

- 基础知识
- 设计方法
- 施工技术
- 维护技能

离网风力发电系统 设计与施工

周志敏 纪爱华 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



离网风力发电系统 设计与施工

周志敏 纪爱华 等 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书结合我国“十二五”新能源开发利用规划与国内外离网风力发电技术的发展动态及最新应用技术,以从事离网风力发电系统设计、施工及维护人员为读者对象,系统、全面地讲解了在离网风力发电系统设计及施工中必备的基础知识和必须掌握的设计方法、施工技术及维护技能。书中选取国内离网风力发电系统的典型设计、安装、维护实例,以供读者在实际的设计、施工、维护工作中参考。

全书共分5章,包括风力发电基础知识,离网风力发电系统蓄能装置,离网风力发电控制器及逆变器,离网风力发电系统工程设计,离网风力发电系统安装、调试、维护及故障处理。

本书题材新颖实用,内容丰富,深入浅出,文字通俗,具有很高的实用价值。本书是从事离网风力发电技术研发、设计、施工、维护的工程技术人员与管理人士的必备读物。也可供高等院校、职业技术学院相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

离网风力发电系统设计与施工/周志敏等编著. —北京:中国电力出版社,2012.9

ISBN 978-7-5123-3518-9

I. ①离… II. ①周… III. ①风力发电系统-系统设计②风力发电装置-设备安装 IV. ①TM614

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第224686号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2013年1月第一版 2013年1月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 12.625印张 341千字

印数 0001—3000册 定价 26.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前言

能源与环境问题已成为人类社会可持续发展面临的主要问题，正日益引起国际社会的广泛关注。风能作为一种重要的可再生能源，具有清洁、无污染、安全、储量丰富的特点，受到世界各国的普遍重视。自《中华人民共和国可再生能源法》颁布实施以来，包括太阳能、风能、生物质能等在内的可再生能源利用事业进入了新的历史发展时期。《中华人民共和国可再生能源法》中明确规定“国家扶持在电网未覆盖的地区建设可再生能源独立电力系统，为当地生产和生活提供电力服务”，这为我国可再生能源利用事业的进一步发展指明了方向。

我国政府一直把研究、开发、利用风能技术列入国家科技攻关计划，进入21世纪，我国风能技术在研究、开发、商业化生产、市场开拓等方面都获得了长足的发展，现已成为高速、稳定发展的朝阳产业。风力发电技术是具有广泛发展前景和影响力的一项高新技术，目前，风力发电技术的研发、设备的生产，系统集成、工程设计、施工运行已形成完整的产业链。

目前，随着人们对离网风力发电技术认识的提高和离网风力发电技术的不断成熟，离网风力发电技术的应用领域也越来越广泛。目前，离网风力发电系统广泛应用于电网无法覆盖的边远山区、牧区及通信基站、气象站、高速公路/铁路监控、森林防火等的监测站、部队边防及海岛哨所、航标灯、油田等领域。

离网风力发电技术是一个崭新的能源技术，在我国的发展时间不长，从设计人员到施工及运行人员，都有许多急需解决的实用技术问题。为此，本书紧紧围绕我国“十二五”新能源开发利用的方针和宗旨，将离网风力发电技术的基础知识、离网风力发电设备、设计方法、典型应用实例和施工、维护技术有机结合，在保证科学性的同时，尽量做到有针对性和实用性，并注重通俗性，是从事离网风力发电系统设计、开发、施工和维护的工程技术人员必备参考书，读者可结合书中的典型应用实例的设计思路和设计方法，灵活地将其应用到离网风力发电系统的实际设计工作中去。

参加本书编写工作的有周志敏、纪爱华、周纪海、刘建秀、顾发娥、纪达安、刘淑芬、纪达奇、纪和平等，本书在写作过程中，无论从资料的收集和技术

信息交流上都得到了国内的专业学者和风力发电设备制造商的大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于时间仓促，水平有限，不当之处在所难免，敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前言

第1章 风力发电基础知识	1
1.1 风力发电系统	1
1.1.1 风力发电技术	1
1.1.2 我国风能资源	6
1.1.3 风力发电技术划分与系统构成	10
1.2 风力机及风力发电机	16
1.2.1 风力机分类及输出特性	16
1.2.2 风力发电机分类及输出功率	19
1.2.3 小型风力发电机	23
第2章 离网风力发电系统蓄能装置	34
2.1 蓄电池的分类及工作原理	34
2.1.1 蓄电池的分类及技术指标	34
2.1.2 蓄电池的工作原理	39
2.1.3 蓄电池的特性	42
2.2 VRLA 蓄电池的充放电特性	45
2.2.1 VRLA 蓄电池的充电特性	45
2.2.2 VRLA 蓄电池的放电特性	49
2.3 胶体铅酸蓄电池	50
2.3.1 胶体铅酸蓄电池的结构及优缺点	50
2.3.2 胶体铅酸蓄电池电解质的特征与特性	53
2.3.3 胶体铅酸蓄电池与 AGM-VRLA 蓄电池的比较	54
2.4 蓄电池的正确使用与维护	57
2.4.1 蓄电池的正确使用	58
2.4.2 蓄电池的维护	61
第3章 离网风力发电控制器及逆变器	64
3.1 离网风力发电控制器	64
3.1.1 离网风力发电控制器工作原理	64

