

DOI: 10.7667/PSPC180055

基于概率潮流法的含分布式光伏的配电网电压状态评估

毛锐¹, 袁康龙², 钟杰峰², 陈思思², 林创²

(1. 广东电网公司肇庆供电局, 广东 肇庆 526000; 2. 中能建广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510660)

摘要: 为克服高渗透分布式电源接入所导致的传统配电网运行状态评估方法存在盲区的困难, 对计及分布式电源随机特性的配电网电压质量的状态定量评估方法进行研究。首先引入一种半不变量结合 Gram-Charlier 级数展开的概率潮流计算方法, 并建立含系统电压平均越限概率、节点电压置信区间和节点电压最大越限概率指标的评估体系。然后以分布式光伏为代表, 构建了其有功出力服从 Beta 分布的概率模型, 并定义一种改进的计及光伏波动特性的光伏渗透率指标, 由此定量评估不同光伏渗透率对配电网电压质量的影响。最后验证该算法用于配电网电压质量状态评估的可行性。

关键词: 分布式光伏; 电压质量; Gram-Charlier 级数; 概率评估; 光伏渗透率

Distribution network voltage state assessment with distributed generation based on probabilistic power flow method

MAO Rui¹, YUAN Kanglong², ZHONG Jiefeng², CHEN Sisi², LIN Chuang²

(1. Zhaoqing Power Supply Bureau of Guangdong Power Grid Corporation, Zhaoqing 526000, China; 2. China Energy Construction Group Guangdong Electric Power Design and Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510660, China)

Abstract: To overcome the blind zone in the evaluation method of the operation status of the traditional distribution network caused by the high penetration of distributed power, this paper studies the state quantitative evaluation method of distribution network voltage quality which takes the random characteristics of distributed generation into account. In this paper, a method based on the invariant and Gram-Charlier series to calculate the probability power flow is introduced, and the evaluation system including the average over-limit probability of system voltage, the voltage confidence interval of node voltage and the maximum over-limit probability of node voltage is established. Then taking the distributed photovoltaic as the representative, the probabilistic model whose active output follows Beta distribution is proposed and an improved index of photovoltaic permeability that includes the photovoltaic fluctuation characteristics is defined so as to quantitatively evaluate the influence of different photovoltaic permeability on the voltage quality of the distribution network. Finally, the feasibility of this algorithm for the assessment of voltage quality status of distribution network is verified.

This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd (No. 031200KK52160003).

Key words: distributed photovoltaic; voltage quality; Gram-Charlier series; probability assessment; photovoltaic permeability

0 引言

分布式电源(Distributed Generations, DG)与大电网供电相互补充、协调大量接入, 是综合利用现有资源和设备, 为用户提供可靠和优质电能的最佳

方式^[1]。然而, 随着 DG 的大量接入, 配电网的运行状态势必受到影响。一方面, 改变了传统配电网的潮流特性; 另一方面, 风电、光伏^[2-3]等分布式电源受外界环境影响, 其出力存在不确定性^[4], 因此传统的确定性潮流计算方法将不再适用, 需引入概率潮流计算理论, 以准确、可靠地分析分布式电源接入对配电网运行状态及稳定性的影响^[5-6]。

目前, 有关分布式电源接入对配电网电压质量

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目资助 (031200KK52160003)

的影响已有一定的研究^[7-8]。文献[9]在分析配电网电压变化情况的基础上,还分析了光伏接入对网络损耗的影响,并基于 DigSILENT 平台搭建了无锡市 10kV 配电网的典型线路模型进行了仿真计算。文献[10]提出了含多种分布式电源的配电网综合评估方法,从不同角度建立综合评价指标体系。此外,也有专家对基于概率潮流计算方法来评估分布式电源接入对配电网的电能质量影响作了一些研究。基于概率的潮流算法主要可分为 3 类^[11],分别是模拟法^[12-15]、解析法^[16-17]和近似法^[18-23]。文献[12]提出一种基于 Monte-Carlo 模拟的概率潮流计算方法,并根据输出随机变量的概率特征建立了一套完整的风险评估体系;文献[13]将 Monte-Carlo 模拟法应用到微电网运行场景,得出微电源逆变器控制参数的调节可有效降低微电网电压和电流越限概率的结论;上述模拟法虽能处理不确定的因素但其计算量大且周期长。文献[16]针对 A 型 Gram-Charlier 级数展开求解输出随机变量概率分布情况会出现负值的不足,引入了 C 型 Gram-Charlier 级数展开式,仿真分析了风电并网带来的影响,但其缺点是需要复杂的数学推导与反复迭代。而近似法中主要包括点估计法^[18-21]、一次二矩法^[22]和状态变换法^[23],目前近似法潮流计算算法中,计算结果以均值和方差为主要目标,如何获得状态变量较为准确的整体概率分布是存在的难题。上述对含有分布式电源的配电网状态评估还需要进一步研究。

