

# 新能源发电并网控制技术的应用

---

李圣清 著



科学出版社

# 新能源发电并网控制技术的应用

李圣清 著

科学出版社

北京

## 内 容 简 介

本书以新能源发电并网控制技术为核心,面向工程应用实践,围绕光伏发电系统、储能系统及并网系统等方面,探讨发电并网原理、混合储能系统功率分配、并网运行控制等诸多理论和技术问题;围绕风力发电并网控制方面,探讨风力发电系统组成及数学模型、新型低电压穿越控制技术、级联 STATCOM 控制方法等理论和技术问题。本书有一定的理论深度,也有许多工程实践应用,强调理论与实际相结合,其中许多内容是研究团队多年科研工作的成果与结晶。

本书可作为高等院校电气工程相关专业的本科生、研究生学习的教材和参考书,也可供电气工程、控制工程及相关领域的工程技术人员在设计、制造、调试新能源发电并网系统时参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

新能源发电并网控制技术及应用/李圣清著. —北京:科学出版社,2019.2  
ISBN 978-7-03-060765-2

I. ①新… II. ①李… III. ①新能源-发电-研究 IV. ①TM61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 043727 号

责任编辑:潘斯斯 于海云 霍明亮 / 责任校对:彭珍珍  
责任印制:张 伟 / 封面设计:迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京建宏印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

2019 年 2 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2019 年 2 月第一次印刷 印张:19 1/4

字数:500 000

定价:128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

# 前 言

传统能源所引起的环境污染越来越严重,使得新能源发电产业不断发展壮大。以风电、光伏发电等为主的无污染和可再生新能源日益受到重视,已成为新一轮国际竞争的战略制高点。世界发达国家和地区都把发展新能源作为顺应科技潮流、推进产业结构调整的重要举措,我国也相继出台了一系列扶持政策,大力规划、发展新能源产业。

光伏发电具有间歇性和波动性,大规模接入电网会对电网安全、稳定及可靠运行带来诸多隐患。同时,在微电网中大功率逆变器件造价昂贵,使得光伏发电系统的经济效益较低。此外,光伏发电在并网、孤岛运行模式切换过程中,不可避免地对电网产生冲击。因此,在提高系统工作效率、降低发电成本以及实现微电网逆变器并网、离网运行模式之间的平滑切换和系统安全并网运行等方面的研究具有重要意义。

风能具有密度低、间歇性和波动性的缺点,其可控性和稳定性都不如常规的化石能源。而低压无功补偿装置在低电压故障结束后没有自动切换能力,无功功率积累过大会导致电压升高,造成故障,往往会给并网运行系统造成较大的控制难度。因此,为保证风电运行的安全性和稳定性,开展风电并网低电压穿越运行技术的研究势在必行。

本书可以推进新能源发电并网控制技术及应用工作,满足本科生、研究生以及相关领域的工程技术人员与管理人员对于新能源发电技术及应用的认知和前沿控制方法的了解,以适应当前形势发展的需求。本书作者和科研团队在微电网并网方面的研究已有十余年,先后完成和正在进行的国家自然科学基金项目、湖南省自然科学基金项目、湖南省科技厅项目以及大中型企业课题和工程应用 12 项,发表相关论文 90 余篇,其中 SCI、EI 收录 50 余篇,授权专利 18 项,获得湖南省科学技术进步二等奖 2 项。本书依托以上项目、论文和专利,结合相关理论研究,对新能源发电并网控制技术及应用方面的工作和成果进行总结,以期对相关问题的研究有所贡献。

本书将光伏发电并网系统分为发电系统、储能系统、并网系统三大模块,分别介绍光伏发电、储能、并网系统的原理及模型。围绕混合储能系统荷电状态估计及功率分配、光伏逆变器并网运行控制方法等技术进行深入探讨。本书提出基于 BP 神经网络的混合储能系统荷电状态估计方法、基于功率频率的混合储能系统功率指令初级分配方法。针对传统光伏逆变器并网运行控制存在的问题,本书提出基于准 PR 调节器的并网电流控制、下垂系数动态调节控制及最大功率点跟踪控制方法;针对光伏逆变器防孤岛运行,提出主被动式相结合防孤岛运行控制方法、光伏逆变器运行模式切换控制方法;针对级联型两级式光伏并网逆变器,提出级联型两级式并网逆变器 MPPT 控制方法,级联型两级式并网逆变器直流母线均压控制。在风力发电并网控制方面,本书介绍风力发电系统组成及数学模型,提出 STATCOM 补偿指令电流检测方法、风电并网中级联 STATCOM 的正负序解耦控制、不平衡条件下级联 STATCOM 的复合控制方法。围绕电压跌落引起风电机组能量过多无法释放的问题,本书提出基于状态反馈线性化的网侧变换器低电压穿越控制和基于 Crowbar 硬件保护电路的低电压穿越技术,在进行故障穿越的同时可向系统提供无功补偿,帮助系统恢复电压。

