

## 风电场容量系数计算方法的研究

潘慧慧<sup>1</sup>, 魏 伟<sup>2</sup>

(1. 铜陵学院 电气工程学院, 安徽 铜陵 244000; 2. 皖能铜陵发电有限公司, 安徽 铜陵 244000)

**摘 要:** 容量系数反映风电场风速与风力发电机组的匹配程度, 是风电场机组选型时衡量的一个重要指标。基于风电场风速的 Weibull 分布函数和风力发电机组输出特性的二次函数, 建立计算容量系数 CF 数学模型, 并且通过工程算例验证该计算方法是可行的。工程实例结果分析表明, 风电场的容量系数和发电量近似呈线性关系, 同时风电机组的塔架高度和额定风速的选择会影响风电场容量系数的大小。

**关键词:** 风电场; 容量系数; 计算方法; 风速; Weibull 分布

中图分类号: TK89

文献标志码: A

文章编号: 1671-8798(2017)03-0183-06

## Study on the calculation method of capacity factor of the wind farm

PAN Huihui<sup>1</sup>, WEI Wei<sup>2</sup>

(1. College of Electric Power Engineering, Tongling University, Tongling 244000, Anhui, China;

2. Wenergy Tongling Power Generation Company Limited, Tongling 244000, Anhui, China)

**Abstract:** Capacity factor, as an important index measured in the model selection of the wind generator, reflects the matching degree about wind speed and wind turbines in the wind farm. Based on the Weibull distribution function of wind speed and the quadratic function of output characteristics of wind turbine, a mathematical model is formulated to calculate the capacity factor, which is proved to be feasible through an engineering example. The result shows that the relationship between capacity factor and power generation of wind farm is approximately linear, and the selection of rated wind speed and tower height has an important impact on capacity factor of the wind farm.

**Keywords:** wind farm; capacity factor; calculation method; wind speed; Weibull distribution

风能是绿色能源, 储量大、分布广、无污染, 近年来得到了世界各国的广泛关注。风力发电是风能利用的主要形式<sup>[1-2]</sup>。随着中国风力发电技术的日益成熟, 全国风电总装机容量一直保持着快速增长的态

收稿日期: 2017-03-04

通信作者: 潘慧慧(1989—), 女, 江苏省大丰人, 助教, 硕士, 主要从事新能源发电、微电网控制研究。E-mail: 18356286369@163.com。

势。在风电场的设计研究中,基本目标是最大限度地利用当地风能资源,并利用最少的成本获得最大的发电收益。而实现该目标的前提是要求风电场风速与风力发电机组匹配,即风电机组选型合理。为此,国内外专家学者提出了不少选型指标,其中容量系数是机组选型时考量的一个重要性能指标,它反映了风力发电机组风能利用情况。通常情况下,根据当地风速数据利用 WASP 等软件就可以粗略估算出年发电量,再通过计算年发电量与理论发电量的比值求取容量系数<sup>[3-4]</sup>。Albadi<sup>[5]</sup>、Huang<sup>[6]</sup>、张旭乐<sup>[7]</sup>等均采用 Weibull 分布函数和风力发电机组输出特性的三次函数积分计算容量系数。杨星光<sup>[8]</sup>等提出利用风速 Weibull 分布函数与风电机组输出特性的线性函数积分得出容量系数。风力发电机组的输出特性函数主要有线性函数、二次函数、三次函数、多项式函数等 7 种数学模型<sup>[9-12]</sup>,其中,二次函数更接近于风力发电机组稳定运行时输出功率的变化规律<sup>[13]</sup>。在上述研究的基础上,笔者基于风速 Weibull 分布函数和风力发电机组输出特性的二次函数,建立了一个新的容量系数 CF 数学模型。

## 1 容量系数的定义

容量系数是衡量风电场风力发电机组设计与选型时的重要参数,它反映了风电场风速与风力发电机组的匹配程度。容量系数可定义为某段时间内风电场实际发电量与其全部时间均在额定功率下工作时的发电量的比值<sup>[14]</sup>。然而,在风电场选址或风电机组选型时无法精确确定风电场的上网电量,因此只能近似计算风电场容量系数。容量系数可近似等于风力发电机组年平均发电功率与额定发电功率的比值。

