

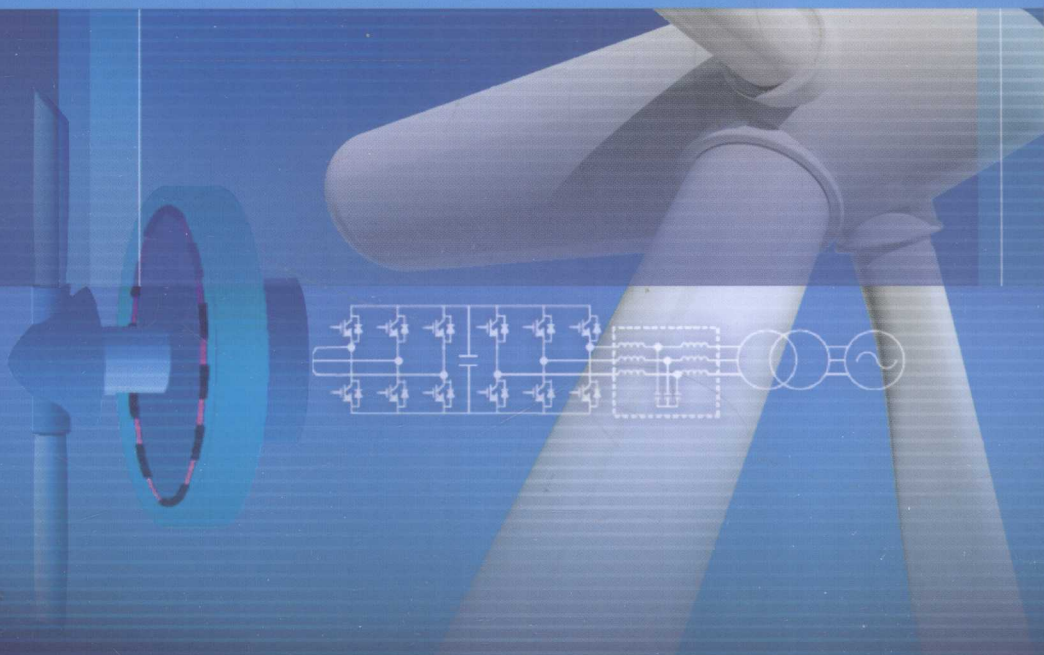


“十二五”国家重点图书出版规划项目
新能源电能变换与控制技术丛书

永磁同步全功率风力发电 变流器及其控制

Permanent Magnet Synchronous Full-Scale
Wind Power Converter and Its Control

◆ 张 兴 曹仁贤 主编



中国工信出版集团



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

永磁同步全功率风力发电 变流器及其控制

张 兴 曹仁贤 主编
杨淑英 王付胜 谢 震 阚超豪 赖纪东 参编

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书以“永磁同步风力发电”和“电力电子变流技术”为基础,从永磁同步发电机及其控制策略、各种变流器拓扑与控制,以及变流器主要电气部件工艺与设计等角度出发,系统讨论了永磁同步发电机、永磁同步发电机控制、网侧变流器的控制、基于不控整流型的 PMSG 变流器、基于三电平拓扑的 PMSG 变流器、基于级联多电平拓扑的 PMSG 变流器、基于模块化多电平变流器拓扑的 PMSG 变流器、基于矩阵变换器拓扑的 PMSG 变流器、基于电流源变流器拓扑的 PMSG 变流器、PMSG 变流器的电网适应性控制,以及风电变流器主要部件工艺与设计等内容,为永磁同步全功率风电变流器技术的应用与研究提供一定的理论与技术参考。

本书适合风电变流器、大功率变流器及其设计、永磁同步电机控制和可再生能源并网技术等领域的研究与工程技术人员阅读,也可作为高校从事电力电子技术教学和研究的教师、研究生的参考书。

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

永磁同步全功率风力发电变流器及其控制/张兴,曹仁贤主编. —北京:电子工业出版社,2016.10

(新能源电能变换与控制技术丛书)

ISBN 978-7-121-30108-7

I. ①永… II. ①张… ②曹… III. ①永磁同步电机—风力发电—变流器—研究 IV. ①TM46

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 247590 号

责任编辑:曲 昕 特约编辑:张传福

印 刷:北京京科印刷有限公司

装 订:北京京科印刷有限公司

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:787×1 092 1/16 印张:27.75 字数:710 千字

版 次:2016 年 10 月第 1 版

印 次:2016 年 10 月第 1 次印刷

定 价:88.00 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, 88258888。

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。

本书咨询联系方式:(010) 88254468, quxin@phei.com.cn, QQ382222503。

前 言

在过去的 20 年中，风力发电技术与产业获得高速发展，尤其是自 2005 年起，全球风电增长势头迅猛。2015 年全球新增装机容量已达到 63013MW，累计装机容量达到 432419MW，实现了 22% 的年增长率。2015 年，中国风电新增装机 30500MW，累计装机容量为 145104MW，位居全球风电市场首位。显然，中国已发展成为名副其实的风电大国。

