

 新能源应用技术丛书

风力发电中的 电力电子变流技术

李建林 许洪华 等著



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

Scale Wind Turbine Based on Fuzzy-PD Method [D]. Electric Utility Derogation

Third International Conference

新能源应用技术丛书

Third International Conference

新能源应用技术丛书

Third International Conference

Third International Conference

Third International Conference

Third International Conference

Third International Conference

Third International Conference

Third International Conference

Third International Conference

Third International Conference

Third International Conference

Third International Conference

Third International Conference

Third International Conference

Third International Conference

Third International Conference

Third International Conference

Third International Conference

Third International Conference

Third International Conference

Third International Conference

Third International Conference

Third International Conference

Third International Conference

Third International Conference

Third International Conference

Third International Conference

新能源应用技术丛书

风力发电中的 电力电子变流技术

Power Electronic Converter Technology in Wind Power Generation

李建林 许洪华 著
高志刚 胡书举 朱颖

Hu Shuju, Li Jianlin, Xu Honghua Modeling on Converter of Direct-driven WECS

IEEE International Conference on Industrial

IEEE International Conference on Industrial

IEEE International Conference on Industrial

IEEE International Conference on Industrial

IEEE International Conference on Industrial

IEEE International Conference on Industrial

IEEE International Conference on Industrial

IEEE International Conference on Industrial

IEEE International Conference on Industrial

IEEE International Conference on Industrial

IEEE International Conference on Industrial

IEEE International Conference on Industrial

IEEE International Conference on Industrial

IEEE International Conference on Industrial

IEEE International Conference on Industrial

IEEE International Conference on Industrial

IEEE International Conference on Industrial

IEEE International Conference on Industrial

IEEE International Conference on Industrial

IEEE International Conference on Industrial

IEEE International Conference on Industrial

IEEE International Conference on Industrial

IEEE International Conference on Industrial

IEEE International Conference on Industrial

IEEE International Conference on Industrial

IEEE International Conference on Industrial

IEEE International Conference on Industrial

IEEE International Conference on Industrial

IEEE International Conference on Industrial



机械工业出版社

地址：北京市西城区百万庄大街24号 邮编：100037

电话：(010) 68993828 传真：(010) 68993828

网址：http://www.cmp.cn

电子邮箱：jcs@cmp.cn

随着能源问题的日益突出和国家节能减排政策的推进,我国风电事业取得了长足的进展,风力发电机组单机容量逐步增大,表现形式也是百花齐放,有失速型、双馈型、直接驱动型、半直接驱动型等。随着风力发电机组单机容量的不断增大,其核心部件——变流器的功率等级也相应不断增大。风力发电中的电力电子变流技术逐步成为国内外学者关注的热点,一些常规的电力电子变流技术需要进行系列改良才能更好地适应于风力发电系统。为此,本书尝试性地从电力电子器件串并联技术、多电平技术、多重化技术等方面进行探索性研究,对与之相应的调制方法:载波层叠、载波相移技术等也进行了剖析。书中对几种典型的变流器拓扑,不仅进行了原理性的仿真验证,而且制作了样机,并在中国科学院电工研究所新能源组的20kW直接驱动型风力发电实验平台和22kW双馈型风力发电实验平台进行了实验验证。大部分研究成果,作者已经以学术论文的形式在国内外期刊发表,在此为方便广大读者,作者对其主要研究成果进行归纳总结,编成此书。本书旨在对风力发电系统中涉及的电力电子变流技术进行探讨,以期通过本书的研究,为我国风力发电机组变流器的选择提供一些可以借鉴的资料,为海上风力发电以及大规模风力发电机组并入电网进行一些前期的理论基础研究和储备。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电中的电力电子变流技术/李建林等著. —北京:
机械工业出版社, 2008.9

(新能源应用技术丛书)

ISBN 978-7-111-24971-9

I. 风… II. 李… III. 风力发电-电力电子学-变流技
术 IV. TM614

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第126651号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

责任编辑:付承桂 版式设计:霍永明 责任校对:张莉娟

封面设计:姚毅 责任印制:邓博

北京京丰印刷厂印刷

2008年10月第1版·第1次印刷

169mm×239mm·16.75印张·306千字

0 001—4 000册

标准书号:ISBN 978-7-111-24971-9

定价:36.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010) 68326294

购书热线电话:(010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010) 88379764

封面无防伪标均为盗版

序

发展和利用风能是国际的大趋势，风电产业已成为一个朝阳产业。我国风能资源丰富，风电在电力结构中的份额会越来越大。为此，必须大力提高国内风力发电设备制造能力，加速风力发电设备国产化进程，建立具有自主知识产权的知名品牌，这方面已取得了一些成效。截止到2003年，600kW风力发电机组国产化率已达96%，国产化机组在国内风电市场累计占有率为15.35%，2003年度国产化机组在国内风电市场销售量占当年风电市场新增容量的33.46%；研制开发兆瓦级风力发电机组的工作已经开始。

