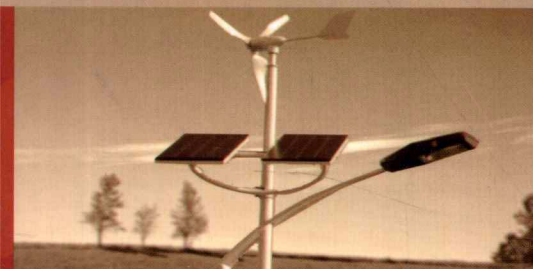




新 能 源 及 高 效 节 能 应 用 技 术 丛 书

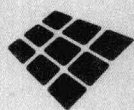
离网风光互补发电 技术及工程应用



周志敏 纪爱华 编著



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



新 能 源 及 高 效 节 能 应 用 技 术 丛 书

离网风光互补发电 技术及工程应用

周志敏 纪爱华 编著

人 民 邮 电 出 版 社

北 京

图书在版编目(CIP)数据

离网风光互补发电技术及工程应用 / 周志敏, 纪爱
华编著. — 北京: 人民邮电出版社, 2011.7
(新能源及高效节能应用技术丛书)
ISBN 978-7-115-25280-7

I. ①离… II. ①周… ②纪… III. ①风力发电②太
阳能发电 IV. ①TM614②TM615

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第066343号

内 容 提 要

本书结合我国能源规划的方针政策和国内风光互补发电技术发展的现状,以离网风光互补发电技术为核心内容,全面系统地阐述了离网风光互补发电技术基础知识和最新应用技术。全书共5章,深入浅出地阐述了离网风力发电系统的技术特点和运行条件、离网风光互补发电系统的技术特点和运行条件、离网风力发电系统和风光互补发电系统工程设计、离网风光互补发电系统的安装与调试、离网风光互补发电系统的运行与维护等内容。本书题材新颖实用、内容丰富,具有很高的实用价值,是从事离网风光互补发电技术研发、应用和维护的工程技术人员必备读物。

本书可供农村乡镇、工矿企业、各级政府从事离网风光互补发电技术推广和应用的工程技术人员及高等职业技术学院的师生阅读参考。

新能源及高效节能应用技术丛书

离网风光互补发电技术及工程应用

-
- ◆ 编 著 周志敏 纪爱华
责任编辑 毕 颖
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
三河市海波印务有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 17.5
字数: 429千字
印数: 1-4000册
 - 2011年7月第1版
2011年7月河北第1次印刷

ISBN 978-7-115-25280-7

定价: 48.00元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

广告经营许可证: 京崇工商广字第0021号

前 言

当前，能源与环境问题已成为各国经济可持续发展面临的主要问题。太阳能、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的利用进入了新的历史发展时期。《中华人民共和国可再生能源法》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。

随着离网风光互补发电技术的不断成熟，其应用领域也越来越广泛，如独立运行于无电地区的集中风光互补供电系统（村落电站）和户用风光互补发电系统，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、高速公路和铁路，用于森林防火等的监测站、部队边防哨所、航标灯、油田等。

离网风光互补发电技术是一种崭新的能源技术，在我国发展时间不长，尤其是可再生能源离网独立发电系统，从设计人员到实际操作人员，都面临许多亟须解决的实用技术问题。为此，本书针对离网风光互补发电系统实际应用中工程技术人员和用户需要解决的实际问题，介绍了离网风光互补发电技术的基本原理，离网风光互补发电系统集成设计、工程设计，离网风光互补发电系统的安装、调试、运行和维护及故障分析等实用知识。本书在写作中尽量做到有针对性和实用性，在保证科学性的同时，注意通俗性，力求做到通俗易懂和结合实际工程应用，以便于读者掌握离网风光互补发电系统的工程设计方法和离网风光互补发电的最新工程应用技术。

参加本书编写工作的有周志敏、纪爱华、周纪海、纪达奇、刘建秀、顾发娥、纪达安、纪和平、刘淑芬等。本书在写作过程中，从资料的收集到技术信息的交流，都得到了国内外的专业学者和同行的大力支持，在此表示衷心的感谢。

由于时间仓促，作者水平有限，书中不妥和错误之处，敬请读者批评指正。

目 录

第 1 章 离网风力发电系统的技术特点和运行条件	1
1.1 离网风力发电系统的组成与技术特点	1
1.1.1 离网风力发电系统的组成	1
1.1.2 风力发电机的分类及输出特性	6
1.1.3 离网风力发电机组的分类及输出功率	10
1.1.4 小型风力发电系统的技术特点	15
1.2 离网风力发电系统的运行条件	28
1.2.1 我国风能资源的分布	28
1.2.2 风能资源的主要参数	33
第 2 章 离网风光互补发电系统的技术特点和运行条件	40
2.1 离网风光互补发电系统的组成与技术特点	40
2.1.1 离网风光互补发电系统的组成	40
2.1.2 离网风光互补发电系统的技术特点及应用	43
2.2 离网风光互补发电系统的运行条件	46
2.2.1 我国太阳能资源的分布	46
2.2.2 太阳能电池组件	48
2.2.3 太阳能及光伏技术	72
2.2.4 离网风光互补发电系统的合理配置	78
第 3 章 离网风力发电系统和风光互补发电系统工程设计	81
3.1 离网风力发电系统工程设计	81
3.1.1 离网风力发电系统的集成设计	81
3.1.2 蓄电池容量的计算	82
3.2 离网风光互补发电系统工程设计	86
3.2.1 离网风光互补发电系统的集成设计	86
3.2.2 风光互补发电控制器技术	100

