

风力发电机的原理与控制

宋亦旭 编著

机械工业出版社

前 言

本书重点介绍了用于风力发电的各种发电机，发电机是风力发电机组中的核心部件之一。

一般来说，风力发电机组是由机械、电气和控制三大系统组成的。电气系统包括发电机、变流器、变压器等部件。其中发电机是核心部件，选用不同类型的发电机，就构成了不同类型的风力发电机组。本书主要介绍了风力发电机组电气系统基本原理和应用方面的知识。

在介绍上述内容时，本书以应用于大型风力发电机组的各种发电机为主线，以风力发电系统的运行规律为核心，以市场主导机型为重点，力求系统、全面和准确地组织材料。为了使读者更好地掌握发电系统，首先对各种发电机的工作原理和结构作了简要介绍。

本书可以作为大学本科、技术专科学校以及各类风电技术培训班的教学用书；也可以作为风电场和风电主机或配套企业管理人员、技术人员以及风电爱好者的自学读物。

感谢读者选择本书，作者愿意与读者进一步交流，听取各方面的批评和意见，以求增长知识，改进工作。

编著者

2011年7月

主要物理量符号表

A ——风轮面积 (风力机)	i_g ——定子电流空间矢量 (永磁电机)
C ——电容	i_n ——电网电流 (逆变器)
C_p ——风能利用系数 (风力机)	i_{n1} —— i_n 的基波分量 (逆变器)
C_T ——电磁转矩常数 (永磁电机)	i_s ——输出电流 (逆变器)
C_e ——电动势比例常数 (永磁电机)	i_{s1} —— i_s 的基波分量 (逆变器)
D_Y ——占空比 (直流斩波器)	I ——电流, 交流表示有效值
e ——电动势瞬时值	\dot{I}_0 ——空载电流 (变压器)
E ——电动势有效值	\dot{I}_{1L} ——一次电流的负载分量 (变压器); 定子电流的负载分量 (双馈电机)
\dot{E}_0 ——励磁电动势 (同步电机)	\dot{I}_k ——极限电流 (感应电机)
\dot{E}_a ——电枢反应电动势 (同步电机)	\dot{I}_{dc} ——发电机的输出电流 (永磁电机)
\dot{E}_σ ——定子漏电动势 (同步电机)	\dot{I}_m ——励磁电流 (双馈电机)
$\dot{E}_{1\sigma}$ 、 $\dot{E}_{2\sigma}$ ——分别为一次、二次侧漏磁电动势 (变压器)	\dot{I}_r ——励磁电流 (同步电机)
\dot{E}_{aq} —— q 轴电枢电动势 (永磁电机)	J ——电机转子转动惯量
\dot{E}_δ ——气隙合成电动势 (永磁电机)	k ——变压比 (变压器); 比例系数
\dot{E}_g ——永磁体产生的电动势 (永磁电机)	k_{N1} 、 k_{N2} ——分别为电机定子、转子绕组系数 (感应电机)
f ——频率	L ——电感
f_1 ——旋转磁场频率	L_n ——输出回路电感 (逆变器)
f_m ——转子机械频率	$L_{2\sigma}$ ——转子一相绕组的漏感 (双馈电机)
f_2 ——转差频率 (双馈电机)	L_{m1} 、 L_{m2} ——分别为定子互感和转子互感 (双馈电机)
f_e ——电频率 (永磁电机)	L_{11} 、 L_{12} ——分别为定子漏感和转子漏感 (双馈电机)
f_{em} ——电磁力 (感应电机)	L_1 、 L_2 ——分别为定、转子等效自感 (双馈电机)
F ——作用在叶片上的气动合力 (风力机)	L_m ——定、转子间互感 (双馈电机)
F_d ——驱动力 (风力机)	m ——相数
F_1 ——轴向推力 (风力机)	M_m ——主传动系统的输出转矩; 发电机机械驱动转矩
F ——磁动势	M_{fw} ——摩擦转矩 (发电系统)
F_0 ——空载电流产生磁动势 (变压器)	M_r ——风力机的机械转矩 (风力机)
F_1 ——定子基波磁动势 (双馈电机)	M_e ——发电机电磁转矩
F_2 ——转子电流产生的基波旋转磁动势 (双馈电机)	M_L ——负载阻转矩 (双馈电机)
F_m ——合成磁动势	M_k ——极限转矩 (感应电机)
i ——电流瞬时值	M_{e1} ——发电机输出转矩
i_d 、 i_{load} ——分别是流经网侧变流器和转子侧变流器直流母线的电流 (背靠背双 PWM)	n ——转子每分钟转速
i_{dc} ——电容电流 (背靠背双 PWM)	n_s ——在发电机同步转速下的风轮转速
i_{2a} ——转子电流的有功分量 (感应电机)	
i_{1a} ——定子上与 i_{2a} 相平衡的电流 (感应电机)	