本书有一定的理论深度,也有很直观的仿真图形和实验波形,强调理论与实际相结合,

应用于多种工程实践，有许多内容是作者和研究团队多年从事科研工作的成果与经验总结。

本书写作过程中除了依托作者以及研究团队的项目报告、论文和专利，还参考和引用了不少前辈和同行的研究成果，使得本书内容比较系统地反映了光伏、风力发电并网相关技术的最新研究成果，使读者能较快地获取这一领域的前沿知识，对光伏、风力发电并网问题有一个全面而深刻的了解。书中主体内容由李圣清撰写和统稿，本书能够顺利出版凝聚了许多研究生的汗水，徐文祥、张彬、白建祥、唐琪、袁黎、张煜文、明瑶、吴文凤、马定寰对一些章节的撰写做了许多前期工作，杨潇、张威威、严威、刘境雨、张茜、王飞刚、李静萍进行了排版，并通读和修改了书中的一些问题。中车株洲电力机车研究所有限公司的胡家喜、蹇芳、陈艺峰等工程技术人员对第2章的工程应用做了大量的前期工作，在此一并向他们致以衷心的感谢！

由于作者的水平有限，加上时间比较仓促，书中难免存在一些不足之处，敬请广大读者批评指正，作者十分感激。

李圣清

2018年9月

# 目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 新能源发电的背景	1
1.1.1 光伏发电的背景	1
1.1.2 风力发电的背景	2
1.2 新能源发电国内外研究历程	3
1.2.1 光伏发电国内外研究历程	3
1.2.2 风力发电国内外研究历程	5
1.3 新能源发电并网控制技术国内外研究历程	7
1.3.1 光伏发电并网控制技术国内外研究历程	7
1.3.2 风力发电并网控制技术国内外研究历程	8
1.3.3 风电场 STATCOM 的应用	10
1.4 小结	11
第 2 章 光伏发电系统组成和基本原理	12
2.1 光伏发电系统的组成	12
2.1.1 光伏发电系统的简介	12
2.1.2 多功能一体化光伏发电装置	13
2.1.3 防逆流控制方法和装置	14
2.2 光伏电池的原理及特性	15
2.2.1 光伏电池工作原理	15
2.2.2 光伏电池数学模型	16
2.2.3 光伏电池输出特性	18
2.3 光伏并网发电系统原理	20
2.3.1 单级式并网发电系统	20
2.3.2 两级式并网发电系统	21
2.4 储能系统原理及数学模型	22
2.4.1 蓄电池的数学模型	22
2.4.2 超级电容器的数学模型	24
2.4.3 混合储能系统的数学模型	25
2.5 小结	26
第 3 章 光伏并网逆变器组成和基本原理	27
3.1 光伏逆变器拓扑结构及工作原理	27
3.1.1 升压部分拓扑结构及工作原理	27
3.1.2 逆变部分拓扑结构及工作原理	28
3.1.3 滤波部分拓扑结构及工作原理	30
3.2 级联型光伏并网逆变器拓扑及工作原理	32

3.2.1	级联型逆变器拓扑	32
3.2.2	级联型逆变器工作模式	34
3.3	级联型光伏并网逆变器工作原理	36
3.3.1	逆变器的选择	36
3.3.2	级联型两级式并网逆变器工作原理	38
3.4	小结	40
<b>第 4 章</b>	<b>基于 BP 神经网络的 HESS 系统荷电状态估计</b>	<b>41</b>
4.1	神经网络的基本原理	41
4.1.1	神经元模型	41
4.1.2	神经元连接方式	42
4.2	神经网络的学习算法理论	42
4.2.1	梯度最速下降算法	43
4.2.2	学习率可调整的 BP 算法	44
4.2.3	增强型学习率自适应算法	44
4.3	BP 神经网络的荷电状态估计效果分析	45
4.4	小结	48
<b>第 5 章</b>	<b>微电网 HESS 系统功率分配协调控制</b>	<b>49</b>
5.1	基于功率频率的 HESS 系统功率指令初级分配方法	49
5.1.1	一阶低通滤波方法	49
5.1.2	小波包分解方法	50
5.1.3	滑动平均滤波方法	51
5.2	基于储能元件荷电状态的 HESS 系统功率协调控制方法	52
5.3	仿真验证	53
5.4	小结	58
<b>第 6 章</b>	<b>光伏逆变器并网运行控制方法</b>	<b>59</b>
6.1	基于准 PR 调节器的并网电流控制	59
6.1.1	电压电流双环控制	60
6.1.2	电压外环的实现	61
6.1.3	电流内环的实现	62
6.2	最大功率点跟踪控制	65
6.2.1	光伏电池等效电路和数学模型	66
6.2.2	常用 MPPT 控制方法及其局限性	68
6.2.3	最大功率点跟踪优化控制方法	69
6.3	仿真验证	72
6.4	小结	76
<b>第 7 章</b>	<b>光伏逆变器防孤岛运行控制方法</b>	<b>77</b>
7.1	逆变器防孤岛运行检测方法	77
7.2	主被动式相结合防孤岛运行控制方法	80
7.2.1	防孤岛运行控制工作原理	80
7.2.2	基于 $Q_{f_0} \times C_{\text{norm}}$ 坐标系模型参数优化	81

