

双馈风力发电系统 设计与并网运行

夏长亮 著



科学出版社

双馈风力发电系统 设计与并网运行

夏长亮 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书内容主要涵盖双馈风力发电系统设计、运行与控制,重点围绕双馈风力发电系统运行特性分析、双馈风力发电机设计与优化、功率变换器设计与控制等一系列关键技术问题进行详细论述。全书不仅包含双馈风力发电系统设计与并网运行方面的基础性应用技术,而且涵盖该领域的前瞻性研究成果,为风力发电相关领域的理论探索与应用研究提供了一定的理论依据与技术基础。

本书可作为高等学校相关专业本科生和研究生的教材,也可作为风力发电相关领域工程技术人员的参考书。

图书在版编目 CIP 数据

双馈风力发电系统设计与并网运行/夏长亮著. —北京:科学出版社,2014
ISBN 978-7-03-042599-7

I. 双… II. 夏… III. 风力发电系统-系统设计 IV. TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 275651 号

责任编辑:魏英杰 / 责任校对:刘小梅
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 11 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014 年 11 月第一次印刷 印张:15 3/4

字数:314 000

定价:80.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

由全球化进程的不断加快带来的能源危机、资源短缺和环境恶化等问题日益突出。为了寻求能够满足社会可持续发展的能源形式,世界各国投入了大量的科研力量。风能作为一种高效、清洁、可再生的新能源引起了越来越多的关注,风力发电技术也在全球范围内得到了快速发展。与此同时,随着电力电子技术的不断进步与成熟,依靠功率开关器件作为变流装置的变速恒频风力发电机组也逐步成为主流机型。

变速恒频双馈风力发电机组是一种采用绕线式双馈异步发电机作为机电转换环节,通过控制转子侧功率变换器调整发电机励磁,实现在发电机转速可调情况下并网运行的风力发电系统。它突破了传统机电系统必须严格同步运行的限制,实现了风电机组和电网之间的柔性连接,具有调速性能优良、功率调节灵活、励磁容量较小等优点,是当前风力发电技术重要的发展方向之一,具有广阔的应用前景。

全书共六章。第一章介绍风力发电的发展现状及其系统控制技术。第二章介绍双馈风力发电系统中各组成部分的数学模型,并详细阐述双馈风力发电系统在超同步和亚同步运行状态下的有功功率和无功功率流动关系。第三章针对双馈发电机的电磁设计进行介绍,建立磁场解析模型,利用粒子群算法对设计结果进行优化,并结合有限元分析软件讨论电机电磁场分布情况。第四章介绍多种基于不同算法的网侧变换器控制策略,包括传统矢量控制、模型预测控制、比例谐振控制以及无差拍控制等,并对这些控制算法进行实验验证。第五章分别针对正常电网情况下与电网故障情况下双馈风力发电系统的运行特点,将多种算法应用到转子侧变换器控制当中,并详细介绍这些算法的具体实现方式。第六章介绍双馈风力发电系统硬件实验平台搭建与软件算法设计,并对实验结果进行详细分析。

本书是作者在风力发电系统运行与控制领域多年研究工作的基础上完成的一部学术著作,是作者主持的多个国家级与省部级基金项目的研究成果,包括作者所指导的多名博士研究生与硕士研究生的研究工作,其中陈炜、阎彦、王志强、王慧敏、宋战锋、刘涛、王萌、陈焱斐、耿秀杰等参与了本书部分章节的编写与校核工作。

