

## 考虑时序波动的风速分布描述方法

张家安<sup>1</sup>, 仇 实<sup>1</sup>, 宋关羽<sup>2</sup>, 李 飞<sup>3</sup>, 刘 东<sup>1</sup>, 王华君<sup>1</sup>

(1. 河北工业大学人工智能与数据科学学院, 天津 300401; 2. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津 300072;  
3. 河北建筑工程学院, 张家口 075400)

**摘 要:** 在传统威布尔分布基础上, 提出考虑时序波动的风速分布描述方法, 其中风速的时序波动根据风速变化量分布和基础风速共同定义。该方法基于风速变化规律对威布尔分布进行优化, 使模拟风速具有更接近实测风速的分布形式及波动规律。利用考虑时序波动的风速分布描述方法建立风速模型并在算例中与传统威布尔分布进行对比, 结果表明所提方法对描述风速变化特性更准确。

**关键词:** 风力发电; 风速; 建模; 威布尔分布; 时序

**中图分类号:** TM615

**文献标志码:** A

### 0 引 言

风速建模及风资源评估与风电场选址<sup>[1-2]</sup>、风电机组选型<sup>[3]</sup>、风电容量可信度分析<sup>[4]</sup>及电网调度运行<sup>[5]</sup>等工作密切相关。风速分布模型及由分布模型求得的风电出力模型是风资源评估的核心。风速分布模型即风速的概率密度函数, 是基于统计学的概率函数表达<sup>[6]</sup>。国内外在风速的概率密度函数方面进行了大量研究, 并提出多种分布描述函数, 常用的有瑞利(Rayleigh)分布函数<sup>[7]</sup>、高斯(Gaussian)分布函数<sup>[8]</sup>及威布尔(Weibull)分布函数<sup>[9]</sup>等。文献[10]对常用于描述风速分布的方法进行了归纳比较, 并指出两参数威布尔分布较高斯分布、瑞利分布等更具灵活性优势。

两参数威布尔分布中通常以  $k$  表示形状因子、以  $c$  表示尺度因子, 在风速描述中共同影响风速分布情况<sup>[11]</sup>。威布尔分布参数计算方法通常有最大似然估计、最小二乘法、矩量法、平均风速与标准差<sup>[12-13]</sup>等。为提高风速分布描述精度, 国内外就威布尔分布的优化进行了大量研究。文献[14]提出基于最大似然估计及修正最大似然估计的逆威布尔分布, 以改善威布尔分布难以对低风速占比较高的风况进行准确描述的问题。文献[15]提出基于矩量法的威布尔分布参数评估改进方法, 通过引入多目标矩改善参数评估精度。文献[16]提出一种自适应神经模糊推理方法, 实现风速威布尔分布曲线的准确拟合。

风力发电在能源系统中被视为一个连续的随机过程<sup>[17]</sup>, 实测风速存在明显波动特征, 而威布尔分布只能对风速分布的概率进行描述, 并不能表达风速序列的波动形式。在风速的短期预测方法中, 如自回归模型、移动平均模型、自回归滑动平均模型和微分方程描述模型等, 考虑了风速序列的时序关系, 包括前一时刻数值和误差因子等信息<sup>[18]</sup>。文献[19]提出基于威布尔分布考虑时序关系的风速短期预测方法, 并应用风速变化量分布作为验证指标。这些短期预测方法为风速模型的建立提供了可借鉴的思路。

本文对风电场实测风速的分布及波动情况进行分析, 基于风速的时序波动规律对传统威布尔分布进行改进, 使通过数学模型拟合的风速序列在良好还原风速分布的同时具备更接近实际风速的波动形式。

### 1 威布尔分布模型

威布尔模型描述风速的概率密度函数如式(1)所示:

$$f(x) = \frac{k}{c} \left(\frac{x}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{x}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

式中,  $x$  ——变量, 对风速分布进行描述时代表风速, m/s;  $c$  ——反映平均风速的尺度参数;  $k$  ——反映风速变化范围的形状参数。

对关键参数  $c$ 、 $k$  有多种评估方法, 一般运用风资源本身的分布特性作为依据对两参数进行计算, 其中

收稿日期: 2019-05-28

通信作者: 张家安(1975—), 男, 博士、讲师, 主要从事新能源发电系统及智能化、新能源接入电网系统建模与仿真研究。

zhangjiaan@foxmail.com

一种简单的常用算法如式(2)所示:

$$\begin{cases} k = (\sigma_v / \bar{v})^{-1.09} \\ c = \bar{v} k^{2.6674} / (0.184 + 0.816 k^{2.73855}) \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $\bar{v}$ ——实测风速均值, m/s;  $\sigma_v$ ——实测风速标准差。