3.2.3	风光互补发电系统逆变技术	110
3.2.4	离网风光互补发电系统设计实例及典型配置方案	115
3.3	离网风光互补发电系统的电气工程设计	124
3.3.1	低压配电系统	124
3.3.2	风光互补配电系统设计要点	129
3.3.3	离网风光互补发电系统接地设计	140
3.3.4	离网风光互补发电系统防雷设计	149
第4章	离网风光互补发电系统的安装与调试	165
4.1	离网风光互补发电系统的安装	165
4.1.1	风力发电机选址	165
4.1.2	基础施工	170
4.2	设备安装	172
4.2.1	风力发电设备安装	172
4.2.2	单体桁架塔风力发电设备安装	180
4.2.3	太阳能电池组件安装	185
4.2.4	蓄电池和控制器及逆变器安装	189
4.3	离网风光互补发电系统的调试	191
第5章	离网风光互补发电系统的运行与维护	196
5.1	离网风光互补发电系统的运行与操作	196
5.1.1	离网风光互补发电系统的运行	196
5.1.2	离网风光互补发电系统的操作	199
5.2	离网风光互补发电系统的维护	201
5.2.1	风光互补发电系统使用与维护	201
5.2.2	蓄电池的使用与维护	204
5.3	离网风光互补发电系统故障处理	211
5.3.1	机械故障分析及处理	211
5.3.2	塔架锈蚀的原因及维修	215
5.3.3	电气故障分析及处理	216
5.3.4	阀控密封式铅酸蓄电池早期失效及自放电故障分析与处理	220
5.3.5	阀控密封式铅酸蓄电池典型物理故障分析及处理	225
5.3.6	阀控密封式铅酸蓄电池典型化学故障分析及处理	241
5.4	铅酸蓄电池修复	263
5.4.1	铅酸蓄电池修复方法	263
5.4.2	阀控密封式铅酸蓄电池修复操作方法	267
5.4.3	硫化阀控密封式铅酸蓄电池的修复	272
参考文献		274

第 1 章

离网风力发电系统的 技术特点和运行条件

1.1 离网风力发电系统的组成与技术特点

1.1.1 离网风力发电系统的组成

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

人类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、前苏联和美国利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在多风的海岛和偏僻的乡村广泛使用，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 4m/s 才适宜于发电。据测定，一台 55kW 的风力发电机组，当风速为 9.5m/s 时，机组的输出功率为 55kW；当风速为 8m/s 时，功率为 38kW；风速为 6m/s 时，只有 16kW；而风速为 5m/s 时，仅为 9.5kW。可见风力愈大，经济效益也愈大。

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。此外，为满足市场的不同需求，延伸出来的风光互补技术不仅推动了中小型风电技术的发展，还为中小型风电技术开辟了新的市场。

(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，由于当地风能资源丰富，风电产业受到政府的助推，大型风电技术和设备的研发在国际上遥遥领先。目前我国政府也开始助推大型风电技术的发展，并出台一系列政策，引导产业发展。大型风电技术都是为大型风力发电机组设

计的,而大型风力发电机组应用区域对环境的要求十分严格,都是应用在风能资源丰富而其他资源有限的风电场上,常年接受各种各样恶劣环境的考验。环境的复杂多变性,使得风能的应用对技术的高度要求直线上升。目前国内大型风电技术普遍还不成熟,大型风电的核心技术仍然依靠国外,此外,并网发电的技术还在完善,一系列的问题还在制约大型风电技术的发展。

(2) 中小型风电技术

在 20 世纪 70 年代,中小型风电技术在我国风能资源较好的内蒙古、新疆一带就已经得到了发展。最初中小型风电技术被广泛应用在“送电到乡”的项目中,为一家一户的农牧民家用供电。随着技术的更新与不断的完善发展,中小型风电技术不仅能单独应用,还与光伏发电互补,构成分布式独立供电系统。这些年来,随着我国中小型风电设备出口的稳步增加,在国际上,我国的中小型风电技术和风光互补技术已跃居国际领先地位。

中小型风电技术成熟,受自然资源限制相对较小,作为分布式独立发电效果显著,不仅可以并网,而且还能结合光电形成更稳定可靠的风光互补技术。况且其技术完全自主国产化,无论从技术还是价格上讲,在国际上都十分具有竞争优势。

目前在国内中小型风电的技术中,低风速启动、低风速发电、变桨矩、多重保护等一系列技术得到国际市场的瞩目和国际客户的一致认可,已处于国际领先地位。中小型风电技术最终是为满足分布式独立供电的终端市场的需求,而并非如大型风电技术是为满足发电并网的国内垄断性市场的需求,其技术的更新速度必须适应广阔而快速发展的市场需求。

2. 风力发电的优势及技术特点

(1) 风力发电的优势

风能是没有公害的能源之一,而且它取之不尽,用之不竭。对于缺水、缺燃料和交通不便的沿海岛屿、草原牧区、山区和高原地带,可因地制宜地利用风力发电。风能作为一种清洁的可再生能源,越来越受到世界各国的重视。每装一台单机容量为 1 000kW 的风能发电机,每年可以减排 2 000t 二氧化碳(相当于种植 1 平方英里的树木)、10t 二氧化硫、6t 二氧化氮。风能产生 1 000kW·h 的电量可以减少 0.8~0.9t 的温室气体,而且风力发电机组不会危害鸟类和其他野生动物。在常规能源告急和全球生态环境恶化的双重压力下,风能作为一种高效清洁的新能源有着巨大的发展潜力。