- n_r ——风轮转速
 n_1 ——同步转速
 n_2 ——转差旋转速度（双馈电机）
 N ——绕组匝数
 p ——电机绕组的极对数
 P ——对时间 t 求异符号
 P_w ——风功率
 P_r ——风力机输出功率
 P_m ——主传动系统的输出功率
 P_e ——发电系统的输出功率
 P_{Cu1} ——电机定子绕组铜耗
 P_{Cu2} ——电机转子绕组铜耗
 P'_{Cu2} ——广义铜耗（双馈电机）
 P_{e1} ——发电机输出电功率
 P_{Fe} 、 P_{add} 和 P_{fw} ——分别是铁损、转子空气动力损耗和摩擦损耗
 P_{em} ——电磁功率
 P_0 ——发电机空载损耗（永磁电机）
 P_1 ——定子有功功率（双馈电机）
 P_2 ——励磁系统输入电机的功率（双馈电机）
 Q_1 ——定子无功功率（双馈电机）
 R ——风轮半径（风力机）；电阻
 R_m ——励磁电阻
 R_k ——短路电阻（变压器）
 R_a ——电枢电阻（同步电机）
 s ——电机转差率
 S_N ——电机额定容量
 S_a 、 S_b 、 S_c ——分别为三相桥臂的开关函数
 S_p 、 S_q ——两相开关函数
 t ——时间
 t_{on} ——开通时间（直流斩波器）
 T_s ——开合周期（直流斩波器）
 T ——励磁时间常数（双馈电机）
 ΔT_2 ——采样周期（逆变器）
 u ——电压瞬时值
 u_n ——电网电压
 u_{n1} —— u_n 的基波
 u_s ——逆变器输出电压
 u_{s1} —— u_s 的基波
 u_{dc} ——电容的电压（背靠背双 PWM）
 \mathbf{u}_{ref} ——空间电压矢量（永磁电机）
 U ——电压，交流表示有效值
 U_d ——输入的恒定的直流电压（逆变器）
 U_{dc} ——整流器输出电压
 U_{20} ——空载时二次电压（变压器）
 ΔU ——电压变化率（同步电机）；电压调整率（变压器）
 v ——风速
 v_c ——切入风速（风力机）
 v_b ——最大允许风轮转速（风力机）
 v_r ——额定风速（风力机）
 v_f ——大风停机风速（风力机）
 v_i ——叶尖线速度（风力机）
 v_{is} ——同步转速下的叶尖线速度（风力机）
 W ——风能
 $X_{1\sigma}$ 、 $X_{2\sigma}$ ——分别为一次、二次绕组漏电抗（变压器）；定子、转子绕组漏电抗（电机）
 X_m ——电机励磁电抗
 X_k ——短路电抗（变压器）
 X_l ——同步电抗（同步电机）
 X_a ——电枢反应电抗（同步电机）
 X_σ ——定子漏抗（同步电机）
 Z ——阻抗
 Z_{2L} ——二次侧负载阻抗（变压器）
 Z_m ——励磁阻抗
 Z_d ——一次侧等效电抗（变压器）
 Z_k ——变压器的短路阻抗
 α —— i_m 超前 $\dot{\Phi}_m$ 的角度（变压器）
 β —— i_g 与 d 轴间角度（永磁电机）
 γ ——定子磁链与转子磁链之间夹角（双馈电机）
 δ ——功率角（同步电机）
 η ——效率
 η_m ——主传动系统的总效率
 η_e ——发电系统的总效率
 θ ——双馈电机 \dot{U}'_2/s 与 \dot{U}_1 相差的电角度（相量模型）； a 、 A 轴间电角度（空间矢量模型）
 θ'_1 ——相量 \dot{U}_1 和 \dot{I}_{1L} 之间的夹角（变压器）
 θ'_2 ——相量 \dot{E}_2 和 \dot{I}_2 间的夹角（变压器）
 θ_1 ——旋转坐标系角度（双馈电机）
 θ_2 ——转子静止坐标系位置角（双馈电机）
 λ ——叶尖速比（风力机）
 ρ ——空气密度
 σ_1 ——校正系数（感应电机）
 v ——转子磁链旋转角（双馈电机）
 φ ——相量 \dot{U} 、 \dot{i} 之间的夹角

φ_u —— u_{s1} 和电网电压 u_n 之间角位移量 (逆变器)	ω ——电气角速度 (电机)
Φ ——磁通; 每极主磁通	ω_1 ——同步角速度
$\dot{\Phi}_m$ ——主磁通	ω_2 —— a 、 A 轴间电角速度 (双馈电机)
$\dot{\Phi}_{1\sigma}$ 、 $\dot{\Phi}_{2\sigma}$ ——分别为一次、二次绕组交链的漏磁通 (变压器)	ω_n ——输出电角速度 (逆变器)
ψ ——磁链	ω_s ——转差角速度 (双馈电机)
ψ_f ——永磁体基波励磁磁场对定子绕组磁链 (永磁电机)	Ω_r ——风轮的角速度 (风力机)
	Ω_m ——主传动系统的输出角速度

字母附加标记说明:

1. 字母上加“·”表示相量;
2. 字母右下标为 1 表示变压器一次侧、电机定子;
3. 字母右下标为 2 表示变压器二次侧、电机转子;
4. 字母右下标为 2, 右上标为“'”表示变压器二次侧、电机转子折算值;
5. 字母右下标为 max 表示极大值;
6. 字母右下标为 min 表示极小值;
7. 字母右下标为 opt 表示最优值;
8. 字母右下标为 N 表示额定值;
9. 字母右下标为 A、B、C 表示定子三相绕组, 字母右下标为 a、b、c 表示转子三相绕组;
10. 字母右下标为 α 、 β 表示 α 、 β 轴分量;
11. 字母右下标为 d、q 表示 d 、 q 轴分量;
12. 字母右上标为“*”表示共轭相量或控制参考值;
13. 黑体字母表示空间矢量。

目 录

前言	
主要物理量符号表	
第一章 绪论	1
第一节 风力发电机组的概述	1
一、风力发电机组的工作原理	1
二、风力发电机组的构成	3
三、风力发电机组的分类	4
第二节 风力发电机组的运行	5
一、风力发电机组的稳态工作点	5
二、最佳风能利用系数	6
三、风力发电机组的运行特征	8
第三节 风力发电系统	12
一、发电系统的总体结构	12
二、发电系统的形式	12
第四节 风力发电机	14
一、风力发电机的种类	14
二、风力发电机的基本参数	14
三、发电机的温控与润滑	16
四、空间坐标矢量变换	18
第二章 变压器	19
第一节 变压器的工作原理和基本结构	19
一、工作原理和分类	19
二、变压器的主要部件	20
三、变压器的冷却	23
四、变压器的额定值	25
第二节 变压器的负载运行	25
一、运行规律	25
二、基本方程式	26
三、折算法	28
四、相量图	31
五、等效电路	31
六、变压器的运行特性	34
第三节 三相变压器	34
一、三相变压器的组成	34
二、三相变压器的磁路系统	35
三、三相变压器的电路系统	36
第三章 变流器	38
第一节 电力电子器件	38
一、电力电子器件的概念和特征	38
二、电力电子器件的分类	38
三、常用电力电子器件	39
第二节 电源变换基本拓扑结构	43
一、AC-DC 变换电路	43
二、DC-DC 变换电路	47
三、DC-AC 变换电路	48
第三节 风力发电机组变流器的应用技术	50
一、正弦脉宽调制 (SPWM) 技术	50
二、大功率变流技术	51
三、多重化技术	54
四、低电压穿越技术	54
第四节 变流器外形及其温控	55
第四章 笼型感应发电机	57
第一节 笼型感应发电机的工作原理和基本结构	57
一、工作原理	57
二、基本结构	58
第二节 笼型感应发电机的运行	59
一、基本方程式、等效电路和相量图	59
二、感应发电机的电磁转矩	61

