引用格式:叶欢欢,曾林俊,颜勤.基于时变Copula函数的分布式光伏接入配电网薄弱点辨识及风险评估[J].电力科学与技术学报,2025,40(6):101-108.
Citation: YE Huanhuan, ZENG Linjun, YAN Qin. Weak point identification and risk assessment of distributed photovoltaic access to distribution network based on time-varying Copula function[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2025,40(6):101-108.

基于时变Copula函数的分布式光伏接入配电网薄弱点辨识及风险评估

叶欢欢[1],曾林俊[2],颜　勤[3]

(1.华南理工大学电力学院,广东 广州 510641;2.长沙理工大学能源与动力工程学院,湖南 长沙 410114;
3.长沙理工大学电气与信息工程学院,湖南 长沙 410114)

摘　要:随着分布式光伏不断发展,配电网电压越限风险与电能质量劣化问题愈发严重。为此,提出一种基于时变Copula函数的分布式光伏接入配电网薄弱点辨识方法,并对其进行风险评估。该法通过分析分布式光伏输出的相关性来识别电力系统元件状态的薄弱性,提升配电网的可靠性。先基于时变Gaussian Copula函数分析分布式光伏出力相关性,实现复杂函数采样,精确描述分布式光伏相关性;再采用Newton-Raphson潮流计算方法的线性化模型,将复杂的非线性化问题简化求解;然后,提出一种基于重复潮流计算的量化方法来评估系统的可靠性,并结合效用理论来识别元件的薄弱环节;最后,通过改进的IEEE 33节点系统对所提方法进行仿真试验。研究结果表明,所提方法可提高分布式光伏出力的精度,定量分析不同分布式光伏比例对电力系统运行风险的影响。

关　键　词:分布式光伏;出力相关性;时变Copula;薄弱点辨识;风险评估
DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2025.06.010　　**中图分类号**:TM73　　**文章编号**:1673-9140(2025)06-0101-08

Weak point identification and risk assessment of distributed photovoltaic access to distribution network based on time-varying Copula function

YE Huanhuan[1], ZENG Linjun[2], YAN Qin[3]

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China; 2. College of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. School of Electrical & Information Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: With the continuous development of distributed photovoltaic (PV), the risk of voltage limit violation and the problem of power quality degradation in the distribution network are becoming increasingly serious. Therefore, a method of weak point identification for distributed PV access to the distribution network based on the time-varying Copula function is proposed, and risk assessment is performed on it. The correlation of distributed PV output is analyzed to identify vulnerabilities in power system component states, and the distribution network reliability is enhanced. First, a time-varying Gaussian Copula function is employed to analyze the force output correlation of distributed PV, achieving complex function sampling and accurately describing the distributed PV correlation. Subsequently, a linearized model derived from the Newton Raphson power flow calculation method is adopted to simplify and solve the complicated nonlinearized problems. Furthermore, a quantitative method based on repeated power flow calculation is proposed for evaluating the reliability of the system, and the utility theory is used for identifying the weak links of components. Finally, simulation experiments are conducted on the proposed method by means of the modified IEEE 33

收稿日期:2025-03-26;**修回日期**:2025-04-07
基金项目:国家自然科学基金(52307080);湖南省自然科学基金(2024JJ6057);湖南省科技创新计划资助项目(2024RC3175)
通信作者:颜　勤(1988—),女,博士,副教授,主要从事电动汽车及新能源接入电力系统运行优化等方面的研究;E-mail: qin.yan@csust.edu.cn

node system. The results demonstrate that the accuracy of distributed PV output can be improved by the proposed method. Additionally, a quantitative analysis is conducted on the effects of different distributed PV penetration ratios on the operational risks of the power system.

Key words: distributed photovoltaic; output correlation; time-varying Copula; weak point identification; risk assessment

在全球能源转型加速推进的浪潮中，以太阳能、风能为主导的可再生能源的规模化接入已成为实现“双碳”目标的核心路径之一[1]。作为太阳能利用的重要形式，分布式光伏在配电网中的渗透率持续攀升[2-4]。然而，分布式光伏出力的强相关性引发的协同波动效应可能导致配电网面临三重技术挑战：其一，节点电压越限风险显著增加；其二，线路过载概率呈指数级增长；其三，谐波畸变率等电能质量指标呈系统性劣化[5-6]。在此背景下，如何构建计及光伏时空相关性的运行风险评估体系，突破传统方法在风险识别精度与计算效率方面的双重局限，已成为提升配电网供电可靠性的关键。

