



“十二五”国家重点图书出版规划项目

新能源电能变换与控制技术丛书

风电场 无功补偿与电压控制

Reactive Power Compensation
and Voltage Control for Wind Farms

◆ 朱永强 迟永宁 李 琰 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

“十二五”国家重点图书出版规划项目
新能源电能变换与控制技术丛书

风电场无功补偿与 电压控制

朱永强 迟永宁 李 琰 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

风电场无功补偿和电压控制是风电并网中保持风电场电压稳定的重要手段之一,应用极其广泛。本书在论述风力发电的发展趋势、基本原理、主流机型及并网运行的基础上,讨论了风力发电的有功、无功和电压特性及风电场的电压稳定,重点讨论了风电场无功补偿方式及其方案设计、电压控制技术和低电压穿越技术,论述了海上风电的发展趋势及其输电方式。

本书旨在强调无功补偿在风力发电中的作用、必要性及其补偿方法,可作为风力发电领域科研及工程技术人员的参考书,也可供高等院校相关专业师生参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

风电场无功补偿与电压控制/朱永强,迟永宁,李琰编著. —北京:电子工业出版社,2012.10
(新能源电能变换与控制技术丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-121-18603-5

I. ①风… II. ①朱… ②迟… ③李… III. ①风力发电-无功补偿-研究②风力发电-电压控制-研究 IV. ①TM614

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第226994号

策划编辑:苏颖杰(suyj@phei.com.cn)

责任编辑:王凌燕

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编100036

开 本:787×1092 1/16 印张:10.25 字数:262千字

印 次:2012年10月第1次印刷

印 数:4000册 定 价:38.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888。

质量投诉请发邮件至zltz@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010)88258888。

丛 书 序

自工业革命以来，人类活动对传统能源的大规模利用已造成严重环境问题，在能源问题上必须寻找新的出路，需要开发多种可持续的清洁环保的能源并加以利用，建立相应的新能源供应体系，以减少污染排放，实现社会的可持续发展。因此，绿色环保、节能减排已成为全社会各行各业的发展方向。

电力电子技术的精髓是能源的高效率利用和提升生产效率，它在工业、能源、交通、信息、国防、教育等重要领域有着举足轻重的作用。如果把计算机比做人的大脑，电力电子就可以看做是肌肉，它是连接信息与制造业的纽带，是实现信息化制造的支撑科技。同时，电力电子技术也是发展智能电网、新能源和节能减排的核心技术，已被列入国家科技发展计划。

在此背景下，由中国电源学会、电子工业出版社共同发起，组织成立了“新能源电能变换与控制技术丛书”编委会，旨在建立一个相关领域专家学者交流学习的平台，及时将适合的理论、技术、科研成果等著为图书并出版。丛书的定位为具有一定广度和研究深度的科技专著，主题围绕新能源应用与电能变换及相关控制技术的结合，介绍具体设计或应用，内容以研究过程、结果和应用实例为主；读者对象为相关专业工程技术人员、科研人员及高等院校师生。

丛书内容目前包括风力发电、光伏发电、燃料电池、半导体照明、分布式逆变电源系统、微电网等多个方向，并将根据相关技术的发展不断推陈出新；丛书主要作者均为长期从事相关领域高校教学及科研工作、在业内颇具影响力的学者。相信这套丛书的出版，将对新能源电能变换与控制技术的发展和传播起到促进作用，为我国新能源产业的发展贡献一份力量。

浙江大学

前言

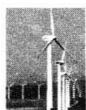
Preface <<< <<<

风力发电技术日趋成熟，已经成为重要的新能源发电方式。随着风电并网比例的增大，风电场的无功和电压问题日益受到风电企业和电网公司的关注和重视。在风力发电技术领域，无功补偿与电压控制是保证风电健康发展的重要技术内容，无功补偿和电压控制技术也是相关领域的从业人员都应当了解的基本知识。

本书主要讲述风电场的有功、无功和电压特性，主要讨论无功补偿的类型和补偿方案及电压稳定性和电压控制。全书共分为7章，涵盖风力发电的发展与趋势，风电并网运行，有功与无功、电压特性和稳定性，无功补偿和方案设计，电压控制技术，低电压穿越技术，海上风电等。

