



双馈风力发电机变流控制技术

年 珩 潘再平 著



科学出版社

双馈风力发电机变流控制技术

年 珩 潘再平 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是编者在长期从事风力发电机及其并网技术研究基础上编写而成,较为全面地介绍了不平衡及谐波电网电压下双馈风力发电机组机侧与网侧变流器的控制技术。主要内容包括双馈风力发电系统的数学建模和分析方法、谐振控制器的典型构成与分析对比、双馈风力发电系统的矢量控制及直接功率控制技术、采用谐振控制器的双馈风力发电系统控制技术、采用重复控制器的双馈风力发电系统控制技术、采用谐振滑模控制器的双馈风力发电系统控制技术。

本书可供从事可再生能源开发与利用、特别是从事风力发电技术研究的高等学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工程技术人员参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

双馈风力发电机交流控制技术/年珩,潘再平著. —北京:科学出版社, 2015.6

ISBN 978-7-03-044743-2

I. ①双… II. ①年… ②潘… III. ①双馈电机-风力发电机-交流-控制 IV. ①TM315

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 124365 号

责任编辑:余江 于海云 / 责任校对:郭瑞芝
责任印制:霍兵 / 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>

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2015 年 6 月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2015 年 6 月第一次印刷 印张:13 3/4

字数:326 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

销售部电话 010-62134988 编辑部电话 010-62135763-2021

前 言

在全球能源发展的新形势下，绿色、低碳、高效、环保的电力需求推动了对新能源的大力开发。我国作为能源消耗大国，新能源开发利用得到了更多的重视。其中，风能作为新能源中极为重要的能源类型，近年来由于技术的成熟和政策的推动而得到迅猛发展，并在经济性上已逐步达到与常规能源相当的水平。

当前，我国风能开发利用主要遵循采取大规模、高集中的发展模式，风能资源开发密集区与用电负荷中心区域之间呈现逆向分布特点，导致风电场接入的电网末端电能质量常处于各种瞬态、稳态的负序电压扰动、谐波畸变等非理想运行环境，对并网运行风电机组安全、稳定、高效运行造成负面影响，严重时甚至威胁风电场接入点处电网的稳定运行。

基于以上背景，本书以目前主流应用机型——双馈风力发电机组为研究对象，综述并讨论了处于负序电压扰动、谐波畸变电网环境中双馈风力发电机组的变流控制技术，以期从理论基础、关键技术层面为实现双馈风力发电机组高效变流控制提供解决思路与控制方案。本书共 6 章。第 1 章为绪论。第 2 章介绍了不平衡及谐波电网下双馈风电系统数学模型，以及矢量控制和直接功率控制策略。第 3 章介绍了实系数与复系数谐振控制器的典型构成与性能分析对比。第 4 章分别介绍了谐振控制器在双馈风力发电系统矢量控制和直接功率控制中的应用，以实现不平衡及 5、7 次谐波电网下风电机组的高性能运行。第 5 章介绍了重复控制器在双馈风力发电机变流控制的应用，以实现含有高次谐波电压的电网下风电机组的高性能运行。第 6 章介绍了滑模控制器在双馈风力发电机变流控制的应用，以提高风电机组在不平衡及谐波电网电压下的运行鲁棒性。

本书编著者多年来从事风电机组变流控制的理论和应用技术研究，研究工作先后得到国家自然科学基金、国家 863 科技计划等多个项目的支持。本书是在多年研究工作基础上，参考吸收了国内外有关风电变流控制方面的一些研究成果完成的。本书由年珩、潘再平共同编著。宋亦鹏、程鹏、全宇、沈永波也分别参与了部分章节内容的编写工作。在此对本书所附相关参考文献的国内外作者表示感谢。