7.3	仿真验证	84
7.4	小结	86
<b>第8章</b>	<b>级联型两级式光伏并网逆变器控制方法</b>	<b>87</b>
8.1	级联型两级式并网逆变器 MPPT 控制方法	87
8.1.1	光伏阵列的输出特性	87
8.1.2	传统 MPPT 控制方法	90
8.1.3	基于 GA 的光伏 MPPT 变加速扰动法	93
8.1.4	仿真验证	97
8.2	级联型两级式并网逆变器直流母线均压控制	99
8.2.1	级联型逆变器调制技术	99
8.2.2	传统控制算法	101
8.2.3	基于误差标幺化的占空比微调均压控制方法	103
8.2.4	仿真验证	105
8.3	小结	108
<b>第9章</b>	<b>下垂系数动态调节的微电网逆变器控制策略</b>	<b>109</b>
9.1	微电网逆变器数学模型	109
9.2	下垂控制的基本原理	111
9.2.1	基本原理分析	111
9.2.2	控制模块分析	113
9.3	传统固定下垂系数的控制策略	116
9.4	下垂系数动态调节的控制策略	117
9.4.1	动态下垂控制方法分析	117
9.4.2	动态下垂控制器参数设计	118
9.5	电压电流双闭环控制器参数设计	119
9.5.1	电压环控制器设计	119
9.5.2	电流环控制器设计	120
9.6	仿真验证	122
9.6.1	离网运行仿真	122
9.6.2	并网运行仿真	125
9.7	小结	127
<b>第10章</b>	<b>光伏逆变器运行模式切换控制方法</b>	<b>128</b>
10.1	孤岛检测原理	128
10.1.1	频率扰动法原理分析	129
10.1.2	带正反馈的频率扰动法原理分析	130
10.2	微电网逆变器并/离网模式切换分析	131
10.2.1	并网切换至离网分析	132
10.2.2	离网切换至并网分析	132
10.3	并网至离网平滑切换控制策略	133
10.3.1	基于增强型频率正反馈的孤岛检测方法	134
10.3.2	孤岛检测仿真	136

10.4	并网至离网切换过程仿真	138
10.5	离网至并网平滑切换控制策略	140
10.5.1	基于动态下垂系数的预同步策略	140
10.5.2	离网至并网切换过程仿真	142
10.6	仿真验证	143
10.6.1	硬件平台设计	143
10.6.2	输出滤波器设计	145
10.6.3	控制系统程序设计	146
10.6.4	实验结果分析	147
10.7	小结	148
<b>第 11 章</b>	<b>风力发电系统组成及数学模型</b>	<b>149</b>
11.1	风力机的数学模型	149
11.2	双馈电机的数学模型	150
11.2.1	静止坐标系下的数学模型	152
11.2.2	同步旋转坐标系下的数学模型	154
11.3	网侧变换器的数学模型	156
11.4	双馈电机及网侧变换器的 MATLAB 建模	158
11.5	STATCOM 拓扑结构与工作原理	159
11.5.1	STATCOM 电路基本结构	159
11.5.2	STATCOM 的工作原理	160
11.6	小结	162
<b>第 12 章</b>	<b>风力发电系统低电压穿越技术研究</b>	<b>164</b>
12.1	基于 Crowbar 电路的低电压穿越技术	164
12.1.1	电压跌落的基本概念	164
12.1.2	低电压穿越的硬件保护方法	166
12.1.3	基于 Crowbar 硬件保护电路的低电压穿越技术	167
12.1.4	仿真验证	173
12.2	基于状态反馈线性化的网侧变换器低电压穿越技术	175
12.2.1	状态反馈线性化理论	176
12.2.2	网侧变换器的状态反馈线性化控制	180
12.2.3	仿真验证	183
12.3	小结	186
<b>第 13 章</b>	<b>STATCOM 补偿指令电流检测方法研究</b>	<b>187</b>
13.1	STATCOM 补偿指令电流定义	187
13.2	传统 STATCOM 补偿指令电流检测方法及其局限性	188
13.2.1	矢量坐标变换原理	188
13.2.2	传统 $p-q$ 检测方法	189
13.2.3	传统 $i_p-i_q$ 检测方法	190
13.2.4	传统检测方法的局限性	194
13.3	跨端口 STATCOM 补偿指令电流检测方法	195