分布式光伏接入背景下的配电网风险评估是识别电网薄弱环节不可或缺的一环。目前，大多数研究是从电力系统元件状态出发，基于风险理论和潮流计算来建立评估指标的[7-8]。在采用确定性潮流计算评估配电网的安全稳定性时，这些方法普遍存在计算负担重、耗时等问题，且这些方法一般仅限于对分布式光伏出力稳定的理想情况进行风险评估，无法充分考量不确定性对系统的影响[9-11]。概率潮流计算方法能有效评估不确定性对系统运行特性的影响。概率潮流计算主要采用3种方法：模拟法、解析法和近似法[12-16]。蒙特卡洛模拟法（Monte Calo simulation，MCS）是这类模拟法中最常用的手段[17]。当样本数量充足时，MCS精度较高且其限制较少[18-20]。近似法旨在简化输出随机变量概率统计特性的估算过程，但当网络节点较多时，近似法会面临计算负担大幅增加的问题[21]。解析法牺牲了精度，但其可对输入和输出的不确定性进行线性化处理，能较快地推导出不确定性因素的输出变量的概率分布[22]。

目前，大多数研究仍主要聚焦基配电系统的风险评估与识别区域薄弱环节[23]。一些薄弱性评估的研究并未考虑分布式光伏的出力相关性。但不可否认的是，分布式光伏出力相关性对风险评估存在较大影响。相较于传统的静态Copula函数，时变Copula函数能更好地反映光伏出力的动态变化过程，即在不同时间段的光伏出力的相关性变化，更准确地描述分布式光伏出力的随机性和相关性。这对识别配电网运行中的系统薄弱环节具有重要的实际意义。

基于这些分析，本文提出基于时变Copula函数的考虑光伏相关性的薄弱点辨识和风险评估方法。先引入时变Copula函数，捕捉分布式光伏出力在时空上的动态变化，使拟合数据更好地贴近实际；再采用以Newton-Raphson潮流计算为基础的线性化模型，简化并求解复杂的非线性化问题；然后，提出一种基于重复潮流计算的量化方法，评估系统的可靠性，并结合效用理论来识别元件的薄弱环节；最后，以改进的IEEE 33节点系统验证所提方法的有效性，进一步分析在不同光伏发电比例下的配电网的风险水平，为分布式光伏系统的接入提供理论上的指导和借鉴。

1 考虑分布式光伏出力相关性的概率潮流研究

1.1 基于时变Copula函数的分布式光伏相关性分析

本文采用时变Copula函数构建分布式光伏的相关性模型。相较于传统的静态Copula函数，时变Copula能更好地捕捉光伏出力在时空上的动态变化，更贴切地拟合实际数据，提高生成样本的准确性。基于该模型的光伏出力样本生成过程可分为以下5个步骤。

1）数据预处理。对分布式光伏出力的历史数据进行核密度估计（kernel density estimation，KDE），以获得光伏出力的边缘概率密度函数。光伏出力的两个概率密度函数$\hat{f}(x)$与$\hat{f}(y)$分别为

$$\begin{cases} \hat{f}(x)=\dfrac{1}{n_{\text{samp}}h}\displaystyle\sum_{i=1}^{n_{\text{samp}}}K\left(\dfrac{x-X_i}{h}\right) \\ \hat{f}(y)=\dfrac{1}{n_{\text{samp}}h}\displaystyle\sum_{i=1}^{n_{\text{samp}}}K\left(\dfrac{y-Y_i}{h}\right) \end{cases} \tag{1}$$

式中，x，y均为随机变量；n_{samp}为样本数量；h为带宽；$K(\cdot)$为核函数。X_i、Y_i分别为x、y这两个随机变量的第i个历史光伏出力样本。

2）Copula函数的选择。本文采用赤池信息准则（Akaike information criterion，AIC）指标 I_{AIC} 和贝叶斯信息准则（Bayesian information criterion，BIC）指标 I_{BIC} 来评估拟合效果，即

$$\begin{cases} I_{\mathrm{AIC}} = 2k - 2\ln\left(\hat{L}\right) \\ I_{\mathrm{BIC}} = k\ln\left(n_{\mathrm{samp}}\right) - 2\ln\left(\hat{L}\right) \end{cases} \tag{2}$$

式中，k 为模型参数个数；$\hat{L}$ 为参数的极大似然估计值。

模型的拟合效果好坏可以通过这2个准则值来评估，这2个值的大小与模型的好坏呈反比关系。

3）时变Copula参数估计。基于历史数据，使用极大似然法（maximum likelihood estimate，MLE），估计每个时段的Copula参数，以反映光伏出力在不同时间段的相关性变化[24]。这些参数能动态调整以适应实际光伏出力的变化。时变参数 θ_t 可表示为

$$\theta_t = g\left(Z_t\right) \tag{3}$$

式中，θ_t 为时刻 t 的Copula参数；$g(\cdot)$ 为参数随时间变化的函数；Z_t 为时刻 t 的特征变量。

4）构建联合概率密度函数。对于每个时间步长 t，依据所估计的时变Copula参数 θ_t 来构建该时间步长 t 对应的联合概率密度函数 $\hat{F}\left(x, y\right)$，即

$$\hat{F}\left(x, y\right) = C_{\theta_t}\left(\hat{F}\left(x\right), \hat{F}\left(y\right)\right) \tag{4}$$

