

普通高等教育风能与动力工程专业系列教材

风电场电气工程

ELECTRICAL ENGINEERING OF
WIND POWER



◎ 朱永强 王伟胜 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

《风电场电气工程》是“普通高等教育风能与动力工程专业系列教材”之一，主要讲述风电场电气部分和风电场接入电网运行两方面的内容。全书分为7章，重点涵盖风电场电气系统的基本构成、主接线设计，风电场主要电气一次设备的结构、原理、型式参数及电气一次设备的选取，风电场电气二次系统、风电场的防雷和接地，风电场输出特性与运行控制，风电场并网对电力系统的影响，改善风电场并网运行特性的措施等。书中强调图文并茂，尤其是介绍电气设备时提供了大量的实物照片和结构示意图，使读者有直观的感性认识。本书主要作为普通高等院校风能与动力工程专业的教材，也适合作为风力发电领域相关从业人员的培训及自学用书。

图书在版编目（CIP）数据

风电场电气工程/朱永强等主编. —北京：机械工业出版社，2012.9
普通高等教育风能与动力工程专业系列教材
ISBN 978-7-111-36026-1

I. ①风… II. ①朱… III. ①风力发电—电气设备—高等学校—教材
IV. ①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2012）第 150766 号

机械工业出版社（北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037）

策划编辑：王雅新 责任编辑：王雅新

版式设计：纪 敬 责任校对：陈 越

封面设计：张 静 责任印制：乔 宇

北京瑞德印刷有限公司印刷（三河市胜利装订厂装订）

2012 年 9 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·14.25 印张·351 千字

标准书号：ISBN 978-7-111-36026-1

定价：30.00 元

凡购本书，如有缺页、倒页、脱页，由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心：(010)88361066

教材网：<http://www.cmpedu.com>

销 售 一 部：(010)68326294

机工官网：<http://www.cmpbook.com>

销 售 二 部：(010)88379649

机工官博：<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线：(010)88379203

封面无防伪标均为盗版

序

开发利用风能是增加能源供应、调整能源结构、保障能源安全、减排温室气体、保护生态环境和构建和谐社会的一项重要措施,对于建设资源节约型和环境友好型社会,实现中国经济、社会可持续发展具有重要促进作用。目前,风力发电是风能利用的最主要方式。自2006年《中国可再生能源法》实施以来,我国风电连续多年保持快速增长,2010年成为全球风电新增和累计装机容量最多的国家,在短时间内步入世界风电大国行列。

随着我国风力发电产业的规模化发展和风能利用技术的不断进步,风力发电专业人才的培养显得越来越重要。2006年,教育部批准在华北电力大学设置了国内第一个“风能与动力工程”专业,之后国内多所高等院校也陆续设置了该专业。由于“风能与动力工程”专业是新专业,因此,其专业课程设置、教材建设和教学方法研究都需要一个探索和实践的过程。在中国政府/世界银行/全球环境基金—中国可再生能源规模化发展项目(CRESP)风电技术人才培养子赠款项目和中国—丹麦风能发展项目(WED)资助下,2008年成立了“风能与动力工程”本科专业教材编审委员会,开始组织编写“风力发电原理”、“风力机空气动力学”、“风力发电机组设计与制造”、“风力发电机组监测与控制”、“风力发电场”和“风电场电气工程”六部必修课教材。

风力发电是一个跨学科的专业,涉及许多学科领域。在专业教材编写时,从专业人才培养目标出发,除了要掌握专业基础知识外,还要掌握风能领域中的专业知识。教材初稿经过在华北电力大学本科学生的试用后,又对内容进行了修改和补充,形成了现在的第一版系列教材。随着我国从“风电大国”向“风电强国”,从“中国制造”向“中国创造”,从“国内市场”向“国际市场”的转变,我国风力发电产业将进入一个新的发展阶段,教材内容也需要不断补充和更新。编审委员会将会根据新的需求,结合教学实践对此系列教材不断进行完善。

在本系列教材编写和出版过程中,得到了中国可再生能源学会风能专业委员会、华北电力大学和机械工业出版社的具体指导,各书编审人员付出了辛勤的劳动,许多专家为本教材提供资料并审阅书稿,在此一并向他们表示衷心的感谢。

本系列教材除了用于高等院校“风能与动力工程”专业教学外,也可作为从事风电专业科技工作人员的参考书。

“风能与动力工程”专业教材编审委员会
2011年6月

前 言

随着风电场规模的扩大，以及风电在电网中比例的提高，风电已经不再是单独的发电技术问题，风电与电网的联系越来越紧密，相互影响也越来越复杂。风电场电气工程，是风力发电持续大规模发展过程中，必须重视的重要课题。

风电场电气工程，是普通高等院校风能与动力工程专业的必修重点课程。该课程理论和实践结合相当紧密，是相关领域的从业人员必修的基本知识。

《风电场电气工程》是“普通高等教育风能与动力工程专业系列教材”之一，主要讲述风电场电气部分和风电场接入电网运行两方面的内容。全书分为7章，重点涵盖风电场电气系统的基本构成、主接线设计，风电场主要电气一次设备的结构、原理、型式参数及电气一次设备的选取，风电场电气二次系统、风电场的防雷和接地，风电场输出特性与运行控制，风电场并网对电力系统的影响，改善风电场并网运行特性的措施等。

本书由华北电力大学、中国电力科学研究院、东北电力大学、中国农业大学等单位联合编写。其中第1章主要由王伟胜、朱永强编写，第2章由朱永强、张旭编写，第3章主要由杨建华、翟庆志编写，第4章主要由穆钢、严干贵编写，第5章主要由刘燕华、迟永宁编写，第6章主要由赵海翔编写，第7章由尹忠东、朱永强编写。全书由朱永强、迟永宁统稿。

