

文章编号:0254-0096(2019)10-3250-08

黑龙江地区风速与风电出力的特征分析与 概率分布最优建模

蔡国伟¹, 西禹霏¹, 王艺博¹, 杨德友¹, 陈剑飞²

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 132012; 2. 国网黑龙江省电力有限公司, 哈尔滨 150001)

摘 要: 基于黑龙江地区不同区域风电场的大量实测数据,对该地区的风速与风电出力特性进行全面分析,并引入威布尔分布、伽马分布、正态分布和对数正态分布4种概率模型,采用极大似然估计法估算各模型参数,对4处不同地区风电场的风速与风电出力进行模拟并比较,确定不同地理位置风电场的最佳拟合概率分布模型。研究表明黑龙江地区的风速具有明显的季节性、时域性和地域性,各场点风电出力具有一定相关性,其自身的随机波动性受时域和地域的影响。

关键词: 风速; 风电出力; 风电场; 概率分布; 特性分析

中图分类号: TM614

文献标识码: A

0 引 言

位于中国东北的黑龙江地区具有十分丰富的风能资源,省内风能分布范围广、平均风速高,大部分地区年平均风速达4 m/s以上,年平均风能密度可达140 W/m²。伴随着近几年能源、环境问题日益突出及中国政府对风电行业的大力支持,黑龙江地区风电获得了突飞猛进的发展。截至2018年底,风电、光伏发电总装机容量达到806.5万kW,全年风电利用达到2144 h,风电发电量完成124.6亿kWh,全省最大风电出力达到4423 MW,占当时供电负荷的49.9%^[1]。但风能的间歇与随机性决定了风电出力的波动性,使得风电在黑龙江地区飞速发展的同时,弃风限电、电网调峰和消纳能力不足等问题也日趋显现。

为有效减少风电并网对系统造成的不利影响,实现对黑龙江地区优越风能资源的持续利用开发,需要在充分解不同地区风能资源的前提下,合理利用区域资源配置,优化风能转换系统设计,分析风电功率输出特性,以概率统计的角度,为黑龙江电网的安全评估、调峰调频和调度规划创造便利条件。对此,文献[2]讨论了风速与风向的连续性、稳

定性以及季节性,同时对风功率密度分布和平均功率密度进行分析;文献[3]表明风速分布可反映风电系统的性能,并验证了其在经济上的可行性;文献[4]表明由于威布尔分布的参数易于估算且与风速分布相似,目前国内外对风能特性的研究多数基于威布尔分布;文献[5]提出对数正态分布、正态分布和伽马分布3种模型对风速分布进行拟合,并得到较好的拟合实验结果;文献[6]表明风电是正比于风速的多维数集,指出风电与风速的立方成正比;文献[7]表明风电功率的波动特性的概率分布可采用带位移因子与伸缩系数的 t 分布来描述。

准确了解地区风资源潜能,掌握风电出力特性,有利于解决现阶段大规模风电并网困难和我国北方采暖期电网调峰能力不足的问题。本文根据2016年黑龙江地区不同风电场的风速与风电出力的实测数据,选取克山、大庆、抚远和依兰4个具有代表性的地理位置内的风电场作为样本,引入威布尔分布、伽马分布、正态分布和对数正态分布4种概率分布模型,对其风速与风电出力进行特性分析,确定不同地理位置风电场的最佳拟合概率分布模型,研究结果表明,黑龙江地区的风速具有明显的季节性、地域性和时域性,其概率密度分布较符

收稿日期: 2017-05-03

基金项目: 国家高技术研究发展(863)计划(SS2014AA052502); 国家自然科学基金(51377017)

通信作者: 王艺博(1989—), 男, 博士研究生, 主要从事电力系统优化运行与电力变流器方面研究。20162669@neepu.edu.cn

合威布尔分布和正态分布;各风电场的出力具有明显的相关性与随机波动性,其中克山、大庆以及依兰3个风电场的风电出力概率密度分布较符合威布尔分布和伽马分布,抚远风电场的风电出力概率密度分布则较符合对数正态分布。

1 黑龙江地区风电场的宏观特性

黑龙江地区是我国规划的第9个千万kW级风电基地,位于中国东北地区,地处欧亚大陆东部、太平洋西岸,受温带大陆性季风气候影响,全省风能资源十分丰富。本文所选取的具有代表性的4个风电场基本地理信息如图1、表1所示。

