

引用格式: 李化, 张彬彬, 丁艳军. 蒙特卡洛模拟法在计算风场超越概率发电量中的应用[J]. 南方能源建设, 2024, 11(6): 174-182. LI Hua, ZHANG Binbin, DING Yanjun. Application of monte carlo simulation for calculating power generation with exceeding probability in wind farm [J]. Southern energy construction, 2024, 11(6): 174-182. DOI: 10.16516/j.ceec.2024.6.18.

蒙特卡洛模拟法在计算风场超越概率发电量中的应用

李化[✉], 张彬彬, 丁艳军
(润阳能源技术有限公司, 天津, 300300)

摘要: [目的] 风场不确定性给风场发电量带来呈概率的分布, 对不确定性因素进行科学并客观地评估是计算风场超越概率发电量的重要前提。目前行业普遍采用折减系数的办法来预估发电量, 达到控制风险的目的, 或者对不确定性因素按概率取值计算, 以评估风场的超越概率发电量。针对这种简单的折减或者忽视不确定因素的本质计算风场超越概率发电量的做法, 文章旨在提出一种既遵循不确定因素的本质还能科学地计算风场超越概率发电量计算方法。[方法] 文章采用蒙特卡洛模拟法构建不确定性因素的正态概率分布模型, 对不确定性进行模拟, 并得出统计结果。通过借助风速-发电量敏感因子, 确定风场发电量的不确定性程度, 最终计算风场超越概率发电量。[结果] 蒙特卡洛进行多次随机模拟结果是服从正态分布的具体函数。文章举例模拟了不确定性因素标准差分别为平均值的 12.0%、14.0%、16.0% 3 种情况的结果, 特定置信区间 95% 风速不确定性程度的分布范围分别为 7.08%~8.56%、6.97%~8.71%、6.88%~8.84%, 发电量总不确定性程度分布范围分别为 13.36%~15.92%、13.17%~16.18%、13.01%~16.41%, 超越概率发电量分布范围分别为 96.06~101.52 GWh、95.50~101.92 GWh、95.01~102.26 GWh。[结论] 采用超越概率发电量作为评估风场投资风险依据, 有助于在正确、可靠的基础上进行决策, 运用蒙特卡洛模拟方法体现了科学性和高效性, 得到的结果具有统计意义。

关键词: 不确定性因素; 正态分布; 蒙特卡洛模拟法; 风速-发电量敏感因子; 超越概率发电量

中图分类号: TU311

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2024)06-0174-09

DOI: 10.16516/j.ceec.2024.6.18

OA: <https://www.energychina.press/>



论文二维码

Application of Monte Carlo Simulation for Calculating Power Generation with Exceeding Probability in Wind Farm

LI Hua[✉], ZHANG Binbin, DING Yanjun
(Runyang Energy Technology Co., Ltd., Tianjin 300300, China)

Abstract: [Introduction] The uncertainty of wind farm brings probability distribution to power generation. The objective and scientific evaluation of uncertainty factors is an important prerequisite for calculating power generation with exceeding probability in wind farm. At present, the industry generally adopts reduction factors to estimate power generation to achieve risk control. Alternatively, uncertain factors are analyzed using probabilistic methods to evaluate the exceedance probability of power generation in wind farms. In view of the simple reduction or neglect of the nature of the uncertain factors, this paper proposes a scientific method to calculate the power generation with exceeding probability in wind farm following the nature of the uncertain factors. [Method] In this paper, the Monte Carlo simulation method was used to construct the normal probability distribution model of uncertainty factors, to simulate and obtain the statistical results for uncertainty. The wind speed-power generation sensitivity factor was applied to determine the uncertainty in wind farm

收稿日期: 2023-10-09 修回日期: 2023-12-12 网络首发日期: 2024-06-07

基金项目: 国家重点研发计划重点专项项目“风力发电复杂风资源特性研究及其应用与验证”(2018YFB1501100)

power generation, and finally, the exceeding probability of wind farm power generation was calculate. [Result] The results of many random simulations by Monte Carlo are concrete functions obeying normal distribution. In this paper, the results of three cases, the standard deviation of uncertainty factor is 12.0%, 14.0%, 16.0% of the average, are simulated. The distribution range of 95% wind speed uncertainty in specific confidence interval is 7.08% ~ 8.56%, 6.97% ~ 8.71% and 6.88% ~ 8.84%, and the distribution range of total uncertainty of power generation is 13.36% ~ 15.92%, 13.17% ~ 16.18% and 13.01% ~ 16.41% respectively. The distribution range of power generation with exceeding probability is 96.06 ~ 101.52 GWh, 95.5 ~ 101.92 GWh and 95.01 ~ 102.26 GWh respectively. [Conclusion] It is helpful for decision-making to be established on a correct and reliable basis to evaluate the investment risk of wind farm based on the power generation with exceeding probability. The Monte Carlo simulation method is scientific and efficient, and the results obtained have statistical significance.

