

中图分类号：TM614

学科分类号：080804

论文编号：1028703 09-0146

硕士学位论文



定桨距变速风力发电机组的 控制技术及其仿真

研究生姓名 赖日新

学科、专业 电力电子与电力传动

研究方向 新能源发电

指导教师 马运东 副教授

南京航空航天大学

研究生院 自动化学院

二〇〇九年一月

中图分类号: TM614

论文编号: 1028703 09-0146

学科分类号: 080804

硕士学位论文

定桨距变速风力发电机组的控制 技术研究及其仿真¹

研究生姓名 赖日新
专业名称 电力电子与电力传动
研究方向 新能源发电
指导教师 马运东 副教授

南京航空航天大学

研究生院 自动化学院

二〇〇九年一月

¹国家重点基础研究发展规划项目(973 计划)(2007CB210303)

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics
The Graduate School
College of Automation Engineering

**Research on control for fixed-pitch
variable-speed wind turbine and its
simulation**

A Thesis in

Electrical Engineering

by Lai Ri-Xin

Advised by

Associate Professor Ma Yundong

Submitted in Partial Fulfillment

of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

January, 2009

承诺书

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

本人授权南京航空航天大学可以有权保留送交论文的复印件，允许论文被查阅和借阅，可以将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。

(保密的学位论文在解密后适用本承诺书)

作者签名：

日 期： 2009.03.18

摘 要

与恒速风力发电机组相比, 变速风力发电机组能够在较大风速范围内实现最大功率跟踪, 机组具有较高的年发电量。但传统的变桨距变速风力发电机组需要复杂的变桨距系统, 这增加了机组成本, 降低了可靠性。为此, 本文重点研究了定桨距变速风力发电机组的控制技术。该机组摒弃了复杂的变桨距系统, 简化了结构, 降低了成本, 其变速控制系统能够同时实现机组在低风速区的最大风能跟踪和高风速区的恒功率控制, 从而使得定桨距变速风力发电机组具有与变桨距变速风力发电机组相媲美的功率特性。

为实现上述目标, 本文首先研究了定桨距变速风力发电机组的基本控制策略, 阐述了不同风速条件下风力机的运行状态, 得到了在整个运行风速范围内机组期望转速与风速的关系。然后详细研究了基于永磁同步发电机的定桨距变速风力发电机组的动态特性, 建立了系统的小信号线性化模型, 并分析系统的稳定性。考虑到机组在其运行风速范围内的工作点是大范围变化的特点, 本文采用鲁棒 PID 控制器设计了机组的转速控制系统。分析结果表明该转速控制系统在机组工作点大范围变化的情况下仍具有良好的鲁棒性, 其动态响应特性符合设计要求。

最后在阐述机组并网控制技术的基础上, 本文搭建了定桨距变速风力发电机组并网发电系统的仿真模型, 通过仿真验证了机组的控制系统性能。仿真结果表明定桨距变速风力发电机组能够在整个运行风速范围里稳定运行, 其变速控制系统具有良好的动态响应特性, 机组完全依靠变速控制系统就能同时实现低风速区的最大风能跟踪和高风速区的恒功率控制。

关键词: 定桨距风力机, 永磁同步发电机, 变速控制, 鲁棒控制器, 并网控制, 系统仿真

Abstract

Unlike the constant speed wind turbines, the variable speed wind turbines can be controlled for Maximum Power Point Tracking (MPPT) in wide wind speed, which makes the variable wind turbines have more annual energy output under the same wind condition than constant speed wind turbines. But traditional pitch-controlled variable speed wind turbines need complex pitch control system, which increases the cost and reduces the reliability. Therefore, this paper focuses on the control of fixed-pitch variable speed wind turbines, which simplify structure and reduce the cost. Fixed-pitch variable speed wind turbines can be operated not only for MPPT in low wind speed but also for constant power control in high wind speed with the speed control system, which makes the fixed-pitch wind turbines have the same power characteristic with the pitch-controlled wind turbines.