本书的完成离不开前人所做的贡献,在此对本书所参考的相关文献、期刊、标准和专利等内容的原作者表示感谢。

限于作者的水平,书中遗漏和不当之处在所难免,恳请广大同行、读者不吝指正。

友亮

2014年6月

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 风力发电发展现状	1
1.1.1 全球风力发电发展现状	1
1.1.2 我国风力发电发展现状	3
1.2 风力发电系统主流技术形式	5
1.2.1 发电机技术形式	5
1.2.2 功率变换器技术形式	6
1.3 风力发电系统控制技术	9
1.3.1 风能吸收及载荷抑制	9
1.3.2 并网发电与功率变换	11
1.3.3 电网故障下稳定运行与控制	13
1.3.4 风力发电系统控制技术的发展趋势	14
参考文献	16
第二章 双馈风力发电系统运行特性分析	17
2.1 双馈风力发电系统数学模型	17
2.1.1 双馈风力发电机	17
2.1.2 功率变换器	24
2.2 双馈风力发电系统运行特性	27
2.2.1 变速恒频运行特性	27
2.2.2 功率传输特性	28
参考文献	31
第三章 双馈风力发电机设计与优化	32
3.1 双馈风力发电机设计方法	32
3.1.1 设计要求	32
3.1.2 设计特点与方法	33
3.1.3 设计流程	42
3.2 双馈风力发电机优化设计	43

3.2.1	优化模型	43
3.2.2	混合粒子群优化算法	45
3.2.3	多目标 Pareto 最优解集	50
3.2.4	优化设计流程	52
3.3	优化设计案例分析	53
3.3.1	优化参数设置	53
3.3.2	方案对比	55
3.3.3	优化设计结果	61
3.4	双馈风力发电机有限元分析	65
3.4.1	有限元模型建立	65
3.4.2	空载特性分析	65
3.4.3	负载特性分析	67
3.4.4	故障状态分析	69
	参考文献	73
第四章	双馈风力发电系统网侧变换器控制	74
4.1	电网电压定向矢量控制	74
4.1.1	网侧变换器矢量控制系统	74
4.1.2	运行特性分析	76
4.2	鲁棒有限状态模型预测控制	80
4.2.1	传统有限状态模型预测控制器设计	81
4.2.2	误差分析与观测器设计	85
4.2.3	鲁棒模型预测控制器结构	90
4.2.4	运行特性分析	91
4.3	定频式模型预测控制	97
4.3.1	定频式模型预测控制器设计	97
4.3.2	扰动观测器设计与稳定性分析	101
4.3.3	运行特性分析	105
4.4	比例谐振控制	112
4.4.1	比例谐振控制器	112
4.4.2	电网电压不平衡下功率补偿控制策略	113
4.4.3	运行特性分析	121
4.5	无差拍功率控制	125

4.5.1	两相静止坐标系下网侧变换器瞬时功率分析	126
4.5.2	网侧变换器无差拍功率控制策略	127
4.5.3	运行特性分析	131
参考文献		135
第五章	双馈风力发电系统转子侧变换器控制	137
5.1	电网电压定向矢量控制	137
5.1.1	空载并网励磁控制	137
5.1.2	发电运行励磁控制	140
5.1.3	运行特性分析	143
5.1.4	实验结果分析	148
5.2	积分滑模励磁控制	154
5.2.1	滑模控制匹配性分析	155
5.2.2	积分滑模控制器设计	156
5.2.3	运行特性分析	159
5.3	低电压故障下比例谐振控制	163
5.3.1	比例谐振控制器设计	164
5.3.2	运行特性分析	173
5.4	电网不平衡下多目标切换控制	179
5.4.1	多目标控制器设计	180
5.4.2	运行特性分析	188
参考文献		193
第六章	双馈风力发电系统功率变换器设计与运行控制	195
6.1	双馈风力发电系统组成	195
6.2	功率变换器参数匹配设计	197
6.2.1	功率变换器额定值设计	198
6.2.2	功率部件参数计算	200
6.3	双馈风力发电系统硬件电路	201
6.3.1	硬件结构	201
6.3.2	功率电路	203
6.3.3	控制电路	205
6.3.4	接口电路	206
6.4	功率变换器软件设计	210

6.4.1 参数设计	210
6.4.2 软件设计	220
6.5 双馈风力发电机组实验平台	233
6.5.1 网侧变换器启动与负载扰动实验	234
6.5.2 双馈风力发电系统并网及发电运行实验	236
参考文献	241