由于作者水平有限，书中难免存在疏漏或错误，敬请读者不吝指教。

作 者

2015 年 3 月

物理量符号表

$T_{3s/2s}$	三相静止坐标系到两相静止坐标系变换矩阵
$T_{2s/2r}$	两相静止坐标系到两相旋转坐标系变换矩阵
$T_{3s/2r}$	三相定子静止坐标系到两相旋转坐标系变换矩阵
$\alpha\beta$	静止坐标系
abc	定子三相静止坐标系
u	电压瞬时值
i	电流瞬时值
ψ	磁链瞬时值
R	电阻
L	电感
θ_s	两相同步旋转坐标系位置角
θ_r	双馈电机转子位置角
θ_{slip}	双馈电机滑差位置角
ω_l	电网电压同步电角速度
ω_r	电机转子旋转电角速度
ω_{slip}	电机转子滑差电角速度
Ω_r	电机转子旋转机械角速度
dq	两相同步旋转坐标系
dq^+	正转两相同步旋转坐标系
dq^-	反转两相同步旋转坐标系
n_p	双馈电机极对数
$S_{ga}、S_{gb}、S_{gc}$	变流器桥臂开关函数
$v_{ca}、v_{cb}、v_{cc}$	变流器交流侧输出电压
P_e	双馈电机电磁功率
P_{es}	双馈电机定子侧电磁功率
P_{er}	双馈电机转子侧电磁功率

T_e	双馈电机电磁转矩
P_s	双馈电机定子有功功率
Q_s	双馈电机定子无功功率
P_{loss}	双馈电机定、转子铜耗
P_{field}	磁场储能变化的电磁功率
P_g	网侧变流器有功功率
Q_g	网侧变流器无功功率
上标	
+	正转同步速坐标系
-	反转同步速坐标系
5-	反转 5 倍同步速坐标系
7+	正转 7 倍同步速坐标系
*	参考指令
^	共轭矢量
下标	
+	正序基频分量
-	负序基频分量
5-	5 倍频谐波分量
7+	7 倍频谐波分量
s	双馈电机定子绕组
r	双馈电机转子绕组
g	网侧变流器
$d、q$	$d、q$ 轴分量
$a、b、c$	$a、b、c$ 轴分量
$\alpha、\beta$	$\alpha、\beta$ 轴分量

缩 略 语

AC	alternate current	交流
BRC	bandwidth-based repetitive controller	带宽可调重复控制器
BTB	back to back	背靠背
CCF	complex coefficient filter	复系数滤波器
CDSC	cascade delayed signal cancellation	级联信号消去
CWEA	china wind energy association	中国风能协会
DC	direct current	直流
DFIG	doubly fed induction generator	双馈感应发电机
DPC	direct power control	直接功率控制
DSP	digital signal processor	数字信号处理器
DVR	dynamic voltage restorer	动态电压恢复器
FFT	fast fourier transformation	快速傅氏变换
FOGI	first-order generalized integrator	一阶广义积分器
FOVI	first-order vector integrator	一阶矢量积分器
GSC	grid-side converter	网侧变流器
GWEC	global wind energy council	全球风能理事会
IGBT	insulated gate bipolar transistor	绝缘栅双极型晶体管
LF	loop filter	环路滤波器
LUT	look-up table	查表法
MAF	moving average filter	移动平均滤波器
P-CCI	proportional complex-coefficient integral	比例-复系数积分
PD	phase detector	鉴相器
PI	proportional integrate	比例积分
PIR	proportional integrate resonant	比例-积分-谐振
PLL	phase-locked loop	锁相环
PMSG	permanent magnet synchronous generator	永磁同步发电机

PNSC	positive negative sequence calculation	正负序计算
PR	proportional resonant	比例-谐振
P-RCI	proportional real-coefficient integral	比例-实系数积分
PWM	pulse width modulation	脉宽调制
RC	repetitive controller	重复控制器
ROGI	reduced-order generalized integrator	降阶广义积分器
ROVI	reduced-order vector integrator	降阶矢量积分器
RSC	rotor-side converter	机侧变流器
SCIG	squirrel cage induction generator	鼠笼感应发电机
SMC	sliding-mode control	滑模控制
SOGI	second order generalized integrator	二阶广义积分器
SOVI	second order vector integrator	二阶矢量积分器
SRF	synchronous reference frame	同步坐标系
STATCOM	static synchronous compensator	静止同步补偿器
SVC	static var compensator	静止无功补偿器
SVM	space vector modulation	空间矢量调制
VCO	voltage controlled oscillator	压控振荡器
VOC	vector oriented control	矢量控制
WRIG	wound rotor induction generator	绕线感应发电机