在此,本文以结合半不变量法和 Gram-Charlier 级数展开方法的概率潮流算法为理论基础,建立分布式光伏出力服从 Beta 分布概率模型。并通过定义含系统电压平均越限概率、节点电压置信区间和节点电压最大越限概率指标的概率评估体系实现配电网电压质量评估。最后通过算例仿真对计及负荷波动和光伏渗透率对配电网电压的影响展开研究,并与 Monte-Carlo 模拟法做对比,验证了该算法的可行性。

1 概率潮流算法理论基础

1.1 线性化概率潮流计算模型

在概率潮流的 4 类计算模型中,本文采用线性化的潮流计算模型,并以极坐标形式的牛顿-拉夫逊作为潮流计算方法,将节点电压 U 和支路功率 Z 在各自的基准运行点处按泰勒级数展开,并忽略二次及高次项,可得

$$\Delta U = \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \frac{\Delta V}{V} \end{bmatrix} = -J_0^{-1} \Delta W = -S_0 \Delta W \quad (1)$$

$$\Delta Z = H_0 \Delta U = -H_0 J_0^{-1} \Delta W = -H_0 S_0 \Delta W \quad (2)$$

式中: ΔU 、 ΔW 、 ΔZ 分别指的是节点电压随机扰动量、节点注入功率的随机扰动量和支路功率随机扰动量; J_0 、 H_0 分别指的是节点注入功率不平衡量、支路功率对节点电压幅值 V 和相角 δ 的偏导数。

已知节点注入功率的概率分布情况且各注入功率相互独立时,可通过卷积计算并转换得到节点电压和支路功率的概率分布情况。

1.2 半不变量概念及求解

基于半不变量^[24]的概率潮流计算基本思想为:根据系统初始确定条件进行潮流计算,并将该计算结果当作基准运行点;然后在基准运行点上叠加系统各种因素的随机干扰,并用各阶半不变量加以描述;最后计算得到系统各状态变量的各阶半不变量,并结合级数展开式计算得到其概率分布情况。

假设 $F(x)$ 是随机变量 X 的累积分布函数,令 t 为任意一实数,则函数 $g(x) = e^{jtx} = \cos(tx) + j\sin(tx)$ 在 $(-\infty, +\infty)$ 上关于 $F(x)$ 的积分称为 $F(x)$ 的特征函数,具体表示为

$$\psi(t) = E(e^{jtx}) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{jtx} dF(x) \quad (3)$$

将 $F(x)$ 的特征函数取对数并在 $t=0$ 处展开为麦克劳林级数,整理以下等式:

$$\log \psi(t) = \sum_{k=1}^n \frac{\gamma_k}{k!} (jt)^k + O(t^n) \quad (4)$$

式中, γ_k 是半不变量,又称累积量,下标 k 表示半不变量的阶数。

本文中半不变量采用蒙特卡洛法求解,先计算随机变量的矩特征,再计算其半不变量,具体如式(5)、式(6)所示。

$$\alpha_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_{si}^k \quad (5)$$

$$\begin{cases} \gamma_k = \alpha_k, & k=1 \\ \gamma_k = \alpha_k - \sum_{i=1}^{k-1} C_{k-1}^i \alpha_i \gamma_{k-i}, & k>1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: α_k 表示随机变量的 k 阶原点矩; x_{si} 表示随机变量的数据样本中第 i 个数据点; n 表示数据样本容量; C_{k-1}^i 表示从 $(k-1)$ 个不同元素中取出 i 个元素的组合,其中满足 $i \leq k-1$ 。

1.3 Gram-Charlier 级数展开

Gram-Charlier 级数展开是一种基于标准正态分布函数的级数展开方法,其是根据随机变量的各阶半不变量,近似求解得到该随机变量的概率密度函数和累积分布函数。

