

# 基于 Cornish-Fisher 展开的配电网电压越限风险评估

姬广龙, 袁 越, 范绪然, 原睿萌, 凌开元, 李 想

(河海大学能源与电气学院, 南京 211100)

**摘 要:** 考虑风功率预测误差分布特性对配电网风险水平的影响,提出一种基于 Cornish-Fisher 级数展开的配电网电压越限风险评估方法。首先,建立风功率随机出力模型、负荷概率模型以及风功率预测误差模型,通过求逆法获得预测误差的随机分布采样值;其次,基于半不变量结合 Cornish-Fisher 级数展开获得系统及各节点电压越限概率分布,引入效用函数构建电压越限严重程度模型,建立电压越限风险指标。最后对 IEEE 33 节点系统进行仿真,分析不同场景下配网运行越限风险,量化配电系统电压越限风险水平,验证本文评估方法的有效性,可辅助运行人员进行决策,为配电网安全运行提供参考。

**关键词:** 随机潮流; 预测误差; 电压越限; 半不变量; Cornish-Fisher 级数; 风险评估

**中图分类号:** TU47

**文献标志码:** A

## 0 引 言

风电是目前发展最快、应用范围最广的可再生能源,大规模风电接入对配电系统的安全运行造成巨大挑战。此外,风功率预测误差以及负荷运行方式的随机改变同样影响配网的安全运行。考虑风电出力随机性与预测不确定性,对配网系统进行高效、准确的安全风险评估,对含分布式电源的配电网安全运行具有重要意义。

国内外对配网风险评估已有相关研究,多数以确定性方法对其风险评估。文献[1]通过定义负荷点的贡献度和消耗度对配电系统划分参量,获得系统的停电风险评估状态。文献[2]将可靠性分析与脆弱性评估方法相结合,对含风力发电的配电网进行电流风险的评估。文献[3]基于 Copula 理论建立新能源联合出力模型,以综合经济成本为目标得到电网运行规划的风险价值。文献[4]采用区间算法对配电网进行可靠性分析计算,评估分布式电源对配电网的风险影响。实际系统中,电网运行条件的不断变化以及可再生能源的介入加剧了配电系统的不稳定性<sup>[5]</sup>,采用确定性分析方法直接应用于高随机性与复杂性配电网络,无法

切实量化系统的风险水平<sup>[6]</sup>。随机潮流可计及风电出力波动性和负荷不确定性等随机因素。因此,随机潮流为当前配网安全高效的风险评估提供一种有效途径。

文献[7]采用蒙特卡洛(Monte Carlo, MC)模拟法求解随机潮流,建立含电池储能风电场的风险评估模型,然而其千万次仿真需耗费大量的计算时间<sup>[8]</sup>。文献[9]利用对偶变数法缩短计算时间,但在一定程度上改变了状态变量的概率分布<sup>[10]</sup>。文献[11]利用 Gram-Charlier 级数展开的方法获得状态变量的概率分布,但求解其概率密度函数(probability density function, PDF)时易出现负值的情况且处理非高斯分布的随机变量时存在收敛性问题<sup>[12]</sup>。文献[13-14]利用 Cornish-Fisher 级数展开的方法对含分布式电源的配电网电压质量进行概率评估,避免了文献[11]中 PDF 出现负值的情况。文献[15]建立风光荷、生物质发电及需求侧响应等不确定性模型,对配电网的节点电压越限进行评估。但上述评估方法均未考虑风功率预测误差分布特性对配电网电压越限风险的影响。风功率预测误差的分布及大小直接影响配网系统所需的备用容量及储能电站充放电计划<sup>[16]</sup>等,对配电网的安全运行人员

收稿日期: 2017-07-14

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0900100)

通信作者: 袁 越(1966—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事电力系统运行与控制、可再生能源发电系统、智能电网与微网技术方面的研究。yyuan@hhu.edu.cn

具有重要的参考意义。

本文提出并建立风功率预测误差模型,通过求逆理论推导出预测误差分布的采样方法,考虑系统中多种随机因素,包括可再生能源出力的非连续性及负荷的非平稳性等,提出基于效用理论的配电网电压越限风险评价指标。采用基于 Cornish-Fisher 级数展开的方法获得系统级及节点级电压越限概率分布,并运用效用理论根据风险偏好建立严重度函数,从配电网安全运行角度建立节点级的电压越限风险指标及总体风险度指标,定量分析含可再生能源的配网系统安全运行风险水平。

