



“十二五”国家重点图书出版规划项目
智能电网研究与应用丛书

可再生能源发电系统的 建模与控制

Modelling and Control of
Renewable Power Generation Systems

鞠平 吴峰 金宇清 著
潘学萍 袁越 秦川



科学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目
智能电网研究与应用丛书

可再生能源发电系统的 建模与控制

Modelling and Control of Renewable Power
Generation Systems

鞠 平 吴 峰 金宇清 著
潘学萍 袁 越 秦 川

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

可再生能源发电是我国能源的国家战略需求,已成为当前的研究热点。而可再生能源发电系统的建模与控制是可再生能源发电系统并网运行的基础,建立合适的模型和优良的控制,对提高大规模可再生能源发电系统的效率和性能具有重要意义。

首先,本书介绍可再生能源发电系统建模与控制的理论基础;然后,以目前已经实际并网运行的风力发电和太阳能发电为对象,构建模型方程,提出参数辨识方法,建立其数学模型;同时,基于最优控制理论,设计优化控制器,提高系统的动态特性;最后,针对可再生能源发电技术的发展前沿,建立海洋能发电系统和含分布式可再生能源微电网的模型,设计其最优控制器。

读者对象主要包括电力系统、可再生能源发电以及自动化方面的科研人员、研究生和工程技术人员。

图书在版编目(CIP)数据

可再生能源发电系统的建模与控制=Modelling and Control of Renewable Power Generation Systems / 鞠平等著. —北京:科学出版社,2014. 10 (智能电网研究与应用丛书)

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-03-042189-0

I. ①可… II. ①鞠… III. ①再生能源-发电-系统建模②再生能源-发电-控制系统 IV. ①TM61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 241561 号

责任编辑:吴凡洁 乔丽维 / 责任校对:邹慧卿

责任印制:肖 兴 / 封面设计:陈 敬

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014年10月第一版 开本:720×1000 1/16

2014年10月第一次印刷 印张:23 3/4

字数:455 000

定价:110.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



《智能电网研究与应用丛书》编委会

主编:周孝信

编委:(按姓氏汉语拼音排序)

白晓民(中国电力科学研究院)

蔡旭(上海交通大学)

曹一家(湖南大学)

陈希(中国电力科学研究院)

程浩忠(上海交通大学)

程时杰(华中科技大学)

丁立健(国家自然科学基金委员会)

董新洲(清华大学)

董旭柱(南方电网科学研究院有
限责任公司)

段献忠(华中科技大学)

郭剑波(中国电力科学研究院)

韩英铎(清华大学)

何湘宁(浙江大学)

胡学浩(中国电力科学研究院)

鞠平(河海大学)

李立涅(华南理工大学)

廖瑞金(重庆大学)

刘建明(国家电网公司)

卢强(清华大学)

梅生伟(清华大学)

穆钢(东北电力大学)

饶宏(南方电网科学研究院有限责
任公司)

荣命哲(西安交通大学)

宋永华(浙江大学)

孙元章(武汉大学)

王成山(天津大学)

王锡凡(西安交通大学)

王益民(国家电网公司)

肖立业(中国科学院电工研究所)

薛禹胜(国家电网公司)

杨奇逊(华北电力大学)

杨勇平(华北电力大学)

余贻鑫(天津大学)

张保会(西安交通大学)

张伯明(清华大学)

赵争鸣(清华大学)

《智能电网研究与应用丛书》序

迄今为止,世界电网经历了“三代”的演变。第一代电网是第二次世界大战前以小机组、低电压、孤立电网为特征的电网兴起阶段;第二代电网是第二次世界大战后以大机组、超高压、互联大电网为特征的电网规模化阶段;第三代电网是第一、二代电网在新能源革命下的传承和发展,支持大规模新能源电力,大幅度降低互联大电网的安全风险,并广泛融合信息通信技术,是未来可持续发展的能源体系的重要组成部分,是电网发展的可持续化、智能化阶段。