式中，$C_{\theta_t}(\cdot)$ 为带有参数 θ_t 的时变Copula函数；$\hat{F}\left(x\right)$、$\hat{F}\left(y\right)$ 分别为光伏出力的随机变量 x 与 y 的边缘分布函数。

5）采样与逆变换。对每个时间步长内的联合分布进行随机采样，得到服从联合分布的样本对 (u_i, v_i)，并根据反函数 $F^{-1}(\cdot)$ 执行逆变换，获得光伏出力样本，即

$$\begin{cases} u_i = \hat{F}\left(x_i\right) \\ v_i = \hat{F}\left(y_i\right) \\ x_i = \hat{F}^{-1}\left(u_i\right) \\ y_i = \hat{F}^{-1}\left(v_i\right) \end{cases} \tag{5}$$

通过这5个步骤，可生成反映分布式光伏出力时空相关性的样本，为考虑分布式光伏相关性的概率潮流计算提供准确的数据支撑。

1.2　基于蒙特卡洛法的静态潮流计算模型

以生成的考虑分布式光伏相关性的样本为基础，采用基于MCS的概率潮流计算方法对配电系统进行分析，评估不同分布式光伏比例对配电网薄弱性的影响。

1.2.1　负荷样本生成

假设考虑的配电网负荷服从正态分布，即

$$\begin{cases} f\left(P_{\mathrm{load}}\right) = \dfrac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_{\mathrm{p}}} \exp\left[-\dfrac{\left(P_{\mathrm{load}} - \mu_{\mathrm{p}}\right)^2}{2\sigma_{\mathrm{p}}^2}\right] \\ f\left(Q_{\mathrm{load}}\right) = \dfrac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma_{\mathrm{q}}} \exp\left[-\dfrac{\left(Q_{\mathrm{load}} - \mu_{\mathrm{q}}\right)^2}{2\sigma_{\mathrm{q}}^2}\right] \end{cases} \tag{6}$$

式中，$f\left(P_{\mathrm{load}}\right)$ 与 $f\left(Q_{\mathrm{load}}\right)$ 分别为系统负载的有功功率 P_{load} 和无功功率 Q_{load} 的概率密度函数；σ_{p}、σ_{q} 分别为有功功率和无功功率的标准差；μ_{p}、μ_{q} 分别为有功功率和无功功率的期望。

1.2.2　概率潮流计算

每隔一段时间 t，更新节点的有功和无功功率，结合分布式光伏出力进行潮流计算，得到各节点的电压。节点功率方程为

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j=1}^{n} U_j\left(\boldsymbol{G}_{ij}\cos\theta_{ij} + \boldsymbol{B}_{ij}\sin\theta_{ij}\right) \\ Q_i = U_i \sum_{j=1}^{n} U_j\left(\boldsymbol{G}_{ij}\sin\theta_{ij} - \boldsymbol{B}_{ij}\cos\theta_{ij}\right) \end{cases} \tag{7}$$

式中，P_i 和 Q_i 分别为节点 i 的有功功率和无功功率；U_i 为节点 i 的电压幅值；θ_{ij} 为节点 i、j 之间的电压相角差；$\boldsymbol{G}_{ij}$、$\boldsymbol{B}_{ij}$ 分别为节点、之间的导纳矩阵 $\boldsymbol{Y}_{ij}$ 的实部和虚部；n 为节点个数。

将式（7）非线性潮流计算方程写为矩阵形式，即

$$\boldsymbol{S} = f(\chi) \tag{8}$$

式中，$\boldsymbol{S} = \left[S_1, S_2, \cdots, S_n\right]^{\mathrm{T}}$ 为节点视在功率向量，$S_i = P_i + \mathrm{j}Q_i$；$\chi = \left[\chi_1, \chi_2, \cdots, \chi_n\right]^{\mathrm{T}}$ 为节点的状态向量，$\chi_i = \left[U_i, \theta_i\right]^{\mathrm{T}}$；$\theta_i$ 为节点 i 的电压相角；$f(\cdot)$ 为节点功率与状态变量之间的非线性映射函数，构成潮流计算的方程组。

节点 i 注入的视在功率 S_i 的概率分布函数 $F_i(s_i)$ 为

$$\begin{cases} F_i\left(S_i\right) = F_i\left(S_{\mathrm{pv},i}, S_{\mathrm{load},i}\right) \\ S_{\mathrm{pv},i} = P_{\mathrm{pv},i} + \mathrm{j}Q_{\mathrm{pv},i} \\ S_{\mathrm{load},i} = P_{\mathrm{load},i} + \mathrm{j}Q_{\mathrm{load},i} \end{cases}, i = 1, 2, \cdots, n \tag{9}$$