第一章 绪 论

目前,能源短缺与能源开发利用带来的环境问题已成为制约社会进步和经济增长的瓶颈。调整能源结构,建立清洁、可持续的新型能源供应体系,实现从以化石能源为主的单一能源结构向以可再生能源为代表的多元化能源结构的战略转变迫在眉睫。在众多的可再生能源形式中,风能资源丰富、分布广泛,能够显著降低温室气体的排放,减轻生态和环境压力,改善能源供应的安全性,是解决世界能源问题的有力候选方案。风力发电是风能的主要利用方式,具有较好的经济效益和社会效益,是当今世界可再生能源开发中技术最为成熟的发电方式之一,因此对风力发电的开发利用具有重要的战略意义。

1.1 风力发电发展现状

1.1.1 全球风力发电发展现状

作为风能的主要利用方式,风力发电在全球电力市场上呈现出强劲的发展势头。全球风能理事会公布的最新数据显示,2013 年全球风力发电新增装机容量 35GW。截至 2013 年底,全球累计装机容量达到约 318GW。1996 年~2013 年全球风力发电新增装机容量统计^[1]如图 1.1 所示。

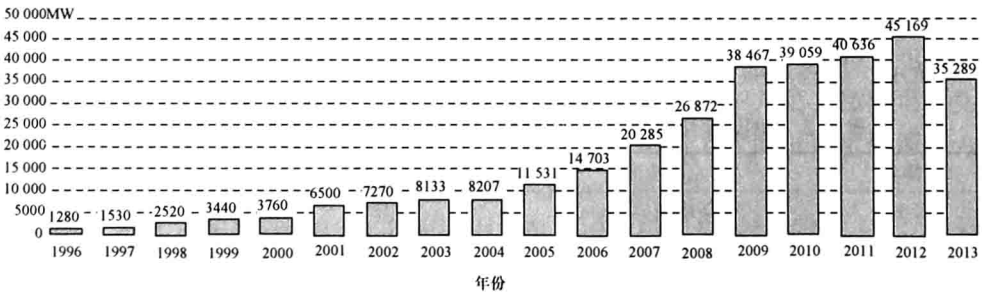


图 1.1 1996 年~2013 年全球风力发电新增装机容量统计情况

由图 1.1 可以看出,1996 年~2012 年全球风力发电产业发展迅猛,年度新增装机容量屡创新高。2013 年,受美国风能生产税抵减法案到期的影响,全球风力发电新增装机容量呈现衰退趋势,风力发电累计装机容量增速放缓。截至 2013 年底,全球共有 24 个国家的风力发电累计装机容量超过 1GW,排名前十位的国家及其市场份额如表 1.1 所示。

表 1.1 截至 2013 年底风力发电累计装机容量排名前十位的国家及其市场份额

排名	国家	装机容量/MW	市场份额/%
1	中国	91 412	28.7
2	美国	61 091	19.2
3	德国	34 250	10.8
4	西班牙	22 959	7.2
5	印度	20 150	6.3
6	英国	10 531	3.3
7	意大利	8552	2.7
8	法国	8254	2.6
9	加拿大	7803	2.5
10	丹麦	4772	1.5

由表 1.1 可以看出,全球风力发电装机主要集中在亚洲、美洲和欧洲。其中,中国和美国的装机容量之和占据全球总装机容量的 47.9%。风力发电产业的发展与各国政府的政策支持密切相关,各国政府已出台税收优惠、价格支持、上网电价分摊和投资补贴等多种措施鼓励风力发电产业进步。例如,美国政府通过金融支持,由联邦和州政府提供信贷资助来扶持风力发电行业;德国和西班牙政府采取财政扶持、直接补贴及固定价格的政策有效地推动风力发电产业开发;印度政府通过鼓励外来投资和加强对外交流合作发展风力发电。正是各国政府的优惠扶持政策,进一步促进了世界风力发电市场的繁荣发展。

