

基于电压灵敏度的配电网DG接纳能力不确定性分析

晋飞¹, 刘静利¹, 刘晓亮¹, 温国强¹, 董逸超², 王守相², 赵倩宇²

(1. 国网山东省电力公司潍坊供电公司, 山东 潍坊 261061; 2. 天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要:为提升不确定环境下配电网分布式电源(DG)接纳能力分析的准确性,采用区间数学和仿射数学量化不确定性因素与电压灵敏度间的映射关系,推导基于雅可比矩阵的仿射三相电压灵敏度方程,有效追踪节点电压幅值对节点注入功率不确定性变化的灵敏度。考虑配电网DG配置方式不确定性引起的过电压风险,提出基于雅可比矩阵电压灵敏度的DG接纳能力不确定性分析方法,该方法兼顾DG接纳能力分析的准确性与快速性,有利于辅助规划人员进行DG接纳能力的在线快速分析和全面准确决策。IEEE 33节点配电网算例分析结果表明,所提方法在保证计算精度的前提下可使仿真时间缩短36.44%,验证了该方法的合理性和有效性。

关键词:配电网;DG接纳能力;电压灵敏度;不确定性分析

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202204076

0 引言

日趋严重的环境污染和能源危机不断促进世界各国对太阳能、风能等可再生能源的发展利用,我国在《新时代的中国能源发展》^[1]中清晰描绘了2060年实现碳中和的“路线图”。在此背景下,受端电网接纳能力的精细化评估分析成为跨省区新能源消纳的核心问题^[2],而大规模分布式电源DG(Distributed Generation)接入配电网也将给间歇性DG的高效接纳带来挑战。探究“双碳”目标下的新能源消纳场景与DG接纳能力已成为当前的研究热点之一^[3]。

目前,国内外学者对配电网DG接纳能力的分析方法开展了许多研究,数学分析方法主要包括解析法、智能优化方法和随机场景模拟法^[4]。解析法和智能优化方法的结果偏于乐观而随机场景模拟法的计算时间过长,如何兼顾分析的准确性与快速性还有待进一步研究。电压灵敏度分析具有有效量化节点电压与注入功率解析关系的特点,为解决该问题提供了思路^[5],但随着配电网中间歇性源荷不确定性的影响愈加凸显,电压灵敏度确定性分析的适用场景将受到一定限制,因此,有必要研究电压灵敏度不确定性分析方法,这将有助于提升多元不确定环境下配电网DG接纳能力分析的全面性、准确性和快速性。

常用的不确定性分析方法包括概率方法、鲁棒方法和区间方法等。概率方法的典型应用场景是概率机会约束规划:文献[6]以运行指标合格率为机会约束,建立光伏极限接入容量的概率机会约束规划

模型,但模型中仅考虑光伏单点接入的情形,场景比较单一;文献[7]考虑风光互补特性,建立风光联合并网的DG接纳能力概率机会约束规划模型;也有学者采用两阶段线性变换^[8]和双层概率优化^[9]的方式来提高计算效率。但概率方法的不足在于,不够精确的数据样本无法完全拟合DG出力和负荷需求的概率密度函数PDF(Probability Density Function),这易使分析结果出现偏差。文献[10]将鲁棒方法引入DG接纳能力分析中,该方法不依赖于随机变量的PDF,且计算保守性可通过参数调整灵活控制,因而该方法具有更好的求解性能;文献[11]建立DG接纳能力分析的两阶段鲁棒优化模型,可以有效量化多元不确定性影响,同时满足计算的鲁棒性和保守性要求;文献[12]在鲁棒模型的基础上考虑强对偶关系,利用条件风险价值重构方法将模型转换为双线性矩阵不等式问题,提高了计算精度。但鲁棒方法的保守性通常只针对DG出力和负荷需求的不确定性,而难以量化配电网DG配置方式潜在的不确定性,因此,由鲁棒方法得到的分析结果往往偏于乐观,与真实接纳能力之间存在一定偏差。相较而言,区间方法易获取不确定变量的上下界,具有模型简单、适用性强、求解快等优势。文献[13]以不确定条件下的能量损失最小为目标,建立网络重构区间优化模型,在量测配置不足时模型的优势更明显。但区间方法难以追踪不确定变量的相关性,通常具有计算偏于保守的缺点。仿射方法通过对多个变量的仿射多项式进行复杂的叠加运算,可以有效追踪多元不确定变量之间的相关性和耦合性^[14],避免“误差爆炸”现象的出现,从而降低计算保守性^[15]。某种意义上而言,仿射方法是一种具有更高的计算精度、更快的计算速度和更好的收敛性的改进区间方法^[16],将其与DG接纳能力分析相结合可有效提升分析计算的合理性与适应性。

收稿日期:2021-11-08;修回日期:2022-02-25

在线出版日期:2022-04-26

基金项目:国网山东省电力公司科技项目(2021A-018)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company(2021A-018)

综上,本文采用区间数学和仿射数学^[17]量化多元不确定性因素与电压灵敏度间的映射关系,推导基于雅可比矩阵的仿射三相电压灵敏度方程,并结合随机场景模拟法^[18-19]提出基于雅可比矩阵电压灵敏度的配电网DG接纳能力不确定性分析方法,兼顾DG接纳能力分析的准确性与快速性,同时为辅助配电网规划人员进行DG接纳能力的在线快速分析和全面准确决策提供可能。

1 基于雅可比矩阵的仿射电压灵敏度方程

1.1 经典电压灵敏度方程

由经典雅可比矩阵 J 可得节点电压对节点有功/无功注入功率的灵敏度方程,如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $J_{P\theta}$ 和 $J_{Q\theta}$ 分别为节点电压相角对有功和无功注入功率的灵敏度; J_{PV} 和 J_{QV} 分别为节点电压幅值对有功和无功注入功率的灵敏度; P 和 Q 分别为节点有功和无功注入功率向量; ΔP 和 ΔQ 分别为 P 和 Q 的变化量; θ 和 V 分别为节点电压相角和幅值向量; $\Delta \theta$ 和 ΔV 分别为 θ 和 V 的变化量。