Key words: uncertainty factors; normal distribution; Monte Carlo simulation method; wind speed-power generation sensitive factor; power generation with exceeding probability

2095-8676 © 2024 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI. This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

0 引言

风场发电量是决定风电场投资决策的关键因素之一,是影响风场经济效益的重要指标。因发电量的评估是根据测风数据经过长期代表年订正后,通过流体力学模型软件推算到风场各风机点位轮毂高风速,再结合风机功率曲线预测风场全生命周期的平均产量水平。在利用过去已有测风数据评估未来建成风场产量这一过程中,每一环节都将给发电量带来不确定性,且测算时间距离评估风场时间越远,风场地形地貌越复杂预测的不确定性会越大。因此,发电量的不确定性是客观存在的,对它进行正确的分析和评估,采用一定超越概率下的发电量评估结果有助于降低风场投资风险,使决策建立在正确、可靠的基础上^[1]。

对于影响风场发电量不确定性因素国内风电企业及设计单位普遍不做单独考虑,而是对影响发电量的各因素估算一定比例,在总发电量的基础上“折减”,将发电量不确定性转换为折减系数计算折减量,最后得到预估发电量^[2]。这种方法很大程度上取决于评估人员的风险偏好,折减系数难以与实际情况相匹配,采用“折减系数”法是一种迂回控制不确定性因素给项目带来风险的简单方法,不能反映出风险本质,计算结果可靠性差。

国外的风电企业普遍将发电量不确定性与折减分开考虑,Matthew等^[3]提出了风场发电量评估过程中存在高度不确定性,将风速不确定性因素分为14类和风机功率曲线不确定性因素分为3类,给出了

不确定性因素的计算公式,采用各不确定因素平方和的方法计算发电量总体不确定性因子,再计算超越概率发电量。

Birgir和Gudmundur将蒙特卡洛模拟法用于风场中模拟风速威布尔分布从而评估风场产量,并将其模拟风速计算所得产量与实测风数据所得产量进行比较,其结果相差较小,得出蒙特卡洛模拟法模拟风速计算的产量结果具有可靠性^[4]。

计算不确定性因素带来发电量偏差是风资源评估不可或缺的内容,是判别项目风险的重要依据^[5]。为了降低发电量偏差给投资带来风险,采用超越概率发电量作为投资决策的依据,文章针对目前风场发电量不确定性评估中存在的问题,假设每个不确定因素是独立的且服从正态分布,建立不确定性因素的正态分布模型,利用蒙特卡洛模拟法对这些不确定性因素进行模拟,得到统计值,再通过发电量敏感因子将这些不确定性程度转化为发电量不确定性程度,在此基础上计算风场超越概率发电量。

1 蒙特卡洛模拟

对不确定性作定量分析称为不确定性评估,常用的评估方法有确定性概率分析法和蒙特卡洛模拟法^[2]。不确定性因素属于随机变量,这些随机变量通常采用某一概率模型分布来描述,由于这类模型含有不确定性的随机因素,分析起来通常比确定性的模型困难。有的模型难于作定量分析,得不到解析结果,或者是虽有解析的结果,但由于蒙特卡洛模拟法的计算精度与样本量的平方根成正比,故需要的

样本量很大,模拟次数一般在数万次到几十万次才能保证计算精度,过去认为蒙特卡洛模拟法计算时间长,限制了它的使用,但随着计算机技术的发展,现在采用蒙特卡洛模拟法很容易解决这类随机概率模型问题^[6]。

1.1 蒙特卡洛模拟建模理论

蒙特卡洛模拟法又称为统计模拟试验法或随机模拟法,它是以概率论和数理统计为基础,通过计算机随机模拟,用统计方法估计和描述随机变量的统计量、求解问题近似解,从而得到实际问题的数值解的一种数值计算方法^[7]。常被用于解决那些无法通过确定性算法得到表达式或数值解的问题,在数理问题、各类工程领域甚至经济金融领域都有广泛应用^[5]。

蒙特卡洛模拟方法运用在此文章的基本思路是假设所有引起发电量的不确定性参数是相互独立且服从正态概率分布的模型^[8],在计算机上模拟这些概率模型,由给定的模型直接产生一大批数据样本,用研究这些样本的性质代替对不确定性模型本身的研究,将求解不确定性问题转换为求解这些样本的参数统计值(如均值、标准差、中位数等),从而得到不确定性程度,求解的精度可用方差来表示^[6]。

1.2 蒙特卡洛建模步骤

1.2.1 不确定性因素的确立

风场发电量的不确定性主要来源于测风数据、风资源评估软件、功率曲线 3 大因素。

测风数据处理是风场发电量计算过程首要且较为耗时的重要工作。这一阶段从测风传感器的选择到测风塔的安装设立,测风时间的长短和测风数据质量及长期代表年的订正,每一环节都将引起风速的不确定性,从而给发电量评估带来不确定性。