三、并网运行时无功功率补偿	62	第三节 电励磁同步发电机的	
四、感应发电机的工作特性	62	发电系统	92
第三节 定速风力发电系统	63	一、定速同步风力发电系统及其并网	92
一、系统的构成	63	二、变速同步风力发电系统	93
二、并网方式	63	第七章 永磁同步发电机	95
第四节 双速风力发电系统	65	第一节 永磁同步发电机的工作原理和	
一、双速发电机	65	基本结构	95
二、运行过程	66	一、工作原理	95
三、电力参数监测	69	二、基本结构	95
四、双速发电机机组控制系统	70	三、永磁同步发电机的运行	97
第五节 变速恒频发电系统	72	第二节 外转子永磁风力发电机	98
第五章 绕线转子感应发电机	75	一、外转子永磁风力发电机结构	
第一节 绕线转子感应发电机的结构和		特点	98
工作原理	75	二、外转子永磁风力发电机数学	
一、结构	75	模型	98
二、发电机转子电流控制技术	75	第三节 直驱型永磁风力发电机组	100
第二节 优化转差风力发电系统	77	一、直驱型风力发电系统的构成	100
一、系统的构成	77	二、直驱型发电系统变流方案	101
二、无功功率补偿	78	三、直驱型发电系统的保护电路	102
三、故障穿越技术	78	第四节 不可控整流 + Boost + 逆变	
第三节 功率和转速的控制	78	变流器的控制	105
一、优化转差机组的运行	78	一、控制系统结构	106
二、优化转差的变桨距系统	79	二、风力发电并网逆变器的工作	
第六章 电励磁同步发电机	84	原理	108
第一节 电励磁同步发电机的工作原理和		第五节 中转速发电机型 (半直驱)	
基本结构	84	风力发电机组	111
一、工作原理	84	第八章 双馈发电机	112
二、基本结构	85	第一节 双馈发电机的基本结构和	
三、同步发电机的励磁方式	86	工作原理	112
第二节 电励磁同步发电机的运行	88	一、基本结构及特点	112
一、隐极同步发电机电动势方程式、		二、基本方程式、等效电路和	
等效电路和相量图	88	相量图	113
二、凸极同步发电机电动势方程式和		三、定、转子电流计算	116
相量图	89	四、能量流动平衡关系	117
三、转矩—转速特性	90	第二节 双馈式风力发电系统	120
四、同步发电机的外特性和调节特性	90	一、基本结构	120
五、有功功率调节和无功功率补偿	91	二、背靠背恒压源 PWM 调制电路	121
		三、双馈发电系统的保护电路	123

第三节 双馈发电系统并网和 脱网·····	127	二、中间继电器·····	165
一、空载并网方式·····	127	第三节 母线与电缆·····	165
二、带独立负载并网·····	128	一、母线·····	165
三、孤岛并网方式·····	129	二、电力电缆·····	166
第四节 双馈发电系统的控制·····	131	第四节 信号检测元件·····	168
一、双馈发电系统变速运行·····	131	一、互感器·····	168
二、转子侧变流器的矢量控制·····	133	二、电量变送器·····	169
三、转子侧变流器的直接转矩控制·····	139	三、电压与电流的测量·····	171
四、转子侧变流器的直接功率控制·····	143	四、电功率测量·····	173
五、网侧变流器的控制·····	147	第十一章 发电系统的维护 ·····	174
六、控制柜·····	150	第一节 发电机的维护及故障 分析·····	174
第九章 风力发电用其他发电机 ·····	154	一、发电机的安装·····	174
第一节 电励磁发电机·····	154	二、电气连接及空载运转·····	174
一、开关磁阻发电机·····	154	三、运行维护·····	175
二、电励磁多极同步发电机·····	155	四、发电机的故障分析·····	176
三、高压发电机·····	156	第二节 变流器的维护及故障 处理·····	177
四、无刷双馈发电机·····	156	一、变流器的维护·····	177
第二节 永磁发电机·····	157	二、变流器常见故障及处理·····	178
一、轴向磁通电机·····	157	第三节 变压器的维护·····	178
二、横向磁通永磁电机·····	158	第四节 其他常用电器部件的 维修·····	179
三、双凸极永磁电机·····	160	一、熔断器的使用与维修·····	179
第十章 电器元件 ·····	162	二、电缆的使用与敷设·····	181
第一节 开关电器·····	162	三、母线的使用与安装·····	183
一、真空断路器·····	162	四、中间继电器的维修·····	184
二、交流接触器·····	164	五、交流接触器的运行与维修·····	185
三、熔断器·····	164	参考文献 ·····	187
第二节 继电器·····	165		
一、热继电器·····	165		

第一章 绪 论

本章重点介绍了风力发电机组的构成及分类，风力发电机组的运行控制，发电系统的形式以及发电机的一些共性问题。

第一节 风力发电机组的概述

一、风力发电机组的工作原理

风力发电机组是将风的动能转换为电能系统。在风力发电机组中，存在着两种物质流：一种是能量流，另一种是信息流；两者的相互作用，使机组完成发电功能。风力发电机组的工作原理如图 1-1 所示。

