

风电场风速分布特性的模式分析

彭虎, 郭钰锋, 王松岩, 于继来

(哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院, 黑龙江省 哈尔滨市 150001)

Pattern Analysis on Characteristics of Wind Speed Distribution in Wind Farms

PENG Hu, GUO Yufeng, WANG Songyan, YU Jilai

(School of Electrical Engineering and Automation, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, Heilongjiang Province, China)

ABSTRACT: At present the analysis on the characteristics of wind speed distribution, which is generally obtained from the statistic of sampled wind speed data, is mainly serviced to the wind farm planning or electric energy planning. However, the characteristics of wind speed distribution serviced to above-mentioned planning fields cannot fully cope with the demands under new conditions, such as the characteristics of wind speed distribution in shorter time periods, especially in those short time periods related to the operation and control of power grid. Based on different application environments, the patternized differences of characteristics of wind speed distribution in wind farm and main causes that may lead to the patternized differences are discussed, and from the probability density of wind speed as well as from the probability density distribution of conditional wind speed the indices, such as characteristic wind speed, shape factor, scale coefficient and probability deviation and so on, are extracted to observe and study the patternized differences due to different wind speed distribution. Results of analysis on characteristics of wind speed distribution in an actual wind farm show that there are evident patternized differences among the characteristics of wind speed distribution from the statistic based on different viewpoints; when characteristics of wind speed distribution is applied to solve different problems, it is necessary to choose the statistical law conforming to the problem.

KEY WORDS: wind farm; distribution characteristics; pattern analysis; probability; confidence interval

摘要: 目前的风电场风速分布特性分析主要服务于风电场规划或电能计划, 通常由较长时间内的风速采样数据统计得到。然而, 当需要应对更短时间、特别是与运行和控制时间级有关的问题时, 服务于规划或电能计划的风电场风速分布特性已不能完全适应新的需要。从不同的应用环境出发, 探讨了风电场风速分布特性的模式化差异及可能造成模式化

差异的主要原因, 并从风速概率密度和条件风速概率密度分布中提取出特征风速、形状系数、尺度系数、概率偏度等指标, 以考察不同风速分布所表现出的模式差异性。某实际风电场风速分布特征分析结果表明: 从不同角度统计的分布特性存在明显的模式差异性; 风速分布特性用于解决不同问题时, 需要采用与其对应的统计规律。

关键词: 风电场; 分布特性; 模式分析; 概率; 置信区间

0 引言

自然风的随机性、波动性和不可控性使风电场的输出功率波动很大。当风电穿透功率达到一定比例时, 将对电网安全稳定运行带来严重影响^[1-3]。为了优化电网运行, 合理安排旋转备用, 提高风电穿透功率极限, 满足电力市场交易需要, 便于安排机组维护和检修, 有必要对风电场的风速分布特性进行研究。

风速是评估风电场风能资源、决定风电场输出功率的主导因素。目前, 相关专家和学者主要关注风速预测^[4-6]和风速分布拟合^[7-9]等问题。除风速预测涉及短周期^[10-12]外, 风速分布绝大部分涉及中长周期, 如年、季或月^[13]。中长周期的风速分布统计特性有助于科学规划风电场^[14-15]或编制电网电能计划, 但对更短时间、特别是与运行和控制时间级有关的问题, 往往不太适应。此时, 需要结合具体运行模式, 采用更有针对性的风速分布统计特性, 才能提高运行与控制的准确性。

本文就电力系统一些特殊的运行模式, 如日负荷爬峰期、迎峰度夏时的日负荷晚峰期和夜间负荷低谷期等, 从风速概率密度和条件风速概率密度分布中提取特征风速、形状系数、尺度系数、概率偏度等指标, 以考察不同运行模式下风速分布所表现出的差异性。

基金项目: 国家自然科学基金项目(50877014)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50877014).