在利用风资源评估软件从测风塔位置风况推算风场各风机点位轮毂高度风况时,会引起垂直和水平外推不确定性,其不确定性程度取决于测风塔代表性高低,垂直外推的不确定性程度与测风塔处的海拔高度和风机点位处的海拔高度差呈正向关系,也与测风高层与轮毂高层高度差呈正向关系,高度差别越大,其不确定性就越高。水平外推的不确定性程度取决于测风塔位置与风机位置的水平距离。

风机功率曲线表示风机在不同风速段出力效果,风机功率曲线需要按照规定程序进行测试。因功率

曲线测试时的环境与风场风机运行的实际风流环境不同带来的不确定性,环境包括地形地貌和风机排布及周边邻近风场。取得认证的风机功率曲线不确定性一般取值 4%~6%^[9]。风场发电量不确定性影响因素如表 1 所示。

1.2.2 建立不确定性因素概率分布函数

假设表 1 中各不确定性因素是相互独立且服从正态分布的随机变量,其数值不能精确地预测和计算,实际发生值总是与预测值有一些偏差,是一个随机变量或随机变量函数,任一不确定性参数的值,可用趋势值与具有某种概率分布的偏差来表达。文章将不确定性因素定义为服从平均值 μ 和偏离程度 σ 的正态概率分布^[13],不确定性因素的正态概率分布函数和风速总不确定性程度的模型表达式分别如式(1)和式(2)所示:

$$U_i = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(z-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

$$U_v = \sqrt{U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + U_5^2 + U_6^2 + U_7^2 + U_8^2 + U_9^2 + U_{10}^2} \quad (2)$$

式中:

U_i —— n 个相互独立的随机变量($U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$), 分别服从正态分布 $U_i \sim (u_i, \sigma_i^2)$;

U_v ——风速带来的总不确定性程度(%);

U_1 ——传感器类型带来的不确定性程度(%);

U_2 ——传感器校准带来的不确定性程度(%);

U_3 ——测风塔塔架形式带来的不确定性程度(%);

U_4 ——实测测风塔数据长短带来的不确定性程度(%);

U_5 ——长期参考数据时间长短带来的不确定性程度(%);

U_6 ——实测测风塔数据与长期参考数据相关性高低带来的不确定性程度(%);

U_7 ——未来气候变化带来的不确定性程度(%);

U_8 ——测风塔海拔与风机点位海拔差距带来的不确定性程度(%);

U_9 ——测风高度与风机轮毂高度差距带来的不确定性程度(%);

U_{10} ——测风塔位置与风机位置的水平距离带来的不确定性程度(%).

表 1 发电量不确定性因素
Tab. 1 Uncertainty factors of power generation

不确定性类别	不确定性因素	不确定性因素来源	建议取值	取值参考文献	
风资源测量	风资源测量	传感器类型	1% ~ 6%	[9]	
		传感器校准	0.5% ~ 2.06%		
		测风塔塔架形式	0.50%		
	测风数据	长期代表年订正 (MCP)	实测测风塔数据时间长短	1% ~ 4%	[10]
			长期参考数据时间长短	2% ~ 8%	
		实测测风塔数据与长期数据相关性高低	$0.9 < R^2 < 1$	<1%	[11]
			$0.8 > R^2 > 0.7$	1% ~ 2%	
			$0.7 > R^2 > 0.6$	2% ~ 3%	
	未来气候	未来气候的变化	5%	[12]	
	风资源评估软件	垂直外推	测风塔海拔与风机点位海拔差距	简单平坦地形 0.05%/10 m; 山地丘陵 0.3%/10 m	[10]
测风高度与风机轮毂高度差距			简单平坦地形 0.3%/10 m; 山地丘陵 1.0%/10 m		
水平外推		测风塔位置与风机位置的 水平距离	简单平坦地形 0.5%/km; 山地丘陵 1.5%/km		
以上各指标的不确定性大小皆引起风速值变化大小, 下面的风机功率曲线不确定性程度直接影响发电量变化大小					
风机功率曲线	风机功率曲线	标准认证	4% ~ 6%	[9]	

1.2.3 随机抽样模拟

若对不确定性因素变量 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ 进行一次随机抽样, 便可得到一组包含 $U_1, U_2, U_3, \dots, U_n$ 变量值, 这里对不确定性因素 U_i 随机抽样可采用 Excel 中复合函数 NORMINV [RAND(probability), mean, standard_dev] 实现, 其中 NORMINV 函数的功能是根据指定平均值和标准差计算正态累计分布的反函数值; RAND(probability) 为随机函数, 概率取值范围在 0 ~ 1 之间。蒙特卡洛模拟法的计算精度与抽样次数成正比, 若经过 N 次抽样和运算, 随着抽样次数增加, 影响风场风速的不确定性样本分布便趋近于总体分布^[14-15], 即重复次数越多, 模拟结果与实际情况越相近^[16]。利用概率统计便可得出影响风场风速不确定性 U_v 的概率分布平均值、标准差等参数。