在本书的编写过程中，得到了华北电力大学肖湘宁教授、国网电力科学研究院朱凌志博士、龙源电力集团范子超博士和华北电力大学齐琳、申惠琪等同志的支持和帮助，在此一并表示衷心的感谢。

本书主要作为普通高等院校风能与动力工程专业的教材，也适合作为风力发电领域相关从业人员的培训及自学用书。

编 者

目 录

序

前 言

第1章 绪 论	1
1.1 风力发电的发展	1
1.1.1 世界风力发电的发展	1
1.1.2 中国风力发电的发展	3
1.2 风电场电气部分	4
1.2.1 风电场电气部分的组成	4
1.2.2 风电场电气部分的特点	4
1.3 风电场接入电网概述	5
1.3.1 风电场容量可信度	5
1.3.2 风电场有功功率特性	6
1.3.3 风电场无功功率特性	7
1.3.4 风电场接入电网方案	8
1.4 本书的主要内容和特点	9
思考题	10
第2章 风电场电气主系统	11
2.1 主要电气一次设备	12
2.1.1 风力发电机组	12
2.1.2 变压器	12
2.1.3 断路器	16
2.1.4 隔离开关及其他开关电器	21
2.1.5 载流导体	25
2.1.6 无功补偿设备	27
2.1.7 互感器	29
2.2 风电场电气主接线	35
2.2.1 电气主接线及其设计要求	35
2.2.2 常见的电气接线形式	39
2.2.3 风电场的典型电气接线	43
2.3 常用的电气计算** (选修)	46
2.3.1 短路电流计算	46
2.3.2 导体发热计算	47
2.4 风电场电气设备的选择	48
2.4.1 一般原则和技术要求	49
2.4.2 环境因素和环保问题	50
2.4.3 变压器的选择	51
2.4.4 开关设备的选择	52

2.4.5 载流导体的选择	53
2.4.6 互感器的选择	55
思考题	57
第3章 风电场电气二次系统	58
3.1 二次系统的构成	58
3.1.1 二次设备	58
3.1.2 二次回路	65
3.2 继电保护的基本知识	66
3.2.1 继电保护的作用和基本原理	66
3.2.2 继电保护的基本要求	68
3.2.3 继电保护的接线图	69
3.2.4 微机继电保护	70
3.3 风电场的继电保护配置	76
3.3.1 电力线路的保护	76
3.3.2 电力变压器的保护	82
3.3.3 母线的保护	89
3.3.4 风电机组的保护	91
3.3.5 无功补偿设备的保护	93
3.4 风电厂的二次部分	94
3.4.1 风电机组的保护、控制、测量和 信号处理	94
3.4.2 箱式变电站中变压器的保护、 控制、测量和信号处理	94
3.4.3 风电厂控制室的控制、测量和 信号处理	95
3.4.4 风电厂远动	95
3.5 升压变电站二次部分	95
3.5.1 升压变电站的控制、测量、 信号	95
3.5.2 升压变电站的继电保护配置	96
3.5.3 升压变电站的操作电源系统	97
3.5.4 升压变电站的图像监控	98
3.6 升压变电站综合自动化系统	98
3.6.1 概念和特点	98
3.6.2 系统功能	99
3.6.3 系统结构	100
3.7 风电场继电保护与综合自动化	

系统的示例	104	5.2.2 并网电压等级的选择	133
3.7.1 风电场的相关数据	104	5.2.3 母线电压计算和无功补偿方案	134
3.7.2 风力发电机的二次部分	105	5.2.4 风电场对电网短路电流的贡献	137
3.7.3 升压变电站的二次部分	105	5.2.5 风电场的稳定性计算	140
思考题	105	5.3 风电场对电力系统的影响	141
第4章 风电机组的输出特性与		5.3.1 对电网电压的影响	142
运行控制	107	5.3.2 对电网稳定性的影响	145
4.1 风电机组运行原理	107	5.3.3 对电力系统调峰能力及运行调度	
4.1.1 风力机的运行特性	107	的影响	147
4.1.2 发电机的运行原理	108	5.3.4 风电场对电能质量的影响	153
4.1.3 并网换流器的结构和原理	111	5.4 风电场的容量可信度	155
4.2 笼型感应风电机组的运行特性与		5.4.1 风电场容量可信度的概念	155
控制	113	5.4.2 容量可信度的评价方法	156
4.2.1 笼型感应风电机组的运行原理	113	5.4.3 影响容量可信度的因素	158
4.2.2 笼型感应风电机组的风速-功		5.5 风电场接入电网的技术要求和	
率特性	115	相关规定	159
4.2.3 笼型感应风电机组的运行控制	115	5.5.1 风电场并网的技术要求	159
4.3 双馈感应风电机组的运行特性与		5.5.2 国外有关风电并网的技术规定	160
控制	118	5.5.3 我国有关风电并网的技术规定	161
4.3.1 双馈感应风电机组的功率传		思考题	163
输特性	118	第6章 风电场的直流输电与功率	
4.3.2 双馈感应风电机组的运行控		控制技术	165
制原理	119	6.1 直流输电技术在风电场并网中的	
4.3.3 双馈感应异步风电机组的运		应用	165
行操作	120	6.1.1 直流输电概述	165
4.3.4 双馈感应异步风电机组的撬杠		6.1.2 基于 VSC 的柔性直流输电	
保护** (选修)	121	技术	167
4.4 直驱式永磁同步风电机组的运行		6.1.3 风电场经 VSC-HVDC 并网的	
特性	122	工程应用	169
4.4.1 永磁同步发电机的外特性	122	6.2 风电场的无功电压控制	170
4.4.2 直驱式永磁同步风电机组的运行控		6.2.1 风电场无功电压控制的要求	
制原理	123	和原则	171
4.4.3 直驱式永磁同步风电机组的运		6.2.2 风电场的无功电压控制技术	172
行操作	123	6.3 风电场低电压穿越能力	179
思考题	124	6.3.1 大规模风电场具备低电压穿越	
第5章 并网风电场对电网的影响	125	能力的必要性	179
5.1 影响风电场输出的因素和并网问题	126	6.3.2 国外风电场低电压穿越技术	
5.1.1 风电场的风速影响	126	要求	180
5.1.2 风电场的集群效应	127	6.3.3 基于 DFIG 的变速风电机组低电压	
5.1.3 与接纳风电有关的电网问题	128	穿越技术	184
5.2 大型并网风电场的分析计算	131	6.4 风电场的频率特性与有功-频率	
5.2.1 风电场的整体数学模型	131	控制	185
		6.4.1 电力系统的有功功率平衡及	

