

第 5 篇

其他能源发电

第 5 篇

其他能源发电

主编单位 机械工业部上海发电设备成套设计研究所

编写单位 机械工业部上海发电设备成套设计研究所

中国电力企业联合会

电力工业部西安热工研究院

上海勘测设计研究院

国家海洋局第二海洋研究所

主 编 李念如

编 写 人 李念如 肖功任 刘志江 陆德超

王传昆 蔡体澄 刘矢昇

主 审 肖功任 胡成春

第 1 章 概 论^{[1]~[3]}

本篇叙述的其他能源发电内容包括:(1)新能源发电方式,如太阳能、风能、地热能、潮汐能、波浪能、海洋温差能等新能源(亦称可再生能源)发电;(2)直接发电方式,如磁流体发电、高温燃料电池发电;(3)利用太阳能及其他方法制氢的氢能发电。它们都已成为商业应用装置、中间示范应用装置或正在研制的试验性装置。至于其他一些尚处于理论探索和试验室研究的项目,如电气体发电、热电子发电等,以及生物质能发电,都不在本篇论述范围之内。

1 新能源的特点

新能源是多种多样的,利用方式也不尽相同,一般而言,其资源分布面广,数量大,可再生,无污染或污染少。但也存在一些缺点,如能量密度低,有的新能源具有间歇性,能量供应不稳定,以致带来设备庞大和储能的问题。因此,常采用多种能源联合应用,以互相弥补。

2 新能源发电的经济性

新能源发电的研究和开发,不仅在技术上难度大、周期长、耗费资金多,而且有地理和资源等方面的局限性。新能源发电的商业化应用还取决于其经济性,一般可按以下因素分析:

1. 一次性投资大 新能源发电不消耗燃料,运行费用低,但在经济上目前还不能与常规发电相竞争。对项目立项的可行性研究,不仅要论证其发电成本和回收全部投资的年限,还应考虑新能源发电是一次能源开发与二次能源建设同时完成的项目,它不需要火力发电建设所涉及的煤炭的开采、运输和环保等问题。

2. 选择富集的新能源资源 这是新能源发电项目取得较好经济效益的关键条件,所以各地区应根据当地资源情况,因地制宜,择优开发。

3. 储能系统的选用 有些新能源需配置储能系统,以达到稳定供电和实用化,但它的造价很高,对经济性有很大的影响,为了解决此矛盾,常采用并入电力网运行方式或增设常规能源装置作后备,从而避免或缩小储能容量,降低发电成本。

4. 优惠政策 为了推动新能源发电事业的发展,

尤其在开发初期,需要政府制定优惠政策予以支持,一般采取无息或低息贷款以及减免税收等方法。此外,针对新能源发电无环境污染的优点,国外一般规定,以合理的较高电价收购作为鼓励。

3 新能源发电技术汇集当代科技新成就

新能源发电是一门新兴的技术,不仅表现在新的技术概念、新颖的材料、特殊的制造工艺和大的工程建设等,同时也要求所研制的相应设备必须具有高效、耐用、可靠和价廉等特点。80年代以来,由于借助了当代先进工业技术和高新技术成就,促进了新能源发电取得较快的发展和走向实用化的进程。主要有以下技术领域得到了发展:

1. 太阳热能聚集和输送技术 创造了各种形式高效聚光器和反射镜,并研究成功了相应的选择性涂层和精密跟踪系统,从而提高了吸热效率。利用熔融盐或导热油作为输送热量的介质,不仅降低管道系统的压力和造价,而且提高了热能输送量和效率。

2. 薄膜工艺技术 利用现代电子器件制作的薄膜工艺,使太阳能电池和高温燃料电池的制作达到省料和大规模生产方式。太阳电池还利用不同光电池半导体材料制成多叠层结构,吸收更广光谱的能量,而成为高效太阳电池。薄膜结构是太阳电池走向实用化的突破口。

3. 低沸点有机工质朗肯热力循环技术 在新能源领域内拥有量大面广的中低温热源,为了把它转换为电能,可采用有机工质朗肯循环(Organic Rankine Cycle——ORC),它比常规蒸汽朗肯循环的热效率高。经过多年来的研制开发,目前已掌握了有机工质选配和密封防漏等关键技术,使新一代ORC机组逐步商业化。

4. 常规汽轮机和水轮机的技术更新 由于嫁接了当代核电汽轮机先进的汽水分离和湿蒸汽技术,进一步提高了地热和太阳热发电领域的大功率饱和蒸汽轮机本身的效率和整个发电系统的热效率。同样为了适应潮汐发电的低水头,成功地开发了结构紧凑的全贯流式水轮机,直接降低了土建和安装费用。

5. 电子技术的广泛应用 现代电子技术有力地

推进了新能源发电的应用。自动控制和远距离遥控技术使装于偏僻位置的新能源发电装置便于操作和管理。由于应用了电子调压、变频和逆变等装置的不同功能,使各种不稳定转速的新能源发电系统和直流电源高效地转变成交流电供电。

4 新能源发电的发展前景

1992年9月第15届世界能源大会公布的《明日世界的能源》预测报告认为,全球能源消耗量的增长趋势如下:

年 份	1960	1990	2020
亿吨油当量	33	87	133 (中等消费)

在消耗的能源结构中,水力发电和核能发电的发展有一定的限制,预计到2020年时,其所占的比例分别约为7.5%和6%,所耗用的能源仍以化石燃料为主。按以上能耗的增长速度估计,地球上蕴藏的化石燃料终将面临资源枯竭和越来越难开采的局面。

化石燃料的燃烧导致严重的环境污染,排放大量的CO₂,会引起大气层的温室效应,使世界气候变暖,海平面上涨。在排放的烟气中,还含有SO₂和NO_x,引

起酸雨沉降。过多的废热造成大气和河流的热污染,还有大量的灰渣、飞尘等。这一切导致破坏生态平衡,危害人类的生存空间。

因此,自70年代世界石油危机以来,许多国家开始制定新能源发展规划,已投入大量的财力和物力进行开发,旨在寻找可靠、持久和清洁的替代能源,逐步减少化石能源的消耗。

5 直接发电方式是高效发电技术

在开发探索的各种新颖发电方式中,另一项主要特征是寻求直接转换的高效发电技术,即摆脱先把热能通过动力机转换为机械能,再用机械能驱动发电机发电的方式,以减少能量损失,提高发电效率。

磁流体发电是把高温高速的导电气体通过磁场而获得电能的。高温燃料电池是把燃料的化学能经电化学过程直接转换为电能,所以理论转换效率很高,远远超过卡诺热力循环效率的限制。这些新发电方式的特点是无污染或少污染,无旋转机械部件,能以叠加方式构成所需容量,可作为前置机组与常规发电机组构成联合装置,从而可达到50%~60%以上较高的发电效率,这将是非常诱人的前景。

第2章 风力发电^{[4]~[6]}

1 概述

人类利用风能历史悠久,我国是最早使用风帆船和风车的国家之一。荷兰被誉为风车之国,1836年,荷兰有12000台风车,由于该国地势低洼,利用风车排水围圩,开垦农田。

由于70年代石油危机的冲击,世界石油供求关系出现了剧烈的变化,能源多样化逐渐得到人们广泛的共识,研究开发可再生能源以补充或替代常规能源,得到世界各国广泛的重视。同时,以油、煤作为主要燃料,面临着严重的环境污染。在1769年蒸汽机的发明逐步取代了许多风车之后,可再生、无污染的风能又重新受到重视。欧美各国为了发展风力发电,投入了大量资金,并制订了风力发电的发展规划及优惠政策,重点研制大中型风力发电机组并网运行,以免去昂贵的储能装置,降低发电成本,提高供电的可靠性。其目标是节油、节煤和减轻环境污染。在这种背景下,1981年美

