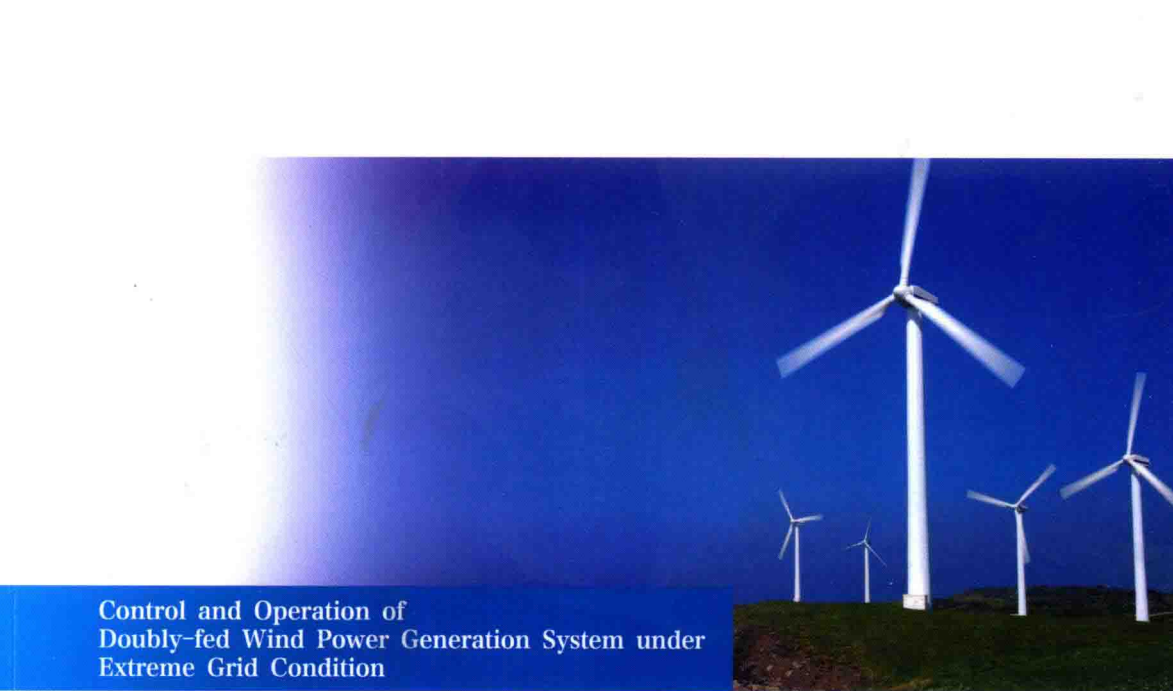




Control and Operation of
Doubly-fed Wind Power Generation System under
Extreme Grid Condition

极端电网环境下 双馈风力发电系统 运行控制

国网湖南省电力公司电力科学研究院 组编
沈阳武 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

Control and Operation of
Doubly-fed Wind Power Generation System under
Extreme Grid Condition

极端电网环境下 双馈风力发电系统 运行控制

国网湖南省电力公司电力科学研究院 组编
沈阳武 主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书共分8章,分别介绍了国内外风力发电概况与发展现状、风力发电系统基本控制技术和发展趋势,风电并网规范和并网事故典型案例,双馈风力发电系统的数学模型与控制,电网电压畸变下双馈风力发电系统协调优化控制,电压畸变下多端VSC-HVDC风电输电系统协调控制,双馈风力发电系统低/高电压穿越控制,双馈风力发电系统暂态无功功率控制,储能型双馈风力发电系统故障穿越控制。

本书适合从事风电并网科学研究,风力发电机组研发、生产制造和运行的专业技术人员及管理人员使用,也可供从事新能源开发的技术人员和风电技术相关专业师生阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

极端电网环境下双馈风力发电系统运行控制/沈阳武主编;
国网湖南省电力公司电力科学研究院组编. —北京:中国电力出版社, 2015. 12

ISBN 978-7-5123-8662-4

I. ①极… II. ①沈…②国… III. ①双馈电机-风力发电机-发电机运行-控制系统 IV. ①TM315.06

中国版本图书馆CIP数据核字(2015)第302540号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015年12月第一版 2015年12月北京第一次印刷

