



关于风电叶片长度的设计及影响因素

赵萍¹ 钟贤和¹

(1.东方汽轮机有限公司,四川 德阳 618000)

[摘要] 论证了风电叶片的长度选取方法,并且分析了海拔高度和风资源对叶片长度的影响,指出风电叶片的长度设计必须进行收益和成本的比较。

[关键词] 风力机;风电叶片长度;海拔高度

中图分类号:TK83 文献标识码:A 文章编号:CKN字 07-005(2009)04-024-04

Design and Effect Factors of the Length of Wind Turbine Blade

ZHAO Ping¹ ZHONG Xian-he¹

(1.DongFang Steam Turbine Works Ltd., Deyang, Sichuan 618000)

Abstract: This article demonstrates the selection of the length of the blade, and analyzes the effect of the height above sea level and wind resource to get the conclusion that the design of the length of wind turbine blade must be set in comparison of profit and cost.

Keyword: wind turbine; the length of blade; height above sea level

1 前言

风力机是一种吸取能量的装置。当具有一定速度即具有一定动能的

气流经过风力机叶片时,驱动风力机叶片,并带动发电机发电,因此,风电叶片是风力机能量转化的重要设备,它的设计是非常重要的。叶片长度直接决定风机的单位功率的选取,同时决定着叶片材料的使用量即材料的成本,如何最有效的利用当地的风资源并且降低制造成本,除了设计气动效率高的叶片同时必须对风资源与发电量对比,才能得到比较合适的叶片长度。

2 风机能量转化原理

当控制体内一定质量的气流以 V_w 流速流过风力机时,根据能量守恒定律,假定气流流体在控制体内在定常流动的条件下,热力学第一定律的一般形式为:

$$\frac{Dq}{dt} = \frac{Di}{dt} + \frac{D}{dt} \left(\frac{V_w^2}{2} \right) + \frac{Dh_u}{dt} \quad (1)$$

这里:

Dq/dt ——单位时间内,单位质量流体从控制体外所接受的热量;

Di/dt ——流体单位质量气体的焓变化率(即内能的变化);

$D(V_w^2/2)/dt$ ——流域控制体内单位质量气体的动能变化率;

Dh_u/dt ——在牵连运动(流体本身的运动)中,单位时间内,单位质量流体对外界所做的功。

风力机处在自然界中,从风能中吸取能量,对于流经风力机的空气没有固体边界,没有热源,没有热能的交换,没有温度的变化即内能没有变化;

$$\text{即: } \frac{Dq}{dt} = 0; \frac{Di}{dt} = 0;$$

$$\text{因此,能量方程变为 } \frac{D}{dt} = \left(\frac{V_w^2}{2} \right) + \frac{Dh_u}{dt} = 0, \text{即}$$

$$\frac{V_w^2}{2} + h_w = \text{const} \rightarrow \quad (2)$$

从上式可以看到风力机就是将空气的动能转化成旋转机械能。

假定气流为不可压缩的均匀定常流,根据质量守恒定理, $G = \rho AV_w$, 即

$$\frac{dp}{\rho} + \frac{dV_w}{V_w} + \frac{dA}{A} = 0 \quad (3)$$

这里:

G 为流过风力机的空气质量;

ρ 为空气密度;

A 为空气流经横截面积;

V_w 为流速。

空气经过风轮后,密度近似没有变化 ρ 为常数,则 $\frac{dV_w}{V_w} + \frac{dA}{A} = 0$, 即当来流接近风轮后,速度逐渐降低,流动面积逐渐增加,空气压力逐渐增加,将动能转变成压力能;当气流经过风轮后,压力能转变成旋转机械能后,压力下降,气流速度减小,面积