13.3.1	STATCOM 跨端口工况下的局限性	195
13.3.2	跨端口 STATCOM 补偿指令电流检测方法	195
13.3.3	仿真验证	198
13.4	改进型 STATCOM 补偿指令电流检测方法	202
13.4.1	传统锁相环的工作局限性	202
13.4.2	改进的软件锁相环算法	202
13.4.3	相位调节模块	206
13.4.4	改进型 STATCOM 补偿指令电流检测方法	207
13.4.5	仿真与实验分析	208
13.5	小结	212
<b>第 14 章</b>	<b>风电并网中级联 STATCOM 的正负序解耦控制方法</b>	<b>213</b>
14.1	级联 STATCOM 结构原理与调制策略	213
14.1.1	拓扑结构与工作原理	213
14.1.2	单极倍频 SPWM 调制策略	222
14.2	级联 STATCOM 直流侧电容电压平衡控制方法	224
14.2.1	直流侧电容电压不平衡的原因	224
14.2.2	传统电容电压平衡控制方法	225
14.2.3	有功功率均等分配的直流侧电容电压平衡控制方法	227
14.2.4	仿真与实验分析	229
14.3	不平衡工况下级联 STATCOM 控制方法	233
14.3.1	系统不平衡产生原因及危害	233
14.3.2	不平衡工况下级联 STATCOM 工作特性分析	234
14.3.3	基于正序-负序解耦 PWM 的级联 STATCOM 控制方法	236
14.3.4	仿真与实验分析	239
14.4	级联 STATCOM 控制系统设计	242
14.4.1	控制硬件设计	242
14.4.2	控制软件设计	245
14.5	小结	254
<b>第 15 章</b>	<b>不平衡工况下级联 STATCOM 的复合控制方法</b>	<b>255</b>
15.1	级联 STATCOM 数学建模	255
15.1.1	级联 STATCOM 建模方法分析	255
15.1.2	级联 STATCOM 建模假设	256
15.1.3	级联 STATCOM 数学模型	256
15.2	级联 STATCOM 直流侧电容电压分层控制方法	259
15.2.1	级联 STATCOM 直流侧电容电压不平衡机理	259
15.2.2	级联 STATCOM 直流电容电压分层控制方法	260
15.2.3	仿真与实验分析	266
15.3	系统不平衡工况下级联 STATCOM 控制方法	274
15.3.1	系统不平衡工况下级联 STATCOM 运行分析	274
15.3.2	系统不平衡工况下级联 STATCOM 负序分量的数学模型	277

15.3.3 系统不平衡条件下级联 STATCOM 控制方法·····	278
15.3.4 仿真与实验分析·····	282
15.4 小结·····	289
参考文献·····	290

# 第1章 绪 论

本章介绍新能源发电的相关背景和国内外研究现状，重点阐述光伏发电并网控制技术和风力发电并网控制技术的国内外研究现状，介绍光伏和风力发电发展现状及其接入电网的技术，尤其是最大功率点跟踪以及并网逆变器控制技术，总结光伏和风力发电并网系统的常见问题，并对风电机组低电压穿越、风电场 STATCOM 应用等关键问题进行介绍。

## 1.1 新能源发电的背景

### 1.1.1 光伏发电的背景

随着经济的快速发展，人类对于能源的需求日益增长，能源已经逐渐成为人们日常生活中不可分割的一部分，它是人类经济发展以及社会活动的动力之源。煤、石油等燃料在全球能源结构中属于一次能源。随着这些有限的不可再生能源被过度开采利用以及自然环境的日趋恶化——全球变暖、水污染、雾霾、酸雨、厄尔尼诺等现象的影响，一连串的环境污染问题危及人类社会的健康发展，已成为人类亟需解决的重大问题。发达国家和发展中国家的各级政府已经认识到亟需采取一些国际行动来消除人为的环境污染。这些行动包括减少不可再生燃料的使用，采用更清洁、排放更低的新型绿色能源来替代化石燃料，从而减少温室气体的排放，抵御各地出现的雾霾现象。因此，新能源家族成员中的太阳能、风能、水能、潮汐能、地热能等可再生能源将在全球环境污染治理过程中扮演重要角色，并且有可能发展成为未来世界能源供应链的核心组成部分。水能发电需要建造大型水库，既有可能破坏生态环境，又存在很大隐患，还受到水源和季节性气候等因素的限制。2011年日本地震导致震惊国际的核泄漏，使附近 30km 成为无人区，这让许多国家必须重新认识核电技术。太阳能资源分布广、蕴含丰富，光伏发电便以其作为能源，将其转化为电能，是一种不需要化石燃料、安全干净的新型发电技术。光伏发电既能在光照充足的地方放置大量光伏电池板进行发电，还能采用小面积的“屋顶计划”。太阳能作为可再生能源，具有独特优点，因此引起广泛重视，已经在国内外逐渐发展起来。

欧洲联合研究中心在 2004 年对未来一个世纪的能源变化进行预测<sup>[1]</sup>：到 2030 年化石燃料消耗总额将出现拐点，煤、石油、天然气等不可再生能源在一次能源消费中所占的份额将呈下降趋势，太阳能将逐渐增加。尽管这仅仅是一个预测，但也充分显示了太阳能发电的广阔前景。因此，太阳能发电成为新时代里最有发展活力的一种新能源<sup>[2]</sup>。加大在太阳能发电方面的研究与投入，在改善环境污染和缓解能源危机等方面发挥着重要作用。

光伏发电系统具有初期投资大、光伏器件制造成本较高等缺点，仅仅在一些偏远地区供电中得到应用。因而，进一步开发成本低和转化效率高的光伏电池成为今后发展的必然趋势。此外，还需通过逐步减少发电自身损耗以及提升发电运行效率来降低成本。经过几十年的努力，光伏电池生产规模逐渐扩大，自动化等技术不断发展，有效地提高了太阳能电池效率，逐步减小了发电成本，为今后太阳能发电奠定技术铺垫。由我国能源战略部署以及《可再生