1 影响风速分布模式差异性的主要因素

在进行风电场风能资源评估时，通常会取 1a 或多年的风速数据进行统计分析，以了解某地域总体风频情况。评估的结果主要服务于风电场规划或电能计划编制。但当关注短期风速对电网调度或运行的影响时，就需要利用更短周期内的风速分布统计规律。针对不同的调度或运行环境所统计的风速分布会存在不同程度的差异，因此有必要根据风电场和电力系统的实际运行需要对风速进行模式化分析。

不同运行模式下，风速分布可能存在明显的差异性。在实际应用中，造成风电分布模式产生差异性的主要原因可能有：

1) 统计周期。在年、季、月甚至更短周期内统计的风速分布特性不会完全相同，肯定存在不同程度的差异性。

2) 不同周期内的特殊系统运行模式，如电网年最大或最小运行方式、月最大或最小运行方式、迎峰度夏、日负荷爬坡和降谷方式、日高峰和低谷方式等。

3) 不同周期内风电场自身的特殊运行模式，如风电场年最大或最小运行方式、月最大或最小运行方式、季风运行模式、白天与黑夜运行模式等。

2 评估风速分布模式差异性的特征指标

2.1 基于风速概率密度分布的特征指标

对风速概率密度分布使用最广泛的是双参数 Weibull 分布^[16]。在考察不同风速分布模式差异性时，本文将 Weibull 分布函数的形状和尺度系数以及分布函数峰值对应的风速(本文称特征风速)纳入考察指标。由某实际风电场 1a 的风速采样数据(每 10 min 的平均风速)统计出的风速概率密度直方图及其 Weibull 函数拟合曲线如图 1 所示。由图 1 可

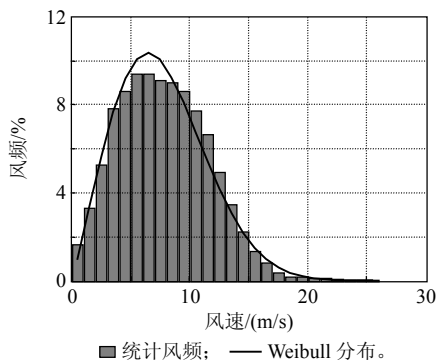


图 1 某风电场年度风速概率密度分布
Fig. 1 Annual wind speed probabilistic density distribution of a wind farm

知：形状系数 $k=2.13643$ ；尺度系数 $c=8.64388\text{ m/s}$ ；特征风速 $v_t=6\text{ m/s}$ 。

2.2 基于条件风速概率密度分布的特征指标

普通的风速概率密度主要由一段时间内的风速采样数据统计不同风速点的频次得到，可以看做为一种非条件概率密度。

对预测或具有后续时间运行与调度特点的应用环境，往往更多地关注某一时刻后风速的变化趋势，而对其之前的风速，由于已成历史，关注度可能会急剧下降。例如，如果已经实测到当前时刻的风速或预测到某一时刻的风速，一般会希望进一步了解下一时段风速的变化信息，如风速在当前或预测时刻风速基础上的变化情况、风速增大与减小的概率、风速增大或减小的范围。要解决上述问题，采用普通的风速概率密度是无法实现的，需要定义一种新的条件风速概率密度。

在某一条件风速的前提下，根据选定的一段时间内的风速采样数据寻找与条件风速相等的所有数据点，取这些点下一时刻或下几个时刻的风速数据构成新的数据子集。该数据子集的风速概率密度就是与该条件风速对应的条件风速概率密度。

在与图 1 来源相同的原始风速采样数据和条件风速为 10 m/s、条件风速下一时刻(10 min)的部分数据构成的数据子集所获得的条件风速概率密度直方图如图 2 所示。考虑到严格等于条件风速值的实际样本较少，不容易满足大样本数目要求，本文采取条件风速区间化的做法，即当当前实测风速值落入条件风速值为中心的某一区间时，认为其是符合该条件风速值的样本，将其纳入条件风速概率密度直方图统计范畴。对于图 2 所示的区间宽度为 0.5 m/s 的情况，当实测风速值(单位为 m/s)落入区间 $[10-0.25, 10+0.25]$ 时，均认为其是与条件风速 10 m/s 相吻合的样本。