## 1 基于 Cornish-Fisher 展开的配电网风险评估模型建立

### 1.1 随机潮流的线性化模型

#### 1.1.1 节点功率方程的线性化模型

采用交流潮流方程,其节点功率方程用矩阵表示,并在基准运行点对其功率方程进行泰勒级数展开:

$$S_0 + \Delta S = f(X_0 + \Delta X) = f(X_0) + J_0 \Delta X + \dots \quad (1)$$

式中,  $S_0$ 、 $X_0$  ——节点注入量  $S$  和状态变量  $X$  的期望值;  $\Delta X$ 、 $\Delta S$  ——随机扰动;  $J_0$  ——牛拉法最后一次迭代所用的雅克比矩阵。

$$S_0 = f(X_0) \quad (2)$$

忽略 2 次及其以上的高次项,整理可得:

$$\Delta X = J_0^{-1} \Delta S \quad (3)$$

式中,  $J_0^{-1}$  ——灵敏度矩阵,通过卷积计算即可状态变量  $\Delta X$  的分布。

#### 1.1.2 基于半不变量法的随机潮流

假设各节点注入功率都相互独立,随机变量的半不变量有 2 条重要性质,其数学式为:

$$\Delta S^{(k)} = \Delta S_g^k + \Delta S_l^k \quad (4)$$

$$\Delta X^{(k)} = J_0^{-1(k)} \cdot \Delta S^{(k)} \quad (5)$$

式中,  $\Delta S_g^k$  ——分布式电源注入功率的  $k$  阶半不变量;  $\Delta S_l^k$  ——节点负荷注入功率的  $k$  阶半不变量;  $\Delta S^{(k)}$  ——节点注入功率的  $k$  阶半不变量;  $J_0^{-1(k)}$  ——灵敏度矩阵  $J_0^{-1}$  中元素的  $k$  次幂所构成的矩阵。

由式(3)可知状态变量与注入功率的转换关系,其权重系数为灵敏度矩阵,将随机变量转化为半不变量的形式后,可将式(3)卷积运算转换为半不变量的代数运算,其线性变换运算将变的非常简单,进而可采用级数展开法进行下一步的计算。

#### 1.1.3 基于 Cornish-Fisher 级数展开的随机潮流

目前求解随机潮流常用的级数展开方法主要有 Gram-Charlier 级数和 Edgeworth 级数等,虽然其级数运算简单可操作,但对高阶矩区间范围的要求较高,当超出一定范围时,其级数展开所逼近的 PDF 会出现非正的情况,违背基本的概率公理<sup>[17]</sup>。相比前 2 种级数, Cornish-Fisher 级数不存在密度函数出现负值的情况且更适合求解非高斯分布。因此本文采用 Cornish-Fisher 级数求取状态变量的累计概率分布 (cumulative probability distribution, CPD)。假定状态变量  $x$  的分位数为  $\alpha$ , 则  $x(\alpha)$  可表示为:

$$x(\alpha) = s(\alpha) + \frac{s^2(\alpha) - 1}{6} \gamma_3 + \frac{s^3(\alpha) - 3s(\alpha)}{24} \gamma_4 - \frac{2s^3(\alpha) - 5s(\alpha)}{36} \gamma_3^2 + \frac{s^4(\alpha) - 6s^2(\alpha) + 3}{120} \gamma_5 + \dots \quad (6)$$

式中,  $s(\alpha) = \Phi^{-1}(\alpha)$ ;  $\gamma_\mu$  ——  $\mu$  阶规格化半不变量。根据式  $x(\alpha) = F^{-1}(\alpha)$ , 可求得状态变量  $x$  的累积分布函数  $F(x)$ 。

### 1.2 节点注入功率随机模型的建立

#### 1.2.1 风力发电随机模型的建立

风速具有随机性的特点,其统计特性可通过概率分布来模拟。其中,双参数威布尔分布较好地反映风速的概率分布特性<sup>[18]</sup>。其累积分布公式为:

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} \quad (7)$$

式中,  $v$  ——风电机组轮毂高度处的平均风速, m/s;  $c$  ——尺度参数, m/s;  $k$  ——形状参数。

根据概率分布的性质,可获得随机变量风速的各阶原点矩及对应的半不变量。对于连续型随机变量,其各阶原始矩可表示为:

$$\alpha_k = \int v^k f(v) dv \quad (8)$$

式中,  $\alpha_k$  ——随机变量的第  $k$  阶原点矩;  $f(v)$  ——随机变量的概率密度分布表达式。

若  $\kappa_k$  为随机变量  $v$  的  $k$  阶半不变量,则  $\kappa_k$  与随机变量  $v$  的  $k$  阶原点矩  $\alpha_k$  的关系可表示为:

$$\begin{cases} \kappa_1 = \alpha_1 \\ \kappa_{k+1} = \alpha_{k+1} - \sum_{j=1}^k \frac{k!}{j!(k-j)!} \alpha_j^j \kappa_{k-j+1} \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $\kappa_1$  ——风力机出力的第一阶半不变量;  $\kappa_{k+1}$  ——风力机出力的第  $k+1$  阶半不变量。

风力机是风力发电最主要的电能生产设备,通常采用输出功率曲线来反应风力机输出有功功率与风速值间的关系。单台风力机出力主要取决于风速<sup>[19]</sup>,其数值关系如式(10)所示。

$$P_w = \begin{cases} 0, v < v_i, v > v_o \\ \frac{P_r}{v_r^3 - v_i^3} (v^3 - v_i^3), v_i \leq v \leq v_r \\ P_r, v_r < v \leq v_o \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $P_w$ ——风力机的出力, MW;  $v$ ——经过风力机的风速, m/s;  $P_r$ ——风力机的额定功率, MW;  $v_i$ ——切入风速, m/s;  $v_r$ ——额定风速, m/s;  $v_o$ ——切出风速, m/s。