同时,在新能源革命的条件下,电网的重要性日益突出,电网将成为全社会重要的能源配备和输送网络,与传统电网相比,未来电网应具备如下四个明显特征:一是具有接纳大规模可再生能源电力的能力;二是实现电力需求侧响应、分布式电源、储能与电网的有机融合,大幅度提高终端能源利用的效率;三是具有极高的供电可靠性,基本排除大面积停电的风险,包括自然灾害的冲击;四是与通信信息系统广泛结合,实现覆盖城乡的能源、电力、信息综合服务体系。

发展智能电网是国家能源发展战略的重要组成部分。目前,国内已有不少科研单位和相关企业做了大量的研究工作,并且取得了非常显著的研究成果。在智能电网研究与应用的一些方面,我国已经走在了世界的前列。为促进智能电网研究和应用的健康持续发展,宣传智能电网领域的政策和规范,推广智能电网相关具体领域的优秀科研成果与技术,在科学出版社“中国科技文库”重大图书出版工程中隆重推出《智能电网研究与应用丛书》这一大型图书项目,本丛书同时入选“十二五”国家重点出版规划项目。

《智能电网研究与应用丛书》将围绕智能电网的相关科学问题与关键技术,以国家重大科研成就为基础,以奋斗在科研一线的专家、学者为依托,以科学出版社“三高三严”的优质出版为媒介,全面、深入地反映我国智能电网领域最新的研究和应用成果,突出国内科研的自主创新性,扩大我国电力科学的国内外影响力,并为智能电网的相关学科发展和人才培养提供必要的资源支撑。

我们相信,有广大智能电网领域的专家、学者的积极参与和大力支持,以及编委的共同努力,本丛书将为发展智能电网、推广相关技术、增强我国科研创新能力做出应有的贡献。

最后,我们衷心地感谢所有关心丛书并为丛书出版尽力的专家,感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和赞助,感谢广大读者对丛书的厚爱;希望通过大家的共同努力,早日建成我国第三代电网,尽早让我国的电网更清洁、更高效、更安全、更智能!

周孝信

序

可再生能源是绿色的清洁能源,开发和利用可再生能源能够缓解能源危机和环境污染问题。将可再生能源转化为电能是高效、便捷的利用方式,世界各国大力推进可再生能源发电的快速发展。近年来,我国可再生能源发电的发展速度居于世界前列,已经成为世界上拥有可再生能源发电装机容量最大的国家。根据《可再生能源发展“十二五”规划》,我国到2015年可再生能源发电量争取达到总发电量的20%以上,可以预计我国的可再生能源发电还将高速发展。

大量的可再生能源发电系统并入电网运行,给电网的安全稳定运行带来了重要的影响。可再生能源发电系统输出功率的随机波动,大大增强了电网动态的随机性;可再生能源发电系统的分布式接入,使得潮流由单向流动变为双向流动;可再生能源发电系统的柔性接入,降低了电网的惯性。由此可见,由于可再生能源发电系统的接入,使电网的结构和特性都发生了变化,要分析这些变化对电网安全稳定运行所产生的影响,建立合适的可再生能源发电系统的模型是前提条件。同时,可再生能源发电系统的有效控制,是提高含大规模可再生能源发电电网安全稳定运行的有力保障。因此,在可再生能源发电系统的建模与控制领域开展研究,具有重要的学术价值和实际意义。

鞠平教授所带领的团队长期在电力系统建模与控制领域开展研究工作,获得了丰富的研究成果,特别是在电力系统建模理论与方法方面做出了突出贡献。近年来,鞠平教授及团队将研究领域拓展至可再生能源发电系统的建模与控制,取得了一系列重要的创新性成果,经过归纳梳理形成《可再生能源发电系统的建模与控制》一书。

该书构建了可再生能源发电系统的建模与控制理论,是《智能电网研究与应用丛书》的重要组成部分。我作为丛书的主编乐意推荐并且作序,相信该书的问世将对该领域学术研究、工程应用和人才培养起到有力的推动作用。

