

考虑大规模集中接入风电功率波动相关性的 在线概率安全评估

吕颖, 鲁广明, 谢昶, 戴红阳, 于之虹, 严剑峰

(电网安全与节能国家重点实验室(中国电力科学研究院有限公司), 北京市 海淀区 100192)

Online Probabilistic Security Assessment Considering Centralized Integration of Large Scale Wind Power

LÜ Ying, LU Guangming, XIE Chang, DAI Hongyang, YU Zhihong, YAN Jianfeng

(State Key Laboratory of Power Grid Safety and Energy Conservation (China Electric Power Research Institute),
Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: Uncertainty and variability of centralized large scale wind power has significant influence on power system security. A probabilistic security assessment method for power grids with centralized wind power integration is proposed for online evaluation. Instead of probabilistic distribution of wind speed or wind power generation forecast errors, wind power variation probability, more suitable for online assessment, is used to model wind power uncertainty. Correlation between power variations of different wind power bases is modeled in detail with Copula method. According to historical dynamic security analysis (DSA) data, possible wind power variation combinations before next interval of DSA calculation can be achieved with the proposed method. Then probabilistic security assessment is carried out to evaluate influence of wind power uncertainty on system security online. In order to improve calculation speed to meet online application, a multi-dimensional discrete model is proposed. Feasibility and necessity of the proposed method is validated in an actual power grid with several large scale centralized wind power bases in China.

KEY WORDS: probabilistic online security assessment; wind power variation; uncertainty; correlation

摘要: 由于风电功率的波动性和不确定性, 大规模风电集中接入对电网安全有很大影响。提出了一种在线概率安全评估方法, 能够实时评估大规模集中接入风电的不确定性对电网安全的影响。因为应用风速概率分布和风电功率预测误差概率分布模拟在线风电功率的不确定性有很多困难, 所以基于风电出力历史数据研究了风电功率超短期波动的概率分布,

并采用 Copula 函数对多个风电基地功率波动的相关性进行了详细模拟。基于风电功率历史数据, 所提方法能够给出短期内可能发生的风电基地的功率波动组合, 进而进行概率安全评估计算, 在线评估风电功率波动对电网安全的影响。为了提高计算速度, 应用多维离散模型简化多风电基地功率波动的联合概率分布。通过在某风电集中接入的省级电网进行实际应用, 验证了所提方法的有效性和必要性。

关键词: 在线概率安全评估; 风电功率波动; 不确定性; 相关性

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2017.2897

0 引言

近年来风电装机容量迅速增长, 大规模风电的接入, 会影响电网的运行特性, 如系统稳定性、断面传输极限、短路电流等^[1-3]。风电场输出功率具有波动性和不确定性, 给电网的运行和控制带来挑战。和分布式接入的风电相比, 集中式接入的风电由于装机容量大、邻近风电场相关性强, 其输出功率波动对电网安全的影响更大。

动态安全评估(dynamic security analysis, DSA) 基于实时电网拓扑和运行数据, 对电网进行周期性的全面安全稳定评估^[4]。和离线安全分析相比, DSA 能跟踪风电输出功率的变化, 更好的评估风电出力的不确定性对电网安全的影响^[5]。DSA 的计算周期一般为 15 min, 由于风电的波动性和不确定性, 其输出功率可能在 15 min 内发生很大波动, 这对电网安全的影响是现有的 DSA 所无法评估的。为此, 有学者提出并开发了一种基于 DSA 的风电安全评估工具(wind security assessment tool, WSAT), 在风电实时出力的基础上, 考虑风电的不确定性, 计算

基金项目: 国家重点研究发展计划项目(2017YFB0902600); 国家电网公司科技项目(SGJS0000DKJS1700840)。

Project Supported by The National Key Research and Development Program (2017YFB0902600); Science and Technology Foundation of SGCC (SGJS0000DKJS1700840).

风电安全水平指标^[5]。但是该方法假设所有风电机组出力按其剩余容量成比例向上波动,这对于风电的不确定性的模拟太过于简单。另外,对电网安全来说,所有风电机组出力同时增加并不一定是最严重的扰动。

很多学者研究了考虑风电不确定性的概率安全评估^[1,6-9],其中对于风电的不确定性建模主要有两种方法。第1种方法根据统计数据得到风速概率分布如正态分布^[9]和威布尔分布^[6-7],然后根据风速出力转换函数得到风电出力的概率分布。这种方法适合进行离线分析,但无法准确给出 DSA 计算周期 15 min 内的风电出力变化。第2种方法使用风电功率预测误差的概率分布,来评估风电不确定性对电网安全和日前计划的影响^[10]。由于天气的混沌特性,目前风电功率预测的误差仍然较大,这给准确描述风电出力的不确定性带来较大困难。另外风电功率预测误差的概率分布取决于预测方法及预测水平,很难找到合适的概率分布函数^[11]。

近期有文献研究了基于历史数据定量评估风电出力短期波动概率分布的方法^[12]。本文进一步发展了该方法,基于 DSA 的历史风电出力数据,快速分析 15 min 内可能发生的风电出力波动及其发生概率,并进一步评估风电出力的不确定性对电网安全的影响。

风电出力的相关性和风电出力波动的相关性对风电接入电网安全评估的结果有很大影响。研究表明,不同风电场输出功率的相关性具有非线性和非对称的厚尾特征^[13]。但不同风电场出力波动的相关性在文献[12]和其他文献中未见报道。为了准确全面的描述不同风电场出力波动的相关性,需要得到其联合概率分布。根据 Copula 理论,风电出力波动的联合概率分布可根据其边缘概率分布建立^[13]。本文基于 Copula 方法,对不同风电出力波动的相关性进行详细建模,然后进行概率安全分析计算以评估风电出力的波动对电网安全的影响。