配网内所装风力机与主网不同, 主网一般规模较大, 其风力机型号也呈多样化。考虑配网自身时空性特点, 配网一般采用同一型号风力机, 忽略地域差异的影响, 各风力机风况近似相同, 可近似认为其出力相同, 且不考虑尾流效应的影响。

对接入电网的风电场要求其具备协调控制机组和无功补偿装置的能力, 能保证无功功率有一定的调节容量<sup>[20]</sup>。因此, 风电场能按恒功率因数运行, 风电场的无功功率为:

$$Q_w = \frac{\sqrt{1 - \cos^2 \varphi}}{\cos \varphi} P_w \quad (11)$$

式中,  $\cos \varphi$ ——功率因数, 取 0.9。

根据半不变量齐次性及可加性的两条重要性质<sup>[21]</sup>, 由随机变量风速的各阶半不变量可快速得到其对应的风力机出力半不变量。

### 1.2.2 风功率预测误差随机模型的建立

风功率预测误差的分布及大小直接影响配网系统所需的备用容量以及储能电站的充放电计划等, 对于配电网安全及经济运行有重要意义。本文通过求逆法获得风功率预测误差的采样值, 推导过程如下:

1) 计算所要的随机变量  $X$  的概率分布函数  $F(X)$ ;

2) 在随机变量预测误差  $X$  的取值范围内, 置  $F(X)=R$ ,  $R$  是区间  $(0,1)$  上的均匀分布;

3) 解方程  $F(X)=R$ , 用随机变量  $R$  表示随机变量预测误差  $X$ , 即求  $F(X)$  的逆。可证明  $X' = F_x^{-1}(R)$  与  $X$  具有相同的分布函数, 证明如下: 若  $X$  为一个随机变量, 它的分布函数为  $F(X)$ , 记  $F_x^{-1}(y)$  为  $F(X)$  的反函数,  $R$  为  $(0,1)$  均匀分布随机变量, 则有:

$$\begin{aligned} P(Y < y) &= P(F_x^{-1}(R) < y) \\ &= P(R < F_x(y)) \\ &= F_x(y) = P(x < y) \end{aligned} \quad (12)$$

4) 生成所要的在  $(0,1)$  上的均匀分布随机数  $R_1, R_2, R_3, \dots, R_i, \dots$  并由式 (13) 计算所要的随机变量:

$$X_i' = F_x^{-1}(R_i) \quad (13)$$

式中,  $R_i$ ——均匀分布随机数;  $X_i'$ ——随机数  $R_i$  对应的样本采样值。

### 1.2.3 负荷随机模型的建立

根据年负荷的实际历史数据, 首先对负荷进行统计学上的分布模拟, 如用正态分布对数据进行拟合。假设节点负荷为连续性负荷且服从高斯分布, 则负荷吸收功率的概率模型可描述为:

$$f(P) = \frac{1}{2\pi\sigma_p} \exp\left(-\frac{(P-\mu_p)^2}{2\sigma_p^2}\right) \quad (14)$$

$$f(Q) = \frac{1}{2\pi\sigma_q} \exp\left(-\frac{(Q-\mu_q)^2}{2\sigma_q^2}\right) \quad (15)$$

式中,  $\mu_p$ 、 $\mu_q$ ——负荷吸收有功、无功功率的期望值;  $\sigma_p$ 、 $\sigma_q$ ——负荷吸收有功、无功功率的标准差。

## 2 基于 Cornish-Fisher 展开的配电网风险评估指标建立

风险指标综合事件发生的可能性以及事件产生的严重性后果, 可定量反映系统的风险水平。当风速序列较平稳或规则变化时, 各种风功率预测方法的预测误差一般不大, 也就是说风功率预测大误差可能发生在风速序列较不规则或混沌变化时。而风速序列的不规则时段相对于整个时域来说一般概率较小, 但往往造成与其概率不成比例的严重后果<sup>[22]</sup>。

传统的风险严重度一般采用自定义的线性函数反映事件的严重程度, 而这些方法不能反映实际配电网对预测误差承受能力的强非线性, 不能较实际地反映高概率、低损失与高损失、低概率间的差异, 实际后者风险更大。而效用函数的不同形式可非线性地反映系统不同风险水平<sup>[23]</sup>, 因此本文根据效用理论采取风险偏好型效用函数构建事件的严重度模型。

### 2.1 基于 Cornish-Fisher 展开的节点电压越限概率

节点电压越限概率指系统在既定场景下电压超过系统容许阈值的概率, 即:

$$P_{V_i} = 1 - P_{|u|} \{ |V_i - 1| \leq 0.05 \} \quad (16)$$

式中,  $P_{V_i}$ ——节点  $i$  电压越限风险概率;  $V_i$ ——节点  $i$  电压矢量;  $P_{|u|}$ ——给定阈值范围内的概率。