假定随机变量 X 的期望值为 μ_X 、标准差为

σ_x , 由 $\bar{X} = \frac{X - \mu_x}{\sigma_x}$ 计算得到标准化后的随机变量。

根据 A 型 Gram-Charlier 级数展开式可计算得到标准化随机变量 \bar{X} 的概率密度函数和累积分布函数, 其表达式分别如式(7)和式(8)所示。

$$f_{\bar{X}}(\bar{x}) = \phi(\bar{x}) + \frac{A_1 \phi^{(1)}(\bar{x})}{1!} + \dots + \frac{A_n \phi^{(n)}(\bar{x})}{n!} \quad (7)$$

$$F_{\bar{X}}(\bar{x}) = \int_{-\infty}^{+\infty} \phi(\bar{x}) d\bar{x} + \frac{A_1 \phi(\bar{x})}{1!} + \dots + \frac{A_n \phi^{(n-1)}(\bar{x})}{n!} \quad (8)$$

式中: $\phi(\bullet)$ 表示服从标准正态分布随机变量的概率密度函数; $\phi^{(n)}(\bullet)$ 表示 $\phi(\bullet)$ 的 n 阶求导的结果; A_1, A_2, \dots, A_n 表示 Gram-Charlier 级数展开的各项系数, 可根据式(9)计算得到。

$$\begin{aligned} A_1 &= 0, & A_5 &= -\gamma_{\bar{X}}^{(5)} \\ A_2 &= 0, & A_6 &= \gamma_{\bar{X}}^{(6)} + 10(\gamma_{\bar{X}}^{(3)})^2 \\ A_3 &= -\gamma_{\bar{X}}^{(3)}, & A_7 &= -(\gamma_{\bar{X}}^{(7)} + 35\gamma_{\bar{X}}^{(3)}\gamma_{\bar{X}}^{(4)}) \\ A_4 &= \gamma_{\bar{X}}^{(4)}, & A_8 &= \gamma_{\bar{X}}^{(8)} + 56\gamma_{\bar{X}}^{(3)}\gamma_{\bar{X}}^{(5)} + 35(\gamma_{\bar{X}}^{(4)})^2 \end{aligned} \quad (9)$$

式中, $\gamma_{\bar{X}}^{(k)}$ 表示标准化随机变量 \bar{X} 的 k 阶半不变量。实际应用中, 先计算得到待求随机变量 X 的 k 阶半不变量 $\gamma_X^{(k)}$, 再根据其线性性质即可计算得到 $\gamma_{\bar{X}}^{(k)}$, 最后根据式(7)、式(8)计算得到标准化随机变量 \bar{X} 的 $f_{\bar{X}}(\bar{x})$ 和 $F_{\bar{X}}(\bar{x})$ 。

为计算待求随机变量 X 的 $f_X(x)$ 和 $F_X(x)$, 需对其进行标准化还原处理, 如式(10)和式(11)所示。

$$\begin{aligned} F_X(x) &= P(X \leq x) = P(\delta_X \bar{X} + \mu_X \leq x) = \\ P\left(\bar{X} \leq \frac{x - \mu_X}{\sigma_X}\right) &= F_{\bar{X}}\left(\frac{x - \mu_X}{\sigma_X}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

$$f_X(x) = \frac{1}{\sigma_X} f_{\bar{X}}\left(\frac{x - \mu_X}{\sigma_X}\right) \quad (11)$$

2 分布式光伏随机特性建模

在短时间尺度上, 太阳能光照强度的随机变化服从 Beta 分布, 即

$$f_R\left(\frac{r}{r_{\max}}\right) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{r}{r_{\max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{r}{r_{\max}}\right)^{\beta-1} \quad (12)$$

式中: $f_R(\bullet)$ 表示光照强度随机变量 R 的概率密度函数; r 和 r_{\max} 分别表示该时段内光照强度的实际值和最大值; $\Gamma(\bullet)$ 表示 Gamma 函数; α 和 β 分别表