风能是面向未来最清洁的能源之一。兆瓦级全功率风力发电变流器是风力发电机与电网之间的桥梁和纽带,它是一种将多变的风能转换成稳定的电能馈入电网的装置。随着大型机组技术的成熟和产品商品化进程的加快,风力发电成本降低,而且不消耗资源、不污染环境,具有广阔的发展前景。风电场建设周期一般很短,一台风力发电机组的运输安装时间不超过 3 个月,万千瓦级风电场建设周期不到 1 年,而且安装一台可投产一台;装机规模灵活,可根据资金多少来确定,为筹集资金带来便利;运行简单,可完全做到无人值守;实际占地少,机组与监控、变电等建筑仅占风电场约 1%的土地,其余场地仍可供农、牧、渔业使用;对土地要求低,在山丘、海边、河堤、荒漠等地形条件下均可建设;在发电方式上还有多样化的特点,既可联网运行,也可和柴油发电机等构成互补系统或独立运行,这为解决边远无电地区的用电问题提供了现实可能性。

由于风电市场的扩大、风力发电机组产量和单机容量的增加以及技术上的进步,风力发电机组每千瓦的生产成本在过去近 20 年中稳定下降。以美国为例,风力发电的成本降低了 80%。20

世纪80年代安装第一批风力发电机时,每发 $1\text{kW}\cdot\text{h}$ 电的成本为30美分,而现在只需4美分。另一方面,由于风力发电机组设计和工艺的改进(如叶片翼型改进等),其性能和可靠性提高,加上塔架高度增加以及风电场选址评估方法的改进等,风力发电机组的发电能力有相当大的提高,每平方米叶轮扫过面积的年发电量从20世纪80年代初期的 $400\sim 500\text{kW}\cdot\text{h}$,提高到目前的 $1\,000\text{kW}\cdot\text{h}$ 以上。一台标准的 600kW 风力发电机,当各种条件都处于最佳状态时,每年可发电约2000万千瓦时,即每平方米叶轮扫过面积的年发电量可达 $1\,400\sim 1\,500\text{kW}\cdot\text{h}$ 。目前风电场的容量系数(即1年的实际发电量除以装机额定功率与1年8760h的乘积)一般为 $0.25\sim 0.35$ 。

从风电场的造价方面看,中国风电场的造价比欧洲高,平均造价为8500元/千瓦左右,基本上是欧洲5年前的水平。建设一座装机100MW的风电场,成本在8~10亿元,而同样规模的火电厂成本约为5亿元,水电站为7亿元。当然,独立运行的非并网风电系统,由于需要蓄电池和逆变器等,同时容量系数较小,所以发电成本比并网型机组要高。

从技术层面上看,风电的发展也经历了波折的历程。1887年,美国人Charles F. Brush建造了第一台风力发电机组,叶片多达144个。此后,人们又经过100多年艰辛的探索,多种技术革新和市场应用的考验,才统一成今天的上风向、水平轴、三叶片、管式塔风发电力机。

同时,每个时期的风电技术都有自身的历史局限性。例如,早在1941年,美国的Smith-Putnam风力发电机就装备了液压变桨矩系统,但受制于当时的技术水平,装置庞大、笨重、复杂。定桨矩的“丹麦概念”Gedser风力发电机采用失速控制,叶尖有气动制动装置,成为风电技术史上的一座里程碑。到了今天,兆瓦级大型风力发电机广泛采用大叶片,因所承受的气动推力大,对生产工艺要求很高,变桨矩技术又成为技术主流。相关领域技术上的突破,又会推动风电技术不断向前发展。如全功率逆变器因复杂、不可靠等因素曾让人望而却步,而大功率IGBT/IGCT的成熟和多电平技术的完善,使之在技术上完全成为可能。

风电技术日趋成熟,产品质量可靠,可利用率达95%以上,风能已成为一种安全可靠的能源。风力发电的经济性日益提高,发电成本已接近煤电,低于油电与核电,若计及煤电的环境保护与交通运输的间接投资,则风电经济性将优于煤电。对沿海岛屿、交通不便的边远山区、地广人稀的草原牧场,以及远离电网和近期内电网还难以达到的农村、边疆来说,风能可作为解决生产和生活能源的一种有效途径。

(2) 风力发电的特点

① 风能是取之不尽、用之不竭的清洁、无污染、可再生能源,用它发电十分有利。与火力发电、燃油发电、核电相比,风力发电无需购买燃料,也无需支付运费,更无需对发电残渣、大气进行环保治理,风能是绿色能源。

② 风力发电有很强的地域性,不是任何地方都可以建站的。风力发电站必须建在风力资源丰富的地区,即风速大、持续时间长的地区。风能资源的大小与地势、地貌有关,山口、海岛常是优选地址。

③ 风的季节性决定了风力发电具有局限性,对风力发电的使用有以下几种方式。

- 风力发电机群并网运行,有风发电,电能送入电网,无风不发电。
- 在无电网的高山、海岛、牧区,风力发电机与柴油发电机并联运行。有风时风力发电,无风时由柴油发电机发电,对用户来说时时都有电。
- 在无电网的高山、海岛、牧区,采用蓄电池储能的AC/DC/AC(交/直/交流)风力发电系统。也就是有风时,风力发电机发出交流电,经整流为直流电对蓄电池充电,再利用电

力电子元器件制造的逆变器将蓄电池中的直流电转换为三相恒频恒压的交流电。这种系统多用在高山雷达站、微波中继站、海洋灯塔、航标灯等场合。

- 在无电网的高山、海岛、牧区，采用蓄电池储能的 AC/DC/AC 风光互补发电系统。在有风而太阳光不充足时，风力发电机发出交流电，经整流变为直流电，对蓄电池充电，再利用电力电子元器件制造的逆变器将蓄电池中的直流电转换为三相恒频恒压的交流电。在无风而太阳光充足时，由太阳能电池组件发电，发出的直流电经 DC/DC 转换对蓄电池充电，再利用电力逆变器将蓄电池中的直流电转换为三相恒频恒压的交流电。在有风而太阳光充足时，风力发电机与太阳能电池组件同时发电，对蓄电池充电。风光互补发电系统多用在高山雷达站、微波中继站、海洋灯塔、航标灯塔等场合。