能源中长期发展规划》可知，在我国未来能源结构中，太阳能将占据主要部分。我国光伏发电的装机容量在未来的许多年里将会不断增加，其增长率甚至有可能达到 20% 以上。21 世纪 50 年代以后，我国的可再生能源发电的装机量将占全国全部发电的 25%，其中光伏占 5%。

随着越来越多的太阳能发电系统并入电网，电网与其之间的交互影响日益凸显。一方面，太阳能电池输出特性受到光强及温度影响，导致发电运行受气候环境因素的影响比较大，且大规模光伏并网系统采用的太阳能电池数量庞大，初始投资成本较高；另一方面，并网逆变器是太阳能发电系统接入电网中的重要组成部件，可看成有源逆变环节，将直流电逆变成所需求的交流电<sup>[3]</sup>。光伏并网发电的电能质量由逆变器拓扑、接口以及其控制策略所决定。并网逆变器工作效率高低不仅直接决定于逆变器本身，而且与光伏电池等装置运用及优化配置息息相关，从而逐渐发展为系统安全、可靠、经济运行的关键影响因素。因此，深入研究光伏电池的最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制以及并网逆变器控制技术，提高太阳能发电的输出功率及转化率，减少并网发电控制过程中的能量损耗，减小外界环境等因素对系统及电网的影响，降低光伏并网发电的成本，保证光伏电池与并网逆变器在外界因素变化和电网电压畸变的情况下安全可靠地运行<sup>[4]</sup>，对实现光伏发电与并网稳定运行具有重要价值。

### 1.1.2 风力发电的背景

近年来风力发电的发展速度很快。根据相关数据统计，丹麦到 2020 年和 2050 年的风力发电比例计划将占到全国发电总量的 42% 和 100% 左右<sup>[5]</sup>；而欧盟诸国的总体目标则是到 2020 年和 2050 年由风力发电提供全国 17.5% 和 50% 的电力能源供应；美国的目标则是到 2030 年由风力发电提供的电力能源占全国电力能源供应的 30% 左右。未来的欧盟以及美国等地区如此高的风力发电占有率，对大电网的安全稳定运行提出了十分严峻的挑战<sup>[6-12]</sup>。我国的风力发电虽然起步较晚，但由风力发电提供的总装机容量已经位列世界第一位，预计到 2020 年和 2050 年，中国的风电装机总容量将分别达到 200GW 和 1000GW 以上，由风电提供的发电量将分别占到总发电量的 5% 和 17% 以上。风力发电将成为我国继煤、石油、天然气、太阳能之后的第五大电力能源来源。

现在，风力发电的巨大市场潜力将使其在世界未来的能源供应中扮演越来越重要的角色。在目前的商业化运营中，风力发电的相关技术已经比较先进。伴随着技术的不断发展，风力发电的技术性成本也越来越低，这将使得风能与传统的化石燃料发电技术相互竞争。此外随着风力发电技术的不断进步，以及材料和工艺的发展，其具体的发电所需要的电力成本也在逐渐降低，这将使得风能被大规模地利用。然而，随着由风力发电提供的电力来源在电力系统的占有率不断加大，风力发电的间歇性、不稳定性等固有缺点对大电网的影响日益凸显<sup>[13-16]</sup>。另外，据国家电网的相关数据分析，在电网电压的众多故障中，短路故障引起的危害最多。其中，三相短路所造成的危害最大，严重时可使整个输电线路完全截断。短路过程中，并网端的电压会产生不同程度上的跌落，而风电机组网端的低电压故障导致所发的电磁功率送不出去，引起功率失衡，严重时甚至会导致大批量的风电机组脱网运行，由此带来低电压穿越的问题。

## 1.2 新能源发电国内外研究历程

### 1.2.1 光伏发电国内外研究历程

太阳能发电最先产生于 19 世纪 40 年代, Becquerel 在实验过程中, 惊奇地发现了“光伏效应”。到了 19 世纪七八十年代, 他着手探究固体光电器件, 其中主要包括硒和硒的氧化物势垒中的光电导与光电效应。在 19 世纪 80 年代, 光电导硒电池第一次进行商业运用。接着, 第一个真正实用的晶体硅电池诞生于贝尔实验室, 进而开拓了光伏发电的新起点<sup>[17]</sup>。

在能源短缺和人类自然环境日益恶化的情况下, 具有资源丰富等优点的太阳能越来越受到全球各国的关注和重视。20 世纪 90 年代后半期是太阳能的迅速发展时期, 全球光伏电池产量逐渐增加, 过去十年平均年增长率达到 38%, 超过了信息技术产业。一系列太阳能光伏器件和集成模块不断发展, 全球范围内的太阳能开发利用技术已经有半世纪的发展历史。20 世纪爆发的三次石油危机, 使全球能源结构发生改变, 导致世界各国积极寻找新能源来替代石油, 促进人们开发太阳能。自从光伏电池被研制出来之后, 先被应用于太空电源, 价格昂贵。因此, 单靠市场需要来推进光伏电池应用于地面是行不通的。自 1980 年以来, 一些发达国家陆续制定了光伏发展计划以及相关政策, 来激励和支持太阳能发电。由于科技进步的推动以及优惠政策的激励, 光伏发电产业迅速发展。图 1-1 所示为全球光伏电池产量, 2000~2008 年, 年均复合增长率达 47%, 尤其是德国于 2004 年实行“上网电价法”以来, 光伏产品供不应求, 2008 年全球光伏电池产量已达到了 6.39GW。