示 Beta 分布的两个形状参数, 具体可根据式(13)和式(14)计算得到。

$$\alpha = \frac{\mu_{\frac{r}{r_{\max}}}^2 \left(1 - \frac{\mu_{\frac{r}{r_{\max}}}}{\frac{r}{r_{\max}}}\right)}{\sigma_{\frac{r}{r_{\max}}}^2} - \frac{\mu_{\frac{r}{r_{\max}}}}{\frac{r}{r_{\max}}} \quad (13)$$

$$\beta = \frac{\mu_{\frac{r}{r_{\max}}} \left(1 - \frac{\mu_{\frac{r}{r_{\max}}}}{\frac{r}{r_{\max}}}\right)^2}{\sigma_{\frac{r}{r_{\max}}}^2} - \left(1 - \frac{\mu_{\frac{r}{r_{\max}}}}{\frac{r}{r_{\max}}}\right) \quad (14)$$

式中, $\mu_{\frac{r}{r_{\max}}}$ 和 $\sigma_{\frac{r}{r_{\max}}}$ 分别表示该时段内光照强度实际值与最大值比值 r/r_{\max} 的期望值和标准差。

当已知太阳能光照强度分布情况时, 近似认为光伏输出有功功率和光照强度呈线性关系, 具体可表示为

$$P_{PV} = A \cdot \eta \cdot r \quad (15)$$

式中: P_{PV} 为该时段内光伏输出功率实际值; A 为光伏电池板的总面积; η 为光电转换效率。

由此可求出分布式光伏输出有功功率如式(16)所示, 无功功率概率模型如式(17)所示。

$$f_{P_{PV}}(p_{PV}) = \frac{1}{A\eta r_{\max}} \cdot \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \cdot \left(\frac{p_{PV}}{p_{PV\max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{p_{PV}}{p_{PV\max}}\right)^{\beta-1} \quad (16)$$

$$f_{Q_{PV}}(q_{PV}) = \frac{1}{A\eta r_{\max}} \cdot \frac{1}{\tan \phi_{PV}} \cdot \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \cdot \left(\frac{q_{PV}}{q_{PV\max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{q_{PV}}{q_{PV\max}}\right)^{\beta-1} \quad (17)$$

式中, 光伏无功功率 $Q_{PV} = P_{PV} \cdot \tan \phi_{PV}$, 其中 $\cos \phi_{PV}$ 为光伏逆变器控制下的光伏运行功率因数。

3 配电网电压质量评估指标

为了全面、准确地评估含分布式光伏配电网的电压变化情况, 定义了系统电压平均越限概率、节点电压置信区间和节点电压最大越限概率三个指标, 具体表示如下。

1) 系统电压平均越限概率 $P_{V\text{offlimits}}$

为对含分布式光伏的配电网稳态运行时电压越限情况进行评估, 需要将整个系统的各节点电压越限情况纳入考量, 通过求解系统电压的平均越限概率来描述该系统的整体电压越限情况。假定系统共有 n 个节点, 并给定节点电压的合格区间, 则节

$$P\left(b_1 \leq \frac{\sum P_{PVi}}{\sum A_i \eta_i r_{\max}} \leq b_2\right) = 1 - CL \quad (24)$$

$$\omega_{PV} = m_1 \frac{b_1 \sum A_i \eta_i r_{\max}}{\sum \mu_{P_i} (1 + a_2 \xi_{P_i})} + m_2 \frac{b_2 \sum A_i \eta_i r_{\max}}{\sum \mu_{P_i} (1 + a_1 \xi_{P_i})} \quad (25)$$

式中: $(1-CL)$ 表示置信度; b_1 、 b_2 指的是服从 Beta 分布的随机变量 $\frac{\sum P_{PVi}}{\sum A_i \eta_i r_{\max}}$ 概率分布置信区间的上

下限; a_1 、 a_2 表示服从标准正态分布随机变量置信区间的上下限; m_1 、 m_2 表示权重系数。

首先利用 HOMER 软件获取 GMT+08:00 时区中国广州市(23°6'N, 113°2'E)的光照强度模拟数据, 可得光照强度最大值 $r_{\max}=1.1335 \text{ kW/m}^2$ 。光照强度近似服从 Beta 分布, 且通过非线性拟合得到形状参数 α 为 0.6798, β 为 1.7788。给定置信度 $(1-CL)$ 为 0.95, 通过查表可知 a_1 为 -1.96, a_2 为 1.96。

根据光照强度数据具体分布情况, 给定 b_1 为 0.00235、 b_2 为 0.834, m_1 为 0.80, m_2 为 0.20。系统负荷总有功为 414.04 kW, 假定各节点负荷波动程度相同且负荷波动系数为 10%。如图 2 所示, 在节