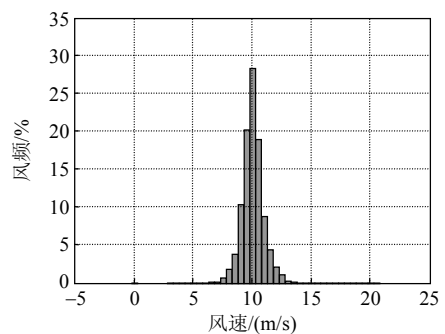


图 2 条件风速为 10 m/s 的条件风速概率密度分布
Fig. 2 Conditional probabilistic density distribution of wind speed with conditional wind speed being 10 m/s

根据条件风速概率密度，可以进一步定义如下特征指标：

1) 概率偏度特征。设条件风速概率密度为 $f(v)$ ，风速 v 小于、等于和大于条件风速 v_c 时的概率分别为

$$P_1 = P(v < v_c) = \int_0^{v_c(-)} f(v)dv \quad (1)$$

$$P_2 = P(v = v_c) = \int_{v_c(-)}^{v_c(+)} f(v)dv \quad (2)$$

$$P_3 = P(v > v_c) = \int_{v_c(+)}^{\infty} f(v)dv \quad (3)$$

$P_1 + P_3$ 为下一时段风速偏离条件风速的概率，可定义为条件风速的概率偏度 P_d 。由于 P_1 通常不等于 P_3 ，2 者的相对大小可以反映概率偏度发生左偏(风速减小)或右偏(风速增大)的程度。定义概率相对偏度为

$$\rho = \frac{P_3}{P_1 + P_3} \quad (4)$$

式中：当 $\rho \in (0, 0.5)$ 时，左偏占优；当 $\rho \in (0.5, 1)$ 时，右偏占优；当 $\rho = 0.5$ 时，左、右偏概率相等。

2) 条件风速波动置信范围特征。当已知某一条件风速时，往往想知道下一时刻具有某一置信水平的风速波动范围。对条件风速概率密度 $f(v)$ ，设 v_1 和 v_2 为 2 个风速值，且 $v_1 < v_c < v_2$ ，若满足：

$$\begin{cases} f(v_1) = f(v_2) \\ P(v_1 < v < v_2) = \int_{v_1}^{v_2} f(v)dv = 1 - \alpha \end{cases} \quad (5)$$

则定义 (v_1, v_2) 为 v_c 的置信度为 $1 - \alpha$ 的条件置信区间。该区间反映风速围绕 v_c 上下波动的范围及其概率。

一般地，条件风速 v_c 下一时刻的风速值 v_n 等于或接近 v_c 的概率最大或较大。 v_n 在 (v_1, v_2) 范围内上波动(风速增大)和下波动(风速减小)的概率往往是不一样的。定义条件风速波动置信范围概率相对偏度为

$$\rho_\alpha = \frac{\int_{v_c}^{v_2} f(v)dv}{\int_{v_1}^{v_c} f(v)dv + \int_{v_c}^{v_2} f(v)dv} \quad (6)$$

式中：当 $\rho_\alpha \in (0, 0.5)$ 时，下波动占优；当 $\rho_\alpha \in (0.5, 1)$ 时，上波动占优；当 $\rho_\alpha = 0.5$ 时，上下波动概率相等。