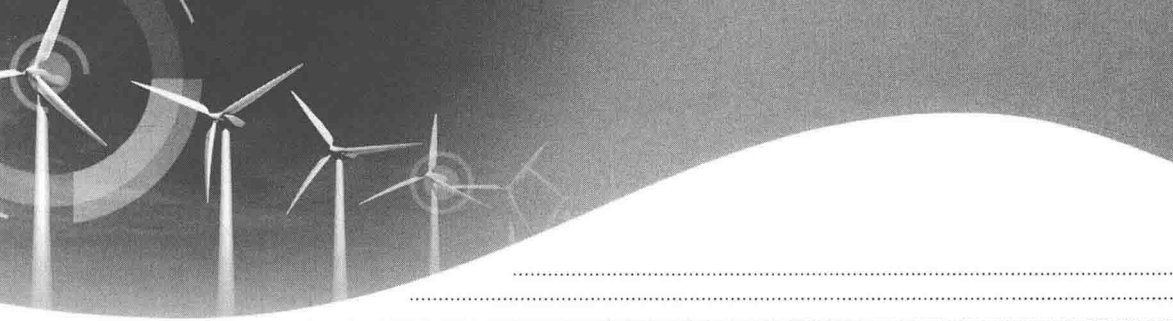
710毫米×980毫米 16开本 12.5印张 225千字

印数:0001—2000册 定价 50.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究



编 委 会

主 编 沈阳武

副 主 编 张 斌

编写人员 左 剑 张可人 崔 挺

实现新能源规模化发展是应对全球能源和环境危机的重要战略选择。风能作为一种清洁的可再生新能源,越来越受到世界各国的高度重视,风力发电已成为新能源发电技术中最成熟、开发规模最大、商业发展前景最好的发电形式。我国已成为全球风电装机容量最大的国家。

在我国,风能资源与负荷中心呈逆向分布,风电场大多建于电网末端,风力发电系统可能运行在稳态电压不平衡且畸变和瞬态电压骤变故障等极端电网环境条件下。与常规发电相比,风力发电系统采用基于电力电子器件的变流器并网,变流器不易承受极端电网环境引起的电磁暂态冲击,风力发电系统易出现脱网运行事故。随着风力发电装机规模的持续扩大,电力系统安全稳定运行面临着日益严峻的新挑战和新问题。

为了充分利用风能且保证电力系统的安全稳定运行,各国电网运营商已从电力系统安全的角度对风力发电系统在极端电网环境下的行为约束提出了明确规范。一方面,并网规范要求风力发电系统具备对电网电压不平衡且畸变的适应能力;另一方面,并网规范不仅要求风力发电系统具有在各种瞬态电压骤变下的故障穿越能力,还要求其具备支撑故障电网恢复的能力。上述行为约束是风力并网发电技术的难点之一,目前已成为风力发电设备制造企业的主要技术门槛之一。因此,开展极端电网环境下风力发电系统的运行控制特性研究,并提出相应的控制策略,具有十分重要的理论研究和工程应用价值。

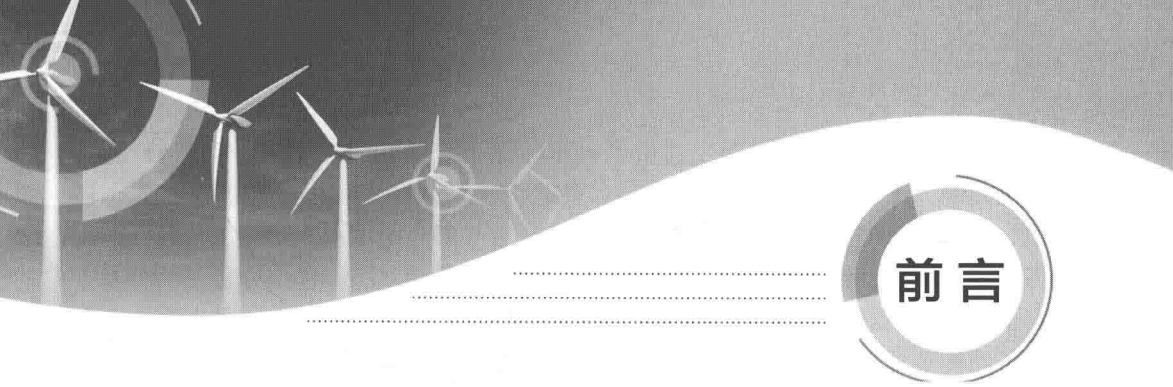
目前,国内外有关极端电网环境下风力发电系统运行控制的系统性和专门性的论著还较少见,《极端电网环境下双馈风力发电系统运行控制》一书及时地填补了这一空白。本书全面总结了风力发电系统的基本结构、控制技术和发展趋势,详细介绍了风电并网规范和典型并网事故案例。以双馈风力发电系统为研究对象,研究了在稳态电压不平衡且畸变和瞬态电压骤变下双馈风力发电系统的动态模型和电磁暂态特性。在这个基础上,本书集中讨论了双馈风力发电系统和多端 VSC-HVDC 风电输电系统的协调优化控制,双馈风力发电系统的低/高电压故障穿越控制,双馈风力发电系统的暂态无功电压控制和储能提高双