In the first, this paper studied the basic control strategy for fixed-pitch variable speed wind turbines, which described the relations between rotating speed reference and wind velocity. In the second, the dynamics of the wind turbine with permanent magnet synchronous generator (PMSG) are researched and their small-signal linear model is established, on the basis of which the stability of system is studied. Considering that the operating point of wind turbine is changing under different wind condition, the PID controller is design for speed control system. The further analysis shows that the speed control system with the PID controller designed has good robustness under different wind condition.

In the last, the grid-connection control is papered and the simulation model of fixed-pitch variable speed wind turbine is built in the Matlab. Then simulations are done to analyze the property of speed controller of fixed-pitch variable speed wind turbine, which show that the fixed-pitch variable speed wind turbine can be operated stably in all operating wind speed and the speed controller have good dynamic characteristics, which indicated that the fixed-pitch variable speed wind turbine can be operated not only for MPPT in low wind speed but also for constant power control in high wind speed.

Key Words: Fixed-pitch wind turbine, PMSG, speed-control, robust controller, grid-connection control, simulation

注释表

一、缩略词及其名称

缩略词	名称	缩略词	名称
PMSG	永磁同步发电机	DFIG	交流励磁双馈发电机
MPPT	最大功率跟踪	PWM	脉宽调制
SVPWM	空间电压矢量调制		

二、基本符号及其意义

基本符号	意义	基本符号	意义
P_a	单位时间内的风能	P_m	机械功率
P_e	有功功率	Q_e	无功功率
T_m	风力机气动转矩	T_e	发电机电磁转矩
J	转动惯量	B	摩擦系数
ω	转速	V	风速
λ	叶尖速比	β	节距角
C_p	风能利用系数	C_T	转矩系数
α	气动转矩对风速偏导数	γ	气动转矩对转速偏导数
u	电压	i	电流
v_{dc}	直流母线电压	ψ	磁链
L	电感	C	电容
$G_c(s)$	控制器传递函数	$G(s)$	开环传递函数
$\Phi(s)$	闭环传递函数	$D(s)$	特征方程
T_s	开关周期	K_{PWM}	电路 PWM 等效增益
T_f	转速采样延迟时间	T_v	风速采样延迟时间
t_s	调节时间	$\sigma\%$	超调量

目 录

第一章 绪论	1
1.1 风力机的功率控制技术	1
1.1.1 风力机的空气动力特性	1
1.1.2 风力机功率控制方式	3
1.2 发电机的变速恒频发电技术	4
1.2.1 交流励磁双馈风力发电机组	4
1.2.2 永磁直驱风力发电机组	5
1.3 本课题研究目的及意义	6
第二章 机组变速控制技术	8
2.1 定桨距变速风力发电机组的基本控制策略	9
2.2 永磁同步发电机控制系统	11
2.2.1 发电机的动态模型	11
2.2.2 控制系统设计	12
2.3 机组转速控制系统	14
2.3.1 机组的动态方程	14
2.3.2 小信号线性化模型	16
2.3.3 稳定性分析	17
2.3.4 控制系统设计	19
2.4 本章小结	26
第三章 机组并网控制技术	27
3.1 机组的并网发电系统	27
3.2 Boost 电路控制系统	29
3.3 并网逆变器控制系统	30
3.3.1 电流内环设计	30
3.3.2 电压外环设计	32
3.3.3 无功功率控制	33
3.4 本章小结	33
第四章 机组的建模仿真	34
4.1 系统仿真模型	34
4.1.1 风速仿真模型	34

4.1.2 风力机仿真模型	35
4.1.3 系统模型及其仿真参数	37
4.2 仿真分析	38
4.2.1 低风速区动态仿真	38
4.2.2 高风速区动态仿真	41
4.2.3 风速跟踪性能仿真	44
4.3 本章小结	47
第五章 总结与展望	48
5.1 本文总结	48
5.2 未来工作展望	48
参考文献	49
致 谢	52
攻读硕士学位期间发表的论文	53

