



“十二五”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

# 风力发电系统 的建模与仿真

FENGLI FADIAN XITONG DE  
JIANMO YU FANGZHEN

王毅 朱晓荣 赵书强 编著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION



“十二五”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

# 风力发电系统 的建模与仿真

王毅 朱晓荣 赵书强 编著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# 《风力发电工程技术丛书》

## 编 委 会

顾 问 陆佑楣 张基尧 李菊根 晏志勇 周厚贵 施鹏飞

主 任 徐 辉 毕亚雄

副 主 任 汤鑫华 陈星莺 李 靖 陆忠民 吴关叶 李富红

委 员 (按姓氏笔画排序)

马宏忠 王丰绪 王永虎 尹廷伟 申宽育 冯树荣

刘 丰 刘 玮 刘志明 刘作辉 齐志诚 孙 强

孙志禹 李 炜 李 莉 李同春 李承志 李健英

李睿元 杨建设 吴敬凯 张云杰 张燎军 陈 刚

陈党慧 陈 澜 林毅峰 易跃春 周建平 郑 源

赵生校 赵显忠 胡立伟 胡昌支 俞华锋 施 蓓

洪树蒙 祝立群 袁 越 黄春芳 崔新维 彭丹霖

董德兰 游赞培 蔡 新 糜又晚

丛书主编 郑 源 张燎军



# 前 言

电力系统的仿真技术在其规划设计和运行管理中都发挥着重要的作用，随着可再生能源、分布式发电、储能等新技术的融入，电力系统各种仿真软件也在不断发展完善之中。风电在全球范围的迅猛发展，促进了各种新型风力发电技术的不断涌现，风电机组的多样性以及电力电子变流器的并网控制策略日趋复杂，需要建立比传统发电方式更加详细和准确的仿真模型，以揭示和评估联网运行风电机组的动态特性。随着风力发电在电力系统的渗透率不断增加，其间歇性、随机性等固有特点对电网运行的影响日益显著，对风电系统的准确建模，是对含风电的电网进行稳态和暂态特性分析的必要手段。

本书在讲述风力发电的机械和电气系统数学模型及并网控制策略原理的基础上，结合具体算例，通过 DlgSILENT 或 MATLAB/Simulink 仿真软件建立典型风电机组的仿真模型，论述其最大功率跟踪控制、有功和频率调节、无功和电压控制等风电机组并网控制的主要特性，分析风电接入对电网的影响，研究低电压穿越、虚拟惯性控制、阻尼控制等改善并网特性的附加控制，以及通过柔性直流输电联网等技术。

本书第 1 章概述了风电的发展与现状、风电机组的类型与构成，介绍了风电系统仿真要求及组成模块。第 2 章介绍了风力机的气动与机械系统的原理及建模，包括风速模型、风轮模型和轴系模型。第 3 章介绍定速机组的原理与建模，分析其并网特性及软启动的原理。第 4 章介绍了双馈感应电机的运行原理，对其稳态特性及功率关系予以说明，并建立了双馈电机、变流器接控制系统的动态模型，通过仿真算例研究双馈风电机组的并网发电特性。第 5 章首先介绍全功率换流器驱动的风电机组的结构和基本原理，建立 PMSG 的动态

## 本书编辑出版人员名单

责任编辑 丁 琪 李 莉

封面设计 李 菲

版式设计 黄云燕

责任校对 张 莉 吴翠翠

责任印制 崔志强 王 凌



# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 概述 .....	1
1.2 风力发电的发展与现状 .....	2
1.3 风力发电机组的类型及构成 .....	4
1.4 风力发电系统的仿真 .....	7
1.5 仿真软件概述 .....	10
<b>第 2 章 风力机的气动和机械系统建模</b> .....	12
2.1 概述 .....	12
2.2 风速模型 .....	12
2.3 风轮模型 .....	17
2.4 轴系模型 .....	25
2.5 仿真算例 .....	29
<b>第 3 章 定速异步风力发电机组的原理及建模</b> .....	34
3.1 概述 .....	34
3.2 结构和原理 .....	34
3.3 稳态模型及特性 .....	36
3.4 仿真算例 .....	40
<b>第 4 章 双馈异步风力发电机组的原理及建模</b> .....	45
4.1 概述 .....	45
4.2 运行原理和功率关系 .....	45
4.3 动态模型 .....	48
4.4 控制策略 .....	57
4.5 仿真算例 .....	65

# 第 1 章 绪 论

## 1.1 概 述

随着全球人口增长和经济发展对能源需求的持续增加，使用传统能源而面临的能源短缺和环境污染问题日益突出。煤、石油、天然气是当今世界的三大主力能源，目前约占一次能源消耗的 80%。而化石性能源的稀缺性和不可再生性使其价格不断上涨，按现在能源的消耗速度和探明储量，世界上的石油、天然气和煤等生物化石能源有可能在 40~200 年内逐渐耗尽；并且化石性能源燃烧产生有害气体，污染环境、危害身体健康、导致全球变暖。因此，寻求清洁、可再生的替代性能源以满足不断增长的能源需求，是当今世界面临的重要问题。