目 录

前言

物理量符号表

缩略语

第 1 章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 风力发电技术现状与趋势	2
1.1.2 风力发电系统拓扑结构	4
1.1.3 风力发电并网规范	7
1.2 研究综述	9
1.2.1 双馈风电系统的基本结构	9
1.2.2 双馈风电系统的技术问题	15
1.3 双馈风力发电机的变流器控制	17
1.3.1 双馈风电系统的基本变流控制技术	17
1.3.2 双馈风电系统的“不间断”运行技术	18
1.3.3 双馈风电系统的“优化自治”运行技术	21
第 2 章 双馈风力发电机数学模型及控制基础	27
2.1 引言	27
2.2 理想电网条件下双馈变流器数学模型	29
2.2.1 机侧变流器数学模型构建	29
2.2.2 网侧变流器数学模型构建	33
2.2.3 双馈变流器瞬时功率模型	35
2.3 不平衡以及谐波电网条件下双馈变流器数学模型	38
2.3.1 正转两相同步旋转坐标系下机侧变流器数学模型	38
2.3.2 两相同步旋转坐标系下网侧变流器数学模型	40
2.3.3 双馈变流器瞬时功率数学模型	40
2.4 双馈风电系统控制基础	43
2.4.1 电网电压同步信号检测	44
2.4.2 电流矢量控制策略	53
2.4.3 直接功率控制策略	58
2.4.4 电网电压不平衡以及谐波畸变的危害评估	64

第3章 谐振控制器的典型构成与性能分析	65
3.1 引言	65
3.2 谐振控制器的典型构成	65
3.2.1 实系数与复系数调节器的基本形式	65
3.2.2 实系数与复系数调节器的全频域拓展	68
3.2.3 实系数与复系数积分器的双边实现	73
3.3 谐振控制器的应用基础	74
3.3.1 频率自适应的数字实现	74
3.3.2 数字化实现的相位补偿	76
3.3.3 谐振控制器的参数设计	78
3.4 谐振控制器的性能分析	82
3.4.1 同阶数的谐振控制器的性能比较	82
3.4.2 不同阶数的谐振控制器的性能比较	90
第4章 谐振控制器在双馈风力发电机变流控制的应用	100
4.1 引言	100
4.2 采用谐振控制器的矢量控制技术	100
4.2.1 双馈风力发电机的 PI+SOGI 电流调节技术	100
4.2.2 双馈风力发电机的 PI+SOGI 直接谐振调节技术	109
4.2.3 双馈风力发电机的 PI+ROGI 直接谐振调节技术	118
4.3 采用谐振控制器的直接功率控制技术	124
4.3.1 双馈风力发电机的 PI+SOVI 功率调节技术	124
4.3.2 双馈风力发电机的 PI+ROVI 直接谐振调节技术	132
第5章 重复控制器在双馈风力发电机变流控制的应用	139
5.1 引言	139
5.2 重复控制器的基本原理	140
5.2.1 重复控制的基本思想	140
5.2.2 重复控制的基本结构	140
5.2.3 采样频率与控制频率比为非整数的重复控制调节器	141
5.3 带宽可调型重复控制器及其应用	143
5.3.1 重复控制器结构设计	143
5.3.2 控制系统稳定性分析	149
5.3.3 机侧变流器系统设计	151
5.3.4 实验波形	152
5.4 幅值补偿型重复控制器及其应用	155
5.4.1 重复控制器结构设计	156
5.4.2 谐波电流抑制能力分析	161

5.4.3 控制系统稳定性分析	163
5.4.4 实验波形	164
5.5 小结	168
第 6 章 滑模控制器在双馈风力发电机变流控制的应用	169
6.1 引言	169
6.2 滑模控制的基本原理	169
6.3 双馈变流器积分滑模控制	171
6.3.1 机侧变流器积分滑模控制系统设计	171
6.3.2 网侧变流器积分滑模控制系统设计	177
6.4 双馈变流器谐振滑模控制	182
6.4.1 机侧变流器谐振滑模控制系统设计	182
6.4.2 网侧变流器谐振滑模控制系统设计	187
6.5 小结	191
参考文献	192

第1章 绪 论

1.1 研究背景

能源是向自然界提供能量转化的物质,例如矿物质能源、核物理能源、地理性能源以及大气环流能源等。作为人类赖以生存的物质基础,能源严重制约着人类社会经济的发展。纵观历史,从柴草能源时代到煤炭能源时代再到石油天然气能源时代,每一次能源时代的变迁,伴随而来的都是人类社会生产力和经济的巨大提升和发展。能源已经成为世界各国社会经济增长的最基本保障和动力。而上世纪 70 年代的两次世界石油危机,让人类认识到将要面临的能源紧缺危机,使能源成为了关乎世界安全、稳定的重要因素。煤,石油,天然气是当今世界最重要的能源。这些地球上亿万年前形成的化石能源,属于不可再生能源。而人类社会的高速发展、人类需求的迅速膨胀,都在以人类社会从未有过的空前速度大量地消耗着这些不可再生的化石能源。