3.1.2	PH-M1-M3000-L-V3 离网型风力发电控制器	75
3.2	离网风力发电系统逆变器	78
3.2.1	离网风力发电系统对逆变器的要求及分类	78
3.2.2	逆变器基本电路	83
3.2.3	电流型逆变电路	86
3.3	逆变器控制技术	88
3.3.1	PWM 调制技术	88
3.3.2	电流型控制技术	90
3.3.3	逆变器的消谐控制技术	91
3.4	离网风力发电逆变器设计要点	93
3.4.1	离网风力发电系统逆变器特性	93
3.4.2	逆变器主电路及控制电路	95
第4章	离网风力发电系统工程设计	100
4.1	离网风力发电系统工程设计方法	100
4.1.1	离网风力发电系统的集成设计	100
4.1.2	蓄电池容量的计算	105
4.1.3	控制器及逆变器选择	108
4.1.4	离网风力发电系统设计实例及典型配置方案	110
4.2	离网风力发电系统的电气工程设计	117
4.2.1	低压配电系统	117
4.2.2	离网风力发电配电系统设计要点	121
4.3	离网风力发电系统的防雷接地设计	130
4.3.1	离网风力发电系统的防雷设计	130
4.3.2	离网风力发电系统的接地设计	142
第5章	离网风力发电系统安装、调试、维护及故障处理	150
5.1	风力发电机选址及地基要求	150
5.1.1	风力发电机选址	150
5.1.2	风力发电机基础要求	154
5.2	风力发电系统安装及调试	155
5.2.1	风力发电机安装	155
5.2.2	单体珩塔架风力发电机安装	163
5.2.3	蓄电池和电气部分安装及线路连接	167
5.2.4	风力发电系统调试及操作	169
5.3	风力发电系统维护及故障处理	172
5.3.1	风力发电系统维护	172
5.3.2	风力发电机故障分析及处理	175
5.3.3	蓄电池故障分析及处理	179
参考文献		196



第1章 风力发电基础知识

1.1 风力发电系统

1.1.1 风力发电技术

1. 风的形成

风是一种自然现象，地球表面的空气水平运动称之为风，风是地球外表大气层由于太阳的热辐射而引起的空气流动。太阳辐射对地球表面不均匀性加热是形成风的主要原因，太阳对地球的辐射是透过厚厚的大气层后到达地球表面的，地球表面各处（海洋和陆地，高山岩石和平原土壤，沙漠、荒原和植被、森林地区）吸收热量不同。由于地球自转、公转、季节、气候的变化和昼夜温差的影响，使地表各处散热情况也各不相同，散热多的地区靠近地表的空气受热膨胀，压力减少，形成低气压区，这时空气从高压区向低气压区流动，这就产生了风，也就是说风能最终还是来自于太阳能。

地形、地貌的差异，地球自转、公转的影响，都会加剧空气流动的力量和流动方向的变化，使风速和风向的变化更加复杂。简单地说，太阳的辐射造成地球表面受热不均，引起大气层中压力分布不均，从而使空气沿水平方向运动形成风，风的形成就是空气流动的结果。

据估计，在到达地球的太阳能中，虽然只有大约 2% 转化为风能，但其总量仍是十分可观的。地球上全部风能估计为 $2 \times 10^{17} \text{ kW}$ ，其中，可利用的约为 $2 \times 10^{10} \text{ kW}$ ，这个能量是相当大的，是地球上水能的 10 倍。因此也可以说风能是一种取之不尽、用之不竭的可再生能源。

2. 风的种类

(1) 贸易风。在地球赤道上，热空气上升，分为流向地球南、北两极的两股强力气流，在纬度 30° 附近，这股气流下降，并分别流向赤道与两极。在接近赤道地区，由于大气层中大量的空气环流，形成了固定方向的风，自古以来，人们利用这种定向风开展海上远洋贸易，所以称为贸易风。由于地球自西向东旋转的结果，贸易风向西倾斜，此时北半球产生东北风，而南半球则产生东南风。

(2) 旋风和反旋风。由地球南北两极流向赤道的冷空气气流与由赤道流向两极的热空气气流

相遇处（在纬度 $50^{\circ}\sim 60^{\circ}$ 附近）构成了涡流运动，形成旋风和反旋风。

(3) 地区性风。由于地形的差异（如陆地、海洋、山岳、森林、沙漠等不同地形），使空气在同一纬度上受到程度不同的加热，因而产生了地区性风。白天山坡受热快，温度高于山谷上方同高度的空气温度，坡地上的暖空气从山坡流向谷地上方，谷地的空气则沿着山坡向上补充流失的空气，这时由山谷吹向山坡的风称为谷风。夜间，山坡因冷却降温速度比同高度的空气快，冷空气沿坡地向下流入山谷，称为山风。山谷能改变气流运动的方向，还能使风速增大，而丘陵、山地会因为摩擦而使风速减小，孤立的山峰会因海拔高而使风速增大。

(4) 轻风。由于昼夜之间的温度变化而产生的沿海岸风称为轻风，在有太阳时，陆地所接收的热量较海洋强烈，因而陆地上空的空气较轻，于是陆地上空的空气向上升，冷空气力图自海洋流向沿岸陆地，于是产生了海风。陆地上的热空气则流向海洋，到离海岸某一距离处下降。而在夜间，陆地上的空气比海洋上的空气冷却更快，因此，陆地上的下层空气流向海洋，而上层空气则由海洋流向陆地，形成与白昼相反的风向，称为陆地风。轻风方向的更换决定于地形条件。海风通常自上午 9~10 时开始，陆地风则在日落以后开始。轻风仅在沿海岸才遇到，流动的距离约为在海洋和陆地两方各 40km 之间。

(5) 季节风。陆地上每年的温度变化较海洋大，同样也引起与轻风相似，但具有季节性的气流循环，它的强度大于轻风的气流循环强度，这种风称为季节风。

(6) 平原和山岳风。山岳地区在一昼夜间有周期性的风向变换，与轻风相似，平原风每日上午自 9~10 时至日落沿山岳的坡度向高处流动，在夜间则与此相反，气流自山岳流向平原，形成山岳风。如果平原处于海岸处，则会引起特别强劲的风，因在夜间，山岳风被陆地风增强了，而在日间，平原风被海风增强。夜间的山岳风是由于山顶的冷空气具有较大密度，于是流向平原，形成夜间山岳风。平原风的产生则是由于日照山岳斜面上的空气较平原上的空气热，因此地势低处的空气膨胀，引起空气流动。

