度的一个关键因素.

表 2 基于高斯模型和高斯混合模型计算所得承载能力

分布式光伏承载能力/kW	夏季		冬季		过渡季	
	高斯模型	高斯混合模型	高斯模型	高斯混合模型	高斯模型	高斯混合模型
8 841.3	8 231.1	8 853.8	9 525.5	9 525.5	8 389.3	7 886.4

不同置信水平下,基于高斯混合模型不确定性量化结果计算所得的系统各个季节分布式光伏承载能力如图 4 所示.从结果可以明显看出,系统的分布式光伏承载能力与季节相关性较强,冬季系统承载能力最强,夏季次之,过渡季最弱,这与光伏出力的季节性密切相关.由于过渡季的光伏发电功率相比夏、冬波动性更强,有着更大的不确定性,对系统运行安全威胁更大,导致系统分布式光伏承载能力明显减弱.出于系统运行安全性的考虑,宜将过渡季承载能力计算结果作为系统最大承载能力.此外,随着置信水平的下降,计算所得的承载能力逐渐上升.但对于分布式光伏接入下的配电网运行,置信水平越低,线路潮流和节点电压越限的风险越大.因此,需要通过合理设置置信水平以获得较高的承载能力同时保证系统运行安全性.

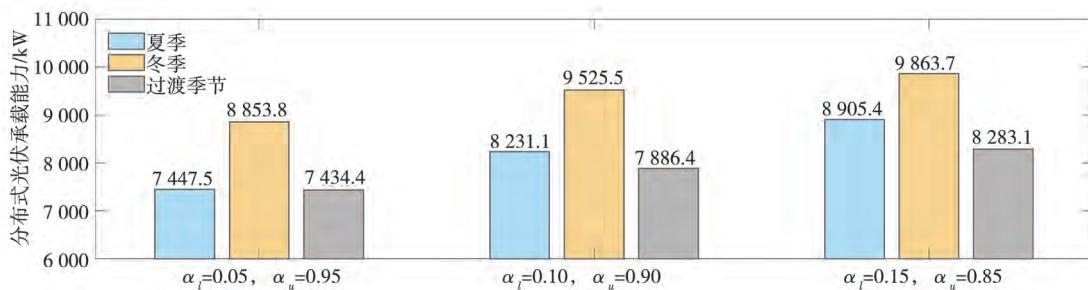


图 4 不同置信水平下,系统各季节分布式光伏承载能力计算结果

为了进一步分析和研究配电网分布式光伏承载能力的主要影响因素,本文针对不同负荷水平、不同储能安装容量下的系统分布式光伏承载能力分别进行了计算和分析。

分布式光伏承载能力与系统整体负荷水平间的关系如图5所示,在一定范围内,承载能力随负荷水平的增大而提高,但当负荷水平超过100%后,系统的分布式光伏承载能力基本不再变化。造成这种现象的主要原因是,负荷水平较低时,系统线路潮流和节点电压安全裕度较高,负荷水平越高,则新接入的分布式光伏发电功率可由负荷增长部分消纳,系统分布式光伏承载能力相应提高。随着负荷水平的进一步提高,线路潮流和节点电压逐渐接近限值,当负荷水平超过100%后,系统的安全裕度持续降低,此时制约系统分布式光伏承载能力的主要因素成为网络拓扑结构和基本参数。86%和110%负荷水平下,各支路有功功率和各节点电压如图6所示,可以看出110%负荷水平下系统潮流和电压分布更加不均衡,安全裕度明显减小,这印证了上述分析的正确性。在高负荷水平下,可通过网络重构等措施来均衡潮流和电压分布以提升系统分布式光伏承载能力。