在线安全评估对于计算速度要求较高,而概率安全评估的计算量较大。离散化方法可以将连续概率分布转化为离散的概率分布,以简化概率计算。文献[5]应用离散化方法简化风电出力预测误差和系统负荷的概率分布,其中针对单个概率分布应用了一维离散化方法。本文提出了多维离散化方法,以简化多个风电出力波动的联合概率分布,并应用风电出力波动组合筛选方法以便进一步提高计算速度。

1 风电不确定性建模

1.1 风电输出功率的波动性

对于集中接入的风电,一个风电基地内的风机、风电场最后都接入到一个厂站。为了减少计算量,直接对整个风电基地输出功率的波动性进行分析。

基于电网实时数据,某风电基地未来 15 min 内可能的风电出力可以根据其出力波动的概率分布确定。

$$P^i(j) = P_0^i + V^i(j) \quad (1)$$

式中: P_0^i 是风电基地 i 的当前出力; $V^i(j)$ 是第 j 种可能的出力波动。风电出力波动的概率分布可根据 DSA 历史风电出力数据分析得到。

图 1 中画出了某风电基地 5 天的出力曲线和出力波动曲线,其中出力波动根据公式(2)统计得到,时间间隔为 5 min。

$$V(t) = P(t + \Delta t) - P(t) \quad (2)$$

式中: $P(t)$ 和 $P(t + \Delta t)$ 分别为时刻 t 和下一个时刻的出力值; $V(t)$ 是时刻 t 的出力波动值。

文献[12]指出风电出力波动和风电出力相关性很弱。图 2 为某风电基地 3 个月的出力值和其对应的出力波动值,其中风电出力按从小到大排序。计

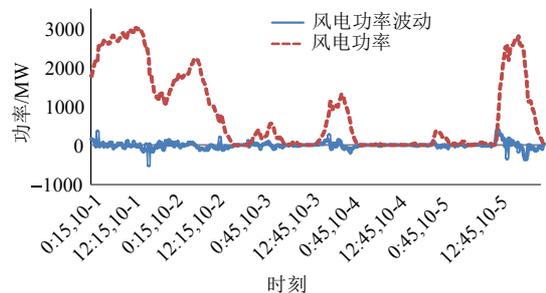
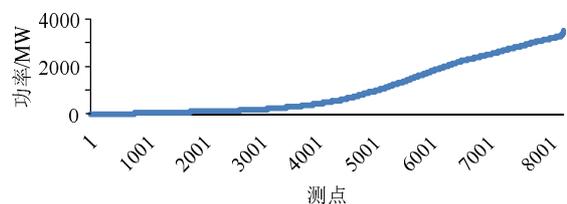
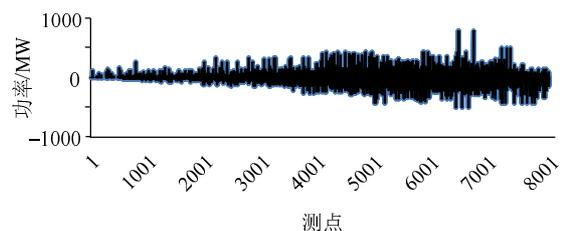


图 1 风电基地出力及波动曲线
Fig. 1 Wind power variation curve



(a) 各个测点风电基地输出功率



(b) 各个测点风电基地输出功率波动

图 2 风电出力及风电出力波动相关性示意图

Fig. 2 Wind power variation and wind power output

算其泊松相关系数为 0.001 8, 表明风电基地的输出波动和风电基地出力弱相关, 即未来可能出现的风电波动与当前的风电出力弱相关。

1.2 风电功率波动的概率分布

风电基地的输出波动与其装机容量 P_N 相关, 定义归一化的风电基地出力变化率如下:

$$\bar{V}(t) = \frac{P(t + \Delta t) - P(t)}{P_N} \times 100 \quad (3)$$

采用 Matlab 的概率密度拟合工具箱对风电出力波动的概率密度函数进行拟合, 发现 t location-scale 分布拟合效果最好, 更适合描述呈胖尾特性的分布。t location-scale 分布为带位置和尺度参数的 t 分布, 具体如下:

$$f(\bar{v}) = \frac{\Gamma(s + 1/2)}{\sigma_t \sqrt{s\pi} \Gamma(s/2)} \left[\frac{s + (\bar{v} - \mu_t / \sigma_t)^2}{s} \right]^{-s+1/2} \quad (4)$$

式中: \bar{v} 是风电出力波动; μ_t 是位置参数; σ_t 是尺度参数; s 是形状参数; Γ 是伽玛函数。

如图 3 所示, 针对某风电基地 3 个月的历史数据, 对比了正态分布和 t location-scale 分布对风电出力波动的概率分布的拟合效果。

图 4 中选择不同的时间尺度 5、10、15 min, 用式(3)统计风电出力波动, 然后进行概率分布拟合, 可以看出, 时间间隔越长, 风电出力波动越大。本文选择 15 min 时间尺度统计风电出力波动, 以找出 DSA 计算间隔中最严重的风电出力波动。

