

941

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

风力发电机组的控制技术

叶杭冶 编著



机械工业出版社

本书在风力机的空气动力学原理和能量转换原理的基础上,系统地介绍了定桨距风力发电机组、变桨距风力发电机组、变速风力发电机组的基本控制要求与控制策略;介绍了风力发电机组的软并网技术、变桨距技术和变速风力发电机组在实现对最佳功率曲线的跟踪过程中的各种控制和处理方法。对基于模糊逻辑和神经网络的智能控制技术也作了简要介绍。最后介绍了电力电子装置引入谐波和变功率因素等问题的控制方案。

本书主要供从事风力发电技术研究的工程技术人员参考,也可作为高等学校相关专业的教师、研究生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电机组的控制技术/叶杭治编著. —北京:机械工业出版社, 2002. 5

ISBN 7-111-10187-1

I. 风… II. 叶… III. 风力发电机-机组-控制技术 IV. TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第022959号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:王世刚 版式设计:张世琴 责任校对:吴美英
牛新国

封面设计:陈沛 责任印制:付方敏

北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

2002年6月第1版·第1次印刷

890mm×1240mm A5·7.625印张·221千字

0 001—3 000册

定价:18.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换
本社购书热线电话(010)68993821、68326677-2527

封面无防伪标均为盗版

前 言

对现代并网风力发电机组的研究已有20多年的历史,并且每年在世界各地都举办了各种形式的学术研讨会,发表数以百计的学术论文,但至今为止,国内外系统介绍现代并网风力发电技术的书籍仍然寥若晨星。多年前虽然出版过一些介绍风力机空气动力学原理和能量转换原理的书籍,并且这些基本原理对于大型风力发电机组的研究仍然是适用的,但现代并网风力发电机组所涉及的技术和理论已远远超出了这一范围。

本书在风力机的空气动力学原理和能量转换原理的基础上,系统地介绍了定桨距风力发电机组、变桨距风力发电机组、变速风力发电机组的基本控制要求与控制策略;介绍了风力发电机组的软并网技术、变桨距技术和变速风力发电机组在实现对最佳功率曲线的跟踪过程中的各种控制和处理方法。在介绍变速风力发电机组控制技术的基础上,对基于模糊逻辑控制和神经网络的智能控制系统也作了简要介绍。最后介绍了对电力电子器件引入谐波和变功率因素问题的控制方案。

由于风力发电机组的控制主要是对风轮的转速和输入功率进行控制,这些都涉及到风轮的能量转换过程及与之密切相关的空气动力学问题。为此先在第二章中对风力机的基础理论作一简要介绍。此后为了循序渐进,先介绍定桨距风力发电机组和变桨距风力发电机组的控制技术,以及与控制技术密切相关的伺服系统。在此基础上介绍变速风力发电机组的控制技术,讨论各种控制策略、处理方法及模拟试验结果。

作者多年来一直从事风力发电技术研究,参与设计了多种型号的定桨距和变桨距风力发电机组,因而可以从比较实用的角度介绍这两种机组的控制技术。对于变速风力发电机组则主要从理论分析与实验研究的角度予以介绍,所引用的国外最新技术成果已在参考文献中全部列出。