当所有节点等效为PQ节点时, $J_{P\theta}$ 和 $J_{Q\theta}$ 均为非奇异矩阵,因此,可将式(1)中的 $\Delta \theta$ 消去,得到 ΔV 对 ΔP 和 ΔQ 的灵敏度方程,如式(2)所示。

$$\begin{cases} \Delta V = J_{RPV} \Delta P + J_{RQV} \Delta Q \\ J_{RPV} = (J_{PV} - J_{P\theta} J_{Q\theta}^{-1} J_{QV})^{-1} \\ J_{RQV} = (J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV})^{-1} \end{cases} \quad (2)$$

式中: J_{RPV} 和 J_{RQV} 分别为 n 节点电力系统中 ΔP 和 ΔQ 对 ΔV 的 $n \times n$ 阶灵敏度系数矩阵,当网络拓扑不变时,其值均近似保持不变。

1.2 基于雅可比矩阵的仿射三相电压灵敏度方程

若考虑配电网的三相不平衡特性,同时忽略三相线路互阻抗,则可将式(1)改写为三相电压灵敏度方程,如式(3)所示。

$$\begin{bmatrix} \Delta P^\varphi \\ \Delta Q^\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta}^\varphi & J_{PV}^\varphi \\ J_{Q\theta}^\varphi & J_{QV}^\varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta^\varphi \\ \Delta V^\varphi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P^\varphi}{\partial \theta^\varphi} & \frac{\partial P^\varphi}{\partial V^\varphi} \\ \frac{\partial Q^\varphi}{\partial \theta^\varphi} & \frac{\partial Q^\varphi}{\partial V^\varphi} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta^\varphi \\ \Delta V^\varphi \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $\varphi = a, b, c$ 表示三相相位; J^φ 为 φ 相负载雅可比矩阵; $J_{P\theta}^\varphi$ 、 $J_{Q\theta}^\varphi$ 、 J_{PV}^φ 和 J_{QV}^φ 均为 φ 相分块子矩阵; P^φ 、 Q^φ 、 θ^φ 和 V^φ 分别为 P 、 Q 、 θ 和 V 的 φ 相值; ΔP^φ 、 ΔQ^φ 、 $\Delta \theta^\varphi$ 和 ΔV^φ 分别为 P^φ 、 Q^φ 、 θ^φ 和 V^φ 的变化量。

因此,式(2)也可改写为:

$$\begin{cases} \Delta V^\varphi = J_{RPV}^\varphi \Delta P^\varphi + J_{RQV}^\varphi \Delta Q^\varphi \\ J_{RPV}^\varphi = [J_{PV}^\varphi - J_{P\theta}^\varphi (J_{Q\theta}^\varphi)^{-1} J_{QV}^\varphi]^{-1} \\ J_{RQV}^\varphi = [J_{QV}^\varphi - J_{Q\theta}^\varphi (J_{P\theta}^\varphi)^{-1} J_{PV}^\varphi]^{-1} \end{cases} \quad (4)$$

式中: J_{RPV}^φ 和 J_{RQV}^φ 分别为 ΔP^φ 和 ΔQ^φ 对 ΔV^φ 的灵敏度系数矩阵。

当故障等因素导致配电网网络拓扑发生变化时,需要重新进行1次三相潮流计算,并结合潮流结果由式(3)所示的三相电压灵敏度方程重新形成分块灵敏度矩阵 $J_{P\theta}^\varphi$ 、 $J_{Q\theta}^\varphi$ 、 J_{PV}^φ 和 J_{QV}^φ ,进而由式(4)重新计算得到灵敏度系数矩阵 J_{RPV}^φ 和 J_{RQV}^φ 。

进一步采用仿射数学量化节点注入功率的不确定性,可将式(4)所示的确定性三相电压灵敏度方程改写为仿射三相电压灵敏度方程,如式(5)~(7)所示。

$$\Delta \hat{V}_t^\varphi = [\Delta \hat{V}_{1,t}^\varphi, \Delta \hat{V}_{2,t}^\varphi, \dots, \Delta \hat{V}_{n,t}^\varphi]^\top = \begin{bmatrix} \Delta V_{1,t}^{\varphi,0} + \sum_{l=1}^M \Delta V_{1,t}^{\varphi,l} \varepsilon_1^l \\ \Delta V_{2,t}^{\varphi,0} + \sum_{l=1}^M \Delta V_{2,t}^{\varphi,l} \varepsilon_2^l \\ \vdots \\ \Delta V_{n,t}^{\varphi,0} + \sum_{l=1}^M \Delta V_{n,t}^{\varphi,l} \varepsilon_n^l \end{bmatrix} = J_{RPV}^\varphi \Delta \hat{P}_t^\varphi + J_{RQV}^\varphi \Delta \hat{Q}_t^\varphi \quad (5)$$

$$\Delta \hat{P}_t^\varphi = [\Delta \hat{P}_{1,t}^\varphi, \Delta \hat{P}_{2,t}^\varphi, \dots, \Delta \hat{P}_{n,t}^\varphi]^\top = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} (\Delta \bar{P}_{1,t}^\varphi + \Delta \underline{P}_{1,t}^\varphi) + \frac{1}{2} (\Delta \bar{P}_{1,t}^\varphi - \Delta \underline{P}_{1,t}^\varphi) \varepsilon_1^P \\ \frac{1}{2} (\Delta \bar{P}_{2,t}^\varphi + \Delta \underline{P}_{2,t}^\varphi) + \frac{1}{2} (\Delta \bar{P}_{2,t}^\varphi - \Delta \underline{P}_{2,t}^\varphi) \varepsilon_2^P \\ \vdots \\ \frac{1}{2} (\Delta \bar{P}_{n,t}^\varphi + \Delta \underline{P}_{n,t}^\varphi) + \frac{1}{2} (\Delta \bar{P}_{n,t}^\varphi - \Delta \underline{P}_{n,t}^\varphi) \varepsilon_n^P \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\Delta \hat{Q}_t^\varphi = [\Delta \hat{Q}_{1,t}^\varphi, \Delta \hat{Q}_{2,t}^\varphi, \dots, \Delta \hat{Q}_{n,t}^\varphi]^\top = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} (\Delta \bar{Q}_{1,t}^\varphi + \Delta \underline{Q}_{1,t}^\varphi) + \frac{1}{2} (\Delta \bar{Q}_{1,t}^\varphi - \Delta \underline{Q}_{1,t}^\varphi) \varepsilon_1^Q \\ \frac{1}{2} (\Delta \bar{Q}_{2,t}^\varphi + \Delta \underline{Q}_{2,t}^\varphi) + \frac{1}{2} (\Delta \bar{Q}_{2,t}^\varphi - \Delta \underline{Q}_{2,t}^\varphi) \varepsilon_2^Q \\ \vdots \\ \frac{1}{2} (\Delta \bar{Q}_{n,t}^\varphi + \Delta \underline{Q}_{n,t}^\varphi) + \frac{1}{2} (\Delta \bar{Q}_{n,t}^\varphi - \Delta \underline{Q}_{n,t}^\varphi) \varepsilon_n^Q \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $\Delta \hat{V}_t^\varphi$ 、 $\Delta \hat{P}_t^\varphi$ 和 $\Delta \hat{Q}_t^\varphi$ 分别为 t 时刻 φ 相仿射电压幅值以及节点注入仿射有功、无功功率变化量向量; $\Delta \hat{V}_{i,t}^\varphi (i=1, 2, \dots, n)$ 为 t 时刻节点 i 的 φ 相仿射电压幅值变化量; $\Delta V_{i,t}^{\varphi,0}$ 、 $\Delta V_{i,t}^{\varphi,l}$ 、 $\varepsilon_i^l (i=1, 2, \dots, n; l=1, 2, \dots, M)$ 分别为 $\Delta \hat{V}_{i,t}^\varphi$ 仿射多项式的中心值、第 l 项噪声系数和第 l 个噪声元, $\varepsilon_i^l \in [-1, 1]$, M 为 $\Delta \hat{V}_{i,t}^\varphi$ 的噪声项总数;