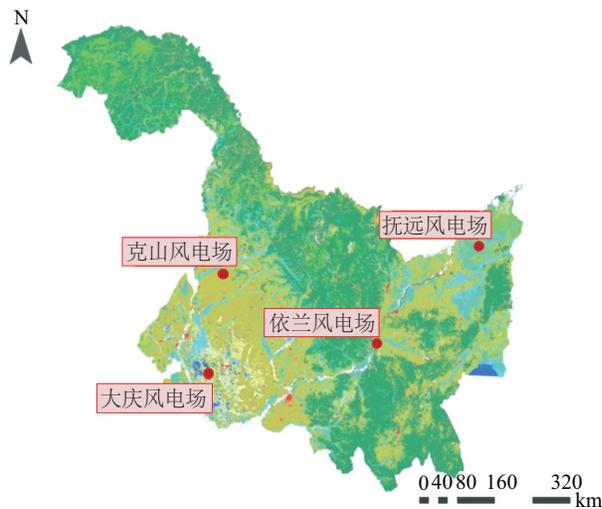


图1 4个风电场的地理位置

Fig. 1 Geographical location of 4 wind farms

表1 4个风电场的基本信息资料

Table 1 Basic information of 4 wind farms

采样 风电场	纬度	经度	海拔/m	装机/MW
克山	125°87'E	48°03'N	235	49.5
大庆	124°45'E	46°87'N	152	49.5
抚远	134°28'E	48°37'N	40	31.5
依兰	129°55'E	46°32'N	100	98.6

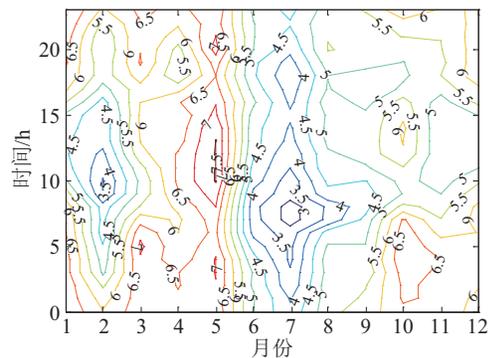
为充分解黑龙江地区风能资源现状和风电出力特性,本文以2016年全年10min采样间隔下的典型风电场风速与风电出力实测数据,对黑龙江地区的风能资源与风电出力特性进行合理分析,为下文的风速与风电出力分布模型的构建奠定基础。

1.1 风速

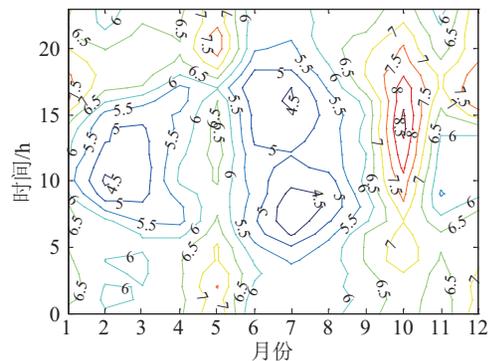
风速是用来表征区域风能资源最为直观的参数,本文通过对采样数据绘制月均风速等高分布图,分别从季节性、时域性与地域性对其进行研究分析,如图2所示。

通过图2可从以下4个方面展开分析:

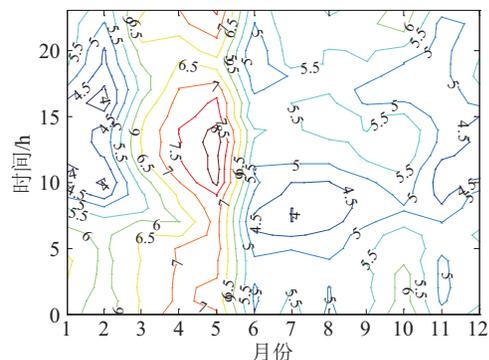
1)季节性:由图2可看出风速变化具有明显的季节性特征。4个风电场在春季4月份、5月份基本达到全年高风速段,全年低风速段则出现在夏季7月份、8月份,而在气候干燥的冬季,风速则呈现出较强的波动性,最小与最大值跨度明显增大。



a. 克山



b. 抚远



c. 大庆

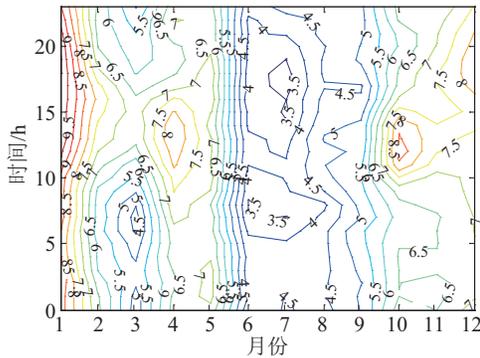


图2 4个风电场月均风速等高分布

Fig. 2 Contour distribution of monthly hourly mean wind speed in 4 wind farms

2)时域性:由于风能资源源自于太阳的热辐射,风能密度的变化与温度波动密切相关,从而使得全天候高风速段主要出现于深夜 23:00 时~次日凌晨 04:00 时的时间区段内,而温度变化相对较为平缓的午间时段则通常是一天的风速低谷时段。