空气流动的动能作用在风力机的叶轮上，动能被转换成机械能，从而推动风力机的叶轮旋转。如果将叶轮的转轴与发电机的转轴相连，就会带动发电机发出电来。由于风力是随机变化的，此类风力发电机发出的电会时有时无，电压和频率都不稳定，是没有实际应用价值的。一阵狂风吹来，风力机的风轮越转越快，系统就会被吹垮。为了解决这些问题，现代风力机增加了齿轮箱、偏航系统、液压系统、制动系统和控制系统等。

风力机的叶轮一般由 2~3 个叶片和轮毂所组成，其功能是将风的动能转换为机械能。除小型风力机的叶片部分采用木质材料外，中大型风力机的叶片都采用玻璃纤维或高强度复合材料制成。风力机叶片都要装在轮毂上。轮毂是叶轮的枢纽，也是叶片根部与主轴的连接部件。所有从叶片传来的力，都通过轮毂传递到传动系统，再传到风力机驱动的对象。同时轮毂也是控制叶片桨矩（使叶片做俯仰转动）的部件。轮毂的作用是连接叶片和低速轴，要求能承受大的、复杂的载荷。中小型风力机常采用刚性连接，兆瓦级风力机常采用跷跷板连接方式。

水平轴风力机的风轮沿水平轴旋转，以便产生动力。变桨矩风力机风轮的叶片要围绕根部的中心轴旋转，以便适应不同的风况。在停机时，叶片尖部要甩出，以便形成阻尼。变桨矩风力机的液压系统用于调节叶片桨矩、阻尼、停机、制动等状态。风力机齿轮箱可以将很低的风轮转速（600kW 的风力发电机组通常为 27r/min）变为很高的发电机转速（通常为 1500r/min）。同时也使得发电机易于控制，实现稳定的频率和电压输出。风力机的偏航系统可以使风轮扫掠面积总是垂直于主风向。

3. 风力发电系统构成

把风的动能转换成机械能，再把机械能转换为电能，这就是风力发电。风力发电技术是一项多学科的、可持续发展的、绿色环保的综合技术。风力发电所需要的装置，称作风力发电机组。

风力发电机组主要由两大部分组成：风力机部分将风的动能转换为机械能，发电机部分将机械能转换为电能。根据风力发电机这两大部分采用的不同结构类型、不同的技术特征，以及不同的组合，风力发电机组可以有多种多样的分类。风力发电机组主要由风轮、传动与变速机构、发电机、塔架、迎风及限速机构组成。大型风力发电机组发出的电能直接并到电网，向电网馈电；小型风力发电机组一般将风力发电机组发出的电能用储能设备储存起来（一般用蓄电池），需要时再提供给负载（可为直流供电，也可用逆变器变换为交流电供给用户）。

（1）风轮

风轮是把风的动能转变为机械能的重要部件，它由 2 只（或更多只）螺旋桨形的叶轮组成。当风吹向桨叶时，桨叶上产生气动力驱动风轮转动。桨叶的材料要求强度高、重量轻，目

前多用玻璃钢或其他复合材料（如碳纤维）来制造。

风轮是集风装置，它的作用是把流动空气具有的动能转换为风轮旋转的机械能。一般风力机的风轮由2个或3个叶片构成。在风的吹动下，风轮转动起来，使空气动力能转换成了机械能（转速+扭矩）。风轮的轮毂固定在发电机轴上，风轮的转动驱动了发电机轴旋转，带动三相发电机发出三相交流电。

（2）调向机构

调向机构是用来调整风力机的风轮叶片与空气流动方向相对位置的机构，其功能是使风力发电机的风轮随时都迎着风向，从而能最大限度地获取风能。因为当风轮叶片旋转平面与气流方向垂直时，也即是迎着风向时，风力机从流动的空气中获取的能量最大，因而风力机的输出功率最大，所以调向机构又称为迎风机构（国外通称偏航系统）。小型水平轴风力机常用的调向机构有尾舵和尾车，在风电场中并网运行的大中型风力机则采用伺服电动机。

（3）发电机

在风力发电机中，已采用的发电机有3种，即直流发电机、同步交流发电机和异步交流发电机。风力发电机的工作原理比较简单，风轮在风力的作用下旋转，它把风的动能转换为风轮轴的机械能。发电机在风轮轴的带动下旋转发电。容量在10kW以下的小型风力发电机组，采用永磁式或自励式交流发电机，经整流后向负载供电及向蓄电池充电；容量在100kW以上的并网运行的风力发电机组，则应采用同步发电机或异步发电机。

恒速同步发电机的优点是，通过励磁系统可控制发电机的电压和无功功率，发电机效率高。同步发电机要通过同步设备的整步操作达到准同步并网（并网困难），由于风速变化大，以及同步发电机要求转速恒定，风力机必须装有良好的变桨距调节机构。

恒速异步发电机结构简单、坚固、造价低。异步发电机投入系统运行时，由于是靠转差率来调节负荷，因此对机组的调节精度要求不高，不需要同步设备的整步操作，只要转速接近同步转速时就可并网，且并网后不会产生振荡和失步。缺点是并网时冲击电流幅值大，不能产生无功功率。

（4）升速齿轮箱

由于风轮的转速比较低，而且风力的大小和方向经常变化着，这又使转速不稳定。所以，在带动发电机之前，还必须附加一个把转速提高到发电机额定转速的变速齿轮箱，再加一个调速机构，使转速保持稳定，然后再连接到发电机上。升速齿轮箱的作用是将风力机轴上的低速旋转输入转换为高速旋转输出，以便与发电机运转所需要的转速相匹配。

（5）塔架

塔架是支撑风轮、尾舵和发电机的构架。它一般比较高，以捕捉更多的风能，为的是获得较大的和较均匀的风力，又要有足够的强度。铁塔高度视地面障碍物对风速影响的情况，以及风轮的直径大小而定，一般在6~20m范围内。塔架是风力发电机的支撑机构，稍大的风力发电机塔架一般采用由角钢或圆钢组成的桁架结构。