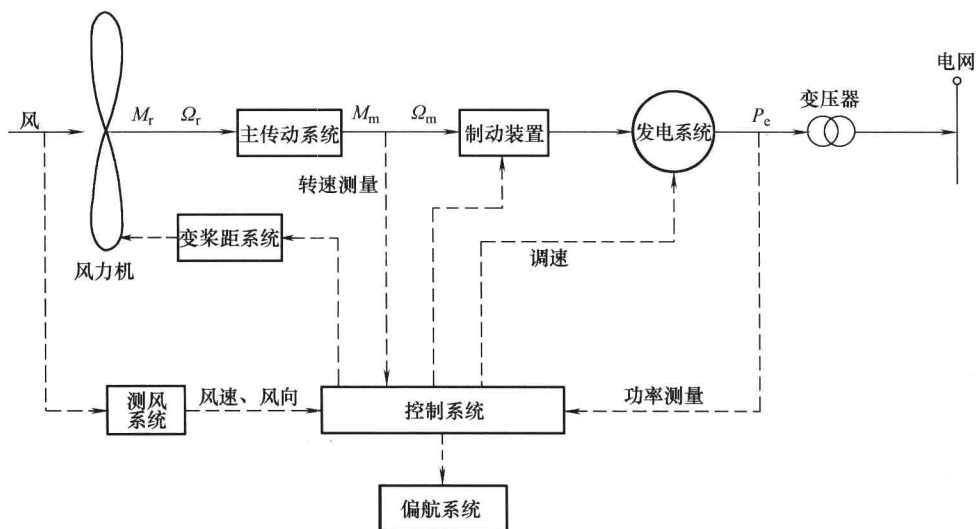


图 1-1 风力发电机组的工作原理

1. 能量流

风力机所捕获的是风的动能，风的动能大小可以由风功率来表示。风功率是指单位时间内，以速度 v 垂直流过截面 A 的气流所具有的动能。因为在 t 时间内，以速度 v 垂直流过截面 A 的气流所具有的动能为

$$W = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}(\rho Avt)v^2 = \frac{1}{2}\rho Av^3t$$

式中 W ——风能，单位为 J；

ρ ——空气密度，单位为 kg/m^3 ；

v ——来流速度，单位为 m/s ；

A ——面积，单位为 m^2 。

所以风功率为

$$P_w = W/t = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1-1)$$

由式(1-1)可见,风功率与风速的立方成正比。当风以一定的速度吹向风力机时,在风轮上产生的力矩驱动风轮转动。将风的动能变成风轮旋转的动能,两者都属于机械能。风轮的输出功率为

$$P_r = M_r \Omega_r$$

式中 P_r ——风轮的输出功率,单位为 W;

M_r ——风轮的输出转矩,单位为 N·m;

Ω_r ——风轮的角速度,单位为 rad/s。

风轮的输出功率通过主传动系统传递。主传动系统可以使扭矩和转速发生变化,于是有

$$P_m = M_m \Omega_m = M_r \Omega_r \eta_m \quad (1-2)$$

式中 P_m ——主传动系统的输出功率,单位为 W;

M_m ——主传动系统的输出转矩,单位为 N·m;

Ω_m ——主传动系统的输出角速度,单位为 rad/s;

η_m ——主传动系统的总效率。

主传动系统将动力传递给发电系统,发电系统把机械能变为电能。发电系统的输出功率为

$$P_e = \sqrt{3} UI \cos\varphi = P_m \eta_e \quad (1-3)$$

式中 P_e ——发电系统的输出功率,单位是 W;

U ——三相绕组上的线电压,单位是 V;

I ——流过绕组的线电流,单位是 A;

$\cos\varphi$ ——功率因数;

η_e ——发电系统的总效率。

对于并网型风力发电机组,发电系统输出的电流经过变压器升压后,即可输入电网。

2. 信息流

信息流的传递是围绕控制系统进行的。控制系统的功能是过程控制和安全保护。过程控制包括起动、运行、暂停、停止等。在出现恶劣的外部环境和机组零部件突然失效时,应该紧急关机。

风速、风向、风力机的转速、发电功率等物理量通过传感器变成电信号传给控制系统,它们是控制系统的输入信息。控制系统随时对输入信息进行加工和比较,及时地发出控制指令,这些指令是控制系统的输出信息。

对于变桨距机组,当风速大于额定风速时,控制系统发出变桨距指令,通过变桨距系统改变风轮叶片的桨距角(在指定的径向位置叶片弦线与风轮旋转面间的夹角),从而控制风力发电机组输出功率。在起动和停止的过程中,也需要改变叶片的桨距角。

对于变速型机组,当风速小于额定风速时,控制系统可以根据风的大小发出改变发电机转速的指令,以便使风力机最大限度地捕获风能。

当风轮的轴向与风向偏离时,控制系统发出偏航指令,通过偏航系统校正风轮轴的指向,使风轮始终对准来风方向。

当需要关机时，控制系统发出关机指令，除了借助变桨距制动外，还可以通过安装在传动轴上的制动装置实现制动。

实际上，在风力发电机组中，能量流和信息流组成了闭环控制系统。同时，变桨距系统、偏航系统等也组成了若干闭环的子系统，实现相应的控制功能。

应该指出，由于各种风力发电机组结构的不同，其工作原理也有差异，这里介绍的是比较典型的情况。

二、风力发电机组的构成

从整体上看，风力发电机组可分为风轮、机舱、塔架和基础等部分，如图 1-2 所示。

风轮是由叶片和轮毂组成的。叶片具有空气动力外形，在气流作用下产生力矩，驱动风轮转动，通过轮毂将扭矩输入到主传动系统。机舱是由底盘、导流罩和机舱罩组成的，底盘上安装了除主控制器以外的主要部件。机舱罩后部的上方装有风速和风向传感器，舱壁上有隔音和通风装置等，底部与塔架连接。塔架支撑机舱达到所需要的高度，其上安置发电机和主控制器之间的动力电缆、控制和通信电缆，还装有供操作人员上、下机舱的扶梯，大型机组还设有升降梯。基础为钢筋混凝土结构，根据当地地质情况，设计成不同的形式，其中心预置与塔架连接的基础部件必须保证将风力发电机组牢牢固定在基础上，而基础周围必须设置预防雷击的接地装置。