图表清单

图 1.1	风能利用系数曲线	2
图 1.2	交流励磁双馈风力发电机组	4
图 1.3	并网型永磁直驱风力发电机组	6
图 2.1	检测风速的变速控制系统	8
图 2.2	定桨距变速风力发电机组的变速控制策略	9
图 2.3	发电机电流控制系统	12
图 2.4	发电机电流控制系统简化结构	13
图 2.5	风力机转矩系数曲线	15
图 2.6	机组转速控制系统	17
图 2.7	机组转速鲁棒控制系统	20
图 2.8	转速控制系统的根轨迹	22
图 2.9	无前置滤波器时系统阶跃响应曲线	22
图 2.10	有前置滤波器时系统阶跃响应曲线	23
图 2.11	线性化系数为-50 时的闭环极点	24
图 2.12	线性化系数为 250 时的闭环极点	24
图 2.13	不同线性化系数时系统的阶跃响应	25
图 3.1	定桨距变速机组并网发电系统	27
图 3.2	系统的并网控制策略	28
图 3.3	Boost 升压电路	29
图 3.4	前级直流母线电压控制系统	29
图 3.5	机组的并网逆变部分	30
图 3.6	电流解耦控制策略	31
图 3.7	电流内环控制系统	31
图 3.8	电流内环等效框图	32
图 3.9	并网逆变器电压控制系统	33
图 4.1	风速仿真模型	35
图 4.2	风力机仿真模型	35
图 4.3	风力机模型的特性曲线	36
图 4.4	机组并网发电系统仿真模型	37
图 4.5	带斜坡补偿的峰值电流调制模块	37

图 4.6 电网电压矢量检测模型	37
图 4.7 低风速区风力机仿真波形	39
图 4.8 低风速区发电机仿真波形	40
图 4.9 低风速区 boost 电路仿真波形	40
图 4.10 低风速区并网仿真波形	41
图 4.11 高风速区风力机仿真波形	42
图 4.12 高风速区发电机仿真波形	43
图 4.13 高风速区 boost 电路仿真波形	43
图 4.14 高风速区并网仿真波形	44
图 4.15 风速跟踪时风力机仿真波形	45
图 4.16 风速跟踪时发电机仿真波形	45
图 4.17 风速跟踪时 boost 电路仿真波形	46
图 4.18 风速跟踪时并网仿真波形	46
表 4.1 定桨距变速风力发电机组并网发电系统的仿真参数	38

第一章 绪论

随着社会经济发展，全世界对能源的需求越来越大。传统的化石能源不仅储量有限，还带来环境污染的问题。因此，作为可再生的清洁能源，风能的开发利用越来越受到各国政府和科研机构的高度重视与关注。

风力发电是风能利用的主要方式。从能量转换角度来看，风力发电机组是将风能转换为电能的能量转换系统，其主要部分是风力机和发电机。因此，风力机的功率控制技术和发电机的变速恒频发电技术是风力发电的关键技术^[1]，其发展水平直接决定着风力发电机组的整体性能。

1.1 风力机的功率控制技术

风力机是将风能转换为机械能的装置。在气流作用下，风力机旋转产生机械能，带动发电机发电。但风力机并不能将通过其旋转面的风能全部转换为自身旋转轴上的机械能，在风能向机械能的转换过程中存在风能利用效率的问题。风力机功率控制技术的目的就是研究如何在不同风速条件下获得期望的风能利用效率，进而有效控制风力机获得的机械功率大小。