国加利福尼亚州在风能资源丰富的场地上,出现和兴起了由几十台至几百台并网风力发电机组为一群体的风力发电场向电力网输送电力。随着机组台数的增多,单机容量的提高,生产量加大和机组更新换代,造价不断下降。据统计,80年代初,美国风力发电场每千瓦建设投资为3000美元,运行维护费用每千瓦小时为0.04美元,1992年分别降到1000美元和0.01美元。风力发电场发电成本有待降低的主攻方向为提高单机容量,改进结构设计和制造工艺,减轻部件质量;在选择风况好的场址的选址技术上,开发先进的风况测量、采集系统并精确推算、评估场址上的风能数据。随着化石燃料有限储量的减少和对环境污染的双重危机的加深,国际上有识之士提出“从全球着想,从全球着手”的口号日益深入人心。由此可见,风力发电的开发利用具有极其重要的深远意义。

1994年底,全世界并入电力网运行的风力发电机组总容量约3732MW,其中美国为1717MW,欧洲为

1725MW (其中德国为 632MW, 丹麦为 539MW, 英国为 170MW, 荷兰为 162MW), 印度为 201MW。纵观有关各国开发风力发电场的经济效益, 风力发电场已逐步具有商业竞争力。1990 年丹麦将 250kW 风力发电机组装在年平均风速为 6m/s 场址上, 发电成本为 0.042 欧洲货币单位/(kW·h); 丹麦燃煤火电厂发电成本为 0.039 欧洲货币单位/(kW·h)。考虑到火力发电对环境的污染, 对人体健康的损害, 以及煤炭运输等因素, 风力发电的社会效益和经济效益将日益显示出来。因此, 风力发电是一个极有吸引力和发展潜力的领域。

我国东南沿海历来具有使用风力提水的传统, 如江苏省 1959 年风车曾多达 20 余万台。50 年代后期, 在发展传统风车的同时, 开始摸索研究小型风力发电机组, 限于当时的技术经济条件, 大多数机组在试验中受挫而停顿。在 70 年代, 先后试制了 1, 2, 10, 12, 18 和 20kW 样机, 其中 18kW 机组装在浙江省嵊泗县, 一直运行至 1986 年 8 月, 因热带风暴(台风)风速达 54m/s 而损坏。1978 年将研制风力发电设备列为国家重点科研项目后, 进展加快, 先后研制生产了微型和 1~200kW 风力发电机组, 其中以户用微型机组技术比较成熟, 已有 100, 150, 200, 300 和 500W 微型风力发电机组系列, 并已定型和批量生产, 产品质量可靠, 不但可满足国内需要, 还远销国外。全国 26 个厂年生产微型风力机组能力约为 3 万台, 截至 1992 年底全国安装微型风力发电机组 14 万台, 独立供电风力发电机组已有 1, 2, 2.5, 5, 7.5 和 10kW 小批量生产, 其中 1, 2kW 机组已向国外出口。用于并网运行的 55kW 风力发电机组, 到 1994 年底共生产 10 台。研制的 200kW 风力发电机组, 于 1991 年在福建省平潭县并网发电, 1993 年通过技术鉴定。自 80 年代中期以来, 我国建成风力发电场 12 座, 共装机组 159 台, 总装机容量为 30526kW。

我国风力发电场建设尚处在发展初期, 其设备、工程每千瓦造价高于火力发电, 在免征进口关税条件下, 其中购置风力发电机组费用占总投资的 70%~75%, 在风况很好、经济发达地区, 风力发电场已具有还本付息自我发展的能力。例如, 广东省南澳县风能开发总公司, 场址的年平均风速达 8.54m/s, 第一期工程进口瑞典 2×150kW 和 1×90kW 共三台风力发电机组, 计 390kW, 1989 年 6 月并网发电, 总投资 260 万元, 当时上网电价为 0.42 元/(kW·h), 1992 年 4 月调整为 0.52 元/(kW·h), 1993 年 6 月为 0.65 元/(kW·h), 1995 年 1 月起为 0.70 元/(kW·h), 至 1995 年 6 月已

全部偿还银行贷款本息。由于风力发电不需要消耗燃料, 运行成本低, 一旦还清贷款本息后, 发电成本就很低廉, 经济效益显著。风力发电机组制造的国产化是降低造价的关键, 只要建立风力发电机组生产体系, 实现规模生产, 风力发电机组的造价必将有较大幅度的下降。

2 风能资源分析

2.1 风的形成

太阳蕴藏着巨大的热量, 以热辐射方式传送到地球, 地球围绕太阳公转, 同时自转, 这就使太阳光线投射到地球表面, 每处有一个不同角度, 一年之中处处不同, 时时不同, 因而太阳对地球各处加热不平衡, 引起大气层温差, 造成气压在水平方向分布不平衡, 在水平气压梯度作用下, 产生空气水平方向运动——风。空气运动可以分解成水平运动和垂直运动两个分量, 在气象学上, 只把空气在水平方向上的运动称之为风, 因此气象台站只测量空气在水平方向的运动, 风的垂直运动分量数值很小, 在风能利用中, 不考虑风的垂直运动分量。风能的优点是可再生, 无污染, 分布广, 蕴藏量大。缺点是不稳定, 密度小, 空气密度只有水的 1/816, 因此, 风能是一种低品位的随机性能源。地球上的大气处在水不止息的流动中, 大气运动的动力来源于太阳的辐射热, 据估计, 太阳传给地球的辐射热能约有 2% 被转换成风能, 所以风能也是太阳能的一种表现形式。

在沿海、大陆与海洋之间, 在山地、山谷与山顶之间, 由于温度差异而产生地方性风, 称为海陆风和山谷风。大陆和海洋热容量不同, 海水热容量大, 接收太阳热量后升温慢, 陆地热容量小, 吸收同样的热量后升温快, 形成海滨昼夜的风速和风向不断变化。白天陆地上热空气上升, 海上的冷空气刮向陆地, 称为海风。夜间则相反, 陆地上冷空气刮向海上, 称为陆风。一般海风比陆风强劲得多。在内陆, 大山、山地的起伏形成山谷风。白天由于太阳的照射, 山顶晒热快, 热空气上升, 山谷冷而密度大的空气就沿着山坡向上流, 称为谷风。夜间气流从山顶沿山坡流向山谷, 形成了山风。山谷风较弱, 谷风比山风大。

季风环流是大气环流的一部分, 在大陆和海洋之间, 由于季节的更迭, 气温冷热的转变, 形成风向随季节有规律变化的季风。在冬季, 严寒的亚洲内陆北部形成高气压, 温暖的海洋上形成低气压, 于是气流从大陆流向海洋。夏天情况正好相反, 气流不断地从海洋流向

大陆,这就是我国在冬季盛行西北风、夏季盛行东南风的主要原因。

2·2 风速

空气在单位时间内所流过的水平距离叫风速,常以米每秒为单位,即 m/s。以距地面 10m 高度为标准

进行测量,风速风向仪要装在平坦开阔场地上,并设置独立的杆(塔)。我国气象台站是将每小时最后 10min 的风速的平均值,作为每小时的平均风速。以每小时的平均风速为基础,计算出日、月、年的平均风速。在天气预报中,采用风力等级来表示风速大小,风力等级规定为 0~17 级,见表 5·2-1^[4]。

