

风电场风速随机性及容量系数分析

牟聿强, 王秀丽, 别朝红, 徐林, 朱卫平

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

摘要: 针对国内风电场实测风速数据, 利用三种分布模型拟合平均风速分布, 结果说明 Weibull 分布是一种适合于描述平均风速分布的模型。针对不同的 Weibull 分布参数估计方法, 提出了用风力发电机有功功率概率分布来检验参数估计效果的方法。同时也给出了一种求取风力发电机有功分布的方法。针对国内风电场实测风速数据, 用 Gumbel 分布拟合极限风速分布, 结果表明 Gumbel 分布适合描述极限风速的分布。通过用风速序列法和 Weibull 法分别计算某风电场 12 个月容量系数结果表明在大风月份容量系数较大。通过对十台风力发电机容量系数的计算给出了风力发电机参数对容量系数的影响, 得出的结论对于风电场风力发电机选型有一定指导意义。

关键词: 风速; 拟合; 分布; 容量系数

Analysis of wind speed probability distribution and wind turbine generator capacity factor

MU Yu-qiang, WANG Xiu-li, BIE Zhao-hong, XU Lin, ZHU Wei-ping

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Three functions are used for fitting the 10 mins mean wind speed probability distribution. Weibull distribution gives a better result. The scale and shape parameters of Weibull distribution are estimated using three methods. The suitability of the estimated methods is judged from the ability to describe the experimental wind power density distribution. Also the paper proposes a method to calculate the wind power density distribution. The Gumbel distribution is adopted in this study to fit the extreme wind speed data. It is found from the result that the Gumbel distribution is suitable. The wind speed data in the chronological (time-series) format and probabilistic (Weibull) format are used to estimate the monthly capacity factor of Growian-3MW turbine. It is shown that the strong wind period leads to significantly higher capacity factors than the weak wind period. Capacity factor of fifteen turbines at one site is done using the Weibull approach. The result will enable the wind power developer to make a judicious choice from kinds of wind turbine generators.

Key words: wind speed; fitting; distribution; capacity factor

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)01-0065-06

0 引言

评估风电场的风能资源情况、风电功率、容量系数等, 是开发风力发电项目的基础工作。评估关心的内容包括平均风速、极限风速。对一给定地区及给定时间段而言, 平均风速的概率分布决定了本地区的风能资源情况。用于拟合平均风速概率分布的模型有双参数 Weibull 分布、Rayleigh 分布、LogNormal 分布等^[1,2], 其中双参数 Weibull 分布模型应用最为广泛。用于估计双参数 Weibull 分布参数的方法有线性回归法、最小二乘法、矩估计法等^[1,3]。极限风速(Extreme wind)是指在一段时间

(3 s、10 min...)内的最大风速, 被用来衡量风能资源对风电场的破坏作用, 同时极限风速的研究对于天线、雷达安装以及高建筑抗风能力等问题也有一定意义^[4,5]。极限风速分布是风电场设计以及安全运行的一个重要参数。有多种描述极值分布的分布形式, 其中第一类极值分布或称为 Gumbel 分布是一种拟合极值分布的经典、常用形式。

风力发电机容量系数 CF (Capacity Factor)^[6,7] 为某特定时间段内(年、月)风力发电机预测输出能量与其按额定功率运行输出能量的比值。它等价于这台风力发电机在一段时间内满负荷工作的时间, 可以用来衡量总的发电情况。风力发电机容量系数是用来进行风电场选址、风力发电机设计的重要参数, 对于风电场建设规划也有一定指导意义。计算

容量系数的方法有两种：其一是通过风速分布概率密度函数以及风速功率曲线进行积分；其二是通过风速序列以及风速功率曲线求出风力发电机功率序列而后进行累加。影响容量系数的因素有风力发电机参数、风速分布情况等。

本文用 Gumbel 分布对国内某风电场 2006 年实测三处极限风速数据进行最小二乘拟合，验证 Gumbel 分布是一种适合描述极限风速的分布。

通过对国内某风电场 2006 年实测三组平均风速数据，分别用双参数 Weibull、Rayleigh、LogNormal 三种分布进行最小二乘拟合，结果表明双参数 Weibull 分布拟合效果良好，适应性也更强一些。