对式(1)进行积分可得基于威布尔分布的风速分布函数:

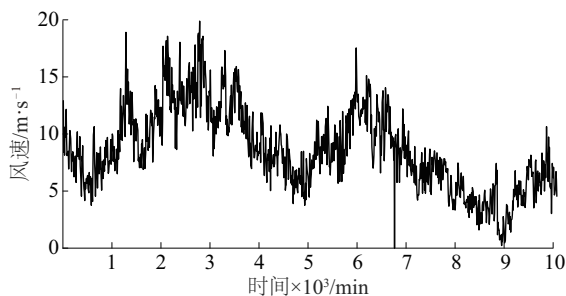
$$p(x \leq v_c) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{v_c^k}{c} \right) \right] \quad (3)$$

由此可知, 已知  $k$  值及  $c$  值的条件下, 通过式(4)对风速进行随机拟合。

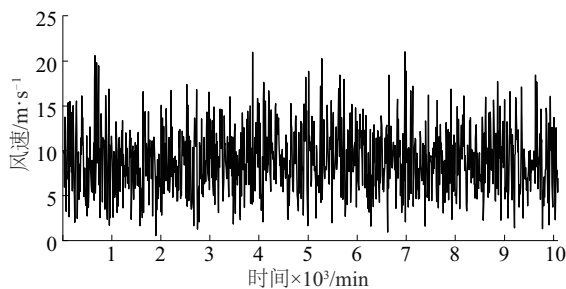
$$v = \{c[-\ln(1 - \alpha)]\}^{1/k} \quad (4)$$

式中,  $\alpha$ ——0~1之间的随机数。

$k$  值及  $c$  值仅能描述风速的分布概率, 并不能表达序列中数据的排列方式。(图 1a 为张家口某地风场采样间隔为 10 min 的 7 日实测风速数据; 图 1b 为以该风场风资源作为参照所拟合的威布尔分布仿真数据)。通过图 1 可知 2 个风速序列单从风速数值角度分析属于同分布, 但由于威布尔分布并未考虑风速的波动规律, 所以威布尔分布拟合风速呈现无规则排列, 与具备明显波动规律的实测风速序列存在较大差异。因此威布尔分布虽然对风速概率分布有良好的描述效果, 但在对风速序列的波动性表达上仍存在局限性。



a. 实测风速数据折线



b. 威布尔分布模拟数据折线

图 1 实测风速及威布尔分布模拟风速对比

Fig. 1 Comparison of measured wind speed and simulated wind speed of Weibull distribution

## 2 考虑时序波动的风速分布描述方法

### 2.1 风速的变化量分布规律

风速的波动特性主要表现为风速变化量的分布规律, 风速变化量  $\Delta v$  为风速序列中相邻两点风速值做差得到, 如式(5)所示:

$$\Delta v = \{v_2 - v_1, v_3 - v_2, \dots, v_i - v_{i-1}, \dots, v_n - v_{n-1}\} \quad (5)$$

图 2 所示为图 1 中对应的 7 d 实测风速变化量。如图 3 为全年风速变化量分布曲线。将全年风速取样点分为 4 段代表四季的风速, 对全年不同时间段内风速变化量分布进行分析, 表 1 为风速变化量分布区间对比。

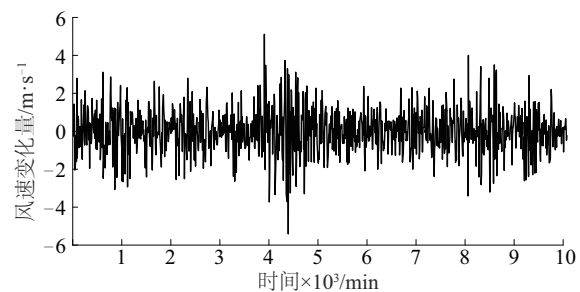


图 2 风速变化量

Fig. 2 Wind velocity variation

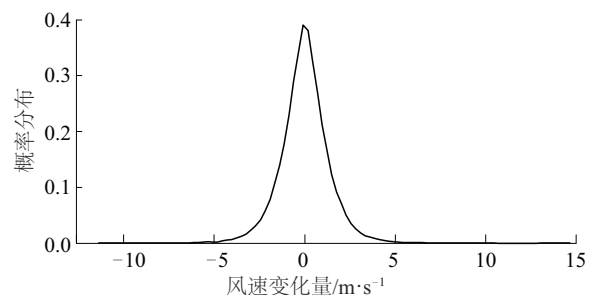


图 3 风速变化量年分布

Fig. 3 Probability annual distribution of wind speed change

表 1 风速变化量分布对比(%)