而相对于化石能源,新能源是指以新技术和新材料为基础上加以开发和利用的可再生能源,具有取之不尽、周而复始的特点,用其取代不可再生及具有污染性的化石能源,是解决能源短缺和环境污染的有效途径^[1]。2009 年 192 个国家参加哥本哈根世界气候大会并签署了《联合国气候变化框架公约》,表明了不以牺牲后代生存环境、经济资源为代价的可持续发展已经成为人类社会的共识。而在能源领域,实施可持续发展的首要任务就是开发利用可再生清洁能源^[2-3]。

我国能源消耗以煤为主,煤炭大量生产和使用,造成了煤炭资源短缺和环境污染问题。而我国优质化石能源相对不足,石油和天然气资源的探明剩余可采储量目前仅列世界第 13 位和第 17 位^[4]。煤炭的大量消耗,石油和天然气资源的相对不足,使得我国面临能源紧缺的危机,威胁国家能源安全。因此,调整能源结构,减少对石化能源资源的需求与消费,降低煤电的比重,大力发展新能源和可再生能源,是保证我国社会经济持续发展和能源安全的重要任务。2006 年开始实施的《中华人民共和国可再生能源法》^[5]以及 2012 年国务院通过的《节能减排“十二五”规划》^[6]等国家政策的出台也表明了调整能源产业结构、最大限度的开发和利用可再生能源是当前中国亟待解决的重要任务。根据相关规划,到 2020 年我国可再生能源开发利用量将达到 5.3 亿吨标准煤,约占届时一次能源消费量的 16%。然而,由于新能源分布广、能量密度低、波动性大及转换效率低等原因,相对于其丰富的蕴含量,我国对其开发利用的比重还很小。为了满足我国经济增长和环境保护的双重需求,研发新能源开发利用技术,以更高效及更多地获取新能源是我国科学技术人员目前面临的重要任务之一。

早在公元前,人类就利用风力磨面、舂米,用风帆推动船舶前进,埃及人的风帆船、中国人的木帆船、古波斯人的垂直轴碾米风车、伊斯兰人的提水风车及 11 世纪在中东得到广泛应用的风车,无一不是人类利用风能的典型例子。从 14 世纪起,风车就成为了欧洲

不可缺少的原动机，被先后用来汲水、榨油和锯木。1891 年，丹麦教授 Paul La Cour 在阿斯科夫市建造风力发电实验站，通过风电机组电解水用来制造氢，并得到了推广和应用。20 世纪 30 年代，为了提高风能利用率并降低成本，以美国、丹麦、法国和德国为首的欧美国家开始研制中大型风电机组。而化石能源的廉价和充足，使得相对处于劣势的风力发电发展缓慢。直到 20 世纪 70 年代爆发了两次全球性石油危机，人们开始意识到能源紧缺的到来，纷纷开始寻求新的可替代能源。从此，风能的开发利用也开始重新受到重视，风力发电以其费用低廉、可再生及洁净无污染的优势进入了商业化的提速发展阶段。上世纪 90 年代，面对全球能源危机和温室效应的威胁，世界各国纷纷加强对可再生能源发展的政策扶持，推进着大型兆瓦级风电机组和风电场并网技术的日益成熟，使得风电产业进入了飞速发展阶段。

1.1.1 风力发电技术现状与趋势

全球风能理事会 (Global Wind Energy Council, GWEC) 发布的《2014 年风电发展年报》显示，2014 年全球风电累计装机容量达到 369.553GW，过去五年全球风电市场规模扩大了几乎 200GW，预计 2015 年新增装机规模将超过 2014 年^[7]。图 1-1 列出了 2014 年全球新增装机容量和累计装机容量排名前十的国家。其中需重点关注的全球风电发展特点是^[7]：
①欧洲和美国之外的全球其他风电市场去年的表现平稳，中国继续领跑；②2014 年欧洲风电增长率迅速，但主要集中在德国和英国；③从累计装机容量看，中国、美国、德国和西班牙几乎占据了世界风电装机容量的 2/3。随着风电技术和装备水平的快速发展，风电已经成为目前技术最为成熟、最具规模化开发条件和商业化发展前景的新能源。丹麦计划 2025 年风电占到整个电力的 50%，美国提出了 2030 年风电占整个电力的 20% 目标，欧盟 2020 年 20% 可再生能源电力的目标中将有一半来自风电^[8]。而根据国家《可再生能源“十二五”规划》，到 2015 年，我国风电装机总量将超过 1 亿千瓦 (100GW)，其中海上风电 500 万千瓦 (5GW)^[9]。可以说，加快风电产业发展、提高风电在整个电力中的比例已成为世界各主要经济体保障能源安全和保护环境战略决策。