值此风力发电技术突飞猛进的时期，变流技术的进步有着十分重要的意义。风力发电中的电力电子变流技术是实用性极强的技术，内容丰富。中国科学院电工研究所长期从事于风力发电技术研究，电力电子变流技术是一个重要的方向。根据多年研发、试验与应用的经验，李建林、许洪华等同志编写了《风力发电中的电力电子变流技术》一书。该书主要供中等技术水平的科技人员阅读，在概念和应用实例方面照顾到其他层面的科技人员，可作为电力电子技术专业，尤其是新成立的风力发电专业的研究生教材，也可作为从事本专业科技工作人员的参考书，期望能为我国风电发展的人才成长发挥应有的作用。

严陆光

2008年8月8日

前言

风力发电技术的研究和发展正在受到越来越多国家的重视,已经从早期的失速型定桨距风力发电机组发展到配合变桨距系统变速恒频运行的双馈型和直接驱动型风力发电机组。其中,失速型发电机组的单机容量较小,通常在几十至数百千瓦的规模,结构一般采用笼型异步发电机,发电机定子直接和电网相连接,不能够调节有功和无功功率,并且对风能的利用效率较低,因此已经逐步被市场所淘汰;变速型风力发电机组主要分为双馈感应风力发电机组和永磁直接驱动型风力发电机组,双馈感应发电机(Doubly-Fed Induction Generator,DFIG)具有有功、无功功率可独立调节的能力,可实现最大风能追踪的变速恒频运行,且由于励磁用 PWM 变流器容量小于风力发电机组额定容量,降低了制造成本,成为当前风能开发利用中的主流发电机类型。随着风力发电系统在电网中所占比重的增大,提高 DFIG 在外部电网故障下的不间断运行能力变得更加重要。根据传统的双馈发电机工作原理,当运行转速偏离发电机的同步转速越多,转子所需的电功率和频率就越高,这会影响发电机的效率,并增加制造难度。因此,需将风力机的转速用变速箱提高到接近同步转速($1000 \sim 1500\text{r/min}$)来拖动发电机。双馈调速系统结构相对复杂,技术要求较高。随着风力发电量在世界各国总发电量中所占比例的不断增大,风力发电机组对现有电力系统的影响已经成为一个不可避免的问题。目前在一些风力发电占主导地位的国家,如丹麦、德国等已经相继制定了新的电网运行准则,定量地给出了风电系统离网的条件(如最低电压跌落深度和跌落持续时间),只有当电网电压跌落低于规定曲线以后才允许风力发电机脱网,当电压在凹陷部分时,发电机应提供无功功率。这就要求风力发电系统具有较强的低电压穿越(LVRT)能力,同时能方便地为电网提供无功功率支持,但目前的双馈型风力发电技术是否能够应对自如,学术界尚有争论,而永磁直接驱动型变速恒频风力发电系统已被证实在这方面拥有出色的性能。

为此,国内外学者们对此展开了深入的研究,取得了一系列喜人的成果。其间,直接驱动型风力发电系统作为一种新型风力发电系统脱颖而出。永磁同步发电机直接驱动型变速恒频(PMSM-DDVSCF)风力发电系统是一种新型的风力发电系统,它采用风轮直接驱动多极低速永磁同步发电机,通过

功率变换电路将电能进行转换后并入电网,省去了传统双馈型风力发电系统中故障率较高的齿轮箱,效率大为提高。与双馈型风力发电系统相比,直接驱动型风力发电系统的优点在于:传动系统部件减少,能够提高系统可靠性和可利用率,提高整体效率,降低了风力发电机组的运行维护成本,使整机的生产周期缩短;可以实现对电网有功、无功功率的灵活控制;发电机与电网之间采用全功率变流器,使发电机与电网之间的相互影响减少,电网故障对发电机的损害较小。