计算风速不确定性评估时, 可借助 Excel 中模拟运算 What-If Analysis 来解决, What-If Analysis 是一种多次运算组合模拟参数使得目标函数得到统计的解决办法, 且不需要 R 语言或 Matlab 这样的编程设计, 此方法结构简单、模拟过程灵活, 方便快捷, 能提高计算的效率和准确性^[17]。

2 超越概率发电量

2.1 风速-发电量敏感因子

风速-发电量敏感因子是借用经济学中价格-需求弹性系数的含义来描述风场因风速变化导致发电量变化, 不同的风场其风速-发电量敏感因子不同, 影响风速-发电量敏感因素有: 平均风速、风频分布、风机排布、风机机型^[18]。计算时用改变输入风资源评估软件中的风速序列或矩阵, 其余输入量和模型参数设置保持不变, 通过试算得到。公式如下:

$$S = \frac{(E_{v_2} - E_{v_1})}{E_{v_1}} \bigg/ \frac{(v_2 - v_1)}{v_1} \quad (3)$$

式中:

S ——风速-发电量敏感因子;

E_{v_1} ——风速为 v_1 时发电量(GWh);

E_{v_2} ——风速为 v_2 时发电量(GWh)。

2.2 发电量不确定性大小

据第 1 章节发电量不确定性影响因素分析, 有 10 个因素是因为引起风速的不确定性而影响风场发电量不确定性, 风速与发电量关系不是线性关系, 文章通过 2.1 章节风速-发电量敏感因子将风速不确定

性转化为发电量不确定性,具体见式(4):

$$U_v(E) = S \times U_v \quad (4)$$

式中:

$U_v(E)$ ——风速不确定性带来的发电量不确定性大小(%);

风机出力大小直接影响发电量多少,在计算风机功率曲线标准认证不确定性带来的发电量不确定性程度时,功率曲线的不确定性程度等于发电量不确定性程度。

$$U_p(E) = U_p \quad (5)$$

式中:

$U_p(E)$ ——功率曲线不确定性带来的发电量不确定性程度(%);

U_p ——功率曲线不确定性程度(%);

风场发电量不确定性程度由风速和功率曲线两部分决定,结合式(4)和式(5),风场发电量总不确定性程度计算公式如式(6)所示:

$$U_T(E) = \sqrt{U_v(E)^2 + U_p(E)^2} \quad (6)$$

式中:

$U_T(E)$ ——风场发电量总不确定性程度(%);

2.3 超越概率发电量

水电水利规划设计总院发布的《关于对中国风电发电量折减问题的说明》^[19],此说明对风电场理论发电量和风电场净发电量进行了定义,风场需根据实际情况考虑折减系数,通过风资源评估软件计算出的发电量为理论发电量,此理论发电量扣除折减后为净发电量,其计算公式见式(7):

$$E_{\text{net}} = E_{\text{gross}} \times F_{\text{loss}} \quad (7)$$

式中:

E_{net} ——净发电量(GWh);

E_{gross} ——理论发电量(GWh);

F_{loss} ——折减系数。

文章将折减和不确定性分别考虑,在风场理论发电量扣除折减后得到风场净发电量,以此基数进行后续的超越概率发电量计算。

考虑风场各因素的不确定性,根据式(6)计算得到风场发电量总不确定性程度 $U_T(E)$ 。风场发电量服从正态分布^[20],风场发电量的标准差及不同概率相应的产量计算分别见式(8)和式(9):

$$\sigma_E = U_T(E) \times E_{\text{net}} \quad (8)$$

$$E_{P_x} = E_{P_{50}} \times (1 - \text{NORMSINV}(P_x) \times \sigma_E) \quad (9)$$

式中:

σ_E ——风场发电量分布的标准差(GWh);

E_{P_x} ——概率为 P_x 时的发电量(GWh);

$E_{P_{50}}$ ——风场发电量分布平均值,概率为50%的发电量,其值等于 E_{net} (GWh);

$\text{NORMSINV}(P_x)$ ——标准正态分布概率为 P_x 的置信区间。

3 案例分析

3.1 风场基本情况及模型基础数据

风场位于丘陵地区,规划容量50 MW,拟安装8台容量为6.25 MW 风机,轮毂高度为115 m;场区内立有1座110 m 高测风塔,风速测量采用美国NRG40#风杯,仪器经过标准校准,塔架采用桁架式;测风数据满2 a且数据有效率达95%,长期参考数据满20 a,实测测风数据与20 a长期参考数据做相关,相关系数 $R=0.87$;测风塔在115 m、100 m、90 m、70 m、50 m、10 m 高层安装了风速仪,在115 m、50 m、10 m 高层安装了风向标;测风塔海拔高度184 m,风机位置机位点海拔平均值245 m;测风塔到风机位置的平均距离为5 km,测风塔与风机位置布置如图1所示。