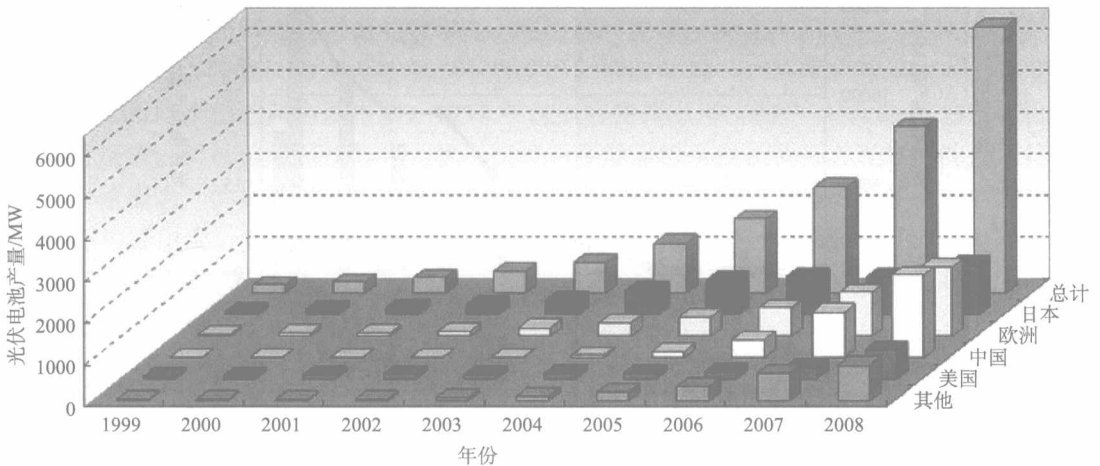


图 1-1 全球光伏电池产量

图 1-2 所示为全球年度及累计装机容量。以欧美为主的世界太阳能发电市场也以 45% 的复合年均增长率迅速增长, 全球装机容量在 2008 年已经将近 14.7GW。

与蓬勃发展的世界太阳能产业相比, 中国太阳能产业起步较晚, 我国 1959 年才成功开发出首个具有实用价值的太阳能电池, 该太阳能电池在 1971 年发射的第 2 颗卫星上得到了首次成功应用。20 世纪 80 年代中后期, 国家对于光伏行业给予支持, 4.5MW 生产能力的太阳能产业逐渐形成, 从而巩固了我国太阳能电池产业。90 年代中后期, 光伏发电工业迅速发展, 太阳能电池及其装置数量逐步增多。2006~2010 年, 由于我国市场需求以及国家激励政策的

双重推动，太阳能产业步入高速增长时期，光伏电池的产量加倍增长。CVSource 投资数据库统计的世界光伏电池产量变化情况如图 1-3 所示，我国的光伏电池产量在 2010 年已经达到 8000MW，占全球总产量一半，成为世界最重要的光伏生产基地之一。在 2008 年世界前十名的太阳能电池生产商中，中国占据四位，充分表明了我国太阳能产业的巨大成功以及广阔的发展前景。