## 2 容量系数的计算方法

### 2.1 风电场风速的 Weibull 分布模型

根据国内外相关文献可知,描述风电场风速的变化规律主要有 LogNormal 分布、Rayleigh 分布和 Weibull 分布<sup>[15-17]</sup>。其中,Weibull 分布被普遍认为最符合风电场风速的分布规律<sup>[18-19]</sup>,其概率密度函数可表示为:

$$f(v) = \frac{k}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left( \frac{v}{c} \right)^k} \quad (1)$$

式(1)中: $k$  为形状参数; $c$  为尺度参数,m/s; $v$  为风速,m/s。

### 2.2 风力发电机组输出特性

风力发电机组输出特性曲线的二次函数<sup>[20-21]</sup>可近似表示为:

$$P(v) = \begin{cases} 0, & 0 \leq v \leq v_c, \\ \frac{v^2 - v_c^2}{v_r^2 - v_c^2} \cdot P_r, & v_c < v < v_r, \\ P_r, & v_r \leq v \leq v_f, \\ 0, & v > v_f. \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: $P_r$  为额定功率; $v_c$ 、 $v_r$ 、 $v_f$  分别为切入风速、额定风速和切出风速。

### 2.3 年理论发电量计算

已知风电场全年有效风速小时数  $T$  及风速  $v$  的 Weibull 分布函数,则每台风电机组年理论发电量计算公式可表示为:

$$W_t = \frac{T}{2} \left( \int_{v_c}^{v_r} \rho A C_p v^3 f(v) dv + \int_{v_r}^{v_f} \rho A C_p v_r^3 f(v) dv \right) \quad (3)$$

将式(1)代入式(3),整理后得:

$$W_t = \frac{\rho k A T C_p}{2 C^k} \left( \int_{v_c}^{v_r} v^{k+2} e^{-\left( \frac{v}{c} \right)^k} dv + \int_{v_r}^{v_f} v_r^3 v^{k-1} e^{-\left( \frac{v}{c} \right)^k} dv \right) \quad (4)$$

式(4)中: $\rho$  为空气密度; $A$  为风轮横扫面积; $C_p$  为风能利用系数。

### 2.4 建立容量系数的数学模型

容量系数可以通过对风力发电机组输出特性曲线函数和风速分布概率密度函数的乘积在切入风速

和切出风速区间范围内进行积分计算而得:

$$CF = \int_{v_c}^{v_r} \frac{v^2 - v_c^2}{v_r^2 - v_c^2} f(v) dv + \int_{v_r}^{v_f} f(v) dv. \quad (5)$$

将式(1)代入式(5),得:

$$CF = \int_{v_c}^{v_r} \frac{v^2 - v_c^2}{v_r^2 - v_c^2} \cdot \frac{k}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} dv + \int_{v_r}^{v_f} \frac{k}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k} dv, \quad (6)$$

令  $x = \left(\frac{v}{c}\right)^k$ , 则  $dx = \frac{k}{c} \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} dv$ ,  $v = cx^{\frac{1}{k}}$ , 将式(6)中的  $dv$  消去并化简整理后得:

$$CF = -e^{-\left(\frac{v_f}{c}\right)^k} + \frac{2}{v_r^2 - v_c^2} \cdot \frac{c^2}{k} \left( \int_0^{\left(\frac{v_r}{c}\right)^k} e^{-x} x^{\frac{2}{k}-1} dx - \int_0^{\left(\frac{v_c}{c}\right)^k} e^{-x} x^{\frac{2}{k}-1} dx \right) + e^{-\left(\frac{v_r}{c}\right)^k} - e^{-\left(\frac{v_f}{c}\right)^k}. \quad (7)$$