### 2.2 基于 Cornish-Fisher 展开的节点电压越限严重度

效用函数的不同形式反映决策者对风险认知的“态度”, 其“风险态度”一般分为风险厌恶型、风险中立型和风险偏好型 3 种。风险偏好型效用函数的函数特点可表示为:

$$S(\omega) = \frac{e^{\gamma\omega} - 1}{e^{\gamma} - 1} \quad (17)$$



式中,  $\omega$  ——严重度风险指标;  $\gamma \geq 0$ , 一般取  $\gamma = 1$ ;  $S(\omega)$  ——电压超过给定阈值的严重度函数, 一般  $S'(\omega) > 0, S''(\omega) > 0$ 。

配电系统坚持安全、高质量供电为第一要务, 因为配电系统是直接面向用户终端, 用户对电能质量十分敏感, 即  $S'(\omega) > 0$ , 同时电压波动的增大会进一步引起电压越限程度的进一步增加, 即  $S''(\omega) > 0$ 。因此, 本文采用风险偏好型效用函数表征事件的严重度模型, 这体现了电网对电压越限的网络承受能力, 贴近配电系统的实际情况, 其效用函数可表示为:

$$S(\omega) = 0.582(e^\omega - 1) \quad (18)$$

电压越限反映配电网络主要节点电压偏离正常运行水平值而面临的电压崩溃风险。偏离程度越大对网络电压影响后果越严重, 本文定义严重度风险指标  $\omega$  为:

$$\omega = \begin{cases} \frac{V_{\min} - V_i}{V_B - V_{\min}}, & V_i < V_{\min} \\ 0, & V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \\ \frac{V_i - V_{\max}}{V_i - V_B}, & V_i > V_{\max} \end{cases} \quad (19)$$

式中,  $V_i$  ——节点  $i$  的电压;  $V_{\max}$ 、 $V_{\min}$  ——设定的上下阈值;  $V_B$  ——网络基准电压。

### 2.3 基于 Cornish-Fisher 展开的节点电压越限风险指标

节点电压越限风险指标指系统在既定场景下电压超过系统容许阈值的风险, 即:

$$R_{V_i} = \int_0^{0.95} f(V_i) \cdot S_{\text{low}}(V_i) dV_i + \int_{1.05}^{+\infty} f(V_i) \cdot S_{\text{up}}(V_i) dV_i \quad (20)$$

式中,  $R_{V_i}$  ——节点  $i$  电压越限风险指标;  $f(V_i)$  ——节点  $i$  电压的 PDF;  $S_{\text{low}}(V_i)$  ——节点  $i$  电压越下限严重度;  $S_{\text{up}}(V_i)$  ——节点  $i$  电压越上限严重度。

## 3 基于 Cornish-Fisher 展开的配电网风险评估流程

本文基于半不变量及 Cornish-Fisher 级数展开的随机潮流, 对含分布式电源配电网风险水平进行评估, 具体评估流程如图 1 所示。主要包括:

1) 获取配电网络、负荷、风功率及算法所需参数等。

2) 随机潮流计算。首先利用确定性潮流获得节点电压的期望值以及灵敏度矩阵  $J_0^{-1}$ ; 其次根据半不变量的性质结合注入功率的分布特性, 求出节点注入功率  $\Delta P_m$  的各阶半不变量; 根据式(6), 利用 Cornish-Fisher 级数求取状态变量的 CPD。

3) 节点电压越限概率计算。根据步骤 2) 求得的节点电压累积分布函数, 通过式(17)求得节点及系统节点电压越限概率。

4) 节点电压越限风险严重度计算。根据 2.2 节严重度函数理论, 利用式(19)和式(20)可求得节点电压越限风险严重度大小。

5) 风险指标的计算。根据 2.3 节越限风险的定义, 由式(21)求得节点电压越限风险指标值。

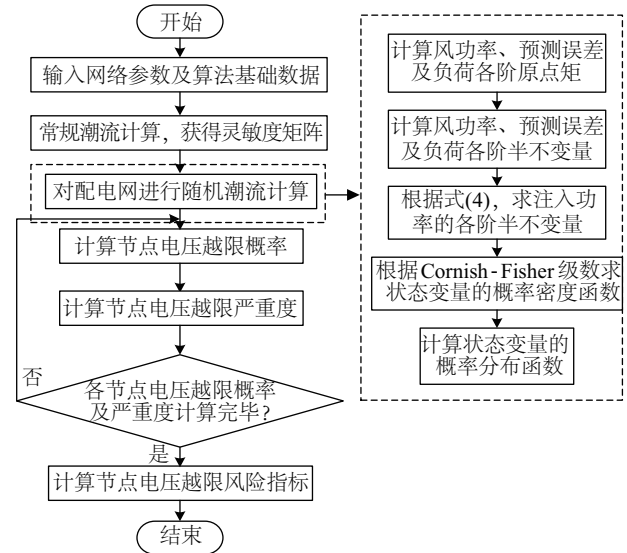


图 1 基于 Cornish-Fisher 展开的配电网风险评估流程图

Fig. 1 Flow chart of distribution network risk assessment based on Cornish-Fisher expansion