（6）控制系统

100kW以上的中型风力发电机组及1MW以上的大型风力发电机组皆配有由微机或可编程控制器（PLC）组成的控制系统来实现控制、自检和显示功能。控制系统的主要功能如下。

① 按预先设定的风速值（一般为3~4m/s）自动启动风力发电机组，并通过软启动装置将异步发电机并入电网。

② 借助各种传感器自动检测风力发电机组的运行参数及状态，包括风速、风向、风力机

风轮转速、发电机转速、发电机温升、发电机输出功率、功率因数、电压、电流以及齿轮箱轴承的油温、液压系统的油压等。

③ 当风速大于最大运行速度（一般设定为 25m/s）时实现自动停机。

④ 故障保护。

⑤ 通过调制解调器与上位机连接。

风力发电系统还设计有电磁制动、变桨矩等多种转速控制技术以及手制动系统，机械制动与电磁停车共同作用以保障系统安全运行。

小型风力发电系统效率很高，但它不是只由一个发电机组成的，而是一个有一定科技含量的小系统：风力发电机+充电器+数字逆变器。风力发电机由机头、转体、尾翼、叶片组成，每一部分都很重要，各部分功能为：叶片用来接受风力并通过机头转为电能；尾翼使叶片始终对着来风的方向从而获得最大的风能；转体能使机头灵活地转动，以实现尾翼调整方向的功能；机头的转子是永磁体，定子绕组切割磁力线产生电能。

小型风力发电机不采用大型机的方法自动并网，而且使用小型风力发电机多是偏远地区。由于风速的多变，风力发电机的电压及频率变化，不可能直接被负载利用，这就出现了储能环节，以便从储能设备中提取能源。一般小型风力发电机使用蓄电池储能，先用整流器将发电机的交流电转换成直流电向蓄电池充电，然后用逆变器将蓄电池的直流电转换成交流电供给负载。整流器和逆变器可以做成两个装置，也可以合为一体。

风力发电机多年的运行表明，风力发电机的逆变器所要着重解决的问题是可靠性及寿命问题，而不是技术性能指标。风力发电机用的逆变器所面临的负载不像一般通信和计算机设备，它必须保证能常年不断的运行，还要能承受风速、负载变化的冲击。目前小型风力发电机用逆变器虽已比较完善，但是在实际应用中仍然存在一些技术难题。

目前最好的小型风力发电机只保留了 3 个运动部件（运动部件越少越可靠已是大家的共识），一是风轮驱动发电机主轴旋转，二是尾翼驱动风力发电机组的机头偏航，三是为大风限速保护而设的运动部件。前两个运动部件是不可缺少的，这也是风力发电机的基础，实践中这两个运动部件故障率并不高，主要是限速保护机构损坏的情况多。要彻底解决小型风力发电机的可靠性问题，必须在限速方式上有好的解决方法。

1.1.2 风力发电机的分类及输出特性

1. 风力发电机分类

（1）按风力发电机功率分类

以风力发电机的容量分为微型（1kW 以下）、小型（1~10kW）、中型（10~100kW）和大型（100kW 以上）风力发电机。

（2）按风力发电机收集风能的结构形式分类

根据风力发电机收集风能的结构形式、在空间的布置、风力发电机组旋转主轴的方向（即主轴与地面相对位置）可分为水平轴风力发电机和垂直轴风力发电机。

① 风轮轴线的安装位置与水平面夹角不大于 15° 的风力发电机称为水平轴风力发电机，水平轴风力发电机的风轮围绕一个水平轴旋转，风轮轴与风向平行，风轮上的叶片是径向安置的，与旋转轴相垂直，并与风轮的旋转平面成一角度（称为安装角）。水平轴风力发电机叶片如图 1-1 所示。

水平轴风力发电机可以是升力装置（即升力驱动风轮），也可以是阻力装置（即阻力驱动风轮）。大多数水平轴风力发电机具有对风装置。小型风力发电机一般采用尾舵，大型风力发电机则采用对风敏感组件。

水平轴风力发电机一般由风轮增速器、调速器、调向装置和塔架等部件组成，大中型风力发电机还有自动控制系统。这种风力发电机的功率从几十千瓦到数兆瓦，是目前最具有实际开发价值的风力发电机。水平轴风力发电机有传统风车、低速风力发电机及高速风力发电机三大类型。水平轴风力发电机的主要技术参数如下。

- 风轮直径，通常风力发电机的功率越大，直径越大。
- 叶片数目，高速发电用风力发电机为 2~4 片，低速风力发电机大于 4 片。
- 叶片材料，现代风力发电机叶片采用高强度、低密度的复合材料。
- 风能利用系数，一般为 0.15~0.5。
- 启动风速，一般为 3~5m/s。
- 停机风速，通常为 15~35m/s。
- 输出功率，现代风力发电机一般为几百千瓦到几兆瓦。
- 塔架高度等。

水平轴风力发电机的式样很多，有的具有反转叶片的风轮，有的在一个塔架上安装多个风轮，以便在输出功率一定的条件下减少塔架的成本，还有的水平轴风力发电机在风轮周围产生旋涡，集中气流，增加气流速度。

② 垂直轴风力发电机。垂直轴风力发电机的风轮不随风向改变而调整方向，而是围绕一个垂直轴旋转，风轮轴与风向垂直。其优点是可以接受来自任何方向的风，因而当风向改变时，无需对风。由于不需要调向装置，所以它的结构设计简化。垂直轴风力发电机的另一个优点是齿轮箱和发电机可以安装在地面上，便于维修。