式中，$S_{\mathrm{pv},i}$、$S_{\mathrm{load},i}$ 分别为节点 i 的光伏出力和负荷视在功率；$P_{\mathrm{pv},i}$、$Q_{\mathrm{pv},i}$ 分别为节点 i 的光伏出力的有功功率和无功功率；$P_{\mathrm{load},i}$、$Q_{\mathrm{load},i}$ 分别为节点 i 负荷的有功功率和无功功率。

节点 i 的电压迭代计算式为

$$V_i^{(k+1)} = V_i^{(k)} + \Delta V_i \tag{10}$$

式中，$V_i^{(k)}$为第k次迭代的节点i的电压；ΔV_i为通过雅可比矩阵计算得到的节点i的电压修正量。

在计算支路电流时，可根据节点电压和导纳值来表示支路电流，即

$$I_{ij}=Y_{ij}\left(V_i-V_j\right) \tag{11}$$

式中，I_{ij}为从节点i到节点j的支路电流；Y_{ij}为节点i到节点j的支路的导纳值；V_i和V_j分别为节点i和节点j的电压。

潮流计算约束条件为

$$\begin{cases}0.95\leqslant V_i^*\leqslant 1.05\\ I_{ij}^*\leqslant 0.9\end{cases} \tag{12}$$

式中，V_i^*为节点i电压的标幺值；I_{ij}^*为节点i到节点j的支路电流的标幺值。

本文对配电网负荷模型做出了正态分布假设，并结合光伏出力的核密度估计进行随机采样。此过程确保了输入数据的合理性和多样性，避免了传统方法中的单一假设带来的误差。

2 薄弱点风险评估与识别方法研究

从风险的定义（导致伤害发生的灾难可能性和这种伤害的严重程度）中不难看出，风险发生的可能性和风险带来的危害程度是风险的两个重要部分。因此，可采用这二者相乘来度量风险[25]。本文假设配电网常规电源满足当前的负荷需求，结合节点电压和支路电流的越限情况，采用基于效用理论的偏好型函数对其进行量化分析。

电压越限风险指标R_{vlot}的表达式为

$$R_{\text{volt}}=\sum_{i=1}^{n_{\text{vu}}}\int_{v_{\text{d}}}^{\infty}f\left(v_i\right)g\left(v_i\right)\mathrm{d}v_i+\sum_{i=1}^{n_{\text{vd}}}\int_{0}^{v_{\text{u}}}f\left(v_i\right)g\left(v_i\right)\mathrm{d}v_i \tag{13}$$

式中，n_{vu}、n_{vd}分别为节点电压越上、下限的次数；v_{u}、v_{d}分别为节点电压运行的上、下限；$f\left(v_i\right)$为节点i的电压v_i对应的概率密度函数；$g\left(v_i\right)$为节点i的电压v_i越限的严重程度函数。

$g\left(v_i\right)$的表达式为

$$g\left(v_i\right)=\begin{cases}\dfrac{\mathrm{e}^{\frac{v_i}{v_{\text{u}}}-1}-1}{\mathrm{e}-1}, & v_i>v_{\text{u}}\\ \dfrac{\mathrm{e}^{1-\frac{v_i}{v_{\text{d}}}}-1}{\mathrm{e}-1}, & v_i<v_{\text{d}}\end{cases} \tag{14}$$

电流越限风险指标R_{line}的表达式为

$$R_{\text{line}}=\sum_{j=1}^{n_{\text{lu}}}\int_{i_{\text{u}}}^{\infty}f\left(i_j\right)g\left(i_j\right)\mathrm{d}i_j \tag{15}$$

式中，n_{lu}为支路电流越上限的次数；i_{u}为支路电流的运行上限；$f\left(i_j\right)$为支路电流i_j对应的概率密度函数；$g\left(i_j\right)$为支路电流i_j越限的严重程度函数。

$g\left(i_j\right)$的表达式为

$$g\left(i_j\right)=\frac{\mathrm{e}^{\frac{i_j}{i_{\text{u}}}}-1}{\mathrm{e}-1} \tag{16}$$

计及分布式光伏相关性配电网薄弱点辨识流程如图1所示。

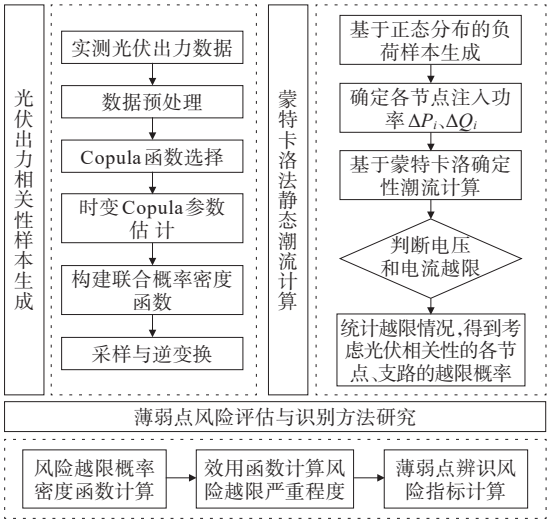


图1 计及分布式光伏相关性配电网薄弱点辨识流程

Figure 1 Steps for weak point identification of distribution network considering correlation of distributed PV