## 4 算例分析

本文采用 IEEE 33 节点测试系统对所提风险评估模型进行验证。在节点 18、33 处分别接入 1 MW 的风电场。假设各节点负荷服从高斯分布, 期望值为原始数据的峰荷值, 标准差取期望值的 10%; 假设各风电注入功率与随机负荷相互独立, 风力机的额定风速为 10 m/s, 切入风速为 3 m/s, 切出风速为 25 m/s。

### 4.1 基于半不变量与 Cornish-Fisher 级数随机潮流计算方法验证

为提高运算效率, 本文采用基于 Cornish-Fisher 级数展开的潮流算法求取状态变量概率分布函数。节点 18 与节点 33 为风电场接入点, 为验证本文采用算法的有效性, 采用 MC 模拟方法结果对比分析, 其中 MC 抽样仿真次数为 10000 次。以节点 18 为例, 其累积概率分布如图 2 所示。由图 2 可见, 本文基于 Cornish-Fisher 级数展开的潮流算法所得状态变量的概率分布曲线与 MC 仿真结果几乎重合。

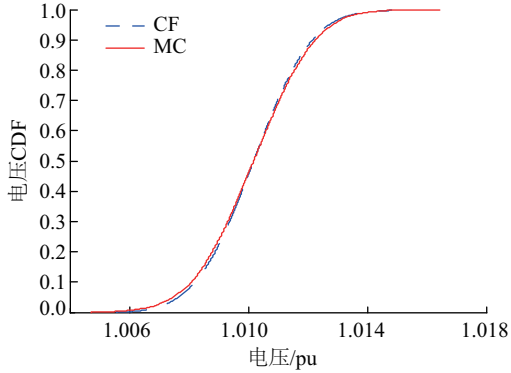


图2 MC与Cornish-Fisher累积概率分布曲线

Fig. 2 Cumulative probability distribution curves of MC and Cornish-Fisher

2种随机潮流计算方法获得的各节点电压对比分析如图3所示,其中点虚线为Cornish-Fisher展开的随机潮流法,点实线为MC随机潮流法。由图3可见,节点距离风电场接入点越远,电压波动范围越小,风电场接入点(即节点18与节点33)波动相对较大,但最大波动误差仅为0.0045%,相对误差指标<sup>[24]</sup>采用公式:

$$\varepsilon = \left| \frac{X_{MC} - X_{CF}}{X_{MC}} \right| \times 100\% \quad (21)$$

式中,  $X_{MC}$  ——MC方法所得状态变量;  $X_{CF}$  ——Cornish-Fisher级数方法所得状态变量。可见,本文采用的基于Cornish-Fisher级数展开的潮流计算方法可为后续配电网风险评估提供基础数据支撑。

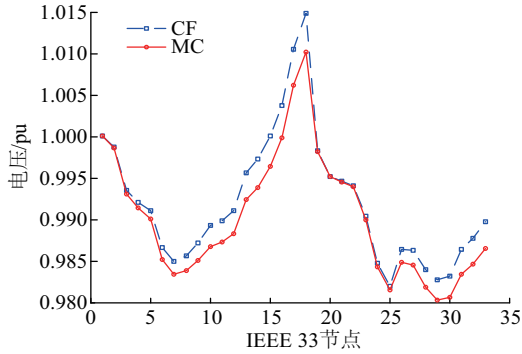


图3 MC与Cornish-Fisher各节点电压

Fig. 3 Voltage of each node of MC and Cornish-Fisher

#### 4.2 风功率及预测误差对风险水平的影响分析

配网系统节点18为风电场接入点,而节点5距离接入点较远,为分析风电接入点对配网系统不同节点风险的影响,选取节点5与节点18的电压分布曲线为研究对象。考虑风功率及预测误差前后节点5与节点18累积分布函数(cumulative distribution function, CDF)如图4所示。

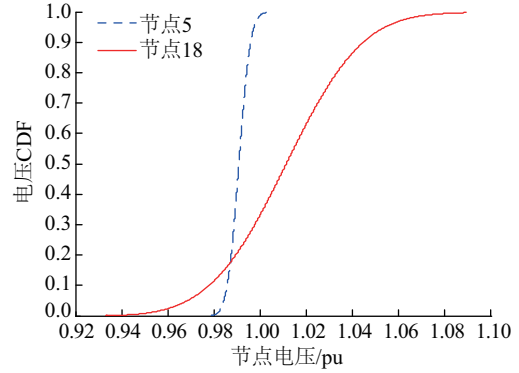


图4 节点5与节点18累积概率密度分布曲线

Fig. 4 Cumulative probability density distribution curve of node 5 and node 18

由图4可见,节点电压的波动程度与节点离风电场接入点远近有关,距离越近,电压波动越明显,距离越远,电压波动越小。为了分析风功率与风功率预测误差对配网系统风险的影响,分别考虑3种情况下节点的CPD如图5所示。图5中LD表示系统只考虑负荷的随机特性;LD+WP表示考虑负荷及注入风功率的随机特性对配网各节点电压概率分布的影响;LD+WP+Err表示在前者基础上考虑风功率预测误差对配网电压随机性的影响。