以往评价 Weibull 分布参数估计效果的方法多是从风速统计量方面进行。研究风速分布的目的是为了确定风能分布，本文提出了一种根据风速分布函数和风力发电机风速功率曲线求取有功功率分布的方法。并用由此方法得出的风力发电机有功功率累积分布与经验分布进行对比，评价双参数 Weibull 分布各种参数估计方法的优劣^[8]。

本文用序列法和 Weibull 法两种方法分别计算 Growian-3MW 型风力发电机在国内某风电场 2006 年各月的容量系数，结果表明平均风速高的月份容量系数要相对大一些。通过对各种风力发电机的容量系数的分析，给出了风力发电机参数对容量系数的不同影响。

1 数学模型

1.1 常用描述风速随机性的分布函数

常用来描述平均风速随机性的分布主要有：双参数 Weibull 分布、Rayleigh 分布、LogNormal 分布。其中双参数 Weibull 分布是应用最为广泛，适应性最强的一种。

在多种描述极限值分布的分布形式中第一类极值分布或称为 Gumbel 分布是一种拟合极值分布的经典、常用形式。

为了分析方便，下面分别将双参数 Weibull、Rayleigh、LogNormal、Gumbel 这四种分布的分布函数列写出来。

双参数 Weibull 分布的分布函数：

$$F_{\text{Weibull}}(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (1)$$

Rayleigh 分布的分布函数：

$$F_{\text{Rayleigh}}(v) = 1 - \exp\left(-\frac{v^2}{2a^2}\right) \quad (2)$$

LogNormal 分布的分布函数：

$$F_{\text{LogNormal}}(v) = \int_{-\infty}^v \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma t}} \exp\left[-\frac{(\ln(t)-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] dt \quad (3)$$

Gumbel 分布的分布函数：

$$F_{\text{Gumbel}}(v) = \exp\left[\exp\left(-\left(\frac{v-b}{d}\right)\right)\right] \quad (4)$$

其中： a 、 b 、 c 、 d 、 k 、 μ 、 σ 为待定的系数。

1.2 常用的参数估计方式

用于随机变量分布类型的参数估计方法有最小二乘法、矩法、极大似然法等，对于有特殊形式的分布(双参数 Weibull 分布)还可以采用线性回归法。矩估计的意义明确，计算相对简单，但要求处理的样本须是完整数据；极大似然法既可处理完整数据又可以处理不完整数据，但计算量较大。最小二乘法鲁棒性好，应用条件广泛。下面介绍最小二乘法以及用于估计双参数 Weibull 分布参数的矩估计法和线性回归法。

1.2.1 最小二乘估计

设待估计随机变量 X 的经验分布为 $F_E(x)$ ，拟合出的概率分布函数为 $F(x)$ ，则最小二乘估计的目标函数为：

$$\min \sum_i [F_E(x_i) - F(x_i)]^2 \quad (5)$$

最小二乘拟合可以通过 Matlab 软件包来计算。评价最小二乘拟合的一个重要指标是 R-Square 即样本相关系数，样本相关系数越高拟合结果越好。

1.2.2 双参数 Weibull 分布的矩估计

双参数 Weibull 分布的 r 阶原点距 m_r 为：

$$m_r = c^r \Gamma\left(1 + \frac{r}{k}\right) \quad (6)$$

其中： Γ 为 Gamma 函数。

设 s 为平均风速样本标准差、 \bar{V} 为平均风速样本均值。则可以由矩估计定义推导出：

$$c = \frac{\bar{V}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (7)$$

$$\frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) - \Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)} = \frac{s^2}{\bar{V}^2} \quad (8)$$