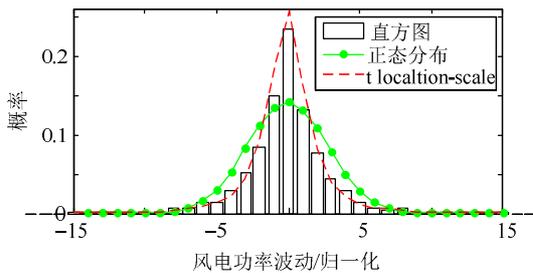


图 3 风电基地出力波动概率分布拟合
Fig. 3 Fittings using different distributions

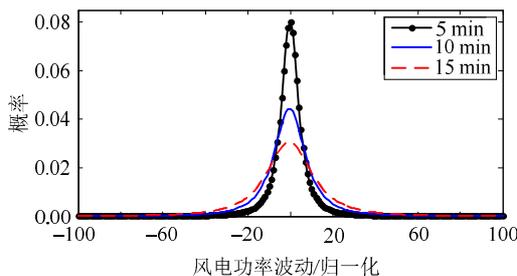


图 4 不同时间尺度下的风电基地出力波动概率分布
Fig. 4 Power variation probability distribution in different intervals

2 风电基地功率波动的相关性建模

2.1 风电基地功率波动的相关性分析

地理位置邻近的风电基地的出力之间以及出力波动之间有一定的相关性。图 5 中画出了 3 个风电基地 1 d 的风电出力曲线, 可以看出, 风电基地 1 和风电基地 2 的出力变化有相同的趋势, 而风电基地 1 和风电基地 3 的出力变化有相反的趋势。为了量化其出力波动间的相关性, 计算其泊松相关系数和 spearman 秩相关系数如表 1 所示。

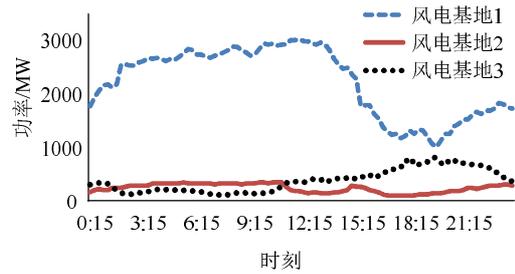


图 5 3 个风电基地出力曲线
Fig. 5 Output power curve of 3 wind power bases

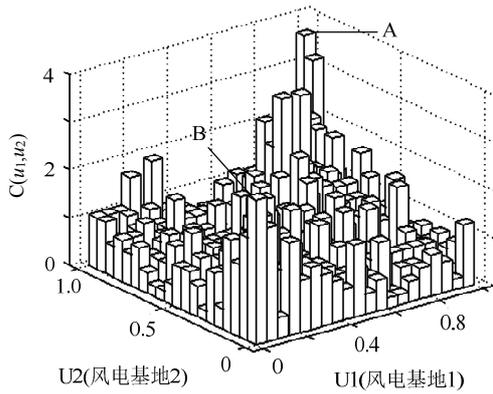
表 1 3 个风电基地出力波动的相关性
Tab. 1 Correlation between three wind power bases

风电基地组合	泊松相关系数	Spearman 秩相关系数
(1, 2)	0.1817	0.2249
(1, 3)	-0.2226	-0.1995
(2, 3)	-0.0161	0.0131

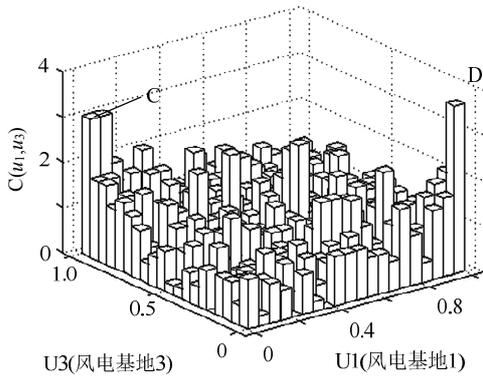
文献[13]指出不同风电场出力间的相关性具有非对称的厚尾特征。为了详细的分析风电基地出力波动间的相关性, 绘出其二元直方图如图 6, u_1 、 u_2 、 u_3 分别表示 3 个风电基地出力波动的累计概率分布, $C(u_1, u_2)$ 和 $C(u_1, u_3)$ 表示其联合概率。图 6(a) 中接近 A 点、B 点时其联合概率显著快速增大, 图 6(b) 中接近 C 点、D 点时其联合概率显著快速增大, 即风电基地间出力波动相关性具备厚尾特征, 风电基地 1 和风电基地 2 出力波动正相关, 风电基地 1 和风电基地 3 出力波动负相关。不同于风电场出力间的相关性, 风电基地间出力波动的相关性具有对称性, 因为风电出力在向上波动和向下波动间是对称的。

2.2 基于 Copula 的风电基地出力相关性建模

泊松相关系数和 spearman 秩相关系数无法准确模拟风电基地出力波动间相关性的非线性和厚尾特征^[13]。Copula 函数将多元随机变量的联合概率分布表示为各自边缘分布的连接, 可以基于 Copula 函数建立风电基地间出力波动的联合概率分布, 详细模拟其相关性。根据 Sklar 定理, 如果风电基地 1 出力波动随机变量 V_1 的边缘分布为 F_1 , 风电基地 2



(a) 风电基地1和风电基地2



(b) 风电基地1和风电基地3

图6 二元直方图

Fig. 6 Two element histogram

出力波动随机变量 V_2 的边缘分布为 F_2 , 用 Copula 函数 C 建立其联合概率分布如下:

$$F_{12}(v_1, v_2) = C(F_1(v_1), F_2(v_2)) \quad (5)$$

如果 F_1 和 F_2 是连续的, 则函数 C 是唯一的。

如果 $u_1 = F_1(v_1)$, $u_2 = F_2(v_2)$, 则式(5)可写为

$$C(u_1, u_2) = F_{12}(F_1^{-1}(u_1), F_2^{-1}(u_2)) \quad (6)$$

常用的 Copula 函数如表 2 所示^[14], 根据其特性选择用 t-copula 函数来模拟不同风电基地间出力波动相关性的厚尾和对称特征。

表2 常见的 Copula 函数
Tab. 2 Common families of Copula function

Copula 函数类型	特性
Normal-copula	对称, 无尾部特征
t-copula	对称, 有尾部特征
Gumbel-copula	不对称, 有上尾特征
Clayton-copula	不对称, 有下尾特征
Frank-copula	对称, 无尾部特征