即将展现在您面前的这本《风电场无功补偿与电压控制》，在广泛调研、广泛收集素材的基础上，结合各位作者的教学和实践经验，精心编制，可为风力发电领域的相关从业人员的培训及自学提供参考。本书第1、2、4、6章主要由朱永强组织编写，第3、5章主要由迟永宁组织编写，第7章主要由李琰组织编写。

参加本书编写工作的还有王腾飞、高领军、王文山、申惠琪、刘艳章、齐琳、王真、王跃锋、张梅、魏林君、刘超、张占奎、王治宇、段春明、付春鹏等。另外，在本书的编写过程中，还得到了中国电力科学研究院新能源研究所王伟胜所长、朱凌志博士，南方电网科学研究院丁泽俊同志，华北电



风电场无功补偿与电压控制

力大学张旭、刘燕华等老师的支持和帮助，在此一并表示衷心的感谢。

本书得到“北京市优秀人才培养资助项目（PYZZ090423001016）”资助。

风电场无功补偿与电压控制技术既传统又新颖，作为无功补偿技术和电压控制在风力发电中的新应用还有许多地方需要改进研究。由于作者水平和精力有限，书中存在错误和不足之处在所难免，敬请广大读者加以批评指正。

编著者

2012年8月

目录

Contents <<< <<<

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	4
1.1.3 风力发电的发展趋势	6
1.2 风力发电的基本原理	8
1.2.1 风力机的工作原理	8
1.2.2 风力发电机组的构成	12
1.3 风电机组的主流机型	14
1.3.1 发电机的运行原理	14
1.3.2 大型风电机组主流机型	17
1.4 风电场的并网运行	21
1.4.1 风电场的概念和特点	21
1.4.2 风电场接入电网的方式	21
第2章 风电的有功、无功和电压特性	23
2.1 风电场的有功出力	23
2.1.1 风速的变化和分布	23
2.1.2 风电机组的输出功率波动	25
2.1.3 风电场的集群功率输出	27



2.1.4	风电场有功功率的统计规律	28
2.2	风电场的无功功率	29
2.2.1	风电机组的无功功率	29
2.2.2	变压器吸收的无功功率	37
2.2.3	输电线路的无功功率	39
2.2.4	风电场的无功功率特性	40
2.3	功率流动与线路压降	41
2.3.1	线路输送功率与电压降	41
2.3.2	不同电压等级的线路电压降	43
2.4	风电场的电压特性	45
2.4.1	有功出力变化对电压的影响	45
2.4.2	无功功率对电压的影响	45
第3章	风电场电压稳定研究	47
3.1	电压稳定的概念和机理	47
3.2	风电场的静态电压稳定问题分析	49
3.2.1	静态电压稳定性分析	49
3.2.2	潮流计算中不同风电机组模型	53
3.3	风电场的暂态电压稳定问题分析	54
3.3.1	恒速风电机组暂态电压稳定	54
3.3.2	变速风电机组暂态电压稳定	58
第4章	风电场无功补偿及方案设计	62
4.1	风电场无功调节的需求和原则	62
4.1.1	风电场无功调节的需求	62
4.1.2	相关的标准和规定	63
4.1.3	风电场无功调节的原则	64
4.2	风电机组的无功功率调节	65
4.2.1	直接并网的鼠笼式异步发电机	65
4.2.2	恒频变速双馈发电机	66
4.2.3	直驱永磁同步发电机	66
4.3	常见的无功补偿设备	66
4.3.1	并联电容器/电抗器	66
4.3.2	静止无功补偿器 (SVC)	68



