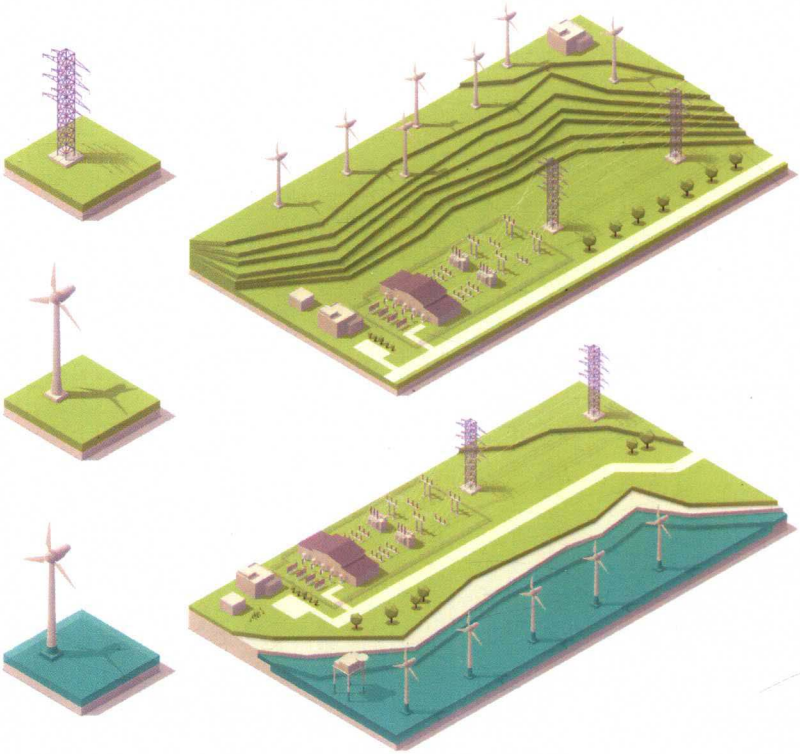
AC Excitation and Control of Doubly Fed Induction Wind Power Generator

双馈风力发电机交流励磁控制技术

◎ 骆 皓 林明耀 侯立军 著



东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS

本书获江苏省“六大人才高峰”高层次人才选拔培养课题
(XNY-021)及中国博士后科学基金面上项目(2017M621086)资助

双馈风力发电机
交流励磁控制技术

骆　皓　林明耀　侯立军　著

东南大学出版社
SOUTHEAST UNIVERSITY PRESS
·南京·

内 容 简 介

随着双馈风电技术的快速发展，双馈风电机组装机在电力系统内渗透率大幅攀升，双馈风力发电机组控制技术与故障电网兼容性的问题日益凸显，而风力发电系统的电网接入标准日益提高。

本书以双馈异步感应发电机的数学模型、正负序解耦控制和暂态特征分析为基础，对双馈发电机四象限变流器的交流励磁和暂态控制策略进行了深入研究，在基于电压不平衡的网侧变流控制和负序电流补偿技术、转子电流小惯性控制环节的参数整定方法、基于 Crowbar 电路的低电压穿越、基于强励的低电压穿越控制等若干方面，取得了一些具有理论意义和工程应用价值的研究成果。针对电机参数的非线性时变问题，本书围绕集肤效应、临近效应和磁路特征，分析了参数非线性时变的基本原理，并通过 Matlab 和有限元分析进行了验证。

本书可供从事新能源发电、特别是从事风力发电技术研究的高等院校电气工程及相关学科师生使用，也可作为从事相关工作的科研院所研究人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

双馈风力发电机交流励磁控制技术/ 骆皓等著. —南京：东南大学出版社，2018.7

ISBN 978-7-5641-7876-5

Ⅰ.①双… Ⅱ.①骆… ②林… ③侯… Ⅲ.①双馈电机—风力发电机—励磁控制—控制系统 Ⅳ.①TM315

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 172832 号

双馈风力发电机交流励磁控制技术

出版发行	东南大学出版社
出 版 人	江建中
社　　址	南京市四牌楼 2 号
邮　　编	210096
经　　销	全国各地新华书店
印　　刷	虎彩印艺股份有限公司
开　　本	700 mm×1000 mm　1/16
印　　张	10
字　　数	256 千字
版　　次	2018 年 7 月第 1 版
印　　次	2018 年 7 月第 1 次印刷
书　　号	ISBN 978-7-5641-7876-5
定　　价	42.00 元

(本社图书若有印装质量问题，请直接与营销部联系。电话：025-83791830)

前　言

在环境污染和温室气体排放日益受到关注的今天，风力发电作为全球公认可以有效减缓气候变化、提高能源安全、促进低碳经济增长的清洁能源方案，得到各国政府、科研院所和企业等的高度关注。此外，由于风电技术相对成熟，且具有更高的成本效益和资源有效性，因此，风电也成为近年来世界上增长最快的能源形式之一。

双馈风电机组配备的变流励磁装置容量较小、控制性能好，在世界范围内已获得了最大的风力发电装机份额。由于兆瓦级大规模风电接入的电网往往远离负荷中心，电网薄弱。双馈风电变流器只提供机组的滑差容量，在电网故障条件下的暂态运行能力成为目前双馈风电机组大规模接入的技术瓶颈，大规模风电解裂的风险日益凸显。本书围绕双馈变流技术展开研究，建立系统数学模型，研究双馈风电机组在电网故障条件下的暂态特性和控制方法，以期提升双馈发电机对故障电网的适应性和降低暂态冲击对电力系统的影响。