3. 风的变化

(1) 风随时间变化。在一天内，风的强弱是随机变化的。在地面上，白天风大，而夜间风小；相反，在高空中却是夜间风大，白天风小。在沿海地区，由于陆地和海洋热容量不同，白天产生海风（从海洋吹向陆地）；夜间产生陆地风（从陆地吹向海洋）。在不同的季节，太阳和地球的相对位置也发生变化，使地球上存在季节性温差，因此，风向和风的强度也会发生季节性变化。在我国，大部分地区风的季节性变化规律是：春季最强，冬季次强，秋季第三，夏季最弱。

(2) 风随高度变化。由于空气的黏性和地面摩擦的影响，风速随高度的变化因地面的平坦度、地表粗糙度以及风通道上的气温变化不同而异。特别是受地表粗糙度的影响程度最大。从地球表面到 10 000m 高空层内，空气的流动受到涡流、黏滞和地面摩擦等因素的影响，风速随着高度的增加而增大。通过实验，常用的计算风速随高度变化的公式如下。

指数公式

$$v = v_1 (h/h_1)^n \quad (1-1)$$

对数公式

$$v = v_1 (\lg h/h_0) / \lg(h_1/h_0) \quad (1-2)$$

式中： v_1 为高度为 h_1 的风速； h_1 为高度（一般为 10m）； v 为待测高度 h 处的速度； h 为待测点离地高度； h_0 为风速为零的高度； n 为指数，取决于地面的平整度（粗糙度）和大气的稳定度，取值范围为 $1/8\sim 1/2$ 。在开阔、平坦、稳定度正常的地区， n 值取 $1/7$ 。粗糙度大的大城市常取 $1/3$ ，一般上下风速差较小时 n 较小，反之 n 值大。

(3) 风变化的随机性。自然风是一种平均风速与激烈变动的瞬间紊乱气流相重合的风, 气流紊乱主要与地面的摩擦有关, 除此之外, 当风速与稳定层垂直分布时会产生重力波, 在山风下侧也会产生山岳波。这种紊乱气流不仅影响风速, 也明显影响风向。如果按时间区分, 可将风向的变化区分为以下几种。

- 1) 一年或一个月内风向的趋势。
- 2) 短时间内变动的紊乱气流。
- 3) 介于两者之间的平均风向。

对于第一种风向的变化状况, 如制成风向玫瑰图(风向频度), 便可清楚地看出风向的大致趋势, 如图 1-1 所示。对于风速, 一般采用年平均风速时间曲线(表示某一地方一年中各种风速的小时数)来进行记录, 如图 1-2 所示。

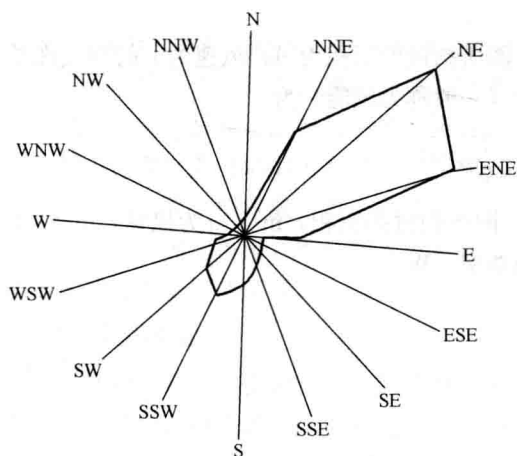


图 1-1 风向玫瑰图

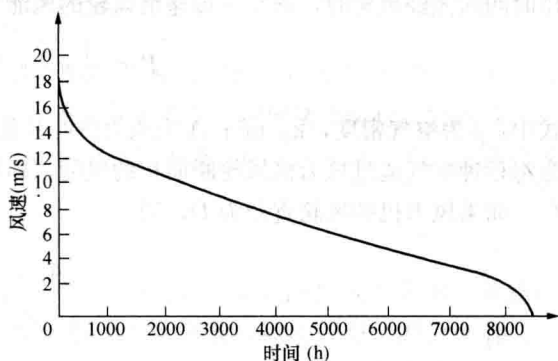


图 1-2 年平均速度时间曲线

4. 风的特性

风作为一种自然现象有它本身的特性。通常采用风速、风频等基本指标来表述。

(1) 风速。风的大小常用风的速度来衡量, 风速是单位时间内空气在水平方向上移动的距离。专门测量风速的仪器有旋转式风速计、散热式风速计和声学风速计等。风速的单位常以 m/s 、 km/h 、 mile/h 等来表示。例如空气在 1s 内运动了 3m , 那么风速就是 3m/s 。由于风是不断变化的, 通常所说的风速是指一段时间内各瞬时风速的算术平均值, 即平均风速。