替代性能源包括水能、核能和可再生能源。水能和核能虽然是现阶段低碳能源的首选，但水电开发总量有限并且影响自然环境，核电有泄漏危险和核废料处理问题。从长远来看，开发和利用清洁的、取之不尽用之不竭的可再生能源才是未来解决能源与环境问题的根本途径。

可再生能源包括太阳能、风能、生物质能、地热能、海洋能、氢能等。而其中风能是目前可再生能源中技术成熟程度、规模化开发程度和商业化程度最高的发电方式。风能由太阳能转化而来，地球表面的温差引起空气流动，而空气具有一定质量，因此空气流动就具有一定的动能，这就是人类可以利用的风能。风能是清洁无污染的可再生能源，而且风能资源分布广泛，总量十分可观。全球可利用的风能约为  $2 \times 10^7$  MW，比地球上可开发利用的水能总量大 10 倍，风能将成为 21 世纪的主要能源之一。

近年来风力发电一直保持着世界增长最快能源的地位。丹麦到 2020 年和 2050 年风力发电比例计划将提高到 42% 和 100%；欧盟的总体目标则是在 2020 年和 2050 年由风力发电分别提供 17.5% 和 50% 的电力；美国的目标是到 2030 年风力发电占电力供应的 30%。未来欧美地区如此高的风力发电渗透率势必对其电网的稳定运行提出严峻的挑战。目前我国风力发电总装机容量为世界第一，到 2020 年和 2050 年，中国风电装机容量将分别达到 200GW 和 1000GW，而发电量将分别占总量的 5% 和 17%，风电将成为中国的五大电源之一。

风能的巨大潜力使其在世界未来能源中扮演重要角色。风力发电技术已经达到了非常可靠和先进的水平，而且随着风电成本逐渐降低，将使风能可以与传统的化石燃料发电技术竞争。随着风力发电在电力系统的渗透率不断增加，其间歇性、随机性等固有点对电网运行的影响日益显著。尽管我国风力发电量比重低于欧美国家，但由于我国风电主要集中在三北地区的风电基地，“大规模-高集中-高电压-远距离输送”的模式使得风电并网问题更加突出。





对风力发电系统的准确建模,是对含风力发电的电网进行稳态和暂态特性分析的必要手段。风力发电机组的多样性以及电力电子变流器的并网控制策略日趋复杂,需要建立比传统发电方式更加详细和准确的仿真模型,以揭示和评估联网运行风力发电机组的动态特性,从而为大规模风力发电渗透到电网之后的电力系统的调度管理提供理论基础。

## 1.2 风力发电的发展与现状

### 1.2.1 发展史

人类利用风能的历史可以追溯到公元前,至少有 3000 年,当时风能主要用来助航、提水灌溉等。约公元 1000 多年前,人们就掌握了帆船技术,即靠直接推动风帆来利用风能,然而机械能不能远距离传送,而电能可以利用电网远距离输送。因此,转化为电能成为风能的主要利用方式,即利用风轮收集风能,将其转变为机械能,通过发电机将风轮收集的机械能转变成电能并利用电网远距离输送。但是由于风能的能量密度低,且具有间歇性和波动性,其可控性和稳定性不如常规能源。

近年来,由于风力发电对环境影响小、发电成本低、技术发展快且规模效益显著,已成为发展最快的新型能源,开始大规模进入电网。但与传统能源发电几乎同时出现的风力发电,却经历了近百年的技术积累阶段。风力发电的发展过程可以分为以下阶段:

(1) 19 世纪末至 20 世纪 60 年代末,风能资源的开发尚处于小规模利用阶段。美国的 Brush 风力发电机和丹麦的 Cour 风力发电机被认为是风力发电的先驱。1887—1888 年冬,作为美国电力工业的奠基人之一,Charles F. Brush 在俄亥俄州安装了第一台自动运行的风力发电机。这台电机叶轮直径 17m,有 144 个由雪松木制成的叶片,运行了约 20 年,用来给他家地窖里的蓄电池充电。不过,由于低转速风力发电机效率不可能太高,这台发电机的功率仅为 12kW。1891 年,丹麦物理学家 Poul La Cour 发现,叶片较少、旋转较快的风力发电机效率高于叶片多、转速慢的风力发电机。应用这一原理,他设计了一台使用 4 个叶片、发电能力为 25kW 的风力发电机。丹麦由于能源相对匮乏,所以风力发电技术得到了持续的发展。1918 年第一次世界大战结束时,丹麦已经建成了几百个小型风力发电站。1957 年在丹麦 Geders 海岸安装的 200kW 风力发电机,具有三个叶片,带有电动机机械偏航、交流异步发电机、失速型风力机,标志着“丹麦概念”风力发电机的形成。与此同时,在美国和德国,各种风力发电机的设计概念也先后出现,虽然一些风力发电机因造价高和可靠性差而逐渐被淘汰,但这一阶段对各种类型风力发电机的试验,为 20 世纪 70 年代后期的大发展奠定了基础。