3)地域性:对于图 2 中的 4 个不同地域的风电场,克山风电场的全年平均高风速段相较其他略长,这是由于在所有场点中克山的海拔最高,在通常情况下同一地区不同场点风速大小与其海拔正相关^[8];抚远风电场在 10 月份前后出现反常的风速高峰带,这是因为该地为三江平原东部,地处太平洋西海岸,当夏秋交替时,大陆内部的冷却效应使得风速短期内有明显提升;大庆地势较为开阔,区域内油田及草原较多,常年风资源较为适中,但由于该区域内风电场较为密集,同一风带内相互影响严重,使得风资源利用受到一定制约,风速等高分布规律性弱于其他地区;依兰风电场的等高分布相较其他 3 个场点从时域上看更为平缓,且其地处三江平原西部的丘陵地带,受丘陵谷影响,高风速段较多。

1.2 风电出力

采样风电场 2016 年月均出力波动情况与风电出力爬坡率分别如图 3、图 4 所示,4 个场点 1 月份日均风电出力波动情况如图 5 所示,本文分别从以下几点风电出力特性进行宏观分析。

1)相关性:由图 3 可看出 4 个风电场在 5 月份、10 月份出力明显升高,虽然各场点地理位置相异,但 4 个风电场均受黑龙江地区温带大陆性季风

气候影响,在全年时间尺度下,各个场点的风电出力波动具有类似的波动趋势,即呈现一定的相关性。

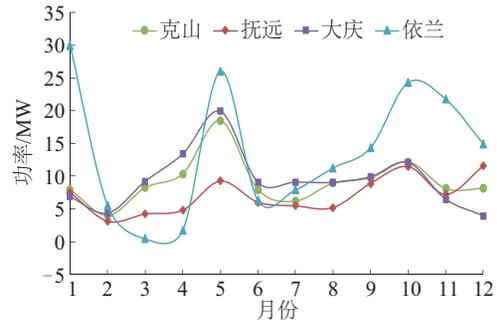
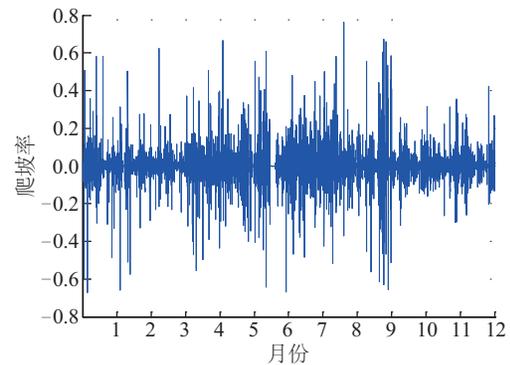


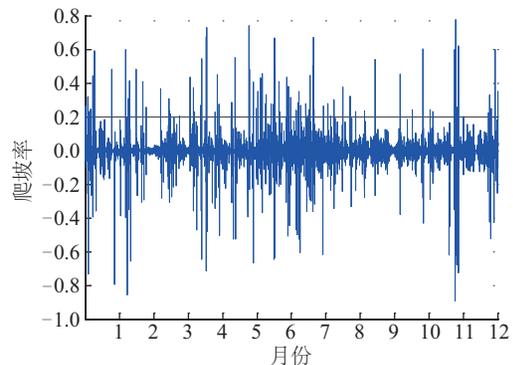
图3 4个风电场月均风电出力分布

Fig. 3 Generation of monthly mean wind power in four wind farms

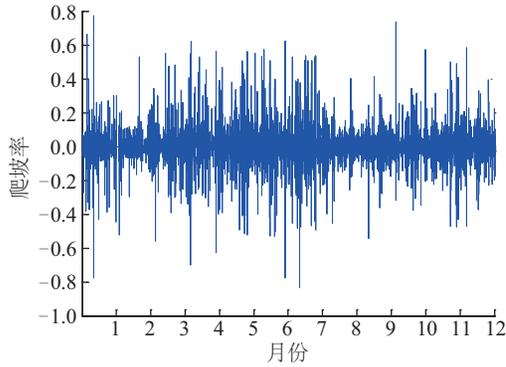
2)波动性:风电出力爬坡率可较直观地表征风电场出力波动性情况,即爬坡率绝对值的大小直接反应风电场出力波动量大小,该值越小则表示风电出力越稳定,其并网运行对系统的影响越小,反之波动越剧烈,影响越大^[9],由此从图 4 可看出 4 个采样风电场的爬坡率最大值均达到 0.8,这意味着单位采样时刻,风电出力的波动量达额定容量的 80%,此时剧烈波动的风电并网将对系统产生较大影响。



