

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200909

考虑机会约束的配电网光伏并网容量分布鲁棒优化方法

于腾凯¹, 董靓媛¹, 杜晓东¹, 柳永超²

(1. 国网河北省电力有限公司电力科学研究院, 河北 石家庄 050021;

2. 上海科梁信息工程股份有限公司, 上海 200233)

摘要: 传统的经验性概率分布描述分布式光伏出力的不确定性难以准确获取概率分布参数。为此, 提出一种基于 Kullback-Leibler 散度的分布鲁棒优化方法来评估配电网分布式光伏的最大并网容量。首先, 通过 Kullback-Leibler 散度来量化实际概率分布与经验性概率分布之间距离, 建立分布式光伏出力不确定性的模糊集。在考虑节点电压和传输容量越限机会约束的情况下, 建立了分布式光伏并网容量分布鲁棒优化模型。通过采用风险价值和样本平均近似方法将分布鲁棒优化模型转化为一个混合整数规划问题求解。在改进的 IEEE-33 节点系统的仿真结果表明了所提出分布鲁棒优化方法的有效性和鲁棒性。

关键词: 光伏并网容量; 配电网; 机会约束; Kullback-Leibler 散度; 分布鲁棒优化

Distributionally robust optimization method of PV grid-connected capacity in a distribution network considering chance constraints

YU Teng kai¹, DONG Liang yuan¹, DU Xiao dong¹, LIU Yong chao²

(1. State Grid Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China;

2. Shanghai Kelian Information Engineering Company, Shanghai 200233, China)

Abstract: The traditional empirical probability distribution is used to describe the uncertainty of distributed PV output but it is difficult to accurately obtain the probability distribution parameters. Therefore, this paper proposes a distributionally robust optimization method based on Kullback-Leibler divergence to evaluate the maximum grid-connected capacity of distributed PV in a distribution network. First, the distance between the actual probability distribution and the empirical probability distribution is quantified by Kullback-Leibler divergence, and the fuzzy set of distributed PV output uncertainty is established. Considering the nodal voltage and transmission capacity over limits chance constraints, a distributionally robust optimization model of distributed PV grid-connected capacity is established. This model is transformed into a mixed integer programming problem using value at risk and a sample average approximation method. The effectiveness and robustness of the method are demonstrated by simulation results on a modified IEEE-33 bus system.

This work is supported by the Science and Technology Plan Projects of Hebei Province (No. 19212102D) and the Science and Technology Project of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. (No. kj2020-049).

Key words: PV grid-connected capacity; distribution network; chance constraints; Kullback-Leibler divergence; distributionally robust optimization

0 引言

分布式光伏发电具有灵活性大、投资低、建设周期短、占地面积小等优点, 十分符合国家可持续

发展的战略需求^[1]。随着分布式光伏发电技术的日益成熟和多层级市场奖励机制, 分布式光伏发电项目的规划与建设快速推进, 大量的分布式光伏电站直接并入配电网。分布式光伏发电不同于传统电源, 其出力具有随机性和波动性, 稳定性差, 容易受季节、天气等多方面因素的影响, 无法将其当作稳定电源来完全接纳^[2-3]。因此, 配电网对分布式光伏的

基金项目: 河北省重点研发计划项目资助(19212102D); 国网河北省电力有限公司科技项目资助(kj2020-049)

接纳能力,即分布式光伏极限并网容量需要进行准确评估和分析,这对促进分布式光伏安全、经济消纳具有十分重要的作用。

目前国内外对分布式光伏并网容量评估方法的研究主要分为基于多次仿真校验的模拟法^[4-5]和基于数学规划的优化法^[6-7]。基于多次仿真校验的模拟法通过仿真软件^[8]对分布式光伏接入后配电网的运行状态进行模拟,并对安全约束进行逐一校验,因而该方法实施简单,但耗时大。基于数学规划的优化法是以分布式光伏并网容量最大化为目标,以配电网的各种安全约束、潮流方程约束等为约束条件^[9],并采用不同的数学规划方法求解。该方法的优点是建立的分布式光伏并网容量优化模型准确,优化结果可靠,但不同的约束条件下产生不同的结果,因此,需要精确建立优化模型。