随着风力发电机的单机容量越来越大,更多的风力发电拓扑正在被研究和开发中,就目前情况来看,双馈型风力发电机仍占主流,然而直接驱动型风力发电机以其固有的优势也开始逐渐受到关注。直接驱动型风力发电系统中,电能都要通过逆变器传递到电网上,这要求功率器件具备较高的功率等级。然而受功率器件材料的耐压极限和制作工艺的限制,单一功率器件的容量是有限的,同时由于逆变器的功率很大,基于降低开关损耗、减小电磁干扰的考虑,器件的开关频率也不可能太高,但开关频率太低又会导致逆变器输出波形的畸变率增加,进而增加后续滤波器的设计难度,因此还需对风力发电系统的逆变器拓扑展开进一步研究。变流器作为风力所发的电能回馈至电网的唯一通路,对其容量、可靠性、响应速度和并网特性等各方面要求很高;逆变器的设计和制造是直接驱动型风力发电系统的一个重点和难点,它对于整个系统的稳定、高效运行很重要,掌握这项技术,对于推动我国风力发电事业的发展,增强风力发电领域的自主创新能力,具有十分重要的意义。

风力发电系统需要大功率变流器,多电平技术、多重化技术以及器件串并联技术均为可选方案,哪种方案更优,尚无定论。与之相应的调制方法:载波层叠、载波相移技术等各有适用场合。为此,本书对这些关键问题进行了深入的剖析,得出了一些有益的结论。本书旨在对风力发电系统中涉及的电力电子变流技术进行探讨,以期通过本书的研究,为今后更大功率等级的风力机组以及海上风力机组的大力推广,大量的变速恒频(VSCF)风力发电机组并入电网进行一些理论基础研究和技术储备。

本书重点介绍了风力发电系统中常用的几种典型电力电子变流技术,题材来源实际,具有前沿性和先进性,遵循了深入浅出、循序渐进的写作路线与理论联系实际的原则。书中涉及的内容均进行了严格推导,通过了仿真和实验双重验证,力争准确无误。书中内容均出自作者及其研究生发表的学术论文,其中,高志刚、胡书举、朱颖对本书做了大量的前期工作,向他们致意;同时,向梁亮、李梅、李政岷、温春雪、付勋波、张雷、孔德国、王剑飞、赵佩宏等研究生表示

谢意,向许洪华老师、赵斌老师、武鑫老师、陈振斌老师等对本书付出的劳动表示感谢。还要感谢给予国家“863”项目(2007AA05Z421)、全国博士后一等资助项目(20060390092)、中国科学院电工研究所所长基金项目(0710141CS1)支持的单位。本书在编写过程中得到许多专家、学者的帮助,由于本书作者学识水平有限,在写作过程中难免出现不妥之处,敬请广大读者批评指正,并给予谅解。

中国科学院电工研究所

研究员 王建林

2008年6月8日

本书是作者多年从事风力发电研究工作,在从事风力发电系统研究、设计、开发、应用等方面工作的基础上,结合国内外风力发电系统研究的最新成果,对风力发电系统进行了系统的分析和研究。本书共分8章,主要内容包括:风力发电系统概述、风力发电系统建模、风力发电系统控制、风力发电系统仿真、风力发电系统设计、风力发电系统应用、风力发电系统维护、风力发电系统安全。本书可作为从事风力发电系统研究的工程技术人员、研究人员、管理人员、大专院校师生、风力发电系统应用人员、风力发电系统维护人员、风力发电系统安全人员等的参考书,也可作为从事风力发电系统研究的工程技术人员、研究人员、管理人员、大专院校师生、风力发电系统应用人员、风力发电系统维护人员、风力发电系统安全人员的培训教材。

中国科学院电工研究所

本书是作者多年从事风力发电研究工作,在从事风力发电系统研究、设计、开发、应用等方面工作的基础上,结合国内外风力发电系统研究的最新成果,对风力发电系统进行了系统的分析和研究。本书共分8章,主要内容包括:风力发电系统概述、风力发电系统建模、风力发电系统控制、风力发电系统仿真、风力发电系统设计、风力发电系统应用、风力发电系统维护、风力发电系统安全。本书可作为从事风力发电系统研究的工程技术人员、研究人员、管理人员、大专院校师生、风力发电系统应用人员、风力发电系统维护人员、风力发电系统安全人员等的参考书,也可作为从事风力发电系统研究的工程技术人员、研究人员、管理人员、大专院校师生、风力发电系统应用人员、风力发电系统维护人员、风力发电系统安全人员的培训教材。