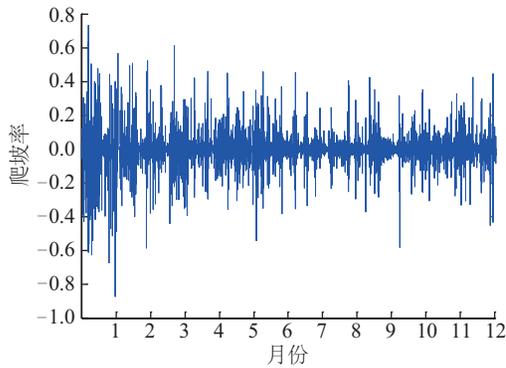
a. 克山



b. 抚远



c. 大庆



d. 依兰

图4 4个风电场全年风电出力爬坡率

Fig. 4 Climbing rate of wind power output in 4 wind farms

由图5可看出各风电场1月份具有显著的波动性,波动量较大。

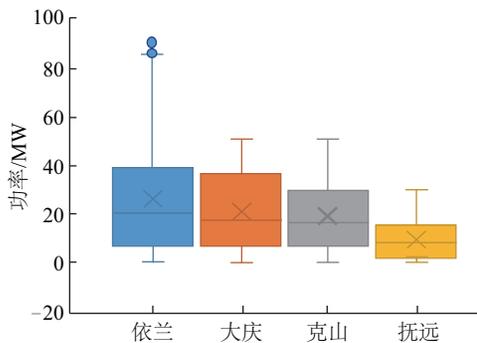


图5 4个风电场1月份日均出力分布

Fig. 5 Distribution of average daily wind power output in January of 4 wind farms

2 概率密度分布模型及求解方法

2.1 概率密度函数

威布尔分布由瑞典工程师、数学家威布尔于1951年详细阐述并命名,由于其具有灵活性高、适

应性强、积分形式简单等优点,近年来在风电研究中得到广泛应用。

威布尔概率密度函数具体为:

$$\begin{cases} f(x) = f(x; k, c) = \frac{k}{c} \left(\frac{x}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^k}, & x > 0; k, c > 0 \\ f(x) = 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, x ——随机变量,本文中其指代风速或风电出力; k ——威布尔分布的形状参数; c ——威布尔分布的尺度参数。

需要注意的是当 $k=1$ 时,威布尔分布变为指数分布;当 $k=2$ 时,威布尔分布变为瑞利分布,其概率密度函数分别为:

$$\begin{cases} f(x) = f(x; c) = \frac{1}{c} e^{-\left(\frac{x}{c}\right)}, & k = 1 \\ f(x) = f(x; c) = \frac{2x}{c^2} e^{-\left(\frac{x}{c}\right)^2}, & k = 2 \end{cases} \quad (2)$$

在此种分布下,随机变量 x 的期望值为:

$$\mu = \frac{c\sqrt{\pi}}{2} \quad (3)$$

式(3)中的尺度参数 c 与随机变量 x 的平均值成比例。

正态分布最初由德国的数学家、天文学家棣莫弗于1733年提出,但由于德国数学家高斯率先将其应用于天文学研究,故正态分布又称高斯分布,它被许多国内外学者用于风速概率密度分布的拟合,其概率密度函数为:

$$f(x) = f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

式中, μ —— x 随机变量的期望值; σ —— x 随机变量的标准差。

当一个随机变量的对数服从正态分布,则该随机变量即为服从对数正态分布,对数正态分布具有“钟”形分布曲线的特征,其较多应用于无线电领域,近几年被一些学者用于风资源分析中,并取得了不错的效果。

对数正态分布概率密度函数如式(5)所示:

$$\begin{cases} f(x) = f(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sigma x \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}, & x > 0 \\ f(x) = 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (5)$$