馈风力发电系统故障穿越能力控制等方面的内容。本书适用于风力发电尤其是风电并网方面基础研究、应用等方面的专业技术人员及管理人员使用，对从事新能源开发的技术人员和风电技术相关专业的师生具有重要的参考价值。

希望本书的出版对风力发电事业的健康发展能起到积极的推动作用。

周年光

2015 年 11 月于湖南长沙



前言

为应对日益严重的能源安全 and 环境恶化问题，大力发展风电已成为我国可持续能源发展战略的重要选择。随着风电技术和装备水平的快速发展，风电已经成为了目前技术最成熟、最具规模化开发条件和商业化发展前景的新能源。双馈风力发电系统具有有功功率和无功功率可独立调节的能力，最大风能追踪的变速恒频运行能力，且由于励磁变流器容量小于风力发电系统的额定容量，降低了系统成本，成为当前风能开发利用中的主流机型。

我国风电场大多建于电网末端，双馈风力发电系统并网后可能面临两种极端外部电网环境，分别为稳态电压不平衡且畸变和瞬态电压骤变。由于双馈风力发电系统采用基于电力电子器件的变流器并网，变流器不易承受上述两种电压扰动引起的电磁冲击，双馈风力发电系统难以穿越这些扰动而可能自动脱网。随着风电装机容量的增长，大规模风力发电系统的脱网可能严重威胁电力系统的安全稳定运行。为了充分利用风能且保证电力系统的安全稳定运行，各国电网运营商相继颁布针对风力发电系统的并网导则以规范其输出特性。其中，并网导则对风力发电系统在极端外部电网环境下的行为约束，被公认是对风力发电系统的严峻挑战。该约束的核心要求主要集中在两个层面：一是提高风力发电系统对电网稳态电压不平衡且畸变下的适应性能力；二是提高风力发电系统在瞬态电压骤变下的故障穿越能力和对故障电网恢复的支撑能力。

基于上述背景，本书对极端电网条件下双馈风力发电系统的并网运行和控制策略进行理论和技术探讨，以期为提高风电并网系统的稳定运行能力提供一定的理论基础和技术支持。本书可供从事风电并网研究，风力发电机组研发、生产制造和运行的专业技术人员及管理人员使用。本书对于从事新能源开发的广大高校师生、特别是学习风电技术的研究生是一本有理论意义和工程实用价值的高水平理论教材。

本书共分 8 章。第 1 章，介绍了国内外风力发电概况与发展现状、风力发电系统基本控制技术和发展趋势。第 2 章简单讨论了风电并网对电力系统的影响，详细介绍了风电并网规范，重点分析了风电并网事故典型案例。第 3 章介绍了 DFIG 的基本原理、数学建模、矢量控制策略和运行特性。第 4 章介绍了电压畸

变下 DFIG 的动态模型,重点讨论了电压畸变下 DFIG 的优化控制和多目标协调优化控制。第 5 章介绍了电压畸变下多端 VSC-HVDC 风电输电系统的动态模型、风功率协调控制策略和控制系统设计。第 6 章介绍了电压骤变时 DFIG 的暂态响应过程,归纳了常用的 DFIG 定子侧低电压穿越方法,重点分析了一种基于定子电压补偿原理的新型 DFIG 低/高电压穿越机理和控制策略。第 7 章详细介绍了储能装置提高 DFIG 暂态电压支撑能力的工作原理,重点分析研究了储能型 DFIG 的转子电流控制策略和所需的储能容量。第 8 章介绍了常用的 DFIG 转子侧低电压穿越方法,重点针对一种新型的储能型 DFIG 的暂态重构拓扑结构,探讨了其实现故障穿越的运行原理和控制方法。

本书由沈阳武博士担任主编,张斌高级工程师担任副主编,左剑博士、张可人工程师、崔挺博士参与编写。本书的编写过程中,得到了国网湖南省电力公司电力科学研究院专家和领导的大力支持与帮助,在此谨向他们致以诚挚的谢意。此外,本书撰写中参阅了不少国内、国外相关文献,在此向作者致谢。