点 31、32、33 和 34 各接入额定功率为 200 kW 的光伏电源, 假定各光伏电源按功率因数为 1 运行, 即无功输出为 0; 此外, 各光伏电源的并联电池阵列特性一致, 光电转换效率均为 13%, 则此时光伏渗透率仅取决于各光伏并网节点上电池阵列的总面积。将上述各参数代入式(23), 并设置一系列光伏电池阵列的总面积的数值, 则可研究不同光伏渗透率下配电网电压质量的变化情况。具体参数如表 1 所示。

表 1 不同光伏渗透率下各光伏电源的参数设置
Table 1 Parameter setting of photovoltaic power supply under different PV permeability

A_{31}/m^2	A_{32}/m^2	A_{33}/m^2	A_{34}/m^2	功率因数	转换效率	光伏渗透率
200	200	200	800	1	13%	10.42%
400	400	400	1600	1	13%	20.83%
600	600	600	2400	1	13%	31.25%
800	800	800	3200	1	13%	41.67%
1000	1000	1000	4000	1	13%	52.08%

不同的光伏渗透率下仿真得到的相应节点电压越限概率评估指标具体如表 2 和表 3 所示。

表 2 不同光伏渗透率下光伏并网节点电压置信区间

Table 2 Confidence interval of photovoltaic grid-connected node under different photovoltaic permeability

光伏渗透率	10%	20%	30%	40%	50%
31 节点无光伏			[0.946,0.958]		
31 节点光伏接入	[0.952,0.974]	[0.954,0.993]	[0.957,1.012]	[0.959,1.031]	[0.961,1.050]
32 节点无光伏			[0.945,0.958]		
32 节点光伏接入	[0.951,0.974]	[0.954,0.994]	[0.956,1.013]	[0.958,1.032]	[0.961,1.050]
33 节点无光伏			[0.946,0.958]		
33 节点光伏接入	[0.952,0.974]	[0.954,0.993]	[0.957,1.012]	[0.959,1.031]	[0.961,1.049]
34 节点无光伏			[0.945,0.958]		
34 节点光伏接入	[0.951,0.974]	[0.954,0.994]	[0.956,1.013]	[0.958,1.032]	[0.961,1.050]

表 3 不同光伏渗透率下系统电压平均越限概率与最大越限概率

Table 3 Average and maximum limit probability of the system voltage under different photovoltaic permeability

光伏渗透率	10%	20%	30%	40%	50%
无光伏系统平均越限概率	8.263%	8.263%	8.263%	8.263%	8.263%
光伏接入系统平均越限概率	0.0259%	0.0196%	0.0154%	0.0177%	0.9160%
无光伏系统最大越限概率	28.643%(34)	28.643%(34)	28.643%(34)	28.643%(34)	28.643%(34)
光伏接入系统最大越限概率	1.098%(34)	0.0689%(34)	0.0112%(17)	0.0515%(17)	2.218%(34)

综合以上各图表, 分析可得知以下结论:

1) 由表 2 可知, 当光伏接入时, 光伏并网节点电压置信区间上下限均有升高, 表明了光伏接入对网络节点电压有一定的抬升作用; 此外, 随着光伏渗透率逐渐增大, 并网节点电压抬升作用愈加明显。

2) 随着光伏渗透率逐渐增大, 并网点电压置信

区间逐渐变宽, 波动程度增加。当光伏渗透率从 10% 增大至 50% 时, 并网点电压置信区间宽度从 0.022 增大至 0.089, 置信区间下限从 0.951 增大至 0.961, 置信区间上限从 0.974 增大至 1.050。说明了光伏渗透率的增加不仅可以明显抬高节点电压期望值, 而且明显增大了电压的波动上限, 也增加了电压越限风险。

3) 由表 3 可知, 分布式光伏的接入明显改善了系统电压平均越限概率和节点电压最大越限概率, 同时改善甚至转移了线路末端节点的电压安全薄弱性。当光伏渗透率由 10% 增大至 50% 时, 无论是系统电压平均越限概率, 还是节点电压最大越限概率, 均呈现出先减小后增大的趋势, 即低渗透率光伏的接入有利于改善节点低电压问题, 而高渗透率光伏的接入会增加节点电压越上限的风险。因此, 需要经过定义指标进行定量评估, 为光伏接入容量的配置规划提供建议。