Table 1 Comparison of wind speed variation distribution (%)

时段	风速变化量分布区间				
	-0.5~0.5	-1.5~1.5	-3.5~3.5	-7.5~7.5	-15~15
全年	40.94	84.01	98.03	99.86	100
一季度	42.16	84.61	98.80	99.92	100
二季度	40.54	83.60	97.29	99.77	100
三季度	41.89	84.26	98.32	99.97	100
四季度	39.91	83.57	97.71	99.78	100

通过表 1 可看出, 不同时间段内风速变化量分布

基本处于相同水平,因此可认为不同时间段风速变化量分布情况相同且可由全年整体风速变化量分布代替表示。对风速变化量进行统计,风速变化量的概率分布  $g(x)$  可用式(5)中  $\Delta v$  的概率分布  $P$  表示。

$$g(x) = P\{\xi \in \Delta v\} \quad (6)$$

风速变化量分布为跨零点的单峰分布。现有已知的分布形式内,两参数威布尔分布对单峰分布也有很好的表达效果,但两参数威布尔分布仅能描述整体不小于零的序列,因此应用威布尔分布对风速变化量进行描述时需对其分布函数进行变化,使其描述区间可跨越零值。风速变化量取值范围为:

$$\Delta v \in [\Delta v_{\min}, \Delta v_{\max}] \quad (7)$$

式中,  $\Delta v_{\min}$ 、 $\Delta v_{\max}$  ——风速变化量  $\Delta v$  的取值范围。

因此,设序列  $\Delta v_i$  为风速变化量序列  $\Delta v$  与  $\Delta v_{\min}$  绝对值之和,则  $\Delta v_i$  序列中全部数值都将大于或等于零。

$$\Delta v_i = \Delta v + |\Delta v_{\min}| \quad (8)$$

$$\Delta v_i \in [0, |\Delta v_{\min}| + |\Delta v_{\max}|] \quad (9)$$

此时威布尔分布可很好地对  $\Delta v_i$  分布进行表达,由  $\Delta v_i$  所得到的分布为  $g(x)$ :

$$g_i(x) = \frac{k}{c} \left( \frac{x}{c} \right)^{k-1} \exp \left[ - \left( \frac{x}{c} \right)^k \right] \quad (10)$$

式中,  $k$ 、 $c$  ——威布尔分布两参数,求取原理可参考式(2);  $x$  ——风速变化量, m/s。

根据  $\Delta v_i$  与  $\Delta v$  的数值关系对威布尔分布表达的风速变化量分布进行修正:

$$g(x) = g_i(x + |\Delta v_{\min}|) \quad (11)$$

修正的风速变化量威布尔分布式  $g(x)$  为:

$$g(x) = \frac{k}{c} \left( \frac{x + |\Delta v_{\min}|}{c} \right)^{k-1} \exp \left[ - \left( \frac{x + |\Delta v_{\min}|}{c} \right)^k \right] \quad (12)$$

## 2.2 基于时序波动的风速分布描述方法

风速的取值可认为是上一采样点风速与两点间风速变化量的和。因此除风速分布外,共同影响风速取值的还有风速变化量分布及前一时刻的风速数值,该风速数值称为基础风速。定义风速变化量分布及基础风速在风速分布的基础上对风速取值范围的影响为风速的时序波动性。设基础风速以  $n$  表示( $n$  为一个随时间变化的实数),风速威布尔分布为  $f(x)$ , 风速变化量分布为  $g(x)$ , 风速变化量分布及基础风速结合风速分布共同得到的简单联合表达式为:

$$f(x) \cdot g(x-n) \quad (13)$$

对式(13)进行积分,可得到结果:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \cdot g(x-n) dx < 1 \quad (14)$$