(2) 风频。风频分为风速频率和风向频率。

1) 风速频率: 各种速度的风出现的频繁程度。对于风力发电的风能利用而言, 为了有利于风力发电机平稳运行, 便于控制, 希望平均风速高、风速变化小。

2) 风向频率: 各种风向出现的频繁程度。对于风力发电的风能利用而言, 总是希望某一风向的频率尽可能地大。

5. 风能

风能就是空气的动能, 是指风所负载的能量, 风能的大小决定于风速和空气的密度。风的能量是由太阳辐射能转化来的, 太阳每小时辐射到地球的能量是 174423000000000kW , 换句话说, 地球每小时接收了约 $1.74 \times 10^{17}\text{W}$ 的能量。风能大约占太阳提供总能量的 $1\% \sim 2\%$, 太阳辐射能量中的一部分被地球上的植物转换成生物能, 而被转化的风能总量大约是生物能的 $50 \sim 100$ 倍。著名的风能公式如下

$$E = 1/2(\rho \times t \times S \times v^3) \quad (1-3)$$

式中: ρ 为空气密度, kg/m^3 ; v 为风速, m/s ; t 为时间, s ; S 为截面面积, m^2 。

它是风能利用中常要用到的公式。由风能公式可以看出, 风能主要与风速、风所流经的面积、空气密度三个因素有关, 其关系如下。

(1) 风能 E 的大小与风速的立方 v^3 成正比, 也就是说, 影响风能的_{最大}因素是风速。

(2) 风能 E 的大小与风所流经的面积 S 成正比, 对于风力发电机来说, 就是风能与风力发电机的风轮旋转时扫过的面积成正比。由于通常用风轮直径作为风力发电机的主要参数, 所以风能大小与风轮直径的平方成正比。

(3) 风能 E 的大小与空气密度 ρ 成正比, 空气密度是指单位体积 (m^3) 所容纳空气的质量 (kg)。因此, 计算风能时, 必须要知道空气密度 ρ 值。 ρ 值与空气的湿度、温度和海拔高度有关, 可以从相关的资料中查到。

空气运动具有动能, 如果风力机风轮叶片旋转一圈所扫过的面积为 A , 风速为 v 的空气在单位时间内流经风轮时, 该空气传递给风轮的风能功率 (一般称为风能) 为

$$P = \frac{1}{2} \rho v^2 \cdot A v = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1-4)$$

式中: ρ 为空气密度, kg/m^3 ; A 为风力机叶片旋转一圈所扫过的面积, m^2 ; v 为风速, m/s ; P 为每秒钟空气流过风力机风轮断面积的风能, 即风能功率, W 。

如果风力机的风轮直径为 D , 则

$$A = \frac{\pi}{4} D^2 \quad (1-5)$$

则

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 \times \frac{\pi}{4} D^2 = \frac{\pi}{8} \rho D^2 v^3 \quad (1-6)$$

若有效风速时间为 t , 则在时间 t 内的风能为

$$E = P \cdot t = \frac{\pi}{8} \rho D^2 v^3 t \quad (1-7)$$

由上式可知, 风能与空气密度 ρ 、风轮直径的平方 D^2 、风速的立方 v^3 和风持续时间 t 成正比。一般说来, 一定高度范围内的空气密度可以认为是一个常数。因此, 风力机的风轮越大, 有效风速时间越长, 特别是风速越大, 则风力机所能获得的风能就越大。

表征一个地点的风能资源, 要视该地区常年平均风能密度的大小。风能密度是单位面积上的风能, 对于风力机来说, 风能密度是指风轮扫过单位面积的风能, 即

$$W = \rho / A = 0.5 \rho \times v^3 (\text{W/m}^2) \quad (1-8)$$

式中: W 为风能密度, W/m^2 ; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; v 为风速, m/s 。

常年平均风能密度为

$$\bar{W} = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{1}{2} \rho v^3 dt \quad (1-9)$$

式中: $\bar{W}$ 为平均风能密度, W/m^2 ; T 为总的时间, h 。

在实际应用时, 常用式 (1-10) 来计算某地年 (月) 风能密度, 即

$$W_{\text{年(月)}} = \frac{W_1 t_1 + W_2 t_2 + \dots + W_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n} \quad (1-10)$$

式中: $W_{\text{年(月)}}$ 为年(月)风能密度, W/m^2 ; $W_i (1 \leq i \leq n)$ 为各等级风速下的风速密度, W/m^2 ; $t_i (1 \leq i \leq n)$ 为各等级风速在每年(月)出现的时间, h 。

不考虑风力机械的利用系数, 单位面积获得的风功率称为风能密度 (W/m^2), 并以此表征某地风能的大小

$$W = 0.5\rho v^3 \quad (1-11)$$

推动风力机械运转的风能功率 (W) 为

$$P_1 = 0.5\rho v^3 A \quad (1-12)$$

由于实际上风力机械不可能将桨叶旋转的风能全部转变为轴的机械能, 因而风轮的实际功率 (W) 为

$$P = 0.5\rho v^3 A C_P \quad (1-13)$$

式中: C_P 为风能利用系数, 即风轮所接收风的动能与通过风轮扫掠面积 A 全部风的动能比值。

以水平轴风力机为例, 理论上最大风能利用系数为 0.593 左右, 但再考虑到风速变化和桨叶空气动力损失等因素, 风能利用系数能达到 0.4 就相当高了。

风力机要根据当地的风况确定一个风速来设计, 该风速称为“设计风速”或“额定风速”, 它与“额定功率”相对应。由于风的随机性, 风力机不可能始终在额定风速下运行。因此风力机就有一个工作风速范围, 即从切入风速到切出速度, 称为工作风速, 即有效风速, 依此计算的风能密度称为有效风能密度。

6. 风力等级

根据理论计算和实践结果, 把具有一定风速的风 (通常是指 $3 \sim 20\text{m/s}$ 的风) 作为一种能量资源加以开发, 用来做功 (如发电), 把这一范围的风称为有效风能或风能资源。因为风速低于 3m/s 时, 它的能量太小, 没有利用的价值, 而风速大于 20m/s 时, 它对风力发电机的破坏性很大, 很难利用。世界气象组织将风力分为 17 个等级, 在没有风速计的时候, 可以根据它来粗略估计风速。风力等级见表 1-1 和表 1-2。