在全球风力发电装机容量不断攀升的同时,风力发电制造技术和控制技术得到了快速发展,涌现出许多大型风力发电设备制造公司。据丹麦行业咨询机构 BTM 统计,2013 年全球风力发电市场排名前十的设备供应商及其市场份额如表 1.2 所示。这些厂商为风力发电产业的发展作出了重要贡献。

表 1.2 2013 年全球风力发电市场排名前十的设备供应商及其市场份额

排名	制造商	装机容量/MW	市场份额/%
1	维斯塔斯(Vestas)	4893	13.1
2	金风科技	4112	11
3	安耐康(Enercon)	3687	9.8
4	西门子(Siemens)	2776	7.4
5	通用(GE)	2458	6.6
6	歌美飒(Gamesa)	2069	5.5
7	苏斯兰(Suzlon)	1995	5.3
8	国电联合动力	1488	4
9	明阳电力	1297	3.5
10	恩德	1254	3.3

近年来,由于欧美市场对于风力发电系统需求量的减少以及中国低价格风力发电系统逐渐步入国际市场,全球风力发电系统价格同比大幅降低。同时,大型风力发电系统成为全球风力发电市场的主流,并且得到了风力发电设备供应商的普遍关注。2013 年安装的风力发电系统平均容量已达到 1.9MW。目前,维斯塔斯公司生产的 V164 型 8MW 风力发电系统已在丹麦进行并网测试。我国的金风科技、国电联合动力及明阳电力等公司也对 6MW~6.5MW 风力发电系统开展了测试工作。

1.1.2 我国风力发电发展现状

我国风力发电产业的发展经历了示范阶段(1986 年~1993 年)和商业化阶段(1993 年至今)。1986 年,山东荣成建立了 3 台由维斯塔斯公司生产的 55kW 风力发电系统,标志着我国并网型风力发电产业发展时代的开始。1989 年,新疆和内蒙古的两个风力发电示范项目分别安装了 13 台 150kW 和 5 台 100kW 风力发电系统。在国家财政的支持下,这些工程为我国风力发电产业的示范性发展创造了条件。从此,采用进口系统的风力发电场在全国纷纷安装并投网发电运行。

1994 年,为了提高风力发电在电力市场中的竞争力,前国家电力部印发了有关风力发电上网电价补贴的相关规定,保证了投资商的资金安全。1994 年~1997 年间我国风力发电市场呈现出了快速发展的态势。1997 年,我国风力发电装机容量首次实现成倍增长。然而,随着电力供应体系向市场化方向的改革和过渡,风力发电产业由于成本过高且缺乏政策支持,在随后几年中发展缓慢。2003 年,国家发改委发起了为期 25 年的风力发电特许权政策,目的在于推动大型风力发电场的规模化发展。通过公开招标选择风力发电场建设项目的投资者,这一措施在增大国内厂商生产能力的同时使风力发电装机容量迅速增加。为了进一步推进可再生能源的发展,全国人大常委会于 2005 年 2 月审议通过了《中华人民共和国可再生能源法》。《中华人民共和国可再生能源法》及其实施细则为我国可再生能源产业的发展注入了强劲动力,风力发电产业也进入快速发展阶段。