传统的确定性分布光伏并网容量优化模型并未考虑分布式光伏出力的波动性,难以适用于分布式光伏并网容量评估。为此,随机规划模型^[10]、鲁棒规划模型^[11-12]、机会约束规划模型^[13-14]分别被引入到分布式光伏并网容量评估。文献[10]中的分布式光伏并网容量随机规模需要建立光伏出力的概率模型,这对于实际的光伏出力建模精度要求较高。而文献[11-12]中的分布式光伏并网容量鲁棒规模则不需要建立精确的概率模型,而仅需要获取光伏出力的区间集合,但鲁棒规划结果较为保守,不利于最大化消纳分布式光伏。机会约束规划模型是指允许分布式光伏并网容量不满足配电网的某些不等式约束条件,但是必须使得满足配电网约束条件的概率不低于事先设定的置信水平。文献[13]以电网电压指标合格率为约束,建立以光伏电站并网容量最大化为目标的机会约束规划模型,并采用遗传算法和蒙特卡罗模拟的混合算法求解;文献[14]以电压不越限为机会约束,建立基于电压偏差机会约束的光伏并网极限容量优化模型,并采用改进的随机权重粒子群算法求解;文献[15]以系统网损最小化为目标,电压偏差为机会约束,对光伏发电最优接入容量进行规划。分布式光伏并网容量的机会约束规划模型虽然比较接近实际,但仍然需要对分布式光伏出力或者预测误差进行精确概率描述^[16],因此文献[13-15]中均对分布式光伏出力概率模型进行了经验性的假设。

为此,本文建立基于 Kullback-Leibler 散度的配电网光伏并网容量分布鲁棒规划模型^[17],通过 Kullback-Leibler 散度来量化分布式光伏出力精确概率模型与经验性概率模型的距离,克服了经验性概率分布模型的不足,并考虑了配电网支路传输功

率机会约束、节点电压偏差机会约束等约束条件,采用样本平均近似法^[18]求解。通过改进的 IEEE-33 节点系统仿真结果表明本文所提出的分布式光伏并网容量分布鲁棒规划模型的有效性。

1 分布式光伏并网容量优化模型

分布式光伏并网容量优化模型是考虑配电网中各种运行约束而所能接纳的分布式光伏并网最大容量,因此,其目标函数是最大化配电网中所有接入分布光伏电站的容量之和,可采用式(1)描述。

$$\text{Obj} \max_{S_i \geq 0} \sum_{i \in \Psi_{PV}} S_i \quad (1)$$

式中: S_i 为节点 i 处的分布式光伏并网容量; Ψ_{PV} 为分布式光伏电站接入点集合。

配电网中的各种约束条件如下。

1) 分布式光伏输出功率约束

$$\begin{cases} P_{i,t}^{PV} = \bar{\omega}_{i,t} S_i \\ Q_{i,t}^{PV} = \tan \varphi_{i,t} P_{i,t}^{PV} \\ \forall i \in \Psi_{PV}, t \in T \end{cases} \quad (2)$$

式中: $P_{i,t}^{PV}$ 、 $Q_{i,t}^{PV}$ 分别为节点 i 在 t 时刻分布式光伏实际输出有功、无功功率; $\bar{\omega}_{i,t} \in [0,1]$ 为节点 i 在 t 时段分布式光伏功率转换系数; $\tan \varphi_{i,t}$ 为节点 i 在 t 时段分布式光伏的功率因数。

2) 节点功率平衡约束

$$\begin{cases} P_{i,t}^{PV} - \bar{P}_{i,t}^L = \sum_{j \in i} p_{ij,t} \\ Q_{i,t}^{PV} - \bar{Q}_{i,t}^L = \sum_{j \in i} q_{ij,t} \\ \forall i \in \Psi_n, t \in T \end{cases} \quad (3)$$

式中: $\bar{P}_{i,t}^L$ 、 $\bar{Q}_{i,t}^L$ 为节点 i 在 t 时刻负荷实际有功、无功需求; $p_{ij,t}$ 、 $q_{ij,t}$ 分别表示支路 ij 在 t 时刻从节点 i 流向节点 j 的有功、无功功率; Ψ_n 为配电网节点集合。

3) 潮流方程约束

$$\begin{cases} U_{i,t} = (V_{i,t})^2, \forall i \in \Psi_n, t \in T \\ U_{i,t} - U_{j,t} = 2(r_{ij} p_{ij,t} + x_{ij} q_{ij,t}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) \frac{p_{ij,t}^2 + q_{ij,t}^2}{U_{i,t}} \\ \forall (ij) \in \Psi_b, t \in T \end{cases} \quad (4)$$

式中: $V_{i,t}$ 为节点 i 在 t 时刻的电压幅值; Ψ_b 为配电网中所有支路集合; r_{ij} 和 x_{ij} 分别为支路 ij 的电阻和电抗值。

由于二次项网损的计算, 潮流方程约束(4)是一个非凸约束, 忽略掉相对来说较小的网损, 线性化潮流方程约束为

$$\begin{cases} U_{i,t} = (V_{i,t})^2, \forall i \in \Psi_n, t \in T \\ U_{i,t} - U_{j,t} = 2(r_{ij}p_{ij,t} + x_{ij}q_{ij,t}) \\ \forall (ij) \in \Psi_b, t \in T \end{cases} \quad (5)$$