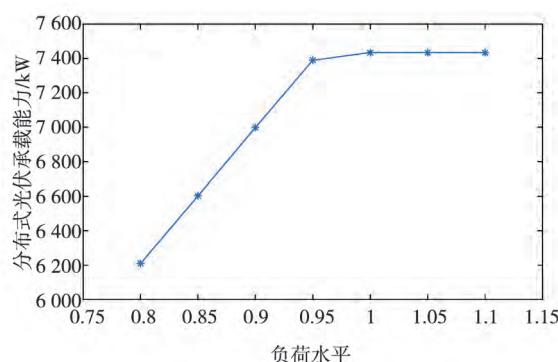


图5 系统分布式光伏承载能力随负荷水平的变化趋势

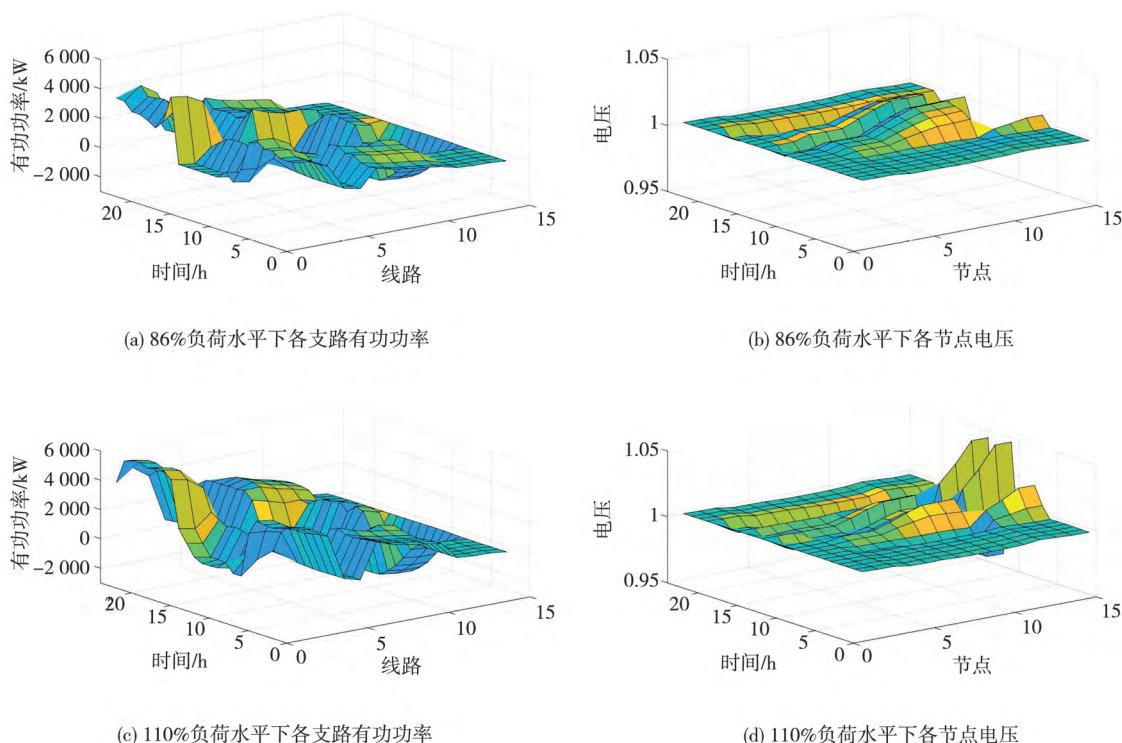


图6 86%和110%负荷水平下系统有功潮流和电压分布情况

不同负荷水平下,分布式光伏承载能力与系统储能安装容量间的关系如图7、图8所示。

(1)改变某一节点接入储能的容量。图7展示了在4节点接入100 kW~1 000 kW储能时,系统分布式光伏承载能力的变化情况。结果表明,负荷水平较低时,储能容量与承载能力有着明显的正相关关系。随着负荷水平进一步上升,储能容量的改变仅能在较小范围内影响承载能力。95%负荷水平时,储能容

量增至 260 kW 后,承载能力基本不再变化.

(2) 增加接入储能的节点个数.86% 负荷水平下,在 1 节点、4 节点、7 节点、11 节点以外的各节点依次接入 600 kWh 的储能(同 11 节点接入的储能),系统的分布式光伏承载能力均由初始的 6 682.5 kW 增加到 6 845.3 kW,增幅 2.44%. 提高负荷水平,88% 负荷水平下,承载能力由初始的 6 840.1 kW 增加到 7 003.1 kW,增幅 2.38%; 90% 负荷水平下,承载能力由初始的 6 997.8 kW 增加到 7 160.9 kW,增幅 2.33%. 图 8 展示了给定负荷水平下,在 1 节点、4 节点、7 节点、11 节点以外再随机选取不同节点个数接入 600 kWh 的储能(同 11 节点接入的储能)对系统分布式光伏承载能力的影响. 不同负荷水平下,分布式光伏承载能力均随着接入储能节点个数的增多有所上升,但是负荷水平越低,上升效果越明显; 86% 负荷水平下,接入储能的节点数增加到 5 时,承载能力不再变化,而 90% 负荷水平下,节点数增加到 3, 承载能力就已不再变化.