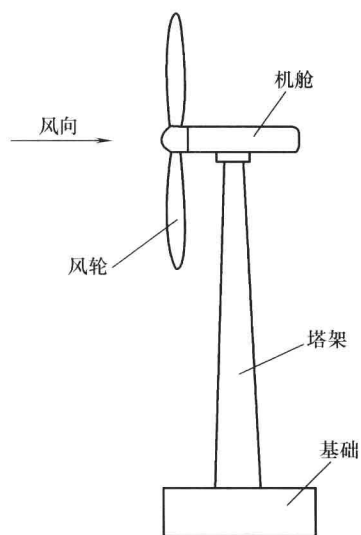


图 1-2 风力发电机组的外观

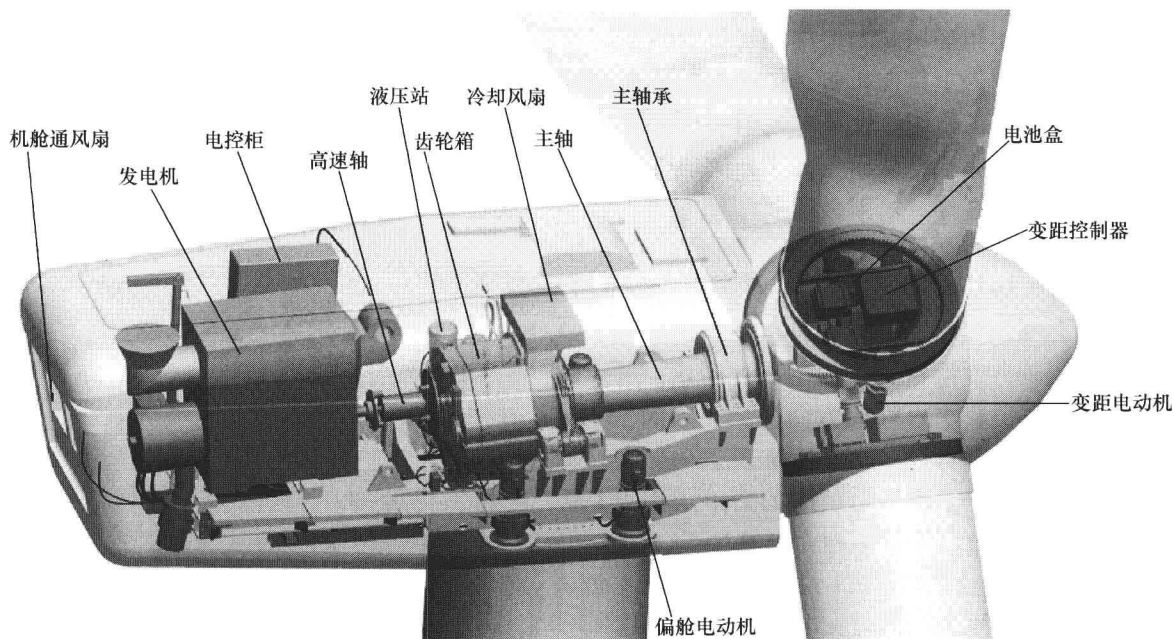


图 1-3 风力发电机组内部结构

图 1-3 为一种变桨距、变速型的风力发电机组内部结构。它由以下基本部分组成：

- (1) 变桨距系统 设在轮毂之中。对于电力变距系统来说，包括变距电动机、变距控制器、电池盒等。
- (2) 发电系统 包括发电机、变流器等。
- (3) 主传动系统 包括主轴及主轴承、齿轮箱、高速轴和联轴器等。
- (4) 偏航系统 由电动机、减速器、变距轴承、制动机构等组成。
- (5) 控制系统 包括传感器、电气设备、计算机控制系统和相应软件。

此外，还设有液压系统，为高速轴上设置的制动装置、偏航制动装置提供液压动力。液压系统包括液压站、输油管和执行机构。为了实现齿轮箱、发电机、变流器的温度控制，设有循环油冷却风扇和加热器。

三、风力发电机组的分类

风力发电机组的类型主要从两个方面来分，一方面是按功率大小来分，另一方面是按结构形式来分。

1. 按装机容量大小分

- (1) 微型 0.1 ~ 1kW；
- (2) 小型 1 ~ 100kW；
- (3) 中型 100 ~ 1 000kW；
- (4) 大型 1 000kW 以上。

2. 按风轮轴方向分

(1) 水平轴机组 水平轴机组是风轮轴基本上平行于风向的风力发电机组。工作时，风轮的旋转平面与风向垂直。

水平轴机组随风轮与塔架相对位置的不同而有上风向与下风向之分。风轮在塔架的前面迎风旋转，叫做上风向机组，如图 1-1 所示。风轮安装在塔架后面，风先经过塔架，再到风轮，叫做下风向机组。上风向机组必须有某种调向装置来保持风轮迎风。而下风向机组则能够自动地对准风向，从而免去了调向装置。但对于下风向机组，由于一部分空气通过塔架后再吹向风轮，这样，塔架就干扰了流过叶片的气流，形成所谓塔影响效应，影响风力机的出力，使性能有所降低。