图 1.2 为 1996 年~2013 年我国风力发电新增装机容量统计情况。

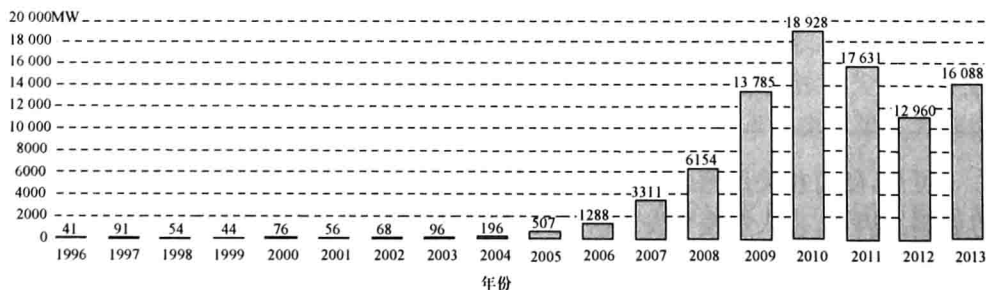


图 1.2 1996 年~2013 年我国风力发电新增装机容量统计情况

由图 1.2 可以看出,2005 年~2010 年,我国风力发电产业呈现出迅猛发展的势头,风力发电累计装机容量连续多年以每年翻番的速度攀升。2011 年,在弃风限电、资金压力、设备质量和管理水平等因素的影响下,我国风力发电产业经历了前所未有的困难,累计装机容量增速放缓。全球风能理事会在 2011 年年度报告中指出,中国风力发电产业在经历了连续多年的爆发式增长后,进入行业整合期。2014 年,全球风能理事会在其年度报告中指出,2013 年中国新增装机容量逾 16GW,产业发展形势喜人,中国风力发电在 2010 年达到最高增长后的行业整合期即将结束,中国再次成为全球风力发电新的增长点。此外,随着近海风电项目的有序推进,我国海上风电发展大幅提速,成为近年我国风力发电产业发展的亮点。国家能源局风电发展规划指出,2020 年我国风电总装机容量将达 200GW,其中海上风电装机容量达到 30GW,风电年发电量达到 390TWh,风电发电量在全国发电量中的比重将超过 5%。

从区域发展方面来看,风力发电已成为在全国范围内广泛使用的新能源发电方式。截至 2013 年底,全国共有 18 个省(自治区、直辖市)风力发电累计装机容量超过 1GW,位列前十位的省(自治区、直辖市)如表 1.3 所示^[2]。由于“三北”地区风能资源非常丰富,风力发电装机容量多集中于这些地区。其中,内蒙古以约 20GW 的累计装机容量名列首位,约占全国风力发电累计装机容量的 22%。

表 1.3 2013 年我国各省市风力发电新增及累计装机容量情况(前十位)

排名	省(自治区、直辖市)	新增容量/MW	累计容量/MW
1	内蒙古	1647	20 270
2	河北	521	8500
3	甘肃	617	7096
4	山东	1290	6981
5	辽宁	640	6758
6	新疆	3146	6452
7	黑龙江	623	4887
8	宁夏	885	4450
9	吉林	383	4380
10	山西	1309	4216

可见,随着相关优惠政策的逐步实施,风力发电逐步克服技术、成本和资金等方面制约因素,步入规模化发展阶段,已成为在我国广泛使用的新能源发电方式,在我国多元化能源体系构建和电力供应中发挥着举足轻重的作用。在风电产业规模化发展的现有形势下,风力发电系统面临着不断提升的运行与控制需求。围绕

风力发电系统控制技术研究 and 探索具有重要意义,相关成果能够在提升风力发电系统运行效能的同时,满足日益提升的运行与控制需求,对于大型风力发电系统设计、运行与控制具有重要参考价值和广泛应用前景。

1.2 风力发电系统主流技术形式

风力发电系统是由风机、发电机和功率变换器等组成的复杂机电系统。其中,发电机和功率变换器将机械功率转换为电功率并实时输至电网,是风力发电系统的关键与核心,其运行特性及控制策略直接决定了风力发电系统的运行效能。

1.2.1 发电机技术形式

在风力发电产业发展初期,风电机组设备供应商多采用定速或双速感应发电机,并为其配备软启动器,避免并网电流冲击。随着风电机组性能需求的不断提升,特别是变速恒频技术的广泛采用,双馈风力发电系统和采用同步发电机的直驱式风力发电系统逐渐占据了市场主导地位。