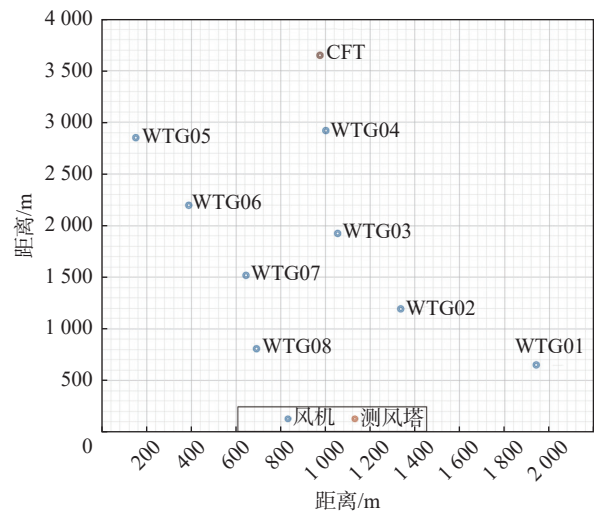


图 1 测风塔与风机位置布置图

Fig. 1 Layout of anemometer tower and wind turbines

3.2 不确定性因素概率分布模拟

根据文章3.1小节描述的风电场实际情况,测风塔实测数据的测风时间长短及质量,长期参考站数

据与实测数据相关性高低, 以及测风塔对风机位置的代表性等资料数据。参考表 1 的不确定性因素来源及分析进行取值, 各不确定性因素服从正态分布, 其均值和标准差如表 2 所示。标准差根据 IEC 国际标准设置了低中高 3 种, 分别为平均值的 12.0%、14.0% 和 16.0%^[21]。

利用函数 NORM.INV(RAND(probability), mean, standard_dev) 进行各不确定性因素第 1 次随机模拟, 采用式(2)计算风速带来的总不确定性程度分别为 7.48%、8.12% 和 8.37%。再采用 Excel 中的 What-If Analysis 模拟工具进行模拟。

3.3 发电量不确定性大小计算

经过蒙特卡洛随机模拟后得到模拟值, 对其进行参数统计, 风速总不确定性程度平均值分别为 7.82%、7.84% 和 7.86%; 标准差分别为 0.45%、0.53%

和 0.60%; 95% 置信区间风速不确定性程度分别为 7.08 ~ 8.56、6.97 ~ 8.71、6.88 ~ 8.84。

据式(3)和式(4)计算风速总不确定性程度和风速引起的发电量不确定性程度, 此处考虑风速-产量敏感因子 1.80^[18, 22]。采用同种机型, 功率曲线带来的发电量不确定性程度为 4.00%。发电量总不确定性程度由式(6)计算所得分别为 13.36% ~ 15.92%、13.17% ~ 16.18%、13.01% ~ 16.41%。具体结果如表 3 所示。

3.4 超越概率发电量

常规计算风速不确定性大小并不考虑不确定因素呈正态分布, 而是直接赋予不确定性因素值。文章为了对比蒙特卡洛模拟法和直接赋予不确定因素值两种方法计算结果, 在表 2 的平均值列按常规方法计算出了风速总不确定性程度为 7.79%, 风速带来的发电量不确定性程度为 14.02%, 再结合功率曲线

表 2 不确定性因素正态分布和第 1 次随机模拟

Tab. 2 Normal distribution of uncertainty factors and the first stochastic simulation

%

不确定性因素	平均值 μ	标准差 $\sigma = 0.12\mu$		标准差 $\sigma = 0.14\mu$		标准差 $\sigma = 0.16\mu$	
		标准差	随机模拟	标准差	随机模拟	标准差	随机模拟
传感器类型	2.00	0.24	2.14	0.28	2.06	0.32	2.52
传感器校准	1.48	0.18	1.71	0.21	1.82	0.24	1.45
测风塔塔架形式	0.50	0.06	0.40	0.07	0.60	0.08	0.48
实测数据时间长短	2.00	0.24	1.63	0.28	2.03	0.32	2.47
长期参考数据时间长短	3.00	0.36	3.16	0.42	3.16	0.48	2.74
实测数据与长期数据相关性高低	3.00	0.36	2.71	0.42	3.39	0.48	3.44
未来气候变化	5.00	0.60	4.55	0.70	5.24	0.80	5.28
测风塔海拔与风机点位海拔差距	0.25	0.03	0.21	0.04	0.30	0.04	0.26
测风高度与轮毂高度差距	1.00	0.12	0.84	0.14	0.98	0.16	1.00
测风塔位置与风机位置水平距离	2.50	0.30	2.54	0.35	2.43	0.40	2.68
风速总不确定性程度	7.79		7.48		8.12		8.37