感谢国网湖南省电力公司电力科学研究院专著出版资金对本书的支持。

由于编者业务水平和学识经验有限,书中难免存有不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2015 年 11 月



目录

序 前言

第 1 章	概述	1
1.1	风能 with 风力发电	1
1.2	风力发电系统的基本结构和类型	6
1.3	风力发电系统的基本控制技术	8
1.4	风力发电系统的发展趋势	9
	参考文献	10
第 2 章	风电并网规范和并网事故典型案例	12
2.1	风电并网对电力系统的影响	12
2.2	风电并网技术规定	14
2.3	风电并网事故典型案例及分析	20
	参考文献	22
第 3 章	双馈风力发电系统的数学模型与控制	24
3.1	DFIG 的基本工作原理	24
3.2	DFIG 的数学建模	26
3.3	DFIG 的变流器矢量控制与数学建模	28
3.4	DFIG 的运行特性	34
3.5	仿真结果分析	36
	参考文献	41
第 4 章	电网电压畸变下双馈风力发电系统协调优化控制	42
4.1	电网电压畸变下 DFIG 三相电磁量表达式	42
4.2	电网电压畸变下 DFIG 的动态模型	44

4.3	电网电压畸变下 DFIG 优化控制	49
4.4	电压畸变下 DFIG 多目标协调优化控制	64
	参考文献	88

第 5 章 电压畸变下多端 VSC-HVDC 风电输电系统协调控制 90

5.1	多端 VSC-HVDC 风电输电系统概述	90
5.2	电压不平衡与畸变下多端 VSC-HVDC 风电输电系统动态模型 ...	91
5.3	风电并网用多端 VSC-HVDC 输电系统风功率协调分配策略	97
5.4	电压不平衡且畸变下多端 VSC-HVDC 风电输电控制系统设计.....	101
5.5	算例结果分析	112
	参考文献	122

第 6 章 双馈风力发电系统低/高电压穿越控制 124

6.1	双馈风力发电系统低/高电压穿越控制概述	124
6.2	电网电压幅值瞬态变化时 DFIG 电磁暂态特性	125
6.3	定子侧低电压穿越方法	127
6.4	储能型 DFIG 拓扑结构低/高电压穿越机理	129
6.5	储能型 DFIG 拓扑结构低/高电压穿越控制策略	134
6.6	算例结果分析	138
	参考文献	147

第 7 章 双馈风力发电系统暂态无功功率控制 149

7.1	双馈风力发电系统暂态无功功率控制概述	149
7.2	储能装置提高 DFIG 暂态电压支撑能力的工作原理	150
7.3	DFIG-ESD 转子电流控制策略和储能容量评估	153
7.4	算例结果分析	162
	参考文献	173

第 8 章 储能型双馈风力发电系统故障穿越控制 175

8.1	双馈风力发电系统故障穿越控制概述	175
8.2	转子侧低电压穿越方案	175
8.3	储能型 DFIG 故障穿越拓扑结构及其运行原理	177
8.4	极端电压故障下暂态拓扑结构控制策略	179
8.5	仿真算例	184
	参考文献	189



概 述

1.1 风能与风力发电

能源是人类生存和发展的必要物质基础，对经济社会发展和提高人民物质文化生活水平极为重要。由于石油、煤炭等常规能源日益枯竭，能源危机受到了世界各国的广泛关注。我国是世界上少数几个以煤炭为主要能源的国家之一。在未来能源结构中，我国火电、水电等都会受到资源的制约。在火电方面，如果按已探明可利用的煤炭储量 1145 亿 t 计算，我国可利用的煤炭资源仅能再维持 30 年；在水电方面，我国水资源可开采量约为 4 亿 kW，当前水电装机容量约为 1 亿 kW，即使在 15~20 年内开采剩余水电，最终还是受到水资源的制约。此外，我国石油自产率逐年降低，对天然气、煤炭等能源的过度开采，使一次性矿物能源资源已濒临危机，严重制约社会经济的持续发展。同时，由于燃煤造成的环境污染问题日益突出，我国二氧化碳排放量已位居世界第二，甲烷等温室气体的排放量也位居世界前列。

随着生产力的发展和科技的不断进步，可再生能源得到了快速发展。可再生能源主要包括太阳能、风能、生物质能、地热能、海洋能等，开发该类能源是应对能源危机和环境问题的有效途径之一。在众多可再生能源中，风能发展最快、商业化最广泛。特别是在缺乏水力资源、缺乏燃料和交通不方便的沿海岛屿、山区和高原地带，风能的开发和利用具有巨大的发展潜力。