通过对概率密度的性质描述:

$$\begin{cases} f(x) \geq 0 \\ \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx = 1 \\ p(a < x < b) = \int_a^b f(x) dx \end{cases} \quad (15)$$

由此可知,式(13)并不满足概率密度函数的条件,需要计算放大系数  $k$ , 根据式(15)中第2个算式,放大系数  $k$  将满足式(16):

$$\int_{-\infty}^{+\infty} k[f(x) \cdot g(x-n)] dx = 1 \quad (16)$$

此计算中放大系数  $k$  为可变的实数,因此式(16)可等价于:

$$k \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \cdot g(x-n) dx = 1 \quad (17)$$

当  $f(x)$ 、 $g(x)$  及实数  $n$  可确定时,由式(18)可求得放大系数  $k$ :

$$k = 1 / \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \cdot g(x-n) dx \quad (18)$$

综上可得,考虑时序波动的风速分布函数如式(19)所示,其中代表风速的  $n$  为变化的实数,放大系数  $k$  也随  $n$  的变化而改变。

$$\left[ 1 / \int_{-\infty}^{+\infty} f(x) \cdot g(x-n) dx \right] f(x) \cdot g(x-n) \quad (19)$$

基于风速变化规律的仿真风速数据生成步骤如图4所示。

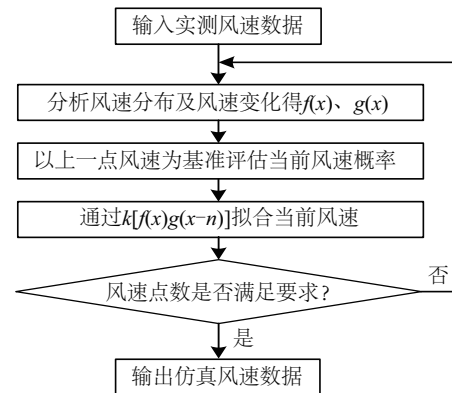


图4 仿真风速数据生成步骤

Fig. 4 Simulated wind velocity data generation steps

## 3 算例分析

本文选取华北某地的实测风速数据进行分析,数据采样间隔为 10 min,应用 Matlab 软件搭建仿真模型。通过对比考虑时序波动的风速分布描述方法所得

仿真结果与实测数据和传统威布尔分布仿真所得结果,检验该方法对威布尔分布的改进效果。

### 3.1 风速描述方法验证

图5分别为实测风速、考虑风速时序波动的模拟风速、威布尔分布模拟风速一年的数据折线图。由图5可知,相比于传统威布尔分布对风速的描述效果,考虑时序波动的风速分布描述方法所建立的风速序列具有更明显的连续性及更接近实测风速的波动特性。