本书共8章：第1章为绪论；第2章为双馈感应发电机的数学模型与特性分析；第3章为基于正负序解耦的网侧变流器控制研究，重点分析了交直流功率的积分对直流母线电压的影响，实现直流母线电压脉动频率和幅值的解析，得出直流母线电压脉动幅值对负序电流补偿能力的约束条件；第4章为基于定子磁链定向的双馈感应风力发电机正负序解耦矢量控制研究；第5章为基于电网故障暂态分析的双馈风电系统控制研究；第6章为基于线性时不变系统参数设计的双馈风力发电系统实验研究；第7章介绍了磁导率非线性、分布绕组、集肤效应和邻近效应导致的双馈感应电机参数非线性时变问题；第8章为总结和展望。

本书著者近年来主要从事双馈风力发电机组交流励磁控制的基础理论和工程应用研究，研究工作中获国家自然科学基金、江苏省自然科

学基金、中国博士后科学基金和江苏省“六大人才高峰”高层次人才选拔培养等多项课题资助。本书是在多年研究工作基础上，参阅诸多已有书籍和论文得以完成。所参考文献已在书后列明，以便读者了解及检索相关领域的现有研究成果，同时也表示对参考文献作者的感谢。课题组侍正坤、黄灿、韩月龙和王侃也分别参与了部分章节内容的理论研究和仿真工作。

本书的撰写过程中，得到了国电南京自动化股份有限公司、天津瑞能电气有限公司、浙江大学、东南大学和江苏省电力公司等单位的支持。在此，向郭效军、詹熙、曹阳、郭巍、张新强、赵家欣、陈国柱、郝立、台流臣、周红勇等诸多专家学者表示由衷的谢意。

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏和错误，敬请读者不吝赐教。

作者

2018 年 4 月 6 日于南京天印湖畔

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

目　录

1　绪论 …… (1)

1.1　风力发电的意义和前景 …… (1)

1.2　风力机空气动力特性 …… (3)

1.3　风力发电系统概述 …… (4)

1.3.1　风力发电系统控制和功率控制概述 …… (4)

1.3.2　直驱型(半直驱型)风力发电技术概述 …… (6)

1.3.3　双馈风力发电控制技术研究现状 …… (9)

1.4　本书的研究内容和章节设置 …… (17)

2　双馈感应发电机的数学模型与特性分析 …… (20)

2.1　引言 …… (20)

2.2　三相对称绕组双馈感应电机运行功率特性 …… (20)

2.3　交流励磁功率在绕组、频率归算中的等值计算 …… (25)

2.4　本章小结 …… (26)

3　基于正负序解耦的网侧变流器控制研究 …… (27)

3.1　引言 …… (27)

3.2　网侧变流器控制模型 …… (27)

3.2.1　三相静止坐标系中的数学模型 …… (27)

3.2.2　两相旋转坐标系下的数学模型 …… (29)

3.3　基于电网电压定向的网侧变流器控制研究 …… (30)

3.4　一种基于网侧变流控制的负序电流补偿控制研究 …… (32)

3.4.1　三维 $\alpha\beta0$-$dq0$ 复空间的功率计算方法 …… (32)

3.4.2　网侧变流器功率和直流母线电压脉动分析 …… (33)

3.5　本章小结 …… (36)

4 基于定子磁链定向的双馈感应风力发电机正负序解耦矢量控制研究 …… (37)
4.1 引言 …… (37)
4.2 基于定子正负序磁链定向的转子正负序解耦励磁控制策略 …… (37)
4.3 电压平衡状态下发电机定子 *PQ* 输出和转子电流数值区间分析 … (41)
4.3.1 双馈异步发电机等效电路的功率分析 …… (41)
4.3.2 定子 *PQ* 输出和转子电流数值区间分析 …… (43)
4.3.3 基于 *PQ* 工作点位移的双馈发电机控制方法 …… (43)
4.3.4 基于 *PQ* 工作点位移的双馈发电机控制仿真 …… (44)
4.4 一种基于开关频率函数的 I-PI 双电流闭环参数整定研究 …… (46)
4.4.1 电流 PI 调节内环设计 …… (46)
4.4.2 电流外环设计 …… (47)
4.4.3 双电流闭环调节器参数整定函数自变量分析 …… (48)
4.4.4 双电流闭环调节器参数整定仿真分析 …… (48)
4.5 本章小结 …… (50)
5 基于电网故障暂态分析的双馈风电系统控制研究 …… (51)
5.1 引言 …… (51)
5.2 电压不平衡条件下双馈风电系统的 PS-VS 和 NS-VR 综合控制 … (51)
5.2.1 电压不平衡跌落条件下 PS-VS 和 NS-VR 的数学模型 …… (52)
5.2.2 基于 PS-VS 和 NS-VR 控制目标的综合控制 …… (55)
5.2.3 PS-VS 和 NS-VR 控制目标的动态优化容量分配 …… (57)
5.2.4 仿真分析 …… (58)
5.3 基于频域分析的双馈发电机非线性 crowbar 电路线性化计算 …… (62)
5.3.1 电网电压跌落时双馈机瞬态电流解析 …… (63)
5.3.2 线性 crowbar 电路计算 …… (67)
5.3.3 非线性 crowbar 电路的线性化分析 …… (69)
5.3.4 crowbar 电路仿真研究 …… (71)
5.4 基于暂态磁链补偿前馈的双馈风电低电压穿越强励直流灭磁 …… (74)
5.4.1 电网故障条件下暂态控制方程 …… (75)
5.4.2 电网故障条件下的强励灭磁 …… (77)