伽马分布也是统计学的一种连续概率密度函数,它与指数分布有着密切联系,其表达式为:

$$\begin{cases} f(x) = f(x; \mu, p) = \frac{\lambda^p}{\Gamma(p)} x^{p-1} e^{-\lambda x}, & x > 0, \lambda, p > 0 \\ f(x) = 0, & x \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中, $\Gamma(p)$ ——伽马函数; p ——伽马分布的形状参数; λ ——伽马函数的尺度参数。

随机变量 x 的期望值 μ 与方差 σ^2 满足:

$$\begin{cases} \mu = \frac{p}{\lambda} \\ \sigma^2 = \frac{p}{\lambda^2} \end{cases} \quad (7)$$

2.2 参数估计

对密度分布函数的参数估计方法有很多,最常用的是极大似然估计法、最小二乘法和卡方法,根据相关文献表明,极大似然估计法是确定威布尔概率分布函数参数的最有效方法^[10]。

以威布尔分布为例,给定随机样本数据 $x = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$, 则威布尔分布模型的似然函数为:

$$L(k, c, x) = \prod_{i=1}^n f(k, c, x_i) \quad (8)$$

式中,威布尔概率密度函数 $f(k, c, x_i)$ 由式(1)定义。

对式(8)取对数得:

$$\begin{aligned} \ln L &= \sum_{i=1}^n \ln[f(k, c, x_i)] \\ &= n[\ln k - k \ln c] + (k-1) \sum_{i=1}^n \ln x_i - c^{-k} \sum_{i=1}^n (x_i)^k \end{aligned} \quad (9)$$

式中, L ——威布尔模型的似然函数。

此时式(9)中函数的极大值可通过求解方程组(10)来确定:

$$\begin{cases} \frac{\partial \ln L}{\partial k} = 0 \\ \frac{\partial \ln L}{\partial c} = 0 \end{cases} \quad (10)$$

同时方程组(9)的解还应满足方程组(11):

$$\begin{cases} c_i = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^{k_i} \right)^{\frac{1}{k_i}} \\ \frac{n}{k_i} - n \ln c_i + \sum_{i=1}^n \ln x_i - \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{c_i} \right)^{k_i} \ln \left(\frac{x_i}{c_i} \right) = 0 \end{cases} \quad (11)$$

消除方程组(11)中的 c , 得到求解参数 k 值的表达式(12), 并通过 k 值回代式(11)求出对应参数 c 的值:

$$k_i = \left[\frac{\sum_{i=1}^n x_i^{k_i} \ln x_i}{\sum_{i=1}^n x_i^{k_i}} - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln x_i \right]^{-1} \quad (12)$$

求解 k 值的过程需要迭代,迭代的初始值由文献[15]给出:

$$k_0 = (\bar{x} \sqrt{var})^{-1.086} \quad (13)$$

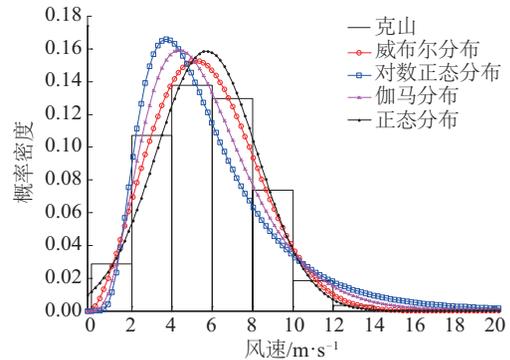
式中, \bar{x} ——样本数据均值; var ——样本数据的方差。

3 仿真验证

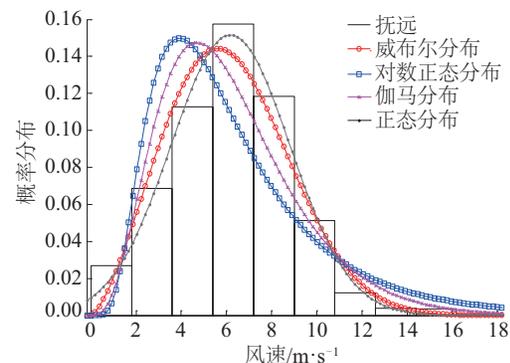
利用第2节提出的模型及参数求解流程,采用 Matlab 软件在4种分布下,对黑龙江地区所选的4个风电场进行风速概率密度分布的模拟,由于正态分布并不适用风电出力波动的拟合^[12-14],因此对于风电出力波动特性的拟合采用除正态分布外的另3种分布方式。