在当今大型风电机组中，变速恒频风电机组已占据主导地位，主要包括双馈型风电机组和全功率直驱（半直驱）型风电机组。双馈型风电机组采用部分功率变换，具有变流器容量小、成本低以及整机技术和产业链成熟等优势，目前依然是大型变速恒频并网风电机组的主流机型。然而，齿轮箱、双馈发电机的电刷和滑环也不可避免地增加了其故障率，另外，双馈型风电机组电网适应性相对较差，这些问题在一定程度上限制了双馈型风力发电系统的发展。而全功率直驱型风电机组，特别是永磁同步直驱型风电机组，由于没有齿轮箱、发电机的电刷和滑环等问题，且具有发动机效率高、电网适应性强等优点，近年来得以快速发展。然而，随着直驱型风电机组容量的进一步增加，低速永磁同步发电机的体积和重量在一定程度上制约了直驱型风电机组的发展，因此半直驱技术得到了业界的关注。半直驱风电机组兼顾了双馈和直驱型风电机组的优势，采用了一级（二级）低传动比齿轮箱设计，在提高发动机转速以减小其体积的同时，简化了齿轮箱结构，有效提高了齿轮箱的可靠性与使用寿命。直驱或半直驱型永磁同步风电机组均采用了全功率驱动技术，具有较好的电网适应性和较高的发动机效率。随着海上风电的兴起和超大容量风电机组的应用，直驱或半直驱永磁同步全功率风电机组将会迎来更好的发展机遇和前景。

实际上，早在 1992 年，德国 ENERCON 公司就率先开始研制直驱型电励磁同步风电机组，并相继开发出 E-92、E-101、E-115、E-126 等型号产品。其中 E-126 是世界上批量生产的容量较大的直驱型风电机组，额定功率为 6MW，可以升级到 7MW。至 2009 年，直驱型风电机组占据德国风电市场 55% 以上的份额，可见直驱型风电机组在德国获得了快速增长。相对于电励磁同步发电机而言，永磁同步发电机具有结构简单、无须励磁和高效率等优点，已成为直驱型风电机组的主流发电机。例如，美国 GE 公司的 GE4.0-110，以及德国西门子公司开发的 3MW、6MW、7MW 直驱型风电机组均采用了永磁同步发电机设计。另外，法国 ALSTOM 公司也研究了新一代 6MW 直驱海上风电机组，该机组采用了法国 Converteam “高密度”直驱永磁发电机，并使其体积更小，质量更轻。另外，国外风电设备商还开发了半直驱风电机组，如富兰德 2.5MW 和 Vestas V164 7MW 机组等。

我国在“十五”末期就开始了永磁同步直驱型风电机组的研制，“十一五”期间在国家科技投入和产业政策的激励下，以金风科技、湘电风能为代表的骨干风电企业，在技术引进和吸收消化的基础上，自主开发成功 2~3MW 功率等级的永磁同步全功率直驱型风电机组。

“十二五”期间金风科技、湘电风能等通过努力又成功开发出 5MW 功率等级的永磁同步全功率直驱型风电机组，这标志着我国在大功率直驱型风电机组的研制能力上有了较大的提升。另外，哈飞工业公司在引进芬兰 1.0MW 机组技术的基础上成功研制出国内首台 1.5MW 半直驱型风电机组，并于 2009 年 5 月并网发电。另外广东明阳风电和德国 aerodyn 公司联合

开发 2.5~6.5MW SCD 系列超紧凑风电机组, 采用了永磁同步半直驱设计, 具有重量轻、体积小、建设重量成本低、效率高等优点。2015 年 11 月, 沈阳华创风能公司自主开发的 3MW 半直驱风力发电机组在张北试验风场也顺利并网运行。可见, 我国在半直驱风电技术领域已迈出了坚实的一步。

在变速恒频风电机组中, 风电变流器是风电机组中最为核心和关键的部件之一, 也是风电机组中较晚实现国产化的关键部件。长期以来, 大容量风电变流器因技术及工艺设计难度大、可靠性要求高等因素而被 ABB、西门子等国外几个电气巨头所垄断。我国在“十一五”、“十二五”期间, 重点支持了风电变流器产品的国产化, 并且通过国家“863”计划、国家科技支撑计划以及地方和企业的大量科技攻关项目的投入, 开始了艰难的国产化道路。到“十一五”末, 科技投入取得了明显成果, 一些厂商也具有一定的风电变流器开发与生产能力。经过“十二五”期间产业界的持续努力和竞争, 风电变流器的国产化技术已迈出了可喜而坚实的一步。禾望电气、阳光电源、海得新能源、龙源电气、上海电气等一批企业的国产风电变流器产品脱颖而出, 其产品获得市场的认可, 到“十二五”末, 国产风电变流器占据了新增装机 90% 以上的市场份额, 真正使风电变流器实现了国产化。虽然国产风电变流器无论市场占有率还是技术性能都取得了突飞猛进的发展, 但是在风电变流器的高效能控制、工艺优化设计和可靠性技术等方面, 尤其是在超大容量风电变流器技术领域与 ABB 等国外顶级公司同类产品相比仍然有差距, 必须持续进行风电变流器的技术创新, 才能真正实现赶超世界一流的目标。