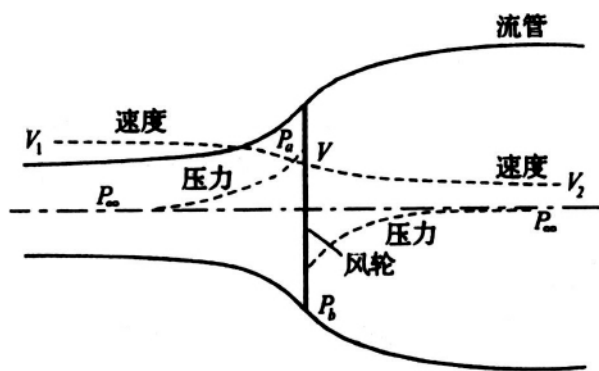


图 1 风经过风力机的压力和风速的变化

增加,同时由于尾流损失的存在使部分动能转化成压力能使压力与远处大气压相等,如图 1 所示气流参数的变化规律。

由式(2)可知,风轮吸收的能量(即风轮轴功率)等于风轮前、后气流动能之差(V_1 和 V_2 为风轮前后的气流速度):

$$W = \frac{1}{2} (v_1^2 - v_2^2) = \frac{1}{2} \rho AV_1 (V_1^2 - V_2^2) \quad (4)$$

这里 V_t 为气流经过风轮的速度,根据动量理论:

$$T = \rho AV (V_1 - V_2) \quad (5)$$

而作用在风轮上的推力又是由于风轮前后压差引起的,即根据伯努利方程:

$$\frac{1}{2} \rho V_1^2 + P_1 = \frac{1}{2} \rho V_t^2 + p_a \text{ (风轮前)} \quad (6)$$

$$\frac{1}{2} \rho V_2^2 + P_2 = \frac{1}{2} \rho V_t^2 + p_b \text{ (风轮后)} \quad (7)$$

P_1 和 P_2 为风轮前和风轮后较远距离的压力,这

里有 $P_1 = P_2 = P_0$ 。

风轮上的轴向推力又为

$$T = P_a - P_b = \frac{1}{2} \rho A (V_1^2 - V_2^2) \quad (8)$$

由式(5)和式(8)两式可以得到:

$$V_t = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (9)$$

从而得到风力机的轴功率为:

$$W = \frac{1}{2} \rho AV_1^3 \left(\frac{1}{2} - \frac{V_2}{2V_1} \right) \left(1 + \frac{V_2}{V_1} \right)^2$$

$$\text{定义 } C_p = \frac{W}{\frac{1}{2} \rho AV_1^3} = \left(\frac{1}{2} - \frac{V_2}{2V_1} \right) \left(1 + \frac{V_2}{V_1} \right)^2 \quad (10)$$

C_p 为能量系数,它与攻角 β 和叶尖速比 λ 有关,理论上当 $V_2/V_1 = 1/3$ 时,上式有极值 $C_{p_{opt}} = 16/27 \approx 0.593$ 。

3 叶片长度的选取

从来流的风能到电机端输出功率,中间要经过空气动力、传动链、电机的转化。则电机端实际输出功率为:

表 1 与风能转换有关的变量

序号	符号	含义	单位	取值	备注
1	W	风轮输出功率	W		用户需求
2	ρ	空气密度	kg/m ³	1.225	与海拔有关
3	v	额定风速	m/s		与地区风况有关
4	R	风轮半径	m		决定叶片的长度
5	C_p	风轮功率系数	/	0.43~0.45	与叶片设计及运行有关
6	η_1	传动链的效率	/	0.92	主要是齿轮箱和轴承引起
7	η_2	电机效率	/	0.95	一般情况

$$W = 1/2 C_p \rho v^3 R^2 \pi \eta_1 \eta_2 \quad (11)$$

式中的各变量的含义见表 1。

从式(11)和表 1 可以看出,风机的输出功率与风轮直径、海拔高度、能量利用系数、传动链的效率及电机效率有关。那么功率与风轮面积的比值即功率密度为:

$$W/(R^2 \pi) = 1/2 C_p \rho v^3 \eta_1 \eta_2 \quad (12)$$

一般情况下,额定功率下传动效率和电机效率都是已知的, $C_p(\beta, \lambda)$ 在额定功率下约取 0.45,而额定风速一般按照平均风速的 1.7 倍选取。因此,对于标准条件,功率密度仅与风速等级有关。根据风速等级和功率就可以初步选定叶片长度,表 3 列出部分国外厂商及我公司叶片的功率密度。