3 算例分析

3.1 基于时变Copula函数的分布式光伏联合场景生成

本文以改进的IEEE 33节点系统为例进行分析，IEEE 33节点系统结构如图2所示。在图2中，该系统负荷为3.7 MW+2.3 Mvar；分别在节点16和节点26各安装一台同步发电机，每台发电机的有功功率输出为1.5 MW；在该系统中接入额定容量为1.5 MW的分布式光伏。

以中国某地区分布式光伏实测数据进行相关性分析，以1 h为采样时间步长。分布式光伏输出功率随机性强，且其输出功率会较大程度地受地理和环境因素的影响。这导致了不同地区之间的光伏发电的输出功率的相关性存在差异。本文选用了光伏出力数据中的一组样本（其相关性系数为0.705 1）进行分析对比。由于在实际光伏出力数据中，大量零值的存在会使数据分布偏离正态分布，影响Copula参数估计的准确性[25-26]，故应对每个时

间段（24 h）的数据进行零值过滤，并将过滤后的数据进行转秩。本文分别采用4组不同类别的Copula函数，计算拟合的联合概率密度分布模型，并比较这4种Copula函数的拟合效果，结果见表1。

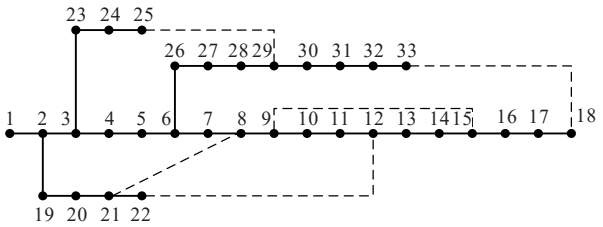


图2　IEEE 33节点配电系统结构

Figure 2　Structure of IEEE 33 node power distribution system

表1　不同Copula函数拟合效果对比

Table 1　Comparison of fitting effects of different Copula functions

序号	Copula函数类型	I_{AIC}	I_{BIC}
1	Gaussian	5.824 0	13.034 4
2	t	1 233.993 5	1 248.414 2
3	Clayton	49.193 7	56.404 0
4	Gumbel	55.269 6	62.479 9

由表1可知，在刻画分布式光伏出力相关特性中，Gaussian-Copula函数表现最优。模型的I_{AIC}值和I_{BIC}值越小，其在平衡拟合效果和复杂度方面表现越好。Gaussian Copula的I_{AIC}值与I_{BIC}值明显低于其他类型Copula的I_{AIC}值与I_{BIC}值。这说明Gaussian Copula具有更好的模型拟合性能与更低的复杂度。