(2) 1973 年的石油危机之后,风力发电由小型逐渐向大中型发展。20 世纪 70 年代连续出现了两次能源危机(1973 年和 1979 年),世界范围内能源价格一路上涨,风力发电的发展得到一些国家政府的大力支持,许多直径超过 60m 的大型风力发电机被建立起来用于研究和验证。丹麦由 Geders 风力发电机改良的古典三叶片、上风向风力发电机设计在激烈的竞争中成为商业赢家。丹麦的 Tvind 2MW 风力发电机,是风力发电机革命中的佼佼者。这台机组是下风向变速风力发电机,叶轮直径为 54m,发电机为同步发电机,通





过电力电子设备与电网相连。美国加利福尼亚州 80 年代开始了风能发展计划，成千的风力发电机被密密麻麻的布置在加州的山坡上，出现了加州风电潮。具有代表性的还有德国的 GROWIAN（风轮直径 100m，3MW），是当时世界最大的风力发电机组，曾引起广泛关注。但这些大型风力发电机的开发都或多或少的碰到了各种技术问题而未能长期运行。在这些研究实践中，积累了大量的技术和经验。1980 年以来，国际上风力发电机技术日益走向商业化。随着风力发电机产业商业化的逐渐成熟，丹麦当时一些农用机械生产商，如 Vestas，Nordtank 和 Bonus 等纷纷开始进入风力发电机生产行业。由于这些公司有丰富的工程机械知识，因而他们很快就在丹麦的风力发电机行业占据主导地位，进而在世界市场占据重要位置。这些对世界风力发电制造业无疑起着巨大的推动作用。

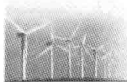
(3) 20 世纪 90 年代后开始进入现代风力发电技术阶段，风力发电开始大规模发展。经过了近百年的技术和经验的积累，加上风力发电机产业的商业化，大型风力发电机组的技术日渐成熟。大规模的商业应用首先出现在北欧，1995 年丹麦建成的赖斯比·合德风电场装有 Bonus 能源公司的 40 台 600kW 型风力发电机，是当时丹麦最大的风电场。恩德公司于 1995 年制造了世界第一台兆瓦级风力发电机组，而 Vestas 公司的 1.5MW 样机建于 1996 年。兆瓦级风力发电机市场真正起飞于 1998 年，而之前 600~750kW 风力发电机组是主流机型。从那时起，市场趋势才越来越清晰，即向着更大的项目、更大的风力发电机发展。目前，1.5~2.5MW 的风力发电机组已成为市场的绝对主力机型。一般来说，综合风力发电机制造、吊装等因素，单机容量越大，风力发电机单位千瓦的造价就越低。基于经济效益的优势，风力发电机单机容量将朝更大方向发展。

### 1.2.2 现状

在过去的 20 年里，风力发电发展不断超越其预期的发展速度。从 2001—2010 年，全球风力发电累计装机容量实现了连续 10 年接近 30% 的年均增长速度，即每 3 年全球风电装机容量就要翻一番。从 2009—2013 年，风电装机的增速放缓，但全球风电市场规模仍扩大了几乎 200GW。2013 年全球风电新增装机容量为 35.5GW，累计装机容量已达到 318GW，预计 2015 年全球装机容量将到 600GW，2020 年将超过 1500GW。

欧美曾主导了风力发电的发展，但目前及今后一段时间内全球的风电格局会出现新的变化：美国因“风电税额抵免政策”结束呈现不确定性，欧洲市场保持稳中有升；亚洲则成为风电的主要发展力量，而拉丁美洲和非洲潜力巨大，2013 年全球风电新增装机容量的绝大部分出现在新市场，亚洲、非洲和拉丁美洲正在拉动全球市场的发展。在全球已经有风电商业运营项目的 75 个国家中，超过 24 个国家装机容量已逾 1GW。其中欧洲 16 个，亚太地区 4 个（中国、印度、日本和澳大利亚），北美 3 个（加拿大、墨西哥、美国）以及拉丁美洲 1 个（巴西）。

随着大型机组技术的成熟，风电的装机容量在大幅增长，同时风力发电机组由陆地走向了近海。海上有丰富的风能资源和广阔平坦的区域，使得近海风力发电技术成为近来研究和应用的热点。多兆瓦级风力发电机组在近海风力发电场的商业化运行是国内外风能利用的新趋势。随着风力发电的发展，欧洲陆地上的风能利用正趋于饱和，海上风力发电场将成为未来发展的重点。1991 年丹麦在南部的罗兰岛以北海域修建了世界上第一个海上