3 算例结果与分析

3.1 算例参数

以黑龙江某风电场实测风速数据为例，对不同模式下风速概率密度和条件风速概率密度分布进

行分析，并计算各项模式特征指标。

风电场原始数据为 2007 年 4 月 1 日到 2008 年 3 月 31 日每 10 min 的平均风速值，且条件风速统计的区间宽度为 0.5 m/s。

3.2 不同模式下的风速概率密度分布差异性

在不同运行模式下，风速的 Weibull 概率密度逼近函数的参数是不同的。表 1 列出了部分模式的风速概率密度特征指标，具体参数可用文献[9]的方法求得。

表 1 不同模式时的特征指标

Tab. 1 Characteristic features of different patterns

模式	k	$c/(m/s)$	$v_r/(m/s)$
全年度	2.136 00	8.644	6.0
全年晚峰期(18:00—22:00)	2.395 00	9.271	7.0
全年夜间低谷期(00:00—04:00)	2.261 00	8.980	8.5
全年早峰期(9:30—11:30)	1.875 00	7.675	3.5
全年白天(06:00—18:00)	2.001 00	8.177	5.5
全年夜间(18:00—次日 06:00)	2.309 00	9.106	8.5
春季	1.934 00	8.352	3.5
夏季(迎峰度夏)	1.825 00	7.248	4.5
夏季早峰期(09:00—11:30)	1.587 00	6.313	2.5
夏季晚峰期(18:00—22:00)	1.970 00	8.062	7.5
夏季夜间低谷期(00:00—04:00)	2.009 00	7.785	5.0
秋季	2.007 88	8.136	5.5
冬季	2.787 00	9.794	9.0
2007 年 4 月	1.951 00	8.394	3.0
2007 年 6 月	2.413 00	7.271	4.5
2007 年 8 月	1.564 00	7.243	3.5
2007 年 10 月	2.055 00	8.933	5.5
2007 年 12 月	2.358 00	8.318	7.0
2008 年 2 月	3.074 10	10.589	9.5
2008 年 3 月	2.361 00	8.862	6.0

从表 1 可见，不同模式下的特征指标具有很大差异，在实际应用时，须根据不同应用环境加以区别。

3.3 条件风速概率密度分布特征指标

对全年度模式，在已知条件风速的情况下，对其下一时刻风速概率密度分布进行统计，如图 3、4 所示。由图 3 可知：条件风速为 8 m/s，该分布呈单峰状，且下一时刻的风速等于条件风速的概率最

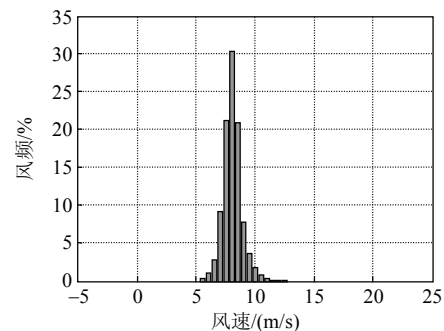


图 3 条件风速为 8 m/s 的概率密度分布

Fig. 3 Conditional probabilistic density distribution of wind speed with conditional wind speed being 8 m/s

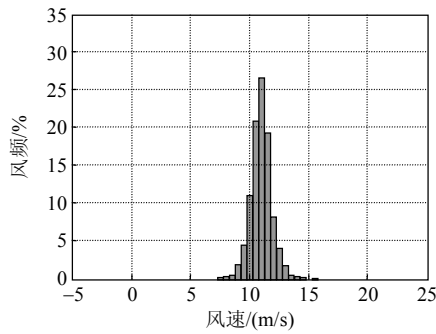


图4 条件风速为11 m/s的概率密度分布

Fig. 4 Conditional probabilistic density distribution of wind speed with conditional wind speed being 11 m/s

大,在条件风速两侧迅速下降。图4的条件风速为11 m/s,分布情况与图3类似。

本文统计了不同模式、不同条件风速时的条件风速概率密度分布,情况大致与图3、4类似。全年部分条件风速的概率密度分布偏度及相对偏度如表2所示。

表2 全年部分条件风速概率密度分布偏度及相对偏度

Tab. 2 Annual partial deviation and relative deviation of conditional probabilistic density distribution for wind speed

条件风速/(m/s)	概率偏度 P_d	ρ
6.0	0.637	0.506
6.5	0.665	0.500
7.0	0.659	0.487
7.5	0.671	0.509
8.0	0.697	0.506
8.5	0.683	0.524
9.0	0.691	0.497
9.5	0.711	0.483
10.0	0.716	0.489
10.5	0.717	0.472
11.0	0.733	0.466
11.5	0.711	0.449
12.0	0.734	0.420
12.5	0.745	0.440