4.3.3	静止同步补偿器 (STATCOM)	74
4.3.4	各种补偿装置的比较	76
4.4	风电场无功补偿方案设计	84
4.4.1	无功补偿方式的选择	84
4.4.2	无功补偿容量的确定	85
第5章	风电场电压控制研究	89
5.1	电网的电压控制要求	89
5.2	并网风电系统的电压稳定改善措施	90
5.2.1	风电送出线路安装串联补偿设备	90
5.2.2	可控高压电抗器	91
5.2.3	在风电场安装 SVC 或 STATCOM	91
5.2.4	桨距角控制	92
5.2.5	变速电机变频器控制措施	93
5.2.6	切除风电机组	93
5.3	风电场综合电压控制技术及系统	94
5.3.1	无功电压自动控制系统建设的必要条件	94
5.3.2	风电场综合自动电压控制系统的结构	95
第6章	风电场低电压穿越技术	101
6.1	低电压穿越的概念和意义	101
6.1.1	低电压穿越的概念	101
6.1.2	风电场具备低电压穿越能力的必要性	101
6.1.3	不同电网对低电压穿越的要求	103
6.2	风电机组低电压穿越的原理	104
6.2.1	鼠笼式异步风电机组的低电压穿越	104
6.2.2	双馈感应式风电机组的低电压穿越	105
6.2.3	永磁同步风电机组的低电压穿越	111
6.3	风电场低电压穿越的规定与认证	113
6.3.1	国外有关风电场低电压穿越的技术规定	114
6.3.2	我国有关风电场低电压穿越的技术规定	117
6.4	风电场低电压穿越的实现措施	119
6.4.1	动态无功支持	119
6.4.2	风电场有功功率控制	119



6.4.3 其他先进技术对风电场的作用	121
第7章 海上风电输电方式	125
7.1 海上风电场现状及其发展趋势	125
7.1.1 海上风力发电的发展现状	125
7.1.2 海上风电的发展趋势	129
7.2 海上风电场输电方式	132
7.2.1 AC 输电方式	132
7.2.2 VSC – HVDC 输电方式	133
7.2.3 传统 HVDC 输电方式	143
参考文献	152



1.1 风力发电的发展

1.1.1 世界风力发电的发展

人类利用风能已有 3000 多年的历史，而风力发电的历史不过 100 多年。

第一台风力发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克利夫兰市 (Cleveland)；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。他的重要贡献是根据空气动力学理论和在风洞进行空气动力学的试验，提出多叶片风轮由于其转速慢不适合用于风力发电的论断。到 1918 年，丹麦已经有 120 台风电机组，单机容量在 20 ~ 35kW，总容量达 3MW，发电量约占丹麦当时用电量的 3%。

第二次工业革命在催生电力工业的同时，也促进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。风力发电因其成本高和效率低，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，风电机组单机容量在 0.3 ~ 3kW。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原因都没有实现大规模推广应用。

20 世纪 70 年代，在世界范围内先后发生两次石油危机，从而触发了第二次



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 2 500kW 和 3 200kW 风电机组，英国宇航公司和德国 MAN 公司分别研制了 3 000MW 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。从 20 世纪 70 年代开始，丹麦生产的风电机组单机容量从数十千瓦发展到数百千瓦，直到目前的兆瓦级风电机组，并出现了 VESTAS、NEG MICON（2003 年 12 月被 VESTAS 收购）、BONUS（2004 年被德国西门子公司兼并）等世界著名风电机组制造商。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，产生了一批世界著名风电机组制造商。

随着风电机组技术的不断进步，风力机直径和风电机组单机容量不断增大，结构形式趋于一致。在 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、两个、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。如图 1-1 所示为风电机组单机容量和叶轮直径的增长变化情况。

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，利用可再生能源逐步替代化石类能源开始受到世界各国的重视。在各类可再生能源发电技术中，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。如图 1-2 所示为 1996—2010 年间世界风电累计装机容量的增长情况，风电装机容量基本以每年 30% 以上的速度增长，成为各种能源中增长最快的一种。