变速恒频双馈风力发电系统具有功率变换器容量小、功率调节灵活等显著优点。维斯塔斯 V90/3MW、通用 XLE/1.5MW、苏斯兰 MM104/3.4MW、歌美飒 G90/2.0MW 等机型均采用该类系统。由于难以制成多极低速电机,双馈发电机需配备多级变速齿轮箱(通常为三级变速),故障率高且需经常维护,给机组的可靠运行带来不利影响。此外,由于定子绕组直接与电网相连且转子励磁电流受功率变换器容量制约,该类发电机对电网电压跌落、不对称等故障较为敏感。

为了省去多级变速齿轮箱、改善风力发电系统的可靠性,采用同步发电机的直驱式变速恒频风力发电系统应运而生。该类发电机转子与风机直接相联,定子经全功率变流器并网发电,与电网间形成隔离,具有较强的故障穿越和无功补偿能力。安耐康公司生产的 E126/7.5MW、E101/3.0MW 等多款机型采用了基于电励磁的同步发电机。由于需配备独立励磁电源提供直流励磁,基于电励磁的同步发电机运行效率受到一定影响。永磁同步发电机在功率密度和运行效率方面具有显著优势,被应用于歌美飒 G90/2.0MW、西门子 SWT101/3MW、金风 70/1.5MW 等多个机型。风力发电系统运行过程中的高温、过载、短路等工况易诱发永磁体产生不可逆去磁,影响系统的稳定运行和使用寿命。该类发电机在设计时需考虑永磁体的磁稳定性,在永磁体材料与尺寸选取、减小永磁体损耗及保证散热等方面采取相应措施。

由于省去了多级变速齿轮箱,直驱式变速恒频风力发电系统中的同步发电机转速较低。为保证其输出电压和频率在正常范围内,同步发电机需要采用较多的极对数和较大的定转子直径。随着单机容量的增大,同步发电机体积过于庞大,给

机组设计、制造、运输与安装等带来了很大困难。为了解决这一问题,歌美飒公司 G128/4.5MW 机型采用半直驱结构,选用了极对数较少的中速同步发电机,风机与发电机之间采用双级齿轮箱增速的半直驱结构。事实上,半直驱式风电系统是多级变速双馈风力发电系统与直驱式同步风力发电系统优点与不足的权衡与优化。

1.2.2 功率变换器技术形式

作为发电机与电网间的接口,功率变换器是风力发电系统的关键与核心。功率变换器及其控制系统是风力发电系统稳定与可靠运行的薄弱环节,直接关乎整机的系统可靠性,如图 1.3 所示^[3]。因此,如何提高功率变换器的可靠性是风力发电系统设计、运行与控制的主要关注点。