$\Delta \hat{P}_{i,t}^{\varphi}$ 、 $\Delta \bar{P}_{i,t}^{\varphi}$ 、 $\Delta \underline{P}_{i,t}^{\varphi}$ ($i=1, 2, \dots, n$) 分别为 t 时刻节点 i 注入的 φ 相仿射有功功率变化量以及区间的上界和下界; $\Delta \hat{Q}_{i,t}^{\varphi}$ 、 $\Delta \bar{Q}_{i,t}^{\varphi}$ 、 $\Delta \underline{Q}_{i,t}^{\varphi}$ ($i=1, 2, \dots, n$) 分别为 t 时刻节点 i 注入的 φ 相仿射无功功率变化量以及区间的上界和下界; ε_i^P 、 ε_i^Q ($i=1, 2, \dots, n$) 分别为 $\Delta \hat{P}_{i,t}^{\varphi}$ 和 $\Delta \hat{Q}_{i,t}^{\varphi}$ 的噪声元, $\varepsilon_i^P, \varepsilon_i^Q \in [-1, 1]$ 。

整理式(5)~(7)可得到节点电压幅值仿射多项式中心项 $\Delta V_{i,t}^{\varphi,0}$ 的灵敏度方程, 如式(8)所示。

$$\Delta V_{i,t}^{\varphi,0} = \frac{1}{2} J_{RPVi}^{\varphi} \begin{bmatrix} \Delta \bar{P}_{1,t}^{\varphi} + \Delta \underline{P}_{1,t}^{\varphi} \\ \Delta \bar{P}_{2,t}^{\varphi} + \Delta \underline{P}_{2,t}^{\varphi} \\ \vdots \\ \Delta \bar{P}_{n,t}^{\varphi} + \Delta \underline{P}_{n,t}^{\varphi} \end{bmatrix} + \frac{1}{2} J_{RQVi}^{\varphi} \begin{bmatrix} \Delta \bar{Q}_{1,t}^{\varphi} + \Delta \underline{Q}_{1,t}^{\varphi} \\ \Delta \bar{Q}_{2,t}^{\varphi} + \Delta \underline{Q}_{2,t}^{\varphi} \\ \vdots \\ \Delta \bar{Q}_{n,t}^{\varphi} + \Delta \underline{Q}_{n,t}^{\varphi} \end{bmatrix} =$$

$$\frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \left[J_{RPV}^{\varphi}(i,j) \left(\Delta \bar{P}_{j,t}^{\varphi} + \Delta \underline{P}_{j,t}^{\varphi} \right) + J_{RQV}^{\varphi}(i,j) \left(\Delta \bar{Q}_{j,t}^{\varphi} + \Delta \underline{Q}_{j,t}^{\varphi} \right) \right] \quad (8)$$

式中: J_{RPVi}^{φ} 和 $J_{RPV}^{\varphi}(i,j)$ 分别为 J_{RPV}^{φ} 的第 i 行向量和第 i 行第 j 列元素; J_{RQVi}^{φ} 和 $J_{RQV}^{\varphi}(i,j)$ 分别为 J_{RQV}^{φ} 的第 i 行向量和第 i 行第 j 列元素。

进一步推导噪声项灵敏度方程, 如式(9)所示。

$$\sum_{l=1}^M \Delta V_{i,t}^{\varphi,l} \varepsilon_i^l = \frac{1}{2} J_{RPVi}^{\varphi} \begin{bmatrix} \left(\Delta \bar{P}_{1,t}^{\varphi} - \Delta \underline{P}_{1,t}^{\varphi} \right) \varepsilon_1^P \\ \left(\Delta \bar{P}_{2,t}^{\varphi} - \Delta \underline{P}_{2,t}^{\varphi} \right) \varepsilon_2^P \\ \vdots \\ \left(\Delta \bar{P}_{n,t}^{\varphi} - \Delta \underline{P}_{n,t}^{\varphi} \right) \varepsilon_n^P \end{bmatrix} +$$

$$\frac{1}{2} J_{RQVi}^{\varphi} \begin{bmatrix} \left(\Delta \bar{Q}_{1,t}^{\varphi} - \Delta \underline{Q}_{1,t}^{\varphi} \right) \varepsilon_1^Q \\ \left(\Delta \bar{Q}_{2,t}^{\varphi} - \Delta \underline{Q}_{2,t}^{\varphi} \right) \varepsilon_2^Q \\ \vdots \\ \left(\Delta \bar{Q}_{n,t}^{\varphi} - \Delta \underline{Q}_{n,t}^{\varphi} \right) \varepsilon_n^Q \end{bmatrix} \quad (9)$$