(2) 垂直轴机组 垂直轴机组是风轮轴垂直于风向的风力发电机组，如图 1-4 所示。其主要特点是可以接收来自任何方向的风，因而，当风向改变时，无需对风。由于不需要调向装置，使它们的结构简化。垂直轴机组的另一个优点是齿轮箱和发电机可以安装在地面上。

由于垂直轴机组需要大量材料，占地面积大，目前，商用大型风力发电机组较少采用。

3. 按桨距角的变化分

(1) 定桨距机组 叶片固定安装在轮毂上，

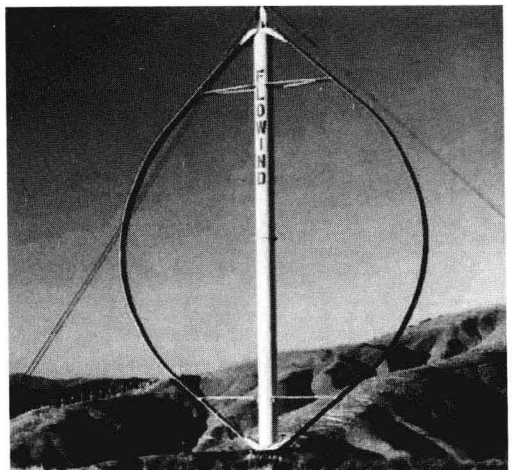


图 1-4 垂直轴风力发电机组

角度不能改变, 风力机的功率调节完全依靠叶片的气动特性。当风速超过额定风速时, 利用叶片本身的空气动力特性, 减小旋转力矩 (失速), 维持输出功率相对稳定。

(2) 变桨距 (正变距) 机组 当风速过高时, 这种机组通过改变桨距角, 使功率输出保持稳定。同时, 机组在起动过程也需要通过变距来获得足够的起动转矩。采用变桨距技术的风力发电机组还可使叶片和整机的受力状况大为改善, 这对大型风力发电机组十分有利。

(3) 主动失速型 (负变距) 机组 这种机组的工作原理是以上两种形式的组合。当风力机达到额定功率后, 相应地增加攻角 (叶片翼型上合成气流方向与翼型几何弦的夹角), 使叶片的失速效应加深, 从而限制风能的捕获, 因此称为负变距型机组。

4. 按发电机转速高低分

(1) 高转速发电机型 发电机转子的转速在同步转速附近。通常, 风轮的转速较低, 达不到发电机发电的要求, 必须通过齿轮箱的增速作用来实现。齿轮箱的主要功能是将风轮在风力作用下所产生的动力传递给发电机, 并使其得到相应的转速。故也将齿轮箱称之为增速箱。

(2) 直接驱动型 应用多极同步风力发电机, 可以使机组在低转速下运行。能够去掉风力发电系统中常见的齿轮箱, 让风力机直接拖动发电机转子运转在低速状态, 这就没有了齿轮箱所带来的噪声、故障率高和维护成本大等问题, 提高了运行可靠性。

(3) 中转速发电机型 (“半直驱”) 这种机组的工作原理是以上两种形式的综合。采用中转速发电机, 减少了传统齿轮箱的传动比, 同时, 也相应地减少了多极同步风力发电机的极数, 从而减小了发电机的体积。

5. 按发电机转速变化分

(1) 定速 (又称恒速) 定速风力发电机组是指其发电机的转速恒定不变, 即不随风速的变化而变化, 始终在一个恒定不变的转速下运行。

(2) 多态定速 多态定速风力发电机组中包含两台或多台发电机, 根据风速的变化, 可以有不同大小和数量的发电机投入运行。

(3) 变速 变速风力发电机组中的发电机在转速随风速时刻变化的状态下工作。目前, 主流的大型风力发电机组都采用变速恒频运行方式。

第二节 风力发电机组的运行

一、风力发电机组的稳态工作点

当外部条件 (如负载、风速和空气密度等) 和自身的参数确定, 风力发电机组经过动态调整后, 将工作在某一平衡工作点, 即稳态工作点。这个工作点取决于风力机、发电机的功率 (或转矩) - 转速特性。

图 1-5 表示的是风力机在不同风速下的功率-转速特性, 以及发电机经由齿轮箱速比转换后的功率-转速特性曲线。由图可见, 当风速一定时, 对应于某一特定转速风力机输出功率最大。在不同风速下, 风力机输出功率最大点的连线叫做最佳风能利用系数曲线。图中的垂直线是同步发电机随风速增加功率增大的情形。发电机自身的转速虽然很高, 但处于齿轮箱低速端的风力机, 其转速却是比较低的。异步发电机以略高于电网频率所对应的转速运

行，因而它的特性曲线与同步机的特性曲线略有差异。直流发电机的功率随着转速的增加而增加，并且其特性曲线形状非常接近风力机的最佳功率系数曲线。但是，直流发电机由于自身固有的维修保养费用高昂，功率质量比小，无法使用高压绕组等缺点，除特殊场合外，已经不再作为发电机使用。

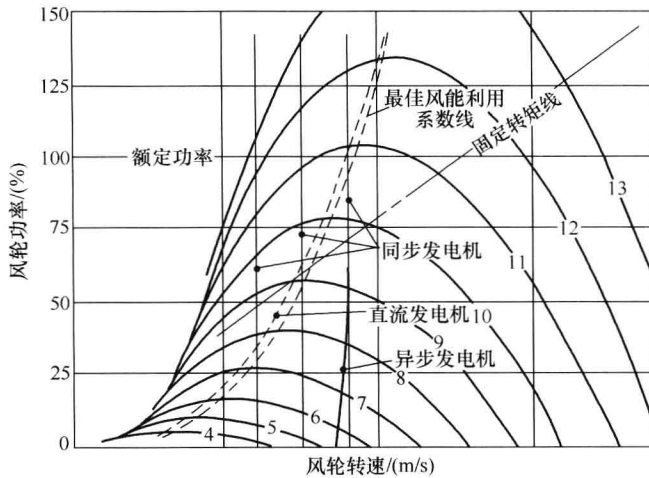


图 1-5 风力发电机组的稳态工作点

风力机和发电机的功率-转速特性曲线的交点就是风力发电机组的稳态工作点。控制系统的任务就是在保证机组安全可靠运行的前提下，使风力发电机组的稳态工作点尽可能靠近风力机的最佳风能利用系数曲线，获得尽可能多的发电量，达到良好的经济效益。同时，在风速超过额定值时，使输出功率保持稳定。