风电场，由 11 台 Bonus 公司 450kW 失速型风力发电机组成。随后荷兰、瑞典、英国相继建成了自己的海上风电场。2010 年 9 月 23 日，英国东南部的 Thanet 海上风电场正式开始并网发电。该风电场由 100 台 Vestas 的 V90 风力发电机组成，总装机容量为 300MW。如今，全球海上风电装机容量已达 5415MW，占风力发电总装机容量的 2%。其中 90% 以上的风力发电场建在北欧，包括北海、波罗的海、爱尔兰海以及英吉利海峡；剩下的大部分是位于中国东部海岸的几个示范项目。到 2020 年全球海上风电总装机容量可能会达 80GW，其中 3/4 在欧洲。

近几年中国风电产业发展迅猛，无论从装机容量还是发展规模上看，都已成为名副其实的世界风电大国。中国风能资源与美国接近，远远高于印度、德国、西班牙，属于风能资源较丰富的国家。中国风能潜力巨大，陆上加海上的总的风能可开发量约有 1000~1500GW。中国不但在风能资源上适合发展风电，国家在政策上也重点鼓励、重点支持风力发电发展建设，使中国风力发电很快进入了大规模稳步发展阶段。2005—2009 年连续 5 年风电总装机翻番，实现飞越式发展。但中国风电在 2010 年达到最高增长后进入了行业整合期，经历了连续 2 年的低迷之后，中国的风力发电行业从 2013 年下半年开始逐步回暖。中国再次成为全球风电新的增长点，2013 年中国市场的增量最大，占总增量约 2/5。中国目前风电的总装机容量和新增容量均居世界第一，2013 年风电装机容量达到了 91.4GW，逾 1000 亿 kW·h 的发电量已超过核电，进而成为我国第三大电源。

为使中国到 2020 年时非化石能源占一次能源比重达到 15%，2020 年的规划已定为 2 亿 kW。未来风电发展继续按照“建设大基地、融入大电网”的方式，推进风电的规模化发展，加强海上风电开发建设。但由于风电基地的消纳问题突出，一些地区弃风限电严重。相比于大基地对并网条件较高的要求，分散式风力发电项目由于具有靠近负荷中心、投资少、线路损耗低等优势而逐步受到重视。因此，同时提出了“有序推进大型风力发电基地建设”和“鼓励分散式并网风力发电开发建设”的发展思路。

## 1.3 风力发电机组的类型及构成

### 1.3.1 主要类型

风力发电机组单机容量从最初的数十千瓦级已经发展到兆瓦级，控制方式从基本单一的定桨距、定速控制向变桨距、变速恒频发展。根据机械功率的调节方式、齿轮箱的传动形式和发电机的驱动类型，可对风力发电机组作以下三种分类方式。

#### 1. 按机械功率调节方式分类

(1) 定桨距控制。桨叶与轮毂固定连接，桨叶的迎风角度不随风速而变化。依靠桨叶的气动特性自动失速，即当风速大于额定风速时，输出功率随风速增加而下降。定桨距风力发电机不能有效利用风能，不能辅助启动。

(2) 变桨距控制。风速低于额定风速时，保证叶片在最佳攻角（气流方向与叶片横截面的弦的夹角）状态，以获得最大风能；当风速超过额定风速后，变桨系统减小叶片攻角，保证输出功率在额定范围内。因此，机械功率不完全依靠叶片的气动特性调节，而主



要依靠叶片攻角调节。在额定风速下，最佳攻角处于桨距角 $0^\circ$ 附近。

(3) 主动失速控制。主动失速又称负变距，风速低于额定风速时，叶片的桨距角是固定不变的；当风速超过额定风速后，变桨系统通过增加叶片攻角，使叶片处于失速状态，限制增加风轮吸收功率，减小功率输出；而当叶片失速导致功率下降，功率输出低于额定功率时，适当调节叶片的桨距角，提高功率输出，可以更加精确地控制功率输出。对于变桨距和主动失速控制方式，叶片和轮毂都通过变桨轴承连接，即都通过变桨实现控制。主动失速控制的敏感性很高，需要准确控制桨距角，造价高。

## 2. 按传动形式分类

(1) 高传动比齿轮箱型。用齿轮箱连接低速风力机和高速发电机，减小发电机体积重量，降低电气系统成本。但风力发电机组对齿轮箱依赖较大，由于齿轮箱导致的风力发电机组故障率高，齿轮箱的运行维护工作量大，易漏油污染，且导致系统的噪声大、效率低、寿命短，因此产生了直驱风力发电机组。

(2) 直接驱动型。应用多极同步风力发电机可以去掉风力发电系统中常见的齿轮箱，让风力发电机直接拖动发电机转子运转在低速状态，解决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。但发电机极数较多，体积较大。

(3) 中传动比齿轮箱（半直驱）型。这种风机的工作原理是以上两种形式的综合。中传动比型风力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。