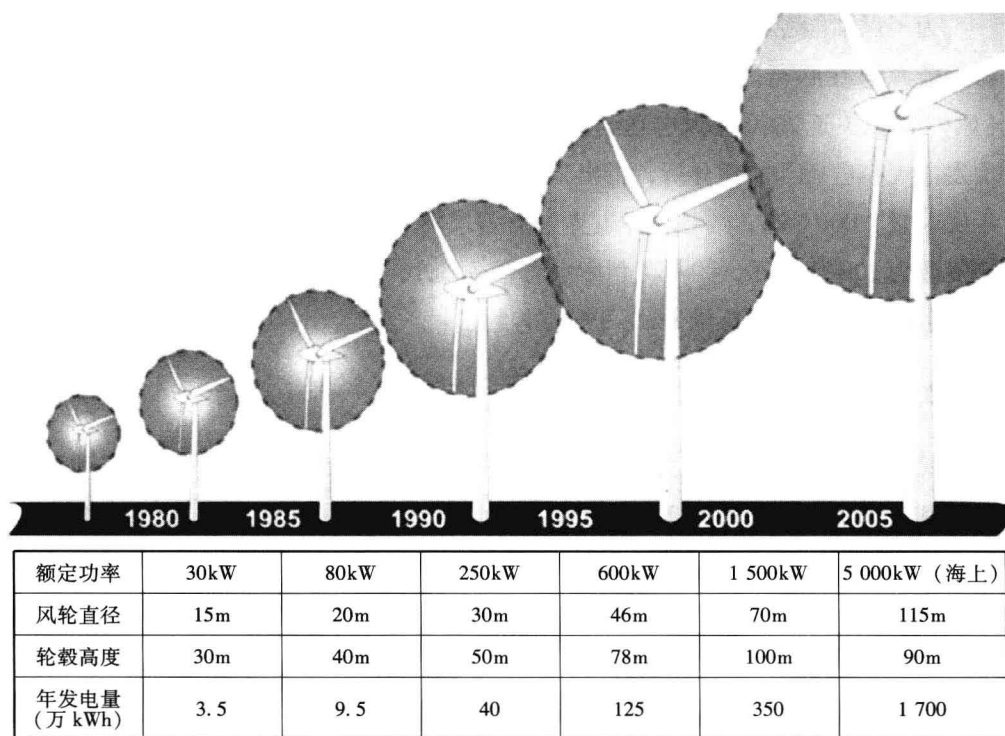
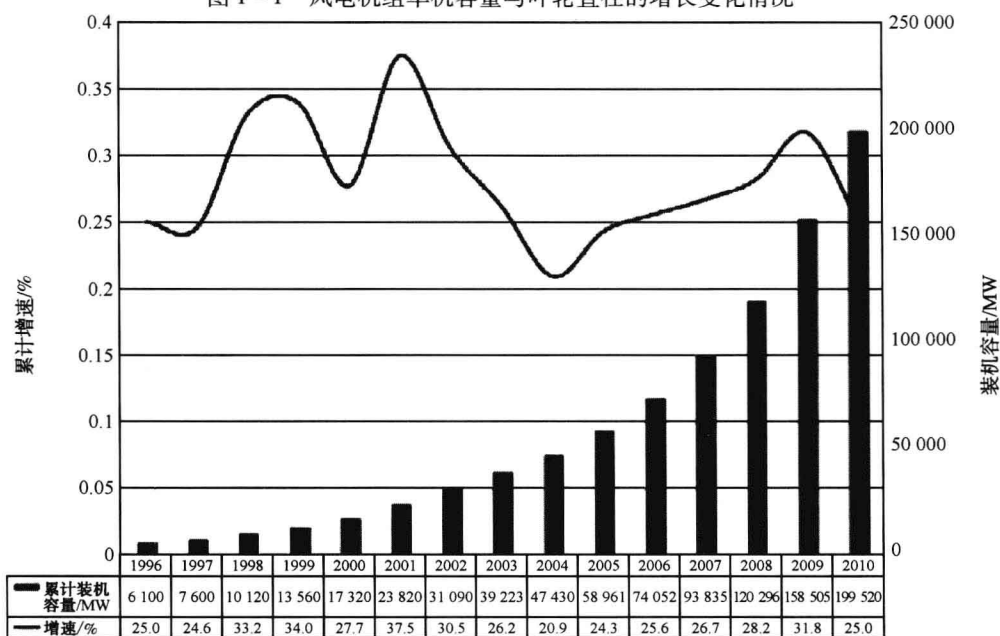


图 1-1 风电机组单机容量与叶轮直径的增长变化情况



(资料来源: GWEC. Global Wind Outlook 2001 和 BTM Consult Aps—A part of Navigant Consulting. World Market Update 2010.)