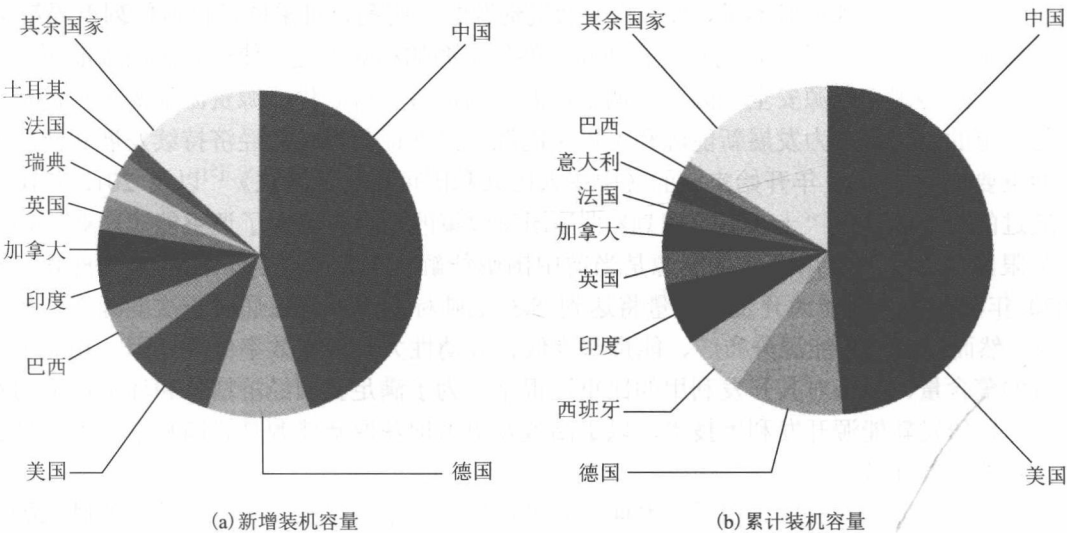


图 1-1 2014 年全球新增/累计装机容量排名前十

据中国风能协会(China Wind Energy Association, CWEA)统计,2014 年中国(不包括台湾地区)新增装机容量 23196MW, 累计装机容量 114609MW, 详见图 1-2, 新增装机和累计装机容量两项数据均居世界第一。