1) 电压参考值约束

$$U_{i,t} = U_{\text{ref}}, \forall i \in \Psi_{\text{sub}}, t \in T \quad (6)$$

式中, Ψ_{sub} 为配电网中变电站母线节点的集合, 其节点电压幅值为给定参考值。

2) 支路传输容量约束

$$\begin{cases} p_{ij,t}^2 + q_{ij,t}^2 \leq s_{ij,\text{max}}^2 \\ \forall (ij) \in \Psi_b, t \in T \end{cases} \quad (7)$$

式(7)是一个二次循环约束, 它需要线性化以便于后面分布鲁棒优化模型的推导。这里采用文献[16]中的二次约束线性化方法, 可以使用两个平方约束替代圆形约束, 如图 1 所示, 可用式(8)描述。

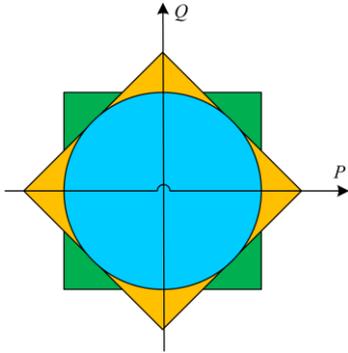


图 1 支路传输容量约束线性化示意图

Fig. 1 Linearization of branch transmission capacity constraints

$$\begin{cases} -s_{ij,\text{max}} \leq p_{ij,t} \leq s_{ij,\text{max}} \\ -s_{ij,\text{max}} \leq q_{ij,t} \leq s_{ij,\text{max}} \\ -\sqrt{2}s_{ij,\text{max}} \leq p_{ij,t} + q_{ij,t} \leq \sqrt{2}s_{ij,\text{max}} \\ -\sqrt{2}s_{ij,\text{max}} \leq p_{ij,t} - q_{ij,t} \leq \sqrt{2}s_{ij,\text{max}} \\ \forall (ij) \in \Psi_b, t \in T \end{cases} \quad (8)$$

3) 节点电压约束

$$\begin{cases} U_{i,\text{min}} \leq U_{i,t} \leq U_{i,\text{max}} \\ \forall (i) \in \Psi_n, t \in T \end{cases} \quad (9)$$

式中, $U_{i,\text{max}}$ 、 $U_{i,\text{min}}$ 分别为节点电压幅值的上下界。

因此, 确定性的分布式光伏并网容量优化模型以式(1)为优化目标, 式(2)、式(3)、式(5)、式(6)、式(8)、式(9)为约束条件, 这是一个典型的线性规划

模型。由于分布式光伏出力和负荷需求的不确定性, 需要在确定性的分布式光伏并网容量优化模型基础上, 建立不确定性分布式光伏并网容量优化模型。

2 配电网光伏并网容量分布鲁棒优化方法

2.1 基于 Kullback-Leibler 散度的分布鲁棒优化方法

不确定性分布式光伏并网容量优化模型通常采用经验性概率分布模型来描述分布式光伏出力和负荷需求的不确定性, 通常假设分布式光伏出力服从贝塔分布, 负荷需求服从正态分布。然而对于实际数据不足的情况, 很难获取精确的概率分布系数, 这也是随机规划方法最大的不足之处。分布鲁棒优化 (Distributionally Robust Optimization, DRO)^[19-20] 是通过寻找不确定参数最恶劣概率分布下的决策方法, 其结合了随机优化和鲁棒优化的优点, 其结果在经济性和保守性方面表现出良好的性能。基于 Kullback-Leibler 散度^[17] 的分布鲁棒优化方法采用 Kullback-Leibler 散度来描述实际概率分布密度函数 f 与经验性概率分布密度函数 f_0 之间的距离 d_{KL} , 即为 Kullback-Leibler 散度, 可用下式描述:

$$d_{\text{KL}}(f \square f_0) = \int_{\square^K} \log \frac{f(\xi)}{f_0(\xi)} f(\xi) d\xi \quad (10)$$

式中: $\xi \in \square^K$ 是随机变量; d_{KL} 表示概率分布密度函数 f 与经验性概率分布密度函数 f_0 之间的 Kullback-Leibler 散度。因此, 可以通过 Kullback-Leibler 散度来定义与经验性分布的距离, 从而描述实际的精确概率分布, 即

$$D = \left\{ \square \mid d_{\text{KL}}(f \square f_0) \leq d_{\text{KL}}, f = \frac{d\square}{d\xi} \right\} \quad (11)$$

式中: \square 是实际概率分布密度函数 f 的累积分布函数; d_{KL} 表示 Kullback-Leibler 散度的容忍值。

考虑分布式光伏出力和负荷需求为随机输入变量 ξ , 将上述分布式光伏并网容量规划模型改写为如式(12)形式。

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{x}} h(\mathbf{x}) \\ & \text{st.} \begin{cases} \mathbf{g}(\mathbf{x}, \xi) = 0 \\ \mathbf{C}(\mathbf{x}, \xi) \leq 0 \end{cases} \end{aligned} \quad (12)$$