表 1-1

风力等级 0~12 级

风级	名称	风速 (m/s)	风速 (km/h)	陆地地面物象	海面波浪	浪高 (m)	最高 (m)
0	无风	0.0~0.2	<1	静, 烟直上	平静	0.0	0.0
1	软风	0.3~1.5	1~5	烟示风向	微波峰无飞沫	0.1	0.1
2	轻风	1.6~3.3	6~11	感觉有风	小波峰未破碎	0.2	0.3
3	微风	3.4~5.4	12~19	旌旗展开	小波峰顶破裂	0.6	1.0
4	和风	5.5~7.9	20~28	吹起尘土	小浪白沫波峰	1.0	1.5
5	劲风	8.0~10.7	29~38	小树摇摆	中浪折沫峰群	2.0	2.5
6	强风	10.8~13.8	39~49	电线有声	大浪白沫离峰	3.0	4.0
7	疾风	13.9~17.1	50~61	步行困难	破峰白沫成条	4.0	5.5
8	大风	17.2~20.7	62~74	折毁树枝	浪长高有浪花	5.5	7.5
9	烈风	20.8~24.4	75~88	小损房屋	浪峰倒卷	7.0	10.0
10	狂风	24.5~28.4	89~102	拔起树木	海浪翻滚咆哮	9.0	12.5
11	暴风	28.5~32.6	103~117	损毁重大	波峰全呈飞沫	11.5	16.0
12	飓风	>32.6	>117	摧毁极大	海浪滔天	14.0	—

表 1-2

风力等级 13~17 级

风级	风速 (m/s)	风速 (km/h)
13	37.0~41.4	134~149
14	41.5~46.1	150~166
15	46.2~50.9	167~183
16	51.0~56.0	184~201
17	56.1~61.2	202~220

风所具有的能量是很大的, 风速为 $9\sim 10\text{m/s}$ 的 5 级风吹到物体表面上的力约为 10kg/m^2 ; 风速为 20m/s 的 9 级风吹到物体表面上的力约为 50kg/m^2 ; 风所含的能量比人类迄今为止所能控制的能量要大得多。

7. 风能的优点和局限性

风能是非常重要并储量巨大的能源, 它安全、清洁、充裕。目前, 利用风力发电已成为风能利用的主要形式, 受到世界各国的高度重视, 而且发展速度最快。风能与其他能源相比有明显的优点, 但也有其突出的局限性。

(1) 风能的优点。

1) 蕴藏量大。风能是太阳能的一种转换形式, 是取之不尽、用之不竭的可再生能源。根据计算, 太阳至少还可以像现在一样照射地球 60 亿年左右。

2) 无污染。在风能转换为电能的过程中, 不产生任何有害气体和废料, 不污染环境。

3) 可再生。风能是靠空气的流动而产生的, 这种能源依赖于太阳的存在。只要太阳存在, 就可不断地、有规律地形成气流, 周而复始地产生风能, 可永久持续利用。

4) 分布广泛、就地取材、无须运输。在边远地区, 如高原、山区、岛屿、草原等地区, 由于缺乏煤、石油和天然气等资源, 给生活在这一地区的人民群众带来诸多不便, 而且由于地处偏远、交通不便, 即使从外界运输燃料也十分困难。因此, 利用风能发电可就地取材、无需运输, 具有很大的优越性。

5) 适应性强、发展潜力大。我国可利用的风力资源区域占全国国土面积的 76%, 在我国发展小型风力发电潜力巨大、前景广阔。

(2) 风能的限制性。

1) 能量密度低。由于风能来源于空气的流动, 而空气的密度很小, 因此风力的能量密度很小, 只有水力的 $1/816$ 。

2) 不稳定性。由于气流瞬息万变, 风时有时无、时大时小, 日、月、季、年的变化都十分明显。

3) 地区差异大。由于地形变化, 地理纬度不同, 因此风力的地区差异很大。两个近邻区域, 由于地形的不同, 其风力可能相差几倍甚至几十倍。

1.1.2 我国风能资源

我国的风力资源十分丰富, 仅次于俄罗斯和美国, 居世界第三位, 根据国家气象局气象研究院的估算, 我国 10m 高度层的风能资源总储量为 32.26 亿千瓦, 其中陆地可开发利用的风能资源储量为 2.53 亿千瓦。据估计, 我国近海风能资源约为陆地的 3 倍, 所以, 我国可开发风能资源总量约为 10 亿千瓦, 其中, 陆地上风能储量约 2.53 亿千瓦 (陆地上离地 10m 高度资料计算), 海上可开发和利用的风能储量约 7.5 亿千瓦。

1. 我国风能资源区划

在我国,不同地区风能资源是不同的,我国风能资源可划分为4种类型。

(1) 风能资源丰富区。这一区域的有效风能功率密度在 $200\text{W}/\text{m}^2$ 以上,风速不低于 $3.5\text{m}/\text{s}$ 的时间全年为 $7000\sim 8000\text{h}$ 。

(2) 风能资源较丰富区。这一区域的有效风能功率密度为 $150\text{W}/\text{m}^2$ 以上,风速不低于 $3.5\text{m}/\text{s}$ 的时间全年为 4000h 以上。

(3) 风能资源可利用区。这一区域的有效风能功率密度为 $50\text{W}/\text{m}^2$ 以上,风速不低于 $3.5\text{m}/\text{s}$ 的时间全年为 2000h 以上。

(4) 风能资源欠缺区。这一区域的有效风能功率密度为 $50\text{W}/\text{m}^2$ 以下,风速不低于 $3.5\text{m}/\text{s}$ 的时间全年为 2000h 以下。