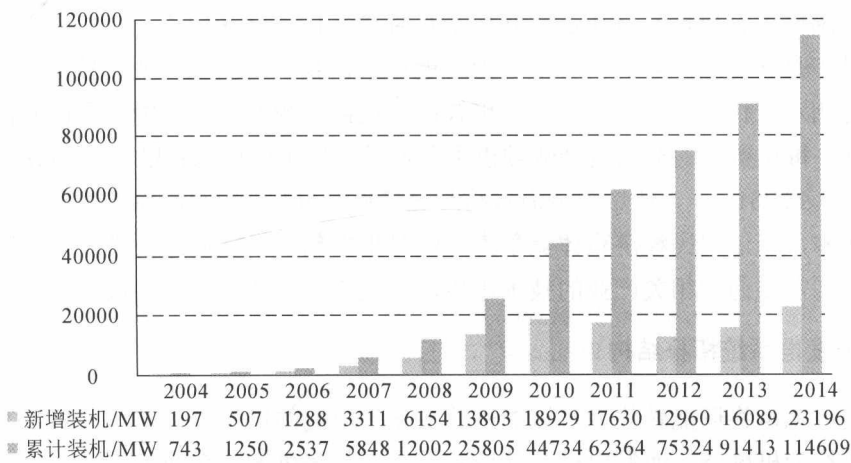


图 1-2 2004-2014 年中国新增及累计风电装机容量

据 CWEA 统计,如表 1-1 所示,2014 年,中国风电有新增装机的制造商共 26 家,机组供应商虽然在减少,但是装机容量却创下历史新高。其中金风科技新增装机 2794 台,新增装机容量 4434MW, 占据 19.12%的市场份额。其次为联合动力、明阳风电、远景能源和湘电风能。2014 年,新增装机排名前五位的风电机组制造商所占市场份额共计为 55.26%, 排名前十位的风电机组制造商所占市场份额达到 80.28%。与 2013 年相比,排名前五的企业中,金风科技同比增长 18.2%,其他四家企业新增装机容量同比增长分别达到 60%以上。另外,值得一提的是东方电气的新增装机容量同比增长 126%。

表 1-1 2014 年中国风电累计装机排名前 10 的机组制造商(数据来源: CWEA)

序号	制造商	装机容量/MW	装机容量占比
1	金风科技	23384.6	20.40%
2	华锐风电	15805	13.79%
3	联合动力	11381	9.93%
4	东方电气	9236	8.06%
5	明阳风电	7600.5	6.63%
6	湘电风能	5527.5	4.82%
7	上海电气	5404.95	4.72%
8	Vestas	4749.6	4.14%
9	远景能源	4383.2	3.82%
10	Gamesa	3597.55	3.14%

尽管 2014 年中国新增装机和累计装机两项数据均居世界第一,但随着新能源产业的快速发展,许多深层次、系统性的矛盾和问题逐步显现出来。除设备产能过剩和质量问题、风电机组吊装后不能及时投产等问题外,风电的送出消纳问题始终困扰着从业人员,干扰并影响风电产业的健康发展^[10]。迄今为止,新能源仍然被看作是补充能源,仅仅在满足用

电需求增量上考虑问题,而没有形成新能源要替代化石能源的共识,表现在现行的电力运行调度方式,不适应新能源电力并网或直接消费的新形势和新情况。例如,《可再生能源法》关于可再生电力全额保障性收购的要求难以落实,导致风电弃风限电现象严重,仅 2012 年一年,全国风电弃风电量就超过 200 亿千瓦时($2 \times 10^{10} \text{ kW} \cdot \text{h}$)^[9]。

技术进步是新能源产业的核心生命力。近年来,我国新能源产业的技术水平有了长足进步,但是相对于传统化石能源,成本仍较高,还需要政府补贴。随着我国新能源发电规模持续增加,每年所需的补贴资金数额也不断增长。按照现行的补贴标准测算,2013 年需要 380 亿元,到 2015 年,补贴资金需求将超过 700 亿元^[9]。如此高额的补贴将会推高全社会的用能成本,降低国民经济整体竞争力,同时也抑制了新能源产业的发展空间。解决这个问题,迫切需要通过相关产业的技术进步,尽快降低新能源发电的成本。

1.1.2 风力发电系统拓扑结构

风力发电就是将风能转化为机械能进而转化为电能的过程,其中风力机及其控制系统是将风能转换为机械能,而发电机及其控制系统则是将机械能转换为电能。风力机作为风力发电系统的关键部件之一,关系着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结构形式,前者是当前最常见和最成熟的设计方案。实现风能采集与变换的风力机功率调节是风力发电系统的关键技术之一,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^[11-12]。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、效率和输出电能质量。

本节中将根据风力发电系统所采用的发电机类型为依据,将其分为如下两大类:第一类,基于异步电机的风力发电系统,其中分别包含定速笼型异步电机、转子外串电阻绕线异步电机、双馈型绕线异步电机、全功率型变速笼型异步电机等;第二类,基于同步电机的风力发电系统,其中分别包含全功率三相桥型单级结构、二极管整流与直流变换器二级结构、开绕组发电机分布式结构等。

1. 基于异步电机的风力发电系统

图 1-3 给出了基于定速鼠笼型异步发电机的风力发电系统拓扑结构。20 世纪八九十年代被较多风机制造商、特别是丹麦风机制造商所广泛采用的风力发电系统结构^[13-14],即采用传统鼠笼式转子异步发电机(squirrel cage induction generator, SCIG)和上风式、失速调节和三桨叶风力机配置结构。为了避免并网电流冲击使用了电机软启动器、为了补偿无功功率采用电容器补偿。此外,为了满足高、低风速均能发电运行,发电机设计有两组不同极对数的绕组以满足不同风速下的高效运行。这种风电系统拓扑的最大缺点是机组转速不可控、并网连接为刚性、需配置多级变速齿轮箱和从电网吸收大量无功。目前,国外 Micon(已并入 Vestas)、Bonus(现为 Siemens)、Made 和 Nordex 等公司还有该类风机结构产品。