式中: \mathbf{x} 为决策变量; ξ 为分布式光伏出力和负荷需求的随机输入变量; \mathbf{g} 为线性等式约束条件(2)、(3)、(5)、(6); \mathbf{C} 为线性不等式约束条件(8)、(9)。随机输入变量 ξ 采用式(11)所描述的模糊集模型, 对于任意的 $\xi \in D$, 则 $\mathbf{C}(\mathbf{x}, \xi) \leq 0$, 当存在 ξ , $\mathbf{C}(\mathbf{x}, \xi) \leq 0$ 不成立时, 即不等式被破坏或者失效,

定义不等式约束条件 $C(\mathbf{x}, \xi) \leq 0$ 失效概率为

$$\Pr[C(\mathbf{x}, \xi) \leq 0] \geq 1 - \alpha \quad (13)$$

式中: $\Pr(A)$ 为事件 A 发生的概率; α 为不等式约束失效的概率。

通过调整 d_{KL} 参数可以改变实际概率分布密度函数的变化范围。因此, 不等式约束条件失效概率变成了一簇概率密度分布函数的失效概率评估, 从鲁棒优化的角度来分析, 即在所有可能的概率密度分布函数中, 最坏的情况下也要满足式(13), 即

$$\inf_{\square \in D} \Pr[C(\mathbf{x}, \xi) \leq 0] \geq 1 - \alpha \quad (14)$$

文献[18]中定理 1 给出了采用 Kullback-Leibler 散度来建立式(11)所示模糊集的等价转化公式, 分布鲁棒机会约束式(14)可以等价转化为传统的机会约束, 即为

$$\begin{cases} \Pr^0[C(\mathbf{x}, \xi) \leq 0] \geq 1 - \alpha_{1+} \\ \alpha_{1+} = \max\{\alpha_1, 0\} \\ \alpha_1 = 1 - \inf_{y \in (0,1)} \left\{ \frac{e^{-d_{\text{KL}} y^{1-\alpha}} - 1}{y - 1} \right\} \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中: $\Pr^0(A)$ 是事件 A 在经验性概率分布函数发生的概率; α_{1+} 为可靠性修正值。因此, 利用式(15), 在考虑分布式光伏出力和负荷输入随机不确定性的情况下, 分布式光伏并网容量规划(12)可等价转化为

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{x}} h(\mathbf{x}) \\ & \text{st.} \begin{cases} g(\mathbf{x}, \xi) = 0 \\ \Pr^0[C(\mathbf{x}, \xi) \leq 0] \geq 1 - \alpha_{1+} \\ \alpha_{1+} = \max\{\alpha_1, 0\} \\ \alpha_1 = 1 - \inf_{y \in (0,1)} \left\{ \frac{e^{-d_{\text{KL}} y^{1-\alpha}} - 1}{y - 1} \right\} \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

式(16)是一个关于经验性概率分布的机会约束线性规划问题, 其实际概率分布通过系数 α_{1+} 来校正。接下来将推导基于风险值的机会约束规划求解方法。

2.2 基于风险值的机会约束规划方法

风险值(Value at Risk, VaR)^[18]被广泛应用于金融风险控制领域, 是主流的风险度量框架。对于含决策变量 \mathbf{x} 和随机变量 ξ 的函数 $C(\mathbf{x}, \xi)$ 的 VaR 定义为

$$\text{VaR}_{\beta}[C(\mathbf{x}, \xi)] = \min\{\Pr(C(\mathbf{x}, \xi) \leq 0) \geq \beta\} \quad (17)$$

式(17)中, $\Pr(C(\mathbf{x}, \xi) \leq 0) \geq \beta$ 是函数 $C(\mathbf{x}, \xi)$ 的值

不超过 0 的概率, β 为风险厌恶程度。VaR 的值代表在给定一个置信水平 β 时, 函数 $C(\mathbf{x}, \xi)$ 遭受的最大损失。根据式(17), 式(16)中的机会约束不等式可等价

$$\text{VaR}_{(1-\alpha_{1+})}[C(\mathbf{x}, \xi)] \leq 0 \quad (18)$$

换言之, 所有可能导致 $C(\mathbf{x}, \xi) \geq 0$ 的输入随机变量的情景数比例不应超过 α_{1+} 。通过抽取随机变量的 q 个场景: $\xi^1, \xi^2, \dots, \xi^q$, 定义 0-1 辅助变量 $z_c(1), z_c(2), \dots, z_c(q)$ 来表征所有可能使得机会约束不等式失效的场景, 当 $z_c(k) = 1$ 表示场景 ξ^k 机会约束不等式失效, 因此, 式(18)可等价