表 5·2-1 风力等级

风力等级	自由海面 状 况		海岸船只 征 象	陆地地面 物 征 象	距地 10m 高处的相当风速		
	浪	高			km/h	n mile/h	m/s
0	—	—	静	静, 烟直上	<1	<1	0~0.2
1	0.1	0.1	平常渔船略觉摇动	烟能表示风向, 但风向标不能转动	1~5	1~3	0.3~1.5
2	0.2	0.3	渔船张帆时, 每小时可随风移行 2~3km	人面感觉有风, 树叶微响, 风向标能转动	6~11	4~6	1.6~3.3
3	0.6	1.0	渔船渐觉簸动, 每小时可随风移行 5~6km	树叶及微枝摇动不息, 旌旗展开	12~19	7~10	3.4~5.4
4	1.0	1.5	渔船满帆时, 可使船身倾向一侧	能吹起地面灰尘和纸张, 树的小枝摇动	20~28	11~16	5.5~7.9
5	2.0	2.5	渔船缩帆一部分	有叶的小树摇摆, 内陆的水面有小波	29~38	17~21	8.0~10.7
6	3.0	4.0	渔船加倍缩帆, 捕鱼须注意风险	大树枝摇动, 电线呼呼声, 举伞困难	39~49	22~27	10.8~13.8
7	4.0	5.5	渔船停泊港中, 在海者下锚	全树摇动, 迎风步行感觉不便	50~61	28~33	13.9~17.1
8	5.5	7.5	近港的渔船皆停留不出	微枝折毁, 人向前行时, 感觉阻力甚大	62~74	34~40	17.2~20.7
9	7.0	10.0	汽船航行困难	建筑物有小损 (烟囱顶部及平屋摇动)	75~88	41~47	20.8~24.4
10	9.0	12.5	汽船航行颇危险	陆上少见, 见时可使树木拔起或使建筑物损坏较重	89~102	48~55	24.5~28.4
11	11.5	16.0	汽船遇之极危险	陆上很少见, 有则必有广泛损坏	103~117	56~63	28.5~32.6
12	14.0	—	海浪滔天	陆上绝少见, 摧毁力极大	118~133	64~71	32.7~36.9
13	—	—	—	—	134~149	72~80	37.0~41.4
14	—	—	—	—	150~166	81~89	41.5~46.1
15	—	—	—	—	167~183	90~99	46.2~50.9
16	—	—	—	—	184~201	100~108	51.0~56.0
17	—	—	—	—	202~220	109~118	56.1~61.2

注: 1. 13~17 级风力是当风速可以用仪器测定时采用。

2. 摘自参考文献 [4], 170~171 页。

在近地面 300m 高度内, 风速随高度的增加而变大, 有指数公式和对数公式两种常用公式。指数公式简单, 计算方便, 工程上常用此公式; 对数公式相对复杂, 理论研究时使用较多。风速随高度变化的指数公式如下:

$$V = V_0 \left(\frac{H}{H_0} \right)^n \quad (5.2-1)$$

式中 V ——欲求的离地面高度 H 处风速;

V_0 ——离地面高度 H_0 处风速, 取气象台站提供的数据, H_0 取 10m;

n ——与地面粗糙度等因素有关的指数, 全国各地测风塔测得平坦地区平均值约为 0.19~0.20。如需精确地求取 n 值, 则要通过梯度观测获得。

一般 300kW 风力发电机组的塔架高度约为 30m。例如, 新疆达坂城三葛庄属一般粗糙地形, 取 $n=0.19$ 。经计算, 如 10m 高度风速对比值为 1.00, 则 30m 高度风速对比值为 1.23, 所以在选择塔架高度时, 应予以分析, 即按塔架造价和机组年发电量两方面因素, 选定风力发电机合理安装高度。概括地说, 提高塔架高度, 就提高了风力发电机组的功率输出。

2.3 风向

通常以风吹来的方向确定为风的方向, 我国气象台站观测的风向, 一般采用 16 个方位。

即以正北为零, 顺时针每转 22.5° 为一个方位, 图 5.2-1 标出 16 个方位的风向符号。

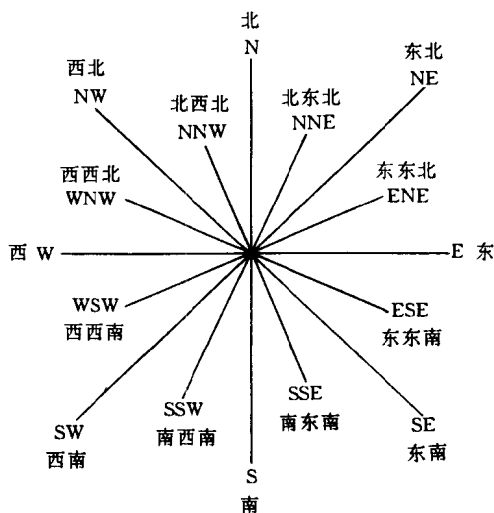


图 5.2-1 风向方位图

2.4 风的统计方法

为充分利用风能资源, 要对风能资源进行全面深入的调研, 而风速频率曲线和风向玫瑰图是反映风的特征最重要的数据, 要求采集三年以上的观测纪录, 至少也应有两年连续测风数据。对预选的风力发电场址, 必须绘制风速频率曲线和风向玫瑰图, 编制月平均风速变化曲线和年平均风速日变化曲线, 作为评价的依据。

2.4.1 风速频率曲线

在一年或一个月的周期中, 出现相同风速的小时数, 占这段时间总小时数的百分比称为风速频率。风速的分布情况常采用风速频率曲线来描述, 该曲线能从实际测量到的原始数据上统计计算得到, 但工作量繁重, 也可利用 Weibull 分布函数来描述, 计算并绘制出理论描述的风速频率曲线, 见图 5.2-2, 图中折线为原始数据的风速分布, 光滑曲线为利用 Weibull 参数画出的风速频率曲线。将图示的风速频率乘以全年总小时数 8760, 即得出一年中某一风速的小时数。例如, 达坂城 $V=5\text{m/s}$, 其风频 $f=10.2\%$, 全年 5m/s 风速为 $0.102 \times 8760 = 894\text{h}$ 。

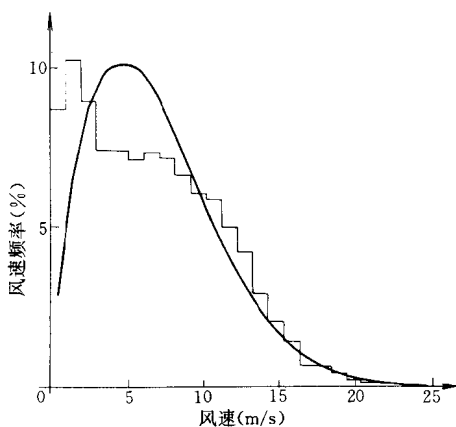


图 5.2-2 达坂城风速频率曲线

绘制出场址的风速频率曲线后, 并根据每台机组的功率曲线, 就可估算出该机组的年发电量。

2.4.2 风向玫瑰图

了解某地盛行风向, 应绘制风向玫瑰图。为此, 要对该地的风向进行长时间的观测, 才能得到每一风向的频率。

表 5·2-2 达坂城风向频率表

N	2	E	3	S	1	W	22
NNE	1	ESE	3	SSW	0	WNW	17
NE	2	SE	12	SW	1	NW	6
ENE	2	SSE	9	WSW	3	NNW	2
						C	14

表 5·2-2 中 C 为静风频率，将风向频率乘以全年小时数 8760，即得一年中某风向的小时数。例如，表 5·2-2 中 W 风向频率为 22%， $0.22 \times 8760 = 1927$ ，即达坂城全年西风为 1927h。图 5·2-3 为按照表 5·2-2 的风向频率绘制成达坂城风向玫瑰图。