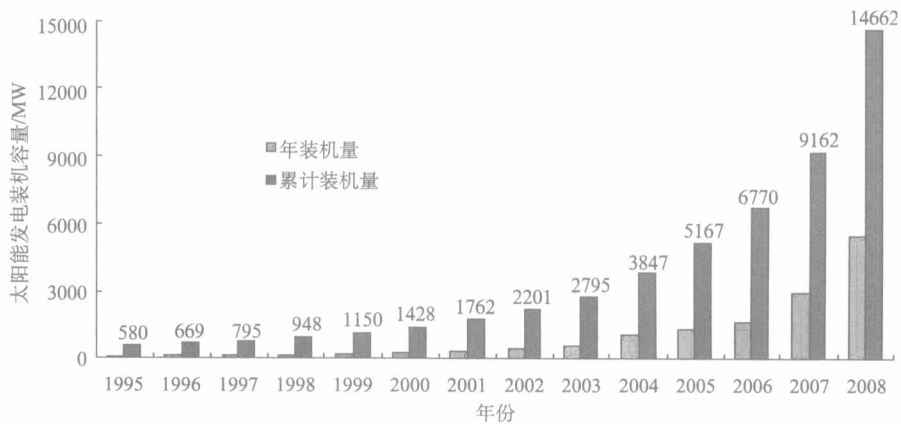


图 1-2 全球年度及累计装机容量

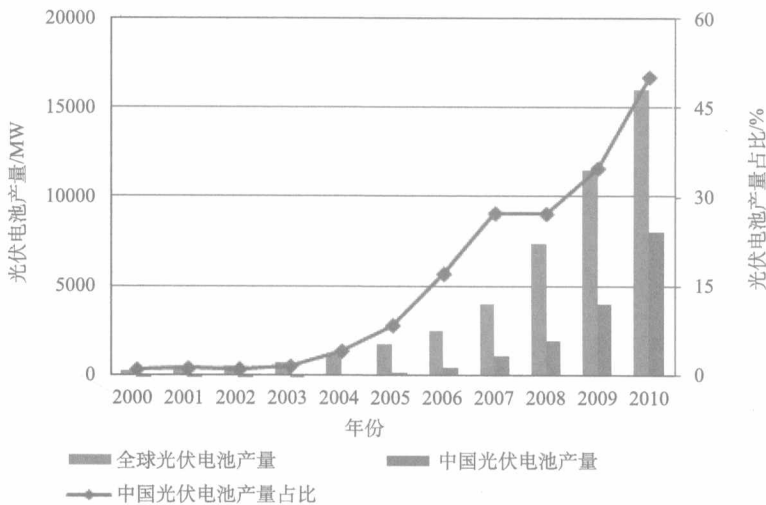


图 1-3 2000~2010 年光伏电池产量变化

经过近 20 年的努力，我国的光伏工业也已具有了一定的基础，但是在整体水平上同国外相比还有比较大的差距，主要是：①生产规模小，我们国家生产光伏电池的能力为 0.5~1MW/a，与世界先进生产水平相比低了一两个数量级；②关键技术水平落后，光伏电池封装水平、转换效率与国际先进技术水平相比均有一定差距，相关配套设备还不成熟，例如，光伏并网控制器和逆变器不能自主研发来进行商业化生产，大部分依赖于国外进口，独立系统储能装置及相关技术还远远达不到要求，并且使用寿命很短；③虽然一些关键的原材料经过多年攻关能够实现国产化，但是其产品性能急需进一步改进，像高纯硅这类材料仍然依靠进口；④成本高，我国当前的光伏电池板均价为 42 元/W，其中大约需要 30 元/W 的成本，价

格均比国外高。上述情况引起了我国政府的高度重视,通过给予一系列的优惠政策,开展多渠道、多形式的光伏技术国际交流与合作来提高我国太阳能发电技术并加速光伏产业化的进程。另外,我国光伏行业也在积极地应对形势变化。因此,在这些相关举措下,我国光伏行业迅速发展的势头日趋明朗。

## 1.2.2 风力发电国内外研究历程

人们使用风能的历史可以追溯到公元前 3000 多年前,当时的风能主要用于运水、灌溉、助航等。大约 1000 年前,人们掌握了帆船的技术,即利用风能直接驾驶风帆。由于机械能不能远距离传输,而电能可以通过电网远距离传输,因此将风能转化为电能成为风能利用的主要方式,用风的动能带动传动装置从而转化成机械能,风力机收集的机械能再带动发电机转化为电能,电能通过电网进行长距离传输。

近年来,风力发电以其低环境影响、低发电成本、快速成熟的技术发展和显著的规模经济等优点,成为发展最快的新能源。与传统的化石能源发电同时出现的风力发电,已经经历了近百年的技术积累阶段。其中,风力发电的发展可分为以下几个阶段<sup>[18-23]</sup>。

(1)从 19 世纪末到 20 世纪 60 年代末这个时期,风能资源的开发利用还处于小规模开采阶段。当时美国的 Brush 风力发电机和丹麦的 Cour 风力发电机被认为是风力发电机的先驱者。1887~1888 年冬,美国电力工业的创始人之一 Brush 在俄亥俄州安装了第一台自动运行的风力发电机。发电机的叶轮直径为 17m,由 14 片雪松木制成的叶片构成,它们连续运转了 20 年。然而,低速风力发电机的发电效率不可能太高,发电机也仅有一年的寿命,容量只有 12kW。1891 年,丹麦物理学家波勒拉库尔发现,用更少叶片快速旋转的风力发电机比具有更多叶片和较低转速的风力发电机的效率高。利用这一原理,他设计了一台功率为 25 kW 的四叶式风力发电机。随着风力发电技术的不断发展,1918 年第一次世界大战结束时,丹麦在境内建造了数百座小型的风力发电站。1957 年丹麦吉德斯海岸安装的 200kW 风力发电机,由三个叶片组成。机械偏航系统与风力机、交流异步发电机及失速型风力发电机的投入使用标志着“丹麦概念”的风力发电机已初步形成。与此同时,在美国和德国,各种风力发电机的设计构想相继出现。虽然部分风电机组由于成本太高、可靠性较差的缺点而逐渐被淘汰,但这一阶段对各种类型的风力发电机进行的相关试验,为 20 世纪 70 年代后期的风电技术大发展奠定了基础。