我国面临能源供应紧张、常规能源受到制约、环境污染严重、可持续发展压力巨大的严峻形势。为了应对上述问题，保证可持续发展，需采取有效的措施：一方面要提高现有能源技术的转换效率，减少污染；另一方面优先规划和发展新能源发电，探索和提高新能源的利用途径和技术，比如风力发电等^[1]。

风是太阳辐射热引起的一种自然现象，太阳辐射到地球表面，由于各处受热不同而产生温差，从而引起大气对流形成风。风能可认为是一种广义上的太阳能，尽管到达地球的太阳能中仅有极少部分转化为风能，但是其总量仍然巨大。全球 80m 高空每年可被利用的风能约为 72TW，即使其中 20% 的风能被利

用就能满足全世界所有能量需求^[2-3]。

我国幅员辽阔、海岸线较长，风能资源非常丰富。据国家气象局统计，我国 10m 高空理论上可开发风能资源约为 4.35TW，实际中可开发风能资源为 0.3TW。根据国家能源研究机构统计结果，截至 2014 年，我国风电累计并网装机容量达到 9673 万 kW，占全部发电装机容量的 7%，占全球风电装机的 27%。2014 年风电上网电量 1534 亿 kWh，占全部发电量的 2.78%。

1.1.1 风能与风力发电的特点

风力发电从其动力资源、风电转换系统及其设备、系统运行特性到电功率输出都不同于常规发电。与常规发电相比，风能属于清洁能源，无污染，可利用量巨大，但其开发利用却较为困难，利用率较低，这主要由于风能和风力发电具有以下特性。

(1) 风能的能量密度低。为了获得相同的发电容量，风力发电系统的风轮尺寸比相应的水轮机大几十倍，如额定功率为 3MW 的风力发电系统风轮机直径已达 100m。风力发电单机极限约为 10MW，因此，相对于电力系统而言，风力发电机组只能是小机组。

(2) 风电功率难以完全控制。风力发电以自然风为原动力，而自然风不可控，并且风能很难大量存储，因此难以像常规电源一样根据负荷需求实时控制风力发电机组的出力。

(3) 风速具有强随机波动性和间歇性，难以准确预测。风电功率的强随机波动性将对电网电压、频率以及潮流产生负面影响，电网实时调度难度大。

(4) 风力发电机组对电网的弱支撑性。大部分风力发电机组与电网处于解耦状态，不响应系统的电压和频率变化，造成系统稳定性下降。

(5) 风力发电机组在暂态过程中，呈现弱生存性。直驱或双馈风力发电机组通过半导体变流器并网，而变流器对电网扰动比较敏感，难以承受电网扰动引起的冲击。在电网出现故障时，风力发电机组极易脱网，因而呈现暂态弱生存性。

1.1.2 国外风力发电概况和发展现状

据全球风能理事会统计，截至 2008 年底全球装机容量累计达 120.8GW，新增风电装机容量超过 27GW，同比增长 36%^[5]，世界各国风电累计装机容量和比例如图 1-1 所示^[6]。2011 年，以德国、西班牙和丹麦为主的欧洲市场新增装机容量为 9616MW，累计装机容量达到 93.4GW，这一装机容量可以满足欧洲 6% 的用电需求。随着欧洲，特别是德国、丹麦等国的陆地风电资源基本开发完

毕，海上风电逐渐成为欧洲未来风电开发的重点。根据欧洲风能协会的预测结果，到 2020 年，欧洲海上风电装机容量将达到 40GW。同时，风电总装机量将达到 230GW，能够满足欧盟 15.7% 的电力需求。到 2014 年底，世界风电累计装机容量高达 369.5GW，同比增长 44%。图 1-2 给出了 2014 年底世界各国风电累计装机容量和比例。由图 1-1 和图 1-2 可见，近年来，尽管亚洲、南美洲等地区风电装机容量快速增长，但是欧洲国家和美国等发达国家的风电装机容量仍然占世界风电装机总容量的绝大部分份额，其风力发电产业规模巨大、较为成熟。