整理可得:

$$\sum_{l=1}^M \Delta V_{i,t}^{\varphi,l} \varepsilon_i^l = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \left[J_{RPV}^{\varphi}(i,j) \left(\Delta \bar{P}_{j,t}^{\varphi} - \Delta \underline{P}_{j,t}^{\varphi} \right) \varepsilon_j^P + J_{RQV}^{\varphi}(i,j) \left(\Delta \bar{Q}_{j,t}^{\varphi} - \Delta \underline{Q}_{j,t}^{\varphi} \right) \varepsilon_j^Q \right] \quad (10)$$

由此构成仿射三相电压灵敏度方程, 可追踪各节点电压幅值对节点注入功率不确定性变化的灵敏度。

2 计及 DG 配置方式不确定性的过电压风险分析

本文在文献[20]的基础上考虑 DG 配置方式不确定性引起的过电压严重程度, 通过过电压场景分

类和过电压严重程度修正系数来分析配电网的真实过电压风险 IOR (Interval Overvoltage Risk)。

2.1 过电压 DG 配置场景分类

由灵敏度方程求得 $\Delta \hat{V}_i^{\varphi}$ 后, 可基于仿射-区间数学变换^[17]将其转化为区间形式 $\Delta \hat{V}_i^{\varphi}$, 如式(11)所示。

$$\Delta \hat{V}_i^{\varphi} = \left[\Delta V_{i,t}^{\varphi,0} - \sum_{l=1}^M |\Delta V_{i,t}^{\varphi,l}|, \Delta V_{i,t}^{\varphi,0} + \sum_{l=1}^M |\Delta V_{i,t}^{\varphi,l}| \right] \quad (11)$$

式中: $\Delta V_{i,t}^{\varphi,0}$ 和 $\Delta V_{i,t}^{\varphi,l}$ 分别为 $\Delta \hat{V}_i^{\varphi}$ 仿射多项式的中心值和第 l 项噪声系数。

进一步由式(12)计算各场景的最大电压幅值区间 $\hat{V}_{\max}$, 其中区间数比较需引入置信度分析^[16]。

$$\hat{V}_{\max} = \max_{\substack{t=t_1, t_1+1, \dots, t_{\max} \\ i=1, 2, \dots, n \\ \varphi=a, b, c}} \left\{ V_{i,t_0}^{\varphi} + \Delta \hat{V}_{i,t}^{\varphi} \right\} \quad (12)$$

式中: V_{i,t_0}^{φ} 为初始时刻 t_0 节点 i 的 φ 相电压幅值; t_1 和 $t_{\max}$ 分别为计算起、止时刻; $\Delta \hat{V}_{i,t}^{\varphi}$ 为 t 时刻节点 i 的 φ 相区间电压幅值变化量。

从而可形成以 DG 安装容量 P_{DG} 为横轴、以 $\hat{V}_{\max}$ 为纵轴的 P_{DG} - $\hat{V}_{\max}$ 区间分布, 包含 I 类和 II 类场景。

I 类场景是必定发生过电压的 DG 配置场景, 不同时刻存在 A 类(完全过电压)、B 类(部分过电压)和 C 类(无过电压)这 3 类情形, 如图 1 所示(图中系统最大电压幅值为标么值, 后同); II 类场景是可能发生过电压的 DG 配置场景, 存在 B 类、C 类这 2 类情形。

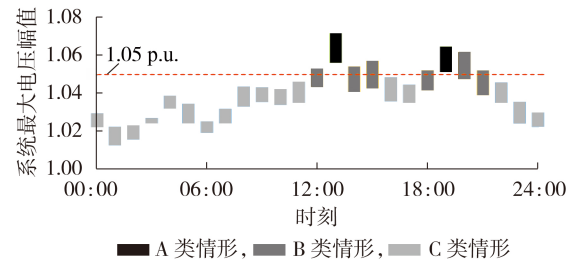


图 1 I 类场景不同时刻 3 类情形示意图

Fig.1 Schematic diagram of three situations at different moments for Scenario I

2.2 过电压严重程度修正系数的计算

I 类和 II 类场景的过电压严重程度不同, 需要在这 2 类场景的过电压严重程度修正系数进行差异化计算。

1) I 类场景过电压严重程度修正系数。

若将 I 类场景各时刻的最大仿射电压表示为式(13), 则过电压严重程度可由 A 类和 B 类情形的最大仿射电压幅值的过电压幅度来衡量, 如式(14)~(18)所示。在此基础上, I 类场景过电压严重程度修正系数 δ_m^I 可根据 I 类场景平均过电压幅度进行计算, 如式(19)、(20)所示。

$$\hat{V}_{\max, m, k}^{1, t} = V_{\max, m, k, 0}^{1, t} + \sum_{s=1}^S V_{\max, m, k, s}^{1, t} \varepsilon_s \quad (13)$$

$$m=1, 2, \dots, m_{\max}; k=1, 2, \dots, N_{m, \text{over}}^1$$

$$\xi_{m, k}^1 = \sum_{t=t_1}^{t_{\max}} \left[\eta_{m, k, A}^{1, t} (V_{\max, m, k, 0}^{1, t} - V^{\max}) + \eta_{m, k, B}^{1, t} (\bar{V}_{\max, m, k}^{1, t} - V^{\max}) \right] \quad (14)$$

$$\eta_{m, k, A}^{1, t} = \begin{cases} 1 & \underline{V}_{\max, m, k}^{1, t} \geq V^{\max} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (15)$$

$$\eta_{m, k, B}^{1, t} = \begin{cases} 1 & \bar{V}_{\max, m, k}^{1, t} \geq V^{\max} \text{ 且 } \underline{V}_{\max, m, k}^{1, t} < V^{\max} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

$$\bar{V}_{\max, m, k}^{1, t} = V_{\max, m, k, 0}^{1, t} + \sum_{s=1}^S |V_{\max, m, k, s}^{1, t}| \quad (17)$$

$$\underline{V}_{\max, m, k}^{1, t} = V_{\max, m, k, 0}^{1, t} - \sum_{s=1}^S |V_{\max, m, k, s}^{1, t}| \quad (18)$$

$$\delta_m^1 = \exp \left[\frac{C_{\Delta V}}{N_{m, \text{over}}^1} \sum_{k=1}^{N_{m, \text{over}}^1} (1 + \xi_{m, k}^1) (V_{\max, m, k}^{1, 0} - V^{\max}) \right] \quad (19)$$

$$V_{\max, m, k}^{1, 0} = \frac{1}{2} (\bar{V}_{\max, m, k}^1 + \underline{V}_{\max, m, k}^1) \quad (20)$$