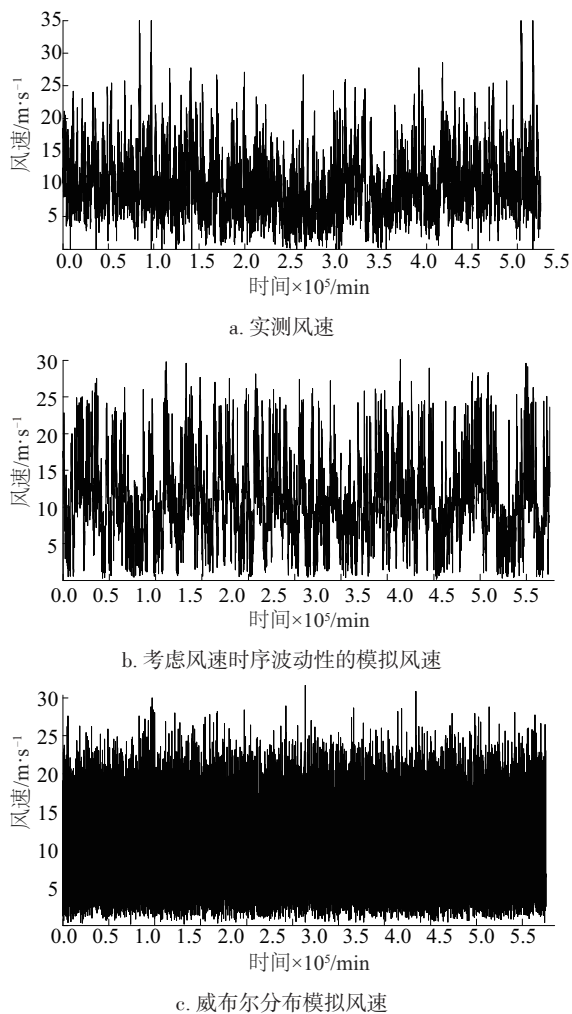


图5 不同风速序列对比

Fig. 5 Comparison of different wind speed sequences

对3种序列风速变化量分布进行对比,如图6所示。通过上述对比可看出,实测风速及考虑时序波动的模拟风速两序列风速变化量分布的峰值及分布曲线基本吻合,风速变化量区间基本保持一致;而威布尔分布的风速变化量分布则与其他两序列存在较大差异。威布尔分布仿真得到的风速序列与实测风速的差异主要表现为风速突变性过强,风速变化量分布更

加分散。而这一问题在基于时序波动的风速分布描述方法所仿真得到的模拟风速数据中得到良好改善。

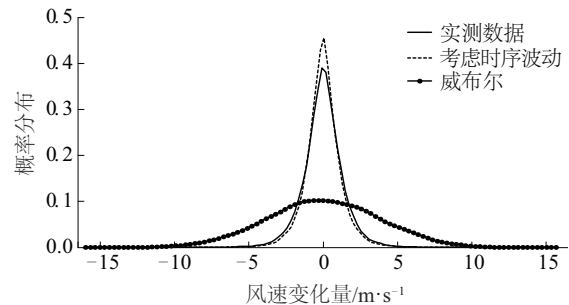


图6 不同风速变化量分布对比

Fig. 6 Comparison of different wind speed variation distribution

### 3.2 风电容量可信度算例

将威布尔分布及基于风速时序波动的风速分布描述方法应用于电力系统可靠性测试系统中进行对比验证。IEEE RTS-79系统内包含容量12~400 MW的常规发电机组共32台,总装机容量3405 MW,年最大负荷2850 MW,其中30日时长的负荷序列如图7所示。

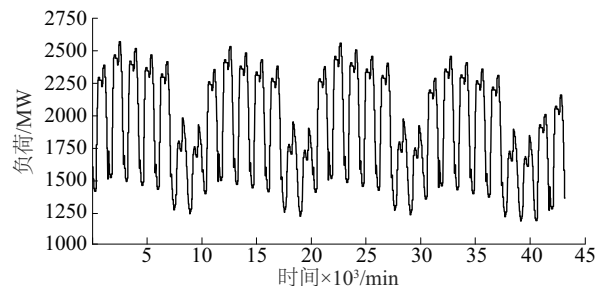


图7 TS-79算例负荷序列

Fig. 7 RTS-79 load sequence

风电总装机容量为100、200、300、400 MW时,威布尔分布的仿真风速及基于风速时序波动的风速分布描述方法仿真风速在IEEE RTS-79系统中的容量可信度如表2所示。

表2 容量可信度对比

Table 2 Capacity reliability comparison

装机容量/MW	时序风速		威布尔	
	平均风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	容量可 信度/%	平均风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	容量可 信度/%
100	7.454	32.11	7.451	33.75
200	7.447	29.09	7.439	30.25
300	7.451	25.58	7.462	26.66
400	7.462	22.11	7.457	23.62



容量可信度会随风电装机容量的上升而逐渐下降,且在不同装机容量下具有时序波动性的风速序列所计算的容量可信度都会略小于威布尔分布仿真风速序列所计算的容量可信度。如文献[20]所述,单风场容量可信度相关的影响因素主要为风电场平均风速、风电出力与系统负荷相关性。由表 2 可看出,基于时序波动的风速序列平均风速并未与威布尔分布所建立的风速序列平均风速有明显差异。因此容量可信度差异可认为是由风速序列连续性及波动性的改变使风电出力与系统负荷相关性发生变化所导致。风电机组出力如式(20)所示:

$$P(V) = \begin{cases} 0, & (V \leq V_c) \cup (V \geq V_{co}) \\ \frac{P_R}{V_R^3 - V_c^3} (V^3 - V_c^3), & V_c \leq V \leq V_R \\ P_R, & V \geq V_R \end{cases} \quad (20)$$

式中,  $P(V)$ ——风速为  $V$  时对应的风电机组输出功率;  $P_R$ ——风电机组额定功率;  $V_R$ ——额定风速;  $V_c$ ——切入风速;  $V_{co}$ ——切出风速。