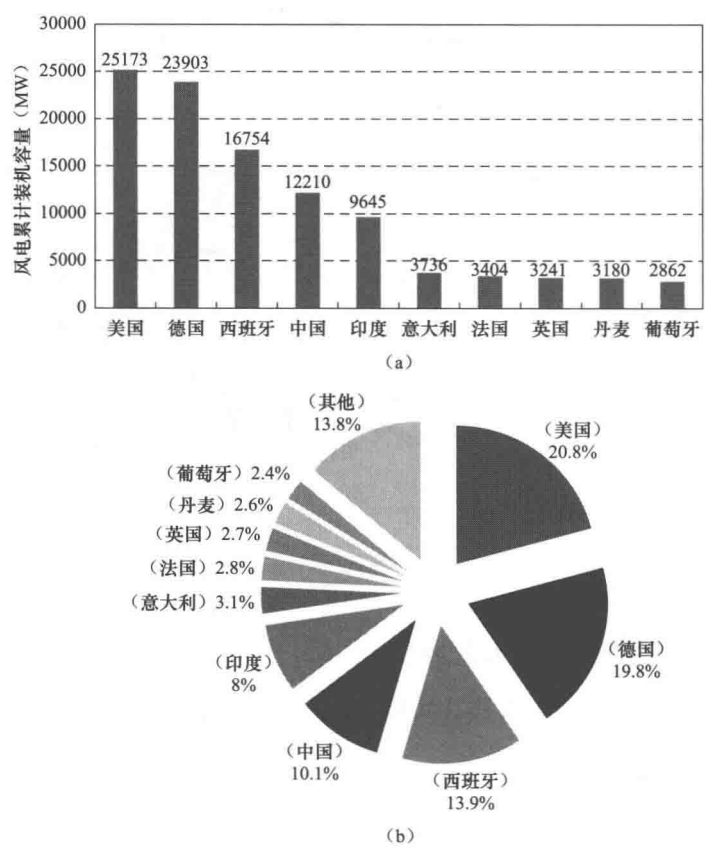


图 1-1 2008 年世界各国风电累计装机容量和比例
(a) 装机容量；(b) 装机容量比例

截至 2014 年底，美国风电累计装机容量为 65.9GW，同比增长 8%。美国能源部计划到 2030 年风电能够提供美国电力需求的 20%。在海上风电方面，美国计划到 2015 年装机容量能够达到 10GW，到 2030 年将达到 54GW，风力发电市场充满巨大潜力。

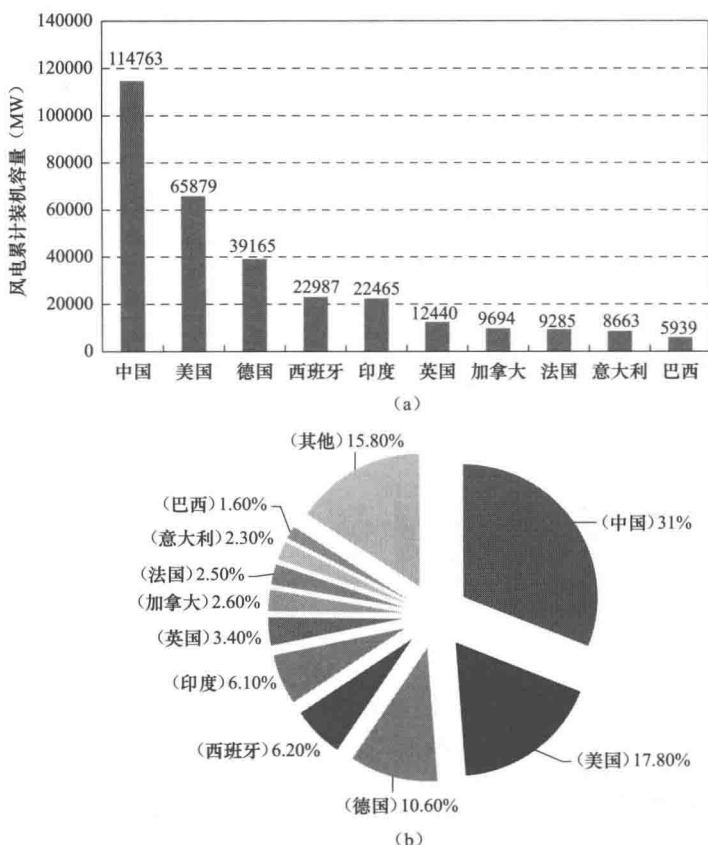


图 1-2 2014 年底世界各国风电装机容量和比例
(a) 装机容量; (b) 装机容量比例

1.1.3 国内风力发电概况和发展现状

从 2006 年《可再生能源法》实施后,我国风力发电产业高速发展^[7-8]。根据中国风能协会的统计数据,截至 2014 年底,我国风电新增装机容量和累计装机容量如图 1-3 和表 1-1 所示。由图 1-3 和表 1-1 可见,2011 年中国(不包括台湾地区)新增风电装机容量 17630MW,累计安装风力发电机组 45894 台,累计装机容量达到 62.4GW,年增长率为 39.4%,新增装机容量和累计装机容量均保持世界第一^[9]。到 2014 年底,全国新增风力发电机组 13121 台,新增装机容量 23351MW;累计安装风力发电机组 76241 台,累计装机容量高达 114.8GW。