式(8)是一个无法求出解析解的方程，可通过数

值算法计算 k 值。

1.2.3 双参数 Weibull 分布的线性回归参数估计

经过变换可将双参数 Weibull 分布的分布函数线性化为下式:

$$\ln[-\ln[1.0 - F_{\text{Weibull}}(v)]] = k \ln(v) - k \ln(c) \quad (9)$$

参数 k 、 c 的求取转化为线性方程系数的求解。通过 1.2.1 中的最小二乘拟合方法可算出线性方程的系数。

1.3 风力发电机有功分布的解析表达式

研究风速分布的目的是为了获得风力发电机有功分布。本小节根据风速分布与风力发电机功率曲线推导出风力发电机功率分布的解析表达式 $F_{\text{pwg}}(P)$ 。同时通过风力发电机有功功率序列可以推导出有功功率的经验分布 $F_E(P)$ 。定义参数 ε 来表征 $F_{\text{pwg}}(P)$ 与 $F_E(P)$ 的接近程度, 通过 ε 的大小来考查 1.2 节中三种参数估计方法的优劣。

风力发电机风速功率曲线可由式(10)描述:

$$P_{\text{wtg}}(v) = \begin{cases} P_r & v_r < v \leq v_{co} \\ P_r \frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} & v_{ci} < v \leq v_r \\ 0 & v \leq v_{ci} \text{ 或 } v > v_{co} \end{cases} \quad (10)$$

其中: v_{ci} 为切入风速、 v_r 为额定风速、 v_{co} 为切出风速、 P_r 为风力发电机额定功率。需要指出的是式(10)中的 v 是风力发电机轮毂高处风速, 而通常获得的风速数据为测风站所测。文献[9]中认为 $V_H = V_{10} \left(\frac{H}{10}\right)^\alpha$, 其中 V_{10} 为 10 m 高处的风速值、 V_H 为高 $H(m)$ 处的风速值、 α 为一个与地形地貌和气象相关的参数, 其大致范围是(0.1~0.4)。

设 P_{wtg} 为风力发电机有功功率随机变量、 $F(v)$ 为轮毂高度处风速的分布函数。则:

1) 当 $P_{\text{wtg}} = P_r$, $v_r < v \leq v_{co}$

$$\text{Pr ob}\{P_{\text{wtg}} = P_r\} = F(v_{co}) - F(v_r)$$

2) 当 $P_{\text{wtg}} = 0$, $v \leq v_{ci}$ 或 $v > v_{co}$

$$\text{Pr ob}\{P_{\text{wtg}} = 0\} = 1.0 - F(v_{co}) + F(v_{ci})$$

3) 当 $P_{\text{wtg}} = x$, $x \in (0, P_r)$

$$\text{Pr ob}\{P_{\text{wtg}} = x\} = \text{Pr ob}\{x_1 < P_{\text{wtg}} < x_2\} \Leftrightarrow$$

$$\text{Pr ob}\{v_1 < v < v_2\} = F(v_2) - F(v_1)$$

其中: $P_{\text{wtg}}(v_2) = x_2$ 、 $P_{\text{wtg}}(v_1) = x_1$; x_1 、 x_2 为离散点 x 临近区间的上、下界。综合起来:

$$\begin{cases} \text{Pr ob}\{P_{\text{wtg}} = P_r\} = F(v_{co}) - F(v_r) \\ \text{Pr ob}\{P_{\text{wtg}} = 0\} = 1.0 - F(v_{co}) + F(v_{ci}) \\ \text{Pr ob}\{P_{\text{wtg}} = x\} = F(v_2) - F(v_1) \end{cases} \quad (11)$$

利用式(11)可以求出风力发电机有功分布 $F_{\text{pwg}}(P)$, 同时可以通过风力发电机有功功率序列推导出的风力发电机有功功率经验分布 $F_E(P)$ 。定义系数 ε :

$$\varepsilon = \max_i |F_E(P_i) - F_{\text{pwg}}(P_i)| \quad (12)$$

显然 ε 越小说明风速分布的估计越准确。

1.4 风力发电机容量系数

对某一风电场, 从能量捕获的角度, 一台风力发电机容量系数越大, 这台风力发电机越适合于此风电场; 从效率的角度, 最适合此风电场的风力发电机要综合考虑风力发电机出力与负荷需求两个方面。