从表 2 可知,不同的风速等级,拥有不同的选取范围。高风速一般取 450~500W/m² (包括海上风机),低风速区取 300~350W/m²,中等风速一般取

表2 部分风电叶片的额定功率密度(单位 W/m²)

功率及直径		IEC IA	IEC IIA	IEC IIIA	备注
1MW	EU64			311	EUROS
	EU60		353		EUROS
	EU56		406		EUROS
	EU53		454		EUROS
1.5MW	DF70		390		DTC
	DF77			322	DTC
2.5MW	DF100			318	DTC
	DF91.3		382		DTC
3MW	V90	471			Vestas
	V100		382		Vestas
5MW	126.5		398		
一般范围		500~450	450~350	350~300	

350~450W/m²。

在风机运行过程中, $C_p(\beta, \lambda)$ 是变化的。实际运行的 $C_p(\beta, \lambda)$ 与叶片的设计和风机运行的控制有关。目前最佳的 C_{popt} 基本能达到 0.5, 一般能达到 0.48~0.49。当叶片设计定型以后, 对应最佳叶尖

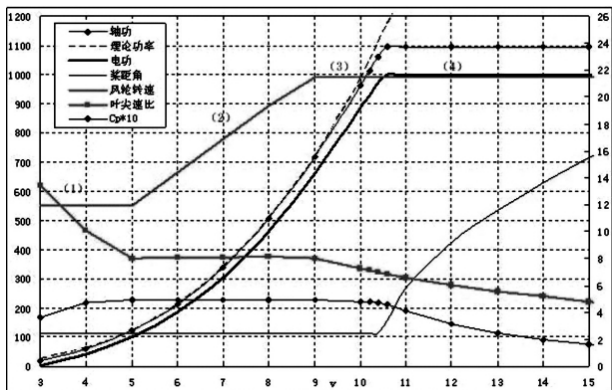


图3 某风力机运行曲线

速比有最大的能量系数。下图是某机组的运行曲线。

对于变频发电机, 电机有一定的转速运行范围(比如 1000~1800rpm)。以图 3 为例, 叶片在运行过程中分成四个阶段 (1)高叶尖速比阶段 (2)最佳叶尖速比阶段 (3)非最佳叶尖速比阶段 (4)功率限制段。当风速很低时, 电机在转速低限范围运行, 此时叶尖速比比较大, 能量系数较低; 当风速增加到第(2)阶段时, 转速随风速增加而增加并且使叶片以最佳叶尖速比运行(此时叶尖速比保持不变), 此时有最高的能量系数, 功率随风速增加但功率还没有达到额定功率。随着风速增加, 风机过渡到第(3)阶段, 此时当转速达到电机的最大转速后, 此时功率没有达到额定功率, 随着风速增加, 转速不再增加, 叶尖速比逐渐从最佳叶尖速比减小, 能量系数也随着减小, 但功率还在增加, 只是效率降低, 见图中虚线和

红线之间部分, 随着风速增加直到额定功率, 从而进入第(4)阶段。当风速大于额定风速以后, 功率受到限制, 通过变桨改变气动力保持额定功率。也就是说在第(1)、第(2)、第(3)区段运行, 其他的条件相同, 叶片越长获得的功率越多, 当运行在第(4)区段则叶片长度则没有任何优势, 多产生的能量也浪费掉。

4 海拔高度和风速对叶片长度的影响

由式(12)可以得到风轮的半径:

$$R = (W / (1/2 C_p(\beta, \lambda) \rho v^3 \eta_1 \eta_2 v^3 \pi))^{0.5} \quad (13)$$

从上式可以看出当功率一定时, 如果能量转换效率相同, 则叶片长度与密度和风速密切相关。

4.1 海拔高度对长度的影响

从式(13)可知, 叶片的直径与当地的空气密度的平方根成反比。

根据气体状态方程式可知空气密度与海拔高度的关系为:

$$\rho_H = \rho_0 (1 - \alpha H / T_0)^{2.6} \quad (14)$$

式中 ρ_H ——海拔高度为 H 时的空气密度;

ρ_0 ——标准状态下空气密度, 海平面在摄氏零度气温条件下空气的密度是 1292 g/m³;