5.4.3 灭磁电流归零导数约束条件 …… (79)
5.4.4 暂态强励灭磁可控性分析 …… (80)
5.4.5 仿真分析 …… (82)
5.5 基于定子电流正弦控制的双馈风电低电压穿越强励控制研究 …… (84)
5.5.1 电网故障下的转子电流控制 …… (84)
5.5.2 基于多分量增益的并联比例谐振控制 …… (88)
5.5.3 仿真分析 …… (91)
5.6 本章小结 …… (93)
6 双馈风力发电系统实验研究 …… (95)
6.1 引言 …… (95)
6.2 30 kW 双馈发电机组实验平台 …… (95)
6.3 电网电压不平衡条件下的网侧变流器负序电流补偿实验 …… (97)
6.4 稳态并网和功率因数调节实验 …… (99)
6.5 基于非线性整流 crowbar 电路的低电压穿越实验 …… (100)
6.6 基于暂态磁链补偿前馈的低电压穿越强励直流灭磁实验 …… (102)
6.7 基于定子电流正弦控制的双馈发电机低电压穿越强励控制实验 …… (104)
6.8 2 MW 变流器低电压穿越实验 …… (105)
6.9 本章小结 …… (114)
7 双馈感应电机参数非线性特征分析 …… (115)
7.1 引言 …… (115)
7.2 集肤效应及邻近效应特性分析 …… (116)
7.3 双馈感应电机非线性时变参数分析 …… (119)
7.4 电机参数非线性导致参数求解误差算例分析 …… (123)
7.5 本章小结 …… (136)
8 总结和展望 …… (137)
8.1 总结 …… (137)
8.2 未来研究展望 …… (139)
参考文献 …… (141)

1 绪论

1.1 风力发电的意义和前景

随着全球经济的迅速发展，人类对化石能源的依赖性日益增强。虽然中国常规能源资源总体储量比较丰富，但是无论是人均储量还是消费量，都与世界人均储量与消费量存在较大差距。就全球而言，区域性能源危机发生概率日益增大，如2003年夏季发生在美国和加拿大的大面积停电事件；2005年发生在国内的发电企业“煤荒”事件。同时限制电煤价格与上网电价对国内电力市场的影响更是日益凸显，特别是在世界范围内电力需求量的膨胀性增长现状中，煤炭、石油及天然气的大量消耗导致了探明可开采量迅速下滑。

常规能源的使用同时对生态环境造成了严重影响。液态污染物过量排放造成土壤污染，严重影响河流、湖泊以及近海海域的水资源质量；气态污染物过量排放则造成了严重的空气污染，显著降低了重工业发达地区居民的生活质量，严重影响多物种的生存环境，使得生态链的稳定性受到不可逆的危害。近年来，全国多地PM2.5爆表使“雾霾围城”再一次成为各界热议的话题。2013年9月，国务院发布《大气污染防治行动计划》，明确要加快调整能源结构，增加清洁能源供应。风能作为一种清洁的可再生能源受到了各国的青睐。

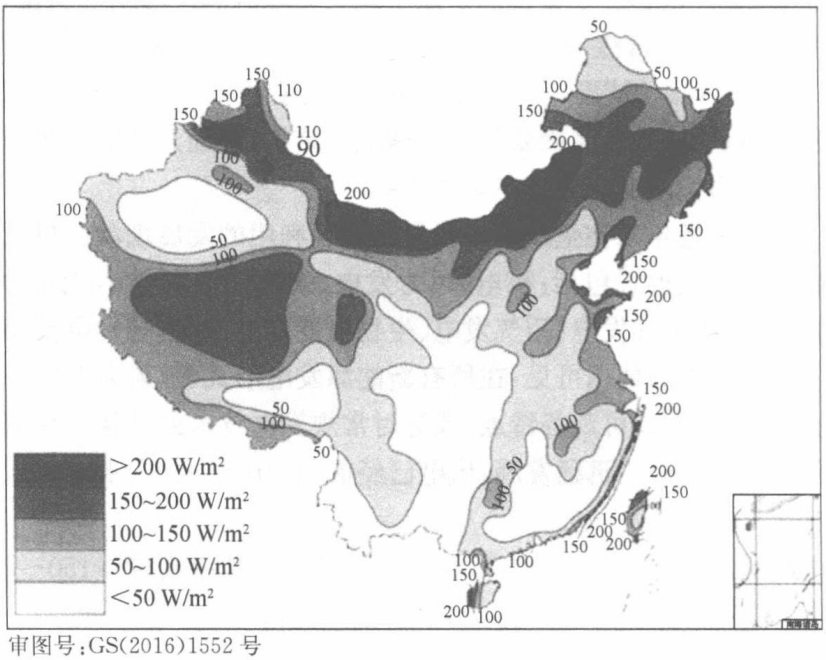
表1.1所示为近年来在全球范围内对新能源利用的发展现状。目前已获得广泛利用的新能源发电形式包括：核电、风力发电、太阳能热发电、太阳能光伏发电、生物乙醇发电、生物柴油发电、沼气发电、生物质能发电、地热能发电及海洋能发电等。由表1.1所给出的数据可见，在所有新能源发电形式中，风力发电技术由于其不产生二次污染、发电量可观等特点，成为对常规发电技术最具替代性的新能源发电方式。随着风电产业的迅猛发展，风电已经成为我国继火电、水电之后的第三大电源。