1.1.1 风力机的空气动力特性

由流体力学可知，单位时间内通过风力机旋转面的风能大小 P_a 与风速 V 的三次方成正比：

$$P_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 \quad (1.1)$$

式中：

P_a — 单位时间内的风能大小，单位为 W；

ρ — 气流密度，单位为 kg/m^3 ；

R — 桨叶半径，单位为 m；

V — 风速大小，单位为 m/s；

在讨论风力机的能量转换与控制时，以下特性系数具有特别重要的意义：

1 叶尖速比 λ

为了表示风力机在不同风速中的状态，用桨叶的叶尖圆周线速度与风速之比来衡量，称为叶尖速比 λ ，其定义表达式：

$$\lambda = \frac{\omega R}{V} \quad (1.2)$$

其中 ω 为风力机的转速，单位为 rad/s。

2 桨叶节距角 β

桨叶节距角定义为半径 r 处回转面与桨叶截面弦线长之间的夹角。

3 风能利用系数 C_p

风能利用系数 C_p 反应了风力机的风能转换效率，其定义为风力机获得的机械功率 P_m 与单位时间内通过其旋转面的风能 P_a 之比，即：

$$C_p = \frac{P_m}{P_a} \quad (1.3)$$

由风能利用系数定义可知，风力机获得的机械功率由单位时间内通过其旋转面的风能及风能利用系数决定，即：

$$P_m = P_a * C_p = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p \quad (1.4)$$

根据贝兹理论，风能利用系数 C_p 的上限为 0.593，即风力机最多能够将通过其旋转面风能的 59.3% 转换为风力机自身旋转轴上的机械能。进一步的分析表明，风能利用系数 C_p 与风力机的叶尖速比 λ 和节距角 β 有关。

典型风力机的风能利用系数曲线如下图所示^[2,3]。

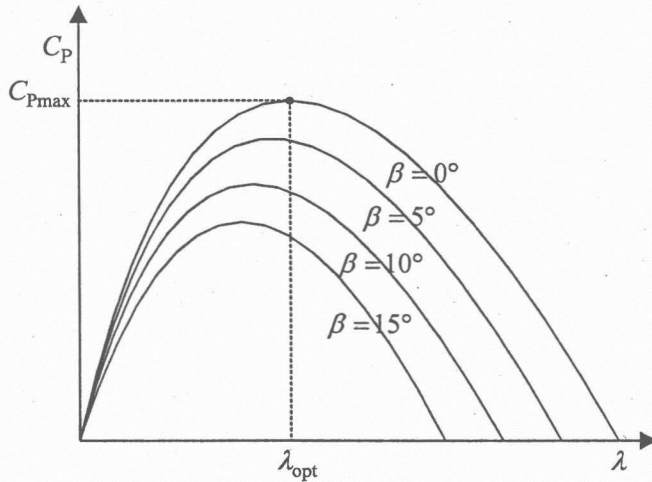


图 1.1 风能利用系数曲线

由上图可知：

1. 当叶尖速比 λ 固定时，风能利用系数 C_p 随节距角 β 增大而减小；
2. 若节距角 β 固定，则当叶尖速比 λ 等于某特定值 λ_{opt} 时，风能利用系数最大。该叶尖速比又称为最佳叶尖速比。此后，叶尖速比增大或减小，风能利用系数 C_p 均会下降。

根据上述分析，改变风力机的叶尖速比 λ 或者节距角 β ，均可改变风力机的风能利用系数，从而有效控制其获得的机械功率大小，这是风力机功率控制的理论依据。

1.1.2 风力机功率控制方式

如前所述, 风力机的功率控制是通过改变其风能利用系数 C_p 来实现的。根据其具体实现方式的不同, 风力机功率控制方式主要有以下三种, 即: 失速控制、变速控制和变桨距控制。

1. 失速控制^[4]

失速控制是利用桨叶的失速特性来限制高风速区风力机获得的机械功率大小。失速控制的基本原理是: 保持风力机转速不变, 进入高风速区后, 叶尖速比随着风速增加而减小, 其风能利用系数 C_p 随之减小, 从而将风力机的机械功率限制在机组的额定值以下。

失速控制的关键是确保风力机的转速恒定。采用失速控制技术的机组称为定桨距失速型风力发电机组。该机组一般采用异步发电机, 其发电机输出端直接与大电网相连。因为电网电压和频率几乎不变, 在这种情况下, 异步发电机具有较硬的机械特性。因此, 在整个运行风速范围内, 异步发电机转速在同步转速以上较小的区域内变化, 可以近似认为是恒速运行。