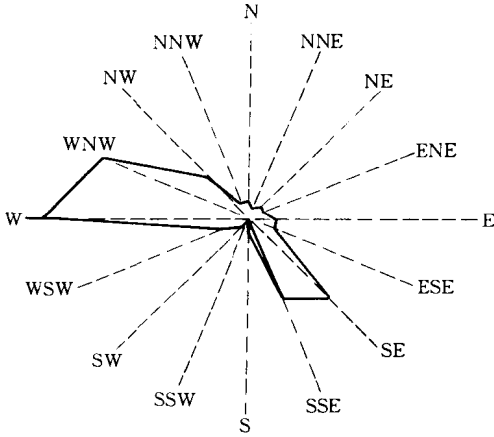


图 5·2-3 达坂城风向玫瑰图

由图 5·2-3 可以清楚看出，达坂城的盛行风向为 W、WNW、SE 和 SSE 方位。

2·5 中国风能资源分布

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，加之青藏高原是耸立在大气中的大陆块，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。在这股频频南下强冷空气的控制和影响下，形成寒冷干燥的西北风侵袭我国北方各省、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壁，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（台风）是太平洋西部和南海热带海洋上形成的空气旋涡，是破坏力极大的海洋风暴，每年夏秋两季频繁侵袭我国，登陆次数最多的是广东省和海南省，其次是台湾省、福建省和浙江省，热带风暴也能在上海以北登陆，但次数很少。

青藏高原耸立，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。夏季大约以唐古拉山为界，以南盛行东南风，以北为东至东北风。

2·5·1 风能资源分布

我国幅员辽阔，陆疆总长达 2 万多 km，还有 18000 多 km 的海岸线，边缘海中有岛屿 5000 多个，风能资源丰富。东南沿海狭长地带及其岛屿为我国最大风能资源区，内陆则以新疆阿尔泰山和天山的山口，以及内蒙古阴山山脉北侧风能资源丰富。根据全国气象台站风能资料的统计和计算，绘制出我国风能分布和风能分区及所占全国面积的百分比，分别见图 5·2-4 和表 5·2-3。

表 5·2-3 中国风能分区及占全国面积的百分比

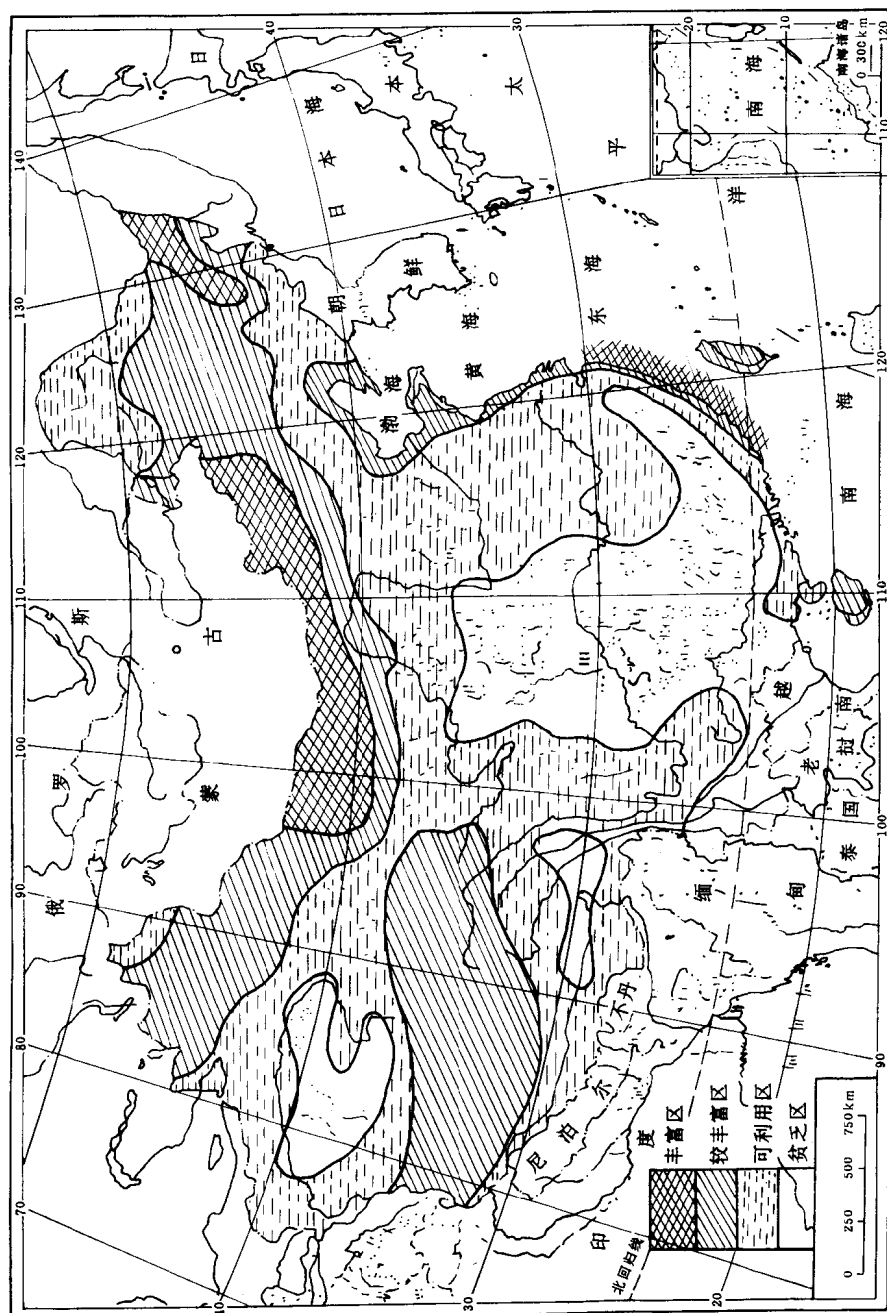
指 标	丰富区	较丰富区	可利用区	贫乏区
年有效风能密度 (W/m^2)	>200	200~150	$<150 \sim 50$	<50
年 $\geq 3m/s$ 累积小时数 (h)	>5000	5000~4000	$<4000 \sim 2000$	<2000
年 $\geq 6m/s$ 累积小时数 (h)	>2200	2200~1500	$<1500 \sim 350$	<350
占全国面积的百分比 (%)	8	18	50	24

注：摘自参考文献 [5] 252 页。

2·5·2 风能潜力

风能是地球上自然能源的一部分，我国风能潜力的估算如下：

风能理论可开发总量 R，全国为 32.26 亿 kW，实际可开发利用量 R'，按总量的 1/10 估计，并考虑到风轮实际扫掠面积为计算气流正方形面积的 0.785 倍（1m 直径风轮扫掠面积为 $0.5^2 \times \pi = 0.785m^2$ ），故实际可开发量为： $R' = 0.785R/10 = 2.53$ 亿 kW。



3 风力机的基本原理

3.1 风力机的轴功率

风力机是将风能转化为机械能的机械,当气流流过风力机风轮时,风轮便做功。风力机的功率输出是风通过风轮后,使风速减低而实现的。单位时间通过风轮的动能为

$$\begin{aligned} KE &= \frac{1}{2} m V^2 \\ &= \frac{1}{2} (\rho V) V^2 \\ &= \frac{1}{2} \rho V^3 \end{aligned} \quad (5.2-2)$$

式(5.2-2)是风轮单位面积上所获得的动能,若风轮扫掠面积为 A ,则理想风力机轴功率是

$$P_w = \frac{1}{2} \rho V^3 A \quad (\text{W}) \quad (5.2-3)$$

式中 P_w ——风力机轴功率(W);

ρ ——空气密度(kg/m^3);

V ——风速(m/s);

A ——风轮叶片扫掠面积(m^2)。

国际标准大气规定:空气看成是完全气体,大气的相对速度为零。以海平面作为零高度,在海平面处,空气的标准状态为:大气压力 $P_0 = 101325\text{Pa}$ (760mmHg),温度 $t_0 = 15^\circ\text{C}$,密度 $\rho = 1.225\text{kg}/\text{m}^3$ 。