图1.1所示为我国风资源分布概况。我国陆地风功率密度>150～200 W/m^2的地区占26%，风能密度在50～150 W/m^2的地区占50%[1]。

表 1.1　新能源利用的发展现状

能源	年	单位	中国	世界	中国占比(%)	排前三位国家(地区)
可再生能源新增容量	2010	MW	9 050	312 000	2.9	德国,美国,西班牙
核电累计装机容量	2010	MW	8 590	372 690	2.3	美国,法国,日本
核电发电量	2010	GW·h	73 900	2 767 200	2.7	美国,法国,日本
风电装备产量	2011	MW	18 000	42 175	42.7	中国,印度,德国
风电累计装机容量	2011	MW	62 733	238 604	26.3	中国,美国,德国
风电发电量	2008	GW·h	12 800	260 000	4.9	德国,美国,西班牙
太阳热能装备产量	2009	MW	29 400	36 418	80.7	中国,德国,美国
太阳热能装备累计容量	2009	MW	101 500	171 159	59.3	中国,美国,德国
光伏组件产量	2009	MW	3 400	9 340	36.4	中国,德国,日本
太阳能发电累计容量	2010	MW	893	39 531	2.3	西班牙,日本,意大利
生物甲醇产量	2010	ktoe*	1 399	59 279	2.4	美国,巴西,德国
生物柴油	2010	ktoe	15	14 070	0.1	德国,巴西,阿根廷
沼气产量	2009	ktoe	76 980	223 670	34.4	中国,美国,德国
生物质能装备容量	2010	MW	4 000	62 000	6.5	美国,欧盟,中国
生物质能发电量	2006	GW·h	6 400	239 400	2.7	美国,日本,德国
地热直接利用装备容量	2009	MW	8 898	50 583	17.6	美国,中国,瑞士
地热直接利用量	2005	ktoe	1 080	6 530	16.6	中国,美国,瑞典
地热能装备容量	2007	MW	24	10 706	0.2	美国,菲律宾,印尼
地热能发电量	2006	GW·h	100	59 200	0.2	美国,菲律宾,墨西哥
海洋能装备容量	2007	MW	11	300	3.7	法国,加拿大,中国
海洋能发电量	2007	GW·h	20	600	3.3	法国,加拿大,中国

注:1 ktoe=11.63 GW·h。



审图号:GS(2016)1552 号

图 1.1　我国风力资源分布

风力发电技术发展趋势如下：

首先，风力发电机组单机容量持续增大。目前，世界上主流机型已经从 2000 年的 500～1 000 kW 增加到目前的 2～5 MW。8～10 MW 风力发电机组的概念设计也已经开始。

其次，海上风电将会加速发展。海上风速大，湍流小，发电量比陆上风电场高 20%～40%。对景观和噪声的要求可以放宽，风力机易于排布。另外，近海风电场与沿海地区的用电负荷中心较近，这也是近海风电的先天优势之一。但是，海上风电机组所处环境较复杂，对风电机组控制技术、运输、安装和维护等提出了更高的要求。

此外，风力发电与电网之间的关系日益密切。我国风资源与电网结构的严重不平衡，成为目前风电大发展的瓶颈，并网问题成为业内研讨的热点；与风电波动的自然属性相关的功率调度问题也日益受到重视；风电机组的电网适应性问题，诸如低电压穿越技术，功率因数控制技术等也成为研究热点。

1.2 风力机空气动力特性

风力发电系统的原动风轮机主要包括叶片、轮毂、联轴器。叶片的功能是实现风能至机械能的转换；轮毂用于安装叶片和叶片变桨机构，并且实现叶片和联轴器的连接；联轴器用于传递原动机与发电机之间的机械转矩。根据空气动力学理论，原动风轮机所捕获的风能功率为[2]：

$$P_{\mathrm{w}}=\frac{1}{2}\rho\pi r^{2}v_{\mathrm{w}}^{3}C_{\mathrm{p}}\left(\frac{v_{\mathrm{w}}}{v_{\mathrm{tip_blade}}},\beta\right) \tag{1.1}$$