式中: $\hat{V}_{\max, m, k}^{1, t}$ 为第 m 个 DG 容量区间 DGCI (DG Capacity Interval) 中 I 类场景 k 在 t 时刻的最大仿射电压幅值; $V_{\max, m, k, 0}^{1, t}$ 、 $V_{\max, m, k, s}^{1, t}$ 和 ε_s 分别为 $\hat{V}_{\max, m, k}^{1, t}$ 仿射多项式的中心值、第 s 项噪声系数和第 s 个噪声元; S 为 $\hat{V}_{\max, m, k}^{1, t}$ 仿射多项式的噪声项总数; $m_{\max}$ 为 DGCI 总数; $N_{m, \text{over}}^1$ 为第 m 个 DGCI 中 I 类场景总数; $\xi_{m, k}^1$ 为第 m 个 DGCI 中 I 类场景 k 的过电压严重程度; $\eta_{m, k, A}^{1, t}$ 和 $\eta_{m, k, B}^{1, t}$ 为 0-1 决策变量, 分别表示 I 类场景 k 在 t 时刻是否属于 A 类和 B 类情形; $V^{\max}$ 为最大允许电压幅值; $\bar{V}_{\max, m, k}^{1, t}$ 和 $\underline{V}_{\max, m, k}^{1, t}$ 分别为 I 类场景 k 在 t 时刻的最大电压幅值上界和下界; $C_{\Delta V}$ 为电压变化比例系数; $V_{\max, m, k}^{1, 0}$ 为 I 类场景 k 的最大电压幅值中心值; $\bar{V}_{\max, m, k}^1$ 和 $\underline{V}_{\max, m, k}^1$ 分别为第 m 个 DGCI 中 I 类场景 k 的最大电压幅值区间上界和下界。

2) II 类场景过电压严重程度修正系数。

若 II 类场景各时刻的最大仿射电压表示为式 (21), 则过电压严重程度可由 B 类情形的最大仿射电压幅值的过电压幅度来衡量, 如式 (22)、(23) 所示。在此基础上, II 类场景过电压严重程度修正系数 δ_m^{II} 可根据 II 类场景平均过电压幅度进行计算, 如式 (24) 所示。

$$\hat{V}_{\max, m, k}^{\text{II}, t} = V_{\max, m, k, 0}^{\text{II}, t} + \sum_{s=1}^S V_{\max, m, k, s}^{\text{II}, t} \varepsilon_s \quad (21)$$

$$\xi_{m, k}^{\text{II}} = \sum_{t=t_1}^{t_{\max}} \eta_{m, k, B}^{\text{II}, t} (\bar{V}_{\max, m, k}^{\text{II}, t} - V^{\max}) \quad (22)$$

$$\eta_{m, k, B}^{\text{II}, t} = \begin{cases} 1 & \bar{V}_{\max, m, k}^{\text{II}, t} \geq V^{\max} \text{ 且 } \underline{V}_{\max, m, k}^{\text{II}, t} < V^{\max} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (23)$$

$$\delta_m^{\text{II}} = \exp \left[\frac{C_{\Delta V}}{N_{m, \text{over}}^{\text{II}}} \sum_{k=1}^{N_{m, \text{over}}^{\text{II}}} (1 + \xi_{m, k}^{\text{II}}) (\bar{V}_{\max, m, k}^{\text{II}} - V^{\max}) \right] \quad (24)$$

式中: $\hat{V}_{\max, m, k}^{\text{II}, t}$ 为第 m 个 DGCI 中 II 类场景 k 在 t 时刻的最大仿射电压幅值; $V_{\max, m, k, 0}^{\text{II}, t}$ 和 $V_{\max, m, k, s}^{\text{II}, t}$ 分别为 $\hat{V}_{\max, m, k}^{\text{II}, t}$ 的中心值和第 s 项噪声系数; $\xi_{m, k}^{\text{II}}$ 为第 m 个 DGCI 中 II 类场景 k 的过电压严重程度; $\eta_{m, k, B}^{\text{II}, t}$ 为 0-1 决策变量, 表示 II 类场景 k 在 t 时刻是否属于 B 类情形; $\bar{V}_{\max, m, k}^{\text{II}, t}$ 和 $\underline{V}_{\max, m, k}^{\text{II}, t}$ 分别为第 m 个 DGCI 中 II 类场景 k 在 t 时刻的最大电压幅值上界和下界; $N_{m, \text{over}}^{\text{II}}$ 为第 m 个 DGCI 中的 II 类场景总数; $\bar{V}_{\max, m, k}^{\text{II}}$ 为第 m 个 DGCI 中 II 类场景 k 的最大电压幅值区间上界。

2.3 IOR 计算与 DG 接纳能力分析

基于 I 类和 II 类场景的过电压严重程度修正系数, 可根据式 (25) 计算区间 IOR 的区间值 $\hat{\lambda}_m' = [\underline{\lambda}_m', \bar{\lambda}_m']$, 其中 $\bar{\lambda}_m'$ 和 $\underline{\lambda}_m'$ 分别为 $\hat{\lambda}_m'$ 的区间上界和下界。

$$\begin{cases} \bar{\lambda}_m' = \frac{\delta_m^1 N_{m, \text{over}}^1 + \delta_m^{\text{II}} N_{m, \text{over}}^{\text{II}}}{N_{m, \text{total}}} \times 100 \% \\ \underline{\lambda}_m' = \frac{\delta_m^1 N_{m, \text{over}}^1}{N_{m, \text{total}}} \times 100 \% \end{cases} \quad (25)$$

式中: $N_{m, \text{total}}$ 为第 m 个 DGCI 中的 DG 配置场景总数。

进一步根据式 (26) 计算 DG 接纳能力区间值 $\hat{H} = [\underline{H}, \bar{H}]$, 其中 $\bar{H}$ 和 $\underline{H}$ 分别为 $\hat{H}$ 的区间上界和下界。

$$\begin{cases} \bar{H} = \min_{m=1, 2, \dots, m_{\max}} \left\{ P_{\text{DG}, m} \mid \underline{\lambda}_m' \geq \lambda'_{\max} \right\} \\ \underline{H} = \min_{m=1, 2, \dots, m_{\max}} \left\{ P_{\text{DG}, m} \mid \bar{\lambda}_m' \geq \lambda'_{\max} \right\} \end{cases} \quad (26)$$