频率调整	185	7.3.3 塔架的防雷保护	203
6.4.2 风电机组的频率特性	186	7.3.4 风电机组的接地	203
6.4.3 风电场的有功功率控制系统及 控制策略	190	7.3.5 电气系统的防雷保护	204
思考题	193	7.3.6 风电机组防雷保护的注意事项 ...	204
第7章 风电场防雷与接地	194	7.4 集电线路的防雷与接地	205
7.1 雷电及常见防护措施	194	7.4.1 集电线路的感应雷过电压	205
7.1.1 雷电及其危害	194	7.4.2 集电线路的直击雷过电压	206
7.1.2 雷电的防护	195	7.4.3 集电线路的雷击跳闸率	209
7.2 接地的概念及措施	197	7.4.4 集电线路的防雷保护措施	210
7.2.1 接地的基本概念	197	7.5 升压变电站的防雷与接地	211
7.2.2 接地的类型	198	7.5.1 升压变电站的直击雷保护	211
7.2.3 接地的基本要求	199	7.5.2 升压变电站的侵入波保护	213
7.3 风电机组的防雷保护	200	7.5.3 升压变电站的进线段保护	213
7.3.1 叶片的防雷保护	201	7.5.4 升压变电站变压器防雷保护	215
7.3.2 机舱的防雷保护	202	思考题	216
		参考文献	218

第 1 章 绪 论

教学目标:

大概了解国内外风力发电的发展状况,掌握风电场电气部分的基本构成和特点,并对风电场容量可信度、输出功率特性和接入电网方式有一定的认识。

知识要点:

重要性	能力要求	知 识 点	
**	了解	风力发电的发展历史和现状	
*****	理解	风电场电气部分的构成和特点	
***	了解	风电场容量可信度	
***	了解	风电场输出功率特性	
*****	理解	风电场接入电网的方式	

重要术语:

电气部分,容量可信度,功率特性,接入电网。

1.1 风力发电的发展

1.1.1 世界风力发电的发展

人类利用风能的历史已有 3000 多年,而利用风力进行发电却是在 100 多年前。

1866 年,德国科学家西门子发明了发电机。19 世纪 70 年代,发电机和电动机相继得到应用,实现了电能和机械能的相互转换,为风电机组的问世奠定了基础。

第一台风电机组由美国电力工业奠基者之一 Charles F. Brush (1849 ~ 1929) 在 1887 ~ 1888 年间研制,安装于美国俄亥俄州的 Cleveland。此风电机组的风轮直径为 17m,由 144 个叶片组成,采用 12kW 的直流发电机,输出电压为 70V,输出的电能给蓄电池充电。

1891 年,丹麦 Askov 高等学校的 Paul La Cour (1846 ~ 1908) 发明了第一台 4 叶片的风电机组,同样采用直流发电机,输出电能用于电解水制氢。他的重要贡献是在进行空气动力学理论分析并在风洞进行空气动力试验后,提出“多叶片风轮由于其转速慢,不适合用于风力发电”的观点。此后,Paul La Cour 的风电机组设计理念在一定范围内得到了应用。到 1918 年,丹麦拥有 120 台风电机组,单机容量为 20 ~ 35kW,总容量达 3MW,发电量约占丹麦当时电能消耗的 3%。

第二次工业革命在催生电力工业的同时,也推动了内燃机的发明和使用。19 世纪七八十年代,以煤和油为燃料的内燃机相继诞生,19 世纪 90 年代柴油机研制成功。人类开始大

规模开发利用化石能源和矿产资源，使用化石燃料的发电机组和内燃机成为主要的电力和动力来源。风力发电因其高成本和低效率，并且具有间歇性和波动性的缺点，进入发展低潮。进入 20 世纪后，风电机组主要用于偏远地区独立供电，单机容量一般在 0.3 ~ 3.0kW 之间。20 世纪 40 年代以后，虽然在美国、法国、苏联和丹麦等国曾研制出百千瓦级以上并网型风电机组，但是由于成本和可靠性等方面的原因都没有实现大规模推广应用。

20 世纪 70 年代，世界范围内先后发生的两次石油危机，触发了第二次世界大战之后最严重的全球经济危机，对发达国家的经济造成了严重的冲击。风力发电作为一种替代化石燃料的可再生能源，重新开始受到高度关注。美国和西欧等发达国家投入大量资金，开始研制兆瓦级并网型风电机组。例如，美国波音公司研制了 2500kW 和 3200kW 风电机组，英国宇航公司和德国 MAN 公司分别研制了 3000kW 风电机组。但是，限于当时技术水平和研制经验，这些兆瓦级风电机组均未能正常运行，没有实现规模化和市场化。丹麦是风电机组制造业的成功范例，通过制定鼓励风电发展的有关政策，以及建立较为完善的风电机组研发、制造、检测和认证体系，促进了风电机组制造业的持续发展和技术进步。德国、美国、西班牙、印度和中国等国家也相继出台了鼓励风电发展的政策，带动了风电机组制造业发展。