周孝信

2014年5月



前 言

为了缓解日益严重的能源危机和环境污染问题,各国政府鼓励开发和利用可再生能源。我国于2006年1月1日颁布实施了《中华人民共和国可再生能源法》,将可再生能源开发利用的科学研究和产业化发展列为科技发展与高科技产业发展的优先领域,并纳入国家科技发展规划和高科技产业发展规划。可再生能源开发和利用主要分为大规模集中式和小规模分布式,大规模集中式的可再生能源发电场直接接入输电网运行;小规模分布式的可再生能源发电系统通过接入微电网运行。近年来,在国家政策的鼓励下,大量的集中式和分布式的可再生能源发电系统并入电网运行,对电网的安全稳定运行产生了重要的影响。为了分析和降低这些影响,需要研究可再生能源发电系统的建模与控制。

为此,作者基于近年来在可再生能源发电系统的建模与控制领域取得的研究成果,撰写了本书,重点阐述可再生能源发电系统的建模方法和控制器的优化设计,为可再生能源发电系统并网运行提供理论支撑。书中大部分内容尤其是核心创新点是我们团队的研究成果,对于他人的成果在书中加以引用标注。

本书共6章。第1章是绪论,由鞠平撰写。第2章是系统建模与控制基本理论,由鞠平撰写。第3章是本书重点,研究在学术上、应用上都十分重要的风力发电系统的建模与控制,由鞠平、金宇清、潘学萍、吴峰、袁越撰写。第4章研究太阳能发电系统的建模与控制,由潘学萍、金宇清撰写。第5章研究海洋能发电系统的建模与控制,由吴峰、秦川、鞠平撰写。第6章研究含分布式可再生能源微电网的建模与控制,由袁越、鞠平撰写。

本书研究工作得到了下列基金的资助:国家自然科学基金重点项目(No. 51137002)、国家自然科学基金重大项目课题(No. 51190102)、国家重点基础研究发展计划(973)课题(2013CB228204)、江苏省自然科学基金重点研究专项(No. BK2011026)、国家高技术研究发展计划(863)课题(No. 2011AA05A103)、国家自然科学基金项目(No. 50907016、No. 51077041、No. 51207045)、国家科技支撑计划项目(No. 2011BAA07B07)等。国家电网公司及其所属网、省电力公司提供了应用机会。本书研究工作得到了许多同行专家的指导和学校的支持,许多研究生参与了研究工作,吴凡洁、张浩等帮助进行编辑工作。本书被列入“十二五”国家重点图书出版规划项目,得到了中国科学院科学出版基金资助,在此一并表示衷心的感谢。



可再生能源发电系统的建模与控制

限于作者理论水平和实践经验,书中难免有不足或有待改进之处,尚希读者不吝指正。

联系方式: pju@hhu.edu.cn 或 jyq16@hhu.edu.cn。

作者

2014年3月

于河海大学



目 录

《智能电网研究与应用丛书》序

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 可再生能源发电系统的重要意义	1
1.2 可再生能源发电系统的基本概念	2
1.2.1 可再生能源发电的类型	2
1.2.2 可再生能源发电的特点	9
1.3 可再生能源发电系统的研究概述	10
参考文献	11
第 2 章 系统建模与控制基本理论	14
2.1 控制理论的发展	14
2.2 系统建模基本理论	17
2.2.1 系统建模概述	17
2.2.2 模型方程的结构特性	18
2.2.3 线性系统的辨识方法	20
2.2.4 非线性系统的辨识方法	26
2.3 优化控制基本理论	27
2.3.1 线性系统的最优控制	27
2.3.2 非线性系统的优化控制	30
参考文献	41
第 3 章 风力发电系统的建模与控制	42
3.1 概述	42
3.2 风力发电系统的模型	43
3.2.1 风力发电系统的结构	43
3.2.2 风力机的模型	46
3.2.3 桨距角控制器的模型	49
3.2.4 传动系统的模型	50