失速控制能够有效限制高风速区风力机获得的机械功率大小, 从而确保机组能在较大的风速范围内安全运行。采用失速控制的风力发电机组无需额外控制系统, 完全依靠桨叶自身失速特性来限制高风速时风力机的机械功率, 结构比较简单, 性能可靠。

失速控制的主要缺点有:

1. 低风速时风力机的风能利用系数较低。因为转速固定, 所以风力机只在特定风速条件下才有最大风能利用系数 C_{pmax} , 机组的风能利用效率较低;
2. 高风速时风力机的机械功率并不能稳定在机组额定值。实际上, 随着风速增加, 桨叶失速程度加深, 风力机的机械功率随风速增加反而有所下降;

与恒速机组相比, 变速机组具有较高的风能利用效率, 其年发电量较高。同时, 变速风力发电机组在高风速区能实现恒功率控制, 其风力机功率不随风速变化而变化, 机组在高风速区具有更好的功率特性。因此, 近年来变速机组已逐渐取代恒速机组, 成为风力发电的主流机组。

2. 变速控制技术^[5,6]

变速控制的基本原理是: 当风速变化时, 相应改变转速以获得期望的叶尖速比, 从而使风力机具有期望风能利用系数, 达到控制风力机机械功率的目的。

在低风速区, 变速控制系统确保风力机具有最佳叶尖速比 λ_{opt} , 此时风力机具有最大风能利用系数 C_{pmax} , 机组的风能利用效率最高。该区域的变速控制又称为最大风能跟踪或者最大功率跟踪(MPPT), 其主要控制目标是确保风力机跟踪其最大风能利用系数点。

在高风速, 随着风速增大, 风力机的机械功率已经达到机组的额定功率。若风速继续增大, 则必须减小风能利用系数从而将风力机的机械功率稳定在机组的额定功率。为此, 高风速区变速控制的目标是根据风速动态调节转速以获得期望的风能利用系数, 实现机组的恒功率运行。

该区域的变速控制又称为恒功率控制。与失速控制不同，恒功率控制具有非常平稳的功率特性，即在高风速区风力机的机械功率将稳定在机组的额定功率，其大小几乎不随风速变化而变化。

从理论上讲，只需采用变速控制就可以同时实现低风速的最大风能跟踪和高风速的恒功率控制。但是高风速区的恒功率控制仍面临诸多技术问题。为解决变速机组在高风速区的功率控制问题，变桨距变速风力发电机组采用了变桨距控制系统，通过改变桨叶节距角将风力机在高风速区的机械功率稳定在机组的额定功率。

3. 变桨距控制技术^[7,8]

变桨距控制的基本原理是在高风速区，通过增加节距角 β 以减小风能利用系数 C_p ，从而将风力机获得的机械功率稳定在机组的额定功率值。

变桨距风力发电机组与定桨距失速型机组相比，具有在额定功率点以上风力机的机械功率平稳的特点，即在高风速区，风力机的机械功率可以稳定在额定值，几乎不随风速变化而变化，这与变速控制在高风速区的效果相似。同时，采用变桨距技术的风力发电机组可使桨叶和整机的受力状况大为改善，这对大型风力发电机组的总体设计非常有利。

变桨距控制的缺点是需要复杂的变桨距控制系统和变桨距执行机构，这增加了机组的制造和维护成本，降低了系统的可靠性。

1.2 发电机的变速恒频发电技术

发电机的变速恒频发电技术有两方面的内容即：发电机的变速运行和输出频率固定的交流电能。不同的风力发电机组，其变速恒频发电方式是不同的，现在研究较多的机组是交流励磁双馈风力发电机组和永磁直驱风力发电机组，下面简要介绍这两种机组的变速恒频发电方式。