对于风速,4种分布方式下的4个场点风速概率密度分布拟合如图6所示,表2为不同概率密度分布的参数估计值。

从图6的频率直方图中可看出克山风电场的高频风速带在4~6 m/s 之间,其概率为0.27;抚远风电场的高频风速带在5~7 m/s 之间,其概率为0.31;大庆风电场的高频风速带在4~8 m/s 之间,其概率为0.55;而依兰风电场的高频风速带在4~6 m/s 之



a. 克山



b. 抚远

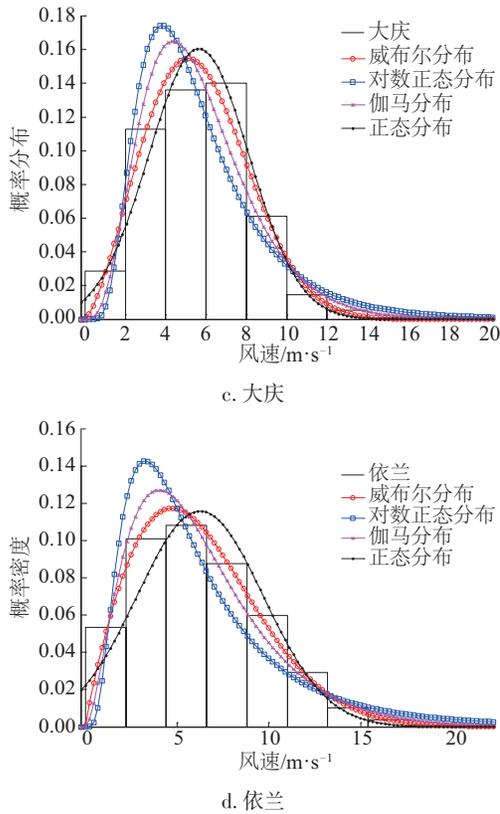


图6 4场点风速概率密度分布拟合

Fig. 6 Fitting of wind speed probability density distribution in 4 wind farms

间,其概率为0.22。而对于出现8 m/s以上的高风速,克山风电场的出现概率约为0.20,抚远风电场的出现概率约为0.26,大庆风电场的出现概率约为0.19,依兰风电场出现的概率约为0.33,可见依兰风电场在4个风电场中全年出现高风速段的概率最高。另外从整体上看,4个风电场的风速波动范围

表2 4个场点风速概率密度分布参数估计值

Table 2 Parameters of wind speed probability density distributions in 4 wind farms

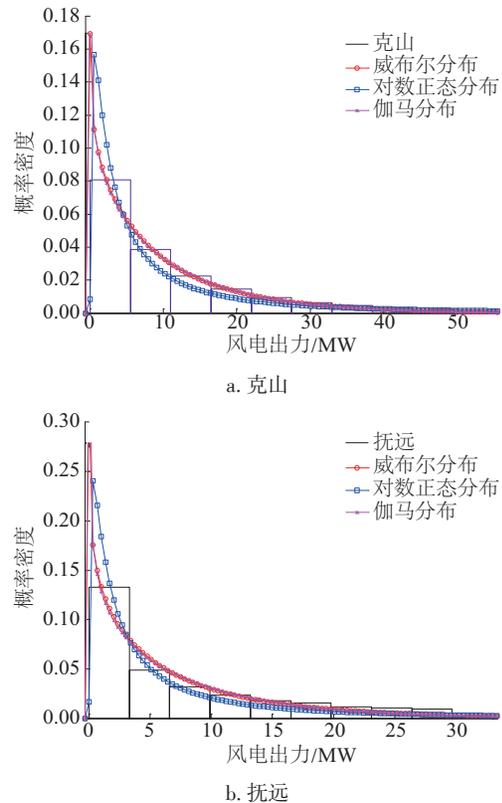
场点	威布尔分布		伽马分布		正态分布		对数正态分布	
	k	c	p	λ	μ	σ	μ	σ
克山	6.45	2.42	4.20	1.36	5.73	2.51	1.62	0.55
大庆	6.37	2.43	4.44	1.27	5.65	2.48	1.61	0.52
抚远	6.94	2.47	4.18	1.48	6.18	2.63	1.70	0.58
依兰	7.05	1.89	2.80	2.23	6.25	3.43	1.64	0.68

注： k —威布尔分布的形状参数； c —威布尔分布的尺度参数； p —伽马分布的形状参数； λ —伽马函数的尺度参数； μ — x 随机变量的期望值； σ — x 随机变量的标准差。表3同。