随着风电机组技术不断进步，风轮直径和风电机组单机容量不断增大，结构形式趋于一致。20 世纪 80 年代，风电机组既有上风向式，也有下风向式；既有水平轴式，也有垂直轴式；叶片有一个、二个、三个和多个。目前，风电机组以上风向、三叶片、水平轴型为主，其中又可分为定桨距和变桨距，定速和变速，有齿轮箱和无齿轮箱等。同时，各种类型的兆瓦级风电机组实现了商品化。图 1-1 给出风机直径和风电机组单机容量的增长情况。

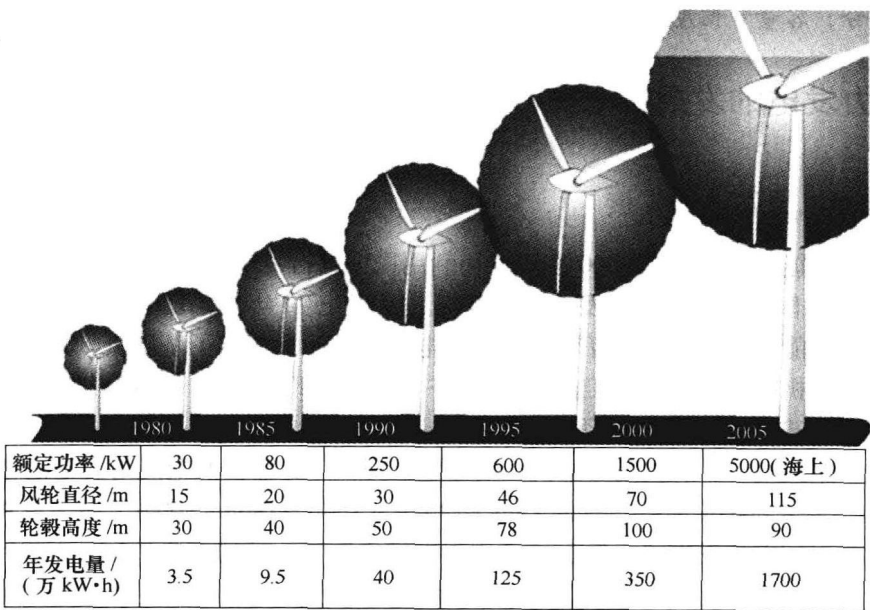


图 1-1 风电机组容量与风轮直径的增长情况

随着世界经济和社会的发展，减少温室气体排放和保护生态环境成为人类面临的重大课题。1992 年 6 月，联合国在巴西里约热内卢召开环境与发展大会，又名地球首脑会议，会议通过了《关于环境与发展里约热内卢宣言》、《21 世纪议程》等文件。1997 年 12 月，

在日本京都召开的《联合国气候变化框架公约》缔约方第三次会议，通过了旨在限制发达国家温室气体排放量以抑制全球变暖的《京都议定书》。2005年2月16日，《京都议定书》正式生效。

在此背景下，利用可再生能源取代化石类能源开始受到世界各国的重视。由于风能资源储量丰富，风力发电是技术最成熟、最具规模开发和商业化发展前景的可再生能源开发方式，因此从20世纪80年代开始，风力发电技术受到各国的重视，并得到了广泛的开发和应用。

为了保障能源供应和减少温室气体排放，大规模利用以风力发电为代表的可再生能源势在必行。2002年，欧洲风能协会和国际绿色和平组织联合发布了《风力12：关于2020年风电达到世界电力总量12%的蓝图》，对2020年全球风力发电规模进行了前景分析，指出2020年全球风电装机容量可以达到1200GW，年发电量3000TW·h，约相当于世界电力需求的12%。

1.1.2 中国风力发电的发展

风能是一种洁净的、储量极为丰富的可再生能源。风能资源受地理位置、季风、地形等因素的影响。将50m高度处风功率密度小于 $300\text{W}/\text{m}^2$ 、 $300\sim 400\text{W}/\text{m}^2$ 、 $400\sim 500\text{W}/\text{m}^2$ 和大于 $500\text{W}/\text{m}^2$ 的区域，分别称为风能资源贫乏区、一般区、较丰富区和丰富区。中国风能资源丰富的地区主要分布在东南沿海及附近岛屿，内蒙古、新疆和甘肃河西走廊，以及华北和青藏高原的部分地区。另外，华中地区也有个别风能资源丰富的地区。

我国风力发电始于20世纪70年代末，首先成功研制了小型风电机组（ $100\text{W}\sim 20\text{kW}$ ）的系列产品，并实现了商业化生产与应用，为解决偏远地区用电问题做出了巨大贡献。2007年我国小型风电机组的年产量、生产能力和出口均列世界首位。

1986年5月，我国第一个并网型风电场在山东省荣城建成投运，安装了丹麦Vestas公司的3台55kW风电机组。同年10月，福建省平潭风电场建成，安装了比利时Windmaster公司的4台200kW风电机组。并网型风力发电开始成为我国风能利用的主要方式。