中国科学院电工研究所

本书是作者多年从事风力发电研究工作,在从事风力发电系统研究、设计、开发、应用等方面工作的基础上,结合国内外风力发电系统研究的最新成果,对风力发电系统进行了系统的分析和研究。本书共分8章,主要内容包括:风力发电系统概述、风力发电系统建模、风力发电系统控制、风力发电系统仿真、风力发电系统设计、风力发电系统应用、风力发电系统维护、风力发电系统安全。本书可作为从事风力发电系统研究的工程技术人员、研究人员、管理人员、大专院校师生、风力发电系统应用人员、风力发电系统维护人员、风力发电系统安全人员等的参考书,也可作为从事风力发电系统研究的工程技术人员、研究人员、管理人员、大专院校师生、风力发电系统应用人员、风力发电系统维护人员、风力发电系统安全人员的培训教材。

目 录

序

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 风力发电现状介绍	1
1.2 风力发电系统分类	3
1.3 风力发电机组并网方式对比分析	10
1.3.1 适合于异步发电机的并网方式	10
1.3.2 适合于变速恒频发电机的并网方式	10
1.4 风力发电与电力电子变流技术	15
1.4.1 不可控整流器后接晶闸管逆变器和无功补偿型拓扑结构	15
1.4.2 不可控整流器后接直流侧电压变化的 PWM 电压源型逆变器型拓扑结构	16
1.4.3 不可控整流器后接直流侧电压稳定的 PWM 电压源型逆变器型拓扑结构	17
1.4.4 PWM 整流器后接电压源型 PWM 逆变器型拓扑结构	17
1.4.5 不可控整流器后接电流源型逆变器型拓扑结构	18
1.4.6 二极管箝位型拓扑结构	18
1.4.7 级联 H 桥型拓扑结构	19
1.4.8 飞跨电容型拓扑结构	20
第 2 章 调制技术	21
2.1 正弦脉宽调制	21
2.2 空间矢量调制	24
2.3 脉宽调制的 AAV 分析方法	25
2.3.1 活动面积矢量的概念	25
2.3.2 SPWM 的 AAV 分析	27
2.3.3 SVM 的 AAV 分析	29
2.3.4 仿真实验	31
2.4 SVM 与 SPWM 通用调制算法	34
2.4.1 SPWM 与 SVM 的通用实现流程	35
2.4.2 实验验证	36
2.5 单周期控制方法	39
2.5.1 双并联 Boost 整流器及其单周控制	43

2.5.2 仿真验证	44
2.5.3 结论	46
2.6 空间矢量滞环技术	47
2.6.1 控制原理	47
2.6.2 仿真验证	51
2.6.3 结论	52
2.7 载波相移技术	52
2.7.1 载波相移技术的概念	52
2.7.2 波形谐波分析	53
2.7.3 仿真验证	56
2.8 其他调制方法	59
第3章 风力发电系统中的典型变流方案	61
3.1 整流技术方案	61
3.1.1 不可控整流方案	61
3.1.2 多脉波不可控整流方案	61
3.1.3 三相单管整流方案	63
3.1.4 PWM 整流方案	67
3.2 斩波技术方案	70
3.2.1 Boost 斩波器	71
3.2.2 Boost 斩波器 PFC 控制	71
3.3 逆变技术方案	76
3.3.1 基于晶闸管的逆变方案	76
3.3.2 电压源型 PWM 逆变方案	77
3.3.3 电流源型逆变方案	81
3.4 典型方案实例	82
3.4.1 不可控整流 + Boost + 逆变方案	82
3.4.2 双 PWM 背靠背方案	83
第4章 大功率变流技术	85
4.1 器件串并联技术	86
4.2 多电平变流技术	88
4.2.1 二极管箝位型多电平技术	88
4.2.2 飞跨电容箝位型多电平技术	102
4.2.3 级联 H 桥型多电平技术	112
4.2.4 级联飞跨电容型多电平技术	113
4.2.5 DRC 混合箝位型多电平技术	118
4.2.6 级联二极管箝位型多电平技术	124