3.2.5	“背靠背”变流器的模型	51
3.2.6	双馈感应发电机的模型	53
3.2.7	双馈感应发电机控制器的模型	69
3.2.8	永磁同步发电机的模型	71
3.2.9	永磁同步发电机控制器的模型	72
3.2.10	风电机组的通用模型	74
3.2.11	风电机组推荐模型	80
3.3	风电机组的参数辨识	82
3.3.1	风电机组的参数辨识策略	82
3.3.2	风力机的参数辨识	87
3.3.3	控制器的参数辨识	89
3.3.4	传动系统的参数辨识	97
3.3.5	双馈风力发电机的参数辨识	100
3.3.6	交叉辨识	104
3.4	风电场与场群的动态等效	108
3.4.1	风电场动态等效的目的	108
3.4.2	集电网络的变换方法	109
3.4.3	风电机组的分群判据	115
3.4.4	风电机组的聚合	119
3.4.5	控制器的聚合方法	123
3.4.6	风电场群的动态等值	132
3.4.7	风速波动情况下的风电场等效	136
3.5	风电机组的优化控制	149
3.5.1	引言	149
3.5.2	风电机组的线性优化控制	149
3.5.3	风电机组的非线性优化控制	157
3.6	风电场的并网控制	165
3.6.1	风电场的有功功率控制	165
3.6.2	风电场的无功功率控制	173
3.6.3	风电场的低电压穿越技术	177
3.6.4	风电场的并网检测	183
	参考文献	190
第4章	太阳能发电系统的建模与控制	194
4.1	概述	194
4.2	太阳能光伏发电系统的原理	196
4.2.1	太阳能光伏发电系统的类型	196



4.2.2	太阳能光伏电池原理与结构	197
4.2.3	并网逆变器	198
4.3	太阳能光伏发电系统的建模	200
4.3.1	光伏阵列模型	200
4.3.2	光伏电池参数辨识	208
4.3.3	DC/AC 逆变器及其控制系统模型	212
4.3.4	DC/AC 逆变器控制参数辨识	215
4.3.5	PLL 锁相环	222
4.3.6	储能电池模型	222
4.4	太阳能光伏发电系统的控制	224
4.4.1	MPPT 控制原理	224
4.4.2	MPPT 控制算法	226
	参考文献	230
第 5 章	海洋能发电系统的建模与控制	232
5.1	概述	232
5.1.1	研究背景与意义	232
5.1.2	海洋能发电发展现状	232
5.2	波浪能发电系统的建模与控制	235
5.2.1	波浪能发电原理	235
5.2.2	基于 AWS 波浪发电系统的建模	236
5.2.3	基于 AWS 波浪发电系统的最优控制	246
5.2.4	基于 AWS 波浪发电系统并网运行与控制	251
5.3	潮流能发电系统的建模	257
5.3.1	机械系统模型	258
5.3.2	电气系统模型	258
5.4	近海可再生能源综合发电系统的建模与控制	258
5.4.1	近海可再生能源综合发电系统的构建	259
5.4.2	近海可再生能源综合发电系统的模型构建	260
5.4.3	近海可再生能源综合发电系统动态仿真分析	262
5.4.4	近海可再生能源综合发电单元的动态控制	276
5.4.5	近海可再生能源综合发电系统的稳态控制	285
	参考文献	308
第 6 章	含分布式可再生能源微电网的建模与控制	309
6.1	概述	309
6.1.1	分布式可再生能源发电概述	309
6.1.2	微电网概述	309



6.1.3	智能微电网概述	310
6.1.4	我国微电网发展概述	314
6.2	微电网的构成	320
6.2.1	微电源	320
6.2.2	逆变器	322
6.2.3	储能装置	323
6.2.4	微电网系统结构	324
6.2.5	微电网运行控制结构	328
6.3	微电网的建模	330
6.3.1	微电网的元件模型	330
6.3.2	微电网的等效模型	331
6.3.3	微电网的等效参数	333
6.3.4	算例分析	334
6.4	微电网的能量管理系统	342
6.4.1	微电网能量管理系统概述	342
6.4.2	并网型微电网能量管理系统控制策略	342
6.4.3	独立型微电网能量管理系统控制策略	351
	参考文献	360