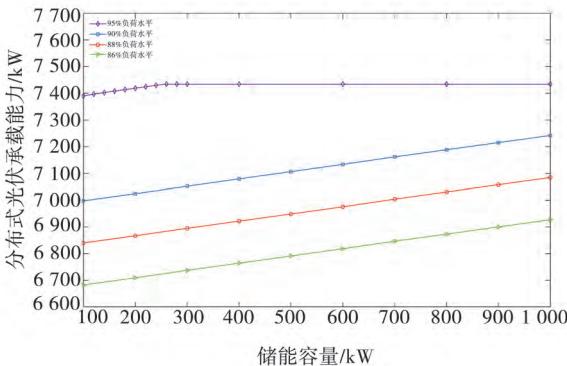


图 7 不同负荷水平下承载能力与储能容量的关系

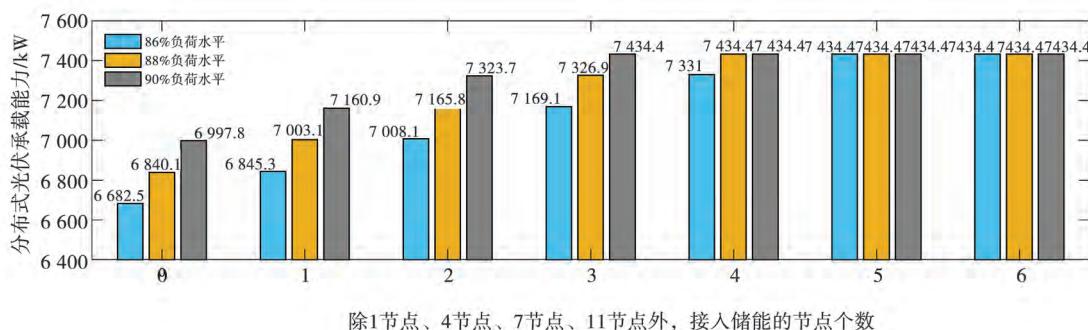


图 8 不同负荷水平下系统分布式光伏承载能力与接入储能节点个数的关系

造成以上现象的主要原因是,低负荷水平时,充电状态的储能相当于负荷,无论是增加某一节点接入储能的容量,还是增加接入储能的节点个数,均相当于提高了负荷水平,对承载能力的提升有较大帮助. 当负荷水平接近 100% 时,由前述分析可知,负荷变化对承载能力的改变影响很小,因而此时增大系统的储能容量带来的效果同样微小.

## 5 结 论

本文提出了基于机会约束规划的配电网分布式光伏承载能力评估方法. 基于分布式光伏出力历史数据,采用高斯混合模型对不同季节下分布式光伏出力不确定性进行了准确量化. 建立了考虑不确定性的配电网分布式光伏承载能力机会约束规划模型,通过推导分布式光伏发电功率与配电网线路潮流和节点电压间的仿射关系,并结合不确定性量化结果对模型中机会约束进行了确定性转化,实现了模型高效求解. 在一个改进的测试系统上进行了仿真分析,验证了所提方法的有效性,并进一步分析了系统负荷水平和储能安装容量对分布式光伏承载能力的影响. 本文所提方法考虑了分布式光伏出力的不确定性和配网运行多重约束,为配电网分布式光伏开发利用提供了关键参考信息.