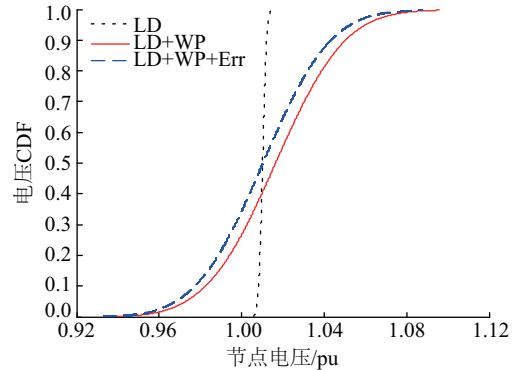


图5 3种情况下节点电压累积概率分布曲线

Fig. 5 Cumulative probability distribution curves of node voltage in three cases

由图5可见,只考虑负荷随机性时,节点电压波动最小;考虑负荷及风功率波动时,节点电压波动最大;在情况2的基础上考虑风功率预测误差后,节点电压的波动性反而变小,说明预测误差的分布及大小可对配网系统风险产生影响,合理考虑预测误差的波动特性可降低系统的风险水平。为分析风力机出力及预测误差对配网风险的影响,分别对只考虑负荷波动性、既考虑负荷又考虑风功率的随机性和考虑包括预测误差在内的3种情况,进行电压越限概率、电压越限严重度以及

电压越限风险指标计算,计算结果如表 1 所示。

表 1 3 种情况下配网系统风险指标值

Table 1 Risk index value of distribution network system in three cases

电压指标	运行状态		
	LD	LD-MW	LD-MW-Err
越限概率	0	0.0463	0.0504
效用函数值	0	0.1526	0.1305
风险指标	0	0.0044	0.0041

从表 1 可看出,当仅考虑负荷波动时,配电网满足系统静态安全要求,电压幅值不存在越限问题;随着风功率的接入,配电网出现了电压幅值越限情况,效用函数值的大小反映电压越限偏离标准值程度,严重度指标越小,表明变量越接近系统给定安全阈值,反之越大,偏离越严重;当考虑风功率预测误差时,系统风险值反而从 0.44%降低至 0.41%。由此可见,考虑预测误差的分布特性有利于更合理地应用预测结果,降低配网系统的安全风险水平,减小系统备用容量。

4.3 不同风功率对比对风险水平的影响分析

为研究不同风力机出力对配网风险水平的影响,本文分别评估风功率注入容量为 0.5、1、1.5、2 和 3 MW 时配网的风险水平。图 6 给出各容量所对应的节点 18 的累计分布函数曲线。

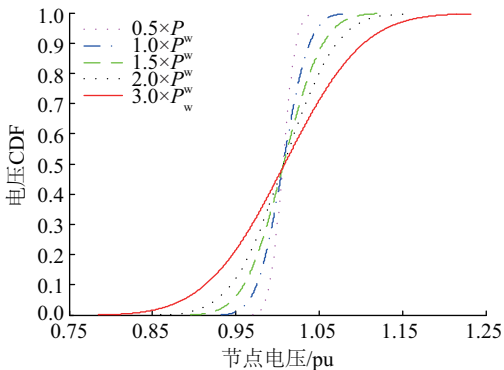


图 6 不同风功率情况下节点累积概率分布曲线

Fig. 6 Cumulative probability distribution curves of nodes under different wind power conditions

由图 6 可见,当风电注入功率为 0.5 MW 时,系统电压不存在越限行为;当风电容量增大到 1 MW 时,配网系统出现部分节点的电压越限;当容量达到 3 MW 时,配网系统电压出现大面积节点越限。可见随着风功率注入容量的增加,节点电压幅值范围波动越大,电压越限行为增加。不同容量的风功率对配网风险水平

影响不一样,各风险指标如表 2 所示。

表 2 不同风功率情况下配网系统风险指标值

Table 2 Risk index value of distribution network under different wind power

电压指标	运行状态/MW				
	0.5	1.0	1.5	2.0	3.0
越限概率	0	0.0509	0.1459	0.2298	0.3443
效用函数值	0	0.1042	0.2161	0.2805	0.3831
风险指标	0	0.0033	0.0205	0.0433	0.0936

从表 2 可见,风电注入功率为 0.5 MW 时,系统静态安全运行;风电容量增大到 1 MW 时,虽出现部分节点电压越限,但其风险值仅为 0.33%,配电网通过自我安全调节,可以保证系统的正常供电;风功率注入容量达 3 MW 时,配电网风险值已达 9.36%,超出配电网安全承受范围,系统可能面临电压崩溃的风险。