为确保上述所提算法的精度, 以 Monte-Carlo 模拟法计算结果当作参考基准, 通过对比分析求证。为了消除线路空载导致的误差, 本章节采用了改进 IEEE34 节点系统进行算例仿真, 并假定各节点负荷波动系数均为 10%; 在节点 31、32、33 和 34 上各接入额定功率为 200 kW 的光伏电源, 具体参数见表 1 中第 2 行数据。设置蒙特卡洛模拟抽样次数为 10 000 次, 仿真结果如下。

由曲线图 3—图 6 可知, 以蒙特卡洛法(MC)计

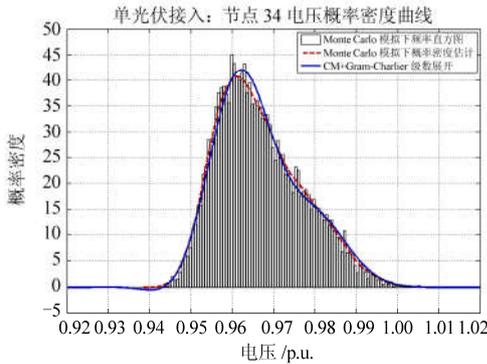


图 3 CM 与 MC 计算的节点 34 电压概率密度曲线对比
Fig. 3 Comparison of voltage probability density curve for node 34 calculated by CM and MC method

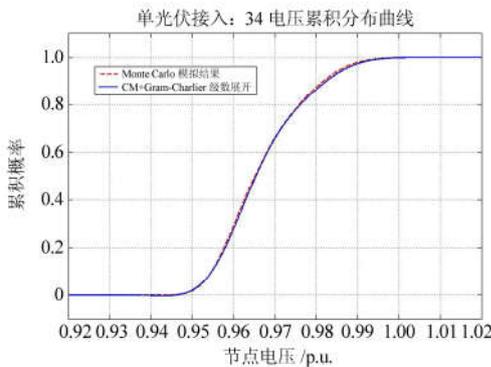


图 4 CM 与 MC 计算的节点 34 电压累积分布曲线对比
Fig. 4 Comparison of voltage cumulative distribution curve for node 34 calculated by CM and MC method

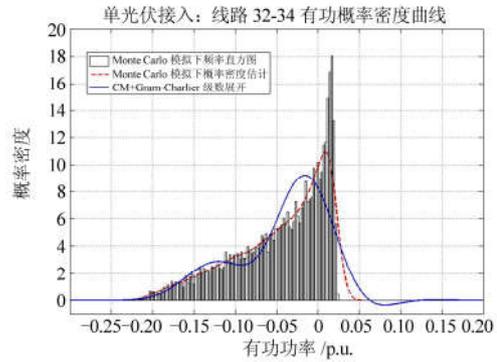


图 5 CM 与 MC 计算所得支路 32-34 有功功率概率密度曲线对比

Fig. 5 Comparison of probability density curves of active power for 32-34 branches calculated by CM and MC method

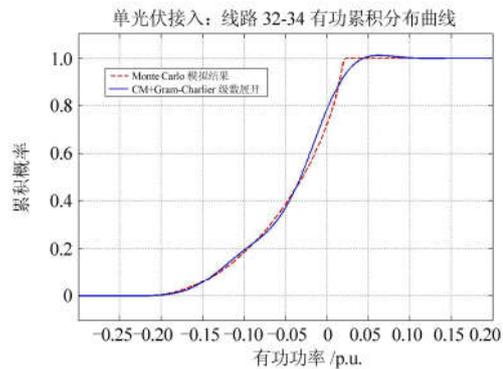


图 6 CM 与 MC 计算所得支路 32-34 有功功率累积分布曲线对比

Fig. 6 Comparison of cumulative distribution curves of active power for 32-34 branches calculated by CM and MC method

算结果为参考基准, 半不变量法(CM)拟合效果良好。其中, 电压幅值概率分布曲线拟合情况比支路有功功率分布曲线拟合情况更精确。因此, 采用半不变量结合 Gram-Charlier 级数展开的方法在针对含分布式光伏配电网电压质量的概率评估方面具有较高的准确性和可行性。