垂直轴风力发电机的机型有 S 型、H 型、 Φ 型等。目前垂直轴风力发电机尚未大量商品化生产。它有许多特点，如不需大型塔架、发电机可安装在地面上、维修方便及叶片制造简便等。目前人们对其的研究日益增多，各种形式的垂直轴风力发电机不断出现。

垂直轴风力发电机常见的结构有 S 型风轮、达里厄（Darrieus）式风轮和旋翼式风轮 3 种，如图 1-2 所示。S 型风轮由两个轴线错开的半圆柱形叶片组成，其优点是启动转矩较大，缺点是围绕着风轮所产生的不对称气流会对它产生侧向推力。对于较大型的风力发电机，因为受偏转与安全极限应力的限制，采用这种结构形式是比较困难的。

达里厄（Darrieus）型风力发电机是利用翼型的升力做功，是水平轴风力发电机的主要竞争者。达里厄风力发电机有多种形式，基本上是直叶片和弯叶片两种。

垂直轴风力发电机在风向改变时，无需对风向。在这一点上，相对于水平轴风力发电机是一大优点。这可使结构简化，同时也减少了风轮对风向时的陀螺力。

旋翼式风力发电机从理论上讲，可以不像水平轴风力发电机那样要求迎风装置，但它同样存在超过工作速度需要限速的问题。为了限速，其机构必然复杂，其结构简单的优越性就不复存在了。该风力发电机由于一些技术难题仍未得到解决，因此目前还没有进入实际应用阶段。

最早的垂直轴风力发电机是一种圆弧形双叶片结构（ Φ 型或称为达里厄型），由于其受风面积小，相应的启动风速较高，一直未得到大力发展。我国也在前几年做了一些尝试，但效果始终不理想。H 型结构的风力发电机与科技的发展特别是计算机技术的发展密切相关，由

于 H 型垂直轴风力发电机的设计需要大量的空气动力学计算以及数字模拟计算，采用人工的方法计算一次至少需要几年的时间，而且不是一次计算就能得到正确的结果，所以在计算机还不是很发达的年代，人们根本无法完成这一设计构思。

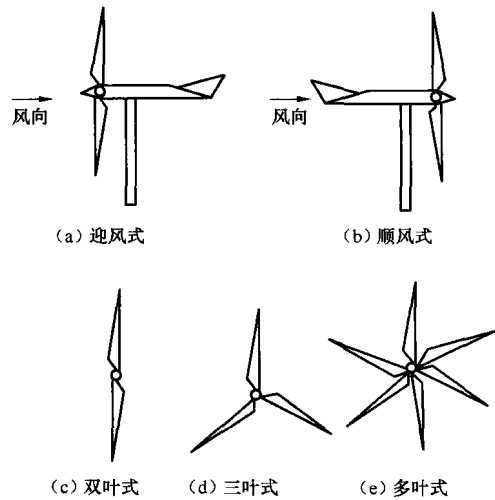


图 1-1 水平轴风力发电机和叶片

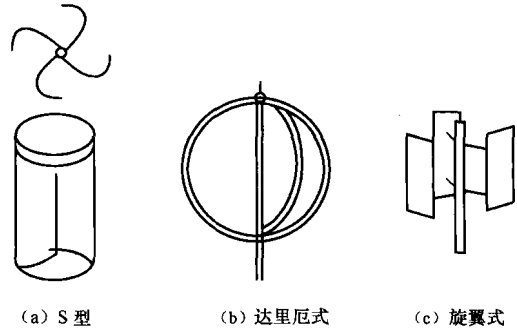


图 1-2 垂直轴风力发电机

H 型垂直轴风力发电机采用空气动力学原理，针对垂直轴旋转的风洞模拟，叶片选用了飞机机翼的形状，在风轮旋转时，它不会因变形而改变效率；风轮由 4~5 个与地面垂直的直线叶片组成，由四角形或五角形形状的轮毂固定、连接叶片的连杆，组成风轮。

根据 H 型风力发电机的原理，其风轮的转速上升速度提高较快（力矩上升速度快），它驱动发电机的发电功率上升速度也相应变快，发电曲线变得饱满。在同样功率下，垂直轴风力发电机的额定风速较现有水平轴风力发电机要小，并且它在低风速运转时发电量也较大。

由于此种设计结构采用了特殊空气动力学原理、三角形向量法的连接方式以及直驱式结构，风轮的受力主要集中于轮毂上，因此抗风能力较强；此种设计的特性还体现在对周围环境的影响上，如运转时无噪声以及电磁干扰小等，使得新型垂直轴风力发电机的优越性非常明显。

目前，生产该类型垂直轴风力发电机产品最多的是日本，英国、加拿大等国也在研制中。这些国家的大部分产品在风轮设计当中采用平行连接杆，这种方式对发电机输出轴要求较高，并且结构相对复杂，现场安装程序也偏多。另外，从力学方面分析，H 型垂直轴风力发电机功率越大、叶片越长、平行杆的中心点与发电机轴的中心点距离越长，抗风能力就越差，而采取三角形向量法的连接方式弥补了上述的一些缺点。

(3) 按风轮转速分类

风力发电机按风轮转速分为高速风力发电机和低速风力发电机。

(4) 按照风力发电机组接受风的方向及塔架位置分类

按照风力发电机组接受风的方向及塔架位置分为上风向型（叶轮正面迎着风向，即在塔架的前面迎风旋转）和下风向型（叶轮背顺着风向）两种类型。上风向风力发电机一般需要调向装置来保持叶轮迎风，而下风向风力发电机则能够自动对准风向，从而免除了调向装置。但对于下风向风力发电机，由于一部分空气通过塔架后再吹向叶轮，这样，塔架就干扰了流过叶片的气流而形成所谓的塔影效应，使效率和性能有所降低。