1990年以后，我国陆续出台了一些鼓励风力发电的政策：国家发展计划委员会、国家科技委员会和国家经济贸易委员会制订发布《新能源和可再生能源发展纲要》（1996-2010），提出了我国“九五”至2010年新能源和可再生能源的发展目标、任务以及相应的对策和措施；国家经济贸易委员会组织实施的国家级重点技术改造项目“双加工程”（即加大技术改造投资力度、加快企业改革步伐）中，支持风电项目77.1MW，分别安装在河北省张北风电场、内蒙古辉腾锡勒风电场、浙江括苍山风电场和新疆坂城风电场等。

从2003年开始，国家发展和改革委员会开始实施风电特许权招标项目。风电特许权项目在推动我国风电规模化发展和促进风电机组设备国产化方面起了双重作用。

2006年1月1日，《中华人民共和国可再生能源法》开始施行，随之国家陆续颁布了一系列配套法规和实施细则，包括要求电网企业全额收购可再生能源电力、上网电价以及费用分摊措施等，从而大大促进了可再生能源产业的发展，我国风电也步入了快速增长时期。2006~2010年之间，我国风电装机容量基本实现每年翻番。

随着风电场规模的扩大，以及风电容量在电网容量中比例的提高，风电已经不再是单独的发电技术问题，风电与电网的联系越来越紧密，相互影响也越来越复杂。风电场电气工

程,是风力发电持续大规模发展过程中必须重视的基础课题。

1.2 风电场电气部分

1.2.1 风电场电气部分的组成

包括风电场在内的各类发电站、实现电压等级变换和电能输送的电网、消耗电能的各种设备(用户或负荷)共同构成了电力系统,即用于生产、传输、变换、分配和消耗电能的系统。电力系统各个环节的带电部分统称为其各自的电气部分。

风电场和变电站内部的带电部分,即为其自身的电气部分。电气部分不仅包括电能生产、变换的部分(例如发电机、变压器等),还包括其内部消耗电能(称为厂用电或所用电)的部分(例如照明、监控电源等)。用于能量生产、传输、变换、分配和消耗的部分,称为电气一次部分,或者电气主系统。电气一次部分解决的是高电压、大电流的能量转换与传递问题。

在风电场和升压站内,为了实现对电气一次部分运行状况的监测与控制,还需要用于对一次部分进行测量、监视、控制和保护的电气部分,称为电气二次部分。电气一次部分和二次部分都是由具体的电气设备构成的。一次设备主要是发电机、变压器、电动机等实现电能生产和变换的设备,它们和载流导体(母线、线路)相连接实现了电力系统的基本功能,即电能的生产、变换、分配、输送和消耗。其中发电机用于电能生产,变压器用于电能变换,电动机和其他用电设备用于电能的消耗(电能变换为其他能量形式),母线用于电能的汇集和分配,线路则用于电能的输送,开关设备用于故障处理和检修倒闸等。此外,还有无功补偿设备、防雷和接地设备等。二次设备是指对一次系统进行测量、控制、监视和保护的设备,主要包括:

互感器:用于将一次系统中的高电压和大电流转换为二次系统可以使用的低电压和小电流;

测量仪表:用于测量电路中的各种电气参数;

继电保护和自动装置:用于监视系统运行状态,当系统运行状态不正常时,发出告警或直接进行调整;

此外,还有各种控制电器、信号设备、控制电缆、直流电源等。

1.2.2 风电场电气部分的特点

与火电厂、水电站等常规发电站相比,风电场的电气部分有其特殊性:

1) 单机容量小,机组数目多。目前世界上容量最大的海上风电机组不超过10MW,而火电机组或水电机组的单机容量可达几百甚至上千兆瓦。由于风资源的低密度特性,单台风电机组不太容易实现大容量风能获取和电能输出,因此建设一个一定容量的风电场,往往要安装多台风电机组。例如,建设一个50MW的风电场,若采用目前技术比较成熟的1.5MW风电机组,需要33台风电机组。而在火电厂或水电站中,这样的容量只需一台机组就可实现。

2) 风电机组种类多,输出特性各异。水电站、火电厂等常规电源的发电机均为同步发电机。风电机组有定速风电机组和变速风电机组(包括双馈和直驱风电机组),相比于同步

机组其无功电压控制能力有限,在发出有功功率的同时,可能还要从电网吸收无功功率。

3) 电能送出需要集电系统和多级升压。由于风电场总的发电出力由数目众多、单机容量较小的风电机组共同实现,需要把每个风电机组经箱变升压至一定电压水平后(10kV或35kV),由专门的集电系统将众多风电机组输出的电能汇集起来,再经升压变电站升压后输送到电力系统。详见本章1.3.4风电场接入电网方案。

4) 风电场出力波动明显。由于风能资源的自然特性,风电机组和风电场输出功率具有波动性和随机性。先进的风力发电技术可以控制风电机组出力,但是会受到风速的限制。在风电场电气设备选择和继电保护设计中必须考虑这些因素。

5) 风电场的厂用电少。发电厂发出的电能不会全部送入电网,一小部分会在发电厂内部消耗掉,这部分用电称为厂用电,厂用电与发电总量之比称为厂用电率。火电厂在生产过程中需要众多辅机进行煤炭及水的预处理和输送,因而厂用电率较高;而风电场的生产运行过程中,一次能源由风能自然提供,不需额外辅助设备。风电场中的生活用电、监控用电等功率都很小,因而厂用电率很低。

1.3 风电场接入电网概述

1.3.1 风电场容量可信度

风电场对电力系统的贡献主要体现在两个方面,即:风电场可以节约常规发电机组使用的燃料从而减少环境污染,以及替代部分常规发电机组容量。而后者就涉及风电场的发电容量可信度问题。

目前没有一种发电方式是完全可靠的,而就容量可信度而言,风力发电和传统发电方式只是在设备可用率方面有数量上的差异,而没有本质区别。确定风电场的容量价值和其他发电形式电厂的方法是相同的。