作者自“十五”末开展风电变流器技术的研究, 并依托合肥工业大学电力电子与电力传动国家重点学科, 与阳光电源股份有限公司开展了长期的产学研合作, 完成了多项有关风电变流器技术研究的科研课题, 相继研究开发了 2MW 双馈型风电变流器、3MW 低压和 5MW 中压永磁同步直驱型风电变流器, 并实现了产业化。在此基础上, 总结和编写一本较为系统论述永磁同步全功率风电变流器及其控制的技术论著已显得十分必要。然而, 如何能编好一本适用于全功率风电变流器技术研究和产品开发的论著, 对笔者而言一直感到是一件非常困难之事。好在已有多部介绍风力发电和其他可再生能源发电变流与控制的论著相继出版, 满足了不同的读者需求。本书以“永磁同步风力发电”以及“电力电子变流技术”理论为基础, 从永磁同步发电机(PMSG)及其控制策略、PMSG 变流器拓扑与控制, 以及变流器主要部件工艺与设计等角度出发, 系统讨论了永磁同步全功率风电变流器及其控制技术, 为相关研究和工程技术人员提供一定的理论和技术参考。

本书由合肥工业大学张兴教授与阳光电源股份有限公司董事长、合肥工业大学兼职博导曹仁贤研究员合作主编, 合肥工业大学杨淑英副教授、王付胜副教授、谢震教授、阚超豪副教授、赖纪东博士等参加了编写工作。另外, 三菱电机机电(上海)有限公司马先奎工程师, 以及鹰峰电子科技有限公司李玉工程师、张伟君工程师、张云云工程师、王伟旭工程师合作编写了第 12 章相关内容。具体编写分工如下: 其中, 张兴教授编写了全书大纲、前言及第 4、7、8、9 章; 曹仁贤研究员编写了第 1、5 章; 杨淑英副教授编写了第 3 章; 王付胜副教授编写了第 6 章; 谢震教授编写了第 11 章; 阚超豪副教授编写了第 2 章; 赖纪东博士编写了第 10 章; 马先奎工程师编写了 12.1 节; 李玉工程师编写了 12.2 节; 张伟君工程师编写了 12.3 节; 张云云工程师编写了 12.4 节; 王伟旭工程师编写了 12.5 节。全书由张兴教授和曹仁贤研究员统稿。

在本书编写过程中, 得到了阳光电源股份有限公司副总裁屠运武博士、阳光电源风电事

业部汪令祥博士、邓立荣高工以及风电变流器项目组研发工程师们的大力协助和指导；博士生邵章平、任康乐、郭磊磊、刘萍，曹鹏鹏，硕士生董文杰、童诚、谭理华、丁杰、汪杨俊、汪天呈分别在直驱风电变流器技术、三电平变流器控制、永磁同步电机控制、模块化多电平变换器（MMC）技术、矩阵变换器（MC）技术、并网逆变器非线性控制以及电网适应性技术等相关内容方面提供了研究支撑，为编著完成本书打下了良好基础；合肥工业大学丁明教授、苏建徽教授和茆美琴教授对于本书的编写也给予了大力支持，并具体指导了第 10 章的编写；鹰峰电子科技有限公司的许飒女士和三菱电机机电（上海）有限公司的宋高升高工对第 12 章的编写组织工作给予了很多的帮助。另外，在本书编著过程中还离不开团队其他老师和研究生的大力协助，他们认真参与文档整理、修订、绘图以及收集参考文献等工作，并以读者的视角提出了很多宝贵意见和建议，他们是：刘芳博士、李飞博士、王佳宁副教授、马明遥教授，博士生李浩源、王宝基、李明，硕士生石天宇、王涛、郭礼致、陆中凯、余世能、杨莹、王志捷、任泰安、张家午。在此一并向他们表示衷心的感谢！

最后，还要感谢湘电风能有限公司的龙辛教授级高工、副总经理宋晓萍博士，电气总师熊弦高工以及相关工程技术人员，他们在笔者参与研制的阳光电源 690V(2.5MW)以及 3300V (5MW) 永磁同步直驱风电变流器全工况测试方面给予了大力支持，并提出了诸多宝贵意见和建议。

由于作者水平有限，疏漏甚至谬误在所难免，敬请读者不吝指教。

编者

2016 年 9 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 风力发电技术及其产业发展	1
1.1.1 全球风电发展现状	1
1.1.2 中国风电发展概述	4
1.2 风力发电系统概述	5
1.2.1 风力发电基本原理	5
1.2.2 风力发电机的分类	6
1.2.3 风力发电机的组成	8
1.2.4 风电机组的功率控制	15
1.3 并网型风电机组的主要结构类型	18
1.3.1 定速型风电机组	18
1.3.2 变速恒频型风电机组	19
1.4 永磁同步全功率风电变流器概述	20
1.4.1 永磁同步全功率风机变流器拓扑	20
1.4.2 主要全功率风机变流器简介	25
参考文献	30
第 2 章 永磁直驱同步发电机	32
2.1 概述	32
2.2 永磁直驱同步风力发电机的结构及分类	33
2.3 永磁材料	36
2.3.1 铁磁材料的磁化曲线	36
2.3.2 永磁材料的性能指标	37
2.3.3 永磁材料的分类及钕铁硼永磁材料	39
2.3.4 永磁材料的选用原则	42
2.4 永磁同步发电机的磁路计算	43
2.4.1 永磁同步发电机的等效磁路	43
2.4.2 永磁体工作点的确定	49
2.5 永磁同步发电机的运行特性	50
2.5.1 电压方程和相量图	50
2.5.2 永磁同步发电机的电枢反应及电枢反应电感	51
2.5.3 永磁同步发电机的功率方程和功角特性	52
2.5.4 永磁同步发电机的外特性和固有电压调整率	53
2.5.5 永磁同步发电机的短路问题	54
2.5.6 电压波形正弦性畸变率	54