根据式(6)可以基于 Copula 函数建立风电基地出力波动的联合概率分布, 步骤如下:

1) 根据 DSA 各风电基地的出力历史数据, 用式(3)计算风电基地出力波动, 用 t location-scale 分布拟合风电基地出力波动的概率分布, 然后得到其累积概率分布。

2) 选择 t-copula 函数模拟不同风电基地间出力波动的相关性, 对于两个风电基地间的出力波动相关性描述如下:

$$C(u_1, u_2, \rho, k) = \int_{-\infty}^{t_k^{-1}(u_1)} \int_{-\infty}^{t_k^{-1}(u_2)} \frac{1}{2\pi\sqrt{1-\rho^2}} \left[1 + \frac{x_1^2 - 2\rho x_1 x_2 + x_2^2}{k(1-\rho^2)} \right]^{-\frac{(k+2)}{2}} dx_1 dx_2 \quad (7)$$

式中: ρ 是相关系数; k 是自由度; t_k^{-1} 是 t 分布函数的反函数; u_1 和 u_2 是累积分布; x_1 和 x_2 是积分变量。

3) 用最大似然法^[15]估计 t-copula 函数的参数, 然后用 K-S 检验法评估参数估计效果, 根据 3 个月的历史数据对图 5 中 3 个风电基地两两间的相关性根据式(7)进行参数估计和评估, 结果如表 3。

组合	ρ	k	K-S 检验
(1, 2)	0.250 0	4.158 9	0.012 6
(1, 3)	-0.221 5	6.366 6	0.014 6
(2, 3)	0.014 8	5.461 9	0.013 3

3 在线概率安全评估

3.1 基于 Copula 函数的蒙特卡罗仿真

基于蒙特卡罗模拟方法并结合 Copula 理论建立风电基地概率波动相关变量的采样方法, 采用如下步骤对 N 个风电基地生成 S 个样本:

1) 采样生成 N 个 0 到 1 之间的随机变量(z_1, z_2, \dots, z_N)作为初始值。

2) 根据(z_1, z_2, \dots, z_N)按下面公式递归计算得到(u_1, u_2, \dots, u_N)。

$$u_1 = z_1, u_k = C_{(u_1, u_2, \dots, u_{k-1})}^{-1}(z_k), k = 2, \dots, N \quad (8)$$

$$C_{(u_1, u_2, \dots, u_{k-1})}(u_k) = \frac{\partial^{k-1}_{(u_1, \dots, u_{k-1})} C(u_1, \dots, u_k, 1, \dots, 1)}{\partial^{k-1}_{(u_1, \dots, u_{k-1})} C(u_1, \dots, u_{k-1}, 1, \dots, 1)}, \quad \partial^{k-1}_{(u_1, \dots, u_{k-1})} C = \frac{\partial^{k-1} C}{\partial u_1 \partial u_2 \dots \partial u_{k-1}} \quad (9)$$

3) 通过求解累积分布函数的逆函数 $v_k = F_k^{-1}(u_k)$ 得到(v_1, v_2, \dots, v_N), 即为 N 个风电基地的功率波动随机变量。

4) 重复步骤 1 到 3 共 S 次, 得到风电基地功率波动随机样本($v_{1,t}, v_{2,t}, \dots, v_{N,t}$), $t=1, 2, \dots, S$ 。

根据足够多的采样样本就可以统计得到 N 个风电基地功率波动的联合概率分布。为了提高计算速度, 对联合概率分布应用离散方法进行简化。首先逐个对每个风电基地的功率波动概率分布进行离散化得到若干离散点, 如表 4。 N 个风电基地功率波动联合概率分布的离散点由每个风电基地的离散点组合而成, S 个样本每个都属于某个离散点($v_1,$

v_2, \dots, v_N), 代表某个功率波动组合。图 7 为两维联合概率分布的离散化示例, 图 7 中矩形区域 $[-30: -10, -30: -10]$ 中的每个样本都近似为离散点 $(-20, -20)$ 。对所有样本进行离散化后, 可以统计得到每个功率波动组合的概率。

表 4 风电基地功率波动离散概率分布
Tab. 4 Discrete probabilities of wind power variation

序号	离散点/MW	区间/MW	概率
1	-80	-90~70	0.001 9
2	-60	-70~50	0.020 2
3	-40	-50~30	0.090 6
4	-20	-30~10	0.232 8
5	0	-10~10	0.310 9
6	20	10~30	0.232 5
7	40	30~50	0.090 6
8	60	50~70	0.020 2
9	80	70~90	0.001 9

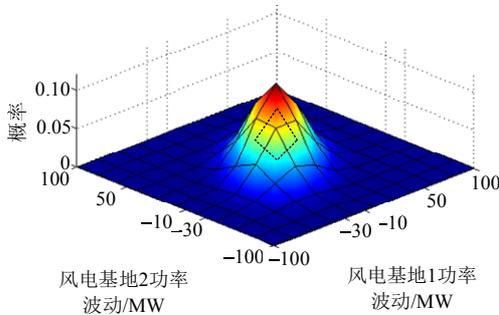


图 7 二维离散模型示意图

Fig. 7 Sketch map for two-dimensional discrete model

3.2 风电功率波动严重程度评估

风电功率波动会引起电网潮流变化, 进而影响电网的安全稳定水平。本文在进行风电功率波动后的潮流分析时, 计及调速器和自动发电控制 (automatic generation control, AGC) 的动作特性, 避免不平衡功率全部由平衡机承担。然后进行静态安全分析和暂态稳定分析来判断风电功率波动后的电网是否满足安全稳定要求(没有预想故障后的越限, 没有功角稳定问题等), 并定义若干指标量化评估电网安全水平。