风电的容量可信度有两种评价方法:

(1) 可靠性指标计算 计算含风电的电力系统可靠性指标,在保证系统可靠性不变的前提下,风电能够替代的常规发电机组容量即为其容量可信度。

这种方法适合于系统的规划阶段。具体方法是:首先在不考虑并网风电场的情况下计算电力系统的可靠性指标,例如电力不足概率(LOLP);然后计入风电场后重新计算,不断调整常规发电厂的出力水平,直到电力系统的LOLP值与没有风电场时的情况相等。此时,常规发电厂所减少的功率输出就是并网风电场的容量可信度。

(2) 时间序列仿真 选择合适的时间段作为研究对象,通过计算风电场的容量系数(风电场实际发电量与理论发电量的比值)来估算容量可信度。在负荷高峰时段,可以认为容量系数等于容量可信度。该方法适用于为系统的运行提供决策支持。

要评价风电对系统可靠性指标的影响,首先要知道风电场所在地的气象信息,获得风能资源数据,了解风电机组的技术参数,根据风速计算风电场出力;还要知道与风能资源数据同步的负荷曲线以分析风电场出力与负荷的相关性,同时要知道系统内其他常规发电机组容量和事故停电率的记录以及可靠性指标目标水平。

大量关于风电容量可信度的研究表明,风力发电将会增加系统的负荷承载能力,可以部

分满足负荷需求的规划性增长。在风电穿透率低、峰荷时容量系数高的情况下，风电容量可信度可高达风电装机容量的 40%；在风电穿透率高、峰荷期间容量系数低的地区或者在地区风电输出曲线与系统负荷曲线趋势相反的情况下，风电容量可信度可小到 5%。考虑到一定地理范围内多个风电场整体出力有平滑效应，因此地理范围越大风电的容量可信度越高。图 1-2 为随着风电装机容量的增加容量可信度的变化趋势，其中实线是考虑了地理范围的平滑效应，而虚线是没有考虑这个影响因素。

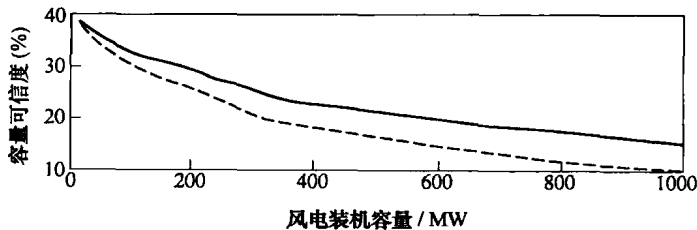


图 1-2 风力发电容量可信度与风电装机的关系曲线

1.3.2 风电场有功功率特性

随着各种新技术的应用，现代风电机组的运行效率与并网特性得到了很大改善，然而，以自然风为原动力的风电机组，其有功功率特性仍表现为波动性与随机性。根据自然风的变化规律，风电场的有功功率既具有长期统计规律，如图 1-3 和图 1-4 所示的有功功率日变化与年变化特征；又具有短期随机性，如图 1-5 所示的有功功率 10min 变化的概率分布。

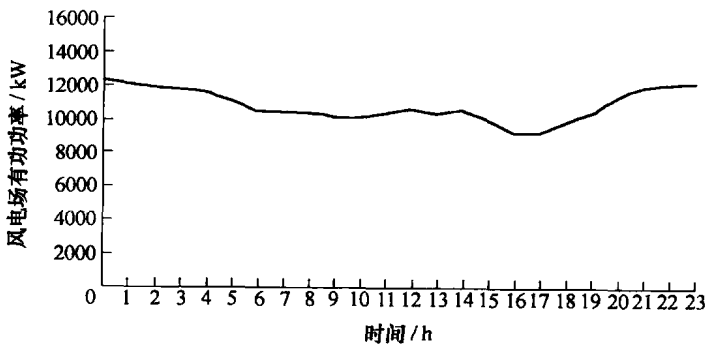


图 1-3 某风电场有功功率的日变化曲线

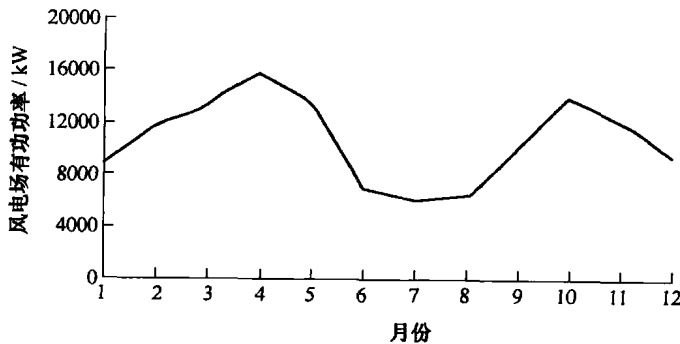


图 1-4 某风电场有功功率的年变化曲线

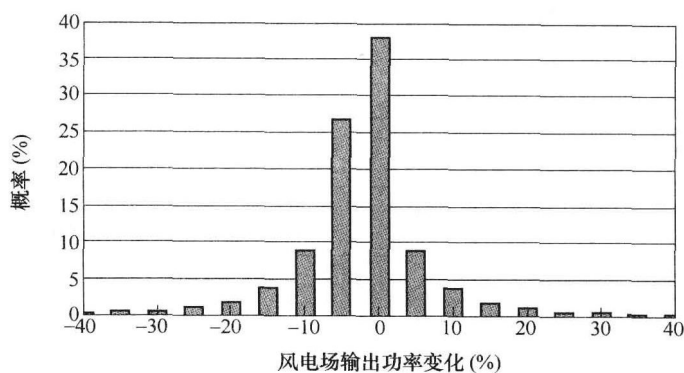


图 1-5 某风电场有功功率 10min 变化的概率分布

风电场有功功率的随机性主要会对电网的调峰及调度运行造成影响。一个安全可靠的电力系统必须保证电力的生产与消耗在任意时刻的动态平衡，常规电力负荷的变化往往具有比较明显的规律性，电网调度人员可根据这一规律制订合理的发电计划，满足各时间尺度上的用电需求。然而，有功功率输出具有波动特征的风电场接入电网后，在一定程度上打破了这一规律，图 1-6 为某区域电网中风电场有功功率波动曲线与负荷曲线对比图。