式中：ρ——空气密度；

r——原动风轮机叶片半径；

v_{w}——瞬时风速；

C_{p}——v_{w}、叶片叶尖速 $v_{\mathrm{tip_blade}}$ 和桨距角 β 的函数，表征风能利用系数。

图 1.2 所示为风力机风能捕获系数在不同叶片叶尖速比（$v_{\mathrm{tip_blade}}/v_{\mathrm{w}}$）和不同风速的曲线。

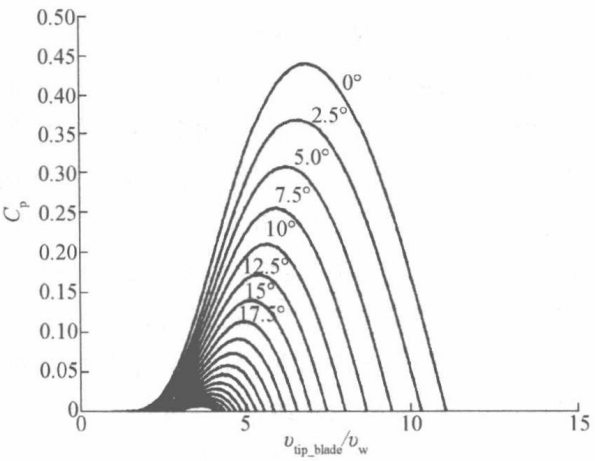


图 1.2 风力机风能捕获系数曲线

风力发电系统在运行过程中可以实现对电力系统注入有功功率和无功功率。目前，有功功率的控制方法主要包括：一为实现发电

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com

机轴转矩的快速响应，以达到最优化的叶尖速比，实现最大风能捕获；二为根据风能预测数据及电力系统的调度指令，通过有功自动调节实现双馈风电系统的自动出力控制，此方法虽然降低了风能至电能的瞬时转换效率，但对提高电网调度的潮流控制性能、提升电力系统的稳定性作用明显。风力发电场域的自动有功无功控制，是风力发电装机容量迅速提升过程中的研究热点。

图 1.3 所示为基于转速函数控制算法的风电机组最大功率跟踪运行区间，包括：待机区间、叶尖速比控制区间、恒转速区间及恒功率区间。当双馈系统处于待机状态时，网侧变流器并网运行、发电机定子处于脱网状态、转子侧变流器处于封锁状态；当风速达到 A 点所示切入风速时，转子变流器进行励磁控制，定子侧并网并向电网输出电能；在 B—C 区间内，变速恒频风电系统通过转矩控制实现叶尖速比控制，实现最大功率跟踪或功率输出曲线优化控制；在 C—D 区间内，风电系统的机械旋转速度达到额定值，采取减小叶尖速比的方法实现转速限定运行；在 D—E 区间内，风电系统的功率输出达到额定值，若风速继续增大，系统将通过继续减小叶尖速比的方法实现恒定功率运行。

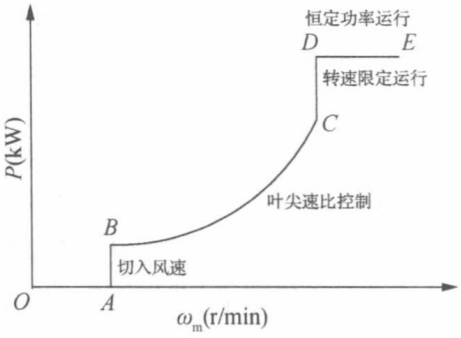


图 1.3　基于转速函数控制算法的风电机组运行区间图

1.3　风力发电系统概述

1.3.1　风力发电系统控制和功率控制概述

风力发电系统主要包括叶片(Blade)、塔架(Tower)、发电机(Primary Generator)和风电电控系统(Electrical Controlling System)。风力发电技术的核心控制目标，是实现风能向机械能的转换和机械能向电能的转换。叶片和塔架承担风能向机械能转换的功能，发电机和相应电控系统承担机械能向电能转换的功能。其中风电电控系统承担着风力发电系统安全运行、可靠发电的关键作用。风电电控系统主要作用包括：风机基本运行功能控制、风机发电状态控制、风机安全刹车停机控制、偏航及解缆控制、液压控制、变桨系统控制、变流系统控制、变速箱和电动机等操作机构检测、设备振动监测、风机电气系统检测和数据采集、环境控制、通信系统配置和状态监测、发电指标统计、风机和风场仿真功能、多重或独立的保护策略。

目前世界上风力发电系统的主要控制技术包括定速恒频控制技术和变速恒频控制技术。定速恒频控制技术可采用异步感应发电机或同步发电机，原动机驱动

发电机转子，定子绕组则不经过任何电力电子变换装置而直接连接于电网。

定速恒频风力发电控制技术的优点是成本低、结构简单，不存在复杂的电控系统需要维护，其缺点是，由于异步感应电机的转子始终运行于近似同步转速、同步电机始终运行于同步转速，无法实现风力机在不同风速状态下的转速调节，导致风力机在扫风面积上无法实现最大气动能量的捕获。由于这种风力发电系统自身不具备无功功率控制的能力，通常在电网接入环节安装无功补偿装置，如电容器组或SVG，其容量依照发电机组容量按一定的比例进行设计。

由图 1.2 可见，变速恒频调节技术使发电机组在输出功率低于额定功率的状态下，通过调节叶尖速比使得效率达到最高，所以变速恒频技术将是目前乃至今后风力发电的主流技术[3-8]。

表 1.2 所示，分别为针对大功率定速恒频风力发电系统、大功率同步电机变速恒频风力发电系统和双馈异步感应发电机变速恒频风力发电系统，在发电机类型、电力电子装置应用、无功补偿、变速装置、风能捕获效率、转速控制和电网柔性接入等方面的分析对比。