综上所述，选择Gaussian Copula函数来描述光伏出力的相关性是合理且有效的，故本文以此方式获取考虑光伏相关性的出力样本数据。

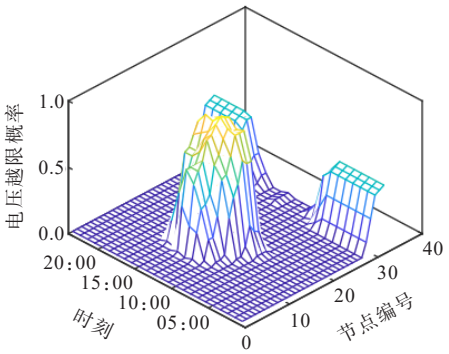
3.2　考虑分布式光伏出力相关性的配电网影响分析

基于MCS的概率潮流可确定每个节点电压越限概率和支路电流越限概率。为保证相关性是唯一变量，本文构建了2组场景。

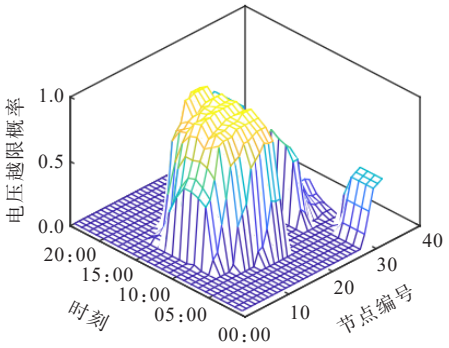
1）场景1：考虑分布式光伏相关性的出力样本，其相关性系数为0.702 6。

2）场景2：不考虑分布式光伏相关性的出力样本，其相关性系数为0.204 6。

通过对比分析这2组场景，可更全面地了解计及分布式光伏出力相关性对电网稳定性的影响。节点电压越限概率分布与支路电流越限概率分布分别如图3、4所示。



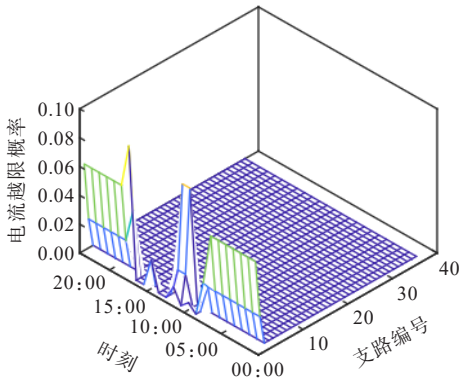
（a）考虑分布式光伏相关性的节点电压越限概率



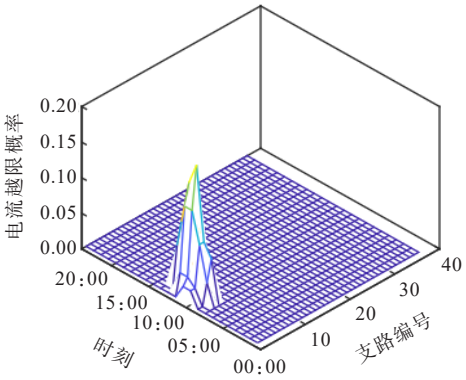
（b）不考虑分布式光伏相关性的节点电压越限概率

图3　节点电压越限概率分布

Figure 3　Probability distribution of node voltage limit violation



（a）考虑分布式光伏相关性的支路电流越限概率



（b）不考虑分布式光伏相关性的支路电流越限概率

图4　支路电流越限概率分布

Figure 4　Probability distribution of branch current limit violation

从图3中可以看出，考虑分布式光伏相关性时，分布式光伏之间可能存在同步变化，故在上午10:00与14:00左右，电压越限概率出现明显峰值，且节点16、26的电压越限概率更突出。从图4中可以看出，由于线路1作为该配电网首段线路，流经该线路的电流较大，更易引发电流越限，在不考虑相关性的情况下，其他节点的分布式光伏出力不会受到影响。因此，负荷可能转移到其他路径，从而导致线路5附近的越限概率上升。综上所述，考虑分布式光伏相关性能更准确地反映实际情况，特别是在分布式光伏接入的关键节点和支路上；但如果不考虑分布式光伏相关性，则可能会低估或高估某些时段节点和支路的越限风险，从而造成人力和财力上的损失。

3.3 不同分布式光伏渗透率下薄弱点风险评估分析

随着分布式光伏发电系统的广泛应用，分布式光伏渗透率（photovoltaic penetration，PVP）对配电网的影响日益显著。本文构建不同分布式光伏渗透率条件下的电压和电流越限的风险评估模型，分析分布式光伏接入对配电网薄弱环节的影响。参考实际配电网分布式光伏并入情况，在节点2、7、14、16、26先后接入分布式光伏，如表2所示。绘制不同分布式光伏渗透率下的风险评估指标曲线，识别在不同渗透率下最易发生电压和电流越限的节点和支路。

表2 不同分布式光伏渗透率的接入场景

Table 2 Access scenarios with different distributed PVP rates

场景	接入节点	接入容量/MW	PVP/%
1	16,26	2.51	10
2	2,16,26	3.77	15
3	2,16,26,7	5.02	20
4	2,16,26,7,14	6.28	25

不同光伏渗透率下各节点电压越限风险评估指标如图5所示。从图5中可以看出，随着分布式光伏渗透率增加，大部分节点的电压越限风险评估指标值显著增加，但节点30～33的电压越限风险评估指标值却在降低。节点30～33位于电网的末端分支，远离电源点，其电压稳定性差。在低分布式光伏渗透率下，这些末端节点电压越限风险较高；随着分布式光伏渗透率增加，这些末端节点附近的分布式光伏系统提供局部电压支撑，有效改善了电压稳定性，降低了电压越限风险评估指标值。

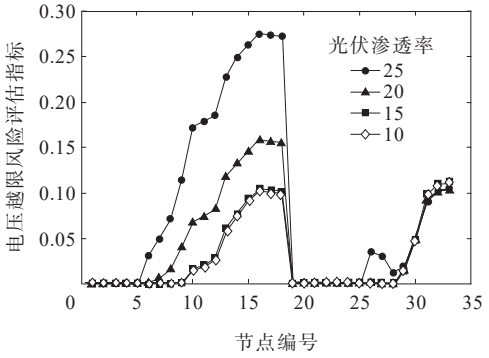


图5 不同光伏渗透率下各节点电压越限风险评估指标

Figure 5 Voltage limit violation risk assessment indicators of each node under different PV penetration rates

不同光伏渗透率下各节点电流越限风险评估指标如图6所示。从图6中可以看出，随着分布式光伏渗透率增加，各支路逐渐出现电流越限现象。其中，与上层电网相连的线路1～2、5～6均出现了明显的越限风险。