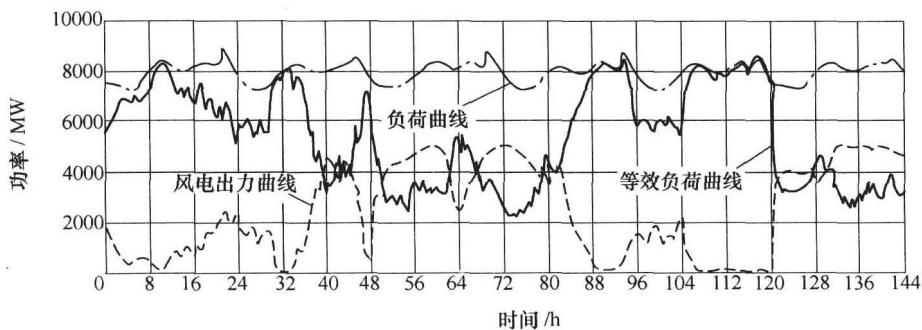


图 1-6 某省电网风电有功功率波动曲线与负荷曲线

由图 1-6 可见，若将风电场输出有功功率看作负的负荷，则风电场有功功率曲线与负荷曲线叠加后得到的等效负荷曲线已完全失去了负荷曲线原有的规律性，且负荷峰谷差（最大负荷与最小负荷之差）显著增大。如果不对风电场的有功功率进行预测，则无法制订相应的发电计划，为了保证电网安全稳定运行，电网调度运行人员只能通过增加与风电场并网容量相当的旋转备用容量（例如备用的火电机组）来平衡未知的风电有功功率波动。额外增加旋转备用容量对电网的调峰能力提出了很高的要求，在一些特殊运行方式下，电网的调峰能力成为限制风电并网容量的主要因素。

1.3.3 风电场无功功率特性

风电场的无功功率特性与风电场的有功功率特性有关。风电场有功输出较低时，输电线路轻载，线路充电功率过剩，风电场向电网注入无功功率；而风电场有功输出增加时，线路

充电功率小于风电场与电网元件消耗的无功功率，风电场从电网吸收无功功率，如图 1-7 所示。

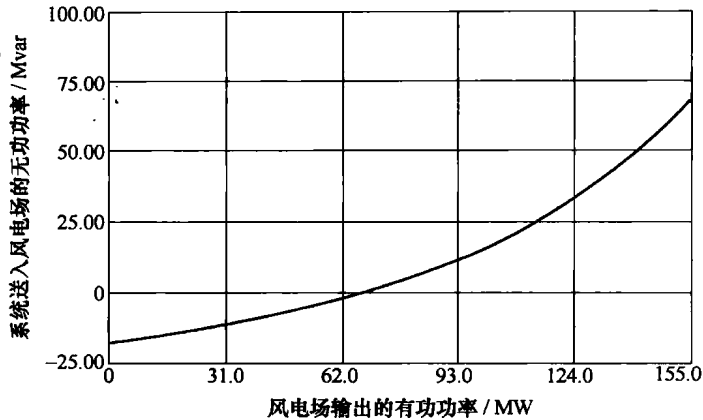


图 1-7 风电场无功功率特性

风电场无功功率特性还与所采用的风电机组类型有关。若采用固定转速风电机组，则风电场在发出有功功率的同时需要从电网中吸收无功功率用于风电机组励磁，并随着有功功率的增加而增加。若采用变速风电机组，风电机组可在控制系统的作用下运行在功率因数等于 1.0 的恒功率因数模式下，但控制系统只能保证风电机组不与电网进行无功功率交换，而随着风电机组有功功率的增加，电网元件无功损耗的增大是必然的。目前运行的风电机组多采用这种功率因数等于 1.0 的恒功率因数控制模式。如果增加风电机组功率因数调节范围，风电机组无功控制能力能够增强。风电机组的无功控制能力能够改变风电场的无功功率特性。我国的风电场大都处于电网末端，风电场并网运行对电网无功/电压的影响成为需要特别关注的问题之一。

1.3.4 风电场接入电网方案

目前国际上主流风电机组的机端输出电压一般为 690V，为了将生产的电能高效、远距离输送出去，风电场一般采用两级或三级升压后，将产生的电能送入电压等级较高的电网。

风电机组出口电压为 690V，通过低压电缆接至箱式变压器（简称箱变，通常放在风电机组塔筒下不远处）低压侧，经一机一变（一台风电机组配备一台箱式变压器）的单元接线方式升压至 10kV 或 35kV。再根据风电机组的安装位置，按照就近原则，分组由集电系统进行电能的汇集，每一组汇集成一路 10kV 或 35kV 的集电线路（取决于箱变高压侧的电压等级），送到风电场的升压变电站。图 1-8 所示为风电机组分组汇集电能送至升压站的示意图。

多条 10kV 或 35kV 集电线路都接入风电场升压变电站的 10kV 或 35kV 母线。根据风电场的装机容量和接入电网的情况，经升压站的主变压器将电压再次升高到 110（66）kV 或 220kV 后送入电网。如果是容量很大的风电场，例如 1000MW 以上，还可以考虑将电压升高到 500kV，经高压远距离输电网络，直接送到负荷中心。