2.5.7 永磁同步发电机的损耗和效率	55
2.6 MW 级永磁同步风力发电机的电磁设计	57
2.6.1 电磁设计的特点	57
2.6.2 电磁设计的要点	58
2.7 永磁同步发电机的温升与冷却	67
2.7.1 永磁同步发电机的温升	67
2.7.2 永磁同步发电机的传热分析	68
2.7.3 永磁同步发电机的最高温升	70
2.7.4 永磁同步发电机的冷却	71
2.8 本章小结	72
参考文献	72
第 3 章 永磁同步发电机的控制	74
3.1 PMSG 的矢量解耦控制策略	74
3.1.1 矢量控制原理	74
3.1.2 PMSG 的磁场定向解耦控制	75
3.1.3 PMSG 的弱磁控制	77
3.1.4 PMSG 的效率最优控制	78
3.2 PMSG 的直接转矩控制	79
3.2.1 直接转矩控制原理	79
3.2.2 定子磁链的估计	82
3.2.3 定子电流的最小化控制	84
3.3 PMSG 的无速度传感器控制	85
3.3.1 PMSG 无速度传感器控制概述	85
3.3.2 基于锁相环和模型参考自适应的 PMSG 无速度传感器控制	89
3.3.3 基于滑模观测器的 PMSG 无速度传感器控制	91
3.4 PMSG 的参数辨识	98
3.4.1 参数辨识方法概述	98
3.4.2 基于最小二乘法的永磁同步发电机参数辨识	99
3.4.3 基于矢量控制系统的直接参数辨识法	102
3.5 本章小结	103
参考文献	104
第 4 章 网侧变流器的控制	109
4.1 概述	109
4.2 网侧变流器的重复控制策略	111
4.2.1 重复控制基本原理及其设计方法	112
4.2.2 传统重复控制结构问题分析	114
4.2.3 一种改进的重复控制结构	118
4.3 网侧变流器的无差拍控制	122

4.3.1 系统物理电路的离散化模型	122
4.3.2 无差拍控制的一般方法	123
4.4 网侧变流器的模型预测控制	126
4.4.1 系统模型的建立	127
4.4.2 滞环模型预测控制原理	128
4.4.3 H MPC 控制系统谐振特性分析及其抑制	129
4.5 网侧变流器的 LCL 滤波器及其改进	133
4.5.1 采用 LCL 滤波器时网侧变流器输出滤波性能分析	133
4.5.2 LCL 滤波器改进拓扑的分析比较	136
4.6 本章小结	141
参考文献	141
第 5 章 基于不控整流型的 PMSG 变流器	143
5.1 基于不控整流的 PMSG 变流器	143
5.2 基于 Boost 不控整流型 PMSG 变流器	145
5.2.1 采用无源 PFC 的基于 Boost 不控整流型 PMSG 变流器	146
5.2.2 采用有源 PFC 的基于 Boost 不控整流型 PMSG 变流器	147
5.2.3 基于 Boost 不控整流型 PMSG 变流器的控制	153
5.3 基于 Vienna 整流器的 PMSG 变流器	155
5.3.1 Vienna 整流器的工作原理分析	156
5.3.2 Vienna 整流器的控制	158
5.4 本章小结	159
参考文献	160
第 6 章 基于三电平拓扑的 PMSG 变流器	161
6.1 三电平 PMSG 变流器的基本拓扑结构和关键技术	161
6.1.1 基于二极管箝位型三电平拓扑结构	161
6.1.2 基于飞跨电容的三电平拓扑结构	162
6.1.3 三电平变流器的关键技术	163
6.2 三电平 PMSG 变流器调制策略和网侧滤波器的优化	170
6.2.1 DPWM 调制策略比较分析	171
6.2.2 网侧滤波器的优化设计	175
6.3 基于模块化并联的三电平 PMSG 变流器	178
6.3.1 模块化并联方案及其控制	179
6.3.2 模块化并联变流器的零序环流分析	182
6.3.3 模块化并联三电平的零序环流抑制	188
6.4 小结	196
参考文献	196
第 7 章 基于级联多电平拓扑的 PMSG 变流器	199
7.1 概述	199