对于静态安全分析, 主要关注故障后的电流和电压越限。为评估由于故障 m 引起的支路 j 越限的严重程度, 定义越限指标 O_{mj} 如下:

$$O_{mj} = \begin{cases} \frac{I_{j(\text{ctg } m)} - I_{j\max}}{I_{j\max}}, & I_{j(\text{ctg } m)} > I_{j\max} \\ 0, & \text{否则} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $I_{j(\text{ctg } m)}$ 是故障 m 后支路 j 的电流; $I_{j\max}$ 是支路 j 的额定载流量; 故障 m 的越限指标定义如式(11), 类似的可以定义和计算电压越限指标。

$$O_m = \sum_j O_{mj} \quad (11)$$

应用时域仿真算法进行暂态稳定评估时, 功角失稳的判据为最大功角差 δ 是否超过阈值 δ_{\max} 。当系统稳定时, 根据最大功角差定义严重指标 T_n 如式(12), 当系统失稳时根据失稳时刻 T_{ps} 和仿真时长 T_{sim} 定义严重指标 T_n 如式(13)。

$$T_n = \begin{cases} \frac{\delta - 0.8\delta_{\max}}{\delta_{\max}} \times 5, & \delta_{\max} > \delta > 0.8\delta_{\max} \\ 0, & \delta \leq 0.8\delta_{\max} \end{cases} \quad (12)$$

$$T_n = 1 + \frac{T_{\text{sim}} - T_{\text{ps}}}{T_{\text{sim}}} \quad (13)$$

定义相对指标 O'_m 和 T'_n 为风电功率波动前后严重指标的差值, 表示由于风电功率波动引起的电网安全稳定水平的变化。

$$O'_i = \sum_{m=1}^M O'_{mi}, \quad T'_i = \sum_{n=1}^N T'_{ni} \quad (14)$$

式中: O'_{mi} 是风电功率波动组合 i 下故障 m 的静态安全严重指标; T'_{ni} 是风电功率波动组合 i 下故障 n 的暂态稳定严重指标。

3.3 风电功率波动风险评估

由于不同风电功率波动组合的发生概率可能相差很大, 只用严重程度指标评估风电功率波动很不合理。风险评估方法已经应用到在线安全评估中^[16], 本文定义风险指标为严重程度指标与其发生概率的乘积, 全网风险指标定义如下:

$$R = \sum_{i=1}^K (R_{O_i} + R_{T_i}) = \sum_{i=1}^K (P_i \times \sum_{m=1}^M p_m O'_{mi} + P_i \times \sum_{n=1}^N p_n T'_{ni}) \quad (15)$$

式中: P_i 是风电功率波动组合 i 发生概率; R_{O_i} 和 R_{T_i} 是波动组合 i 对应的静态安全风险和暂态稳定风险; O'_{mi} 是波动组合 i 下故障 m 的静态安全严重指标; p_m 是故障 m 发生概率; T'_{ni} 波动组合 i 下故障 n 的暂态稳定严重指标; p_n 是故障 n 的发生概率。

全网风险代表由于未来 15 min 内风电功率波动给电网带来的安全风险, 与当前电网运行状态及风电输出功率等因素相关。

4 算例分析

4.1 算例系统

在某省级电网对本文提出的方法进行应用验证, 图 8 为其局部电网接线示意图, 有 3 个大规模集中接入的风电基地记为 W1、W2 和 W3, 表 5 中列出其装机容量、平均功率波动和最大功率波动值。