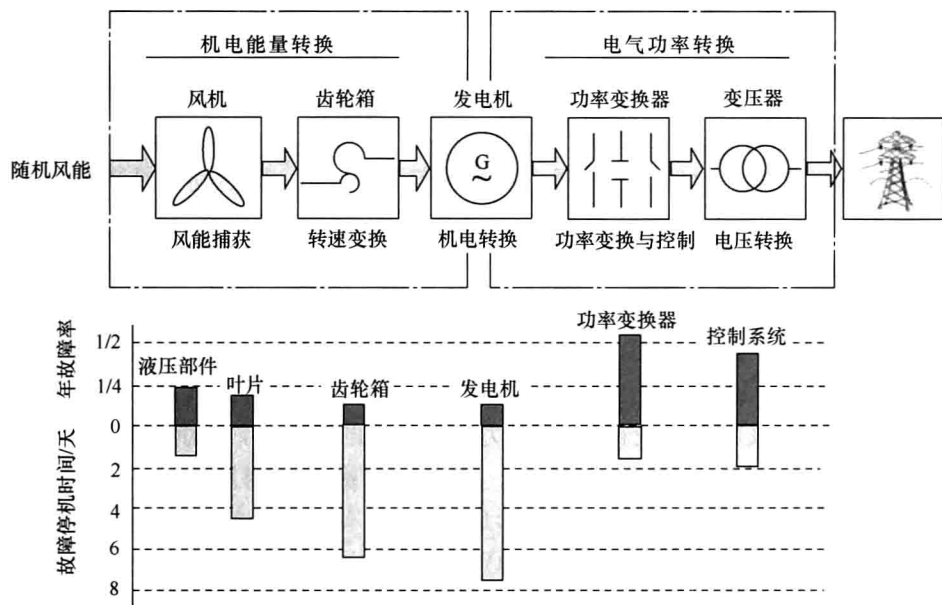


图 1.3 风力发电系统运行可靠性(1500 台机组 15 年运行统计数据)

适用于风力发电系统的功率变换器拓扑结构较多,不同拓扑结构的控制系统也不尽相同。通过控制功率变换器可以实现发电机转速调节、转矩控制以及发电机与电网间的柔性连接、满足电网控制需求等。

目前,商业化变速恒频双馈风力发电系统多采用两电平背靠背功率变换器,如图 1.4 所示。两电平背靠背功率变换器的最大优势在于四象限控制能力,但是由于直流侧仅有两种电平,采用该类变换器时发电机和变压器均需承受较高的电压应力。为了抑制绕组过电压、降低对电网的谐波污染,两电平背靠背功率变换器两

端需分别加装电抗器和滤波器。此外,在大型直驱式变速恒频风力发电系统中,功率变换器需要传递机组全功率。采用两电平背靠背功率变换器实现大容量全功率传输会导致开关损耗大,降低运行效率,并对系统可靠性带来不利影响^[4]。

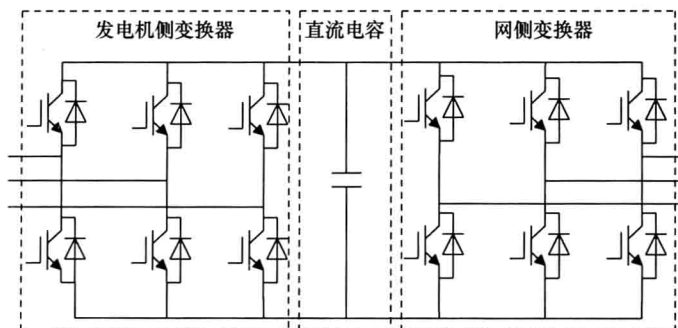


图 1.4 两电平背靠背功率变换器

基于 Boost 斩波的不控整流型两电平功率变换器因其具有拓扑结构较简单、系统可靠性较高、控制算法和电路复杂程度适中等优点而常见于直驱式变速恒频风力发电系统,如图 1.5 所示。由于该类功率变换器中的电机侧变换器不能实现矢量控制,发电机定子电流谐波含量较大,易诱发转矩波动,对功率变换器稳定性造成不利影响。此外,受 Boost 斩波电路自身条件的约束,采用该类功率变换器时发电机转速的调节范围有限。

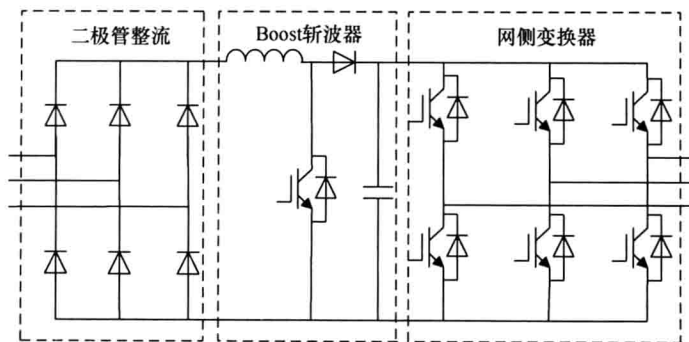


图 1.5 基于 Boost 斩波的不控整流型两电平功率变换器

为了在实现风力发电系统输出功率实时传输的同时,提升风力发电系统功率变换器的运行可靠性,多种新型功率变换器被应用到风力发电系统中。部分风电设备供应商将两电平背靠背功率变换器作为基本单元,通过单元间的并联构建新型功率变换器,如图 1.6 所示。该类功率变换器的优势主要体现在冗余特性和模块化设计,但功率变换单元并联会产生环流,对功率变换器产生危害,如何消除和抑制环流是保证该类功率变换器安全与可靠运行的关键。