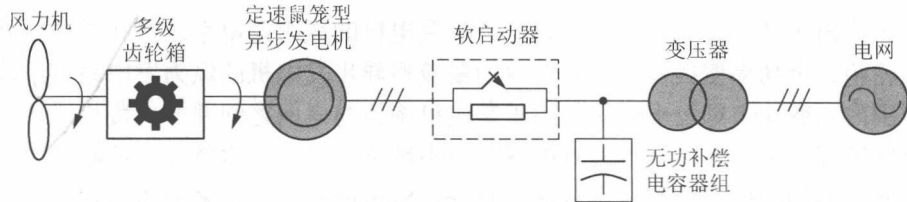


图 1-3 基于定速鼠笼型异步发电机的风力发电系统拓扑结构

图 1-4 给出了基于转子外串电阻绕线式异步发电机的风力发电系统拓扑结构，该类产品于 20 世纪 90 年代中期由丹麦风机制造商 Vestas 生产。该结构采用绕线式转子异步发电机 (wound rotor induction generator, WRIG)，通过电力电子变换器改变发电机转子外部所串电阻大小，控制转子电阻耗能以获取变速运行，但其转差一般最大控制在 10% 范围内、即可在 10% 同步速以上运行。其主要缺陷在于转子吸收的能量全部消耗在转子电阻发热上，且需配置转子碳刷、无功补偿装置和软启动器。目前，Vestas 和 Suzlon 两家公司仍有该产品。

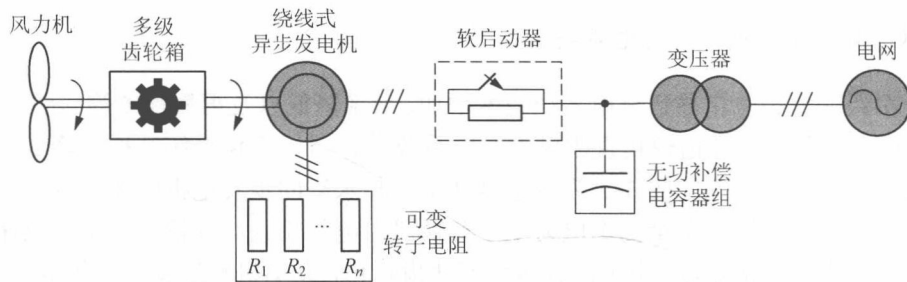


图 1-4 基于转子外串电阻绕线式异步发电机的风力发电系统拓扑结构

图 1-5 给出了基于双馈型绕线异步发电机的风力发电系统拓扑结构，即双馈型异步发电机 (doubly fed induction generator, DFIG) 型式。与图 1-4 所示相比，由于是通过电力电子变换器对 DFIG 转子进行交流励磁，该风电系统随着转子励磁变频器容量的增加具有更宽的调速范围，一般为同步速附近 $\pm 30\%$ ，此时相对应的转子励磁变频器容量仅为发电机额定功率的 30% 左右。该拓扑结构的缺陷是：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、碳刷需要经常维护，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，如电网对称、不对称等电压故障相当敏感；在现代电网规范要求风电系统在电网故障下不脱网或故障穿越运行条件下的系统控制策略和保护方案比较复杂。然而其交流励磁变频器容量小和电机体积小的显著优点使该拓扑结构成为全球许多风机制造商青睐的风力发电系统结构型式，得到了最大的研究和制造，如 Vestas、Gamesa、Repower 和 Nordex 等。