用 3 维 t-copula 函数描述其功率波动间的相关性如式(16)所示, Copula 函数参数估计结果如式(17)所示。

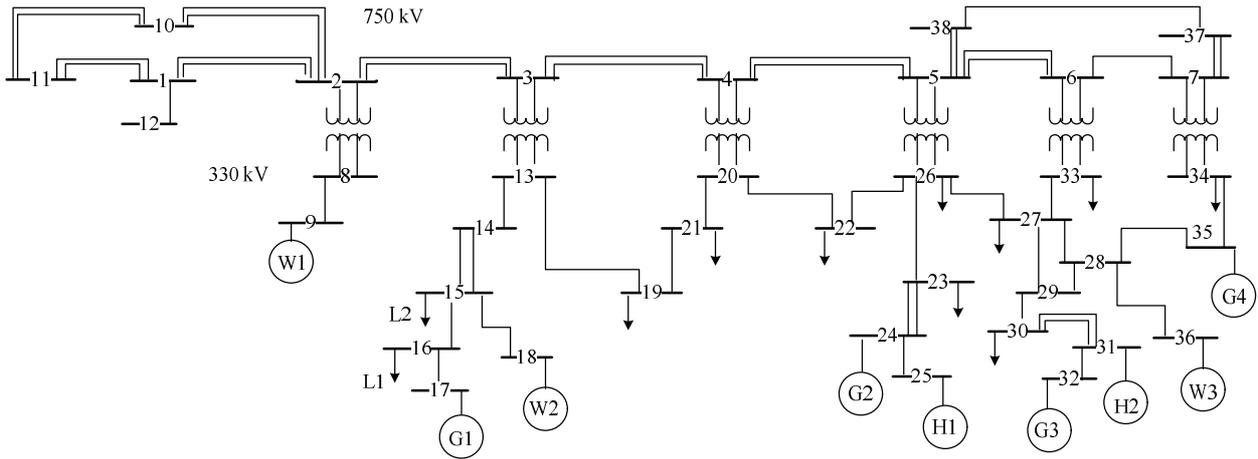


图 8 局部电网接线示意图

Fig. 8 Diagram for part of one provincial power grid

表 5 3 个风电基地装机容量和功率波动统计
Tab. 5 Information of three wind power bases

风电基地	装机容量/MW	平均波动/MW	最大波动/MW
WFB1	3600	60	800
WFB2	1600	29	426
WFB3	650	13	150

$$C(u_1, u_2, u_3, \rho, k) = \int_{-\infty}^{t_k^{-1}(u_1)} \int_{-\infty}^{t_k^{-1}(u_2)} \int_{-\infty}^{t_k^{-1}(u_3)} \frac{\Gamma(\frac{k+3}{2})|\rho|^{-\frac{1}{2}}}{\Gamma(\frac{k}{2})(k\pi)^{\frac{3}{2}}} [1 + \frac{1}{k} x^T \rho^{-1} x]^{-\frac{(k+3)}{2}} dx \quad (16)$$

$$\rho = \begin{bmatrix} 1.0000 & 0.2426 & -0.2059 \\ 0.2426 & 1.0000 & 0.0039 \\ -0.2059 & 0.0039 & 1.0000 \end{bmatrix}, k = 5.5581 \quad (17)$$

该省级电网有大量水电装机，根据调速器和 AGC 的设置主要由水电机组承担风电功率波动引起的不平衡功率。

图 9 为在线安全评估系统的示意图，包括本文提出的在线概率安全评估功能。

系统每 15 min 启动一次计算，基于电网实时数据进行包括静态安全分析、暂态稳定分析、小干扰

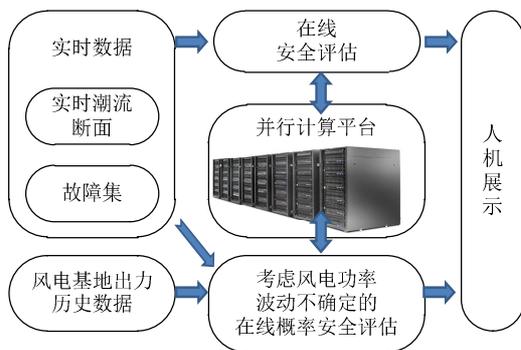


图 9 在线安全评估架构示意图

Fig. 9 Structure chart of online security assessment system

稳定分析的安全稳定评估。系统运行在由 20 个刀片服务器组成的并行计算平台上，每个刀片服务器包含 64 个 CPU 核。根据风电功率波动组合和预想故障集，将风电功率波动概率安全评估的计算任务分配到并行计算平台上。

4.2 算例结果

考虑风电功率波动的概率安全评估包含以下两个功能模块：1) 抽样生成风电基地功率波动组合。2) 概率安全评估计算。如第 2 节所述，风电基地功率波动与风电基地出力弱相关，因此功能模块一不需在线运行。实际每天运行 1 次，并将当天最新的风电出力数据加入到历史数据，以提高风电功率波动模拟的抽样仿真精度。某日运行情况如下：用第 4 节的方法进行 20 000 次抽样，然后进行间隔 50 MW 的离散化，得到 363 组风电功率波动组合。

概率安全评估功能模块在线运行，每 15 min 计算一次。静态安全分析故障 461 个，暂态稳定故障 161 个。随机选择 2 天中的 2 个时刻的电网数据进行概率安全评估计算。

算例 1 中，风电基地 W1、W2、W3 出力分别为 1781 MW、1029 MW 和 224MW，部分风电功率波动组合及其静态严重指标如表 6。组合 1 的 3 个

表 6 风电功率波动组合及静态严重指标(算例 1)
Tab. 6 Wind variation combinations and overcurrent severity index (case 1)

序号	基地 1 功率波动/MW	基地 2 功率波动/MW	基地 3 功率波动/MW	严重指标
1	300	150	50	1.22
2	-300	-150	-50	1.64
3	-300	150	-50	1.78
4	-250	150	-50	1.55
5	-200	150	-50	1.46
6	-200	150	0	1.46

风电基地的功率都向上最大波动，但组合 3 的严重指标最高，其 W2 向上波动而 W1 和 W3 向下波动。因为 W2 实时出力相比其装机容量很大导致邻近的线路 15-14 潮流重载(潮流方向为从节点 15 到 14)，W2 出力再向上波动就会导致线路 15-14 在其邻近线路故障时出现越限。同时 W1、W3 功率向下波动，且波动量大于 W2，会引起包括 H1 和 H2 的水电机组出力增加进而导致线路 24-23 和 31-30 在邻近线路故障时越限。组合 2 上午 3 个风电基地的功率都向下最大波动，其严重指标比组合 3 的低，原因是 W2 的向下功率波动由多个水电机组承担，而 W2 的向上功率波动全部由线路 15-14 承担。

算例 2 中，风电基地 W1、W2、W3 的出力分别为 2797 MW，627 MW 和 401 MW，部分风电功率波动组合及其静态严重指标如表 7。组合 1 的 3 个风电基地的功率都向上最大波动，但组合 3 的严重指标最高。因为 W1 和 W3 实时出力相比其装机容量很大导致邻近的线路 28-27 和变压器 8-2 潮流重载，W1 和 W3 出力再向上波动就会导致线路 28-27 和变压器 8-2 在其邻近线路故障时出现越限。由于机组 G1 检修而负荷 L1 和 L2 重负荷，线路 14-15 实时潮流重载(方向为从节点 14-15)，W2 功率再向下波动就会引起线路 14-15 在其邻近线路故障时出现越限。

为对比本文方法与文献[5-6]方法的结果，图 10 中将算例 1 和算例 2 中按文献[5-6]中的简单方法找到的最严重故障(3 个风电基地同时向上最大波动)