(2)1973 石油危机后,风力发电逐渐由小向中、大型过渡。在 20 世纪 70 年代,全球先后于 1973 年、1979 年发生了两次严重的石油危机。因此风力发电的发展得到了一些政府的大力支持,许多直径超过 60m 的大型风力发电机建成,以供研究和验证。在激烈的市场竞争中,迎风型风力发电机是商业上的最大获利者。丹麦 Tvind 公司生产的以 2MW 为代表的风力发电机成为风力发电商业化进程中的领先者,这是一台下风型变速风力发电机,叶轮直径为 54m,发电机为通过电气和电子设备与电网相互连接的同步发电机。加利福尼亚州在 20 世纪 80 年代开始了风能开发利用计划,成千上万的风力发电机被密集地安置在加利福尼亚州的山坡上,形成了加利福尼亚州的风电潮。德国的 GROWIAN 是当今世界上最大的风力发电机,但这些大型风力发电机的发展或多或少都遇到了各种技术问题,并未能长期正常运行。自 1980 年以来,随着风力发电机组商业化的成熟,丹麦的一些农机制造商,如 Vestas 公司开始进入风力发电机行业。由于以前对工程机械的深入研究,他们很快在丹麦风力发电机工业中处于领先地位,这无疑对推动世界风电制造业的发展起到了巨大的推动作用。

(3) 20世纪90年代以后, 风力发电技术开始进入崭新的阶段, 开始了跳跃式的发展。经过近百年的技术和经验的积累, 风力发电机行业和技术逐渐商业化, 大型风力发电机日益成熟。大规模的商业型风力发电最早出现在欧洲。丹麦于1995年建造了其最大的风力发电场, 该大型风电场配备了40台600 kW的异步风力发电机, 是丹麦最大的风力发电场。1995年世界上第一台兆瓦级风力发电机的制造公司为 Bonus 公司, 1.5MW 的 Vestas 公司的原型机于1996年制成。1998年, 兆瓦级风力发电机组市场真正实现了腾飞, 但此后600~750 kW 的风电机组却成为主流机型, 市场占有率越来越高, 风力发电机组建设的项目越多, 发展速度就越快。目前, 1.5~2.5MW 的风力发电机已成为绝对的市场主力。一般来说, 综合风力发电机的制造、维修等因素, 风力发电的单机容量越大, 单位千瓦的成本就越低。

在过去风电发展的40年间, 风力发电的发展速度不断超越着人们的预期。2001~2010年, 全球的风力发电累计装机容量实现了连续十年呈现30%的增长速度, 即每隔三年左右, 全球的风电总装机容量就要增长一倍多。2009~2013年, 全球风电总装机容量增速逐渐放缓, 但是全球风电市场的规模仍增长了200GW左右。据统计, 在2015年, 全球风电总装机容量已经突破了600GW大关, 预计到2020年左右, 全球的风电总装机容量将超过1500GW<sup>[24-30]</sup>。

在2013年, 全球风力发电的新增装机容量都出现在了新兴市场上, 其中亚洲、非洲和拉丁美洲等地区推动了风电的全球市场化进程。风力发电呈现出了与起始阶段完全不同的市场化走向。在世界上75个已经有风力发电商业化运营的国家中, 有24个国家的装机总容量超过了1000MW, 其中16个在欧洲, 4个在亚洲(如中国、印度、日本和泰国), 3个在北美洲(加拿大、墨西哥、美国), 1个在拉丁美洲(巴西)。

随着大型机组技术的逐渐成熟, 风力发电的装机容量不断增加, 而风力发电则从陆地逐渐发展到海上。1991年丹麦南部的海域, 即洛兰建造了世界上第一个利用海上潮汐所带来的风能发电的海上风力发电场, 该电厂安装了18台300kW左右的迎风型失速风力发电机。随后, 西方发达国家, 例如, 荷兰、瑞典和英国都相继建立了自己的海上风电场。到2010年9月23日, 英格兰东南部的萨奈近海风电场已并入大电网运行。该风力发电场由120台英国生产的风力发电机构成, 总的装机容量为300MW, 全球海上风力发电装机容量达到5415MW, 占风力发电总装机容量的2%。在北欧地区, 90%以上的油田分布在英国周边的海峡, 例如, 北海、英吉利海峡等, 其余大部分位于沿海地区。中国东部也有几个示范项目<sup>[31-35]</sup>。到2020年全球海上风力发电装机容量将达到80GW左右, 其中欧洲约占3/4。

近年来, 我国风电产业发展速度极其迅猛, 无论总的装机容量、新增装机容量还是具体的发展规模, 都已经成为名副其实的利用风力发电来提供电力能源的发展大国。中国的风能资源接近于美国, 远高于印度、德国和西班牙等国家, 目前海上和陆上的总装机容量分别达到了1000万kW和1500万kW左右。中国不但在风能资源的空间分配上适合发展风力发电, 国家在对待新能源开发的相关政策上也不遗余力地鼓励、推动和重点支持风力发电的相关建设, 这一切都使中国的风力发电以超乎人们预期的速度快速进入大规模稳固发展的辉煌阶段。2005~2009年, 风力发电总量连续五年保持快速增长, 实现了跨越式发展。然而, 在2010达到最高增长之后, 中国进入产业一体化时期, 并经历了连续两年的低迷。2013年下半年, 中国的风电产业开始复苏, 再次成为全球风力发电新的增长点。中国目前拥有世界上最大的风电装机容量, 2013年度达到91.4GW, 发电总量超过100亿kW·h, 风电成为中国的第三大电力来源。

我国为了在2020年的非化石能源占一次能源比例达到15%及以上, 国家已制定了2亿kW