二、最佳风能利用系数

风力机的功率特性通常由一簇风能利用系数 C_p 的无因次性能曲线来表示，其定义为

$$C_p = \frac{P_m}{\frac{1}{2}\rho v^3 A} \tag{1-4}$$

式中 P_m ——风力机输出功率，单位为 W；

ρ ——空气密度，单位为 kg/m^3 ；

v ——来流速度，单位为 m/s；

A ——风轮面积，单位为 m^2 。

在理想状态下， C_p 的最大值为 0.59。

风能利用系数是风力机叶尖速比 λ （风轮叶尖切向速度与风轮前的风速之比）的函数，如图 1-6 所示。

$C_p(\lambda)$ 曲线是桨距角的函数。从图上可以看到 $C_p(\lambda)$ 曲线对桨距角的变化规律；当桨距角逐渐增大时， $C_p(\lambda)$ 将显著地缩小。

如果保持桨距角不变，用一条曲线就能描述出它作为 λ 函数的性能和表示从风能中获取的最大功率。图 1-7 是一条典型的 $C_p(\lambda)$ 曲线。

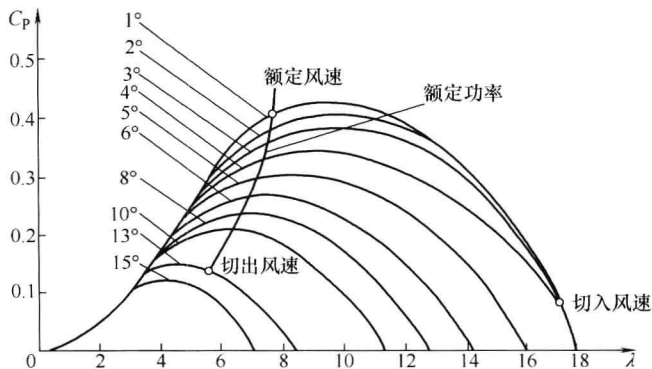


图 1-6 风力机性能曲线

叶尖速比可以表示为

$$\lambda = \frac{R\Omega_r}{v} = \frac{v_t}{v} \quad (1-5)$$

式中 Ω_r ——风力机风轮角速度，单位为 rad/s；

R ——风轮半径，单位为 m；

v ——主导风速，单位为 m/s；

v_t ——叶尖线速度，单位为 m/s。

由式 (1-4) 可得，风力机从风中捕获的机械功率为

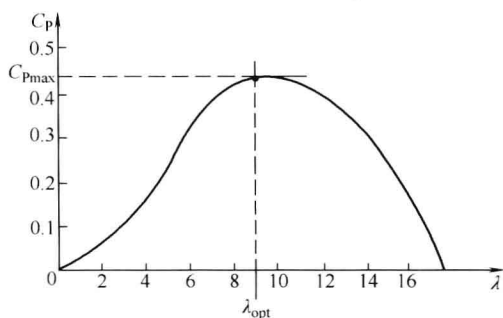


图 1-7 桨距角不变时风力机性能曲线

$$P_r = \frac{1}{2} \rho A C_p v^3 \quad (1-6)$$

由式 (1-6) 可见，在风速给定的情况下，风轮获得的功率将取决于风能利用系数。如果在任何风速下，风力机都能在 C_{pmax} 点运行，便可增加其输出功率。而只要使得风轮的叶尖速比 $\lambda = \lambda_{opt}$ ，就可维持风力机在 C_{pmax} 下运行。因此，风速变化时，只要调节风轮转速（即发电机的转速），使其叶尖速度与风速之比保持不变，就可获得最佳的风能利用系数。这就是变速风力发电机组进行转速控制的基本目标。

对于图 1-7 所示的情况，获得最佳风能利用系数的条件是

$$\lambda = \lambda_{opt} = 9 \quad (1-7)$$

这时， $C_p = C_{pmax} = 0.43$ ，而从风能中获取的机械功率为

$$P_r = k C_{pmax} v^3 \quad (1-8)$$

式中 k ——常系数， $k = \rho A / 2$ 。

设 v_{ts} 为同步转速下的叶尖线速度，即

$$v_{ts} = 2\pi R n_s \quad (1-9)$$

式中 n_s ——在发电机同步转速下的风轮转速。

对于任何其他转速 n_r ，则有

$$\frac{v_t}{v_{ts}} = \frac{n_r}{n_s} = 1 - s \quad (1-10)$$

根据式 (1-5)、式 (1-7) 和式 (1-10), 可以建立给定风速 v 与最佳转差率 s (最佳转差率是指在该转差率下, 发电机转速使得风力机运行在最佳的风能利用系数 $C_{P_{\max}}$) 的关系式为

$$v = \frac{1-s}{\lambda_{\text{opt}}} v_{\text{ts}} = \frac{1-s}{9} v_{\text{ts}} \quad (1-11)$$

这样, 对于给定风速的相应转差率可由式 (1-11) 来计算。

但是, 由于风速测量的不可靠性, 很难建立转速与风速之间直接的对应关系。实际上, 并不是根据风速变化来调整转速的。

为了不用风速控制风力机, 可以修改功率表达式, 以消除对风速的依赖关系, 按已知的 $C_{P_{\max}}$ 和 λ_{opt} 计算 P_{opt} 。如用转速代替风速, 则可以导出功率与转速的函数, 三次方关系仍然成立, 即最佳功率 P_{opt} 与转速的三次方成正比

$$P_{\text{opt}} = \frac{1}{2} \rho A C_{P_{\max}} [(R/\lambda_{\text{opt}}) \Omega_r]^3 \quad (1-12)$$