风力发电容量系数与风力发电容量可信度是从两个方面来考核风电场对系统的贡献。发电容量可信度又称有效容量, 是电源可被信用的容量, 它可以用一个周期内发出的电能除以周期内小时数来评价, 也可通过对比不同性质的电源对供电可靠性的影响来评价。

1.4.1 容量系数的计算方法^[6]:

计算容量系数的方法有两种。第一种是利用风速分布概率密度函数如: Weibull 分布、Rayleigh 分布、LogNormal 分布等以及风速功率曲线进行积分。这种方法的准确性依赖于概率密度函数的适当选择, 风速分布的参数一般由时序风速数据计算得出。第二种是利用风速序列以及风速功率曲线求出风力发电机功率序列而后进行累加。由于序列法利用了原始的风速数据, 故给出的结果在理论上要比第一种方法准确。容量系数所关心的是风电场长时间段(一年、一月)内的能量输出情况, 而且风速序列的测量时间间隔又不会达到无限小, 所以有必要用一段时间内的平均风速来计算此时间段内的平均功率。这种方法的准确性依赖于时间间隔的选择, 如 10 min、30 min...。IEA(International Energy Agency) 建议用 10 min 内的平均风速来度量风力发电机出

力情况^[6]。下面给出两种方法的计算公式:

1) 通过风速分布获取容量系数(Weibull 方法)

若给出了风速概率密度函数 $f(v)$, 则时间段 T 内风力发电机发出的总能量 E_w 可由下式算出

$$E_w = T \int_0^{\infty} P_{wtg}(v) f(v) dv \quad (13)$$

本文在计算容量系数时认为风速符合双参数

Weibull 分布, 即 $f(v) = \frac{k}{c} (\frac{v}{c})^{k-1} \exp(-(\frac{v}{c})^k)$ 。

风力发电机在时间段 T 内以额定功率运行所发出的能量 E_R 可由下式算出。

$$E_R = TP_r \quad (14)$$

结合容量系数的定义可得

$$CF = \frac{E_w}{E_R} \quad (15)$$

2) 通过风速序列获取容量系数(序列方法)

把风速序列带入式(10), 累加时间段 T 内的能量输出, 那么时间段 T 内风力发电机发出的总能量 E_c 可由式(16)计算出。

$$E_c = \sum_{i=1}^N P_{wtg}(V_i) \Delta t_i \quad (16)$$

其中: $T = \sum_{i=1}^N \Delta t_i$ 。

结合容量系数的定义可得式(17)

$$CF = \frac{E_c}{E_R} \quad (17)$$

表 1 风力发电机参数

Tab.1 Specification of wind turbine generators

序号	型号	P_r /kW	H /m	V_c /(m/s)	V_r /(m/s)	V_{co} /(m/s)
1	GROWIAN	3 000	100	6.3	11.8	24
2	GAMMA-60	1 500	66	5	13.3	27
3	JACOBS 48/750	750	75	3.2	15	25
4	NM 600/43	600	56	4	15	25
5	CONE-450	450	50	3	12	25
6	MS-2-1	250	25	5	13.5	25
7	MEDIT	225	26	4.8	11.6	23
8	FD-24-200	200	30	4.5	14	28
9	M30	200	30	5	11	20
10	WIND-MASTER	100	23	4.5	10.8	22

2 算例及分析

2.1 数据说明

1) 风速数据

对国内某风电场 2006 年以十分钟为间隔测量的三处平均风速数据分别命名 Sta1-EVA、Sta2-EVA、Sta3-EVA; 对同一风电场 2006 年以十分钟为间隔测量的三处最大风速数据命名为 Sta1-MAX、Sta2-MAX、Sta3-MAX。

2) 风力发电机参数

表 1 给出了 10 种典型风力发电机的参数。最大的单机容量为 3 000 kW, 最小的单机容量为 100 kW。其中 P_r 为风力发电机额定功率、 H 为风力发电机轮毂高度。