$$C(\mathbf{x}, \xi^k) \leq M z_c(k) \quad (19)$$

式中, M 为一个足够大的数。当 $z_c(k) = 0$ 则表示场景 ξ^k 下 $C(\mathbf{x}, \xi) \leq 0$ 成立; 反之, 不成立。因此, 机会约束不等式失效的概率由所有 $z_c(k)$ 的和占场景总数 q 的比值来确定, 则式(16)的样本平均逼近等价形式为

$$\begin{aligned} & \max_{\mathbf{x}} h(\mathbf{x}) \\ & \text{st.} \begin{cases} g(\mathbf{x}, \xi^k) = 0 \\ C(\mathbf{x}, \xi^k) \leq M z_c(k) \\ \sum_{k=1}^q z_c(k) \leq q \alpha_{1+}, z_c(k) \in \{0, 1\} \\ \alpha_{1+} = \max\{\alpha_1, 0\} \\ \alpha_1 = 1 - \inf_{y \in (0,1)} \left\{ \frac{e^{-d_{\text{KL}} y^{1-\alpha}} - 1}{y - 1} \right\} \end{cases} \end{aligned} \quad (20)$$

式(20)是一个经典的混合整数线性规划模型, 可以基于 Matlab 的工具箱 Yalmip 进行建模^[21]。在 Yalmip 中直接将约束和目标函数显式写出, 同时利用 Yalmip 调用商业求解器 Cplex 12.7^[22]求得相应的分布式光伏并网容量优化结果。

3 仿真分析

本文采用含分布式光伏的改进 IEEE-33 节点标准配电网作为算例系统, 以验证本文所提出的分布式光伏并网容量分布鲁棒规划模型的有效性。系统总有功负荷为 3.715 MW, 总无功负荷为 2.3 Mvar, 线路的参数和负荷数据见文献[23], 接线图如图 2 所示, 选取节点 15、22、25 和 32 作为接入分布式

光伏的备选节点。电压约束取基准电压的 1.1 和 0.95 倍作为节点电压的上下限, 线路容量约束参考标准 IEEE-33 节点算例, 并假设分布式光伏和负荷的功率因数恒定。

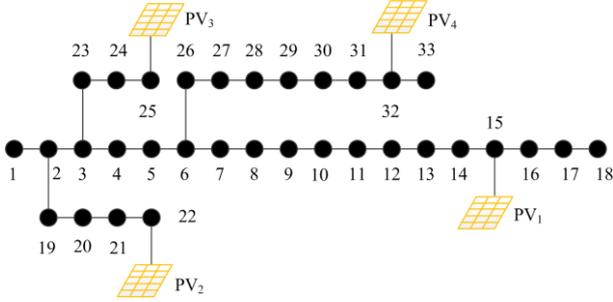


图 2 含分布式光伏的改进 IEEE-33 节点配电网

Fig. 2 Modified IEEE-33 bus distribution system with distributed PV

假设分布式光伏出力 and 负荷有功需求相对参考值的误差服从正态分布, 其均值为 0, 并假定其预测误差的标准差 σ 为参考值的 5%。本文利用蒙特卡洛方法随机产生了 5 000 个场景, 机会约束的失效概率为 0.05, 即节点电压和线路传输容量越限的概率为 0.05。 d_{KL} 的值根据历史数据可以准确估计, 历史数据越多, 则估计出来的参考分布与真实分布越近, 这在文献[24]中的定理 3.1, d_{KL} 可以采用如下选取方法:

$$d_{KL} = \frac{2}{2M} \chi_{N-1, \alpha^*}^2 \quad (21)$$

式(21)中, χ_{N-1, α^*}^2 为 $N-1$ 自由度的卡方分布 α^* 上分位数, 保证了真实分布以不小于 α^* 的概率包含在集合 D 中。

根据式(21), 在置信水平 $\alpha^* = 0.90$ 的情况下选择 $d_{KL} = 0.0118$ 。本文将所提出的分布式光伏并网容量的分布鲁棒模型(DRO)和传统的随机规划(SO)、鲁棒优化(RO)进行对比, 分布式光伏并网总容量如表 1 所示, 各分布式光伏接入点并网容量如图 3。从表 1 和图 3 不难发现, 基于 DRO 模型得到的光伏并网总容量比 SO 模型更加保守, 但相比 RO 模型其保守性则大大降低。造成上述差异的原因在于, SO 仅仅考虑经验性分布下的情况而忽略了概率分布参数的不确定性, 而 RO 则完全没有利用概率分布信息而只考虑了最坏情况, 从而导致了非常保守的结果。此外, 和 RO 相比, DRO 考虑了分布参数的不确定性从而获得了更加鲁棒的结果, 仅减少了分布式光伏并网总容量 0.335 MW, 占总确定性有功负荷的 9%。

表 1 三类优化分布式光伏并网总容量
Table 1 Distributed PV grid-connected total capacity with three optimization methods