典型的风电场接入电网方案，如图 1-9 所示。

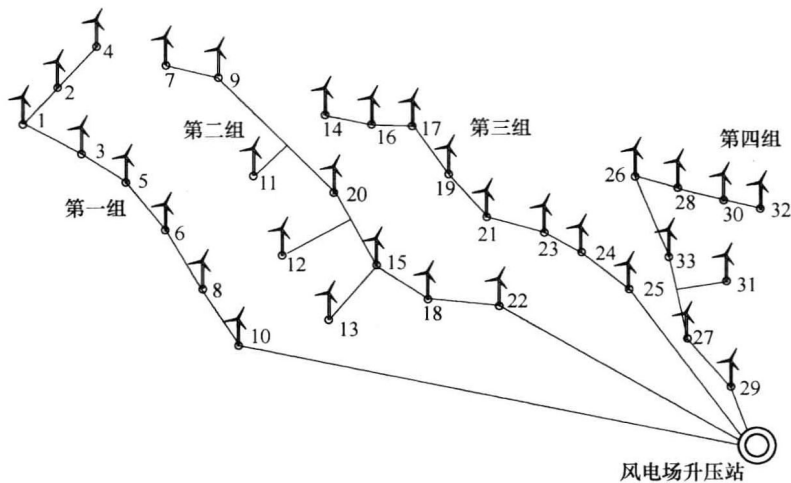


图 1-8 风电机组分组汇集电能送至升压站的示意图

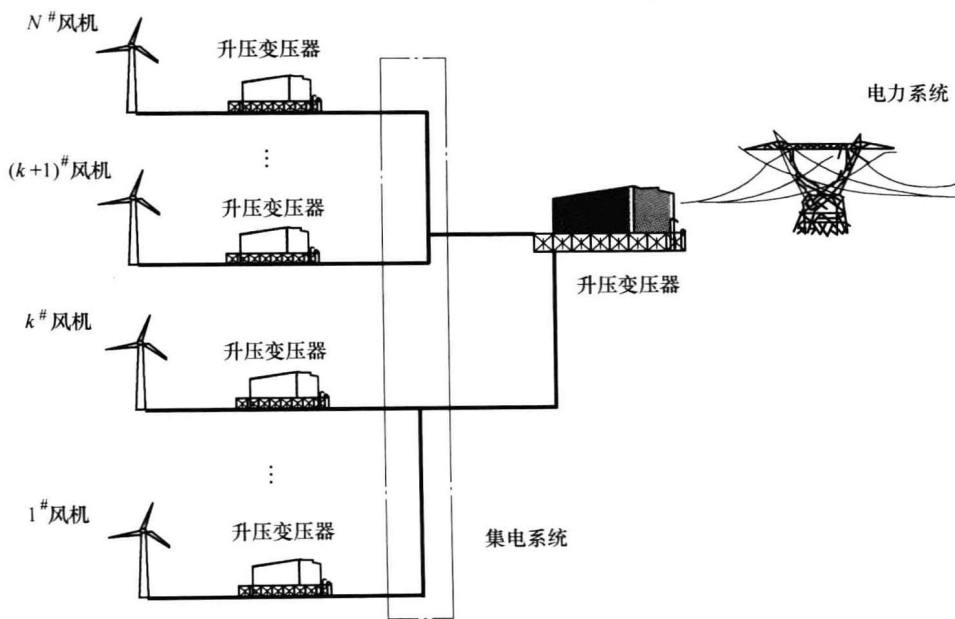


图 1-9 风电场接入电网方案示意图

1.4 本书的主要内容和特点

本书作为风能与动力工程专业的本科教材，力求做到通俗易懂，主要介绍目前业界公认的风电场电气工程知识。全书共分7章。

第1章绪论，主要介绍了风力发电与常规发电的不同之处，着重突出风电场不同于常规发电厂的电气特点。

第2章风电场电气主系统，介绍了风电场、升压变电站中除发电机组以外的主要一次设

备和电气主接线，包括电气设备的原理、结构以及选择方法，电气接线的设计和表示方法等。

第3章风电场电气二次系统，主要介绍电气二次系统的构成和功能，例如继电保护、自动化和信号系统等。

第4章风电机组的输出特性与运行控制，主要介绍了各种风电机组的工作原理、运行特性、起停及并网控制等内容。

第5章并网风电场对电网的影响，主要介绍风电场接入系统的数学模型及分析计算，风电场对电力系统的影响，风电场容量可信度以及风电场接入电网的技术规定。

第6章风电场的直流输电与功率控制技术，主要介绍柔性直流输电技术、风电场无功电压控制要求和方法，以及风电场低电压穿越技术和有功功率控制技术。

第7章风电场防雷与接地，介绍了雷电的防护及接地措施、风电机组的防雷保护、集电线路及升压变电站的防雷与接地。

本书涉及内容广泛，读者在修读本书之前，应先修完以下课程：电机学、风力发电原理、自动控制理论等。最好还学习过电力系统分析、电力系统继电保护等课程。

思考题

1. 近十几年世界风力发电的发展非常迅速，尤其是在中国。想一想，其主要原因有哪些？
2. 根据中国的风资源情况，设想一下未来中国风电发展的方向和前景。
3. 风电场的电气部分，与常规发电厂相比有哪些异同？
4. 风电场容量可信度与哪些因素有关？
5. 影响风电机组和风电场有功功率特性的因素有哪些？
6. 为什么风电场要经过多级升压后，才能将电能送入公共电网？