2. 可利用的风能

风虽然随处可见,但是也有可利用和不可利用之分,它与风速有直接关系。根据上面风能资源区划,年平均风速小于 $2\text{m}/\text{s}$ 的地区目前是没有利用价值区。年平均风速在 $2\sim 4\text{m}/\text{s}$ 的地区是风能可利用区,在这一区域内,年平均风速在 $3\sim 4\text{m}/\text{s}$ 的地区利用价值较高,有一定的利用前景,但从总体考虑,该地区的风力资源仍是不高。年平均风速在 $4\sim 4.5\text{m}/\text{s}$ 的地区基本相当于风能较丰富区;年平均风速大于 $4.5\text{m}/\text{s}$ 的地区属于风能丰富区。

由此可见,除去一些破坏性极大的风(如台风、龙卷风等),绝大多数风速在 $2\text{m}/\text{s}$ 以上的风能都是对人类有用的。目前,国内外一般选择年平均风速为 $6\text{m}/\text{s}$ 或以上的高风速区(即风能资源丰富区)来安装并网型风力发电机组,即大型风力发电机组。在这些机组中,我国一般选用单机容量 600kW 以上的机组建设风电场。这样才能保证机组多发电,经济效益才能显著。独立运行的小型风力发电机组启动风速较低,一般为 $3\text{m}/\text{s}$ 以上就能发电,这些地区分布区域广,我国有相当部分农耕区、山区和牧区属于这种地区。

3. 风能资源开发判断依据

从风能公式可以看到,影响风能资源的主要因素是风速,风能欠缺区由于平均风速很低而没有开发价值。另一方面还要考虑,因功率不同的风力发电机对风速的要求是不同的,因此判断某一地区的风能资源是否值得开发还要考虑采用的风力发电机的功率大小和机型。

(1) 大型风力发电机(100kW 级以上)可能发展地区的年平均风速大约为 $6\text{m}/\text{s}$ 以上,在全国范围内仅局限于几个地带,就陆地而言,大约占全国总面积的 $1/100$ 。

(2) 中型风力发电机(10kW 级及以上)可能发展的地区的年平均风速大约为 $4.5\text{m}/\text{s}$ 以上,在全国范围内可以发展中型风力发电机的地区,大约占全国陆地总面积的 $1/10$ 。

(3) 小型风力发电机(10kW 级及以下)可能发展的地区的年平均风速大约为 $3\text{m}/\text{s}$ 以上,在全国范围内可以发展小型风力发电机的地区范围较大,大约占全国陆地总面积的 40% 以上。

4. 我国风力资源区划

我国地域辽阔、海岸线长,风能资源比较丰富。据国家气象局估算,除少数省份年平均风速比较小以外,大部分省、市、自治区,尤其是西南边疆、沿海和三北(东北、西北、华北)地区,都有着极有利用价值的风能资源。风能分布具有明显的地域性规律,这种规律反映了大型天气系统的活动和地形作用的综合影响。而划分风能区划的目的是为了了解各地风能资源的差异,以便合理地开发利用。根据全国有效风能密度、有效风力出现时间百分率,以及大于等于 $3\text{m}/\text{s}$ 和 $6\text{m}/\text{s}$ 风速的全年累积小时数,将全国风能资源划分为4个大区(30个小区),见表1-3。

表 1-3

风能区划标准

区 指标	丰富区	较丰富区	可利用区	贫乏区
年有效风能密度 (W/m)	≥ 200	200~150	150~50	≤ 50
风速 $\geq 3\text{m/s}$ 的 年小时数 (h)	≥ 5000	5000~4000	4000~2000	≤ 2000
占全国面积 (%)	8	18	50	24
包括的地区	A34a—东南沿海及中国台湾岛屿和南海群岛秋冬特强压型; A21b—海南岛南部夏春强压型; A14b—山东、辽东沿海春冬强压型; B12b—内蒙古北部西端和锡林郭勒盟春夏强压型; B14b—内蒙古阴山到大兴安岭以北春冬强压型; C13b—c—松花江下游春秋强中压型; 东南沿海及其岛屿, 为我国最大风能资源区	D34b—东南沿海(离海岸 20~50km)秋冬强压型; D14a—海南岛东部春冬特强压型; D14b—渤海沿海春冬强压型; D34a—台湾东部秋冬特强压型; E13b—东北平原春秋强压型; E14b—内蒙古南部春冬强压型; E12b—河西走廊及其邻近春夏强压型; E21b—新疆北部夏春强压型; F12b—青藏高原春夏强压型; 内蒙古和甘肃北部, 为我国次大风能资源区; 黑龙江和吉林东部以及辽东半岛沿海, 风能也较大	G43b—福建沿海(离海岸 50~100km)和广东沿海秋冬强压型; G14a—广西沿海及雷州半岛春冬特强压型; H13b—大小兴安岭山地春秋强压型; I12c—辽河流域和苏北春夏中压型; I14c—黄河、长江中下游春冬中压型; I31c—湖南、湖北和江西秋春中压型; I12c—西北五省的一部分以及青藏的东部和南部春夏中压型; I14c—川西南和云贵的北部春冬中压型; 青藏高原、三北地区的北部和沿海, 为风能较大区	J12d—四川、甘肃、陕西、鄂西、湘西和贵北春夏弱压型; J14d—南岭山地以北冬春弱压型; J43d—南岭山地以南冬秋弱压型; J14d—云贵南部秋冬弱压型; K14d—雅鲁藏布江河谷春冬弱压型; K12c—昌都地区春夏中压型; L12c—塔里木盆地西部春夏中压型; 云贵川、甘肃、陕西南部, 河南、湖南西部, 福建、广东、广西的山区