已知标准伽马函数为:

$$\Gamma(a) = \int_0^\infty t^{a-1} e^{-t} dt. \quad (8)$$

已知不完全伽马函数为:

$$P(x, a) = \frac{1}{\Gamma(a)} \int_0^x t^{a-1} e^{-t} dt. \quad (9)$$

将  $v = cx^{\frac{1}{k}}$ , 式(8)~(9)代入式(7)中, 容量系数  $CF$  的表达式可以简化为:

$$CF = \frac{2}{v_r^2 - v_c^2} \cdot \frac{c^2}{k} \Gamma\left(\frac{2}{k}\right) \left[ P\left(\left(\frac{v_r}{c}\right)^k, \frac{2}{k}\right) - P\left(\left(\frac{v_c}{c}\right)^k, \frac{2}{k}\right) \right] - e^{-\left(\frac{v_f}{c}\right)^k}. \quad (10)$$

式(10)中的尺度参数  $c$  和形状参数  $k$  的数学关系可表示为:

$$c = \frac{\bar{v}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)}. \quad (11)$$

根据式(11), 利用 Matlab 软件将  $\frac{c}{\bar{v}}$  与  $k$  的关系绘于图1中。从图1可以看出, 当  $k$  在0到1.5这个范围时,  $\frac{c}{\bar{v}}$  随着  $k$  值增大而增大; 而当  $k$  在1.5到3.5之间时,  $\frac{c}{\bar{v}}$  近似等于一个常数, 即1.125。

研究表明, 风电场风速 Weibull 分布的  $k$  值一般情况下都在1.5到3.5这个范围内。所以, 尺度参数  $c$  与平均风速  $\bar{v}$  的关系可描述为:

$$c = 1.125 \bar{v}. \quad (12)$$

根据风切变幂定律, 可将风力发电机组轮毂高度  $h$  处风速  $\bar{v}$  表示为:

$$\bar{v} = \bar{v}_0 \left( \frac{h}{h_0} \right)^\alpha. \quad (13)$$

式(13)中:  $\bar{v}_0$  为高度  $h_0$  处的风速, m/s;  $\alpha$  为风切变指数。将式(13)代入式(12), 推算出高度  $h$  处的尺度参数  $c$  为:

$$c(h) = 1.125 \bar{v}_0 \left( \frac{h}{h_0} \right)^\alpha. \quad (14)$$

令  $H = \frac{h}{h_0}$ , 则  $c(h) = 1.125 \bar{v}_0 H^\alpha$ , 将其代入式(10), 容量系数可表示为:

$$CF = \frac{2.531 \bar{v}_0^2 H^{2\alpha}}{(v_r^2 - v_c^2)k} \Gamma\left(\frac{2}{k}\right) \left[ P\left(\left(\frac{v_r}{1.125 \bar{v}_0 H^\alpha}\right)^k, \frac{2}{k}\right) - P\left(\left(\frac{v_c}{1.125 \bar{v}_0 H^\alpha}\right)^k, \frac{2}{k}\right) \right] - e^{-\left(\frac{v_f}{1.125 \bar{v}_0 H^\alpha}\right)^k}. \quad (15)$$

由式(15)可知, 计算容量系数的数学模型包含7个参数, 分别为风力发电机组的切入风速  $v_c$ 、额定风

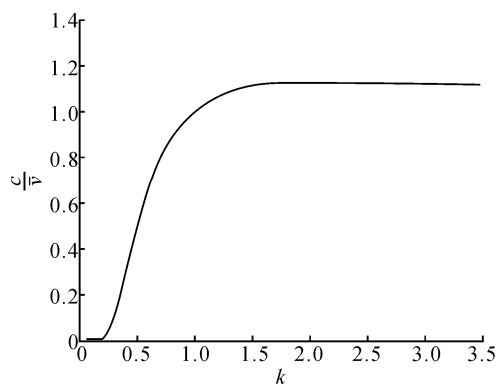


图1  $\frac{c}{\bar{v}}$  与  $k$  的变化关系

Fig. 1 The relationship diagram of variation between  $\frac{c}{\bar{v}}$  and  $k$

速  $v_r$ 、切入风速  $v_i$ 、参考高度  $h_0$ 、参考高度处平均风速  $\bar{v}_0$ 、风切变指数  $\alpha$  和形状参数  $k$ 。该数学模型充分反映了风电机组与风电场风资源的匹配情况,对风电场机组选型的研究具有一定的参考价值。