IV

本书的出版荣幸地受到机械工业出版社基金支助，还受到国家高技术研究发展计划专项经费资助。

本书主要供从事风力发电机组设计、研究的工程技术人员参考，也可作为理工大学电机及控制专业教师和研究生的参考书。

书中的错误恳请读者批评指正。

作者于 2002 年 1 月 8 日

符 号 表

A —— 项目投资每年等额折旧	dL —— dF 分解的升力
A —— 桨叶前缘 (Leading edge), 它是距后缘最远的点	dD —— dF 分解的阻力
A —— 放大器、增益	dF_u —— 气动力 dF 在旋转平面上的投影值
A —— 正弦波调制振幅	dF_a —— 气动力 dF 在转轴上的投影值
a —— 轴向诱导速度系数	dP_u —— dr 段叶片产生的风轮功率
a —— 电机转子串联有效匝数与定子串联有效匝数之比	dP_r —— 流过 dr 段叶片的风的功率
B —— 桨叶后缘 (Trailing edge)	Ec —— 年发电量
B —— 系统的摩擦损耗	E —— 计算过程中采用的简化符号
b —— 叶片数	F —— 气流的轴向推力
b —— 切向诱导速度系数	f —— 翼型中线最大弯度
C —— 发电成本	f —— 频率
C —— 最大厚度, 即弦长法线方向之翼型最大厚度	\bar{f} —— 翼型相对弯度, $\bar{f}=f/l$
\bar{C} —— 翼型相对厚度, $\bar{C}=C/l$, 通常为 $10\% \sim 15\%$	F_a —— 阻力, 与速度 v 平行
C_r —— 总的气动系数	F_l —— 升力, 与速度 v 垂直
C_T —— 转矩系数	G —— 计算过程中采用的简化符号
C_F —— 推力系数	h —— 周向速度因子
C_d —— 阻力系数	I —— 倾斜角, 为 ω 与旋转平面间的夹角
C_l —— 升力系数	I_0 —— 叶尖的倾角
C_M —— 变距力矩系数	i —— 贷款利率
C_{di} —— 诱导阻力系数	i —— 攻角, 是来流速度方向与桨叶弦线间的夹角
C_{do} —— 无限叶展的阻力系数	J —— 风力发电机组总转动惯量
C —— 电容	J_r —— 风轮的转动惯量
c_l —— 发电机负载系数	K_{opt} —— 获得最佳 C_T 值时的比例系数
dF —— 叶素受到气动力	L —— 单位时间内流过风轮扫掠面积 S 的气体的体积

L —— 桨叶长度	U —— 电压
L_c —— 电感	U_1 —— 定子额定相电压
l —— 翼型的弦长, 是两端点 A 、 B 连线方向上叶型的最大长度	u —— 圆周速度, $u=2\pi rn$ (n 为转速)
m —— 的运行维护费	v —— 气体的速度
m —— 气体的质量	v_T —— 叶尖线速度
m_1 —— 电机定子相数	w —— 气流相对于叶片的速度
n —— 折旧年限	X_1 —— 定子绕组的漏抗
n —— 风轮的转速	X'_2 —— 折算到定子侧的转子每相漏抗
n_s —— 在电机同步转速下的风轮转速	α —— 是展弦比, $\alpha=L^2/S$
P —— 风力机实际获得的轴功率	α —— 逆变器触发角
P —— 总投资	α —— 线性系数
p —— 桨叶表面上的静压	γ —— 线性系数
p —— 电机极对数	δ —— 线性系数
R —— 风轮半径	ρ —— 空气密度
R_1 —— 定子绕组的电阻	ω_1 —— 定子角频率, 即电网角频率
R'_2 —— 折算到定子侧的转子每相电阻	λ —— 叶尖速比
r_0 —— 轴毂半径	θ_0 —— 零升力角, 它是弦线与零升力线间的夹角
R —— 电阻	θ —— 升力角, 来流速度方向与零升力线间的夹角
S —— 风轮扫掠面积	η —— 效率
S —— 桨叶面积, 等于弦长 \times 桨叶长度	ε —— dF 和 dL 之间的夹角
s —— 转差率	Ω —— 气流的旋转角速度
s_0 —— 电机切出时的转差率	σ —— Prandtl 系数
T —— 转矩	β —— 节距角
T_a —— 风轮的气动转矩	ω —— 风轮角频率
T_e —— 发电机获得的转矩	ω —— 正弦波调制频率
T_c —— 转矩期望值	ω^* —— 发电机转速的期望值
T_m —— 驱动风力机的机械转矩	ω_{ref} —— 转速控制系统的参考速度
\hat{T} —— 转矩的观测值	ω_n —— 转矩观测器的自然频率
	ω_o —— 转矩观测器带宽
	ζ —— 转矩观测器阻尼

目 录

前言

符号表

第一章 绪论	1
第一节 风能的开发利用	1
第二节 风力发电的成本与效益	2
第三节 风力发电技术	4
第二章 风力机的基础理论	14
第一节 风力机的能量转换过程	14
第二节 桨叶的几何参数和空气动力特性	17
第三节 风轮的气动力学	24
第四节 简化的风力机理论	26
第五节 涡流理论	30
第三章 定桨距风力发电机组	37
第一节 定桨距风力发电机组的特点	37
第二节 定桨距风力发电机组的基本运行过程	42
第三节 风力发电机组的基本控制要求	46
第四节 定桨距风力发电机组的制动与保护系统	57
第四章 定桨距风力发电机组的软并网	62
第一节 并网方式概述	62
第二节 发电机软切入装置	65
第三节 三相负载不平衡保护	80
第五章 变桨距风力发电机组	86
第一节 变桨距风力发电机组的特点	86
第二节 变桨距风力发电机组的运行状态	88
第三节 变桨距控制系统	90
第四节 功率控制	93