在“十二五”期间,我国规划风电新增装机容量 70GW。按照该风电发展规划的要求,未来我国风电行业将从追求速度向追求质量转变,从追求装机容量向并网发电量转变,从大基地的集中式开发向集中式开发与分布式发展相结合转变,从陆上风电开发向陆上风电与海上风电共同开发转变。

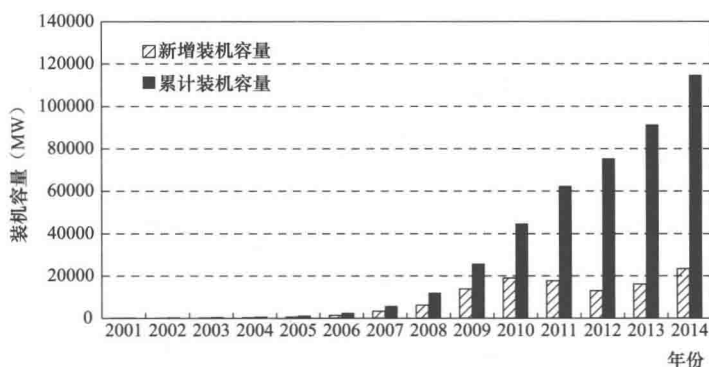


图 1-3 中国风电新增装机容量和累计装机容量

表 1-1 中国风电新增装机容量和累计装机容量

年份	新增装机容量 (MW)	累计装机容量 (MW)
2001	41.7	381.2
2002	66.3	447.6
2003	98.3	545.9
2004	196.8	742.7
2005	506.9	1249.6
2006	1287.6	2537.2
2007	3311.3	5848.5
2008	6153.7	12002.2
2009	13803.2	25805.4
2010	18928.0	44733.4
2011	17630.9	62364.3
2012	12959.7	75324
2013	16088	91412
2014	23351	114763

以风电为代表的新能源发电在我国充满活力，取得了巨大进步。新能源的大规模开发和利用，将推动我国能源结构向绿色、多元、低碳化方向发展。

随着全球风力发电行业的高速发展，各国政府和风力发电机组厂商对风力发电技术十分重视，风力发电技术不断提高^[10]。这主要体现在以下方面：风力发电系统单机容量快速增加、拓扑结构逐渐完善、新的控制技术不断提出和实际运用。风力发电系统与电网的相互关系不断完善和规范，风电并网标准、入网检测及流程，风力发电系统与电网耦合稳定机理和协调运行等方面取得了丰硕的成果。

1.2 风力发电系统的基本结构和类型

风力发电系统是将风能转化为机械能进而转化为电能的发电系统,如图 1-4 所示,风力发电系统主要由风力机、发电机以及能量转换装置等组成^[11-12]。其中,风力机及其控制系统是将风能转换为机械能,发电机及其控制系统则是将机械能转换为电能,电能转换装置实现直流功率与交流功率之间的变换。

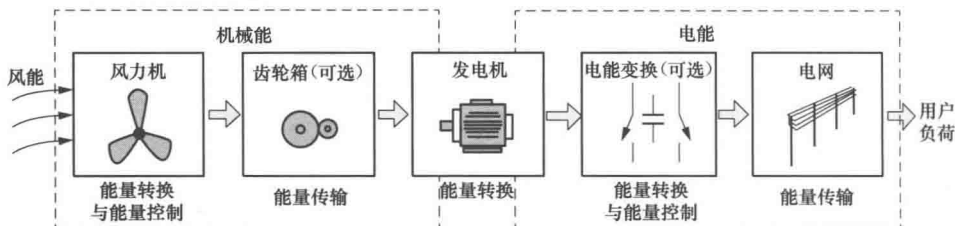


图 1-4 风力发电系统的一般构成

风力机作为风力发电系统的关键组成部分之一,影响到整个风力发电系统的效率和性能,其结构上主要有水平轴和垂直轴两种形式,当前最常见的风力机主要采用水平轴形式。风力机的主要功能是实现风能采集、变换与调节,目前投入运行的风力机主要有定桨距失速控制和变桨距控制两种调节方式。发电机及其控制系统是风力发电系统的另一个核心部分,它负责将机械能转换为电能,决定着整个发电系统的性能、效率和输出电能品质。