2.2 极限风速分析

利用 Gumbel 分布即式(4), 采用最小二乘的方法对 Sta1-MAX、Sta2-MAX、Sta3-MAX 三组数据进行分析。

表 2 Gumbel 分布拟合结果

Tab.2 Values of the estimated parameters and R-Square of the Gumbel distribution

	d	b	R-Square
Sta1-MAX	4.442	8.375	0.995
Sta2-MAX	4.006	8.004	0.993 5
Sta3-MAX	4.203	7.335	0.995 8

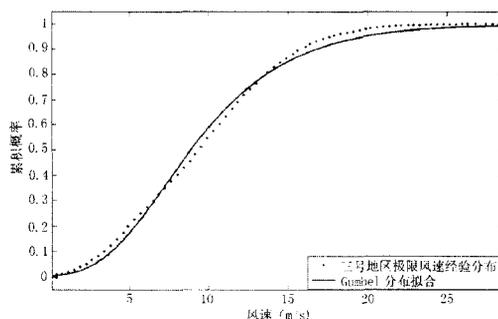


图 1 三号地区极限风速的 Gumbel 分布拟合示意图

Fig. 1 Gumbel distribution of the extreme wind speed in station three

表 2 给出了三个地区极限风速 Gumbel 分布的参数值以及样本相关系数。图 1 为三号地区极限风速经验分布与拟合出的 Gumbel 分布示意图。

表 2 以及图 1 的结果验证了 Gumbel 分布可以用来描述极限风速分布。

2.3 平均风速分析

2.3.1 不同分布函数拟合结果

对三组数据(Sta1-EVA、Sta2-EVA、Sta3-EVA)分别用 Weibull、Rayleigh、LogNormal 分布以最小二乘法进行拟合。

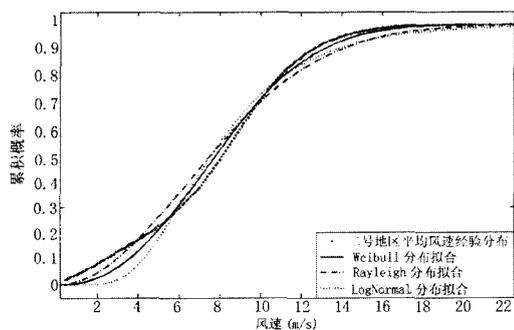


图 2 二号地区三种分布函数拟合示意图

Fig.2 Comparison of different cumulated distributions of the mean wind speed in station two

图 2 为二号地区三种分布拟合结果的示意图。表 3 给出了三种分布最小二乘拟合的结果以及样本相关系数。由表 3 可以看出 Weibull 分布在二号地区的样本相关系数最小即拟合出的效果在三组数据中最差, 但 Weibull 分布依然比其余两种分布的拟合效果要好, 从图 2 中也可看出 Weibull 分布最接

近经验分布。从表 3 和图 2 可以得出双参数 Weibull 分布在这三种描述平均风速的分布类型中具有较好的适应性。

2.3.2 三种估计 Weibull 分布参数方法的对比

利用 1.2 节中的三种参数估计方法分别对三组数据(Sta1-EVA、Sta2-EVA、Sta3-EVA)进行参数估计; 利用 1.3 节中提出的方法对三组参数估计结果进行分析, 其中风力发电机为表 1 中一号风力发电机、风速功率曲线见式(10)。

表 4 给出了三个地区分别用不同的方法估计出的 Weibull 分布的参数, 以及判定这三种方法优劣的参数 ϵ 。从表 4 对 ϵ 的对比可以看出: 最小二乘法的效果要比矩估计好; 而矩估计要比线性回归方法好。但是从原理上讲线性回归方法只需要四个数据就可以计算出参数, 而且其计算量要远远小于矩估计(求解一元非线性超越方程)和最小二乘法。同时线性回归计算出的结果可以作为其他两种方法的初值选择。

表 3 不同分布类型拟合平均风速的结果

Tab.3 Comparison of different cumulated distributions of the mean wind speed in three stations