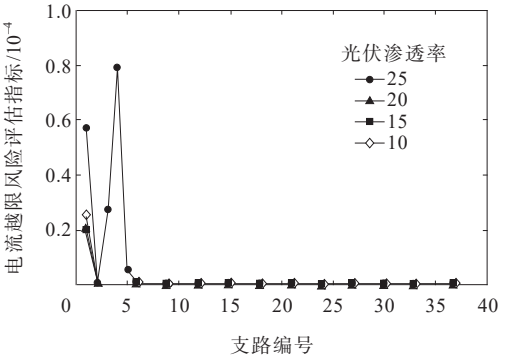


图6 不同光伏渗透率下各节点电流越限风险评估指标

Figure 6 Current limit violation risk assessment indicators of each node under different PV penetration rates

从图6中还可以看出，本文所提方法可准确定位系统电压、电流越限薄弱点，并可据此采取有针对性的预防措施，如在分布式光伏接入节点处增设静止无功发生器（static var generator，SVG）；增加出现电流越限的支路的导线截面积，提高其传输能力和安全性等。

4 结语

本文提出了一种基于时变Copula函数的分布式光伏接入配电网薄弱点辨识及风险评估方法，通过IEEE 33节点系统验证了所提方法的可行性和有效性，所得结论如下：

1）基于时变Copula函数生成的光伏出力样本

数据能充分考虑分布式光伏在时空上的相关性，允许Copula参数随时间变化，所拟合数据更贴近实际，可为后续概率潮流计算提供保障。

2）结合分布式光伏出力样本数据进行概率潮流计算，量化了配电网中分布式光伏出力对节点、线路可靠性的影响，并结合效用理论准确评估节点电压和支路电流越限风险。

3）确定不同渗透率情况下的节点电压和支路电流过载风险状态，以可预测的方式准确度量高渗透率分布式光伏出力随机性对配电网的影响。

综上所述，本文的研究成果为分布式光伏接入配电网的风险评估提供了科学依据和技术支持，有助于提升配电网的安全性和可靠性，为更多分布式能源的有效接入提供了理论支持。未来将探索多类型可再生能源（如风-光-储联合）的出力相关性建模方法，以适配日益复杂的能源结构。

参考文献：

[1] 卓振宇，张宁，谢小荣，等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化，2021，45(9): 171-191.
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.

[2] 康重庆，姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论研究框架[J]. 电力系统自动化，2017，41(9): 2-11.
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems,2017,41(9):2-11.

[3] 张天策，王剑晓，李庚银，等. 面向高比例新能源接入的配电网电压时空分布感知方法[J]. 电力系统自动化，2021，45(2): 37-45.
ZHANG Tiance, WANG Jianxiao, LI Gengyin, et al. Perception method of voltage spatial-temporal distribution of distribution network with high penetration of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(2): 37-45.

[4] 鲁宗相，黄瀚，单葆国，等. 高比例可再生能源电力系统结构形态演化及电力预测展望[J]. 电力系统自动化，2017，41(9): 12-18.
LU Zongxiang, HUANG Han, SHAN Baoguo, et al. Morphological evolution model and power forecasting prospect of future electric power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 12-18.

[5] 马钰，韦钢，李扬，等. 考虑孤岛源-荷不确定性的直流配电网可靠性评估[J]. 电工技术学报，2021，36(22): 4726-4738.
MA Yu, WEI Gang, LI Yang, et al. Reliability evaluation of DC distribution network considering islanding source-load uncertainty[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(22): 4726-4738.

[6] 吴润基，王冬骁，谢昌鸿，等. 空调负荷参与配电网电压管理的分布式控制方法[J]. 电力系统自动化，2021，45(6): 215-222.
WU Runji, WANG Dongxiao, XIE Changhong, et al. Distributed control method for air-conditioning load participating in voltage management of distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(6): 215-222.

[7] 陈为化，江全元，曹一家. 基于风险理论和模糊推理的电压脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报，2005，25(24): 20-25.
CHEN Weihua, JIANG Quanyuan, CAO Yijia. Voltage vulnerability assessment based on risk theory and fuzzy reasoning[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 20-25.

[8] 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.
WAN Can, SONG Yonghua. Theories, methodologies and applications of probabilistic forecasting for power systems with renewable energy sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(1): 2-16.

[9] 王辉，付凌云，孙世民，等. 海上风电场集电系统电压选择研究[J]. 高压电器，2022，58(9): 112-119.
WANG Hui, FU Lingyun, SUN Shimin, et al. Study on voltage selection of collection system in offshore wind farm[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 112-119.

[10] 王雨欣，王思怡，杨黎晖，等. 超级电容储能和卸荷电路协调控制的永磁同步风电机组低电压穿越策略[J]. 高压电器，2023，59(4): 177-185.
WANG Yuxin, WANG Siyi, YANG Lihui, et al. Low-voltage ride-through control strategy of permanent magnetic synchronous wind turbine with coordination of super capacitor energy storage and chopper circuit[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4): 177-185.

[11] 缪惠宇，史明明，费骏韬，等. 计及综合能源系统接入影响的配电网可靠性评估方法[J]. 电测与仪表，2022，59(10): 23-31.
MIAO Huiyu, SHI Mingming, FEI Juntao, et al. Reliability assessment method of distribution network considering the impact of integrated energy system access[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(10): 23-31.