## 3. 按发电机调速类型分类

(1) 定速恒频机组。采用异步电机直接并网，无电力电子变流器，转子通过齿轮箱与低速风机相连，转速由电网频率决定。定速恒频机组的优点是简单可靠，造价低，因而在早期的小型风电场中获得广泛应用。定速异步发电机组结构简单、可靠性高，但只能运行在固定转速或在几个固定转速间切换，不能连续调节转速以捕获最大风电功率。此外，在风机转速基本不变的情况下，风速的波动直接反映在转矩和功率的波动上，因此机械疲劳应力与输出功率波动都比较大。此外，每台风力发电机需配备无功补偿装置为异步电机提供励磁所需的无功功率，并且采用软启动装置限制启动电流。

(2) 变速恒频机组。异步发电机或同步发电机通过电力电子变流器并网，转速可调，有多种组合形式。目前实际应用的变速恒频机组主要有两种类型：采用绕线式异步发电机通过转子侧的部分功率变流器并网的双馈风力发电机组；采用永磁同步发电机通过全功率变流器网网的直驱永磁同步风力发电机组。与定速恒频机组相比，变速恒频风力发电机组可调节转速，进行最大功率跟踪控制，提高了风能利用率；风速变化而引起的机械功率波动可变为转子动能，从而减小机械应力，对输出功率的波动也可起到平滑作用。

目前，在风力发电领域广泛应用的风力发电机组主要有三种类型，即固定转速的鼠笼异步发电机组、可调速的双馈异步发电机组和直驱永磁同步发电机组。

早期的小型风电场主要应用定速异步发电机组，其定子侧直接并网，转子通过齿轮箱与低速风力发电机相连，每台风力发电机需配备无功补偿装置为异步电机提供励磁所需的无功功率。定速异步发电机组结构简单、可靠性高，但只能运行在固定转速或在几个固定转速间切换，不能连续调节转速以捕获最大风电功率。此外，在风力发电机转速基本不变



的情况下，风速的波动直接反映在转矩和功率的波动上，因此机械疲劳应力与输出功率波动都比较大。

变速风力发电系统的特点是在有效的风速范围内，发电机组的转速和发电机组定子侧产生的交流电能的频率是变化的，直驱永磁同步机组和双馈异步发电机组都属于变速机组。直驱永磁同步机组，风轮与发电机的转子直接耦合，而不经齿轮箱，故此转速都较低，因此只能采用低速的永磁同步发电机。因为无齿轮箱，可靠性高；但采用低速永磁同步发电机，体积大，造价高；而且发电机的全部功率都需要变流器送入电网，变流器的容量大，成本高。与采用全功率变频器驱动直驱永磁同步发电机组相比，双馈异步发电机组的发电机为绕线转子异步电机，其定子侧直接与电网相连，而绕线转子侧通过双 PWM 变流器接入电网。双馈感应式发电机，一般采用升速齿轮箱将风轮的转速增加若干倍，传递机械功率给发电机转子时转速明显提高，因而可采用高速发电机，体积小，质量轻。双馈变流器的容量仅与发电机的转差功率相关，效率高，价格低廉。这种方案的缺点是升速齿轮箱结构复杂，噪声大，易疲劳损坏。表 1-1 给出了这三种主流机型的比较。

表 1-1 三种风力发电型机的比较

发电机类型	鼠笼异步发电机	直驱永磁同步发电机	双馈异步发电机
转子结构	转子为鼠笼式，结构简单，制造方便，运行可靠	转子为永磁式，结构、维护简单	转子为绕线式，结构较复杂
励磁方式	从电网取得励磁电流及感性无功功率，无需励磁装置及励磁调节装置	无需外部励磁	从电网及转子励磁装置取得励磁电流，需要交流励磁装置及励磁调节装置
转子速度	定速	可调	可调
齿轮箱	需要	不需要	需要
变流器容量	不需要变流器	全功率	约 1/3 额定功率

### 1.3.2 主要设备

风力发电系统主要由风轮、齿轮箱、发电机、变流器等设备以及控制系统构成，典型的风力发电系统组成如图 1-1 所示。风轮首先捕获波动的风能并转换为旋转的机械能，再由发电机将机械能转换为电能后经由变压器馈入电网。

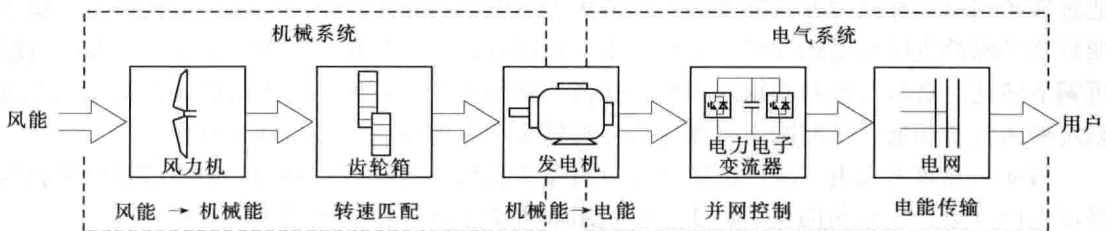


图 1-1 风力发电系统主要组成

风轮由叶片、轮毂和变桨系统组成，是吸收风能的单元，用于将空气的动能转换为叶轮转动的机械能。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