分布类型	Weibull 分布			Rayleigh 分布		LogNormal 分布		
	参数	k	c	R-Square	a	R-Square	μ	σ
Sta1-EVA	2.177	10.25	0.997 4	7.24	0.996 2	2.126	0.491 3	0.987 7
Sta2-EVA	2.389	9.129	0.994 4	6.433	0.989 8	2.028	0.45	0.981 1
Sta3-EVA	2.063	8.341	0.998 4	5.895	0.998 2	1.907	0.519	0.988 6

表 4 三种估计方式对比

Tab.4 Shape and scale parameters for the three stations using three methods

估计方法	线性回归			矩估计			最小二乘		
	参数	k	c	ϵ	k	c	ϵ	k	c
Sta1-EVA	1.787	9.325 9	0.130	2.089 2	10.152 3	0.047 1	2.177	10.25	0.033 3
Sta2-EVA	1.838	8.017 4	0.179	2.250 1	8.948 5	0.070 9	2.389	9.129	0.045 9
Sta3-EVA	1.8	7.567	0.108	2.037 2	8.265 1	0.037 1	2.063	8.341	0.031 2

2.4 容量系数分析

2.4.1 各类风力发电机的参数对容量系数的影响

利用 Weibull 法计算不同风力发电机的容量系数并考查风力发电机参数对容量系数的影响。

其中风力发电机共十台参数见表 1, 风力发电机风速有功曲线见式(10); 风速数据为 Sta3-EAV, 其 Weibull 分布的参数采用最小二乘法估计, 结果见表 3; 此地区平均风速为 7.3226(m/s)。关于高度的影响认为风速数据为 10 m 处所测, 折算系数 α 取 0.12。记 $H_{Par}=(H_i/10.0)^{0.12}$ 。

表 5 给出了不同风力发电机参数对容量系数的

影响: 从表 5 看出 5 号风力发电机的容量系数最大, 但它的额定功率小于 1 号机的 3 MW, 说明风力发电机额定容量大小并不能决定容量系数的大小。同时容量系数相对较大风力发电机其 $|V_r/H_{Par}-V_{mean}|$ 较小, 说明轮毂处的平均风速和额定风速的接近程度对风力发电机容量系数有影响。关于风力发电机切入、切出、额定风速对容量系数的影响也可以从表 5 中看出: 1、5、10 号风力发电机的 (V_{co}/V_r) 与 (V_{ci}/V_r) 同时大于其它风力发电机的 (V_{co}/V_r) 与 (V_{ci}/V_r) 。说明切入、额定、切出风速同时对风力发电机的容量系数产生影响。

表 5 不同风力发电机参数及其容量系数

Tab.5 Turbine specifications and their capacity factors

序号	CF	H /m	P_r /kW	$ V_r/H_{Par} - V_{mean} $	V_{co}/V_r	V_{ci}/V_r
1	0.508 7	100	3 000	1.628 615	2.033 9	0.533 9
2	0.478 6	66	1 500	3.282 295	2.030 08	0.375 94
3	0.497 5	75	750	4.455 735	1.666 67	0.213 33
4	0.448 1	56	600	4.875 964	1.666 67	0.266 67
5	0.582 0	50	450	2.569 872	2.083 33	0.25
6	0.395 5	25	250	4.771 706	1.851 85	0.370 37
7	0.474 7	26	225	3.020 749	1.982 76	0.413 79
8	0.414 8	30	200	4.948 217	2	0.321 43
9	0.493 1	30	200	2.318 756	1.818 18	0.454 55
10	0.509 9	23	100	2.4501 42	2.037 04	0.416 67

2. 4. 2 各个月的容量系数

利用 1. 4. 1 中对容量系数的两种定义，分别用风速序列法和 Weibull 法计算 Growian-3MW 型风力发电机 2006 年各月容量系数。风速数据为 Sta1-EVA、风速分布采用双参数 Weibull 分布；风力发电机风速功率曲线见式(10)。

由于 Weibull 方法中 Weibull 分布的参数由风速序列估算出，所以两种方法的计算结果在理论上会有所不同。

图 3 给出了 Growian-3MW 型风力发电机在一号地区 2006 年 12 个月份两种计算方法下的容量系数。从图 3 可以看出：由风速序列计算出的容量系数普遍比由 Weibull 法计算出的容量系数大；另外大风月份的容量系数比较大。表明平均风速比较大的月份，风力发电机能利用更多风能。