7.2 H 桥级联型多电平逆变电路与多相 PMSG	200
7.2.1 基于 H 桥逆变器的功率单元电路	200
7.2.2 基于 H 桥级联型多电平逆变器拓扑	201
7.2.3 H 桥级联型逆变器工作原理	202
7.2.4 单相级联 H 桥的并网控制	205
7.2.5 多相永磁同步发电机	208
7.3 采用级联多电平技术的 PMSG 风电变流器拓扑与控制	209
7.3.1 基于不控整流级联型 PMSG 风电变流器	209
7.3.2 基于可控整流级联型 PMSG 风电变流器	212
7.4 级联多电平逆变器的调制策略	216
7.4.1 级联多电平逆变器的调制	216
7.4.2 阶梯波调制法	216
7.4.3 载波调制 PWM 法	218
7.4.4 空间矢量调制法	223
7.4.5 单极性倍频载波相移调制法的谐波特性	225
7.5 本章小结	228
参考文献	228
第 8 章 基于 MMC 拓扑的 PMSG 变流器	231
8.1 MMC 概述	231
8.2 基于 MMC 拓扑的风电变流器及其直流输电系统	233
8.3 MMC 的等效模型电路、运行及调制原理	237
8.3.1 MMC 等效模型电路	238
8.3.2 MMC 运行原理及基本方程	239
8.3.3 MMC 调制原理	242
8.4 MMC 电容电压平衡策略	244
8.4.1 同一桥臂内子模块电容电压的平衡控制策略	245
8.4.2 桥臂电压均衡控制策略	248
8.4.3 输出低频交流时电容电压脉动抑制策略	253
8.5 本章小结	258
参考文献	259
第 9 章 基于矩阵变换器 (MC) 拓扑的 PMSG 变流器	261
9.1 概述	261
9.1.1 常规矩阵变换器 (CMC) 的研究概况	262
9.1.2 双级矩阵变换器 (TSMC) 的研究概况	263
9.1.3 基于 MC 的商用变频器开发	264
9.1.4 基于 MC 的双馈风电变流器技术	265
9.2 基于 MC 的 PMSG 直驱式风力发电系统	265
9.2.1 基于 CMC-PMSG 的直驱式风力发电系统	266

9.2.2 基于 TSMC-PMSG 的直驱式风力发电系统	266
9.2.3 基于 SSMC -PMSG 的直驱式风力发电系统	267
9.2.4 基于 RMC -PMSG 的直驱式风力发电系统	267
9.2.5 基于 MC 的 PMSG 变流器控制策略	268
9.3 常规矩阵变换器 (CMC) 的间接空间矢量调制策略	269
9.3.1 CMC 基本原理	269
9.3.2 等效交—直—交结构的间接空间矢量调制	275
9.3.3 改进的降低开关损耗的调制策略	282
9.3.4 四步换流策略	284
9.4 双级矩阵变换器 (TSMC) 的调制策略	286
9.4.1 TSMC 的空间矢量调制策略	286
9.4.2 TSMC 的共模电压抑制	293
9.5 基于 CMC 的控制器设计	296
9.5.1 控制电路结构	296
9.5.2 解码器	297
9.5.3 延迟器	299
9.5.4 四步换流开关序列	300
9.6 本章小结	300
参考文献	301
第 10 章 基于电流源型变流器 (CSC) 拓扑的 PMSG 变流器	303
10.1 概述	303
10.2 基于系统运行电流优化的 CSC-PMSG 协调控制策略	304
10.2.1 电流源型变流器直流电流控制	304
10.2.2 满足发电机控制要求的 CSC 最小直流电流控制	306
10.2.3 满足并网要求的 CSC 最小直流电流控制	308
10.2.4 运行电流优化的 CSC-PMSG 系统协调控制方案	311
10.2.5 电流优化控制策略仿真验证	313
10.3 网侧逆变器并网控制策略	315
10.3.1 电流源型并网逆变器主电路拓扑	316
10.3.2 电流内环变结构并网控制策略	317
10.3.3 控制策略仿真验证	329
10.4 本章小结	333
参考文献	333
第 11 章 PMSG 变流器的电网适应性控制	336
11.1 PMSG 变流器的电网适应性控制概述	336
11.2 电网电压不平衡条件下 PMSG 变流器控制	337
11.2.1 不平衡控制关键技术	337

11.2.2	网侧变流器的不平衡控制策略	345
11.3	电网电压谐波下的 PMSG 变流器控制	354
11.3.1	电网电压谐波下的 PMSG 变流器数学模型	354
11.3.2	电网电压谐波下的 PMSG 变流器控制策略	355
11.4	PMSG 变流器低电压穿越 (LVRT) 及其控制策略	358
11.4.1	风力发电低电压穿越的标准	358
11.4.2	电网电压跌落的特点和类型	360
11.4.3	DMSG 变流器低电压穿越控制策略	361
11.5	PMSG 变流器高电压穿越 (HVRT) 及其控制策略	374
11.5.1	高电压穿越 (HVRT) 的背景和研究现状	374
11.5.2	PMSG 变流器高电压穿越控制策略	376
11.6	本章小结	378
	参考文献	379