(5) 按照桨叶数量分类

风力发电机按照桨叶数量可分为单叶片、双叶片、三叶片和多叶片型风力发电机。叶片的数目由很多因素决定，其中包括空气动力效率、复杂度、成本、噪声、美学要求等。大型风力发电机可由1、2或者3个叶片构成。叶片较少的风力发电机通常需要更高的转速以提取风中的能量，因此噪声比较大。而如果叶片太多，它们之间会相互作用而降低系统效率。

目前三叶片风力发电机是主流。从美学角度来看，三叶片的风力发电机看上去较为平衡和美观。

(6) 从桨叶的形式分类

风力发电机按桨叶的形式分为螺旋桨式、 Φ 型、S型、H型等。

(7) 按照桨叶受力方式和工作原理分类

风力发电机按照叶片受力方式和工作原理可分为升力型和阻力型两类。升力型风力发电机旋转速度快，阻力型旋转速度慢。对于风力发电，多采用升力型水平轴风力发电机。大多数水平轴风力发电机具有对风装置，能随风向改变而转动。对于小型风力发电机，这种对风装置采用尾舵；而对于大型的风力发电机，则采用风向传感组件以及伺服电动机组成的传动机构。

(8) 按照功率传递的机械连接方式分类

风力发电机按照功率传递的机械连接方式分为有齿轮箱型风力发电机和无齿轮箱的直驱型风力发电机。有齿轮箱型风力发电机的风轮通过齿轮箱和其高速轴及万能弹性联轴节，将转矩传递到发电机的传动轴，联轴节具有很好的吸收阻尼和震动的特性，可吸收适量的径向、轴向和一定角度的偏移，并且联轴节可阻止机械装置的过载。而直驱型风力发电机则另辟蹊径，配合采用了多项先进技术，风轮的转矩可以不通过齿轮箱增速而直接传递到发电机的传动轴，这样的设计简化了装置的结构，减少了故障概率。

2. 风力发电机输出特性

具有固定桨矩的水平轴风轮产生的扭矩随风速和转速变化。如果叶片的旋转速度太低，叶片将失速，风轮输出的扭矩下降，因此为了从气流中取得最大功率输出（当气流速度变化时），必须改变叶片的桨矩角或叶片的转速。现在很多风力发电机风轮都设计成变桨矩叶片。

风力发电机的风轮转速若随风速改变，可从空气中取得最大功率，但对于由风轮驱动的同异步交流发电机而言，这并不是最佳的选择。

优化设计的解决方法是准许风轮转速随风速变化，同时使用变速恒频发电系统，以得到所需频率的电。风力发电机输出功率曲线如图1-3所示，其中 v_C 为启动风速， v_R 为额定风速，此时风力发电机组输出额定功率， v_P 为截止风速。

当风速小于启动风速时，风力发电机组不能转动。风速达到启动风速后，风力发电机组

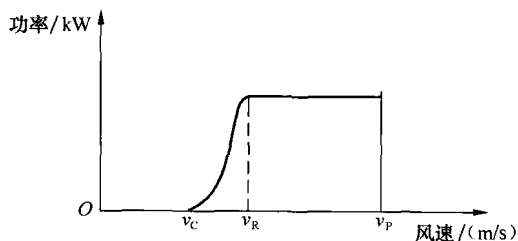


图 1-3 风力机输出功率曲线

开始转动，带动发电机发电，输出电能供给负载以及给蓄电池充电。当蓄电池组端电压达到设定的最高值时，信号电压通过控制电路进行开关切换，使系统进入稳压闭环控制，既能保持对蓄电池充电，又不致使蓄电池过充。在风速超过截止风速时，风力发电机组通过机械限速机构使风力发电机在一定转速下限速运行或停止运行，以保证风力发电机不致损坏。

普通风力发电机至少需要 3m/s 的风速才能启动, 3.5m/s 的风速才能发电, 一定程度上限制了离网型小型风力发电机在我国很多地区的运用。而采用全永磁悬浮风力发电机, 由于使用微摩擦、启动力矩小的磁悬浮轴承, 在 1.5m/s 的微弱风速下就能启动, 2.5m/s 的风速就能发电, 能效提高约 20%, 能广泛应用于全国 80% 的地区。经中国机械工业风力发电机械产品质量监督检测中心检测, 全永磁悬浮风力发电机组的启动力矩降至国家标准的 $1/12$ 左右, 启动风速降低了 57.14%, 切入风速降低 23.81%, 额定功率提高 20.57%。

3. 风力发电机的变桨距调节

风力发电机通过叶轮捕获风能, 将风能转换为作用在轮毂上的机械转矩。变桨距调节方式是通过改变叶片迎风面与纵向旋转轴的夹角, 从而影响叶片的受力和阻力, 限制大风时风力发电机组输出功率的增加, 保持输出功率恒定。采用变桨距调节方式, 风力发电机功率输出曲线平滑。在额定风速以下时, 控制器将叶片攻角置于零度附近, 不做变化, 近似等同于定桨距调节。在额定风速以上时, 变桨距控制结构发生作用, 调节叶片攻角, 将输出功率控制在额定值附近。变桨距风力发电机的启动速度较定桨距风力发电机低, 停机时传递冲击应力相对缓和。正常工作时, 主要是采用功率控制, 在实际应用中, 功率与风速的立方成正比。较小的风速变化会造成较大的风能变化。

由于变桨距调节风力发电机受到的冲击较其他风力发电机要小得多, 可减少材料使用率, 降低整体重量, 且变桨距调节型风力发电机在低风速时, 可使桨叶保持良好的攻角, 比失速调节型风力发电机有更好的能量输出, 因此比较适合于平均风速较低的地区。