### 3 容量系数计算的工程实例及结果分析

某风电场计划总装机容量为 49.5 MW。该风电场所在地平均空气密度为  $1.04 \text{ kg/m}^3$ ,测风塔 10、70 m 高度处年平均风速分别为 6.2、8.0 m/s;年平均风功率密度分别为  $224.1$ 、 $486.6 \text{ W/m}^2$ ;年有效风速时数分别为 7 786 h ( $3 \sim 25 \text{ m/s}$ )、7 898 h ( $3 \sim 25 \text{ m/s}$ )。不同高度处风速 Weibull 分布函数的参数如表 1 所示,风速分布曲线如图 2 所示。

表 1 不同高度 Weibull 分布函数参数

Table 1 Weibull parameters at different height

$h/\text{m}$	$v/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$c/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$k$
10	6.2	6.9	2.04
30	7.4	8.4	2.33
50	7.7	8.8	2.17
70	8.0	9.1	2.16

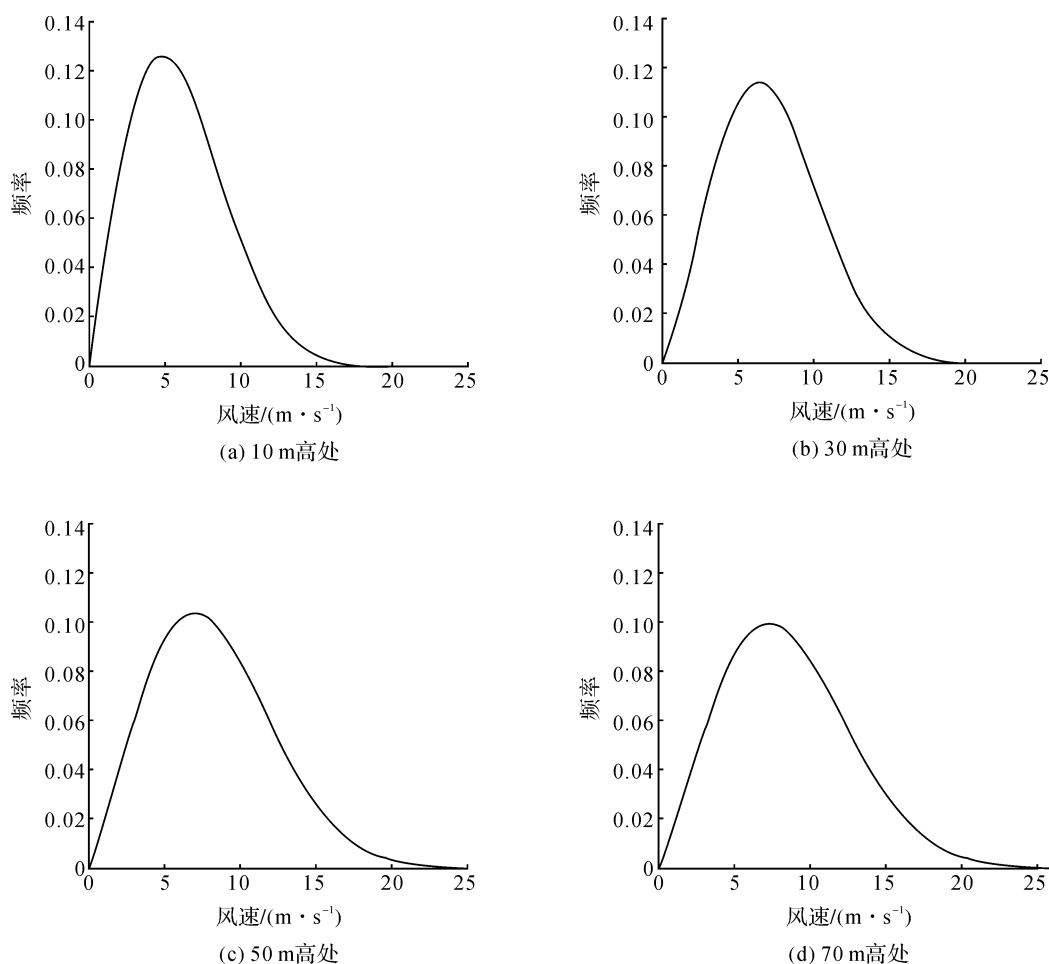


图 2 不同高度风速分布曲线

Fig. 2 Weibull distribution of wind velocity at different height

根据风电场测风塔各高度的数据资料可知不同梯度范围内的风切变指数平均值,如表 2 所示。根据测风资料可知,该地区风能资源丰富,参照 GB 18451.1—2001《风力发电机组安全要求》,该风电场适合选择 IEC 标准中的 III C 类及以上的风力发电机组,且适合选择容量较大的机组,这样才能更好地利用风电场风能资源。本研究以单机容量 1.5、2.0 MW 的两种机型为例。表 3 列出了近年来 5 家主流风电设备制造商生产的 10 种机型的技术参数。

表 2 风切变指数平均值

Table 2 The average of wind shear

梯度范围/m	风切变指数 $\alpha$
10~30	0.14
>30~50	0.05
>50~70	0.11

表3 不同机型的技术参数

Table 3 Technical specifications of different models

编号	厂家	型号	$P_r/\text{MW}$	$v_c/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_r/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$v_t/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$D/\text{m}$	$A/\text{m}^2$	$h/\text{m}$
1	华锐	SL1.5/82	1.5	3	10.5	20	82.00	5 281	65