风轮不可能将流经其扫掠面积 A 的风能全部转化为机械能,也就是说,只有一部分风能可转化为机械能,因此,风力机轴功率为

$$P_w = \frac{1}{2} \rho V^3 A C_p \quad (5.2-4)$$

式中 C_p ——风能利用系数。

C_p 是风轮所接受的风的动能与通过风轮扫掠面积的全部风的动能的比值。贝兹(Betz)提出了关于理想风轮能够吸收的最大风能的理论,经计算理想状态下风轮的最大风能利用系数 $C_{p\max} = 16/27 = 0.593$ 。它规定了从风能中吸取出来,风轮转化为有用功的能量上限。

3.2 风力机的空气动力特性及基本参数

风轮空气动力特性是表示风轮力矩系数、风能利用系数和叶尖速度比之间关系的一个属性。一台最佳风力机必须具有良好的空气动力特性;一台空气动力特性良好的风力机不但效率高,而且适宜于安全可靠运行。对风力机的综合评价,还应包括结构、工艺和成

本等因素。

1. 叶尖速度比(高速性系数) λ 是叶尖速度与风速的比值。它是风力机的一个重要设计参数,要根据风力机类型和机电传动系统来确定 λ 值。在风力机总体设计时,就要拟定叶尖速度比,然后进行其他设计计算。

2. 力矩系数 C_M C_M 是风轮的输出力矩与风能对风轮产生的力矩的比值,也是反映风轮输出力矩大小的系数。

C_p 和 λ 、 C_M 和 λ 的变化关系曲线称为风力机空气动力特性曲线。高速风力机和低速风力机的 $C_p = f(\lambda)$ 和 $C_M = f(\lambda)$ 特性曲线,反映了风力机风能利用程度和力矩系数随运行工况变化的特性,见图5.2-5和图5.2-6。

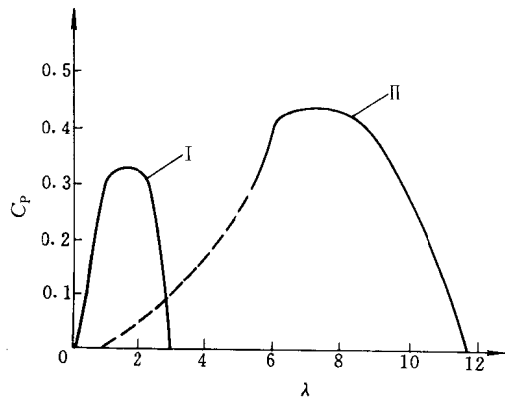


图 5.2-5 C_p 和 λ 的关系特性曲线

I—低速风轮 II—高速风轮

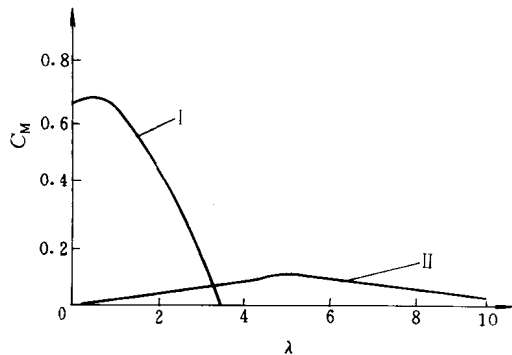


图 5.2-6 C_M 和 λ 的关系特性曲线

I—低速风轮 II—高速风轮

风力机空气动力特性曲线可以通过模型实验或理论计算描绘出来。图 5.2-5 表明,低速风力机的 λ 值,在 1~2 之间有较高的 C_p 值;而高速风力机的 λ 值,一

一般在6~8范围内有较高的 C_P 值,有的高速风力机的 λ 值可到10以上。在同样风轮直径条件下,高速风力机比低速风力机的造价低,由阵风引起的动载荷影响要小些。高速风力机的 C_{Pmax} 大于低速风力机的 C_{Pmax} 。由图5-2-6可知,低速风力机的 C_M 远远大于高速风力机的 C_M ,因而,低速风力机起动性能好,适用于低转速、大力矩的提水;而高速风力机的 C_P 大,而 C_M 小,则适用于高转速、低力矩的发电类型。

其次是标志风力机性能的基本参数——风轮实度,它是风轮叶片投影面积的总和与风轮扫掠面积的比值。风轮实度和叶尖速度比是密切相关的一个重要设计参数,研究结果表明:风力发电机要求转速高,可降低升速齿轮箱的传动比,风轮实度取值小;而风力提水机要求力矩大,风轮实度取值大。通常风力机风轮实度大致在5%~20%范围内。

3.3 翼型

叶片展向长度趋于无穷小时称为翼型,通俗说法就是叶片剖面外形曲线。翼型空气动力特性好坏直接影响风力机的性能。目前,风力机叶片的翼型多采用飞机翼型,如水平轴风力机常用NACA230XX、NACA44XX系列翼型和Göttingen系列翼型等。

由于航空工业发展的需要,空气动力学从研究气流流经物体上的升力和阻力的基本原理出发,建立了升力和阻力理论,它标志着现代空气动力学的开端。

图5-2-7为均匀气流作用在叶片上的升力和阻力,当气流流经叶片时,沿着叶片流动的气流,上下流线的分布状态不同,叶片上面的流速比下面快,形成叶片下面压力大,而上面压力小,由此产生了上升的力,称为升力 Y 。此升力与气流来向成 90° 角,叶片上的升力在风轮旋转平面形成扭力矩,使风轮旋转。与气流平行方向的力,称为阻力 X ,两者合成力为 F 。为了产生升力,叶片相对气流必须保持一定的角度,即翼型上合成气流

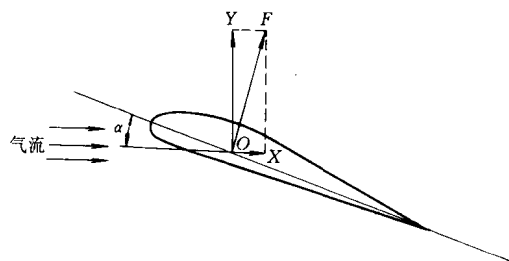


图 5-2-7 均匀气流中作用在叶片上的升力和阻力

方向与翼型几何弦的夹角,叫作叶片几何攻角 α 。

升力可用升力系数来表示,升力系数可看作是升力与最大升力的比值。由图5-2-8可以看出,叶片处于某个几何攻角时升力最大,超过这个角度升力急剧降低,称为叶片失速,这时叶片表面层的气流将形成分离状态,致使升力不再增加,而叶片功率降低,风轮转速也不会随风速增大而上升,但叶片失速也引起能量损失。为了得到高的风能利用系数,要求选择的翼型具有高的升力系数。在风轮叶片运转的几何攻角范围内,有升高阻比和平稳的失速特性。升力系数与阻力系数的比值,叫作升阻比。一般来说,翼型的升阻比越大越好。

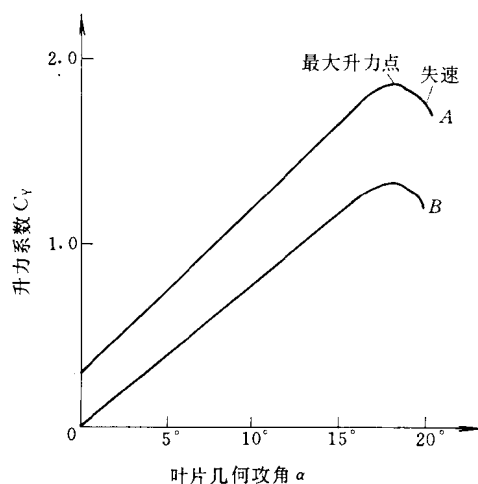


图 5-2-8 两种不同翼型叶片几何攻角和升力系数的关系
A—有弯度翼型 B—对称翼型

3.4 风力机的种类

风力机是将风能转化为其他有用能的机械,其结构形式多种多样,习惯上按风力机主轴与地面相对位置分为水平轴风力机和垂直轴风力机两大类。此外,还有特殊类型风力机,如正在进行研究的新概念型风力机等。各种类型风力机的示意图见图5-2-9。