第 1 章 绪 论

1.1 可再生能源发电系统的重要意义

目前,全世界以化石能源为主的能源结构已经日益面临资源与环境的双重约束,具有明显的不可持续性^[1]。为了缓解日益严重的能源危机和环境污染问题,各国政府鼓励开发和利用可再生能源。我国于 2006 年 1 月 1 日施行的《中华人民共和国可再生能源法》第一条指出:“为了促进可再生能源的开发利用,增加能源供应,改善能源结构,保障能源安全,保护环境,实现经济社会的可持续发展,制定本法。”第十二条指出:“国家将可再生能源开发利用的科学研究和产业化发展列为科技发展与高技术产业发展的优先领域,纳入国家科技发展规划和高技术产业发展规划,并安排资金支持可再生能源开发利用的科学研究、应用示范和产业化发展,促进可再生能源开发利用的技术进步,降低可再生能源产品的生产成本,提高产品质量。”

“十二五”时期,世情国情继续发生深刻变化,能源发展呈现新的阶段性特征,我国既面临由能源大国向能源强国转变的难得历史机遇,又面临诸多困难。能源发展的长期矛盾和短期问题相互交织,国内因素与国际因素相互影响,资源和环境约束进一步加剧,节能减排形势严峻,能源资源对外依存度快速攀升,能源控总量、调结构、保安全面临全新的挑战。为此,我国《能源发展“十二五”规划》要求加快发展风能等其他可再生能源。规划指出,要坚持集中与分散开发利用并举,以风能、太阳能、生物质能利用为重点,大力发展可再生能源。优化风电开发布局,有序推进华北、东北和西北等资源丰富地区的风电建设,加快风能资源的分散开发利用。协调配套电网与风电开发建设,合理布局储能设施,建立保障风电并网运行的电力调度体系。积极开展海上风电项目示范,促进海上风电规模化发展。加快太阳能多元化利用,大力推广与建筑结合的光伏发电,提高分布式利用规模,立足就地消纳建设大型光伏电站,积极开展太阳能热发电示范。加快发展建筑一体化太阳能应用,鼓励太阳能发电、采暖和制冷,以及太阳能中高温工业的应用。有序开发生物质能,加快发展生物液体燃料。鼓励利用城市垃圾、大型养殖场废弃物建设沼气或发电项目。因地制宜利用农作物秸秆、林业剩余物发展生物质发电、气化和固体成型燃料。稳步推进地热能、海洋能等可再生能源的开发利用。到 2015 年,风能发电装机规模达到 1 亿 kW;太阳能发电装机规模达到 2100 万 kW;生物质能发电装机规模达到



1300 万 kW,其中城市生活垃圾发电装机容量达到 300 万 kW。

1.2 可再生能源发电系统的基本概念

1.2.1 可再生能源发电的类型

可再生能源发电具有多种类型,《中华人民共和国可再生能源法》指出:“本法所称可再生能源,是指风能、太阳能、水能、生物质能、地热能、海洋能等非化石能源。水力发电对本法的适用,由国务院能源主管部门规定,报国务院批准。通过低效率炉灶直接燃烧方式利用秸秆、薪柴、粪便等,不适用本法。”

从严格意义上来讲,传统的水力发电也属于可再生能源发电这个范畴,但由于水力发电的研究工作和技术开发已经非常成熟,所以本书不加以讨论。而生物质能和地热能发电目前研究较少、比例很小,所以本书也不加以讨论。因此,本书重点研究风能、太阳能、海洋能发电。