以 100 MW 装机容量为例,分别对考虑时序波动的风电出力和威布尔分布风电出力 2 种模拟风速截取 7 d 时长的数据进行出力计算,如图 8 所示。风电出力与负荷相关性的改变主要表现为:由于考虑时序波动的风速出力连续性相比于威布尔分布风速出力连续性更强,致使相比于威布尔分布风速出力,考虑时序波动的风速出力出现长时间较低出力概率增大,在电网

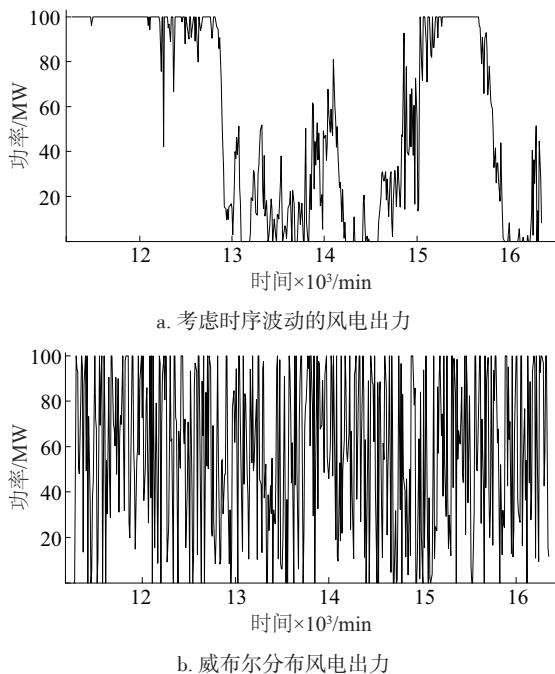


图 8 不同风速序列出力对比

Fig. 8 Comparison of different wind power output

运行过程中出现较长时间供电不足的概率也随之上升,因此风电容量可信度下降。

由此可看出,基于风速时序波动的风速分布描述方法可得到相比于威布尔分布更准确的容量可信度,对电力规划中电力平衡、电力备用率计算、容量市场定价等具有重要意义。

## 4 结 论

风场实际工况中,风速具有一定的时序波动性,传统两参数威布尔分布在对风速的描述及仿真过程中并未考虑时序波动性的存在,因此在仿真效果上与实际风速存在较大差异。本文阐述的基于时序波动的风速分布描述方法,是在威布尔分布模型的基础上结合风速变化规律对威布尔分布的改良方法。仿真表明,该方法能在一定程度上较好地还原风速的波动特性,同时对威布尔分布起到很好的优化作用,可以得到更符合实际工况的风速仿真结果,更符合实际工程需求,具备良好的应用价值。另外,所述方法对风速的其他描述模型如瑞利分布等,也具有一定的适应性。

### [参考文献]

- [1] 王芃,刘伟佳,林振智,等.基于场景分析的风电场与电转气厂站协同选址规划[J].电力系统自动化,2017,41(6):20-29.  
WANG P, LIU W J, LIN Z Z, et al. Collaborative site selection planning of wind farm and power to gas plant station based on scenario analysis [J]. Automation of electric power systems, 2017, 41(6): 20-29.
- [2] 柳成,王天宇,曲永印,等.风电场的风力资源分析及场址选择[J].太阳能学报,2016,37(11):2835-2842.  
LIU C, WANG T Y, QU Y Y, et al. Wind resource analysis and site selection of wind power plant [J]. Acta energiae solaris sinica, 2016, 37(11): 2835-2842.
- [3] AHMAD S, FADI A, ARMIN E, et al. A new strategy for wind turbine selection using optimization based on rated wind speed [J]. Energy procedia, 2019, 160: 582-589.
- [4] 李轩,张家安,吴林林,等.可再生能源汇集地区风电与光伏发电的综合容量可信度评估[J].太阳能学报,2017,38(3):707-714.  
LI X, ZHANG J A, WU L L, et al. Comprehensive capacity credit evaluation of wind and photovoltaic power in dense renewable energy areas [J]. Acta energiae solaris sinica, 2017, 38(3): 707-714.