表 7 风电功率波动组合及静态严重指标(算例 2)
Tab. 7 Overcurrent severity indices for wind power variation combinations (case 2)

序号	基地 1 功率波动/MW	基地 2 功率波动/MW	基地 3 功率波动/MW	严重指标
1	300	150	50	0.86
2	-300	-150	-50	0.04
3	300	-150	50	1.29
4	300	-100	50	1.16
5	250	-150	50	1.18
6	300	-150	0	1.04

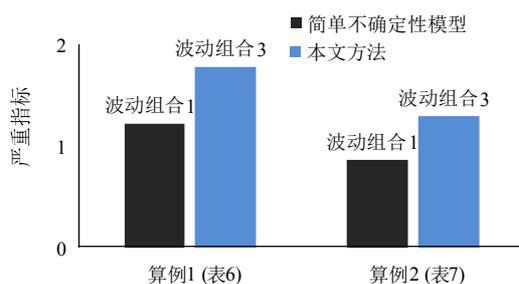


图 10 严重指标结果对比
Fig. 10 Comparison of security indices

即表 6 和表 7 中的 1 号组合，与用本文方法找出的最严重故障即表 6 和表 7 中的 3 号组合进行严重指标对比，可以看出两个算例中风电基地功率同时向上最大波动都不是最严重的风电功率波动场景。因此有必要对风电基地功率波动的不确定性进行详细的建模，以找出对电网安全影响最大的风电功率波动组合。

从表 4 可以看出，当风电功率波动较大时，随着风电功率波动增大其发生概率快速降低。表 4 中当风电功率波动由 60 MW 增加到 80 MW 时其概率降低超过 10 倍。根据这个特点，为了减少离散化后组合的数目，去除发生概率极小(小于概率门槛值 P_{low})的风电功率波动组合。

表 8 中给出了表 7 中波动组合对应的静态越限严重指标、发生概率和风险指标，前 3 个组合的发生概率极低，尽管其严重指标较高，但其风险指标不高。表 9 中给出了对应的暂态严重指标和风险指标，结果与表 8 类似。

表 10 中对比了采样数目、离散化后的组合数目和进一步去除低概率组合后的组合数目，处理后剩余 205 个风电波动组合，仅为采样数目 20 000 的百分之一，即计算速度比传统蒙特卡罗仿真提高 100 倍。基于 DSA 的并行计算平台，考虑风电功率波动的概率安全评估能够在 10 min 内完成，能满足在线应用的需求。

离散化处理会影响风电功率波动大小的精度，进而影响严重指标的计算精度，表 11 中列出了对算例 1 用本文方法和蒙特卡罗仿真找出的最严重风电功率波动组合。表 11 中 1 号为本文方法的计算结果，严重指标 1.78 表示该风电功率波动共导致新

表 8 风电功率波动组合及静态严重指标和风险指标
Tab. 8 Over-current severity indices and risk index

序号	严重指标	概率	风险指标
1	0.86	5.0×10^{-5}	2.15×10^{-7}
2	0.04	5.0×10^{-5}	9.45×10^{-7}
3	1.29	5.0×10^{-5}	3.26×10^{-7}
4	1.16	2.0×10^{-4}	1.17×10^{-6}
5	1.18	5.5×10^{-4}	3.24×10^{-6}
6	1.04	6.0×10^{-4}	3.13×10^{-6}

表 9 风电功率波动组合及暂态严重指标和风险指标
Tab. 9 Transient angle severity indices and risk index

序号	严重指标	概率	风险指标
1	0.070	5.0×10^{-5}	1.76×10^{-8}
2	0.056	5.0×10^{-5}	1.40×10^{-8}
3	0.084	5.0×10^{-5}	2.12×10^{-8}
4	0.040	2.0×10^{-4}	4.00×10^{-8}
5	0.040	5.5×10^{-4}	1.12×10^{-7}
6	0.039	6.0×10^{-4}	1.18×10^{-7}

表 10 风电功率波动采样和组合数目
Tab. 10 Number of Samples and Combinations

样本数目	风电功率波动组合数目	
	离散化后	去除低概率($P_{LOW}=1\times 10^{-4}$)
20 000	363	205

表 11 最严重的风电功率波动组合对比
Tab. 11 Comparison for severest variation combination

序号	基地 1 功率 波动/MW	基地 2 功率 波动/MW	基地 3 功率 波动/MW	严重指标
1	-300	150	-50	1.78
2	-289	156	-70	1.87

增的故障后越限百分比达 178%，比用蒙特卡罗仿真方法找出的最严重的表 11 中 2 号组合小 0.09。表 12 中列出了对算例 2 用本文方法和蒙特卡罗仿真找出的最严重组合的对比，严重指标相差也很小。

表 13 中列出了针对两个算例用蒙特卡罗仿真、离散化处理后和进一步去除低概率组合的全网风险，可以看出去除低概率组合引起的全网风险计算误差很小，相比蒙特卡罗仿真，离散化处理会引起较大的全网风险计算误差，但全网风险计算的相对趋势是正确的。

表 12 最严重的风电功率波动组合对比(算例 2)
Tab. 12 Comparison for severest variation combination

序号	基地 1 功率 波动/MW	基地 2 功率 波动/MW	基地 3 功率 波动/MW	严重指标
1	300	-150	50	1.29
2	323	-157	58	1.40

表 13 风险指标结果对比
Tab. 13 Comparison for risk index by different methods

算例 序号	离散化后 全网风险	去除低概率组合后 全网风险	蒙特卡罗方法 全网风险
1	9.2×10^{-5}	8.7×10^{-5}	1.10×10^{-4}
2	5.5×10^{-5}	5.1×10^{-5}	7.04×10^{-5}