1. 风力发电

在主要的可再生能源中,风力发电(以下简称风电)是除水电之外,技术最成熟、成本最接近商业利用的能源,也是近年来全球发展最快的能源种类之一^[2]。我国地域辽阔,风能资源丰富,可开发量为 7 亿~12 亿 kW,其中陆地为 6 亿~10 亿 kW,海上为 1 亿~2 亿 kW^[3]。我国风电开发虽然在起步上比欧美发达国家晚,却是全球风电发展最快的国家。世界风能协会的报告指出,2008 年中国已经成为继美国、德国、西班牙之后第四个装机容量超过 1000 万 kW 的风电大国^[4]。中国风能协会发布的 2001~2011 年我国风电增长数据如图 1-1 所示,在 2010 年年底时中国的风电装机容量已经跃居世界第一,2011 年又增长了 39.4%^[5]。在风电发展速度领先世界的同时,我国风电并网的形式也与欧洲等发达国家有重要的差别。欧洲国家风电场的装机规模普遍较小,除了近期集中开发的大规模海上风电场采用高压远距离输送,主要是分散接入配电网就地消纳^[6]。而我国的风电并网呈现出大规模、集中式的特点,除了江苏海上千万千瓦级的风电基地,规划的六个陆上千万千瓦级的风电基地全部集中在“三北”地区(东北、华北、西北),占全国风电并网容量的 87%左右,其分布如图 1-2 所示^[7]。但是,“三北”地区并非我国的负荷中心,所发电能还需要通过西电东送通道长距离送往负荷集中的“三华”(华北、华东、华中)受端电网。在这样的形势下,现有电网接纳和承载能力的不足引起了国家的高度关注,在《可再生能源发展“十二五”规划编制工作方案》中将配套电网建设作为五大规划内容之一,提出“为保障优先调度和全额收购可再生能源电力,必须统筹可再生能源电力和配套电网建设”。

目前处于商业运营中的风电机组主要有三种类型^[8]。

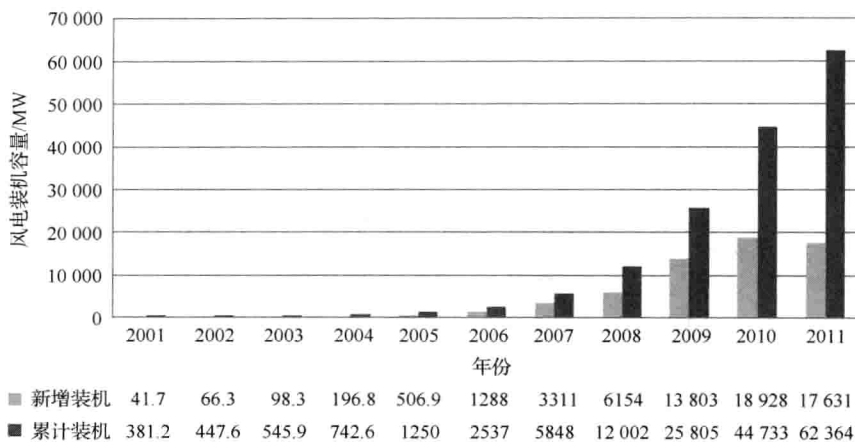


图 1-1 2001~2011 年中国历年新增及累计风电装机容量^[5]