条件风速波动置信范围是条件风速概率密度分布分析的重要内容。本文对不同模式的条件分布做了置信度为0.95($\alpha=0.05$)的统计,典型的年条件风速波动置信范围及其概率相对偏度如表3所示。

表3 全年条件风速波动置信范围及其概率相对偏度

Tab. 3 Confidence intervals and its relative probabilistic deviation of annual conditional wind speed fluctuation

条件风速/(m/s)	下限风速/(m/s)	上限风速/(m/s)	ρ_α
6.0	5.0	7.5	0.516
6.5	5.5	8.0	0.508
7.0	6.0	8.5	0.498
7.5	6.0	9.0	0.501
8.0	6.5	9.5	0.495
8.5	7.0	10.0	0.517
9.0	7.5	10.5	0.486
9.5	8.0	11.0	0.478
10.0	8.5	12.0	0.498
10.5	9.0	12.5	0.475
11.0	9.0	12.5	0.452
11.5	10.0	13.0	0.456
12.0	10.0	13.5	0.406
12.5	10.5	14.5	0.446

当某一时段风速落入不同条件风速区间时,其下一时段的风速变化信息可由表3直观看出。如当条件风速为9 m/s时,下一个10 min平均风速将以0.95的置信度落在7.5~10.5 m/s的范围内,且下波动略占优。然而对于不同的模式,同一条件风速下的风速波动置信范围不同,如表4所示。从表4可以看出:全年白天和2007年8月份上半月日负荷晚峰期的条件风速波动置信范围与全年度同条件风速时的范围及其概率相对偏度存在较大差异,如果只用全年度的波动范围信息去指导2007年8月份上半月日负荷晚峰期的运行,势必会产生较大的误差,因此针对不同的应用对象,应采用不同模式

表4 部分模式的条件风速波动范围

Tab. 4 Conditional wind speed fluctuation scales of some patterns

条件风速/(m/s)	全年度			全年白天(06:00—18:00)			2007年8月份上半月日负荷晚峰期(18:00—22:00)		
	下限	上限	ρ_α	下限	上限	ρ_α	下限	上限	ρ_α
6.0	5.0	7.5	0.516	4.5	7.5	0.515	5.5	6.5	0.201
7.0	6.0	8.5	0.498	5.5	8.5	0.484	6.0	8.0	0.200
7.5	6.0	9.0	0.501	6.0	9.5	0.511	6.5	8.0	0.667
8.0	6.5	9.5	0.495	6.5	10.0	0.484	7.0	9.5	0.556
10.0	8.5	12.0	0.498	8.0	12.0	0.493	9.5	11.5	0.333
11.0	9.0	12.5	0.452	9.0	13.0	0.450	9.0	11.0	0.333
11.5	10.0	13.0	0.456	9.5	13.0	0.433	11.0	12.5	0.500
12.0	10.0	13.5	0.406	9.5	14.0	0.377	10.0	12.0	0.500
12.5	10.5	14.5	0.446	9.5	14.5	0.405	12.0	13.5	0.667

下的规律。

4 结论

本文就电力系统一些特殊的运行模式,从风速概率密度和条件风速概率密度分布中提取特征风

速、形状系数、尺度系数、概率偏度等指标,以考察不同运行模式下风速分布所表现出的差异性。这些指标是从大量实际运行数据中统计得出的,能反映出一定的客观规律,对风电场规划、电能计划编制以及风电场运行与控制具有指导意义。