1.2.1 交流励磁双馈风力发电机组

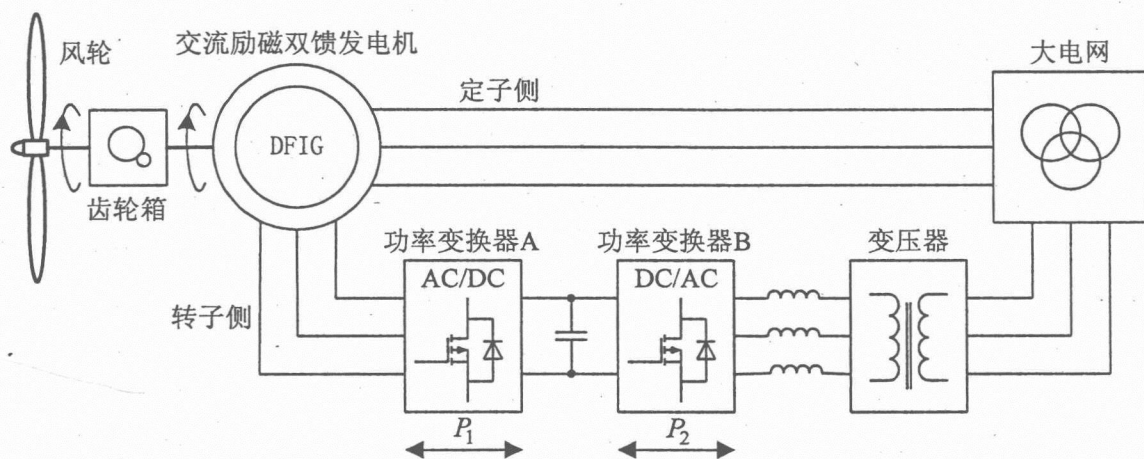


图 1.2 交流励磁双馈风力发电机组

交流励磁双馈风力发电机组构成的并网发电系统如上图 1.2 所示。风力机通过齿轮箱驱动交流励磁双馈发电机(DFIG)发电。发电机的定子绕组直接与电网相连,其转子绕组则通过背靠背的双向变换器与并网电感连接,然后经变压器接入电网。

功率变换器 A 主要有两个作用:并网过程控制和最大风能跟踪。在机组并网过程中,功率变换器 A 调节发电机转子绕组电流以控制其定子端空载电压。当发电机定子端的空载电压与电网电压满足并网条件,即两者的频率、幅值和相位完全相同时,发电机并网发电。机组并网后,功率变换器 A 动态调节发电机转子电流以控制发电机输出功率,实现机组的最大风能跟踪。

功率变换器 B 为并网逆变器,其主要作用是完成直流母线与电网间的能量交换,实现系统的能量平衡。为了实现机组的变速运行,转子与电网间能量必须能够双向流动:当转速低于同步转速时,电网向转子输入功率;当转速高于同步转速时,转子向电网输出功率;当转速等于同步转速时,电网向转子提供直流励磁。因此,为实现系统的能量双向流动,交流励磁双馈风力发电机组需要能量可双向流动的功率变换器。

由于这种变速恒频发电技术是通过转子回路来实现的,流过转子的功率是由交流励磁双馈发电机的转速运行范围所决定的转差功率,该转差功率仅为发电机全部发电功率的一部分。因此,功率变换器的容量仅为发电机容量的一部分,这样可以大大减小功率变换器的成本和技术难度^[9]。

同时,交流励磁双馈风力发电机组在磁场定向技术的基础上,还可以实现发电机有功、无功功率的灵活控制,这对电网而言可以起到无功补偿的作用^[10,11]。

交流励磁双馈风力发电机组的主要缺点有以下几个方面:

1. 交流励磁双馈发电机有滑环和电刷,具有有刷电机的诸多弊端;
2. 发电机与风力机间需要齿轮箱,这增加了机组的制造维护成本;
3. 发电机定子端直接与电网相连,电网波动可能危及机组的安全运行。
4. 机组的并网技术比较复杂;