变桨距调节的另外一个优点是, 当风速达到一定值时, 失速型风力发电机必须停机, 而变桨距型风力发电机可以逐步变化到一个桨叶无负载的全翼展开模式位置, 避免停机, 增加发电机的发电量。变桨距调节的缺点是对阵风反应要求灵敏。失速调节型风力发电机由于风的震动引起的功率脉动比较小, 而变桨距调节型风力发电机则比较大, 尤其对于采用变桨距方式的恒速风力发电机, 这种情况更明显。为此, 要求风力发电机的变桨距系统对阵风的响应速度要足够快, 才可以减轻此现象。

风力机的变桨距调节技术、发电机的变速恒频发电技术是风力发电技术发展的趋势, 也是当今风力发电的核心技术。目前, 在我国得到广泛使用的风力发电机主要是水平轴式风力发电机, 水平轴式风力发电机是目前技术最成熟、生产量最多的一种机型。它由风轮、增速齿轮箱、发电机、偏航装置、控制系统、塔架等部件组成。从大的结构划分来说, 风力发电机可由风轮和发电机两部分构成, 空气流动的动能作用在风轮上, 将动能转换成机械能, 从而推动风轮旋转。这样就通过风轮将风能转换为机械能, 低速转动的叶轮通过传动系统由增速齿轮箱增速, 将动力传递给发电机, 将机械能转换成电能。在这里齿轮箱可以将很低的风轮转速(600kW 的风力发电机组通常为 27r/min)变为很高的发电机转速(通常为 1500r/min)。同时也使得发电机易于控制, 实现稳定的频率和电压输出。

1.1.3 离网风力发电机组的分类及输出功率

1. 风力发电机组的分类

(1) 按风力发电机组的桨叶接受风能的功率调节方式分类

① 定桨距(失速型)风力发电机组。定桨距风力发电机组的桨叶与轮毂的连接是固定的, 当风速变化时, 桨叶的迎风角度不能随之变化。由于定桨距机组结构简单、性能可靠, 在 20 年来的风能开发利用中一直占据主导地位。

② 变桨矩风力发电机组。变桨矩风力发电机组的叶片可以绕叶片中心轴旋转，使叶片攻角可在一定范围内（一般为 $0^{\circ} \sim 90^{\circ}$ ）调节变化，其性能比定桨矩型提高许多，但结构也趋于复杂，多用于大型机组上。

（2）按风力发电机组的叶轮转速是否恒定分类

① 恒速风力发电机组的优点是设计简单可靠，造价低，维护量小；缺点是气动效率低，结构载荷高，并网运行给电网造成波动，从电网吸收无功功率。

② 变速风力发电机组的优点是气动效率高，机械应力小，功率波动小，成本效率高，支撑结构轻；缺点是功率对电压降敏感，电气设备的价格较高，维护量大。其常用于大容量的主力机组。

（3）按风力发电机组的发电机类型分类

按风力发电机组的发电机类型可分为两大类：异步发电机组和同步发电机组。只要选用适当的变流装置，它们都可以用于变速运行风力机。同步发电机运行时的频率与工频电网的频率完全相同，同步发电机也被称为交流发电机。异步发电机运行时的频率比工频电网频率稍高，异步发电机常被称为感应发电机。

异步发电机与同步发电机都有一个不旋转的部件，被称为定子，这两种发电机的定子相似，两种发电机的定子叠片铁芯上都绕三相绕组，通电后产生一个以恒定转速旋转的磁场。尽管两种发电机有相似的定子，但它们的转子是完全不同的。同步发电机中的转子有一个通直流电的绕组，称为励磁绕组，励磁绕组建立一个恒定的磁场锁定定子绕组建立的旋转磁场。因此，转子始终能以一个恒定的与定子磁场和工频电网频率同步的转速旋转。在某些设计中，转子磁场是由永磁体产生的，但这对大型发电机来说不常用。

异步发电机的转子是由一个两端都短接的笼型绕组构成的，转子与外界没有电的连接，转子电流由转子切割定子旋转磁场的相对运动而产生。如果转子旋转速度完全等于定子旋转磁场的速度（与同步发电机一样），这样它们之间就没有相对运动，也就没有转子感应电流。因此，感应发电机总的转速总是比定子旋转磁场速度稍高，其速度差叫滑差，在正常运行期间滑差大概为1%。

① 同步发电机。同步发电机应用非常广泛，在核电、水电、火电等常规发电厂中所使用的几乎都是同步发电机。在风力发电中同步发电机既可以独立供电，又可以并网发电。然而同步发电机在并网时必须要有同期检测装置来比较发电机侧和系统侧的频率、电压、相位，对风力发电机进行调整，使发电机发出电能的频率与系统一致；操作自动电压调压器将发电机电压调整到与系统电压相一致；同时，微调风力机的转速（从周期检测盘上监视），使发电机的电压与系统的电压相位相吻合，就在频率、电压、相位同时一致的瞬间，合上断路器将风力发电机并入系统。同期装置可采用手动同期并网和自动同期并网。但总体来说，由于同步发电机造价比较高，同时并网麻烦，故在并网风力发电机中很少采用。同步发电机按其产生旋转磁场的磁极的类型又可分为以下几种。

- 电励磁同步发电机。转子为线绕凸极式磁极，由外接直流电流励磁来产生磁场。

- 永磁同步发电机。转子为铁氧体材料制造的永磁体磁极，通常为低速多极式，不用外界励磁，简化了发电机结构，因而具有多种优势。永磁同步发电机是一种将普通同步发电机的转子改变成永磁结构的发电机，常用的永磁材料有铁氧体（ BaFeO ）、钕钴（ SmCo ）等。永磁同步发电机一般用于小型风力发电机组中。

② 异步发电机。异步发电机按其转子结构不同又可分为以下几种。

- 笼型异步发电机。转子为笼型。由于其结构简单可靠、廉价、易于接入电网，而在中小型机组中得到大量的应用。