由于机械强度和其他物理性能的限制, 输出功率也是有限度的, 超过这个限度, 风力发电机组的某些部分便不能工作。因此, 风力发电机组受到以下两个基本限制:

- 1) 功率限制: 所有电路及电力电子器件受功率限制。
- 2) 转速限制: 所有旋转部件的机械强度受转速限制。

三、风力发电机组的运行特征

1. 定桨距风力发电机组

定桨距风力发电机的主要结构特点: 叶片与轮毂的连接是固定的, 即当风速变化时, 叶片的迎风角度不能随之变化。当风速高于额定风速时, 叶片必须能够自动地将功率限制在额定值附近, 叶片的这一特性被称为自动失速性能。叶片的失速调节原理如图 1-8 所示。图中 F 为作用在叶片上的气动合力, 该力可以分解成 F_d 、 F_l 两部分; F_d 与风速垂直, 称为驱动力, 使叶片转动; F_l 与风速平行, 称为轴向推力, 通过塔架作用到地面上。当叶片的安装角度不变时, 随着风速的增加, 攻角增大, 当达到临界攻角时, 升力系数开始减小, 阻力系数不断增大, 造成叶片失速。失速调节叶片的攻角沿轴向由根部向叶尖逐渐减少, 因而, 根部叶面先进入失速, 随风速增大, 失速部分向叶尖处扩展, 原先已失速的部分, 失速程度加深, 未失速的部分逐渐进入失速区。失速部分使功率减少, 未失速部分仍有功率增加, 从而使输入功率保持在额定功率附近。

2. 变桨距风力发电机组

与定桨距风力发电机组相比, 变桨距风力发电机组能使风轮叶片的桨距角随风速而变化, 具有在额定功率点以上输出功率平稳的特点。变桨距风力发电机组的功率调节不完全依靠叶片的气动性能。当功率在额定功率以下时, 控制器将桨距角置于 0° 附近, 可认为等于定桨距风力发电机组, 发电机的功率根据叶片的气动性能随风速的变化而变化。

当功率超过额定功率时, 变桨距机构开始工作, 调整桨距角, 使叶片攻角不变, 将发电机的输出功率限制在额定值附近, 如图 1-9 所示。叶片受力定义与图 1-8 相同。

但是, 随着并网型风力发电机组容量的增大, 大型风力发电机组的单个叶片已重达数

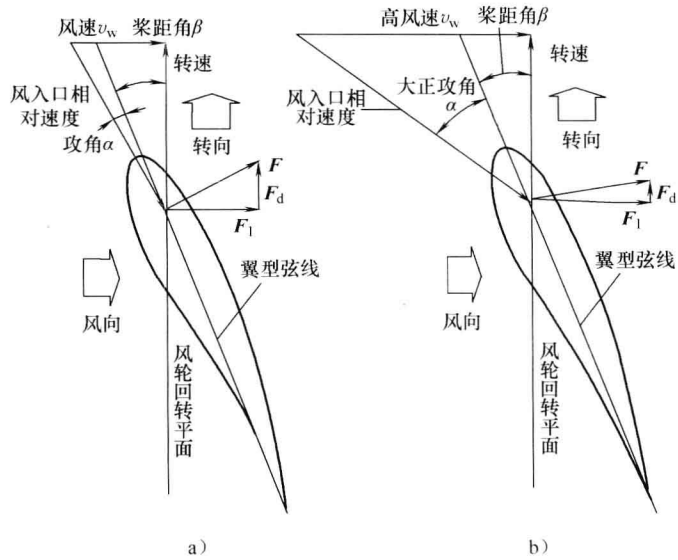


图 1-8 失速调节原理

a) 小风速 b) 大风速

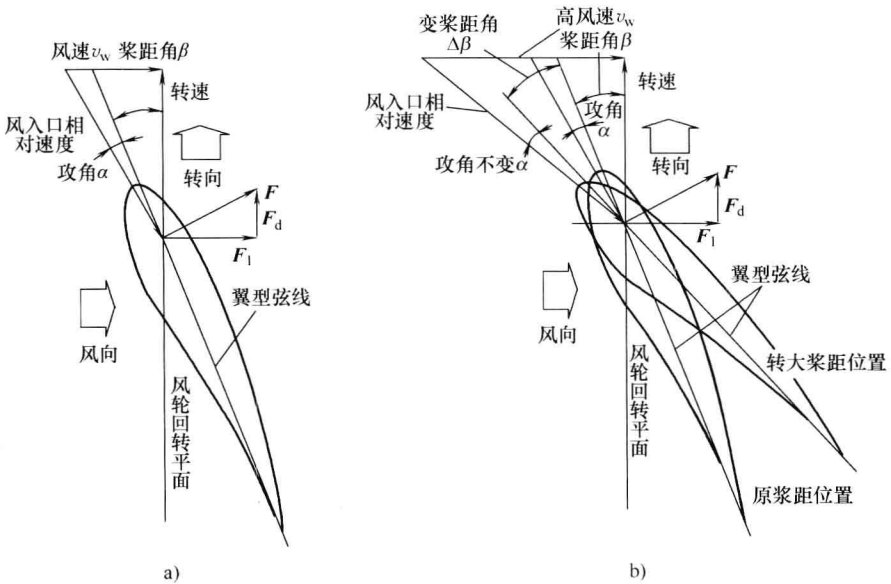


图 1-9 变桨距调节

a) 小风速 b) 大风速

吨，操纵如此巨大的惯性体，并且响应速度要能跟得上风速的变化是相当困难的。事实上，如果没有其他措施，那么变桨距风力发电机组的功率调节对高频风速变化是无能为力的。因此，近年来生产的变桨距风力发电机组，除了对桨距角进行控制以外，还通过控制发电机转速使输出的功率曲线更加平稳。