式中: $P_{\text{DG}, m}$ 为第 m 个 DGCI 的下确界; $\lambda'_{\max}$ 为 IOR 阈值。

3 基于电压灵敏度的 DG 接纳能力不确定性分析方法

雅可比矩阵 J 通常根据初始时刻 t_0 的节点注入功率 $P^0 + jQ^0$ 和 1 次潮流计算得到的基准节点电压 $V^0 \angle \theta^0$ 求得, 因此, 基于雅可比矩阵的电压灵敏度分析仅需 1 次潮流计算就能快速得到不同场景的 $\hat{V}_{\max}$ 。基于电压灵敏度的 DG 接纳能力分析步骤如下。

步骤 1: 在初始时刻 t_0 执行 1 次三相潮流计算, 由式 (3)、(4) 计算电压灵敏度系数矩阵 J_{RPV}^e 和 J_{RQV}^e 。

步骤 2: 基于蒙特卡罗仿真进行 DG 随机场景模拟, 由式 (6)、(7) 构建各场景的节点有功、无功注入功率变化量向量 $\Delta \hat{P}_i^e$ 和 $\Delta \hat{Q}_i^e$, 并由式 (8) 和式 (10) 计算各场景的仿射电压幅值变化量向量 $\Delta \hat{V}_i^e$ 。

步骤 3: 基于仿射-区间数学变换由式 (11) 将 $\Delta \hat{V}_i^e$ 转化为区间值 $\Delta \hat{V}_i^e$, 由式 (12) 计算各场景的

最大电压幅值区间值 $\hat{V}_{\max}$, 进而形成 $P_{\text{DG}} - \hat{V}_{\max}$ 区间分布。

步骤4: 对 $P_{\text{DG}} - \hat{V}_{\max}$ 区间分布中的过电压 DG 配置场景进行分类, 选取合适的 DGC I 宽度后, 由式(13)~(20)和式(21)~(24)分别计算 I 类和 II 类场景的过电压严重程度修正系数 δ_m^{I} 和 δ_m^{II} 。

步骤5: 由式(25)计算 IOR 区间值 $\hat{\lambda}'_m$, 在此基础上考虑 DG 实际规划需求选择合适的 IOR 阈值 $\lambda'_{\max}$, 并由式(26)计算 DG 接纳能力区间值 $\hat{H}$ 。

4 算例分析

采用附录 A 图 A1 所示的 IEEE 33 节点配电网进行仿真, 系统基准电压和基准容量分别为 12.66 kV 和 10 MV·A, 平衡节点电压幅值为 1.00 p.u., 总负荷为 3 715+j2 300 kV·A。为简化分析, 所有 DG 和负荷均采用附录 A 图 A2 所示的区间变化特性, 功率因数分别为 1 和 0.9。

由初始时刻 t_0 的 1 次潮流计算得到电压灵敏度系数矩阵 $J_{\text{RPV}}^{\text{e}}$ 和 $J_{\text{RQV}}^{\text{e}}$, 将蒙特卡罗仿真次数设为 6 000, 即构造 1.98×10^5 个 DG 配置场景。根据式(8)和式(10)快速计算各场景的仿射电压幅值变化量 $\Delta \hat{V}_i^{\text{e}}$, 进而形成 $P_{\text{DG}} - \hat{V}_{\max}$ 区间分布, 如图 2 所示。图中, Z 点表示在系统最大电压幅值超过 1.05 p.u. 的所有场景中对应的最小 DG 安装容量为 2 600 kW。

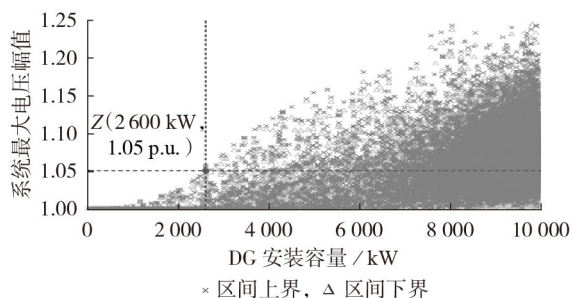


图2 $P_{\text{DG}} - \hat{V}_{\max}$ 区间分布图

Fig.2 Plot of $P_{\text{DG}} - \hat{V}_{\max}$ interval distribution

若将 DGC I 宽度设为 100 kW, 将 $m_{\max}$ 设为 100, 将最大电压幅值上限 $V^{\max}$ 设为 1.05 p.u., 则可得到各 DGC I 中的 I 类和 II 类场景总数 $N_{m, \text{over}}^{\text{I}}$ 和 $N_{m, \text{over}}^{\text{II}}$ 。进一步计算 I 类和 II 类场景的过电压严重程度修正系数 δ_m^{I} 和 δ_m^{II} , 当电压变化比例系数 $C_{\Delta V}$ 设为 5.0 时, 各 DGC I 的 IOR 区间值变化情况如图 3 所示。

由图 3 可知, 随着 DG 安装容量的增大, IOR 区间值 $\hat{\lambda}'_m$ 近似呈指数增长趋势, $\hat{\lambda}'_m$ 为 0 和 0.1 时的 DGC I 编号分别为 26 和 44, 在 $\hat{\lambda}'_m > 0.1$ 后, IOR 的增长速度越来越快, 显然, 这在实际配电网中是不允许的。为了避免 IOR 过高, 本文将 IOR 阈值 $\lambda'_{\max}$ 的上限设为 0.1, 这也是配电网规划人员实际可接受的合理