参考文献

- [1] Mark L A, Robert M Z. The role of wind forecasting in grid operations & reliability[C]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition: Asia and Pacific, Dalian, China, 2005.
- [2] 韩爽. 风电场功率短期预测方法研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2008.
- [3] Chen Z, Blaabjerg F. Wind farm: a power source in future power systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009(13): 1288-1300.
- [4] 杜颖, 卢继平, 李青, 等. 基于最小二乘支持向量机的风电场短期风速预测[J]. 电网技术, 2008, 32(15): 62-66.
Du Ying, Lu Jiping, Li Qing, et al. Short-term wind speed forecasting of wind farm based on least square-support vector machine[J]. Power System Technology, 2008, 32(15): 62-66(in Chinese).
- [5] 蔡凯, 谭伦农, 李春林, 等. 时间序列与神经网络法相结合的短期风速预测[J]. 电网技术, 2008, 32(8): 82-85.
Cai Kai, Tan Lunnong, Li Chunlin, et al. Short-term wind speed forecasting combing time series and neural network method[J]. Power System Technology, 2008, 32(8): 82-85(in Chinese).
- [6] 杨秀媛, 肖洋, 陈树勇. 风电场风速和发电功率预测研究[J]. 中国电机工程学报. 2005, 25(11): 1-5.
Yang Xiuyuan, Xiao Yang, Chen Shuyong. Wind speed and generated power forecasting in wind farm[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 1-5(in Chinese).
- [7] 潘晓春. 基于矩函数的风速概率分布参数估计方法[J]. 现代电力, 2007, 24(5): 12-18.
Pan Xiaochun. Parameter estimation methods of wind speed probability distribution based on moment function[J]. Modern Electric Power, 2007, 24(5): 12-18(in Chinese).
- [8] 丁明, 吴伟, 吴红斌, 等. 风速概率分布参数预测及应用[J]. 电网技术, 2008, 32(14): 10-14.
Ding Ming, Wu Wei, Wu Hongbin, et al. Research on forecasting of probabilistic distribution parameters of wind speed and its application [J]. Power System Technology, 2008, 32(14): 10-14(in Chinese).
- [9] 丁明, 吴义纯, 张立军. 风电场风速概率分布参数计算方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(10): 107-110.
Ding Ming, Wu Yichun, Zhang Lijun. Study on the algorithm to the probabilistic distribution parameters of wind speed in wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(10): 107-110(in Chinese).
- [10] Riahy G H, Abedi M. Short term wind speed forecasting for wind turbine applications using linear prediction method[J]. Renewable Energy, 2008(33): 35-41.
- [11] Alexiadis M C, Dokopoulos P S, Sahsamanoglou H S, et al. Short-term forecasting of wind speed and related electrical power[J]. Solar Energy, 1998, 63(1): 61-68.
- [12] Ma Lei, Luan Shiyan, Jiang Chuanwen, et al. A review on the forecasting of wind speed and generated power[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009(13): 915-920.
- [13] Thanasis G B, John B T, Minas C A, et al. Long-term wind speed and power forecasting using local recurrent neural network models[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2006, 21(1): 273-284.
- [14] 李常春. 风资源评估方法研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2006.
- [15] 张节潭, 程浩忠, 黄微, 等. 含风电场的电源规划综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(2): 35-41.
Zhang Jietan, Cheng Haozhong, Huang Wei, et al. Review of generation expansion planning for power system with wind farms[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2009, 21(2): 35-41(in Chinese).
- [16] Seyit A A, Dinler A. A new method to estimate Weibull parameters for wind energy applications[J]. Energy Conversion and Management, 2009(50): 1761-1766.



彭虎

收稿日期: 2010-07-08。

作者简介:

彭虎(1986), 男, 硕士研究生, 研究方向为风力发电与新能源, E-mail: phu315@126.com;

郭钰锋(1977), 女, 博士, 硕士生导师, 研究方向为电力系统随机过程分析、动力系统建模与仿真;

王松岩(1982), 男, 博士研究生, 研究方向风电场接入对电网电压的稳定影响;

于继来(1965), 男, 教授, 博士生导师, 目前主要研究电网理论分析与应用、电力系统优化调度与运营、电力系统稳定性分析与数值仿真等内容。

(责任编辑 杜宁)