表 1.2 大功率风力发电典型方案比较

定速恒频型风电系统	变速恒频型风电系统	
采用异步感应电机（多采用转子鼠笼结构）	永磁或电励磁同步电机	双馈异步感应电机
除采用电力电子软并网装置外，无其他电力电子装置	全功率变流器	电力电子装置的额定容量为发电系统的最大滑差容量
可采用外部无功发生装置调节公共接入点电压	通过网侧变流器实现无功输出，公共接入点电压可控	通过网侧变流器及发电机定子实现无功输出，通过无功控制实现电网接入点电压可控
无需齿轮箱	直驱方式无需齿轮箱，半直驱方式需要低速齿轮箱	需要高速齿轮箱
无法实现最大功率捕获	可实现最大功率捕获	可实现最大功率捕获
需要被动失速控制或主动失速控制	通过变桨伺服机构控制转速	通过变桨伺服机构控制转速
并网和脱网过程均存在电气和机械冲击	柔性并网/脱网	柔性并网/脱网

电力电子装置是变速恒频风力发电系统的核心设备，表 1.3 对电力电子变换装置的若干拓扑结构和特点进行了分析比较[9]。

表 1.3 变流器拓扑方案比较

变流器拓扑	拓扑特征	优点	缺点	备注
电压源两电平背靠背	电压源双侧调制 PWM	结构简单	产生谐波	获广泛应用，适合应用于风电系统
电压源多电平双 PWM	电压源＋钳位	输出高压、低谐波输出	结构复杂	控制策略复杂，成本较高

续表 1.3

变流器拓扑	拓扑特征	优点	缺点	备注
单元串联级联式变流器	H 桥串联	输出电压高，输出电压畸变率小	依赖移相变压器	广泛应用于电机调速领域，可作为轻型直流输电（HVDC-LIGHT）的高电压实现方案
电流源型变流器	直流环节采用电感储能	输出电流畸变率小	变流器输出禁止开路	传动领域有所应用，风电领域鲜见应用
交-交变流器	无直流储能环节	结构简单，省略储能器件	频率调整范围窄，输出电压谐波含量高	多应用于低于工频的调速领域
矩阵式变流器	无直流储能环节	功率因数可调，可实现四象限运行	控制算法复杂，技术尚未成熟	处于理论研究及实验验证阶段，工程领域未得到大规模应用
模块化多电平变流技术	模块化串联，单个模块为单桥臂结构	输出电压高，容错运行能力强，扩展性强	直流单元均压，技术复杂	处于理论研究及实验验证阶段，机车传动领域及输电工程领域得到小规模试验性应用

1.3.2 直驱型（半直驱型）风力发电技术概述

1）直驱型（半直驱型）风力发电技术现状

永磁直驱、电励磁直驱、永磁半直驱和电励磁半直驱风力发电系统，均通过增加同步电机的极对数，实现发电机的低速运行[10-11]。系统通过全功率电力电子变流装置并网。图 1.4 和图 1.5 分别是直驱和半直驱型风力发电系统原理图。直驱型风力发电系统无需故障率较高的高速齿轮箱，提高了系统的可靠性及发电效率，并有效抑制了机械噪音；半直驱型风力发电系统仅需转速变比相对较低的齿轮箱，减少了同步发电机的极对数，减小了发电机体积。永磁直驱和永磁半直驱系统，采用稀土永磁材料进行励磁，系统具有较高的效率，发电机自身损耗较电励磁发电机可降低 25%左

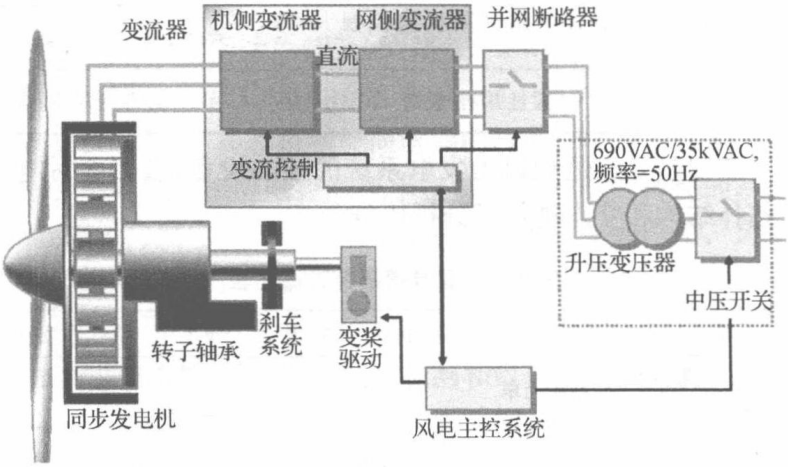


图 1.4 直驱型风力发电系统图

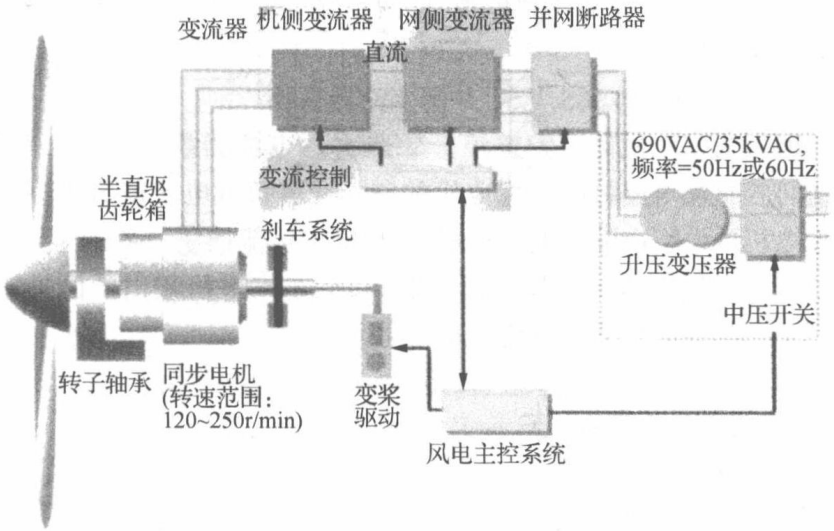


图 1.5 半直驱型风力发电系统图

右，但永磁材料的成本和退磁风险的不确定性是制约永磁直驱和永磁半直驱风力发电系统发展的主要因素；电励磁直驱、电励磁半直驱系统由于采用外部直流电源励磁，克服了永磁励磁的制约，并且较之采用永磁材料具有成本优势。