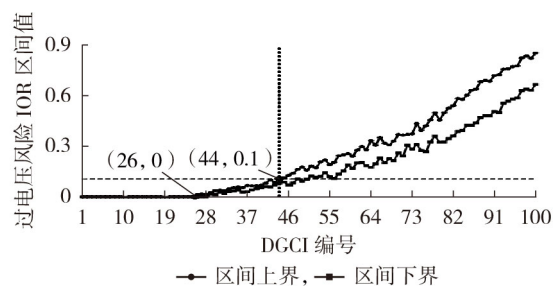


图3 IOR 区间值随 DGC I 的变化情况

Fig.3 Variation condition of IOR interval value along with DGC I

范围。进一步分析 DGC I 编号在 [26, 44] 之间时 IOR 区间值的变化情况, 如图 4 所示。

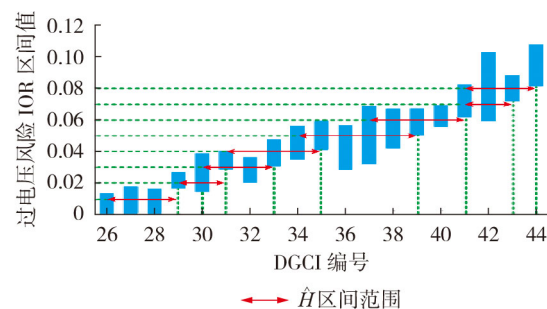


图4 DGC I 编号在 [26, 44] 之间时 IOR 区间值的变化情况

Fig.4 Variation condition of IOR interval value when DGC I number is within [26, 44]

在此基础上, 可得到基于电压灵敏度的配电网 DG 接纳能力区间值 $\hat{H}$ 计算结果, 如表 1 所示。

表1 DG 接纳能力区间值计算结果
Table 1 Calculative results of DG hosting capacity interval value

$\lambda'_{\max}$	最小不可行 DGC I 编号区间	$\hat{H} / \text{kW}$
0.01	[26, 29]	[2 500, 2 800]
0.02	[29, 31]	[2 800, 3 000]
0.03	[30, 33]	[2 900, 3 200]
0.04	[31, 35]	[3 000, 3 400]
0.05	[34, 39]	[3 300, 3 800]
0.06	[37, 41]	[3 600, 4 000]
0.07	[41, 43]	[4 000, 4 200]
0.08	[41, 44]	[4 000, 4 300]
0.09	[42, 45]	[4 100, 4 400]

为验证电压灵敏度方法兼顾 DG 接纳能力分析的准确性与快速性的效果, 进一步将基于复仿射潮流的 DG 接纳能力分析方法(记为方法 I)与基于电压灵敏度方法的 DG 接纳能力分析方法(记为方法 II)进行对比。对于 IEEE 33 节点配电网和湖北 55 节点配电网, 当仿真参数相同时, 2 种分析方法的 DG 接纳能力区间值 $\hat{H}$ 计算结果和计算时间对比分别如图 5 和表 2 所示。

由图 5 和表 2 可见: 2 种分析方法计算得到的

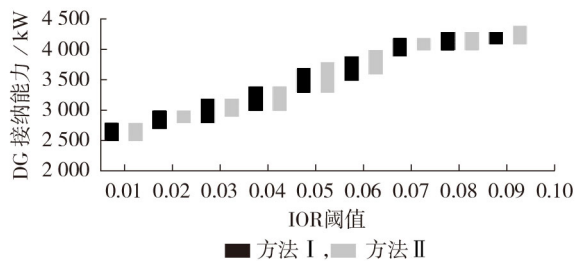


图5 2种分析方法的计算结果对比

Fig.5 Result comparison between two analysis methods

表2 2种分析方法的计算时间对比

Table 2 Calculation time comparison between two analysis methods

算例	DG 配置场景总数	计算时间 / min	
		方法 I	方法 II
IEEE 33 节点配电网	1.98×10^5	24.15	15.35
湖北 55 节点配电网	3.30×10^5	42.72	27.26

DG 接纳能力区间值 $\bar{H}$ 整体上较接近;对于 IEEE 33 节点配电网,当 DG 配置场景总数为 1.98×10^5 时,方法 II 相比方法 I 计算时间缩短 36.44%;对于湖北 55 节点配电网,当 DG 配置场景总数为 3.30×10^5 时,方法 II 相比方法 I 计算时间缩短 36.19%。由此验证了所提电压灵敏度方法兼顾 DG 接纳能力分析的准确性与快速性的效果。

5 结论

本文基于区间数学和仿射数学进行配电网 DG 接纳能力的不确定性分析,主要结论如下:

1) 采用区间数学和仿射数学量化多元不确定性因素与电压灵敏度间的映射关系,推导基于雅可比矩阵的仿射三相电压灵敏度方程,有效追踪节点电压幅值对节点注入功率不确定性变化的灵敏度;

2) 提出基于雅可比矩阵电压灵敏度的配电网 DG 接纳能力不确定性分析方法,与基于复仿射潮流的 DG 接纳能力分析相比,所提方法的计算精度能够得到保证,同时在 IEEE 33 节点配电网和湖北 55 节点配电网中,所提方法的仿真计算时间可分别缩短 36.44% 和 36.19%,由此验证了所提方法兼顾 DG 接纳能力分析的准确性与快速性的效果。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 中华人民共和国国务院新闻办公室. 新时代的中国能源发展[N]. 人民日报, 2020-12-22(10).

[2] 张彦涛, 宋炳兵, 周毅, 等. 基于多级协同的受端电网接纳能力评估分析方法及应用[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(6): 121-126.

ZHANG Yantao, SONG Bingbing, ZHOU Yi, et al. Evaluation and analysis method of receiving end power grid acceptance capacity based on multi-level collaboration and its application[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(6): 121-126.

[3] 邱伟强, 王茂春, 林振智, 等. “双碳”目标下面向新能源消纳场景的共享储能综合评价[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 244-255.

QIU Weiqiang, WANG Maochun, LIN Zhenzhi, et al. Comprehensive evaluation of shared energy storage towards new energy accommodation scenario under targets of carbon emission peak and carbon neutrality[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 244-255.

[4] 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 Yichao, WANG Shouxiang, YAN Bingke. Review on evaluation methods and improvement techniques of DG hosting capacity in distribution network[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2258-2266.

[5] 徐志成, 赵波, 丁明, 等. 基于电压灵敏度的配电网光伏消纳能力随机场景模拟及逆变器控制参数优化整定[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(6): 1578-1587.

XU Zhicheng, ZHAO Bo, DING Ming, et al. Photovoltaic hosting capacity evaluation of distribution networks and inverter parameters optimization based on node voltage sensitivity[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(6): 1578-1587.

[6] 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.

[7] 蒋平, 严栋, 吴熙. 考虑风光互补的间歇性能源准入功率极限研究[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1965-1970.