第 12 章 风电变流器主要部件工艺与设计 381

12.1	变流器开关器件选型	381
12.1.1	IGBT 模块选型的基本准则	382
12.1.2	IGBT 模块电压和电流的选择	383
12.1.3	IGBT 模块温升设计要求	386
12.1.4	IGBT 模块绝缘耐压的选择	392
12.2	薄膜电容概述	393
12.2.1	薄膜电容器及其基本构造	393
12.2.2	薄膜电容基本参数、等效模型以及主要参数间关系	395
12.2.3	常见薄膜材料参数比较	397
12.2.4	薄膜电容器常用填充材料	399
12.2.5	薄膜电容的工艺技术	402
12.2.6	DC-link 薄膜电容简介及其与铝电解电容对比	404
12.2.7	DC-link 薄膜电容在风电变流器中的应用	404
12.3	低电压穿越电阻概述及应用	406
12.3.1	低电压穿越电阻简介	406
12.3.2	低电压穿越电阻的应用与市场	407
12.3.3	低电压穿越电阻材料的选择	407
12.3.4	低电压穿越电阻的结构、设计及测试	410
12.4	水冷电抗器的概述及应用	412
12.4.1	电抗器简介	412
12.4.2	水冷电抗器的分类及特点	413
12.4.3	水冷电抗器的应用	414
12.5	叠层母排简介及应用	414
12.5.1	叠层母排简介	414

12.5.2 叠层母排材料的选择	416
12.5.3 叠层母排的电感分析及低电感优化设计	418
12.5.4 绝缘材料的绝缘强度	421
12.5.5 叠层母排的设计原则和工艺	422
12.5.6 叠层母排的测试	426
参考文献	428

第 1 章 绪 论

1.1 风力发电技术及其产业发展

随着人类能源危机和环保意识的增强，世界能源结构正在发生着巨大的转变——由矿物能源系统向以可再生能源为基础的可持续新能源系统转变。大力发展可再生能源，改善能源结构、缓解资源供需矛盾、保护生态环境，实现经济、社会和自然的协调、健康、可持续发展，已成为人类社会的共识。

区别于常规的矿物能源（煤、石油和天然气），可再生能源包括水能、风能、太阳能、生物质能、地热能、海洋能等。在这些众多的新能源中，风能资源的发电利用开发较早。19 世纪末，丹麦首次成功建立了世界上第一个风力发电站，揭开了风力发电技术蓬勃发展的序幕。风力发电站利用风力发电机，将风能转换为电能，进一步通过并网发电实现风能的高效利用。与传统的火力发电厂相比，风力发电站利用可再生的风能资源，无污染地产生电能，不仅可以为社会发展提供能源，而且避免了自然环境的破坏，实现了真正意义上的可持续发展。

另外，风能资源的发电利用具有以下优势，因而最具发展前景。

（1）世界风能资源储备丰富。按 80m 高度处 6.9m/s 的风速计算，全球风能可利用资源量为 72 万亿千瓦时。预计到 2020 年，世界电力总的需求为 26 万亿千瓦时，到时即使只成功利用了三分之一的风能资源，即可满足世界电力需求。

（2）风是地球上的一种自然现象。风能是太阳能的一种转换形式，只要有太阳和大气的存在，就会有风，它取之不尽，用之不竭。

（3）风能分布广泛。这对于交通不便、远离主干电网的岛屿及边远地区的利用尤为重要。

（4）风能没有污染。风能在转换过程中，只降低气流的速度，不会给大气造成任何污染，因此具有显著的环保效益。

（5）风电场建设周期短、占地少、见效快、造价低、可实现无人值守。风电机组的设计寿命为 20~25 年，运行及维护的费用低（通常相当于机组总成本的 3%~5%）。

1.1.1 全球风电发展现状

1998 年以来，全球风电装机容量增长迅速。全球年度风电安装容量如图 1.1 所示，可以看出：1998—2009 年全球风电年度装机容量呈现快速发展态势，2009 年以来受全球金融危机的影响，全球风电年度装机容量的增长速度发生波动，其中 2013 年度的新增装机容量则下降至 2009 年以来的最低点，但总体仍然呈现增长态势。2014 年，全球年度新增装机容量为 52.52GW，刷新了历史记录，较 2013 年的 35GW 同比增长 47%，而较 1998 年的 2GW 同比增长了 23 倍。而从图 1.2 所示的全球风电累计安装容量的发展可以看出：2014 年年底全球累计装机容量为 371.34GW，较 2013 年的 318.53 GW 同比增长 16.6%，而较 1998 年的 9.67GW 同比增长了 37 倍。