图 1-2 世界风电累计装机容量



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3000TWh,约相当于世界电力需求的12%。据测估,全球可利用的风能资源为200亿千瓦,约是可利用水力资源的10倍。如果利用1%的风能能量,可产生世界现有发电总量8%~9%的电量。

1.1.2 中国风力发电的发展

我国风资源丰富,开发潜力巨大,主要分布在三北地区(华北、东北和西北)和东南沿海地区。在20世纪80年代后期和2004—2005年,中国气象局分别组织了第二次和第三次全国风能资源普查:我国陆地上离地面10m高度处风能资源理论储量分别为3.23TW和4.35TW,技术可开发量分别为253GW和297GW。估算离地面50m和70m高度处陆地风能资源技术可开发量分别约为600GW和700GW。近年来,联合国环境署(UNEP)和中国气象局国家气候中心等采用数值模拟方法分别对我国风能资源进行了评价,得出我国陆地上离地面10m高度处风能资源理论技术可开发量均在1TW以上。

关于海上风能资源,中国气象局、中国科学院和联合国环境署都分别对我国海上风能资源进行过评价。根据《中国海岸带和海涂资源综合调查报告》和《全国海洋功能区划》,综合考虑航运、渔业、旅游及其他工程所用海区等因素,初步测算我国近海风电装机容量为100~200GW。

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(100W~20kW)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作出了巨大贡献。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。从此,并网型风力发电开始成为我国风能利用的主要方式。

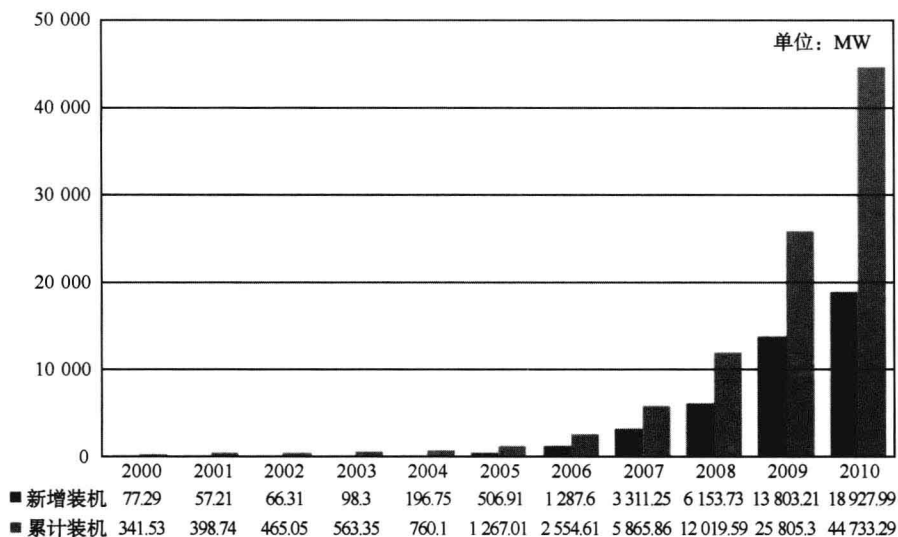
1990年以后,我国陆续出台了一些鼓励风力发电的政策:原电力工业部颁布了《风力发电场并网运行管理规定》(试用),对风力发电并网运行做出了明



确规定；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定发布《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、内蒙古辉腾锡勒、浙江括苍山和新疆达坂城等风电场。

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，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到了重要作用。2006年1月1日，《中华人民共和国可再生能源法》开始实施，政府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、上网电价及费用分摊措施等，大大促进了可再生能源产业的发展，风电也步入了快速增长时期。

2000—2010年我国风电装机容量（未计入中国台湾地区的数据）的增长情况如图1-3所示。2010年中国新增安装风电机组12 904台，装机容量18 927.99MW，同比增长37.1%；累计安装风电机组34 485台，装机容量44 733.29MW，年同比增长73.3%。