虽然相差不大,但依兰风电场风速分布的拖尾效应较为明显,其风速的随机波动性也较强。

对于风电出力,3种分布方式下的4场点风电出力概率密度分布拟合如图7所示,表3为不同概率密度分布的参数估计值。从图7的频率直方图中可看出克山风电场的高频出力区间为 $[0,5]$ MW,其概率为0.4;抚远风电场的高频出力区间为 $[0,3]$ MW,其概率为0.39;大庆风电场的高频出力区间为 $[0,5]$ MW,其概率为0.37;而依兰风电场的高频出力区间为 $[0,10]$ MW,其概率为0.47。从整体分布上看,各个风电场出力具有明显的相关性,其风电出力波动范围从小到大依次为抚远、克山、大庆和依兰,依兰风电场的风电出力范围最高可达95 MW以上,其自身分布具有较强的拖尾效应,可见在4个风电场中,依兰风电场的风电出力波动性最为显著。

通过测试与比较,对于克山和依兰风电场的风速概率密度拟合,应首选威布尔分布;对于抚远和大庆的风速概率密度拟合,则应首选正态分布。而对于各风电场风电出力的概率密度拟合而言,克山、大庆以及依兰风电场更适合威布尔和伽马分布,抚远风电场则更适合对数正态分布。



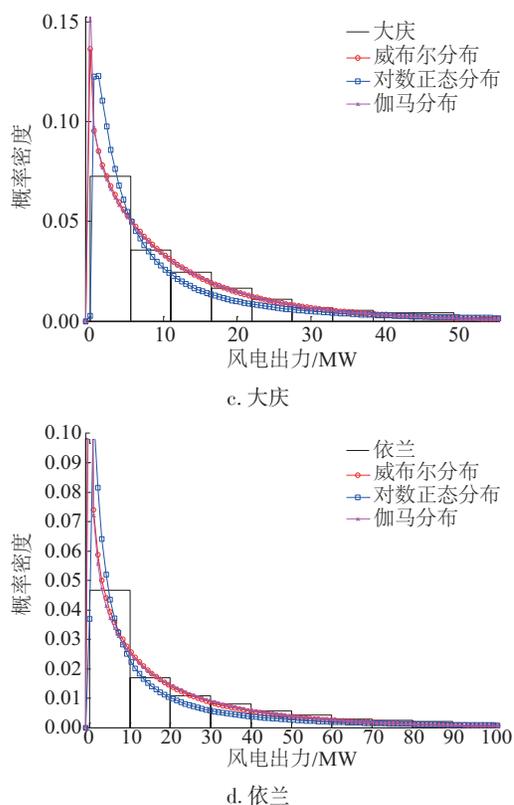


图7 4场点风电出力概率密度分布拟合

Fig. 7 Fitting of the wind power probability density distribution in 4 wind farms

表3 4个场点风电出力概率密度分布参数估计值
Table 3 Parameters of wind power probability density distributions in 4 wind farms

场点	威布尔分布		伽马分布		对数正态分布	
	k	c	p	λ	μ	σ
克山	9.86	0.90	0.84	12.32	1.63	1.47
大庆	11.54	0.92	0.86	13.94	1.80	1.41
抚远	6.97	0.85	0.77	9.77	1.25	1.53
依兰	17.56	0.78	0.67	30.09	2.09	1.71

4 结 论

本文基于2016年黑龙江地区风电场的风速与风电出力实测数据,从中选取克山、大庆、抚远以及依兰4个典型风电场,对其风速与风电出力进行特性分析,并在多种概率密度分布模型下,模拟4个场点的风速与风电出力概率密度分布,通过分析与比较可得到以下结论:

1)黑龙江地区的风速具有明显的季节性、地

域性和时域性。在全年的时间跨度下,该地区在春季与冬季时期的风速维持在较高水平;在一日的时间跨度下,由于受日温度变化的影响,高风速段出现在深夜至凌晨,低风速段出现在午间前后;且风速还受到例如海拔、气候、地势等地理因素的影响。

2)黑龙江地区各风电场之间的风电出力变化趋势大体一致,具有明显的相关性。此外各风电场的风电出力受地域、时域的影响,造成它们自身出力的波动性不尽相同,其中依兰风电场的风电出力波动范围较大,随机性较强。

3)在本文引入威布尔分布、伽马分布正态分布和对数正态分布4种概率模型中,威布尔分布和正态分布更适合模拟黑龙江地区4个场点的风速概率密度分布;而对于该地区风电出力概率密度分布的拟合,较多场点则更适合威布尔分布和伽马分布。

[参考文献]