表 3 蒙特卡洛模拟统计值及发电量不确定性程度

Tab. 3 Statistics of Monte Carlo simulation and uncertainty of power generation

统计参数	标准差 $\sigma = 0.12\mu$	标准差 $\sigma = 0.14\mu$	标准差 $\sigma = 0.16\mu$
模拟次数/次	2×10^4	2×10^4	2×10^4
平均值/%	7.82	7.84	7.86
标准差/%	0.45	0.53	0.60
中位数/%	7.81	7.81	7.87
95%置信区间风速不确定性/%	7.08 ~ 8.56	6.97 ~ 8.71	6.88 ~ 8.84
功率曲线引起的发电量不确定性程度/%	4.00	4.00	4.00
95%置信区间发电量总不确定性程度/%	13.36 ~ 15.92	13.17 ~ 16.18	13.01 ~ 16.41

带来的发电量不确定性程度为 4.00%，则直接赋予不确定因素值带来的发电量总不确定性程度为 14.58%。文章把折减和不确定性分开考虑，扣除折减后计算所得风场净发电量为 130 GWh，风场发电量分布的标准差根据式(8)计算，再根据式(9)计算各概率下的超越发电量，此处因涉及的数据信息庞大，表 4 只列出了常用概率情况下的发电量，文章为方便书写，直接赋予不确定因素值方法计算相应的结果用表 4 中 $\sigma = 0$ 表示。

3.5 计算结果分析

文章针对此案例具体情况，对风场不确定性因素进行分类并确定其正态概率分布函数具体形式，标准差根据 IEC 设置了 3 种^[21]，文章将直接赋予不确定因素值计算结果纳入对比。

表 2 可以得出，蒙特卡洛进行第 1 次随机模拟风速总的不确定性程度分别为 7.48%、8.12%、8.37%，与直接赋予不确定因素值计算结果 7.79% 分别相差 -0.31%、0.33%、0.58%。

蒙特卡洛进行多次随机模拟结果是服从正态分布的具体函数，可以得到平均值和标准差及其它统计参数，表 3 中风速总不确定性程度平均值分别为 7.82%、7.84%、7.86%；与直接赋予不确定因素值计算结果 7.79% 分别相差 0.03%、0.05%、0.07%。随着模拟次数的增加，给定 3 种标准差的风速不确定性程度与直接赋予不确定因素值计算结果的差距变小。

表 3 模拟得到的风速总不确定性平均值和标准差，计算 95% 置信区间 3 种标准差风速不确定性总的大小区间分别为 7.08% ~ 8.56%、6.97% ~ 8.71%、6.88% ~ 8.84%，随着不确定性因素标准差的增加，不确定性程度的区间范围会以 7.79% 为概率分布的中心但跨度会变大。因发电量敏感因子的作用，95% 置信区间发电量总不确定性程度分别为 13.36% ~

15.92%、13.17% ~ 16.18%、13.01% ~ 16.41%，直接赋予不确定因素值带来的发电量总不确定性程度为 14.58%。95% 置信区间超越概率发电量分布范围为 96.06 ~ 101.52 GWh、95.50 ~ 101.92 GWh、95.01 ~ 102.26 GWh。

表 4 所得风电场超越概率发电量，随着超越概率的增加，能保障的发电量变小；同一超越概率情况下，随着不确定性因素概率分布中标准差的增加，其超越概率发电量的区间范围跨度变大。

采用直接赋予不确定性因素值的计算方法能得到风速不确定性程度和超越概率发电量的平均值，但它忽略了不确定性因素是服从正态分布的概率函数，不能得到相应的超越概率发电量分布。

4 结论

文章采用蒙特卡洛模拟法对引起风场发电量不确定性因素建模和程度进行模拟，不确定性因素建模遵循了其正态分布的本质，借助蒙特卡洛模拟法的优势可根据建立的模型生成随机样本，随着模拟次数的增加，其样本结果能代表总体结果。

蒙特卡洛模拟法模拟风场风速总不确定性程度，得到服从正态分布的具体函数，可以求出特定置信区间的风速不确定性程度的上下限，得出落在某一区间范围内的超越概率发电量，以此为依据计算风场收益和控制风险，将收益和风险进行量化对应，并将风险控制一定范围内。