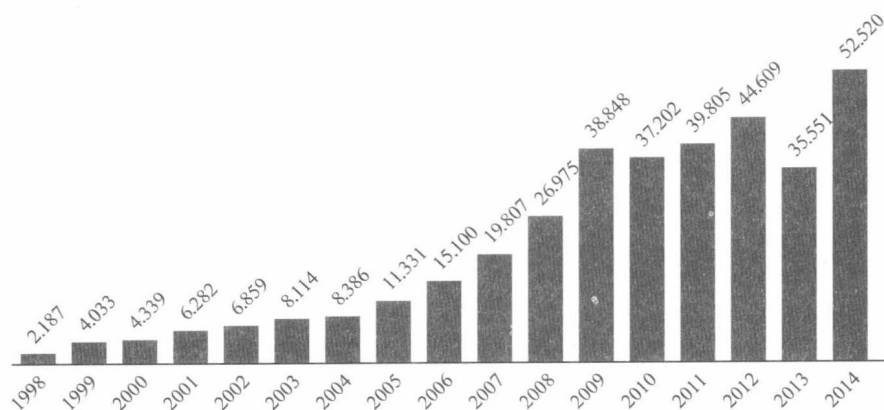


图 1.1 全球年度风电装机容量（1998—2014 年）（单位：MW）

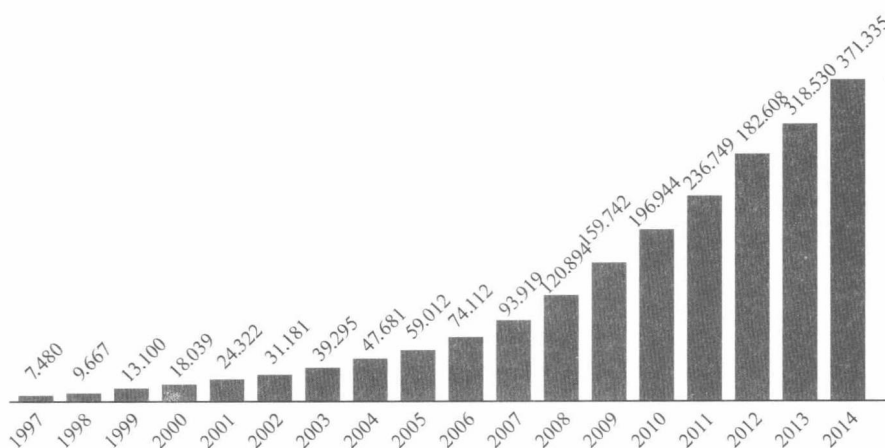


图 1.2 全球累计风电装机容量（1997—2014 年）（单位：MW）

2014 年，中国的年新增装机达到了创纪录的 23GW，累计装机容量达到了 114GW。在中国的引领下，亚洲的新增风电装机容量连续多年超过欧洲和北美洲。到 2014 年年底，亚洲的累积风电装机容量也首次超过了欧洲，位居世界第一。这说明全球风电重心已经由欧洲转移到了亚洲。表 1.1 为全球风电装机在各大洲的分布。

表 1.1 全球风电装机在各大洲分布

	截至 2014 年年底累积装机容量 (MW)	2014 年新增装机容量 (MW)	截至 2014 年年底累积装机容量 (MW)
亚洲	115 968	26 161	142 119
欧洲	121 573	12 820	133 969
北美洲	70 792	7247	77 953
南美	4777	3749	8526
非洲	1612	934	2545
大洋洲	3874	567	4441
全球统计	318 596	51 477	369 553

从全球各国风电发展来看：2014 年，中国的风电发展处于遥遥领先的地位，德国排在第二，美国紧随其后。2014 年，印度新增装机容量达到 2315MW，这一不错的表现让印度位列亚洲第二，迎来了风电发展的新一轮高潮。欧洲风电装机容量在 2014 年实现了小幅增长，

新增装机容量达到 12 820 MW，稍逊于 2012 年创造的历史最高装机纪录。德国稳居欧洲首位，其在 2014 年的新增装机容量达到 5279 MW，超越了之前的历史纪录。英国紧随其后，新增装机容量达到 1736 MW，位居欧洲第二。法国则以 1042MW 的装机容量，位列欧洲第四。瑞典装机容量达到 1050 MW，首次超过了 1000 MW。装机容量 300MW 的摩洛哥 Tarfaya 风电场是非洲最大的风电场，其在 2014 年正式并网并投入运营。南非风电起步稳健，2014 年实现了 560MW 的新增装机容量，使得非洲总装机容量达到 934MW。巴西继续引领拉丁美洲，新增装机容量达到 2472 MW，促使拉丁美洲的总装机容量达到 3749 MW，其中智利 506 MW、乌拉圭 405 MW。经历了 2013 年的低谷后，美国风电也开始回暖，2014 年新增装机达到 4854 MW。加拿大 171MW 的装机容量创造了本国的历史纪录，墨西哥也有不俗的表现，装机容量达 522 MW。受 2014 年国家政府政策变化的影响，澳大利亚的风电发展在过去一年受到限制，但仍有 567MW 的装机容量。图 1.3、图 1.4 所示分别为 2014 年全球新增和累计装机容量排名前十的国家及所占比例。