3.4.1 水平轴风力机

风轮轴线的安装位置与水平面夹角不大于 15° 的风力机叫作水平轴风力机。其叶片翼型通常使用飞机翼型,它以类似螺旋桨式的叶片绕水平轴旋转,风轮的扫掠面与风向垂直,并随风向变化而迎风回转。它的风能利用系数一般比垂直轴风力机的高,机舱安装在塔

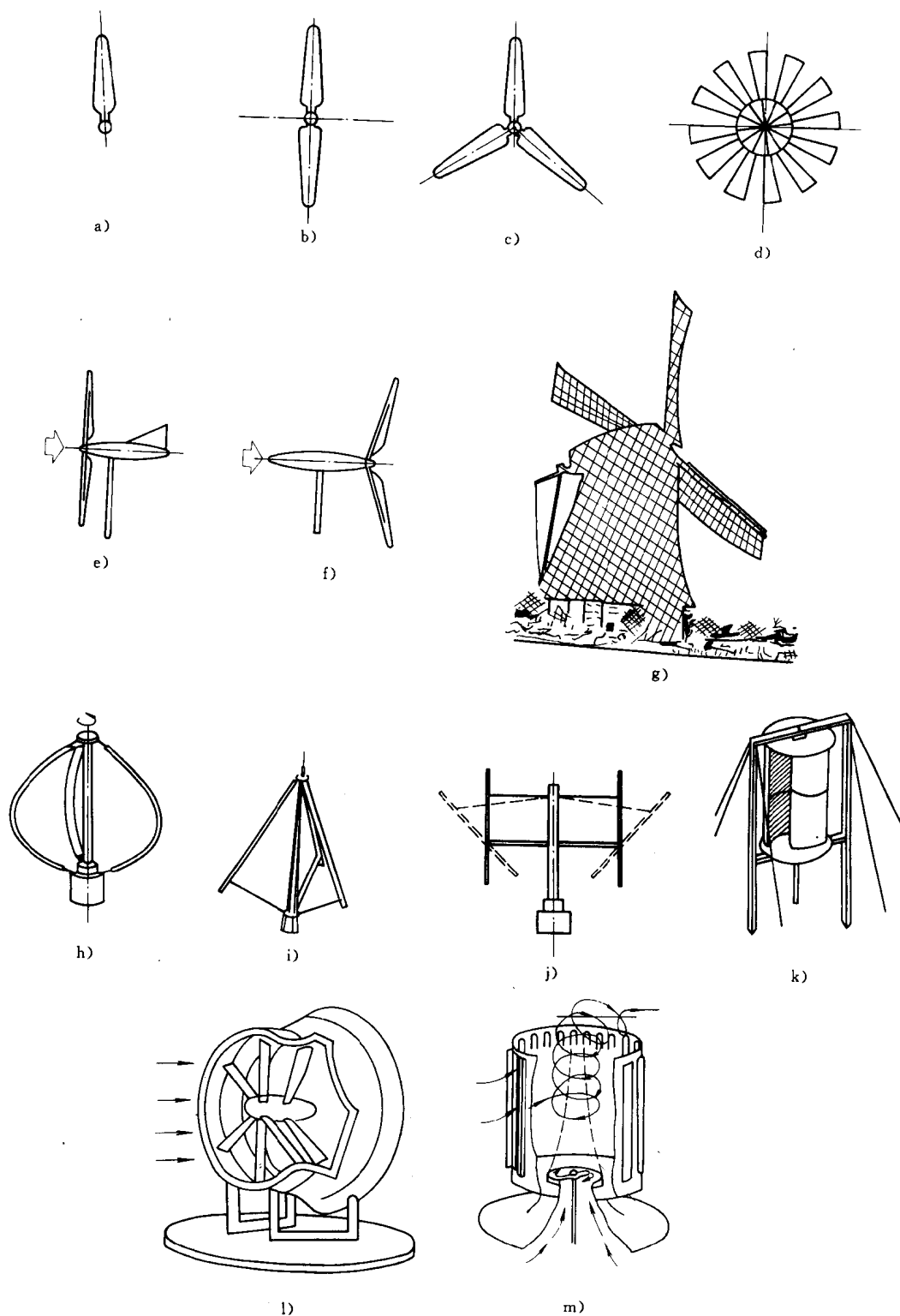


图 5-2-9 各种类型风力机的示意图

- a) 单叶片式 b) 二叶片式 c) 三叶片式 d) 多叶式 e) 上风式 f) 下风式 g) 荷兰式
 h) Φ 型 i) Δ 型 j) 可变几何型 k) S型 l) 扩散型 m) 旋风型
 a) ~g) 为水平轴风力机 h) ~k) 为垂直轴风力机 l)、m) 为新概念型风力机

架上,虽然增加了造价,但却提高了机组的出力。目前,国内外普遍推广使用水平轴风力发电机组。中小型风力发电机多选用三叶片风力机,主要强调其运行平稳性。兆瓦级大型风力发电机则考虑造价因素,多选用二叶片式。德国还研制出单叶片风力发电机组,如 Monopteros 50 650kW 机组已于 1989 年并网发电。风力提水机则选用多叶式风力机,一般属于低速风力机。例如,国产 FD-2.6 和 FDG-6 型风力提水机,风轮直径分别为 2.6m 和 6m,叶片数为 20 和 18,最大风能利用系数为 0.25 和 0.33,叶尖速度比为 1.25 和 1.4,叶片材料均为镀锌薄钢板。荷兰 CWD2000、CWD2740 和 CWD5000LW 风力提水机,风轮直径分别为 2,2.74 和 5m,叶片数为 6,6 和 8,最大风能利用系数分别为 0.3,0.38 和 0.35,叶尖速度比分别为 1.5,2 和 2,叶片材料均为镀锌薄钢板。

3.4.2 垂直轴风力机^[5]

风轮轴线的安装位置与水平面垂直的风力机叫作垂直轴风力机,其叶片绕垂直轴旋转。它的优点是风轮可吸收来自任意方向来的风能,而不需要跟踪风向的迎风机构。垂直轴风力机风轮叶片分为固定不可调节的弯叶片和可调节的直叶片两类。它的增速器和发电机都可以安装在地面上,不仅结构简单,造价低廉,且便于维修。垂直轴风力机有代表性的是达里厄 (Darrieus) 型,它有多种型式,即 Φ 型、 Δ 型等,以 Φ 型为主要机型被推广使用,见图 5-2-10。