4.2.7 小结	130
4.3 模块并联技术	131
4.3.1 Boost 电路的并联技术	131
4.3.2 带耦合电感的并联 Boost	144
4.3.3 并联三相单管整流电路	148
4.3.4 逆变器共母线并联	153
4.3.5 并联背靠背	164
4.3.6 并联方案举例	173
4.4 多重化技术	173
4.4.1 多重化方波整流电路	173
4.4.2 多重化方波逆变电路	174
4.4.3 多重化 PWM 逆变电路	175
第 5 章 低电压穿越技术	176
5.1 风力发电系统并网运行标准规范	176
5.2 双馈型风力发电机组的电压跌落特性	177
5.2.1 理论分析	177
5.2.2 仿真验证	179
5.2.3 实验验证	184
5.2.4 小结	189
5.3 电网故障时风力发电系统中的保护电路	189
5.3.1 两种主流变速恒频风力发电系统	190
5.3.2 双馈型风力发电系统的保护电路	191
5.3.3 直驱型风力发电系统的保护电路	195
5.3.4 小结	198
5.4 电网电压跌落发生器的研制	198
5.4.1 几种常用的电压跌落发生器的拓扑结构	199
5.4.2 基于变压器形式的 VSG 实验	203
5.4.3 基于晶闸管的 VSG 实验	208
5.4.4 小结	210
5.5 双馈型风力发电系统的低电压穿越技术	210
5.6 直驱型风力发电系统的低电压穿越技术	214
5.7 电压跌落的检测技术	222
5.7.1 检测方法	222
5.7.2 仿真验证	226
5.7.3 实验验证	227
5.7.4 小结	229



第6章 风力发电外围应用技术	230
6.1 最大风能捕获	230
6.2 风力机模拟	234
6.3 变桨距控制	238
6.3.1 变桨距和定桨距	238
6.3.2 变桨距的执行方式	240
6.3.3 变桨距控制策略	241
6.3.4 变桨距系统的设计	244
6.3.5 独立变桨技术	245
6.3.6 小结	245
第7章 展望	246
7.1 风力发电技术发展趋势	246
7.1.1 风力发电装备制造技术	246
7.1.2 风电场开发技术	247
7.1.3 标准与规范建设	247
7.1.4 海上风电场开发技术	248
7.2 风力发电面临的挑战	250
缩略语	253
参考文献	254

第1章 绪论

1.1 风力发电现状介绍

近来可再生能源的开发利用越发受到重视,而风力发电是其中最廉价、最有希望的绿色能源。在风力发电技术中,大型变速恒频风力发电技术已经成为其主要发展方向之一。但是其主要技术仍然掌握在少数国家手中,我国风力发电绝大部分关键技术落后,有些甚至是空白。在“九五”期间,我国重点对600kW三叶片、定桨距、失速型、双速发电机的风力发电机组进行了研制,掌握了整体总装技术和关键部件叶片、电控、发电机、齿轮箱等的设计制造技术,并初步掌握了总体设计技术。对变桨距600kW风力发电机组也研制了样机。对变速恒频风力发电机组只研制过20kW的风力发电机组。要实现风力发电的产业化,必须降低成本。而掌握自主知识产权的风力发电设备设计制造技术,实现关键部件的国产化是降低成本的必要手段。“十五”期间国家在“863攻关计划”中对兆瓦级变速恒频风力发电机组进行攻关,同时国家科技部对750kW的失速型风力发电机组的产品化和产业化进行攻关。

从国际风力发电技术发展的趋势来看,风力发电机组单机容量越来越大,陆地风力发电机组主力机型单机容量在1.5MW、2MW,近海风力发电机组的主力机型单机容量多为3MW以上,双馈型变速恒频风力发电机组是目前国际风力发电市场的主流机型。国产兆瓦级双馈型变速恒频风力发电机组目前还没有定型产品,与其配套的控制系统及变流器还处于样机研制阶段。国家科技部在“十五”期间的“863攻关计划”中支持了兆瓦级变速恒频风力发电机组的攻关工作,自主研制的1MW双馈型变速恒频风力发电机组样机已投入试运行。由北京科诺伟业科技有限公司和中国科学院电工研究所共同研制的1MW双馈型变速恒频风力发电机组控制系统和变流器样机已经在甘肃玉门风电场成功并网运行。这些项目的成功证明我国已初步掌握了双馈型变速恒频风力发电机组的控制技术和控制规律。通过国家科技支撑计划的资助,中国科学院电工研究所初步掌握了具有自主知识产权的1.5~2.5MW双馈型变速恒频风力发电机组控制系统及变流器的产业化关键技术和优化设计技术,自主研制了2.5MW以上双馈型变速恒频风力发