2	华锐	SL1.5/82	1.5	3	10.5	20	82.00	5 281	70
3	金风科技	GW82/1.5	1.5	3	10.3	22	82.00	5 281	70
4	金风科技	GW82/1.5	1.5	3	10.3	22	82.00	5 281	85
5	联合动力	UP86	1.5	3	10.0	25	86.09	5 820	65
6	联合动力	UP82	1.5	3	10.5	25	82.76	5 384	65
7	联合动力	UP86	1.5	3	10.0	25	86.09	5 820	80
8	湘电风能	XE93-2.0	2.0	3	10.5	25	93.40	6 852	70
9	湘电风能	XE93-2.0	2.0	3	10.5	25	93.40	6 852	80
10	东方电气	FD82A	1.5	3	10.5	25	82.00	5 281	70

该风电场总装机容量为 49.5 MW,当选用机型容量为 1.5 MW 时,需要安装台数为 33 台;当选用机组容量为 2.0 MW 时,需要安装台数为 25 台。根据式(4)和式(15)分别计算出不同型号机组的年理论发电量和容量系数,结果见表 4。

表4 不同机型的年理论发电量和容量系数

Table 4 Calculated values of capacity factor and annual power generation of different models

序号	$P_r/\text{MW}$	$h/\text{m}$	台数	年理论发电量/(MW·h)	CF
1	1.5	65	33	221 024	0.511 5
2	1.5	70	33	226 268	0.517 4
3	1.5	70	33	232 442	0.532 9
4	1.5	85	33	233 841	0.549 1
5	1.5	65	33	234 788	0.544 9
6	1.5	65	33	222 387	0.517 8
7	1.5	80	33	241 718	0.562 9
8	2.0	70	25	230 323	0.524 4
9	2.0	80	25	231 795	0.536 1
10	1.5	70	33	228 017	0.524 4

由表 3~4 可知,在这 10 种机型中,联合动力 UP86 的切入风速为 3 m/s,额定风速为 10 m/s,切出风速 25 m/s,塔架高度为 80 m,其容量系数最大,为 0.562 9。这说明此机型能更好地利用该地区的风能资源,因此,该风电场可选择此种机型。

为了更加直观地看出容量系数与年理论发电量的关系,绘制了两者的关系图,如图 3 所示。由图 3 可知,容量系数和年理论发电量的相关系数为 0.909。这说明两者具有良好的线性正相关关系,因此,可近似认为两者之间是线性关系。由容量系数的定义可知,年理论发电量越大,风电机组的容量系数也越大。这就论证了笔者建立的计算容量系数 CF 数学模型是可行的。

#### 4 结 论

笔者根据风电场风速 Weibull 分布函数和风力发电机组输出特性的二次函数,建立了容量系数的数学模型。同时,根据某风电场的风资源数据,通过容量系数这一性能指标进行了理论分析,可以得出以下