5 结论

1) 低渗透率光伏的接入有利于改善节点低电压问题, 而高渗透率光伏的接入会增加节点电压越上限的风险。同时, 电压最大越限概率节点可能出现转移, 即光伏接入在改善线路末端电压安全性的同时, 甚至可能转移系统电压安全的薄弱环节。

2) 随着接入光伏渗透率的逐渐增大, 光伏并网节点置信区间逐渐增大, 而区间下限变化幅度微小。说明了利用光伏改善节点低电压问题的同时需

注意节点电压波动越上限的可能性。

3) 以 Monte-Carlo 模拟法计算结果作为参照基准, 利用半不变量结合 Gram-Charlier 级数展开方法进行考虑分布式光伏随机特性的配电网电压质量评估是切实可行的。

参考文献

- [1] 雒浪, 吴杰康, 杨秀菊, 等. 新能源环境下配电网无功电压协调优化[J]. 广东电力, 2018, 31(6): 54-60.
LUO Lang, WU Jiekang, YANG Xiujun, et al. Coordination and optimization for reactive power voltage of power distribution network under new energy environment[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(6): 54-60.
- [2] 王冬, 王黎, 黄静. 光伏组件自然老化年度衰减分析[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2018, 31(3): 375-380.
WANG Dong, WANG Li, HUANG Jing. Analysis on annual attenuation rate of PV modules due to natural aging[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2018, 31(3): 375-380.
- [3] 张玉, 莫寒, 张烈平. 基于模糊支持向量机的光伏发电量预测[J]. 热力发电, 2017, 46(1): 116-120.
ZHANG Yu, MO Han, ZHANG Lieping. Photovoltaic power prediction based on fuzzy support vector machine[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(1): 116-120.
- [4] 黄伟, 陈雪, 林怀德, 等. 考虑光伏不确定性的配电网负荷特性概率评估[J]. 广东电力, 2018, 31(6): 84-90.
HUANG Wei, CHEN Xue, LIN Huaide, et al. Evaluation on load characteristic probability of power distribution network considering photovoltaic uncertainty[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(6): 84-90.
- [5] 邱宜彬, 欧阳誉波, 李奇, 等. 考虑多风电场相关性的场景概率潮流计算及无功优化[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 61-68.
QIU Yibin, OUYANG Yubo, LI Qi, et al. Scenario probabilistic load calculation and reactive power optimization considering wind farms correlation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 61-68.
- [6] 李升, 姜程程, 赵之瑜, 等. 分布式光伏电站接入低压配电网系统暂态电压稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 67-72.
LI Sheng, JIANG Chengcheng, ZHAO Zhiyu, et al. Study of transient voltage stability for distributed photovoltaic power plant integration into low voltage distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 67-72.
- [7] 崔红芬, 汪春, 叶季蕾, 等. 多接入点分布式光伏发电系统与配电网交互影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 91-97.
CUI Hongfen, WANG Chun, YE Jilei, et al. Research of interaction of distributed PV system with multiple access points and distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 91-97.
- [8] 金卓勃, 向铁元, 陈红坤, 等. 考虑电能质量问题的分布式光伏发电接入规划方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 1-8.
JIN Zhuoqing, XIANG Tiejun, CHEN Hongkun, et al. Planning method of distributed photovoltaic power generation considering power quality[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 1-8.
- [9] 缪立恒. 分布式光伏接入对配电网稳态运行影响的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
MIU Liheng. Research on the impact of distributed photovoltaic power network on steady state operation of distribution network[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [10] 陈巧野, 文亚凤, 刘自发, 等. 含有多种分布式电源的配电网综合评估方法[J]. 电力建设, 2015, 36(1): 128-135.
CHEN Qiaoye, WEN Yafeng, LIU Zifa, et al. Distribution network comprehensive evaluation method with multiple distributed power sources[J]. Electric Power Construction, 2015, 36(1): 128-135.
- [11] 刘宇, 高山, 杨胜春, 等. 电力系统概率潮流算法综述[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(23): 127-135.
LIU Yu, GAO Shan, YANG Shengchun, et al. Review on algorithms for probabilistic load flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(23): 127-135.
- [12] EL-KHATTAM W, HEGAZY Y G, SALAMA M M A. Stochastic power flow analysis of electrical distributed generation systems[C] // 2003 IEEE Power Engineering Society General Meeting, July 13-17, 2003, Toronto, Canada: 1141-1144.
- [13] 段玉兵, 龚宇雷, 谭兴国, 等. 基于蒙特卡罗模拟的配电网随机潮流计算方法[J]. 电工技术学报, 2011, 26(1): 274-278.
DUAN Yubing, GONG Yulei, TAN Xingguo, et al. Micro power network random power flow calculation method based on Monte Carlo simulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1): 274-278.
- [14] 张建华, 王昕伟, 蒋程, 等. 基于蒙特卡罗方法的风电场有功出力的概率性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 82-87.
ZHANG Jianhua, WANG Xinwei, JIANG Cheng, et al. Probabilistic assessment of wind farm active power based on Monte-Carlo simulation[J]. Power System Protection