电机组控制系统及变流器,解决了 1.5MW 以上风力发电机组控制系统及变流器产业化应用的技术问题。尽管目前双馈型风力发电系统仍占主流,然而直接驱动型(以下简称为直驱型)风力发电机组以其固有的优势也开始逐渐受到关注。直驱型风力发电系统是一种新型的风力发电系统,它采用风力机直接驱动多极低速永磁同步发电机发电,然后通过功率变换电路将电能进行转换后并入电网,省去了传统双馈型风力发电系统中的我国难以自主生产且故障率较高的齿轮箱这一部件,系统效率大为提高,有效地抑制了噪声。无齿轮箱的直驱方式能有效地减少由于齿轮箱问题而造成的机组故障,可有效提高系统的运行可靠性和寿命,大大减少了维护成本,得到了市场青睐。2006 年,ENERCON 公司生产的直驱型风力发电机组在德国市场销售量第一。伴随着直驱型风力发电系统的出现,全功率变流技术得到了发展和应用。应用全功率变流的并网技术,使风力机和发电机的调速范围扩展到 0~150% 的额定转速,提高了风能的利用范围。我国新疆金风科技股份有限公司与国外合作已成功研制 1.2~1.5MW 直驱型风力发电机组并成功实现并网运行。丹麦的 BOUNS 公司(现已被西门子公司收购)选择了无刷感应发电机配备全功率变流器。GE 公司也在其最新的 2.X 系列(2.3MW、2.5MW、2.7MW)中把双馈感应发电机换成了带全功率变流的同步发电机,GE 公司风力发电系统的逐步转型是为了适应新的“电网故障穿越”规则。

尽管目前我国风电场装机大都属于兆瓦级以下的定桨定速型风力发电机组,但市场趋势已向兆瓦级以上的风力发电机组发展,其中主力机型是 1.5MW 风力发电机组。在兆瓦级风力发电机组研制上,新疆金风科技股份有限公司的 1.2MW 直驱型的样机于 2005 年 4 月完成了吊装投入试运行,并请国外有关机构对其功率曲线进行了检测,在产品升级换代方面迈出了重要一步,该机型在 2007 年上半年开始投入市场。沈阳工业大学的 1MW 变桨变速双馈型风力发电机组也于 2005 年 7 月投入试运行,2006 年又研制出 1.5MW 的机组并投入市场。东方汽轮机有限公司、华锐风电科技有限公司等的兆瓦级变桨变速技术的产品则已经开始批量生产,并安装到风电场调试运行。2008 年是我国风力发电事业快速发展的一年,东方汽轮机有限公司、新疆金风科技股份有限公司等迅速发展各自的风电业务,各地风电场风起云涌,机组功率等级从 1MW 发展到 2.5MW。原定的中长期规划:2010 年全国风电总装机容量达到 500 万 kW,2020 年达到 3000 万 kW,但就现在的发展情况,2008 年底全国风电装机容量就将突破 1000 万 kW,2020 年则可达 8000 万 kW 乃至 1 亿 kW。

1.2 风力发电系统分类

从当前世界的发展趋势来看,容量小于750kW的系统尚可以用定桨距失速调节技术,但是当容量大于750kW时,大多要采用主动失速调节、变桨调节或变速恒频调节技术。因此,对风力发电中的变速恒频双馈发电技术在理论和实践中进行系统深入的研究,是十分必要和迫切的,对我国的风电事业的发展有着十分重要的意义。以下为几种比较典型的变速恒频风力发电技术。

风力发电机组可以分为两大类:恒速恒频机组和变速恒频机组。风力发电机与电网并联运行时,要求风力发电的频率保持恒定,为电网频率。恒速恒频指在风力发电中,控制发电机转速不变,从而得到频率恒定的电能;变速恒频指发电机的转速随风速变化而变化,通过其他方法来得到恒频电能。

目前运用较多的还是恒速恒频风力发电系统。恒速恒频风力发电系统的一个弊端是,当风速跃升时,巨大的风能将通过风力机叶片传递给主轴、齿轮箱和发电机等部件,在这些部件上产生很大的机械应力,上述过程的重复出现将会引起这些部件的疲劳损坏。因此,在设计时不得不加大安全系数,从而导致机组重量加大、制造成本增加。而且恒速恒频风力发电系统的风力机转速不能够随着风速的变化而变化,无法达到最优的风能利用系数。

变速恒频风力发电系统允许风力机根据风速的变化而以不同的转速旋转。变速恒频风力发电系统与恒速恒频风力发电系统相比,有以下优点:

1) 减少了机械应力,阵风能量可以被风力机的转动惯量吸收。这种具有“弹性”的吸收方式减少了力矩的脉冲幅度。由风速跃升所产生的巨大风能,部分以动能的形式储存于加速旋转的风力机中,避免了主轴及传动机构承受过大的扭矩及应力;当风速下降时,在电力电子装置的调控下,将高速风轮所释放的能量转变为电能,送入电网。风力机的加速、减速对风能的阶跃性变化起到了缓冲作用,使风力机内部能量传输部件承受的应力变化比较平稳,防止破坏性机械应力的产生,从而使风力发电机组的运行更加平稳和安全。