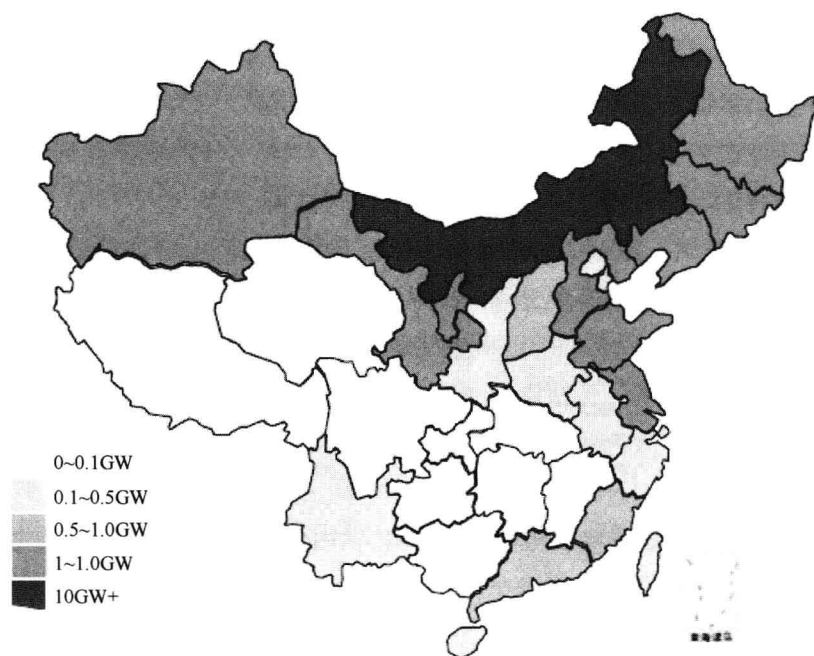
（数据来源：中国风能协会）

图1-3 中国风电累计装机容量

2010年中国各省区风电装机情况如图1-4所示，累计装机容量前5位的省



区依次为内蒙古、甘肃、河北、辽宁、吉林，如表 1-1 所示。



(数据来源：中国风能协会)

图 1-4 2010 年中国各省区风电装机情况

表 1-1 2010 年中国风电装机前 5 位的省区 单位：MW

序号	省（自治区、直辖市）	2009 年累计	2010 年新增	2010 年累计
1	内蒙古	9 196. 16	4 661. 85	13 858. 01
2	甘肃	1 187. 95	3 756	4 943. 95
3	河北	2 788. 1	2 133. 4	4 921. 5
4	辽宁	2 425. 31	1 641. 55	4 066. 86
5	吉林	2 063. 86	877	2 940. 86

(数据来源：中国风能协会)

1.1.3 风力发电的发展趋势

风力发电经历了 100 多年的发展，技术基本成熟，成本也逐渐降低，随着运行经验的增加和各国政府的重视，正在走向更大规模的快速发展道路。

风力发电的发展趋势大致体现在以下几个方面。



1. 单机容量不断增加

风力发电机组从早期的十几千瓦、几十千瓦，一直发展到几千千瓦。1941 年在美国建成世界上第一台兆瓦级风力发电机（容量为 1.25MW）。目前，国际上陆上风电场的主流风电机组，单机容量多为 1.5MW 左右。2.5MW、3MW 的风电机组也被逐渐被应用。海上风电场的风电机组平均容量在 3MW 左右，最大单机容量达到 5~6MW。随着风力机设计水平、叶片材料等方面的技术进步，单机容量可能还会继续增大。

2. 风电场规模不断增大

随着风电机组制造水平的提高和各国政府对风力发电的鼓励支持，风电场的装机规模越来越大。装有几十台、上百台风电机组的容量超过十万千瓦的风电场在我国已经很常见，百万千瓦、千万千瓦级的大型风电基地也在陆续建设。例如，我国将在内蒙古、甘肃、河北、吉林、新疆、江苏及山东沿海等省区建设多个百万千瓦和千万千瓦的大型风电基地。

3. 海上风电的快速发展

海上风电场的主要优点是基本不受地形地貌影响，风能资源更为丰富，平均风速高，可安装的风电机组单机容量大，年利用小时数更高。因此，海上风电受到很多国家的重视，发展也比较快，有很大的潜力。

4. 风电在电力结构中的比例逐步提高

风电是目前增长速度最快的电源之一。在 2007 年中国的电力结构中，风电装机容量所占的比重只有 0.8%，发电量的比重只有 0.2%。到 2008 年，中国风力发电的装机容量占全国电力装机容量的 1.5%。截至 2010 年，中国的风电总装机容量达到 44 733MW。按照中国的《新能源产业振兴规划》，到 2020 年，风电总装机容量将达到 1.5 亿千瓦以上，风电在整个发电结构中的比重将明显提高。

随着风电场规模的扩大，以及风电在电网中比例的提高，风电的问题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。其中，风电场的无功和电压问题，作为风力发电接入电网最先出现也是最根本的问题，在风力发电持续大规模发展过程中及接入电网研究过程中，必须给予足够重视。