JIANG Ping, YAN Dong, WU Xi. Research on penetration level of intermittent energy considering wind and PV hybrid system[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1965-1970.

[8] ABAD M S S, MA J, ZHANG D W, et al. Probabilistic assessment of hosting capacity in radial distribution systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(4): 1935-1947.

[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] WANG S X, CHEN S J, GE L J, et al. Distributed generation hosting capacity evaluation for distribution systems considering the robust optimal operation of OLTC and SVC[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 1111-1123.

[11] CHEN X, WU W C, ZHANG B M. Robust capacity assessment of distributed generation in unbalanced distribution networks incorporating ANM techniques[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(2): 651-663.

[12] CHEN X, WU W C, ZHANG B M, et al. Data-driven DG capacity assessment method for active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3946-3957.

[13] DE OLIVEIRA L W, DA SETA F S, DE OLIVEIRA E J. Optimal reconfiguration of distribution systems with representation of uncertainties through interval analysis[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 83: 382-391.

[14] VACCARO A, CANIZARES C A, VILLACCI D. An affine arithmetic-based methodology for reliable power flow analysis in

- the presence of data uncertainty[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 624-632.
- [15] WANG S X, HAN L, WU L. Uncertainty tracing of distributed generations via complex affine arithmetic based unbalanced three-phase power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6): 3053-3062.
- [16] WANG S X, WANG K, TENG F, et al. An affine arithmetic-based multi-objective optimization method for energy storage systems operating in active distribution networks with uncertainties[J]. Applied Energy, 2018, 223: 215-228.
- [17] LUIZ J, COMBA D, STOLFI J. Affine arithmetic and its applications to computer graphics[C]//Proceedings of Brazilian Symposium on Computer Graphics and Image. Recife, Brazil: [s.n.], 1993: 9-18.
- [18] DING F, MATHER B. On distributed PV hosting capacity estimation, sensitivity study, and improvement[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(3): 1010-1020.
- [19] DUBEY A, SANTOSO S. On estimation and sensitivity analysis of distribution circuit's photovoltaic hosting capacity[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 2779-2789.
- [20] 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.

作者简介:



晋 飞

晋 飞(1980—),男,高级工程师,主要研究方向为智能配电网运行(**E-mail**: 32145672@qq.com);

董逸超(1992—),男,工程师,博士,通信作者,研究方向为智能配电网评估与规划(**E-mail**: ycdong007@tju.edu.cn);

王守相(1973—),男,教授,博士,研究方向为智能配电网优化与规划(**E-mail**: sxwang@tju.edu.cn)。

(编辑 王锦秀)

Uncertainty analysis of DG hosting capacity in distribution network based on voltage sensitivity

JIN Fei¹, LIU Jingli¹, LIU Xiaoliang¹, WEN Guoqiang¹, DONG Yichao², WANG Shouxiang², ZHAO Qianyu²

(1. Weifang Power Supply Company of State Grid Shandong Electric Power Company, Weifang 261061, China;

2. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: In order to improve the accuracy of DG (Distributed Generation) hosting capacity analysis under uncertain environment, the interval mathematic and affine mathematic are adopted to quantify the mapping relationship between uncertainty factors and voltage sensitivity, the affine three-phase voltage sensitivity equations based on Jacobian matrix are derived, and the sensitivity of node voltage magnitude to the uncertainty variation of node injection power is effectively tracked. The overvoltage risk caused by the uncertainty of DG configuration mode is considered, and an uncertainty analysis method of DG hosting capacity is proposed based on voltage sensitivity of Jacobian matrix, which considers both the accuracy and rapidity of DG hosting capacity analysis, and is helpful to assist planners for quick online DG hosting capacity analysis and comprehensive and accurate decision making. The case analysis results of IEEE 33-bus distribution network show that the proposed method can reduce simulation time by 36.44% on the premise of ensuring the computation accuracy, which verifies the rationality and effectiveness of the proposed method.

Key words: distribution network; DG hosting capacity; voltage sensitivity; uncertainty analysis

附录 A

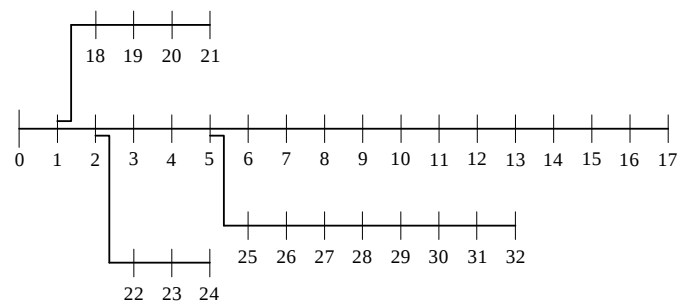
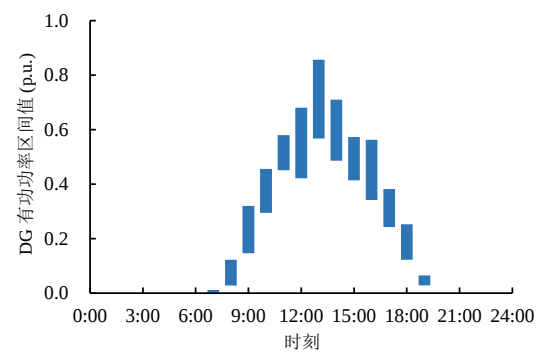
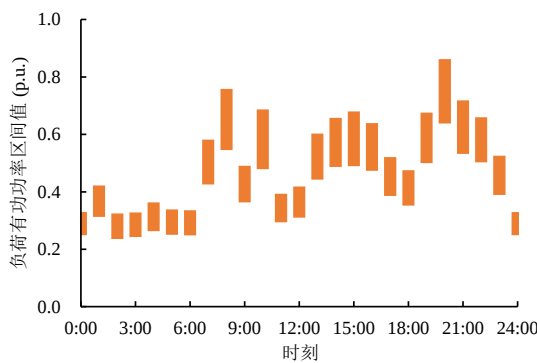


图 A1 IEEE 33 节点配电网拓扑
Fig.A1 Topology of IEEE 33-bus distribution network



(a) DG 有功功率区间特性



(b) 负荷有功功率区间特性

图 A2 DG 和负荷区间变化特性
Fig.A2 Interval variation characteristics of DGs and loads