毂将转矩输入到主传动系统。轮毂的作用是将叶片固定在一起，并且承受叶片上传递的各种载荷，然后传递到发电机转动轴上。每个叶片有一套独立的变桨机构，可主动对叶片捕获的风能进行调节。叶片的数量通常为3个，叶片半径越大，旋转速度越慢，兆瓦级风力机的旋转转速一般为 $10\sim 15\text{r}/\text{min}$ 。由于风力机转速较慢，因此在其与发电机的连接中需要齿轮箱将低转速转换为高转速。

齿轮箱、传动链、发电机和控制柜等主要设备安装于机舱内。机舱用于保护电气设备免受风沙、雨雪、冰雹以及烟雾等恶劣环境的直接侵害，顶部装有风速风向仪。双馈型机舱长度一般在 $8\text{m}$ 以上，宽度和高度在 $3\text{m}$ 以上，一般采用拼装结构；直驱型风力发电机组的机舱较短小，一般整体制造。机舱在偏航系统的驱动下，可实现风轮的自动对风。由于风的方向和速度经常变化，为了使风力机有效地捕捉风能，设置了偏航装置以跟踪风向的变化，保证风轮基本上始终处于迎风状况。偏航系统采用主动对风的齿轮驱动形式，与控制系统相配合，使叶轮始终处于迎风状态，充分利用风能，提高发电效率。通过风向仪和地理方位检测风轮轴线与风向的偏差，采用电力或液压驱动来完成对风。

齿轮箱作为风力发电机组中一个重要的机械部件，其主要功用是将风轮在风力作用下所产生的动力传递给发电机。使用齿轮箱，可以将风力机转子上的较低转速、较高转矩，转换为用于发电机上的较高转速、较低转矩。由于齿轮箱速比较高，并且受无规律的变向变负荷的风力作用以及强阵风的冲击，通常采用一级平行轴加两级行星等多级齿轮箱结构，以提高其运行可靠性。

发电机将叶轮转动的机械动能转换为电能输送给电网。与其他发电形式相比，风力发电使用的发电机类型较多，既可采用笼型、绕线型的异步发电机，也有采用电励磁和永磁的同步发电机。此外，风力发电机受风的随机性影响，效率低、易过载，并且散热条件差、振动强烈。

风力发电机组的电控系统贯穿于风力发电机组的每个部分，相当于风力发电系统的神经。电控系统主要包括主控系统、变流器、变桨和偏航控制系统，由控制柜、变流柜、机舱控制柜、三套变桨柜、传感器和连接电缆等组成。其主要作用是保证风力发电机组的可靠运行，获取最大风能转化效率，以及提供良好的电力质量。其控制内容包括正常运行控制、安全保护、运行状态监测等三个方面。

## 1.4 风力发电系统的仿真

### 1.4.1 建模的基本模块

风力发电机系统建模时，在大多情况下，可以将它表示为6个基本模块，如图1-2所示。这6个模块分别为气动系统（风轮模型）、机械系统（轴系模型）、发电机及传动系统（发电机和电力电子变流器）、桨距控制系统、风力机控制系统、风力机保护系统。

图1-2中， $f$ 为电网频率； $I_s$ 、 $I_r$ 分别为定子、转子电流； $U_s$ 、 $U_r$ 分别为定子、转子电压； $P$ 、 $Q$ 分别为有功、无功功率；上标\*为参考值； $T_e$ 、 $T_m$ 分别为电磁、机械转矩； $\omega_1$ 、 $\omega_r$ 分别为风力机、发电机转速； $\beta$ 为桨距角。



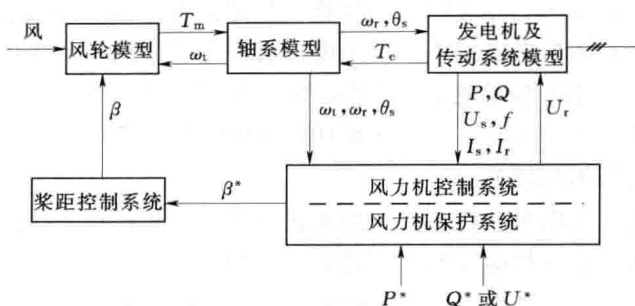


图 1-2 风力发电系统模型框图

### 1. 气动系统

风力机的气动系统是指风轮（即桨叶和轮毂）。风轮改变空气流速，吸收空气动能，转化为机械功率。风力机的机械功率输出取决于风速、桨距角和风轮转速。气动系统与机械系统的联系可以用机械功率或者机械转矩表示。

### 2. 机械系统

风力机的机械系统由风轮、轴、齿轮箱和发电机转子组成。系统的惯量主要取决于风轮和发电机转子。齿轮箱的齿轮仅占相对很小的一部分，因此常忽略齿轮惯性，仅考虑其变速比。因而，机械系统模型通常采用轴连接的双质块模型。模型中也可包含低速和高速系统以及惯性齿轮系统，但将使系统含有三个旋转部分和两个连接轴。