根据风电接入点的不同,其各节点风险值也是各异的。各节点的潜在风险水平如图 7 所示。由图 7 可见,风电接入点节点 18 及节点 33 为系统薄弱节点,风险值处系统最高点,距离风电接入点越远,节点电压越限风险值越小。这是由于配电网一般采取单向式供电,配电网各线路会产生较大的电压损失,导致风电注入点电压产生越上限风险,而远离注入点节点产生电压越下限风险。因此,通过对配网的安全风险评估,能有效控制配电系统的越限风险,有利于新能源的高效利用。

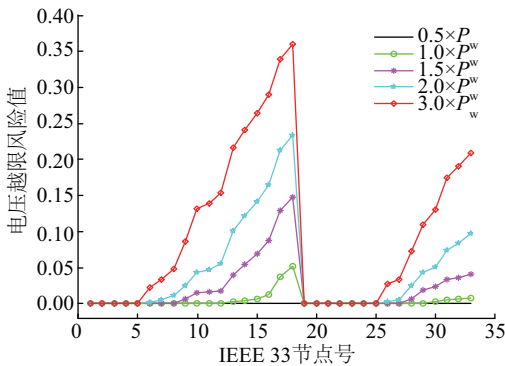


图 7 不同风功率情况下各节点风险值

Fig. 7 Risk value of each node under different wind power conditions

5 结 论

针对风功率预测误差分布特性对配电网风险水

平的影响,提出一种基于 Cornish-Fisher 级数展开的配电网电压越限风险评估方法。

首先,分析传统确定性评估方法的不足,在考虑配网运行现状的基础上引入了随机潮流;其次,建立以效用函数为基础的非线性严重程度模型,提出更贴合实际的配电网运行风险指标,最后,对 IEEE 33 节点系统进行仿真,验证本文评估方法的可行性。结果表明,考虑风功率预测误差可有效降低配网系统的风险水平;不同风电接入点对不同节点风险水平影响不同;风功率注入容量的不同对系统的风险水平影响也不同。根据风险值的大小可直观地辨识配电系统的薄弱环节,为运行人员提供决策参考,从而有效控制配电网的运行风险。

### [参考文献]

- [1] 周淦,廖婧舒,廖瑞金,等.含分布式电源的配电网停电风险快速评估[J].电网技术,2014,38(4):882-887.  
ZHOU Y, LIAO J S, LIAO R J, et al. Fast assessment of power failure risk in distribution network containing distributed generation[J]. Power system technology, 2014, 38(4): 882-887.
- [2] 王增平,戴志辉.含风力发电的配网电流保护运行风险评估[J].电力自动化设备,2013,33(6):7-12.  
WANG Z P, DAI Z H. Operation risk assessment for current protection of distribution network with wind farm[J]. Electric power automation equipment, 2013, 33(6): 7-12.
- [3] 卢锦玲,程晓悦,徐超,等.风光联合微电网系统电源优化配置[J].太阳能学报,2016,37(4):1030-1036.  
LU J L, CHENG X Y, XU C, et al. Optimal configuration of power source in micro-grid system integrated wind and pv power[J]. Acta energiae solaris sinica, 2016, 37(4): 1030-1036.
- [4] 钱科军,袁越, Zhou Chengke. 分布式发电对配电网可靠性的影响研究[J].电网技术,2008,32(11):74-78.  
QIAN K J, YUAN Y, ZHOU C K. Study on impact of distributed generation on distribution system reliability[J]. Power system technology, 2008, 32(11): 74-78.
- [5] 刘怡芳,张步涵,李俊芳,等.考虑电网静态安全风险的随机潮流计算[J].中国电机工程学报,2011,31(1):59-64.  
LIU Y F, ZHANG B H, LI J F, et al. Probabilistic load flow algorithm considering static security risk of the power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 59-64.
- [6] 朱益华,罗毅,段涛,等.基于输电线路实时评估模型的电力系统静态安全在线风险评估[J].电力自动化设备,2014,34(7):150-156.  
ZHU Y H, LUO Y, DUAN T, et al. Online risk assessment based on real-time evaluation model of transmission line for static security of power system[J]. Electric power automation equipment, 2014, 34(7): 150-156.
- [7] 蒋程,刘文霞,张建华,等.含电池储能风电场的发电系统风险评估[J].太阳能学报,2014,35(2):207-213.  
JIANG C, LIU W X, ZHANG J H, et al. Risk assessment of generation systems of wind farm with battery energy storage[J]. Acta energiae solaris sinica, 2014, 35(2): 207-213.
- [8] STEFOPOULOS G K, MELIPOULOS A P, COKKINIDES G J. Probabilistic power flow with non-conforming electric loads[J]. International journal of electrical power & energy systems, 2005, 27(9): 627-634.
- [9] OCNASU A B, BESANGER Y, ROGNON J P, et al. Distribution system availability assessment Monte Carlo and antithetic variates method[C]//CIRED, Vienne, 2007.
- [10] SHU Z, JIRUTITIJAROEN P. Latin hypercube sampling techniques for power systems reliability analysis with renewable energy sources[J]. IEEE transactions on power systems, 2011, 26(4): 2066-2073.
- [11] 艾小猛,文劲宇,吴桐,等.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].中国电机工程学报,2013,33(16):16-23.  
AI X M, WEN J Y, WU T, et al. 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.
- [12] USAOLA J. Probabilistic load flow with wind production uncertainty using cumulants and Cornish-Fisher expansion[J]. International journal of electrical power & energy systems, 2009, 31(9): 474-481.
- [13] 周建华,袁越.含风电场电力系统的Cornish-Fisher级数概率潮流计算[J].电力自动化设备,2011,31