2）全功率风电变流拓扑结构

（1）机侧不控整流＋DC/DC 变换器＋VSC 并网变流器拓扑

如图 1.6 所示为基于机侧不控整流＋DC/DC 变换器＋VSC 并网变流器拓扑的全功率变流器原理图。其中的六脉二极管电路将同步发电机的三相交流负载电流整流为直流电流。DC/DC 变换器实现对同步电机输出功率、转矩的调节，控制原动机转速，实现最大功率点跟踪。基于 VSC（Voltage Source Converter）的并网变流器实现对直流母线电压的恒压控制，同时将同步发电机产生的能量输入电网。根据发电机定子输出电压的不同范围，图 1.6 中所示的 BOOST 电路也可以替换为 BUCK 电路或 BOOST-BUCK 电路。该拓扑结构机

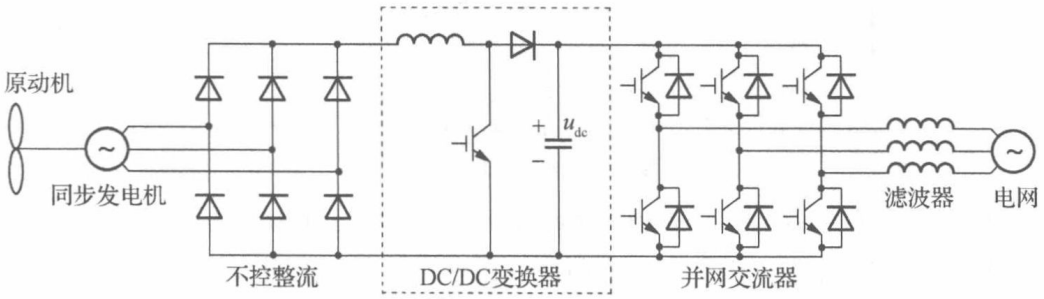


图 1.6 机侧不控整流＋DC/DC 变换器＋VSC 并网变流器拓扑

侧电路简单，缺点是由于采用不控整流，使同步发电机电枢绕组内存在较大的谐波电流并导致转矩脉动。

(2) 机侧 VSC 可控整流＋VSC 并网变流器拓扑

图 1.7 所示为基于机侧可控整流＋VSC 并网变流器拓扑的全功率变流器原理图。机侧可控整流电路将同步发电机的三相交流负载电流整流为直流电流，并控制同步发电机的电枢电流和电磁转矩，实现最大风能捕获。基于 VSC 的并网变流器实现对直流母线电压的恒压控制，同时将同步发电机输出的能量输入电网。该拓扑实现了同步发电机电枢电流的正弦化运行。

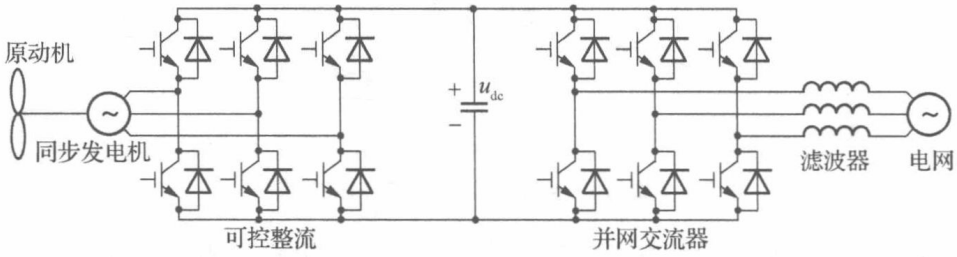
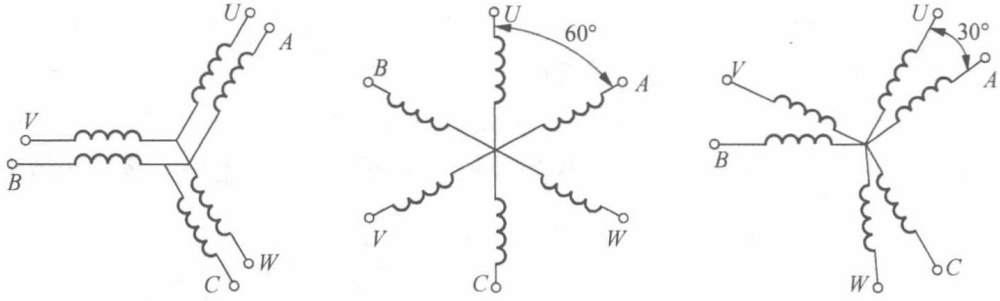