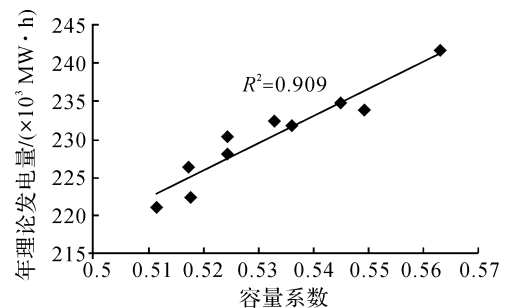


图3 容量系数与年理论发电量的关系

Fig. 3 Relationship between capacity factor and power generation in theory

结论:当单机容量一定时,容量系数越大,风力发电机组理论发电量越大;当额定功率、切入风速、额定风速、切出风速一定时,塔架高度越高容量系数也越大;当额定功率、切入风速、切出风速一定时,额定风速越大则容量系数越小。

#### 参考文献:

- [1] 卢为平. 风力发电基础[M]. 北京:化学工业出版社,2011.
- [2] 宋亦旭. 风力发电机的原理与控制[M]. 北京:机械工业出版社,2012.
- [3] 李远. 基于风能资源特征的风电机组优化选型方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2008.
- [4] 易雯岚. 风电机组选型及风电场优化设计研究[D]. 北京:华北电力大学,2010.
- [5] ALBADI M H, EL-SAADANY E F. Wind turbines capacity factor modeling: a novel approach [J]. IEEE Transactions on Power Systems,2009,24(3):1637.
- [6] HUANG S J, WAN H H. Enhancement of matching turbine generators with wind regime using capacity factor curves strategy[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2009,24(2):551.
- [7] 张旭乐. 风力机优化选型在风电场建设中的经济性研究[D]. 长沙:湖南大学,2011.
- [8] 杨星光. 基于容量系数的风力发电机组选型研究[D]. 长沙:湖南大学,2012.
- [9] CHANG T P, LIU F J, KO H H, et al. Comparative analysis on power curve models of wind turbine generator in estimating capacity factor[J]. Energy,2014,73(7):88.
- [10] LYDIA M, KUMAR S S, SELVAKUMAR A I, et al. A comprehensive review on wind turbine power curve modeling techniques[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2014,30(2):452.
- [11] 杨旭华,薛文亮,包玲玲. IEC 标准在风机实际功率曲线测定中的应用[J]. 电网与清洁能源,2012,28(5):87.
- [12] NIMBAL J, NAIK R L, JANGAMSHETTI S H. Wind data analysis: a case study[C]//International Conference on Power, Signals Controls and Computation. Thrissur: EPSCICON,2012.
- [13] FAHMY A A. Using the bees algorithm to select the optimal speed parameters for wind turbine generators[J]. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences,2012,24(1):17.
- [14] AYODELE T R, JIMOH A A, MUNDA J L, et al. Wind distribution and capacity factor estimation for wind turbines in the coastal region of South Africa[J]. Energy Conversion and Management,2012,64(4):614.
- [15] 王佳宇. 基于风能资源特征的风力发电机组选型研究[D]. 保定:华北电力大学,2012.
- [16] 华荣芹. 基于风资源评估的风力机选型的研究[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2014.
- [17] 华荣芹,张新燕,胡立锦. 基于风资源评估的风电机组设计风速分析[J]. 广东电力,2014,27(2):26.
- [18] 严彦,许昌,刘德有,等. 测风数据的时间间隔对风速概率分布参数计算的影响[J]. 可再生能源,2011,29(6):24.
- [19] 龚伟俊,李为相,张广明. 基于威布尔分布的风速概率分布参数估计方法[J]. 可再生能源,2011,29(6):20.
- [20] 潘慧慧. 风电场风力发电机组选型的研究[D]. 上海:上海电力学院,2013.
- [21] BELABES B, YUCEFI A, GUERRI O, et al. Evaluation of wind energy potential and estimation of cost using wind energy turbines for electricity generation in north of Algeria[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 51:1245.