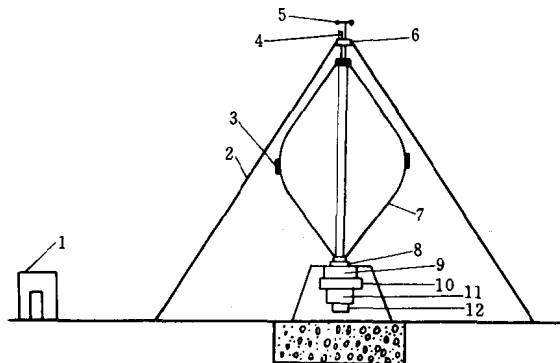


图 5-2-10 20kW 垂直轴 Φ 型风力发电机组结构图

- 1—控制间 2—缆绳 3—阻尼板 4—振动传感器
5—风速计 6—上轴承 7—叶片 8—下轴承
9—齿轮箱 10—电控间 11—发电机
12—起动电动机

Φ 型风力机,它利用固定在垂直轴周围类似跳绳曲线形状的等截面叶片,带动主轴旋转,叶片取 2~3 个, Φ 型叶片主要承受拉力,弯曲力很小;缺点是不能自启动。垂直轴可变几何型风力机采用直叶片,即直线形状的对称等截面翼型,制造较容易。它可自动改变叶片倾斜角度,以达到调速和限速的作用。这种小型机组可装设单根钢管拉索塔架,它的传动系统和发电机都装在塔架底座内。还有垂直轴 S 型 (Savonius) 风力机,它是由两个半圆筒构成的。S 型风轮是阻力型,优点是结构简单、坚固,起动力矩大,起动性能好,可作为 Φ 型风力机的起动辅助风轮;缺点是风能利用系数低,叶片固定,不能调速,只能依靠蓄电池保持电压相对稳定,多用于微型风力发电机组。此外,新概念型风力机正在研究之中。

4 水平轴风力发电机组的主要部件

水平轴风力发电机组是传统型式,技术成熟,生产批量大,已成为当今普遍推广的机型,单机容量从 100W 到兆瓦级,而大中型风力发电机组并网发电,已经成为世界风能利用的主要型式。从技术经济角度观察,目前并网风力发电机组容量的最佳量级为 250~500kW。现就该量级风力发电机组的主要部件简述如下。

4.1 风轮

风轮是由叶片等部件组成接受风能转化为机械能的转动件,它由叶片和轮毂组成。当今 95% 以上的叶片都采用玻璃钢复合材料制成,优点是易成形,可修补,适于制造复杂的外型,疲劳性能及耐腐蚀性能好,质量小。轮毂的功能是安装叶片和连接低速轴,要求能承受相当大的复杂的外载荷,它的结构一般采用刚性连接,虽然叶片和塔架受力有所增加,但制造安装方便,造价较低。为降低叶片的应力,大型风力发电机轮毂,多采用跷跷板 (Teetering) 机构方案,但结构复杂,制造费用增加。风轮在运转中承受因旋转引起的惯性力和气动力的作用,还要考虑风力载荷的可变性。对于直径大于 30m 的风力机,动载荷引起的交变应力,是设计中起决定作用的因素。

4.2 传动装置

风轮转速约为 30~50r/min,而发电机转速为 1000r/min 或 1500r/min (50Hz)。因此,在风轮与发电机之间必须有增速传动系统,才能实现转速的变换和能量的传递。低速轴是连接风轮和增速箱传递扭矩的

转轴,前端与轮毂连接,中间支承在滚动轴承上,后端与增速箱低速端连接。增速箱可用普通定轴圆柱齿轮箱,现多采用行星齿轮箱。前者体积大,效率略低,但制造简单,安装维修方便;后者采用多行星轮,可使功率均匀分布、效率高、质量小、体积小、传动比范围大,但零件多,制造难度较大。传动系统普遍装有机械制动器,在紧急停机或检修时使用。此外,还应装设独立的气动制动(刹车)机构,以确保安全。

4.3 变桨距调节机构和迎风机构

风速和风向都是随机变量,变动频繁且幅度大,加上负载波动,风力发电机组的变桨距调节机构和迎风机构较复杂。

4.3.1 变桨距调节机构

它是使风轮叶片安装角^①随风速而变化,并能调节风轮旋转速度或功率输出的机构。当风速大于额定风速时,依靠改变桨距,将输出功率维持在额定值附近;或当风速变化时,稳定风轮转速。对于变桨距调节机构的设计,要求能提供足够的动力,推动叶片变桨距所需要的力矩,以满足变桨距调节的变距角范围和速率要求,并保证可靠地实现快速应急顺桨^②。为了完成上述功能,目前,大都采用电液伺服系统,该系统综合电子和液压两方面的优点,能够迅速、准确、可靠地实现多种参数(转速、功率、桨叶变距及其变化率)的调节和综合。正常运行时,由电气信号控制伺服阀工作,以保证正常变桨距速率。当风轮超速应急顺桨时,电气信号控制顺桨阀动作,这时液压缸驱动应急顺桨装置,实现快速变桨距。

4.3.2 迎风机构

它是使风轮保持最佳迎风位置的装置。由于自然风的风向不断地变化,上风式风力机^③在运行时,必须使风轮平面与风向接近垂直,才能发出最大功率,为了调整机舱的方位,使风轮对准风向,常采用电动迎风机构。该装置的风向感受信号来自装于机舱上的风向传感器,从而带动交流接触器闭合,起动伺服电动机左转或右转,经过减速传动,以获得低转向速度来驱动机舱转盘,使机舱旋转跟随迎风。为了防止机舱转盘向某一方旋转过多,设置电缆扭转传感器,当转盘旋转到某一设定值时,向控制系统发出信号,指令转向反向,使电缆解除缠绕。下风式风力机^④,则具有自动对风能力,随风向变化,机组自动偏航,有利于简化偏航机构

和调向控制系统。其缺点是引起塔影响效应^⑤。在低风速下运行而自动对风性能较差时,仍需机动迎风。

4.4 电气和控制系统

4.4.1 发电机

并网风力发电机组可选用同步发电机或异步发电机。同步发电机的优点是其励磁系统控制发电机的电压及无功功率,调节无功功率性能好,效率高。由于风速变化大,同步发电机要通过整步达到准同步并网,以及它的转速恒定,必须装设良好的变桨距调节机构。异步发电机结构简单、坚固,造价低,并网操作比同步发电机方便,不需同期并网装置,并网运行稳定可靠,容易实现无人值守。缺点是直接并网时冲击电流幅值大,它不能产生无功电流,并网运行时,需要由电力网提供无功电流来建立磁场,必须加装无功补偿装置来改善电力网功率因数。目前多数并网风力发电机组采用异步发电机。装在沿海盐雾潮湿地区的发电机,不宜采用开启式发电机,应选用防雾湿的封闭式防护型发电机。

4.4.2 控制系统

它是整个风力发电机组的运行指挥中心,必须在各种工况下无人值守时能自动操作,异常运行时有紧急保护措施——停机。包括:

1. 传感器部分 要求提供准确、稳定、可靠的信号。主要有采集风速、风向、低速轴和高速轴转速、机舱回转限位(电缆解扭)、机舱振动、轴承温度、液压压力等传感器。

2. 微机控制部分 主要有控制柜、主机板、存储板及采集板等,必需满足各种工况下无人值守时的自动操作,汉字记录运行数据,自动故障检查分析和整机管理。

3. 并网配电部分 设置配电柜及设备、并网电气装置,并装设继电保护装置,以防止风力发电机故障对电力网的影响。

① 叶片安装角是指叶片的翼型几何弦与叶片旋转平面所夹的角度。

② 顺桨是指风轮叶片的几何攻角趋近零升力的状态(通常用顺桨作为停机的方法)。

③ 上风式风力机是使风先通过风轮,再通过塔架的风力机。

④ 下风式风力机是使风先通过塔架,再通过风轮的风力机。

⑤ 塔影响效应是指塔架造成的气流涡流区对风力机产生的影响。

4.5 塔架

它是支撑风力发电机回转部分及以上部件的支撑物。有角钢或钢管桁架塔和圆锥钢管塔。桁架塔的缺点

是维护不便,以及刮大风时工作人员难以攀登进入机舱。现多采用圆锥钢管塔,它由钢板卷制焊接而成,形成上小下大的圆锥管,塔内装设铁梯直通机舱,结构紧凑,外形美观,虽造价较高,仍受用户欢迎。