- [5] 朱永胜, 乔百豪, 瞿博阳, 等. 含风电及电动汽车的多目标电力系统调度[J]. 太阳能学报, 2019, 40(6): 1722-1730.
- ZHU Y S, QIAO B H, QU B Y, et al. Multi-objective power system scheduling including wind power and electric vehicles[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2019, 40(6): 1722-1730.
- [6] VLADISLOVAS K, MANTAS M, GIEDRIUS G, et al. Statistical analysis of wind characteristics based on Weibull methods for estimation of power generation in Lithuania[J]. *Renewable energy*, 2017, 113: 190-201.
- [7] PISHGAR- K S H, KEYHANI A, SEFEEDPARI P. Wind speed and power density analysis based on Weibull and Rayleigh distributions (a case study: Firouzkooch county of Iran)[J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2015, 42: 313-322.
- [8] HOSSAIN J, SHARMA S, KISHORE V V N. Multi-peak Gaussian fit applicability to wind speed distribution [J]. *Renewable & sustainable energy reviews*, 2014, 34: 483-490.
- [9] HARRIS R I, COOK N J. The parent wind speed distribution: why Weibull? [J]. *Journal of wind engineering & industrial aerodynamics*, 2014, 131: 72-87.
- [10] WANG J Z, HU J M, MA K L. Wind speed probability distribution estimation and wind energy assessment [J]. *Renewable and sustainable energy reviews*, 2016, 60: 881-899.
- [11] AZAD A K, RASUL M G, ALAM M M, et al. Analysis wind energy conversion system using Weibull distribution [J]. *Procedia engineering*, 2014, 90: 725-732.
- [12] USTA I, ARIK I, YENILMEZ I, et al. A new estimation approach based on moments for estimating Weibull parameters in wind power applications [J]. *Energy conversion and management*, 2018, 164: 570-578.
- [13] MOHAMMADI K, ALAVI O, MOSTAFAEIPOUR A, et al. Assessing different parameters estimation methods of Weibull distribution to compute wind power density [J]. *Energy conversion and management*, 2016, 108: 322-335.
- [14] FATMA G A, BIRDAL S, TALHA A. An alternative distribution to Weibull for modeling the wind speed data: inverse Weibull distribution [J]. *Energy conversion & management*, 2016, 114: 234-240.
- [15] USTA I, ARIK I, YENILMEZ I, et al. A new estimation approach based on moments for estimating Weibull parameters in wind power applications [J]. *Energy conversion and management*, 2018, 164: 570-578.
- [16] ASGHAR A B, LIU X D. Estimation of wind speed probability distribution and wind energy potential using adaptive neuro-fuzzy methodology [J]. *Neurocomputing*, 2018, 287: 58-67.
- [17] SU W C, WANG J H, ROH J. Stochastic energy scheduling in microgrids with intermittent renewable energy resources [J]. *IEEE transactions on smart grid*, 2014, 5(4): 1876-1883.
- [18] CHANG W Y. A literature review of wind forecasting methods [J]. *Journal of power and energy engineering*, 2014, 2: 161-168.
- [19] KAPLAN O, TEMIZ M. A novel method based on Weibull distribution for short-term wind speed prediction [J]. *International journal of hydrogen energy*, 2017, 42: 17793-17800.
- [20] 张宁, 康重庆, 肖晋宇, 等. 风电容量可信度研究综述与展望[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(1): 82-94.
- ZHANG N, KANG C Q, XIAO J Y, et al. Review and prospect of wind power capacity credit [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(1): 82-94.

## WIND SPEED DISTRIBUTION DESCRIPTION METHOD CONSIDERING TIME SERIES FLUCTUATION

Zhang Jiaan<sup>1</sup>, Qiu Shi<sup>1</sup>, Song Guanyu<sup>2</sup>, Li Fei<sup>3</sup>, Liu Dong<sup>1</sup>, Wang Huajun<sup>1</sup>

(1. *College of Artificial Intelligence and Data Science, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China;*

2. *Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Tianjin 300072, China;*

3. *Hebei University of Architecture, Zhangjiakou 075400, China)*

**Abstract:** A wind speed distribution description method considering of time series fluctuation is proposed based on the Weibull distribution. The fluctuation of wind speed time series is defined by the wind speed and its variation distribution. The method optimizing the wind speed established by the Weibull distribution is based on the law of wind speed variation, so that the simulated wind speed is closer to the actual wind speed. The wind speed model is established using the wind speed distribution description method considering the time series fluctuation, and compared with the traditional Weibull distribution. The results show that the proposed method is more accurate in describing the characteristics of wind speed variation.

**Keywords:** wind power; wind speed; modeling; Weibull distribution; time series