### 3. 发电机及传动系统

发电机传动系统包含发电机及其换流器。对于定速异步电机，发电机传动系统仅指发电机本身，多数电力系统仿真程序中都有异步电机模型。变速发电机传动系统由传统发电机和提供转差或解耦的电力电子设备组成，其中双馈感应发电机和用全功率变流器连接的永磁同步发电机传动是最常用的变速发电机传动系统。多数标准仿真程序中并没有这些模型，只有个别元件的标准模型，即异步发电机和变频器，且缺少内部控制系统模型，因而无法组成变速发电机传动的整体模型。

分析发电机传动模型的动态稳定性时，假设忽略电磁暂态，即忽略发电机定子电流的直流偏置，这意味着忽略定子绕组磁通的时间常数，使定子磁通不再是暂态模型中的状态变量，而是动态稳定性模型中可计算的代数变量。这样，即可用三阶和五阶模型进行计算，阶数表示发电机模型中状态变量的个数。

### 4. 桨距控制系统

风力机的气变桨距和桨距角由桨距伺服来控制。主控制系统产生参考桨距角，桨距伺服是执行机构，实际控制风力机桨叶旋转到要求的角度。桨距伺服受结构限制，叶片仅能在某物理限度内转动，调桨速度也有限制。

### 5. 风力机控制系统

风力机的控制系统主要控制其功率和转速。

对于恒速异步风力机，风轮桨距角是唯一的控制量。虽然可测的参数很多，如风速、风轮转速和有功功率，但它们仅被用来优化桨距角。高风速时，控制系统通过调节桨距角



降低风力机功率，使它保持在最大额定功率水平。

对于变速风力机，除了桨距角，发电机也是可控元件，发电机瞬时有功和无功功率输出均能受控制。变速特性把风力机调节到最优转速，优化风能利用系数。这意味着控制系统必须包含速度控制系统和参考速度的确定方法。速度控制系统控制旋转系统的机械功率，以及发电机的电气功率，即控制旋转系统的功率平衡也就控制了速度。因此，电气功率控制系统和桨距角控制系统的动作必须协调一致。

#### 6. 风力机保护系统

风力机的保护系统根据各种参数的实测值进行动作，如电压、电流和转速。如果电压、电流或转速超出限定值一定时间，就会触发继电器动作。显然，保护系统动作将对仿真结果产生重要影响。

### 1.4.2 不同类型仿真的模型精度要求

计算机仿真时，仿真类型、模型精度和数据精度对研究结果有着显著的影响。除了仿真目标，必须注意到全系统模型的每个独立部分，并将其分类；必须合理地平衡仿真系统中的所有模型（即独立元件模型和可能的外部系统模型）的精度；还必须要有相称水平，即可接受的模型最小精度必须随特定模型对考察现象的重要性而增加。

计算机仿真能用于研究多种不同现象，因此，对仿真程序、建模准确性和模型数据的要求会因研究对象而有很大的不同。根据仿真目标，应该针对特定研究类型选择软件程序。

#### 1. 电磁暂态

电磁暂态用特定的电磁暂态程序仿真，这些程序能准确描述所有电气元件的相位，通常还包括可能很复杂的饱和性、行波传播和短路电弧。通常，仿真在时域中进行，输出的是电压、电流等参数的瞬时值。

电磁暂态仿真程序用于求解所有对称的和不对称的故障条件下的故障电流，还可以仿真电力电子设备，如高压直流电网（HVDC）、静止无功补偿器（SVC）、静止同步补偿器（STATCOM）和电压源变流器（VSC）等的准确特性。

#### 2. 机电暂态

机电暂态一般用暂态稳定性程序评估，仿真通常在时域进行，输出的是电压、电流等参数的有效值。

暂态稳定性程序通常需要合理的风力机模型，它包含主要的电气元件，即发电机、可能的电力电子设备（含基本控制）、可能的静止无功补偿、主控制系统、仿真事件中可以启动并投入运行的保护系统、机械轴系统和风力机风轮的机械功率。

#### 3. 小信号稳定性

小信号稳定性通常是指大系统，如完全互联的交流电力系统，在遭受小扰动后返回稳定运行点的稳定能力。小信号稳定性程序包含必要的物理系统模型数据和相关的控制系统，具有内建模块进行特征值分析。目前，电力系统的小信号稳定性分析中还没有考虑过风力发电机组，因为风力发电机组分散在电力系统中，并且单台风力发电机的容量比中心发电厂小几个数量级，比总互联电力系统小更多的数量级。风力发电机单机容量与风电场





总容量逐渐增加,使风力发电渗透率升高。此外,现代风力发电机的可控性得到了提高。因此,小信号稳定性分析中将逐渐增加风力发电的研究内容。

#### 4. 风力机设计

风力机设计要考虑机械结构和气动模型。设计过程中,风力机本身是研究的重点,叶片强度和翼型、轴和齿轮尺寸、塔架强度,甚至塔架基座强度也都需要仔细考虑。可以借助许多能处理机械结构的仿真工具,如 CAD 等;也可以借助能处理动态特性的其他工具。