2) 较简单的桨距控制。通过调节风力发电机的转速,可以使得对桨距的控制时间常数延长,降低了桨距控制的复杂性,也降低了对峰值功率的限制的要求。在低风速下,桨距通常保持不变。桨距控制只是保证在高风速下,风力机吸收的功率不超过最大值。

3) 提高了系统的风能利用率。转速可以在较大范围内变化,通过对最佳叶尖速比的跟踪,使风力发电机组在可发电风速下均可获得最佳的功率输出。风力



发电机组的控制技术从机组的定桨距恒速运行发展到变速运行,已经基本实现了风力发电机组从能够向电网提供电力到理想地向电网提供电力的目的。

目前国际上有多种方案实现变速恒频风力发电。如交-直-交风力发电系统、磁场调制式发电机系统、绕线转子双馈发电机系统、无刷双馈发电机系统、无刷爪极式发电机系统、开关磁阻式发电机系统等,这些变速恒频发电系统有的是发电机与电力电子装置相结合实现变速恒频的,有的是通过改造发电机本身结构而实现变速恒频的。这些系统都有自己的特点,适用于不同的场合。下面对这些系统介绍。

1. 交-直-交风力发电系统

原理:发电机发出频率变化的交流电首先通过整流器整流成直流电,再通过逆变器变换为频率恒定的交流电输入电网。在此系统中,可以采用的发电机有绕线转子同步发电机、笼型感应发电机、永磁同步发电机。

优点:这种系统在并网时没有电流冲击;可调节无功功率。永磁同步发电机系统是这种类型中最有优势的一种,可以做到风力机与发电机的直接耦合,省去变速箱,由此可以提高可靠性,减小系统噪声,降低维护成本。

缺点:变流器的容量和系统的容量相同。有高频电流谐波注入电网。目前,永磁同步发电机系统是研究的热点之一,而且发展很快,国外已经出现了兆瓦级永磁同步发电机系统。

2. 磁场调制式发电机系统

原理:系统由一台高频交流发电机和一套电力电子变换电路组成,图 1-1 示出磁场调制式发电机单相输出系统的原理框图及各部分的输出电压波形。发电机本身具有较高的旋转频率 f_r ,用频率为 f_m 的低频交流电励磁(f_m 即为所要求的输出频率,一般为 50Hz),当频率 f_m 远低于频率 f_r 时,发电机三相绕组的输出电压波形将是由频率为 $(f_r + f_m)$ 和 $(f_r - f_m)$ 的两个分量组成的调幅波(图 1-1b 中波形),这个调幅波的包络线的频率是 f_m ,包络线所包含的高频谐波的频率是 f_r 。

将三个相绕组接到一组并联桥式整流器,得到如图 1-1c 中波形所示的基本频率为 f_m (带有频率为 $6f_r$ 的若干纹波)的全波整流正弦脉动波。再通过晶闸管开关电路使这个正弦脉动波的一半反向,得到图 1-1d 中的波形。最后经滤波器滤去纹波,即可得到与发电机转速无关、频率为 f_m 的恒频正弦波输出(图 e)。输出电压的频率和相位取决于励磁电流的频率和相位,正是这一特点使得磁场调制式发电机非常适合于并网风力发电系统。

优点:

1) 经桥式整流器后得到的是正弦脉动波,晶闸管是在波形过零点时开关换

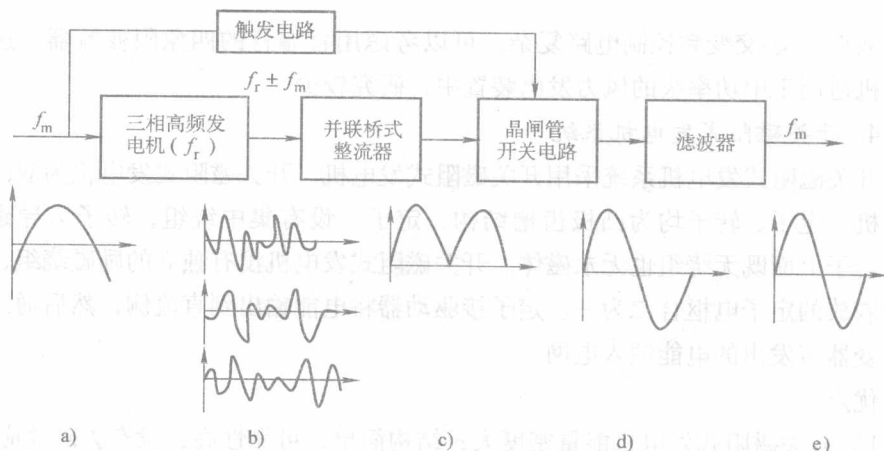


图 1-1 磁场调制式发电机系统

相，换相简单容易，系统效率较高。

2) 输出波形中谐波分量小而且频率高，容易滤去，可以得到很好的正弦波。

3) 磁场调制式发电机系统的输出频率与励磁电流频率相同，与电网或柴油发电机组并联运行十分简单可靠。

缺点：电力电子变换装置容量较大。仅仅适用于中小型风力发电系统，研究较少。

3. 无刷爪极式发电机系统

无刷爪极式发电机的定子铁心及电枢绕组与同步发电机的相同，区别仅在于它的励磁部分，如图 1-2 所示。爪极式发电机的磁路系统是一种并联磁路结构，所有各对极的磁动势均来自一套共同的励磁绕组。爪极式发电机发出的高频交流电通过交-交变流器转变为工频交流电，所以它实现变速恒频发电。

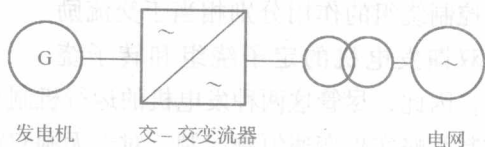


图 1-2 无刷爪极式发电机系统

优点：

1) 与一般同步发电机相比，励磁绕组所用的材料较省，所需的励磁功率也较小，具有较高的效率。

2) 发电机为无刷结构，易维护。

3) 易调节。通过励磁调节可以很方便地控制它的输出特性，使风力机实现最佳叶尖速比运行。

缺点：交-交变频控制电路复杂。可以考虑用背靠背的四象限变流器。这种发电机适用于中功率级的风力发电装置中，研究较少。

4. 开关磁阻式发电机系统

开关磁阻式发电机系统采用开关磁阻式发电机。开关磁阻式发电机为双凸极发电机，定子、转子均为凸极齿槽结构，定子上设有集中绕组，转子为导磁材料，转子上面既无绕组也无永磁体。开关磁阻式发电机没有独立的励磁绕组，与集中嵌放的定子电枢合二为一。定子接驱动器将电能输出到直流侧，然后通过网侧逆变器将发出的电能馈入电网。

优点：

- 1) 开关磁阻式发电机能量密度大；结构简单，可靠性高；没有去磁效应。
- 2) 系统在并网时没有电流冲击；可调节无功功率。

缺点：逆变器和驱动器容量大，开关磁阻式发电机容易出现力矩波动。这种发电机系统是目前研究的热点之一。

5. 无刷双馈发电机系统

如图 1-3 所示，系统采用的发电机为无刷双馈发电机。其定子有两套极数不同的绕组，一个称为功率绕组，直接接电网；另一个称为控制绕组，通过双向变流器接电网。转子为笼型结构，无需电刷和集电环，转子的极数应为定子两个绕组的极对数之和。

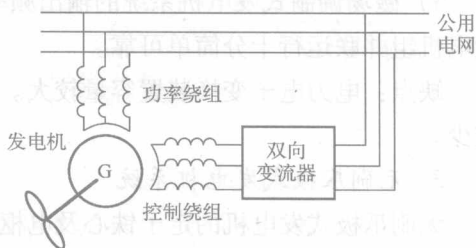


图 1-3 无刷双馈发电机系统

无刷双馈发电机定子的功率绕组和控制绕组的作用分别相当于交流励磁双馈发电机的定子绕组和转子绕组，因此，尽管这两种发电机的运行机制有着本质的区别，但却可以通过同样的控制策略实现变速恒频控制。对于无刷双馈发电机，有

$$f_p \pm f_c = (p_p + p_c)f_m \quad (1-1)$$

式中， f_p 为功率绕组电流频率，与电网频率相同； f_c 为控制绕组电流频率； f_m 为转子机械频率； p_p 为功率绕组的极对数； p_c 为控制绕组的极对数。

超同步时，式(1-1)取“+”；亚同步时，取“-”。当发电机的转速 n 变化时，即 f_m 变化时，若控制 f_c 相应地变化，可使 f_p 保持恒定不变，即与电网频率保持一致，也就实现了变速恒频控制。

尽管这种变速恒频的控制方案是在定子电路实现的，但流过定子控制绕组的功率仅为无刷双馈发电机总功率的一小部分，这是由于控制绕组的功率为功率绕