随着超越概率的增加，发电量会降低；同一超越概率情况下，随着不确定性因素标准差的增加，不确定性程度以及超越概率发电量的区间范围跨度会变大，风险会增加。

采用超越概率发电量作为依据评估风场投资风险，有助于决策建立在正确、可靠的基础上，明确不

表 4 超越概率发电量

Tab. 4 Power generation with exceeding probability

发电量	标准差 $\sigma = 0$	标准差 $\sigma = 0.12\mu$	标准差 $\sigma = 0.14\mu$	标准差 $\sigma = 0.16\mu$
年净发电量/GWh	130.00	130.00	130.00	130.00
P75	117.30	116.13 ~ 118.36	115.91 ~ 118.53	115.71 ~ 118.67
P84	111.24	109.51 ~ 112.81	109.18 ~ 113.05	108.88 ~ 113.26
P90	105.74	103.51 ~ 107.77	103.08 ~ 108.09	102.69 ~ 108.35
P95	98.92	96.06 ~ 101.52	95.50 ~ 101.92	95.01 ~ 102.26
P99	85.84	81.78 ~ 89.53	80.99 ~ 90.11	80.29 ~ 90.59

确定性因素的来源并在实际评估中去规避这些不确定性因素带来的风险。

参考文献:

- [1] 张璐,张斌.基于正态分布区间数的综合能源系统效益评价研究[J].南方能源建设,2015,2(2):41-45. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.02.007.
ZHANG L, ZHANG B. Evaluation of the integrated energy system effectiveness based on the normal distribution interval number method [J]. *Southern energy construction*, 2015, 2(2): 41-45. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2015.02.007.
- [2] 李伟,姚晖,王焕奇,等.发电量估算不确定性对风电项目投资决策的影响[J].风能,2014(9):78-81. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2014.09.021.
LI W, YAO H, WANG H Q, et al. The influence of uncertainty power generation assessment on investment decision making on wind plant [J]. *Wind energy*, 2014(9): 78-81. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2014.09.021.
- [3] LACKNER M, ROGERS A, MANWELL J. Uncertainty analysis in wind resource assessment and wind energy production estimation [C]//45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, January 08-11, 2007. Reno: AIAA, 2007. DOI: 10.2514/6.2007-1222.
- [4] HRAFNKELSSON B, ODDSSON G V, UNNTHORSSON R. A method for estimating annual energy production using Monte Carlo wind speed simulation [J]. *Energies*, 2016, 9(4): 286. DOI: 10.3390/en9040286.
- [5] 刘新苗,王诗超.电力市场环境广东电力系统规划方法初探[J].南方能源建设,2021,8(2):111-118. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.02.017.
LIU X M, WANG S C. Initial investigation of Guangdong power system planning method under power market environment [J]. *Southern energy construction*, 2021, 8(2): 111-118. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2021.02.017.
- [6] 袁贵星,王平.蒙特卡洛模拟及其在公差设计中的应用[J].天津科技大学学报,2008,23(2):60-64. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6510.2008.02.016.
YUAN G X, WANG P. Monte Carlo simulation and its application in tolerance design [J]. *Journal of Tianjin University of Science & Technology*, 2008, 23(2): 60-64. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6510.2008.02.016.
- [7] 董玉亮,顾煜炯,杨昆.基于蒙特卡洛模拟的发电厂设备重要度分析[J].中国电机工程学报,2003,23(8):201-205. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2003.08.041.
DONG Y L, GU Y J, YANG K. Criticality analysis on equipment in power plant based on Monte Carlo simulation [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(8): 201-205. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.2003.08.041.
- [8] 郭智骏.基于蒙特卡洛方法建立用于产品良率估算的最小工作电压模型[D].上海:复旦大学,2013.
GUO Z J. VDDmin modeling for yield prediction based on Monte Carlo method [D]. Shanghai: Fudan University, 2013.
- [9] LIRA A G, ROSAS P A, ARAÚJO A M, et al. Uncertainties in the estimate of wind energy production estimation [J]. 2007(1). DOI: 10.2514/6.2007-1222.
- [10] WindPRO 4.0. EMD International A/S [Z]. Denmark.
- [11] WindFarmer 5.0. GL Garrad Hassan [Z]. USA.
- [12] 可再生能源专家技术委员会.基于概率的发电量计算方法指导文件:REETC/TN006:2022[S].北京,2022.
Technical Committee of Renewable Energy Experts. Guidance document on probability-based annual energy production calculation methods: REETC/TN006: 2022 [S]. Beijing, 2002.
- [13] 路晓敏,张明,邓星,等.考虑多重不确定性的多站融合容量优化配置方法[J].综合智慧能源,2022,44(1):31-38. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0706.2022.01.005.
LU X M, ZHANG M, DENG X, et al. Optimal capacity configuration for multi-station integration considering multiple uncertainties [J]. *Integrated intelligent energy*, 2022, 44(1): 31-38. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0706.2022.01.005.
- [14] 石立宝,翟放.考虑风-光-荷不确定性的数据驱动型机组组合模型[J].综合智慧能源,2022,44(1):18-25. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0706.2022.01.003.
SHI L B, ZHAI F. Data-driven unit commitment model incorporating the uncertainty of wind-PV-load [J]. *Integrated intelligent energy*, 2022, 44(1): 18-25. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0706.2022.01.003.
- [15] 陈瑞.基于PERT和蒙特卡洛法的建设工程完工概率分析[J].水电能源科学,2019,37(5):115-117.
CHEN R. Analysis of completion probability based on PERT and Monte Carlo method [J]. *Water resources and power*, 2019, 37(5): 115-117.
- [16] 杨舟,蒋雯倩,潘俊涛,等.基于差分功率处理提高光伏系统能量转换可靠性的研究[J].可再生能源,2023,41(7):964-970. DOI: 10.3969/j.issn.1671-5292.2023.07.016.
YANG Z, JIANG W Q, PAN J T, et al. Study on energy conversion and reliability improvement in photovoltaic systems using differential power processing [J]. *Renewable energy resources*, 2023, 41(7): 964-970. DOI: 10.3969/j.issn.1671-5292.2023.07.016.
- [17] 牛鸿燕.基于Excel规划求解器的配煤比优化尝试[J].科技视界,2013(12):130-131. DOI: 10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2013.12.100.
NIU H Y. The optimization of ration coal basis on Excel solver [J]. *Science & technology vision*, 2013(12): 130-131. DOI: 10.19694/j.cnki.issn2095-2457.2013.12.100.
- [18] 赵韵.风资源评估的不确定性分析[J].科技创新与应用,2016(4):16.
ZHAO Y. The uncertainty of wind resource assessment [J]. *Technology innovation and application*, 2016(4): 16.
- [19] 国家发展改革委气候司.关于对中国风电发电量折减问题的