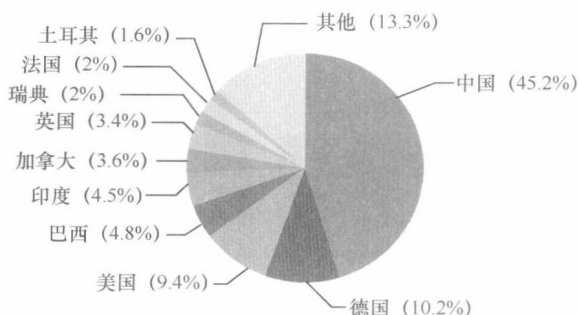


图 1.3 2014 年全球新增装机容量排名前十的国家及所占比例

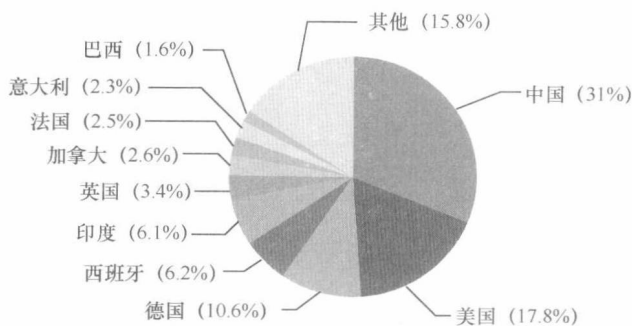


图 1.4 2014 年全球累计装机容量排名前十的国家及所占比例

相比于陆上风电的发展，全球海上风电近年来也正处于大力发展中，主要集中在欧洲地区。2014 年全球新增海上风电装机 1720MW，2014 年年底全球累积安装海上风电机组 8759MW，占全球风电累积装机容量的 2.3%。欧洲海上风力发电新增装机容量 1500MW，其中 86.2%为西门子风电机组。2013 年 7 月 4 日，世界上最大的海上风电场，伦敦矩阵风电场正式投入运营。该项目由丹麦 Dong 能源公司和德国意昂能源集团等企业投资 15 亿英镑，安装了 175 台西门子风轮直径 120m 的 3.6MW 海上风电机组，总功率超过 63 万千瓦。此外，德国巴尔德海上 1 号风电场也于 2013 年 8 月 26 日投入运营，总功率达 40 万千瓦。而日本截至 2013 年累计有 49.6MW 的海上风电装机容量，其中漂浮式海上风电有 4MW。

1.1.2 中国风电发展概述

自 2004 年以来,中国风电产业发展势头良好,从图 1.5 所示的中国风电新增及累积风电装机容量发展数据可以看出:2014 年,新增装机容量为 23.2GW,较上一年相比增加了 44.2%,新增风电装机量刷新了历史记录。到 2014 年年底全国累计的装机容量达到了 114.6GW,同比增长 25.4%。

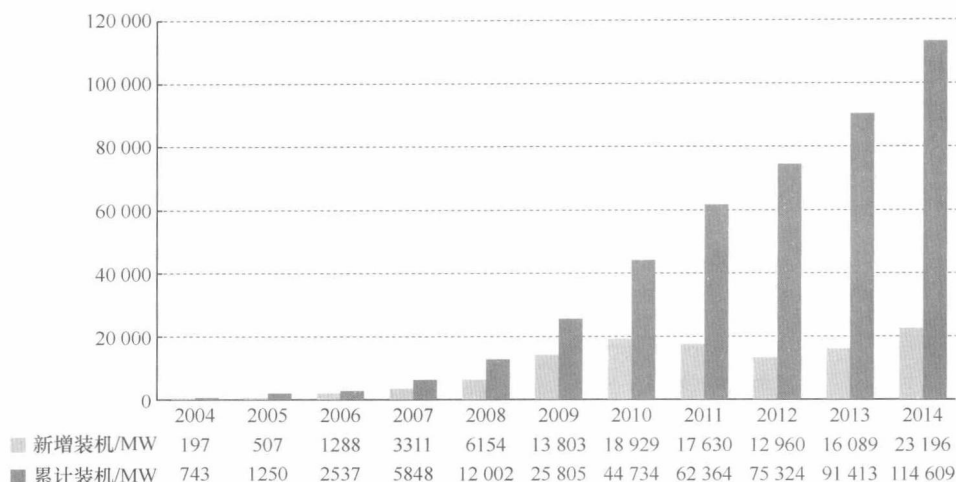


图 1.5 2004—2014 年中国新增及累积风电装机容量 (MW)

2014 年,中国海上风电新增装机 61 台,容量达到 229.3MW,同比增长 487.9%,其中,潮间带装机容量为 130MW,占海上风电新增装机总量的 56.69%。截至 2014 年年底,中国已建成的海上风电项目装机容量共计 657.88MW。图 1.6 所示为 2009—2014 年中国新增及累积海上风电装机情况。

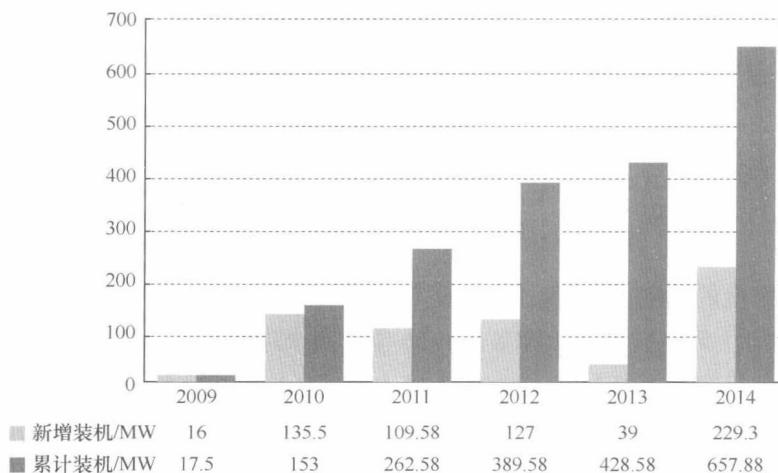


图 1.6 2009—2014 年中国新增及累积海上风电装机容量 (MW)

截至 2014 年年底,我国潮间带累计风电装机容量达到 434.48MW,占海上装机容量的 65.6%,近海风电装机容量占 34.4%,其中规模化项目为东海大桥海上项目(102MW)及其