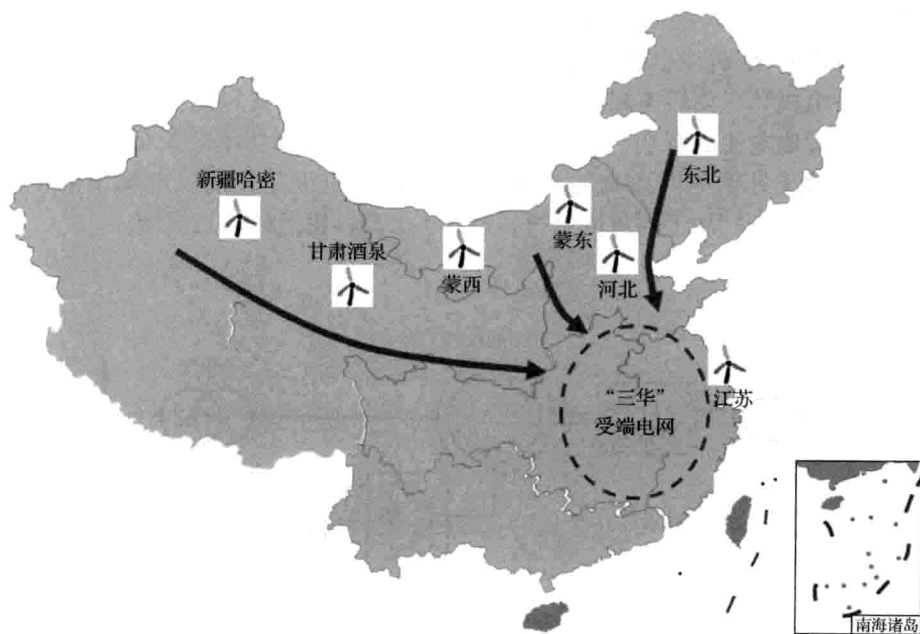


图 1-2 我国规划的七个千万千瓦级的风电基地分布图^[7]

FSIG (fixed speed induction generator) 机组的结构如图 1-3 所示, 它通常由风力机、传动轴及齿轮箱、鼠笼式异步发电机和机端的无功补偿电容器组成^[9]。这种风电机组的结构简单、成本低、可靠性高, 但缺点是发电机转速只能在很小的范围内变化, 导致不能充分利用风能, 而且在发电过程中需要吸收大量的无功^[10,11]。早期建成的风电场都是基于 FSIG 机组的, 目前都还在运营中, 但新建风电场已经不再使用这类机组。文献^[12]和^[13]建立了 FSIG 机组的动态模型, 定义了 FSIG 机组的临界



切除时间,并从机组的机械参数、电气参数和并网方式等方面分析了影响临界切除时间的因素。

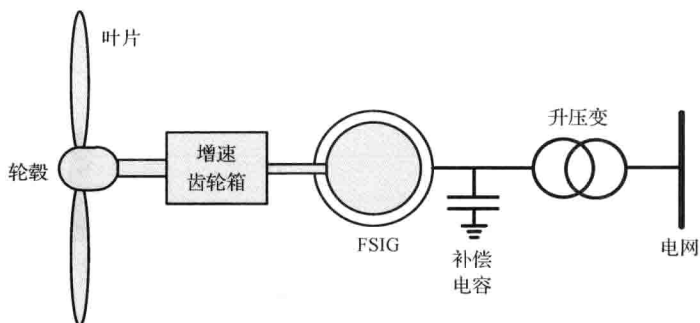


图 1-3 FSIG 机组的结构图

DFIG(doubly fed induction generator)机组的结构如图 1-4 所示,它的转子侧通过变流器(其额定功率为机组额定功率的 $1/4 \sim 1/3$)引入交流励磁,因此即使其转速在很大范围内变化,机组也能始终与电网保持同步^[14]。在额定风速以下,DFIG 机组通过调节发电机转矩使转速跟随风速变化,从而实现了最大风能捕获^[15]。此外,通过调节转子励磁电流的有功、无功分量可以实现机组输出功率的矢量控制,以达到调节功率因数或补偿电网无功的目的^[16-18]。DFIG 机组是目前风电场中的主流机型。文献[19]~[22]从不同角度分析和建立了 DFIG 机组的动态模型。