5. 我国风能资源的特点

我国风能资源分布有以下特点。

(1) 季节性的变化。我国位于亚洲大陆东部, 濒临太平洋, 季风强盛, 内陆还有许多山系, 地形复杂, 加之青藏高原耸立于我国西部, 改变了海陆影响所引起的气压分布和大气环流, 增加了我国季风的复杂性。冬季风来自西伯利亚和蒙古等中高纬度的内陆, 那里空气十分严寒干燥, 冷空气积累到一定程度, 在有利高空环流引导下就会爆发南下, 俗称寒潮, 在此南下的强冷空气的影响下, 形成寒冷干燥的西北风侵袭我国北方各省(直辖市、自治区)。每年冬季总有多次大幅度降温的强冷空气南下, 主要影响我国西北、东北和华北, 直到次年春夏之交才会消失。

夏季风是来自太平洋的东南风、印度洋和南海的西南风, 东南季风影响遍及我国东半部, 西南季风则影响西南各省和南部沿海, 但风速远不及东南季风大。热带风暴是太平洋西部和南海热带海洋上形成的空气涡旋, 是破坏力极大的海洋风暴, 每年夏、秋两季频繁侵袭我国, 登陆我国南海之滨和东南沿海, 热带风暴也能在上海以北登陆, 但次数很少。

(2) 地域性的变化。我国地域辽阔, 风能资源比较丰富, 特别是东南沿海及其附近岛屿, 不仅风能密度大, 年平均风速也高, 发展风能利用的潜力很大。在内陆地区, 从东北、内蒙古到甘肃走廊及新疆一带的广阔地区, 风能资源也很好。

东南沿海的风能密度一般在 200W/m^2 , 有些岛屿达 300W/m^2 以上, 年平均风速在 7m/s 左

右,全年有效风时为6000多小时。内蒙古和西北地区的风能密度也在 $150\sim 200\text{W}/\text{m}^2$,年平均风速在 $6\text{m}/\text{s}$ 左右,全年有效风时为 $5000\sim 6000\text{h}$ 。青藏高原的北部和中部,风能密度也有 $150\text{W}/\text{m}^2$,全年 $3\text{m}/\text{s}$ 以上风速出现时间在 5000h 以上,有的可达 6500h 。

青藏高原地势高亢开阔,冬季东南部盛行偏南风,东北部多为东北风,其他地区一般为偏西风,冬季大约以唐古拉山为界,以南盛行东南风,以北为东至东南风。

我国幅员辽阔,陆疆总长达两万多公里,还有18000多公里的海岸线,边缘海中有岛屿5000多个,风能资源丰富。我国相当于 $6\text{m}/\text{s}$ 以上的地区在全国范围内仅限于较少几个地带。就内陆而言,大约仅占全国总面积的 $1/100$,主要分布在长江到南澳岛之间的东南沿海及其岛屿,这些地区是我国最大的风能资源区以及风能资源丰富区,包括山东、辽东半岛、黄海之滨,南澳岛以西的南海沿海、海南岛和南海诸岛,内蒙古从阴山山脉以北到大兴安岭以北,新疆达坂城,阿拉山口,河西走廊,松花江下游,张家口北部等地区以及分布各地的高山山口和山顶。中国沿海水深在 $2\sim 10\text{m}$ 的海域面积很大,而且风能资源好,靠近我国东部主要用电负荷区域应适宜建设海上风电场。

6. 影响中国风能资源的因素

(1) 大气环流对中国风能分布的影响。东南沿海及东海、南海诸岛,因受台风的影响,最大年平均风速在 $5\text{m}/\text{s}$ 左右。东南沿海有效风能密度 $\geq 200\text{W}/\text{m}^2$,有效风能出现时间百分率可达 $80\%\sim 90\%$ 。风速 $\geq 3\text{m}/\text{s}$ 的风全年出现累积小时数为 $7000\sim 8000\text{h}$;风速 $\geq 6\text{m}/\text{s}$ 的风有 4000h 。岛屿上的有效风能密度为 $200\sim 500\text{W}/\text{m}^2$,风能可以集中利用。福建的台山、东山,台湾的澎湖湾等,有效风能密度都在 $500\text{W}/\text{m}^2$ 左右,风速 $\geq 3\text{m}/\text{s}$ 的风累积为 8000h ,换言之,平均每天有 21h 以上时间的风速 $\geq 3\text{m}/\text{s}$ 。但在一些大岛,如台湾和海南,又具有独特的风能分布特点。台湾风能南北两端大,中间小;海南西部大于东部。

内蒙古和甘肃北部地区,高空终年在西风带的控制下。冬半年地面在蒙古高原东南缘,冷空气南下,因此,总有 $5\sim 6$ 级以上的风速出现在春夏和夏秋之交。气旋活动频繁,当每一气旋过境时,风速也较大。年平均风速在 $4\text{m}/\text{s}$ 以上,有效风能密度为 $200\sim 300\text{W}/\text{m}^2$,风速 $\geq 3\text{m}/\text{s}$ 的风全年累积小时数在 5000h 以上,是中国风能连成一片的最大地区。

云南、贵州、四川、甘南、陕南、豫西、鄂西和湘西风能较小,这一地区因受西藏高原的影响,冬半年高空在西风带的死水区,冷空气沿东亚南下,很少影响这里。夏半年海洋气候也很难影响到这里,所以风速较弱,年平均风速约在 $2.0\text{m}/\text{s}$ 以下,有效风能密度在 $50\text{W}/\text{m}^2$ 以下,有效风力出现时间仅为 20% 左右。风速 $\geq 3\text{m}/\text{s}$ 的风全年出现累积小时数在 2000h 以下,风速 $\geq 6\text{m}/\text{s}$ 的风在 150h 以下。在四川盆地和西双版纳最小,年平均风速 $< 1\text{m}/\text{s}$ 。这里全年静风频率在 60% 以上,有效风能密度仅 $30\text{W}/\text{m}^2$ 左右。风速 $\geq 3\text{m}/\text{s}$ 的风全年出现累积小时数仅 3000h 左右,风速 $\geq 6\text{m}/\text{s}$ 的风仅 20 多小时。换句话说,这里平均每 18 天以上才有一次 10min 风速 $\geq 6\text{m}/\text{s}$ 的风,是没有利用价值的区域。