方法	总并网容量/MW
SO	3.571
RO	3.161
DRO	3.496

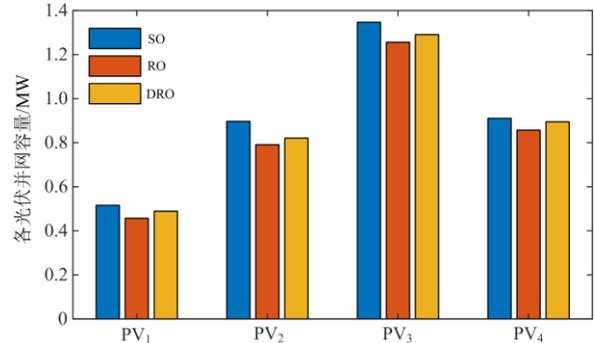


图 3 各分布式光伏接入点并网容量

Fig. 3 Grid-connected capacity of each distributed PV

参数 d_{KL} 决定了实际概率分布的不确定集合的范围, 也反映了决策者的风险偏好。 d_{KL} 越大, 配电网应对不确定性的能力越强, 所能接纳分布式光伏的容量也越大。根据式(21), 本文研究了不同的样本数 M 和不同置信水平 α^* 下产生的不同 d_{KL} 对改进的 IEEE-33 节点系统分布式光伏并网总容量结果的影响。如表 2—表 4 所示, 在同样样本数 M 的情况下, 分布式光伏并网总容量随着 d_{KL} 的增大而缓慢增大, 表明不确定概率密度函数集合大小的扩大直接导致了配电网接纳分布式光伏的能力增加。同样可以看到, 样本数 M 对结果的影响明显大于置信水平 α^* , 因此获取更多的历史数据有助于减小不确定集合, 从而显著降低系统储能配置结果的保守性。

表 2 置信水平 $\alpha^* = 0.90$ 下的分布式光伏总并网容量

Table 2 Distributed PV grid-connected total capacity under confidence level $\alpha^* = 0.90$

M	置信水平 $\alpha^* = 0.90$	
	d_{KL}	总并网容量/MW
5 000	0.011 8	3.496
2 000	0.029 6	3.566
1 000	0.059 2	3.635
500	0.118 5	3.782
100	0.592 5	3.912

表 3 置信水平 $\alpha^*=0.95$ 下的分布式光伏总并网容量

Table 3 Distributed PV grid-connected total capacity under confidence level $\alpha^*=0.95$

M	置信水平 $\alpha^*=0.95$	
	d_{KL}	总并网容量/MW
5 000	0.012 4	3.498
2 000	0.031 1	3.569
1 000	0.062 2	3.638
500	0.124 3	3.784
100	0.621 7	3.915

表 4 置信水平 $\alpha^*=0.99$ 下的分布式光伏总并网容量

Table 4 Distributed PV grid-connected total capacity under confidence level $\alpha^*=0.99$

M	置信水平 $\alpha^*=0.99$	
	d_{KL}	总并网容量/MW
5 000	0.013 6	3.499
2 000	0.034 0	3.570
1 000	0.067 9	3.639
500	0.135 8	3.789
100	0.679 0	3.918

进一步分析了分布式光伏出力和负荷有功需求的预测误差的标准差 σ 和机会约束不等式失效概率对分布式光伏并网总容量结果的影响。图 4 给出分布式光伏并网容量随机会约束不等式失效概率的变化曲线。如图 4 所示,在标准差 σ 一定的情况下,随着机会约束不等式失效概率的增加,分布式光伏并网总容量逐渐增加,这是因为机会约束不等式失效概率越大,即允许节点电压和线路传输容量越受限的概率越大,显然削弱约束条件限制使得配电网光伏并网容量增大。另外,预测误差的标准差越大,模糊集中包含的概率分布函数集范围越大, DRO 从这些概率分布函数集中选择出一个最坏的概率分布进行决策,因此,预测误差的标准差变大,反而使得配电网的光伏并网总量结果更保守。

最后,本文给出了配电网 IEEE-33 中各个节点的分布式光伏最大并网容量,结果如图 5 所示,假设此时系统中每次仅有一个节点接入分布式光伏,其它设置一样。从图 5 中基于 DRO 模型给出改进 IEEE-33 节点系统中各节点单独接入分布式光伏的最大并网容量,可以看出,支路首端节点 2、19、23、26 的最大光伏并网容量为该支路中所有节点中最大,这表明,同一支路中的所有节点,越靠近首端节点的越利于分布式光伏并网。此外,支路首端节点 2 最为靠近主网,因为该节点能从主网获得最大的有功功率支援和无功补偿而使得该节点的分布