说明 [S]. 北京, 2009.

Department of Climate, National Development and Reform Commission. The explanation on the losses of wind power generation in China [S]. Beijing, 2009.

- [20] 王一妹, 刘永前, 李莉, 等. 计及风向不确定性的海上风电场年发电量计算 [J]. *可再生能源*, 2018, 36(4): 603-610. DOI: [10.3969/j.issn.1671-5292.2018.04.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-5292.2018.04.022).
WANG Y M, LIU Y Q, LI L, et al. AEP calculation for offshore wind farm considering wind direction uncertainty [J]. *Renewable energy resources*, 2018, 36(4): 603-610. DOI: [10.3969/j.issn.1671-5292.2018.04.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1671-5292.2018.04.022).
- [21] International Electrotechnical Commission. Wind turbines—Part 1: Design requirements: IEC 61400-1: IEC 2005 [S]. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2005.
- [22] 盛科, 刘超, 杨佳元. 基于风电场后评价的风能资源评估不确定度研究与应用 [J]. *风能*, 2015(1): 72-75. DOI: [10.3969/j.issn.1674-9219.2015.01.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-9219.2015.01.019).
SHENG K, LIU C, YANG J Y. Research and application of uncertainty of wind energy resource evaluation based on wind farm post evaluation [J]. *Wind energy*, 2015(1): 72-75. DOI: [10.3969/j.issn.1674-9219.2015.01.019](https://doi.org/10.3969/j.issn.1674-9219.2015.01.019).

作者简介:



李化

李化(第一作者, 通信作者)

1980-, 女, 中级工程师, 一级建造师, 硕士, 主要从事风能资源评估、风电场微观选址和风电项目经济评价研究工作(e-mail)liziqi1120@126.com。

张彬彬

1992-, 男, 中级工程师, 技经工程师, 学士, 主要从事新能源项目概算、经济评价工作(e-mail)354559582@qq.com。

丁艳军

1982-, 男, 中级工程师, 解决方案高级经理, 硕士, 主要从事风电控制系统及项目开发工作(e-mail)dingyj1808@163.com。

项目简介:

项目名称 国家重点研发计划重点专项项目“风力发电复杂风资源特性研究及其应用与验证”(2018YFB1501100)

承担单位 国家气候中心

项目概述 项目针对我国复杂地形和台风影响的特点, 面向风力机大型化发展的实际需求, 构建 300 m 高度内的风和湍流特性理论体系, 揭示复杂风资源特性形成机理, 构建从中尺度环流、风电场湍流到风力机尾流的多尺度耦合数值模拟中的关键数学物理模型, 研发台风影响地区风电场极端风况数值模拟和风电机组风险概率评估方法及软件。

主要创新点 重新构建中国风能资源评估技术体系, 将国内划分为 9 个风环境区域和 17 类典型地形, 不同典型地形适用的风资源数值模拟方法不同, 采用中微尺度耦合结合流体力学模型或者风廓线解析算法结合流体力学模型来评估不同区域的风能资源。对于台风影响地区, 采用中尺度结合台风大气涡旋流体力学数值模拟。此项工作为制定国标《风能资源评价技术导则》完成了基础研究工作。中微尺度耦合数值模拟方法不仅适用于风电场选址风能资源评估, 也适用于长、中、短期的风功率预测。

(编辑 徐嘉铖)