[12] 赵玉林，李若瑾，尹杰，等. 考虑新能源不确定性的含

DSSC电网静态电压稳定分析[J]. 南方电网技术, 2024, 18(7): 95-107.
ZHAO Yulin, LI Ruojin, YIN Jie, et al. Static voltage stability analysis of power grid with DSSC considering uncertainty of new energy sources[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(7): 95-107.

[13] 姚竞宙, 付强, 杜文娟, 等. 基于特征值指标的光伏并网系统静态电压稳定性[J]. 电力工程技术, 2023, 42(6): 32-41, 140.
YAO Jingzhou, FU Qiang, DU Wenjuan, et al. Static voltage stability of photovoltaic grid-connected system based on eigenvalue index[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2023, 42(6): 32-41, 140.

[14] 甘艳, 黄菁雯, 吴军, 等. 含风电光伏电力系统概率潮流计算改进方法研究[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(5): 34-43.
GAN Yan, HUANG Jingwen, WU Jun, et al. Research on probabilistic power flow calculation improvement method of power system including wind and photovoltaic power generation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(5): 34-43.

[15] 蔡绍荣, 沈力, 江栗, 等. 考虑水风光互补与机会约束的电力系统源网荷协调扩展规划研究[J]. 电网与清洁能源, 2022, 38(11): 134-145.
CAI Shaorong, SHEN Li, JIANG Li, et al. A study on source-network-demand coordinated expansion planning of the power system considering hydro-wind-solar complementary and chance constraints[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(11): 134-145.

[16] 沈玉明, 斯辉, 马浩天, 等. 考虑数据中心和分布式能源接入的配电网双层规划方法[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(2): 116-125.
SHEN Yuming, SI Hui, MA Haotian, et al. A bilevel programming model for distribution networks considering data center and distributed energy access[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(2): 116-125.

[17] WANG Z W, SHEN C, LIU F, et al. Analytical expressions for joint distributions in probabilistic load flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 2473-2474.

[18] 黄煜, 徐青山, 卞海红, 等. 基于拉丁超立方采样技术的半不变量法随机潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(11): 112-119.
HUANG Yu, XU Qingshan, BIAN Haihong, et al. Cumulant method based on Latin hypercube sampling for calculating probabilistic power flow[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(11): 112-119.

[19] 丁明, 李生虎, 黄凯. 基于蒙特卡罗模拟的概率潮流计算[J]. 电网技术, 2001, 25(11): 10-14+22.
DING Ming, LI Shenghu, HUANG Kai. Probabilistic load flow analysis based on Monte-Carlo simulation[J]. Power System Technology, 2001, 25(11): 10-14+22.

[20] 叶圣永, 王晓茹, 周曙, 等. 基于马尔可夫链蒙特卡罗方法的电力系统暂态稳定概率评估[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 168-174.
YE Shengyong, WANG Xiaoru, ZHOU Shu, et al. Power system probabilistic transient stability assessment based on Markov chain Monte Carlo method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 168-174.

[21] 余光正, 林涛, 徐遐龄, 等. 基于2m+1点估计法的考虑风力发电接入时电力系统谐波概率潮流算法[J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3260-3265.
YU Guangzheng, LIN Tao, XU Xialing, et al. An algorithm based on 2m+1 point estimate method for harmonic probabilistic load flow calculation of power systems incorporating wind power[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3260-3265.

[22] 蔡德福, 周鲲鹏, 忻俊慧, 等. 概率潮流计算方法研究综述[J]. 湖北电力, 2015, 39(10): 20-25.
CAI Defu, ZHOU Kunpeng, XIN Junhui, et al. A review of probabilistic load flow algorithm[J]. Hubei Electric Power, 2015, 39(10): 20-25.

[23] 孙媛媛, 程凯强, 许庆燊, 等. 考虑光伏出力相关性的主动配电网薄弱环节识别[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(15): 96-103.
SUN Yuanyuan, CHENG Kaiqiang, XU Qingshen, et al. Identification of weak link for active distribution network considering correlation of photovoltaic output [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(15): 96-103.

[24] GAO C, LIN J J, ZENG J F, et al. Wind-photovoltaic co-generation prediction and energy scheduling of low-carbon complex regional integrated energy system with hydrogen industry chain based on copula-MILP[J]. Applied Energy, 2022, 328: 120205.

[25] 李帅虎. 大规模电网电压稳定预防控制及多防线协调决策方法研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2015.
LI Shuaihu. Research on voltage stability preventive control andmulti – defense-lines coordination control in large-scale power[D]. Changsha: Hunan University, 2015.

[26] RAMÍREZ A F, VALENCIA C F, CABRALES S, et al. Simulation of photo-voltaic power generation using copula autoregressive models for solar irradiance and air temperature time series[J]. Renewable Energy, 2021, 175: 44-67.