第六章 变桨距风力发电机组的模拟	100
第一节 模拟系统的结构	100
第二节 风力发电机组特性的数学模型	101
第三节 模拟与实验结果	109
第七章 控制系统的执行机构	114
第一节 定桨距风力发电机组的液压系统	114
第二节 变桨距风力发电机组的液压系统	116
第三节 偏航系统	124
第八章 变速风力发电机组	129
第一节 风力发电机组的基本特性	130
第二节 变速风力发电机组的基本结构	133
第三节 变速风力发电机组的基本控制策略	139
第四节 变速风力发电机组各种特性的模拟分析	143
第九章 低于额定风速时的转速控制	150
第一节 控制策略分析	151
第二节 观测器的执行情况	158
第三节 控制器设计	162
第四节 低于额定风速情况下的风速估算	164
第五节 DSC 和 ISC 策略的模拟结果	166
第六节 实验结果	168
第十章 高于额定风速时的功率控制	176
第一节 动态模型的建立	176
第二节 控制器设计	180
第三节 模拟与结果	183
第十一章 风力发电机组的智能控制	193
第一节 模糊逻辑控制	194
第二节 采用智能控制的风力发电机组模型	201
第三节 模糊励磁环的设计	206
第四节 神经转速控制环设计	209
第五节 模拟与结果	211
第十二章 提高变速风力发电机组供电质量	216

第一节	电力电子接口.....	216
第二节	电感性储能器对供电质量的改善	221
参考文献	229

第一章 绪 论

第一节 风能的开发利用^[1]

能源、环境是当今人类生存和发展所要解决的紧迫问题。常规能源以煤、石油、天然气为主，它不仅资源有限，而且造成了严重的大气污染。因此，对可再生能源的开发利用，特别是对风能的开发利用，已受到世界各国的高度重视。据专家们估计，地球上所接收到的太阳辐射能大约有 2% 转换成风能，装机容量可达 10TW，每年可发出电力 13PW·h。

近 20 年，发达国家在风能的开发利用方面已取得了惊人的成就。20 世纪 80 年代问世的现代并网风力发电机组，只经过几年的发展便迅速实现了商品化、产业化，到 90 年代中期已形成了一个规模巨大的风力机工业。2001 年 10 月，全世界风力发电装机容量突破了 20000MW，其中当年新增容量达到 5000MW。专家们预测，从 2002 年以后，世界风力发电机组装机容量将继续以每年高于 25% 的速度递增，到 2010 年，全世界风力发电机组装机容量将突破 100GW。

我国是世界上风力资源较为丰富的国家之一，全国可开发利用的风能约 2.5 亿 kW。有沿海（山东、浙江、福建、广东）和东北至西北包括内蒙古、新疆、甘肃两大风带，风的质量很好，为开发风力发电提供了基础环境和条件。近 10 年来，国内在新疆、内蒙、广东、浙江、辽宁等地利用引进国外机组建立了 26 个风电场，总装机容量约 400MW。与此同时国产风力发电机组的开发也取得了一定的成果，其中包括“八五”期间开发成功的 200kW/250kW 风力发电机组和在“九五”期间开发的 600kW 风力发电机组，并成功地开发了并网型风力发电机组的当地控制和远程控制系统，使大型风力发电机组的一项关键技术得到了解决。国内可以制造的其他主要部件包括桨叶、发电机、齿轮箱、机舱、主轴、塔架、偏航系统、液压系统等，为我国大

型风力发电机组国产化奠定了基础。

第二节 风力发电的成本与效益

一、常规能源发电的上网电价

如果以我国目前使用最普遍的 30 万 kW 级火力发电机组为例测算其发电的上网电价，结果如表 1-1 所示。

表 1-1 燃煤电厂的平均上网电价 (含税)^[2]

机组类型 \ 电价	2×30 万 kW 机组		2×35 万 kW 机组	
	无脱硫	有脱硫	无脱硫	有脱硫
上网电价/(元/kW·h)	0.33	0.36	0.35	0.38