(2) 海陆和水体对风能分布的影响。中国沿海风能都比内陆大,湖泊都比周围湖滨大。这是由于气流流经海面或湖面摩擦力较小,风速较大。由沿海向内陆或由湖面向湖滨,动能很快消耗,风速急剧减小。故有效风能密度、风速 $\geq 3\text{m}/\text{s}$ 和风速 $\geq 6\text{m}/\text{s}$ 的风的全年累积小时数的等值线不但平行于海岸线和湖岸线,而且数值相差很大。若台风登陆时在海岸上的风速为 100% ,而在离海岸 50km 处,台风风速为海岸风速的 68% 左右。

(3) 地形对风能分布的影响。地形影响风可分为山脉、海拔高度和中小地形等几个方面。

1) 山脉对风能的影响。气流在运行中遇到地形阻碍的影响不但会改变风速,还会改变方向。其变化的特点与地形形状有密切关系。一般范围较大的地形对气流有屏障作用,使气流出现爬绕

运动。所以在天山、祁连山、秦岭、大小兴安岭、太行山和武夷山等的风能密度线和可利用小时数曲线大都平行于这些山脉。特别明显的是东南沿海的几条东北—西南走向的山脉,如武夷山等地。所谓华夏式山脉,山的迎风面风能是丰富的,风能密度为 $200\text{W}/\text{m}^2$, 风速 $\geq 3\text{m}/\text{s}$ 的风出现的小时数为 $7000\sim 8000\text{h}$ 。而在山区及其背风面风能密度在 $50\text{W}/\text{m}^2$ 以下,风速 $\geq 3\text{m}/\text{s}$ 的风出现的小时数为 $1000\sim 2000\text{h}$,风能是不能利用的。四川盆地和塔里木盆地由于天山和秦岭山脉的阻挡为风能不能利用区。雅鲁藏布江河谷也是由于喜马拉雅山脉和冈底斯山的屏障,风能很小,是没有利用价值的区域。

2) 海拔高度对风能的影响。由于地面摩擦消耗运动气流的能量,所以在山地,风速是随着海拔高度增加而增加的。事实上,在复杂山地很难分清地形和海拔高度的影响,二者往往交织在一起,如北京和八达岭风力发电试验站同时观测的平均风速分别 $2.8\text{m}/\text{s}$ 和 $5.8\text{m}/\text{s}$,相差 $3.0\text{m}/\text{s}$ 。后者风大,一是由于它位于燕山山脉的一个南北向的低地,二是由于它海拔比北京高 500 多米,风速改变是二者共同作用的结果。

青藏高原海拔在 4000m 以上,所以这里的风速比周围大,但其有效风能密度却较小,在 $150\text{W}/\text{m}^2$ 左右。这是由于青藏高原海拔高,但空气密度较小,因此风能也小,如在 4000m 高空的空气密度大致为地面的 67% 。也就是说,同样是 $8\text{m}/\text{s}$ 的风速,在平地海拔 500m 以下为 $313.6\text{W}/\text{m}^2$,而在 4000m 只有 $209.9\text{W}/\text{m}^2$ 。

3) 中小地形的影响。蔽风地形风速减小,狭管地形风速增大。即使在平原上的河谷,风能也较周围地区大。海峡也是一种狭管地形,与盛行风方向一致时,风速较大,如台湾海峡中的澎湖列岛,年平均风速为 $6.5\text{m}/\text{s}$ 。

局部地形对风能的影响是不可低估的。在一个小山丘前,气流受阻,强迫抬升,所以在山顶流线密集,风速加强。山的背风面,由于流线辐散,风速减小。有时气流过一个障碍,如小山包等,其产生的影响在下方 $5\sim 10\text{km}$ 的范围。有些地层风是由于地面粗糙度的变化形成的。

1.1.3 风力发电技术划分与系统构成

风力发电技术是一项高新技术,它涉及气象学、空气动力学、结构力学、计算机技术、电子控制技术、材料学、化学、机电工程、电气工程、环境科学等十几个学科和专业,因此是一项系统技术。

1. 风力发电技术的划分

利用风力发电的尝试早在 20 世纪初就已经开始了。20 世纪 30 年代,丹麦、瑞典、前苏联和美国应用航空工业的旋翼技术成功地研制了一些小型风力发电装置。这种小型风力发电机广泛在多风的海岛和偏僻的乡村使用,它所获得的电力成本比小型内燃机的发电成本低得多。不过,当时的发电量较低,大都在 5kW 以下。

一般说来,3 级风就有利用的价值。但从经济合理的角度出发,风速大于 $4\text{m}/\text{s}$ 才适宜于发电。据测定,一台 55kW 的风力发电机组,当风速为 $9.5\text{m}/\text{s}$ 时,机组的输出功率为 55kW ;当风速为 $8\text{m}/\text{s}$ 时,功率为 38kW ;风速为 $6\text{m}/\text{s}$ 时,只有 16kW ;而风速为 $5\text{m}/\text{s}$ 时,仅为 9.5kW 。可见风力越大,经济效益也越大。

风能技术分为大型风电技术和中小型风电技术,虽然都属于风能技术,工作原理也相同,但是却属于完全不同的两个行业:具体表现在政策导向不同、市场不同、应用领域不同、应用技术更是不同,完全属于同种产业中的两个行业。因此,在中国风力机械行业会议上把大型风电和中小型风电区分出来分别对待。

(1) 大型风电技术。大型风电技术起源于丹麦、荷兰等一些欧洲国家,由于当地风能资源