- (12): 68-71.
- ZHOU J H, YUAN Y. Probabilistic load flow calculation based on Cornish-Fisher expansion for power system with wind farm[J]. Electric power automation Equipment, 2011, 31(12): 68-71.
- [14] 张喆, 李庚银, 魏军强. 考虑分布式电源随机特性的配电网电压质量概率评估[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 150-156.
- ZHANG Z, LI G Y, WEI J Q. Probabilistic evaluation of voltage quality in distribution networks considering the stochastic characteristic of distributed generators [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 150-156.
- [15] 王秀丽, 张择策, 侯雨伸. 基于拟蒙特卡罗模拟法的主动配电网随机潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(3): 7-12.
- WANG X L, ZHANG Z C, HOU Y S. Stochastic load flow calculation based on quasi-Monte Carlo method for active distribution network [J]. Electric power automation equipment, 2017, 37(3): 7-12.
- [16] 孙国强, 李逸驰, 向育鹏, 等. 计及风速时空相关性的含风电场电力系统动态随机最优潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(17): 4308-4317.
- SUN G Q, LI Y C, XIANG Y P, et al. Dynamic stochastic optimal power flow of wind integrated power system considering temporal and spatial correlation of wind speed [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(17): 4308-4317.
- [17] MUSCOLINO G, RICCIARDI G. Probability density function of MDOF structural systems under non-normal delta-correlated inputs [J]. Computer methods in applied mechanics & engineering, 1999, 168(1): 121-133.
- [18] 杨苏, 袁越, 陆丹, 等. 基于风速-负荷联合状态的输电系统可靠性评估研究[J]. 可再生能源, 2016, 34(7): 1024-1031.
- YANG S, YUAN Y, LU D, et al. Reliability assessment of generation and transmission systems considering joint state of wind speed and load [J]. Renewable energy resources, 2016, 34(7): 1024-1031.
- [19] ROY S. Market constrained optimal planning for wind energy conversion systems over multiple installation sites [J]. IEEE transactions on energy conversion, 2002, 17(1): 124-129.
- [20] 王敏, 丁明. 考虑分布式电源的静态电压稳定概率评估[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 17-22.
- WANG M, DING M. Probabilistic evaluation of static voltage stability taking account of distributed generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 17-22.
- [21] 朱星阳, 刘文霞, 张建华. 考虑大规模风电并网的电力系统随机潮流[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 77-85.
- ZHU X Y, LIU W X, ZHANG J H. Probabilistic load flow method considering large-scale wind power integration [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 77-85.
- [22] 郁琛, 薛禹胜, 文福拴, 等. 风电功率预测误差的风险评估[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 52-58.
- YU C, XUE Y US, WEN F S, et al. Risk assessment of wind power prediction errors [J]. Automation of Electric power systems, 2015, 39(7): 52-58.
- [23] 巫伟南, 杨军, 胡文平, 等. 考虑输电线路故障特性的电网综合风险评估体系[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(6): 129-134.
- WU W N, YANG J, H W P, et al. Power grid risk assessment system considering characteristics [J]. Electric power automation equipment, 2014, 34(6): 129-134.
- [24] YU H, CHUNG C Y, WONG K P, et al. Probabilistic load flow evaluation with hybrid latin hypercube sampling and cholesky decomposition [J]. IEEE transactions on power systems, 2009, 24(2): 661-667.



## RISK ASSESSMENT OF VOLTAGE LIMIT VIOLATION ON DISTRIBUTION NETWORK BASED ON CORNISH-FISHER EXPANSION

Ji Guanglong, Yuan Yue, Fan Xuanran, Yuan Ruimeng, Ling Kaiyuan, Li Xiang

*(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China )*

**Abstract:** Considering the influence of wind power forecast error distribution on the risk level of distribution network in this paper, a risk assessment method based on Cornish-Fisher expansion of the distribution network is proposed. First, the wind power output model, load probability model and wind power forecasting error model are established, and the random distribution prediction error is obtained by inverse method. Next, by adopting the stochastic power flow method based on semi invariants combined with Cornish-Fisher series expansion, the voltage limit violation probability distribution of the system and each node is obtained. Then used the utility function to construct the model of voltage over limit severity and set up the risk index of voltage over limit. Finally, the simulation results of IEEE 33 demonstrate the effectiveness of the proposed model, the risk of voltage limit violation under different scenarios is analyzed, the risk assessment method can assist operators to make decision and provide reference for safe operation of distribution network.

**Keywords:** probabilistic load flow; forecast error; voltage limit violation; semi invariants; Cornish-Fisher series; risk assessment