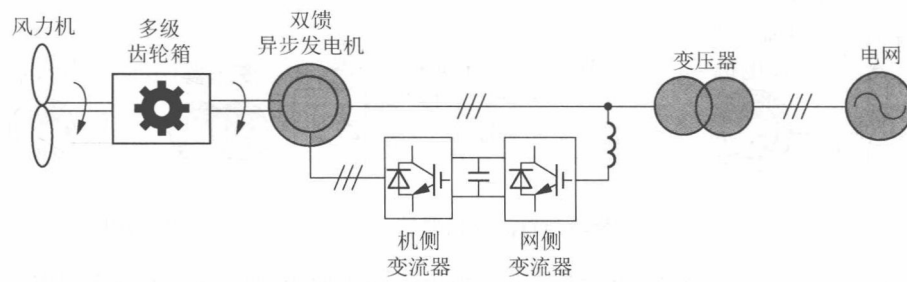


图 1-5 基于双馈型绕线异步发电机的风力发电系统拓扑结构

图 1-6 给出了基于全功率型变速笼型异步发电机的风力发电系统拓扑结构，其采用多级变速齿轮箱、全功率变换器和较高转速的鼠笼型异步发电机的风力发电系统结构，实现了全速范围内的变速恒频发电运行。由于其电机绕组与电网之间并非直接相连，而是由全功率变流器进行能量传输，因此其对电网故障不敏感，对电机本体控制策略简单，然而由于全功率变流器的使用导致其成本较高。目前，Siemens 公司正采用该拓扑结构生产出了转速范围为 595~1547r/min 的 3.6MW (Bonus107) 风电机组。

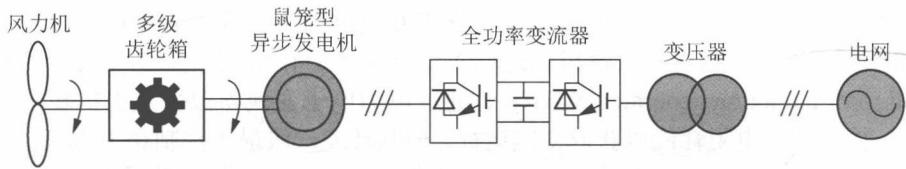


图 1-6 基于全功率型变速笼型异步发电机的风力发电系统拓扑结构

2. 基于同步电机的风力发电系统

由于多级变速齿轮箱导致风电系统成本增加、效率降低以及可靠性差等问题，图 1-7~图 1-9 给出了三种无变速齿轮箱直驱风力发电系统^[15]，可以简化系统结构，降低日常维护成本以及提高系统可靠性。图 1-7 为基于全功率三相永磁同步发电机的风力发电系统拓扑结构，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发电运行。但其缺点表现为，由于没有多级变速齿轮箱，发电机转速受风力机低转速约制，即转速非常低，一般为 10~25r/min，导致输送相同容量功率条件下，发电机转矩很大，于是发电机体积较大、且极对数多；永磁材料价格较高，从而导致发电机成本上升。

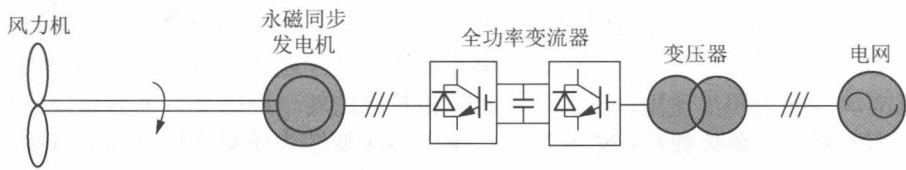


图 1-7 基于全功率三相永磁同步发电机的风力发电系统拓扑结构

图 1-8 给出了基于二极管整流与直流变换器结构的永磁风力发电系统拓扑结构，其与图 1-7 相比，将机侧变流器采用不控整流与 Boost 变流器来代替，从而降低系统成本，但由于在电机侧采用不控整流将导致其定子输出电流畸变，从而导致电磁转矩中存在波动分量，对电机轴承及转轴部分易造成机械损伤。

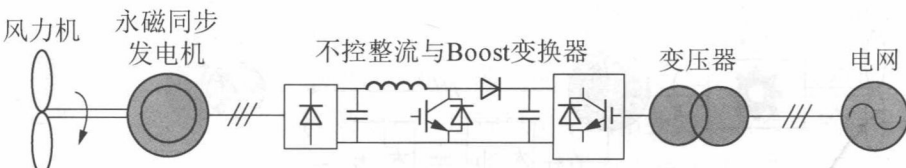


图 1-8 基于二极管整流与直流变换器的永磁风力发电系统拓扑结构

图 1-9 给出了基于开绕组发电机分布式的永磁同步发电机的风力发电系统拓扑结构，其与上述两种拓扑结构最大不同为，其采用的发电机为开绕组永磁同步发电机，定子绕组