- and Control, 2014, 42(3): 82-87.
- [15] 方斯顿, 程浩忠, 徐国栋, 等. 基于 Nataf 变换含相关性的扩展准蒙特卡洛随机潮流方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(2): 255-263.
FANG Sidun, CHENG Haozhong, XU Guodong, et al. A Nataf transformation based on extended quasi Monte Carlo simulation method for solving probabilistic load flow problems with correlated random variables[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(2): 255-263.
- [16] 高立志. 考虑风电场间歇性的电力系统风险评估[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
GAO Lizhi. Power system risk assessment considering in intermittent of wind farms[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2012.
- [17] 刘小团, 赵晋泉, 罗卫华, 等. 基于 TPNT 和半不变量法的考虑输入量相关性概率潮流算法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 13-18.
LIU Xiaotuan, ZHAO Jinquan, LUO Weihua, et al. A TPNT and cumulants based probabilistic load flow approach considering the correlation variables[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 13-18.
- [18] 李一铭, 李文沅, 颜伟. 考虑风速有界性的概率潮流点估计法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1606-1612.
LI Yiming, LI Wenyuan, YAN Wei. Probabilistic power flow using the point estimate method considering bounded wind speeds[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1606-1612.
- [19] 周玮, 姜汀, 胡姝博, 等. 基于两点估计法的交直流混合系统电压稳定概率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 8-13.
ZHOU Wei, JIANG Ting, HU Shubo, et al. Probabilistic assessment on voltage stability of AC/DC hybrid systems based on two-point estimate method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 8-13.
- [20] 潘炜, 刘文颖, 杨以涵. 概率最优潮流的点估计算法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(16): 28-33.
PAN Wei, LIU Wenyong, YANG Yihan. Point estimation method for probabilistically optimal power flow computation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(16): 28-33.
- [21] 艾小猛, 文劲宇, 杨以涵. 基于点估计和 Gram-Charlier 展开的含风电电力系统概率潮流实用算法[J]. 电网技术, 2013, 33(16): 16-23.
AI Xiaomeng, WEN Jinyu, YANG Yihan. A practical algorithm based on point estimate method and Gram-Charlier expansion for probabilistic load flow calculation of power systems incorporating wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 16-23.
- [22] WAN C, XU Z, DONG Z Y, et al. Probabilistic load flow computation using first-order second-moment method[C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting, July 22-26, 2012, San Diego, Canada: 1-6.
- [23] 刘利民, 刘俊勇, 刘友波. Nataf 变换三点估计分布式发电网络的概率潮流分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 41(4): 50-54.
LIU Limin, LIU Junyong, LIU Youbo. Probabilistic power flow analysis of distributed generation network based on Nataf transform three-point estimation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 41(4): 50-54.
- [24] 石东源, 蔡德福, 陈金富, 等. 计及输入变量相关性的半不变量法概率潮流[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 104-114.
SHI Dongyuan, CAI Defu, CHEN Jinfu, et al. Probabilistic load flow calculation based on cumulant method considering correlation between input variables[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 104-114.
- [25] IEEE Distribution Planning Working Group Report. Radial distribution test feeders[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(3): 261-267.

收稿日期: 2018-01-11; 修回日期: 2018-09-29

作者简介:

毛锐(1983—), 男, 本科, 工程师, 主要研究方向为电力系统规划设计; E-mail: mary2514@163.com

袁康龙(1988—), 男, 工学硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统规划设计; E-mail: yuankanglong@gedi.com.cn

钟杰峰(1973—), 男, 工学硕士, 教授级高工, 主要研究方向为电力系统规划设计。E-mail: zhongjiefeng@gedi.com.cn

(编辑 葛艳娜)