5 结论

本文提出了一种考虑集中接入风电功率波动及其相关性的概率安全评估方法。基于历史数据建立风电功率波动的概率分布模型，采用 Copula 函数实现风电功率波动相关性的详细建模。不同于风电场出力的相关性，风电基地出力波动间的相关性是对称的，同时同样具有厚尾特征。

采用基于 Copula 函数的蒙特卡罗仿真采样生成未来 15 min 内电网可能出现的风电基地功率波动组合。由于风电功率扰动与实时风电出力弱相关，比较耗时的蒙特卡罗仿真不需要在线运行。概率安全评估计算在线运行，基于实时电网状态和可能的风电基地功率波动组合，定量评估风电功率波动对电网安全的影响。为了提高计算速度，采用多维离散化方法简化多个风电基地功率波动组合的

联合概率分布，应用效果表明加速效果良好。

本文提出的方法在某省级电网进行了应用验证，考虑风电基地功率波动的概率安全评估计算能够在 10 min 内完成，能够满足以 15 min 为周期的在线安全评估的速度要求。算例验证表明该方法能找出未来 15 min 可能发生的最严重的风电功率扰动组合，算例中所有风电基地功率同时向上最大波动并不是最严重的，因此有必要详细模拟风电功率波动的不确定性。

参考文献

- [1] 梁立龙, 白雪峰. 计及风速相关性的含风电电力系统暂态稳定分析[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 3228-3232.
Liang Lilong, Bai Xuefeng. Transient stability analysis of power system considering wind speed correlation[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3228-3232(in Chinese).
- [2] 郑超, 葛星, 霍超, 等. 近振荡中心规模化风电对电网阻尼特性的影响[J]. 电网技术, 2017, 41(5): 1561-1568.
Zheng Chao, Ge Xing, Huo Chao, et al. Analysis of influence of large-scale wind farm adjacent to oscillation center on damping characteristics[J]. Power System Technology, 2017, 41(5): 1561-1568(in Chinese).
- [3] 王伟胜, 张冲, 何国庆, 等. 大规模风电场并网系统次同步振荡研究综述[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1050-1060.
Wang Weisheng, Zhang Chong, He Guoqing, et al. Overview of research on subsynchronous oscillations in large-scale wind farm integrated system[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1050-1060(in Chinese).
- [4] 严剑峰, 于之虹, 田芳, 等. 电力系统在线动态安全评估和预警系统[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 87-93.
Yan Jianfeng, Yu Zhihong, Tian Fang, et al. Dynamic security assessment & early warning system of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 87-93(in Chinese).
- [5] Ivan M D, Alan R, Robbie A, et al. Safety in numbers: online security analysis of power grids with high wind penetration[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2012, 10(2): 62-70.
- [6] Faried S O, Billinton R, Aboreshaid S. Probabilistic evaluation of transient stability of a wind farm[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2009, 24(3): 733-739.
- [7] 黄海煜, 于文娟. 考虑风电出力概率分布的电力系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2585-2591.
Huang Haiyu, Yu Wenjuan. Power grid reliability assessment considering probability distribution of wind farm power output[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2585-2591(in Chinese).
- [8] 林泽坤, 彭显刚, 武小梅, 等. 基于交叠概率的含风电的地区电网暂态电压稳定评估的特征选择[J]. 电网技术, 2014, 38(2): 484-488.
Lin Zekun, Peng Xiangang, Wu Xiaomei, et al. Overlapped probability based feature selection for assessment on transient voltage stability of regional power system containing wind farms[J]. Power System Technology, 2014, 38(2): 484-488(in Chinese).
- [9] Almeida A B, Lorenci E V, Leme R C, et al. Probabilistic voltage stability assessment considering renewable sources with the help of the PV and QV curves[J]. IET Renewable Power Generation, 2013, 7(5): 521-530.
- [10] Bludszweit H, Dominguez-Navarro J A. A probabilistic method for

- energy storage sizing based on wind power forecast uncertainty [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1651-1658.
- [11] Bruninx K, Delarue E. A statistical description of the error on wind power forecasts for probabilistic reserve sizing[J]. IEEE Transactions Sustainable Energy, 2014, 5(3): 995-1002.
- [12] 林卫星, 文劲宇, 艾小猛, 等. 风电功率波动特性的概率分布研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 38-46.
Lin Weixing, Wen Jinyu, Ai Xiaomeng, et al. Probability density function of wind power variations[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 38-46(in Chinese).
- [13] 黎静华, 文劲宇, 程时杰, 等. 考虑多风电场出力 Copula 相关关系的场景生成方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 30-36.
Li Jinghua, Wen Jinyu, Cheng Shijie, et al. A scene generation method considering copula correlation relationship of multi-wind farms power[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 30-36(in Chinese).
- [14] Nelsen R B. An introduction to Copulas[M]. 2nd ed. New York, NY, USA: Springer, 2006.
- [15] 王俊, 蔡兴国, 季峰. 基于 Copula 理论的相关随机变量模拟方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 75-82.
- Wang Jun, Cai Xingguo, Ji Feng. A simulation method of correlated random variables based on Copula[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 75-82(in Chinese).
- [16] Ciapessoni E, Cirio D, Grillo S, et al. An integrated platform for power system security assessment implementing probabilistic and deterministic methodologies[J]. IEEE Systems Journal, 2013, 7(4): 845-853.



吕颖

收稿日期: 2017-12-06。

作者简介:

吕颖(1981), 男, 博士, 高级工程师, 通信作者, 主要研究方向为电力系统在线安全稳定分析, 安全校核, 考虑新能源接入的在线安全分析, E-mail: lvying@epri.sgcc.com.cn。

(责任编辑 王金芝)