虽然交流励磁双馈风力发电机组有上述缺点,但是其功率变换器需要的容量较小,仍不失为一种能实现工业应用的机组,目前已经得到广泛的商业应用。

1.2.2 永磁直驱风力发电机组

风力机的转速较低,为了驱动高速运行的发电机,风力机和发电机间必须采用齿轮箱,这不仅增加了制造维护成本,还可能导致漏油事故,引起环境污染^[12]。近年来出现的直驱式风力发电机组摒弃了复杂的齿轮箱,这从根本上解决了齿轮箱带来的相关问题。

设计低速运行的发电机是直驱式风力发电机组的关键技术之一。永磁同步发电机具有较高的功率密度、良好的控制特性,非常适合直驱式风力发电机组^[13,14]。

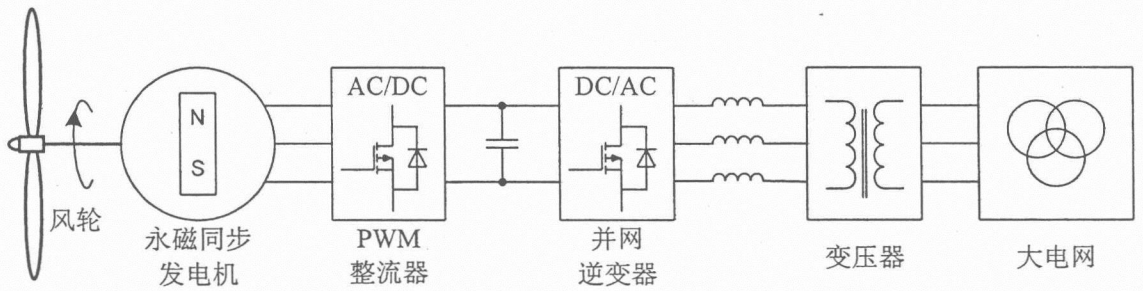


图 1.3 并网型永磁直驱风力发电机组

永磁直驱风力发电机组构成的并网发电系统如上图所示，机组的变速恒频发电是通过控制发电机定子电流来实现的。由于风速是不断变化的，风力机和发电机转速在变速控制系统作用下也将随之变化，产生频率变化的电功率。发电机发出的频率变化的交流电首先经 PWM 整流器变换为直流电然后通过并网逆变器向电网输出与电网频率相同的交流电。同时，机组的变速控制系统通过 PWM 整流器调节发电机定子端输出电流的幅值和相位以控制发电机的电磁转矩，实现机组的变速运行。后级并网逆变器作用与交流励磁双馈风力发电机组的并网逆变器作用相似。但与交流励磁双馈风力发电机组不同，该机组的全部发电功率都需要通过 PWM 整流器和并网逆变器输入电网，功率变换器的容量要求较高。

并网型永磁直驱风力发电机组具有以下特点：

1. 风力机与发电机直接相连，无齿轮箱；
2. 并网时几乎没有电流冲击，并网过程对电网影响较小；
3. 发电机通过交直交变频器与电网连接，电网波动不会直接危及机组的安全运行；
4. 机组变速控制系统和并网控制系统相互独立，简化了控制系统的设计；
5. 低速永磁同步发电机体积较大，成本较高；
6. 需要全功率变换器，变换器设计难度大，成本高。

考虑到永磁直驱风力发电机组的诸多优点，随着永磁同步发电机制造技术的发展和电力电子技术的进步，这种机组必将得到越来越多的关注，具有非常好的发展前景。

1.3 本课题研究目的及意义

经过数十年发展，低风速区的变速控制技术，即最大风能跟踪技术日臻完善，已经有许多成功的商业应用。但在高风速区的变速控制，即恒功率控制仍面临诸多技术难题，相关的研究也不多，这极大限制了变速控制在风力机功率控制中的应用。虽然变桨距变速风力发电机组能够通过变桨距系统实现风力机在高风速区的恒功率控制，但其需要复杂的变桨距控制系统，这增加额外的制造维护成本，降低了系统可靠性。