- [1] 李俊峰, 蔡丰波, 乔黎明, 等. 2016年中国风电发展报告[R]. 北京: 中国循环经济协会可再生能源专业委员会, 2016: 21—34.
- [1] Ren Jianfeng, Ding Yawei, Fu Lei, et al. An improved strategy for out-of-step separation based on phase angle principle for 1000 kV ultra-high voltage AC power grids [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35 (10): 104—107.
- [2] Safari B. Modeling wind speed and wind power distributions in Rwanda[J]. 2011, 12(2): 925—935.
- [3] Kamau J N, Kinyua R, Gathua J K. 6 years of wind data for Marsabit, Kenya average over 14 m/s at 100 m hub height: An analysis of the wind energy potential[J]. Renewable Energy, 2010, 35(6): 1298—1302.
- [4] Catta J, Ramirez P, Velzquez S. A review of wind speed probability distributions used in wind energy analysis [J]. Renewable Sustainable Energy Reviews, 2009, 13 (5): 107—110.
- [5] Tar K. Some statistical characteristics of monthly average wind speed at various heights[J]. Renewable Sustainable Energy Reviews, 2008, 12 (6): 1712—1724.
- [6] Ramirez P, Carta J. Influence of the data sampling interval in the estimation of the parameters of the weibull wind speed probability density distribution: A case study [J]. Energy Conversion Management, 2005, 46(24):

- 19—38.
- [7] 王松岩, 李碧君, 于继来, 等. 风速与风电功率预测误差概率分布的时变特性分析[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 967—973.
- [7] Wang Songyan, Li Bijun, Yu Jilai, et al. Analysis on time-varying characteristics of probability error in forecast of wind speed and wind power[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 967—973.
- [8] Justus C G, Mikhail A. Height variation of wind speed and wind distribution statistics[J]. Geophysical Research Letters, 1976, 3(5): 261—264.
- [9] 杜彬, 王致杰, 刘三明, 等. 基于分段优化的风电功率爬坡有限度控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(5): 78—82.
- [9] Du Bin, Wang Zhijie, Liu Sanming, et al. Finite control strategy for wind power ramping based on segmentation optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 78—82.
- [10] Weisser D. A wind energy analysis of Grenada: An estimation using the Weibull density function[J]. Renewable Energy, 2003, 28(11): 1803—1812.
- [11] Yilmaz V, Celik H E. A statistical approach to estimate the wind speed distribution: The case of Gelibolu region [J]. Dogus University Journal, 2008, 9(1): 122—132.
- [12] 蔺红, 孙立成, 常喜强. 新疆风电出力波动特性的概率建模[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1616—1620.
- [12] Lin Hong, Sun Licheng, Chang Xiqiang. A probabilistic model to simulate wind power output fluctuation of a certain wind farm cluster in Xinjiang region [J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1616—1620.
- [13] 肖创英, 汪宁渤, 阚晶, 等. 甘肃酒泉风电出力特性分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(17): 64—67.
- [13] Xiao Chuangying, Wang Ningbo, Zhi Jing, et al. Power characteristics of Jiuquan wind power base [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(17): 64—67.
- [14] 孙健, 刘斌, 刘锋, 等. 计及预测误差相关性的风电出力不确定性集合建模与评估[J]. 电气系统自动化, 2014, 38(18): 27—32.
- [14] Sun Jian, Liu Bin, Liu Feng, et al. Control strategy for dynamic voltage restorers without inner current loops [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 27—32.

CHARACTERISTIC ANALYSIS AND OPTIMAL MODELING OF PROBABILITY DISTRIBUTION OF WIND SPEED AND WIND POWER IN HEILONGJIANG REGION

Cai Guowei¹, Xi Yufei¹, Wang Yibo¹, Yang Deyou¹, Chen Jianfei²

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. State Grid Heilongjiang Electric Power Company Limited, Harbin 150001, China)

Abstract: It is foundation for resolving the difficulty of grid-connection of large-scale wind power and the problem of insufficient peak capacity in heating period in North China to master the wind resource potential and the wind power characteristic. Based on the measured data of wind farms in Heilongjiang region, the characteristics of wind speed and wind power output are analyzed in this paper. The paper also introduces four probability density distribution function such as Weibull, Gamma, lognormal and normal. The maximum likelihood estimation method is used to estimate the parameters of each function and the wind speed and the wind power output of the wind farms in different regions are simulated and compared to select the optimal probability distribution model for each farm. The simulation results show that the wind speed in Heilongjiang region has obviously seasonal, temporal and geographical characteristics. Then the wind power output of each wind farm has certain correlation and volatility which is influenced by temporal and geographical factors.

Keywords: wind speed; wind power; wind farm; probability distribution; characteristic analysis