图 1.7　机侧 VSC 可控整流＋VSC 并网变流器拓扑

(3) 机侧 VSC 可控整流＋VSC 并网变流器拓扑的多相变流系统

多相同步电机驱动系统具有容错性好，可实现低电压大功率和低谐波运行。基于以上优点，针对 MW 级风力发电系统的多相同步电机控制技术的研究，成为近年来国内外风力发电领域的研究热点[12-13]。图 1.8(a)～(c)所示为应用较为广泛的三种六相电机的绕组形式，分别为双 Y 不移相绕组、60°相带角度绕组和双 Y 移 30°绕组。



(a) 双 Y 不移相绕组　　(b) 60°相带角度绕组　　(c) 双 Y 移 30°绕组

图 1.8　六相电机绕组形式

如图 1.9 所示为基于双 PWM 背靠背六相变流器全功率变流器原理图。该六相系统实际由两组独立的三相系统构成。该变流系统可以更好地满足 MW 级风力发电大功率接入电网的需要。

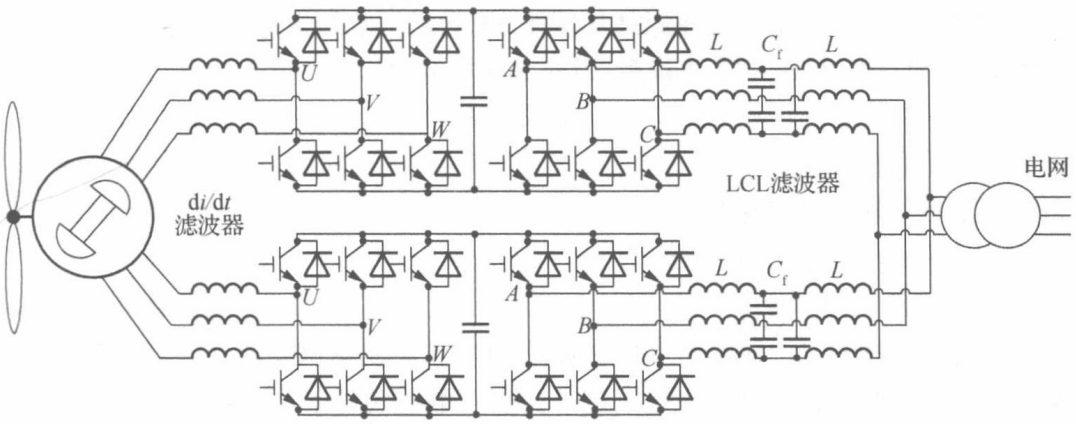
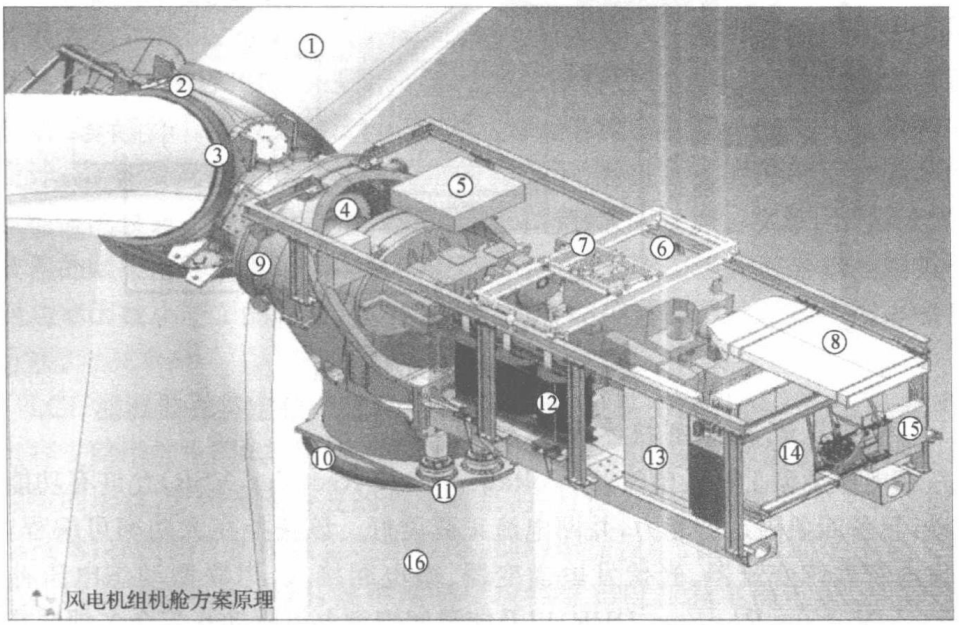


图 1.9 双 PWM 背靠背六相变流器原理图

1.3.3 双馈风力发电控制技术研究现状

双馈控制系统不仅实现了变速恒频控制，而且由于其通过电机转子绕组和功率变换器相连接，变换器的运行功率仅仅是转差功率，双馈调速将转差功率回馈到电机转子或者电网，因此大大降低了变流器的额定功率。双馈型风力发电系统的机舱布局如图 1.10 所示。



①—桨叶；②—轮毂；③—桨叶轴承；④—主轴承；⑤—油冷系统；⑥—发电机；⑦—机舱起重机；⑧—发电机排气口；⑨—机舱底座；⑩—偏航轴承；⑪—偏航齿轮；⑫—变压器；⑬—机舱主控柜；⑭—变流器；⑮—变流器冷却器；⑯—塔筒

图 1.10 双馈型风力发电系统机舱布局

此为试读，需要完整PDF请访问：www.ertongbook.com