#### 5. 潮流和短路计算

潮流和短路计算都假设在稳态进行(即所有时间导数都为零)。潮流计算用于计算各种运行条件下的节点电压和节点间的有功功率和无功功率。短路计算用于计算电力系统中任意点的短路电流。

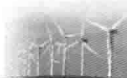
潮流计算时,仅需表示有功功率和无功功率的输入量。定速异步风力发电机必须用异步发电机表示,有功功率为瞬时值,潮流计算程序根据电机阻抗计算无功功率;变速风力发电机无功功率具有可控性,可用 PQ 节点描述,或在风力发电机设定为电压控制模式时设为 PV 节点表示。

短路计算时,所需的风力发电机表达式取决于所采用的发电机技术。一般地,如果临近风力发电机的某短路处,短路计算中就必须包含所有提供短路电流的部分。对定速风力发电机,电机本身有适当的表达式。对含双馈发电机的变速风力发电机,短路电流由电机和部分功率变流器共同提供。对含全功率变流器的永磁直驱风力机,发电机与交流电网解耦,只有变流器与电网连接,因此,短路电流主要由变流器决定。

## 1.5 仿真软件概述

目前,国际上有很多电力系统分析软件,应用较为广泛的有:①美国邦纳维尔电力局(Bonneville Power Administration)开发的 BPA 程序和 EMTP (Electromagnetic Transients Program) 程序;②加拿大曼尼托巴高压直流输电研究中心(Manitoba HVDC Research Center)开发的 PSCAD/EMTDC (Power System Computer Aided Design/Electromagnetic Transients Program including Direct Current) 程序;③德国西门子公司(SIEMENS)研制的电力系统仿真软件 NETOMAC (Network Torsion Machine Control);④中国电力科学研究院开发的电力系统分析综合程序 PSASP (Power System Analysis Software Package);⑤美国 MathWorks 公司开发的科学与工程计算软件 MATLAB (MATrix LABoratory);⑥德国 DIgSILENT (DIgital Simulation and Electrical Network) 开发的 PowerFactory 程序。它们为电力系统提供了丰富灵活的仿真分析功能,广泛应用于科学研究和工程实施等方面。本书的仿真算例采用的是在风力发电研究方面应用较为普遍的仿真软件为 MATLAB/Simulink 和 DIgSILENT/PowerFactory。

Matlab 是由 Mathworks 公司 1982 年推出的高性能数值计算和可视化软件产品,由主包、Simulink 及功能各异的工具箱组成。由于 Matlab 语言程序效率高、程序设计灵活、图形功能强大,自问世以来,在教学、科研等领域应用越来越广泛。从 Matlab 5.2



版本开始增加了一个由加拿大魁北克电力公司开发的专用于电力系统分析的电力系统模块 PSB (Power System Blockset)。PSB 模块中含有丰富的元件模型,包括同步机、异步机、变压器、直流机、特殊电机的线性和非线性、有名值系统和标么值系统的、不同仿真精度的设备模型库;单相、三相的分布和集中参数的传输线;单相、三相断路器及各种电力系统的负荷模型、电力半导体器件库以及控制和测量环节。再借助其他模块库或工具箱以及自己在 Simulink 下搭建的模块,在提供的仿真平台上可以进行电力系统的仿真计算,尤其可以进行复杂控制系统的仿真等。

德国 DIgSILENT/PowerFactory 电力系统仿真软件最早开发于 1976 年。自 1993 年开始,DIgSILENT/PowerFactory 开始全面引入面向对象编程技术和数据库概念,并对算法和元件模型进行了较大改进,形成了代表性的 10.31 版本。该版本允许用户在单一的数据库中创建详尽的电力系统元件模型(包括稳态、时域、频域等计算用的一系列参数),不需再像一些电力系统分析软件那样采用不同的软件包进行相应类型的电力系统仿真计算(例如输电、配电、发电或者工业应用)。现在最新的 DIgSILENT/PowerFactory 15 成为应用最广泛的含风力发电的电力系统仿真程序。

MATLAB/Simulink 和 DIgSILENT/PowerFactory 各具优势,都提供了风力发电系统的 Demo 算例,在风力发电系统的建模和仿真研究过程中广泛应用。MATLAB/Simulink 学习资料非常丰富、简单易学,适用于对规模不大的风力发电系统进行仿真分析,特别是涉及到复杂的控制算法和精细的仿真要求时;DIgSILENT/PowerFactory 则适用于大规模的风力发电系统仿真分析,特别是涉及到复杂的网络拓扑结构,其计算结果的准确性和有效性已经被电力规划和运行机构在实践中检验,由于该软件学习资料相对较少且独具特色,用户需要经过系统的学习和摸索才能够熟练地使用。因此,在本书附录中将介绍 DIgSILENT/PowerFactory 软件的基本使用方法。