H——海拔高度(m);

T_0 ——绝对温度, 为 273 K;

α ——空气温度梯度, 约为 0.0065 kg/m。

例如西昌市海拔高度为约 1500m, 其空气密度为 1.107kg/m³, 那么风轮直径就是按照标准情况下(一般取 1.225kg/m³)设计的 1.05 倍, 因此对于海拔高度较高的风场必须增加叶片长度, 否则按照标准条件设计的风力机在额定风速下将无法达到额定功率, 与设计产生很大差别。

4.2 风速分布对长度的影响

风速与叶片的长度即风轮半径是否合理取决于当地的风资源, 叶片是在低风速的情况下运行的多, 还是在大于额定风速的运行的时间长。因为只有叶片处于限制功率阶段, 叶片的长度是没有起到作用。如果在某处建立风场需要准确评估某地区的风能资源, 必须要有平均风速概率分布的资料。图 4

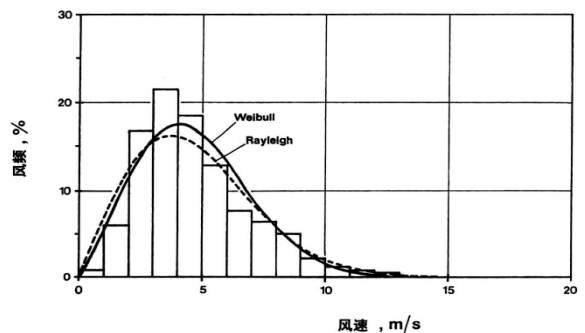


图4 某地实测的平均风速概率分布与威布尔和瑞利分布的对比

是某地的平均风速的概率分布曲线与威布尔和瑞利分布的对比。如果没有当地的风资源实测数据,一般采用瑞利分布进行评估。

从图 4 可知,一般的 3~6 米/秒的风速占的概率较大,高风速占的概率非常少。

从式(11)和图 4 中分析可以得出:当低于额定风速时,较长的叶片可以获取更多的能量,当风速达到额定风速后,多余的能量则无用。对于在限制功率阶段,那么叶片越长,同样的能量系数,则获得的有效功率越少,但是根据瑞丽的概率分布,在一年当中超过额定风速的时间非常有限,表 3 是三种长度的叶片年发电量的对比。

2 上网电价按 0.3 元/度计算。

表 3 某地区三只不同长度叶片的年发电量对比

叶片	Cp(opt)	电机转速	额定风速	年发电量	收益增加
m	/	rpm	m/s	万度	万元/年
29.1	0.492	1000~1800	11.5	339	0
30.2m	0.492	1000~1800	11	355	4.8
31m	0.493	1000~1800	10.5	365	7.8

注:1 采用瑞利风速分布,风机的利用率为 95%,额定功率为 1MW。

从表 2 可知,同样的额定功率,叶片越长,额定风速越低,低风速获得的功率越多,年发电越多,收益越明显。

当然叶片越长,所用材料增加,成本可能会增加。风电叶片材料的使用与叶片的成本密切相关,而材料使用的多少又与叶片的翼型、弦长分布和长度有密切关系。如果叶片的翼型与弦长分布基本一致,叶片越长使用的材料越多,成本相应增加,但是根据以上分析,叶片长度加长,年发电量增加,因此,必须进行完整的方案比较论证,才能确定叶片的最佳长度。

5 结论

对于风电叶片,单从叶片长度还无法判断叶片的优劣,必须进行方案对比。但对于从上面分析可知除了与气动效率及能量转换效率有关,同时叶片的长度与当地的风资源和海拔高度有密切关系,因此对于叶片的长度必须进行性价比分析,才能确定比较合理的风轮直径。

[参考文献]

- [1] 贺德馨等.风工程与工业空气动力学[M].北京:国防工业出版社,2006.
- [2] 秦仁.透平机械原理[M].北京:机械工业出版社,1981.
- [3] Tong burton 等.武鑫等译.风能技术[M].北京:科学出版社,2007.
- [4] 刘万琨等.风能与风力发电技术[M].北京:化学工业出版社,2007.