由于火力发电厂每年向大气排放数百亿吨的有害气体，给全球环境造成了极大的污染，目前发达国家已采用煤的洁净燃烧技术。国内如果采用该项技术，需对现有的火力发电设备进行一次彻底的改造，则火力发电的建设成本将增加 30%，上网电价可能达到 0.40 元/kW·h。

二、风力发电的成本

根据 600kW 风力发电机组的国产化成本测算，其价格为 5000 元/kW。加上风电场配套费用，风电场的建设成本不高于 7500 元/kW；取容量系数 0.25，风力发电成本 C /[元/(kW·h)]可由下式计算：

$$C = \frac{A+M}{E_c} \quad (1-1)$$

式中 E_c ——每千瓦装机年发电量 (kW·h)；

M ——年运行维护费 (元)；

A ——年项目投资等额折旧 (元)，可由下式计算：

$$A = P \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (1-2)$$

式中 P ——每千瓦投资 (元/kW)；

i ——贷款利率；

n ——折旧年限 (年)。

将风电场建设的各项条件 $E_c = 365 \times 24 \times 0.25 \text{ kW} \cdot \text{h}$ ， $P = 7500$

元/kW, $i=5\%$, $n=20$ 代入式 (1-1)、式 (1-2) 可得

$$A = 7500 \times \frac{5\% (1+5\%)^{20}}{(1+5\%)^{20} - 1} \text{元} = 601.82 \text{元}$$

$$C = 0.27 + m \quad (1-3)$$

式中 m ——每千瓦时运行维护费 (元/kW·h), $m = \frac{M}{E_c}$ 。

从式 (1-3) 可以看出, 风力发电成本由两部分构成: 一部分是风电场的建设成本, 这是构成风电成本的主要部分, 为 0.27 元/kW·h; 另一部分是运行维护成本 m 。由于风能消耗不计入成本, 这部分成本主要取决于设备的可靠性及风电场的管理水平, 根据我国目前的风电场运行情况, $m=0.05\sim 0.08$ 元/kW·h, 这样风力发电的成本将不高于 0.35 元/kW·h。如果国家能在政策上给予强有力的支持, 风力发电与常规能源发电相比在上网电价上有一定的竞争能力。

三、经济效益与社会效益^[1]

能源生产利用对生态环境产生的损害, 是中国环境问题的核心。大量直接燃煤造成的城市大气污染, 过度消耗生物质能引起的农村生态环境破坏, 以及 CO₂ 温室气体排放是其主要的问题。

我国燃煤释放的 SO₂ 占全国总排放的 85%, CO₂ 占 85%, NO_x 占 60%, 烟尘占 70%。1997 年我国 SO₂ 排放总量为 2346 万 t。我国酸雨区域在迅速扩大, 已超过国土面积的 40%。1995 年酸雨沉降造成的经济损失为 1165 亿元, 占 GNP 的 1.9%。

风能在转换成电能的过程中, 只降低了气流的速度, 没有给大气造成任何污染。用风力发电, 可减少常规能源的消耗, 从而减少 CO₂、SO₂ 的排放, 对保护环境和生态平衡, 改善能源结构具有重要意义。在我国的能源构成中, 虽然煤的比例最大, 但可采量有限, 并带来环境、交通等诸多问题。因此, 开发可再生能源, 尤其是风能, 将显得更为重要。

风力发电机组是涉及控制、机电、材料、钢结构等多学科多专业的机电一体化产品, 它的产业化, 可带动一批相关产业的发展, 有利于促进国民经济发展。

根据在本世纪中叶我国国民经济达到中等发达国家水平的目标,

我国的发电能力应达到人均 1kW，即 15 亿 kW。为了实现这一目标，专家们认为我国风力发电的装机容量至少应达到 1 亿 kW。如果按这一发展目标估算，在今后 50 年中，我国的风力机工业及其相关产业将有 7000 亿产值的市场潜力，平均每年 140 亿，可望成为我国 21 世纪经济与社会效益都十分显著的新兴产业。