根据风力发电机运行特征,可将其分为以下三类^[13-15]:

(1) 恒速恒频式风力发电系统。其特点是在有效风速范围内,发电机组产生的交流电能频率恒定,发电机组的运行转速变化范围很小,近似恒定,比如笼式感应发电机。

(2) 变速恒频式风力发电系统。其特点是在有效风速范围内,发电机组定子发出的交流电能频率恒定,而发电机组的转速可变化,比如著名的双馈感应发电机(double fed induction generator, DFIG)。

(3) 变速变频式风力发电系统。其特点是在有效风速范围内,发电机组定子产生的交流电能频率和发电机组转速均可变化。因此,此类风力发电系统需要串联全功率变流装置才能并网运行,比如永磁直驱发电机。

图 1-5 所示为笼式感应风力发电系统基本拓扑结构。该类风力发电系统在 20 世纪八九十年代应用广泛,其最大缺点是机组转速不可控、与电网刚性连接、需配置多级变速齿轮箱,而且正常运行需要从电网吸收大量无功功率^[16]。

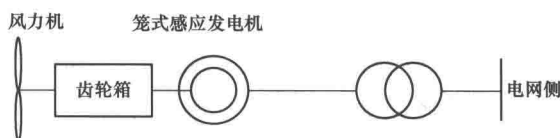


图 1-5 笼式感应风力发电系统结构示意图

图 1-6 所示为著名的双馈风力发电系统基本拓扑结构^[17-18]。与图 1-5 所示风力发电系统结构相比，其通过电力电子变换器对双馈感应发电机转子进行交流励磁。由于 DFIG 的转子励磁变频器容量仅为发电机额定功率的 30% 左右，其具有更宽的调速范围，一般为 $\pm 30\%$ 的同步转速。该拓扑结构的主要缺陷有：采用多级变速齿轮箱实现升速以减少发电机体积；连接 DFIG 转子与转子励磁变频器的滑环、电刷需要经常维护，以防止发电机故障；由于 DFIG 定子通过变压器直接并网，发电系统对电网故障相当敏感，比如电网对称、不对称电压跌落故障。现代电网规范要求 DFIG 在电网故障下不脱网运行，即具备故障穿越能力。这使得系统的控制策略和保护方案比较复杂。但是，DFIG 交流励磁变频器容量小和电机体积小的显著优点，使得该拓扑结构受到全球众多风力发电机组制造商的青睐。

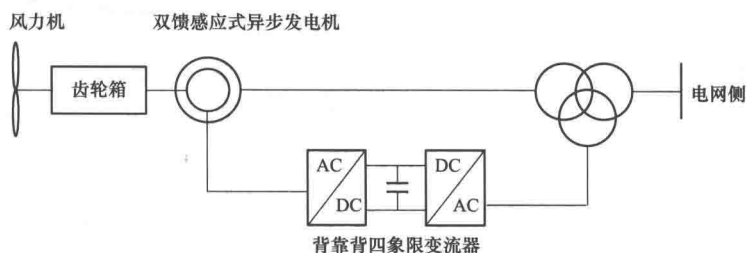


图 1-6 双馈风力发电系统结构示意图

为了克服多级变速齿轮箱引起的成本增加、效率降低及可靠性差等不足之处，永磁直驱风力发电系统受到越来越多的关注。图 1-7 给出典型永磁直驱风力发电系统的基本拓扑结构，其风力发电机定子通过一个全功率电力电子变换器与电网相联，理论上可实现全速范围的变速运行^[19-20]。由于没有多级变速齿轮箱，发电机转速非常低，一般为 $10 \sim 25 \text{ r/min}$ 。在输送相同功率条件下，发电机转矩很大，体积较大，且极对数较多。

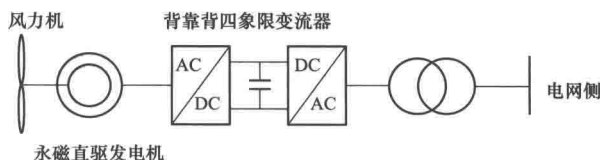


图 1-7 永磁直驱风力发电系统结构示意图