## 参 考 文 献

- [1] 徐潇源,王晗,严正,等.能源转型背景下电力系统不确定性及应对方法综述[J].电力系统自动化,2021,45(16):2-13.
- [2] 姚良忠,朱凌志,周明,等.高比例可再生能源电力系统的协同优化运行技术展望[J].电力系统自动化,2017,41(9):36-43.
- [3] 万灿,宋永华.新能源电力系统概率预测理论与方法及其应用[J].电力系统自动化,2021,45(1):2-16.
- [4] C.Zhao,C.Wan,Y.Song.Cost-oriented prediction intervals:On bridging the gap between forecasting and decision[J].IEEE Transactions on Power Systems,2022,37(4):3048-3062.
- [5] 曹永吉,张恒旭,施啸寒,等.规模化分布式能源参与大电网安全稳定控制的机制初探[J].电力系统自动化,2021,45(18):1-8.
- [6] 谢小荣,贺静波,毛航银,等.“双高”电力系统稳定性的新问题及分类探讨[J].中国电机工程学报,2021,41(2):461-475.
- [7] S.Wang,Y.Dong,L.Wu.Interval overvoltage risk based pv hosting capacity evaluation considering pv and load uncertainties[J/OL].IEEE Transactions on Smart Grid,2020,11(3):2709-2721.
- [8] 程浩忠,李隽,吴耀武,等.考虑高比例可再生能源的交直流输电网规划挑战与展望[J].电力系统自动化,2017,41(9):19-27.
- [9] A.Dubey,S.Santoso.On estimation and sensitivity analysis of distribution circuit's photovoltaic hosting capacity[J].IEEE Transactions on Power Systems,2017,32(4):2779-2789.
- [10] 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.
- [11] 薛蕾,井天军,陈义,等.配电网光伏消纳能力定界模拟与消纳方案综合择优[J].电网技术,2020,44(3):907-916.
- [12] 马红明,刘林青,谢海鹏,等.计及综合需求响应的电-热综合能源系统分布式光伏最大接入容量评估[J].智慧电力,2021,49(8):23-30.
- [13] 刘敦楠,李奇,秦丽娟,等.电网多时间尺度接纳可再生能源能力评估指标体系[J].电力建设,2017,38(7):44-50.
- [14] 梁志峰,夏俊荣,孙稼稼,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.
- [15] M.J.Chihota,B.Bekker,T.Gaunt.A stochastic analytic-probabilistic approach to distributed generation hosting capacity evaluation of active feeders[J].International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2022,136:107598.
- [16] 方一晨,张沈习,程浩忠,等.含智能软开关的主动配电网分布式光伏准入容量鲁棒优化[J].电力系统自动化,2021,45(7):8-17.
- [17] M.Alturki,A.Khodaei,A.Paaso.Optimization-based distribution grid hosting capacity calculations[J].Applied Energy,2018,219:350-360.
- [18] P.Yu,C.Wan,Y.Song.Distributed control of multi-energy storage systems for voltage regulation in distribution networks:a back-and-forth communication framework[J].IEEE Transactions on Smart Grid,2020,12(3):1964-1977.
- [19] H.Akhavan-Hejazi,H.Mohsenian-Rad.Energy storage planning in active distribution grids:A chance-constrained optimization with non-parametric probability functions[J].IEEE Transactions on Smart Grid,2018,9(3):1972-1985.
- [20] 陈金富,孙鑫,段献忠,等.基于机会约束规划的含风电场电力系统可用输电能力计算[J].中国电机工程学报,2019,39(23):6804-6814,7094.
- [21] 万灿,崔文康,宋永华.新能源电力系统概率预测:基本概念与数学原理[J].中国电机工程学报,2021,41(19):6493-6509.
- [22] M.Aien,A.Hajebrahimi,M.Fotuhi-Firuzabad.A comprehensive review on uncertainty modeling techniques in power system studies[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews,2016,57:1077-1089.
- [23] 崔杨,杨海威,李鸿博.基于高斯混合模型的风电场群功率波动概率密度分布函数研究[J].电网技术,2016,40(4):1107-1112.
- [24] 李昀熠,万灿,李彪,等.新能源配电系统非参数概率最优潮流解析方法[J/OL].中国电机工程学报:1-11[2023-01-05].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.Tm.20220523.1114.005.html>.
- [25] C.Biemacki,G.Celeux,G.Govaert.Choosing starting values for the EM algorithm for getting the highest likelihood in multivariate Gaussian mixture models[J].Computational Statistics & Data Analysis,2003,41(3/4):561-575.
- [26] D.Kim,B.Seo.Assessment of the number of components in Gaussian mixture models in the presence of multiple local maximizers[J].Journal of Multivariate Analysis,2014,125:100-120.
- [27] A.Gopi,P.A.-D.-V.Raj.Distributed generation for line loss reduction in radial distribution system[C]//2012 International Conference on Emerging Trends in Electrical Engineering and Energy Management (iceteeem - 2012).New York:Ieee,2012;29-32[2022-12-14].
- [28] M.S.S.Abad,J.Ma,D.Zhang.Probabilistic assessment of hosting capacity in radial distribution systems[J].IEEE Transactions on Sustainable Energy,2018,9(4):1935-1947.
- [29] 武梦景,万灿,宋永华,等.含多能微网群的区域电热综合能源系统分层自治优化调度[J].电力系统自动化,2021,45(12):20-29.

## Chance-constrained Optimization-based Distributed Photovoltaic Hosting Capacity Assessment of Distribution Networks

DING Qixin<sup>1,2</sup>, QIN Hongpei<sup>1</sup>, WAN Can<sup>1</sup>, PENG Yan<sup>3</sup>, LI Yunyi<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310027; 2. Polytechnic Institute, Zhejiang University, Hangzhou Zhejiang 310015; 3. State Grid Zhejiang Electric Power Research Institute, Hangzhou Zhejiang 310014)

**Abstract:** The intermittency and uncertainty of rapidly developed distributed PV (DPV) pose great threats to the safe operation of distribution networks, so it is urgent to quantify DPV hosting capacity of the distribution network to facilitate the reasonable and scientific development of DPV. In this regard, considering the uncertainty of PV generation, a chance-constrained DPV hosting capacity assess method for distribution networks is proposed. Firstly, the Gaussian mixture model is adopted to model and characterize the probability distribution of DPV generation based on the yearly historical data. Secondly, considering the power flow constraints, voltage constraints and equipment operating constraints and treating the DPV generation as random variables, a chance-constrained optimization-based distribution network DPV hosting capacity assess model is established. Then, by deriving the affine relationships between DPV generation and state variables such as power flows and node voltages, the chance-constrained terms are converted into deterministic counterparts based on the obtained quantiles at a given confidence level. Finally, case studies on a modified test system verify the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** Hosting capacity assessment; Distribution network; Distributed photovoltaic; Uncertainty; Chance constrained programming; Guassian mixture model