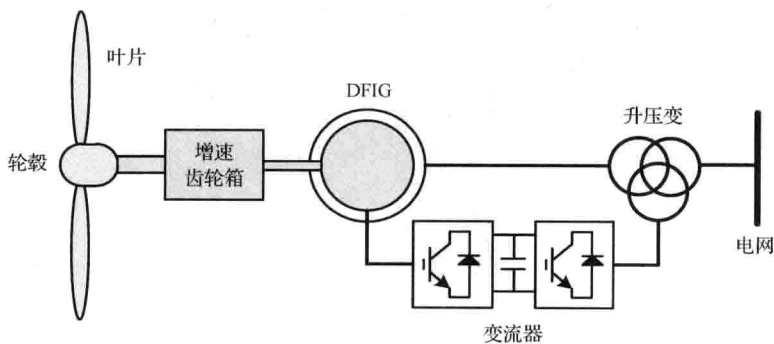


图 1-4 DFIG 机组的结构图

DDPMSG(direct drive permanent magnet synchronous generator)机组的结构如图 1-5 所示,其风力机与永磁式同步发电机的转子直接连接,省去了升速齿轮,从而提高了机械部分的可靠性,但是发电机转速低,为了获得同等的转矩就需要较大的质量,因此其体积较大^[14]。DDPMSG 机组的定子侧通过全功率变流器与系统连接,因此其动态特性完全取决于变流器的控制策略^[23],通过对变流器的控制也可以实现机组输出功率的矢量控制和最大风能捕获^[24,25]。许多新建风电场已开始采用这种机型。文献[26]~[28]建立了较为详细的 DDPMSG 机组的数学模型,并对其



特性进行了分析。

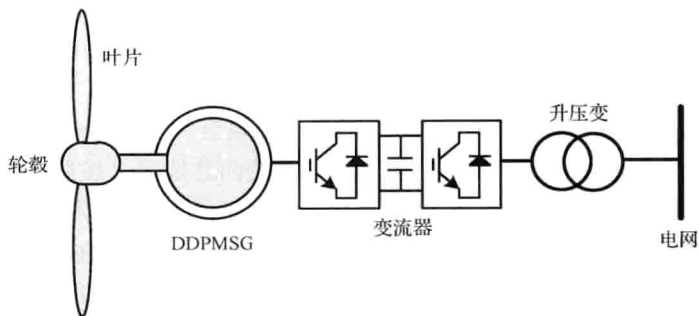


图 1-5 DDPMSG 机组的结构图

总的来说,目前兆瓦级的风电机组已成为主流机型,陆上风电主力机型的单机容量在 1.5MW 及以上,近海风电主力机型的单机容量达到了 3MW 及以上;双馈异步发电技术占主流,而直驱型风电机组发展迅速^[29]。

2. 太阳能发电

太阳能发电具有受季节和地域影响小的特点,主要有光热发电和光伏发电两种形式^[30,31]。光热发电主要是通过集热器收集太阳辐射能,产生热蒸气或者热空气,再推动传统的蒸汽发电机或者涡轮发电机来产生电能。与光伏发电相比,光热发电具有下列优点:①出力调节性能好;②发电机具有传统机组的惯性。但由于目前光热发电在集成优化设计、高温部件制造维护等方面存在瓶颈,还没有进入大规模商业化建设阶段。光伏发电以光伏电池技术作为核心,实现光电转换。从目前来看,光伏发电更具有竞争优势^[30,31]:①结构相对简单,体积小而且轻;②便于安装运输,建设时间短;③维护相对简单,使用方便;④清洁、安全、噪声小;⑤可靠性高,应用范围广。所以,我国目前以光伏发电为主,但从中长期来看,应为光伏发电与光热发电并重。

光伏电池是光伏发电的核心部件,从市场份额上看,晶体硅电池占 90%以上,非晶硅电池占 9%,其他类型的电池约占 1%。在一般情况下,结晶硅太阳能电池的转换效率为 15%~20%,非晶硅光伏电池转换效率为 8%~10%,薄膜光伏电池转换效率只有 5%~8%。光伏组件的成本 30 年来下降了两个数量级,随着光伏技术上的突破,如增加薄膜电池市场份额,组件的价格将会进一步降低。

从全球的角度来看,光伏发电已经完成了初期开发和示范阶段,目前正在向大规模生产和大规模应用的方向发展。过去的 10 年里,全球太阳能光伏市场的年平均增长率为 41.3%;过去的 5 年里,全球太阳能光伏市场的年平均增长率为 49.5%。到 21 世纪中叶,太阳能发电预计将占世界总发电量的 5%~20%。欧洲是全球光伏发电装机规模最大的地区,截至 2011 年年底,欧盟累计光伏发电装机容量约 50300MW,约占全球光伏发电总装机容量的 75%;新增装机容量约 20900MW,约占