式光伏并网容量最大,达到了 4.12 MW。

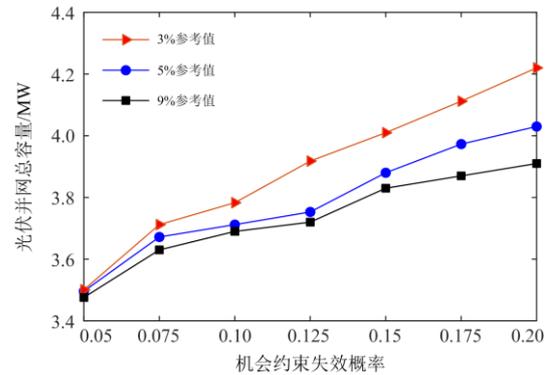


图 4 各分布式光伏接入点并网容量

Fig. 4 Grid-connected capacity of each distributed PV

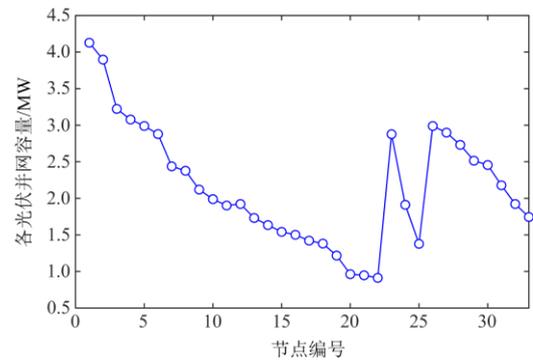


图 5 单节点分布式光伏并网最大容量

Fig. 5 Maximum grid-connected capacity for only one bus

4 结论

针对分布式光伏并网容量优化中的不确定性,本文采用 Kullback-Leibler 散度建立模糊集来克服经验性概率分布模型的不足,提出了基于 Kullback-Leibler 散度的配电网光伏并网容量分布鲁棒优化方法,经改进的 IEEE-33 节点系统算例仿真表明:

1) 与随机优化方法相比,本文所提出的分布鲁棒优化方法无需建立精确的概率分布,因而处理概率分布参数不确定性时更加鲁棒;与鲁棒优化方法相比,本文所提出的分布鲁棒优化方法考虑的是概率分布的最坏情况而不是最坏的场景,因而分布式光伏并网总容量结果的保守性降低。

2) 分布鲁棒优化方法的保守性和鲁棒性是根据采样历史数据大小和决策者风险偏好进行调节的,具有很高的灵活性,最终将分布鲁棒优化模型转换为一个混合整数线性规划问题,具有较高的求解效率。

3) 此外, 本文所提出的配电网光伏并网容量分布鲁棒优化模型具有普适性, 也能应用于其他类型的分布式电源并网容量优化, 对于不同的分布式电源不同的运行模式, 只需改进相应的分布式电源运行约束即可。

参考文献

- [1] 黄堃, 刘澄, 吕潇, 等. 计及本地负荷的分布式光伏并网电压协同控制策略[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(11): 131-137.
HUANG Kun, LIU Cheng, LÜ Xiao, et al. Distributed photovoltaic grid-connected voltage coordination control strategy considering local load[J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(11): 131-137.
- [2] INJETI S K, THUNUGUNTLA V K. Optimal integration of DGs into radial distribution network in the presence of plug-in electric vehicles to minimize daily active power losses and to improve the voltage profile of the system using bioinspired optimization algorithms[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 21-35. DOI: 10.1186/s41601-019-0149-x.
- [3] 张金平, 汪宁渤, 黄蓉, 等. 高渗透率光伏参与电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(15): 1-8.
ZHANG Jinping, WANG Ningbo, HUANG Rong, et al. Survey on frequency regulation technology of power grid by high-penetration photovoltaic[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15): 1-8.
- [4] HOKE A, BUTLER R, HAMBRICK J, et al. Steady-state analysis of maximum photovoltaic penetration levels on typical distribution feeders[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(2): 350-357.
- [5] 王璟, 蒋小亮, 杨卓, 等. 光伏集中并网电压约束下的准入容量与电压波动的评估方法[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2450-2457.
WANG Jing, JIANG Xiaoliang, YANG Zhuo, et al. Penetration capacity under voltage constraint and evaluation methodology of voltage fluctuation caused by centralized grid connection of photovoltaic power[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2450-2457.
- [6] 苏小玲, 韩民晓, 赵正奎, 等. 配电网中分布式电源最大准入容量分析[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 87-92.
SU Xiaoling, HAN Minxiao, ZHAO Zhengkui, et al. Research on maximum capacity of grid-connected distributed generation in distribution network[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 87-92.
- [7] 邹宏亮, 韩翔宇, 廖清芬, 等. 考虑电压质量与短路容量约束的分布式电源准入容量分析[J]. 电网技术, 2016, 40(8): 2273-2280.
ZOU Hongliang, HAN Xiangyu, LIAO Qingfen, et al. Penetration capacity calculation for distributed generation considering voltage quality and short circuit capacity constraints[J]. Power System Technology, 2016, 40(8): 2273-2280.
- [8] 邵庆祝, 杨畅, 谢民, 等. 基于 RTDS 的光伏接入配电网故障特征研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 1-8.
SHAO Qingzhu, YANG Chang, XIE Min, et al. Research on fault characteristics of distributed photovoltaic system in distributed network based on RTDS[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 1-8.
- [9] 刘科研, 刘永梅, 盛万兴, 等. 考虑电压约束的分布式电源接入配电网最大准入容量计算方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 81-87.
LIU Keyan, LIU Yongmei, SHENG Wanxing, et al. Maximal allowable DG penetration capacity calculation considering voltage constraints[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 81-87.
- [10] 王文宾, 朱燕舞, 韩天华, 等. 基于随机规划的分布式光伏并网最大准入容量计算[J]. 燕山大学学报, 2018, 42(6): 44-52.
WANG Wenbin, ZHU Yanwu, HAN Tianhua, et al. Maximum access capacity calculation of distributed PV grid connected based on stochastic programming [J]. Journal of Yanshan University, 2018, 42(6): 44-52.
- [11] 向加佳, 刘建华, 朱雪松, 等. 基于分布鲁棒优化的光伏电站并网极限容量研究[J]. 电力建设, 2016, 37(6): 151-156.
XIANG Jiajia, LIU Jianhua, ZHU Xuesong, et al. Research on capacity limit of grid-connected photovoltaic power station based on distributional robust optimization[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(6): 151-156.
- [12] CHEN X, WU W, ZHANG B. Robust capacity assessment of distributed generation in unbalanced distribution networks incorporating ANM techniques[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(2): 651-663.
- [13] 王一波, 许洪华. 基于机会约束规划的并网光伏电站极限容量研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 22-28.
WANG Yibo, XU Honghua. Research of capacity limit of grid-connected photovoltaic power station on the basis of chance-constrained programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 22-28.
- [14] 孙玲玲, 赵美超, 王宁, 等. 基于电压偏差机会约束的分布式光伏发电准入容量研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(7): 1560-1569.