第三节 风力发电技术

并网运行的风力发电技术是 20 世纪 80 年代兴起的一项新能源技术，一开始就受到世界各国的高度重视，因而迅速实现了商品化、产业化，特别是随着计算机与控制技术的飞速发展，风力发电技术的发展极为迅速，其单机容量从最初的数十千瓦级发展到最近进入市场的兆瓦级机组；控制方式从基本单一的定桨距失速控制向全桨叶变距和变速控制发展，预计在最近的 5 年内将推出智能型风力发电机组；运行可靠性从 20 世纪 80 年代初的 50%，提高到 98% 以上，并且在风电场运行的风力发电机组全部可以实现集中控制和远程控制。从今后的发展趋势来看，风电场将从内陆移到海上，其发展空间将更加广阔。

一、风力发电机组的总体结构

风力发电机组的总体结构示意图如图 1-1 所示。

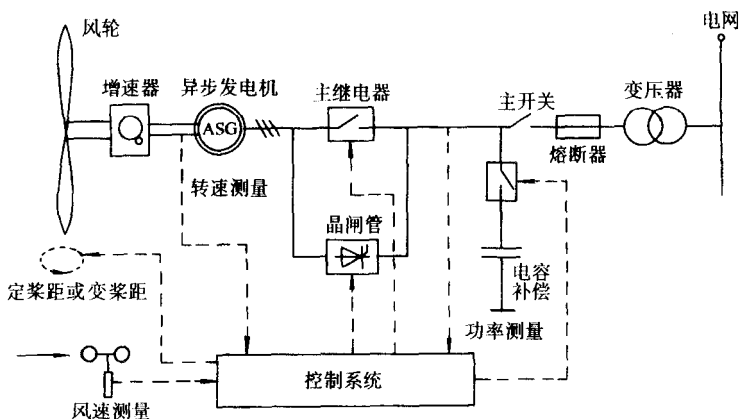


图 1-1 风力发电机组

风轮是吸收风能并将其转换成机械能的部件，风以一定的速度和攻角作用在桨叶上，使桨叶产生旋转力矩而转动，将风能转变成机械能，进而通过增速器驱动发电机。

多年来风力发电机组的风轮大都采用三桨叶与轮毂刚性联接的结构，即所谓定桨距风轮。桨叶尖部 1.5~2.5m 部分，一般设计成可控制的叶尖扰流器。当风力发电机组需要脱网停机时，叶尖扰流器可按控制指令释放并旋转 90°形成阻尼板，使风轮转速迅速下降。这一机构通常称为空气动力刹车。

近年来，随着风力发电机组设计水平的不断提高，在大型风力发电机组，特别是兆瓦级机组（1000kW 以上）的设计中，开始采用变距风轮，桨叶与轮毂不再采用刚性联接，而通过可转动的推力轴承或专门为变距机构设计的联轴器联接。这种风轮可根据风速的变化调整气流对叶片的攻角，当风速超过额定风速后，输出功率可稳定地保持在额定功率上，特别是在大风情况下，风力机处于顺桨状态，使桨叶和整机的受力状况大为改善。

由于风力发电机组起停频繁，风轮又具有很大的转动惯量，通常风轮的转速都设计在 20~30r/min，机组容量越大，转速越低，因此，在风轮与发电机之间需要设置增速器。大型风力发电机组的机械传动系统都沿中心线布置，因此增速器都采用结构紧凑的行星齿轮箱。

风力发电机组中的发电机一般采用异步发电机，对于定桨距风力发电机组，一般还采用单绕组双速异步发电机，这一方案不仅解决了低功率时发电机的效率问题，而且改善了低风速时的叶尖速比，提高了风能利用系数并降低了运行时的噪声。出于同样的考虑，一些变距风力发电机组也使用双速发电机。

发电机并网过程采用晶闸管恒流软切入，过渡过程结束时，主继电器合上，晶闸管被切除，机组进入发电运行状态。

二、风力发电机组的主要机型

近 10 年来，风力发电机组的主流机型主要有两种：一是以 NEG MICON 600/700/750kW 机组为代表的定桨距失速型机组；二是以 VESTAS V39/V42/V44—600kW 机组为代表的全桨叶变距型机组。两种机型的风轮均采用水平轴、三叶片，上风向布置；额定转速约 27r/

min。舱内机械采用沿轴线布置的结构；控制系统均使用微处理器和晶闸管恒流软切入技术，并且均采用了双速发电机。对定桨距失速型机组，用叶尖扰流器作为气动刹车。液压系统作为变距系统或叶尖气动刹车的执行机构。