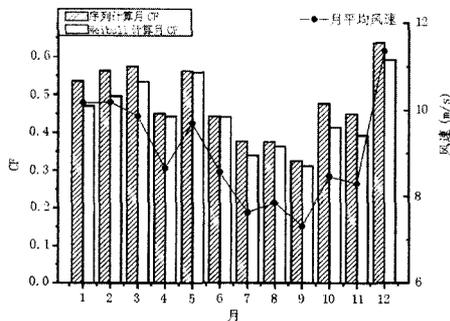


图 3 一号地区 2006 年不同月份的容量系数

Fig.3 Comparison of the monthly capacity factors using the chronological approach, the Weibull approach in 2006

3 结论

本文利用国内某风电场的实测数据，对平均风速以及极限风速的分布问题进行了研究。提出了一种由风力发电机有功功率的分布来检验 Weibull 分布不同参数估计方法优劣的方法。利用风速序列和风速分布两种方法计算了 Growian-3MW 型风力发电机 2006

年各月的容量系数。针对不同风力发电机以及不同有功风速关系对容量系数进行了分析。结论如下：

- (1) Gumbel 分布适合于描述风速的极限分布。
- (2) 在众多描述风速分布的分布函数中 Weibull 分布的适应性相对较强。
- (3) Weibull 分布参数最小二乘估计的性能良好。
- (4) 容量系数与风力发电机参数有密切的关系，容量大的风力发电机其容量系数不一定大；当风力发电机额定风速接近于轮毂处平均风速时容量系数较高；当切入风速与额定风速比值以及切出风速与额定风速比值同时取得较大值时容量系数较大。
- (5) 计算容量系数有风速序列和风速分布两种方法，两种方法计算的结果有所不同，在平均风速较大的月份两种方法计算出的容量系数较高。

参考文献

- [1] Morgan V T. Statistic Distribution of Wind Parameters at Sydney, Australia[J]. Renewable Energy, 1995, 6(1): 39-47.
- [2] Garcia A, Torres J L, Prieto E, et al. Fitting Wind Speed Distribution: A Case Study[J]. Solar Energy, 1998, 62(2): 139-144.
- [3] Dervlo A S S. Estimating Wind Speed Distribution[J]. Energy Conversion and Management, 2002, 43: 2311-2318.
- [4] Xiao Y Q, Li Q S, Li Z N, et al. Probability Distribution of Extreme Wind Speed and Its Occurrence Interval[J]. Energy Structure, 2006, 28: 1173-1181.
- [5] Cheng E, Yeung C. Generalized Extreme Gust Wind Speeds Distributions[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2002, 90: 1657-1669.
- [6] Chang Tsang-Jung, Tu Yi-Long. Evaluation of Monthly Capacity Factor of WECS Using Chronological and Probabilistic Wind Speed Data: A Case Study of Taiwan[J]. Renewable Energy, 2007, 32: 1999-2010.
- [7] Torres J L, Prieto E, Garcia A, et al. Effects of the Model Selected for the Power Curve on the Site Effectiveness and the Capacity Factor of a Pitch Regulated Wind Turbine[J]. Solar Energy, 2003, 74: 93-102.
- [8] Celik A N. Assessing the Suitability of Wind Speed Probability Distribution Functions Based on Wind Power Density[J]. Renewable Energy, 2003, 28: 1563-1574.
- [9] Pashardes S, Christofides C. Statistical Analysis of Wind Speed and Direction in Cyprus[J]. Solar Energy, 1995, 55(5): 405-411.

收稿日期：2008-02-28

作者简介：

牟丰强 (1983-)，男，硕士研究生，主要研究方向为分布式发电的运行与规划；E-mail: myq@stu.xjtu.edu.cn

王秀丽 (1961-)，女，教授，博士生导师，从事电力系统分析及电力市场方面的研究工作。