- SUN Lingling, ZHAO Meichao, WANG Ning, et al. Research of permitted capacity of distributed photovoltaic generation based on voltage deviation chance constrained[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(7): 1560-1569.
- [15] 王宁, 孙玲玲, 贾清泉, 等. 计及光伏调压能力的分布式光伏并网机会约束规划方法[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(6): 88-96.
- WANG Ning, SUN Lingling, JIA Qingquan, et al. Chance constrained programming method of distributed photovoltaic grid connection considering PV voltage regulation ability[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(6): 88-96.
- [16] 吴素农, 于金镒, 杨为群, 等. 配电网分布式电源最大并网容量的机会约束评估模型及其转化方法[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3691-3697.
- WU Sunong, YU Jinyi, YAN Weiqun, et al. Chance constrained DG capacity assessment model and transforming method for distribution networks[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3691-3697.
- [17] XIE Rui, WEI Wei, KHODAYAR M E, et al. Planning fully renewable powered charging stations on highways: a data-driven robust optimization approach[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, 4(3): 817-830.
- [18] JIANG Ruiwei, GUAN Yongpei. Data-driven chance constrained stochastic program[J]. Mathematical Programming, 2016, 158(1-2): 291-327.
- [19] 阮贺彬, 高红均, 刘俊勇, 等. 考虑 DG 无功支撑和开关重构的主动配电网分布鲁棒无功优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(3): 685-695.
- RUAN Hebin, GAO Hongjun, LIU Junyong, et al. A distributionally robust reactive power optimization model for active distribution network considering reactive power support of DG and switch reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(3): 685-695.
- [20] 周计晨, 吕胤杰, 杨诚之, 等. 考虑风电出力不确定性的分布鲁棒主备协同优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 66-73.
- ZHOU Jichen, LÜ Yinjie, YANG Chengzhi, et al. Distributionally robust co-optimization of energy and reserve dispatch considering uncertain wind power output[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 66-73.
- [21] LOFBERG J. YALMIP: A toolbox for modeling and optimization in Matlab[C] // 2004 IEEE International Symposium on Computer Aided Control Systems Design, September 2-4, 2004, Taipei, China: 284-289.
- [22] 陈志杰, 李凤婷, 赵新利, 等. 考虑源荷特性的双层互动优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(1): 135-141.
- CHEN Zhijie, LI Fengting, ZHAO Xinli, et al. A bi-level interactive optimization scheduling considering source load characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(1): 135-141.
- [23] 王守相, 王成山. 现代配电系统分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.
- [24] PARDO L. Statistical inference based on divergence measures[M]. Boca Raton, USA: Chapman and Hall/CRC, 2005.

收稿日期: 2020-07-29; 修回日期: 2020-12-30

作者简介:

于腾凯(1982—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 从事电力系统运行与控制技术研究。E-mail: xydream@126.com

(编辑 葛艳娜)