最近几年进入风力发电领域的变速风力发电机组也已占到一定的市场份额（约 17%），其主要特点是在变距风力发电机组的基础上采用了转速可以在大范围变化的绕线转子异步发电机或同步发电机及相应的电力电子技术，通过对最佳叶尖速比的跟踪，使得风力发电机组在所有的风速下均可获得最佳的功率输出。

1. 定桨距风力发电机组

定桨距风力发电机组的典型代表是 NEG MICON 600/700/750kW 机组。它有三种可供选择的额定功率，分别为 600kW、700kW 和 750kW，其机舱内的机械设计具有良好的互换性，可根据需要在同一机舱内选配不同的发电机和增速器，并根据安装点不同的年平均风速，选择不同长度的桨叶，构成三种不同功率的机组。该型机组是我国目前安装数量最多的机型之一。

下面以 NEG MICON 750—200/48 型为例介绍其主要参数。

起动风速 $v > 3\text{m/s}$ ；当 $v > 4\text{m/s}$ 时，风轮转速可达到小发电机额定转速（6 极）

切换风速 $v > 8\text{m/s}$ ；当 $v > 8\text{m/s}$ 时，发电机将从 6 极切换到 4 极（大发电机）或直接切入大发电机运行

额定风速 $v = 14\text{m/s}$ ；当 $v > 14\text{m/s}$ 时，桨叶将自动失速

切出风速 $v = 25\text{m/s}$

风轮

风轮直径 48m

风轮转速 $(22.3/14.9)\text{r/min}$

桨叶 LM 23.5m，带空气动力刹车机构

功率调节 自动失速

发电机

型式 三相异步双速发电机

额定功率 $(750/200)\text{kW}$

额定转速 (1500/1000)r/min

冷却 液体循环冷却系统

增速齿轮箱

结构 一级行星齿轮加两级平行轴齿轮

润滑 带强制喷射润滑和飞溅式润滑

油温控制 体外循环冷却系统和内置加热器

联轴器

低速轴联接 收缩套

高速轴联接 弹性联轴器

偏航系统

回转支撑 内齿型滚动轴承,电动机驱动

偏航减速比 1 : 2716

偏航制动 液压驱动的摩擦制动器

偏航转速 0.46°/s

机械刹车

低速轴盘式制动器

制动力矩 233kN·m

控制系统

MITA WP3000

主要功能：控制风力发电机组并网与脱网；自动相位补偿；监视风力发电机组运行状态；监视气象情况；监视电网情况，在异常情况下使风力发电机组安全停机；记录运行数据，产生功率曲线、风速变化曲线、运行可靠性、发电量等各种图表。

2. 变桨距风力发电机组

VESTAS 是世界上最大的风力发电机组制造商之一，其生产的风力发电机组 2001 年达到 1630MW，约占世界风力发电机组总产量的 24%。我们以 V47—660/200kW 为例介绍变桨距风力发电机组的主要技术参数。

起动风速 3.5m/s

额定风速 16m/s

切出风速 25m/s

风轮

水平轴、三桨叶，上风向布置，全桨叶变距

直径 47m

转速 20~26r/min

叶片数 3

功率调节 变桨距/转速调节

变距机构 液压驱动的曲柄连杆机构

发电机

主发电机 异步发电机+最佳转差率控制

额定功率 660kW

运行转速 1515~1650r/min

小发电机 异步发电机

额定功率 200kW

运行转速 1500~1516r/min

增速齿轮箱

结构 行星齿轮+平行轴齿轮

增速比 1:75

控制系统

基于微处理器的控制系统+OPTISLIP（转速调节）+OPTITIP（变距调节）

主要功能：控制风力发电机组并网与脱网；优化功率输出曲线；监视风力发电机组运行状态；监视气象情况；监视电网情况，在异常情况下使风力发电机组安全停机；记录运行数据，产生功率曲线、风速变化曲线、运行可靠性、发电量等各种图表。

3. 变速风力发电机组

德国 DeWind 公司生产的变速风力发电机组 2000 年已在德国市场占到 8% 的份额，机组容量从 600kW 到 1500kW，1999 年~2000 年装机 96 台，容量达 76.4MW。我们以 D6 型机组为例，介绍其主要技术参数。

额定功率 1250kW

起动风速 2.5m/s