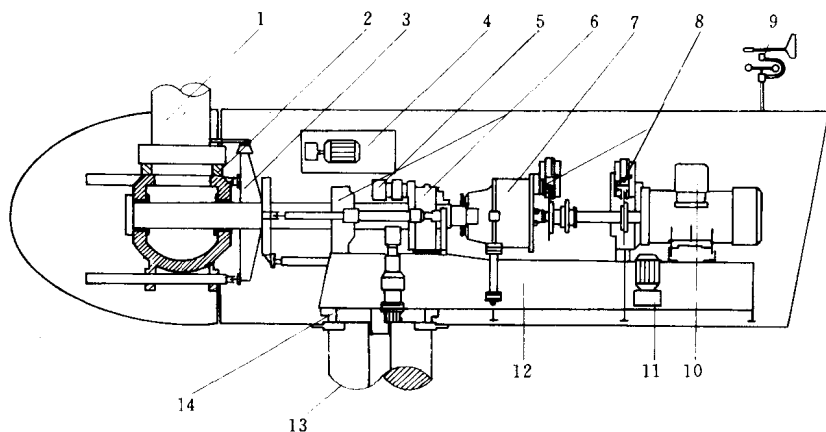


图 5-2-11 水平轴 (330kW) 风力发电机组机舱部件结构图

- 1—叶片 2—轮毂 3—变桨距机构 4—液压变桨距系统 5—液压应急顺桨
6—主轴 7—增速齿轮箱 8—制动盘 9—风向传感器 10—发电机
11—齿轮箱油泵 12—机舱转盘 13—圆锥钢管塔 14—偏航传动器

水平轴(330kW)风力发电机组机舱部件结构见图

5-2-11。

水平轴风力发电机组的功率曲线和年平均发电量曲线分别见图 5-2-12 和图 5-2-13。

5 风力发电的现状和展望

5.1 并网风力发电机组的研制

风力发电机组是风力发电场的发电单元,研制并网风力发电机组,以美国起步最早,投资最多,美国能源部主管联邦风能规划,其目标是力求使风力发电的成本达到常规能源发电成本,早日实现商业化。表 5-2-4 为美国从 1975~1982 年研制的水平轴风力发电机组一览表。

在发展大中型机组的同时,丹麦研制了水平轴、三叶片、上风式、定桨距失速调节、气动刹车和异步发电机并网的风力发电机组,虽然其消耗材料较多,但坚实可靠。丹麦是向国外大量输出风力发电机组的国家,80 年代初以 55kW 为主,80 年代后期单机容量达 450kW。例如,LM GLASFIBER 风力机叶片制造厂,出口产品约占总产量的 50%。750kW 以上机组则多采用变桨距调节,它不像失速调节会造成叶片、机舱、塔架上空气动力载荷大,而且可以充分利用风能,机组年

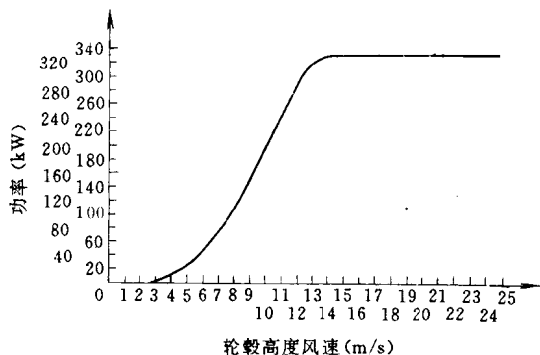


图 5-2-12 水平轴 (330kW) 风力发电机组功率曲线

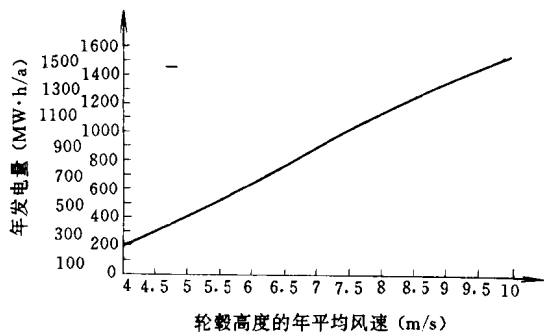


图 5-2-13 水平轴 (330kW) 风力发电机组年平均发电量曲线

表 5·2-4 美国研制的水平轴风力发电机组一览表

机 型	Mod-O	Mod-OA	Mod-1	Mod-2
建成年份	1975	1977 ~1980	1979	1980 ~1982
建设台数	1	4	1	5
功率 (kW)	100	200	2000	2500
风轮直径 (m) / 叶片数	38/2	38/2	61/2	91.5/2
轮毂高度 (m)	30	30	41	61
风轮转速 (r/min)	40	40	35	17.5
额定风速 (m/s)	—	8	—	12.3
工作风速范围 (m/s)	4.5 ~15.6	4.5 ~15.6	5 ~15.6	6~20
功率调节	变桨距	变桨距	变桨距	变桨距

发电量较多。90年代中期,风轮直径>39m的商品风力发电机组已推向市场,有德国的 Tacke TW600,丹麦的 Vestas V39-600kW, Vestas V42-600kW, Vestas V44-600kW, NORDEX N43/600, BONUS600kW, MICON600kW, NTK550/41 和美国的 Z-40 500~550kW 等机型,走向实用化,标志着商品机组正向着大型化发展。

5·2 兆瓦级大型风力发电机组研制进展

为降低单位千瓦的造价,节省风电场场地使用面积,不少国家相继研制兆瓦级大型风力发电机组样机,见表 5·2-5。

表 5·2-5 中兆瓦级大型风力发电机组 24 台都是科研样机或进行中间试验机组,其中 6 台机组已拆除或停止运行。除EOLE一台为垂直轴达里厄Φ型机

表 5·2-5 兆瓦级大型风力发电机组研制概况表

国 名	机型/安装地点	额定 功率 (kW)	额定 风速 (m/s)	风轮直径 (m) / 叶片数	轮毂 高度 (m)	轴 型 式	风轮 配 置	建成 年份	发电机 型式	备 注
美 国	Mod-1/Boone	2000	—	61/2	41	H	D	1979	S	1981 年拆除
	Mod-2/Goodnoe Hill 3 台	2500	12.3	91.5/2	61	H	U	1980	S	1986 年停运
	Mod-2/Medicine Bow 1 台	2500	12.3	91.5/2	61	H	U	1980	S	1986 年停运
	Mod-2/Solano 1 台	2500	12.3	91.5/2	61	H	U	1982	S	1987 年停运
	WTS-4/Medicine Bow	4000	15	78/2	80	H	D	1981	S	
	Mod-5B/Kahuku Pt	3200	13.4	97.5/2	61	H	U	1987	A	
德 国	GROWIAN/Kaiser-Wilhelm-Koog	3000	12	100/2	100	H	D	1984	A	1987 年停运
	Aeolus I	2000	12.5	75/2	77	H	D	1982	S	
	Aeolus I /Jade	3000	14	80/2	92	H	D	1992	S	
	WKA-60 I /Heligoland	1200	12	60/3	44	H	U	1990	S	
	WKA-60 I /Kaiser-Welhelm-Koog	1200	12	60/3	—	H	U	1991	S	
瑞 典	WTS-3/Maglap	3000	14	78/2	80	H	D	1982	S	
	Näsudden I	2000	12.5	75/2	77	H	U	1983	A	1991 年拆除
	Näsudden II	3000	14	80/2	80	H	D	1992	S	
英 国	WEG LS-1/Burgar Hill	3000	17	60/2	45	H	U	1988	S	
	Howden/Richborough	1000	13	55/3	45	H	U	1989	A	