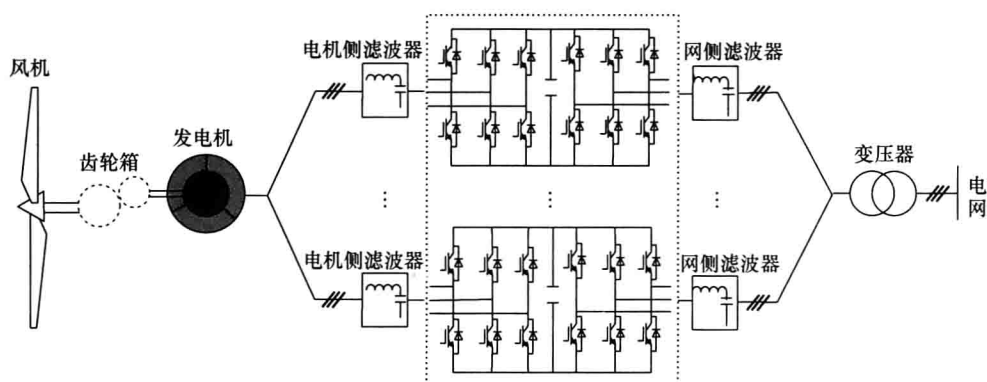


图 1.6 多单元并联型功率变换器

与两电平功率变换器相比,多电平功率变换器在承受电压等级、传输功率等级等方面具有显著优势。在众多拓扑结构型式,图 1.7 所示的二极管箝位型三电平功率变换器在风力发电领域的应用及相关控制技术得到了深入研究。然而,二极管箝位型三电平功率变换器在运行中存在不平衡损耗,这一问题在电网故障等工况下显得更为突出,影响系统可靠性,在设计时需进行降容处理。矩阵变换器是实现风力发电系统功率变换的另一种备选方案。由于不含直流母线及储能元件,采用该类变换器时风力发电机和电网间存在间接电耦合,电网故障下该类变换器的运行特性与控制方法有待进一步研究。此外,H 桥级联型变换器、模块化多电平变换器等多种新型拓扑被引入风力发电系统功率变换体系。

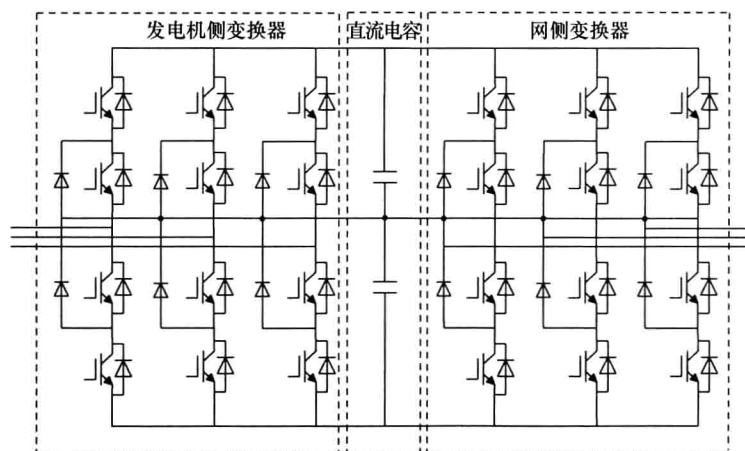


图 1.7 二极管箝位型三电平功率变换器