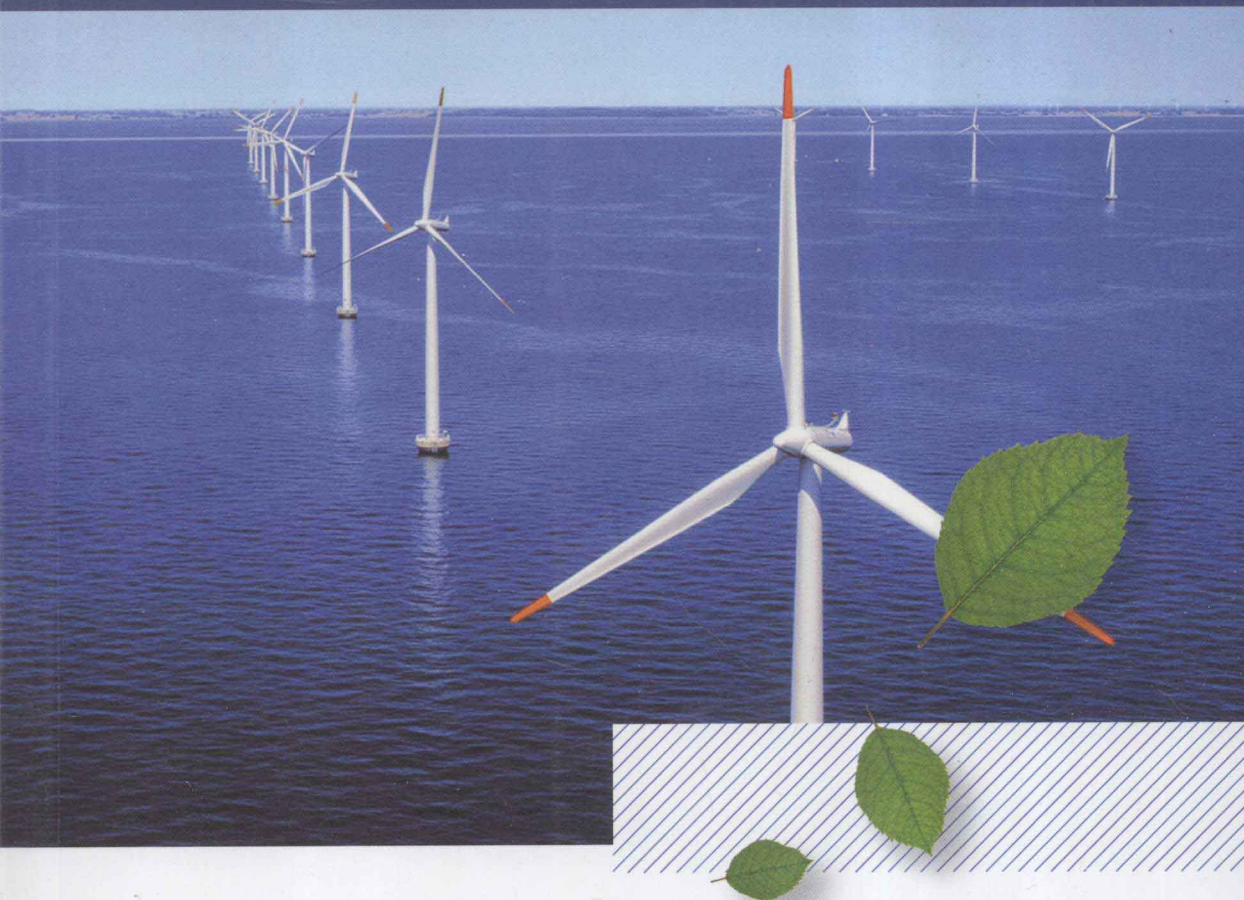




永磁风力发电系统 运行与控制

夏长亮 著

 科学出版社

永磁风力发电系统运行与控制

夏长亮 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书内容主要涵盖永磁风力发电机及其功率变换系统的运行与控制,并对永磁风力发电机磁场解析、Boost 斩波型功率变换系统控制、三电平功率变换系统控制 and 多重化功率变换系统控制等关键技术问题进行了详细的论述,得出了一些有益的结论。全书既反映永磁风力发电系统运行与控制领域的新技术、新成果、新趋势等前瞻性内容,又与实际相结合,为我国风力发电技术的不断突破提供一定的理论依据与技术基础。

本书可作为电机学、电力电子技术、自动控制、电机控制等方向的高等学校本科生、研究生的参考教材,也可作为永磁风力发电技术等领域相关科技人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

永磁风力发电系统运行与控制/夏长亮著. —北京:科学出版社,2012
ISBN 978-7-03-036097-7

I. 永… II. 夏… III. ①永磁发电机-风力发电系统-电力系统运行
②永磁发电机-风力发电系统-电力系统-自动控制 IV. ①TM313②TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 281755 号

责任编辑:魏英杰 杨向萍 / 责任校对:包志虹

责任印制:张 倩 / 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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 10 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2012 年 10 月第一次印刷 印张:16

字数:313 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

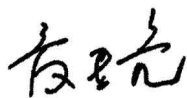
当今世界能源安全问题日益突出,生态环境恶化日趋严重,风力发电作为一种技术相对成熟的清洁型可再生能源异军突起,在众多可再生能源中占据主导地位。风力发电系统涉及电气工程、控制工程、计算机技术、空气动力学等多个学科领域的相关理论,具有较强的综合性和交叉性。随着现代科学技术的飞速发展,风力发电系统及其相关技术不断趋于完善,其中永磁风力发电系统作为最具发展潜力的一类风力发电系统,其广阔的应用前景受到世界各国政府、广大学者及风力发电设备厂商的深切关注。

全书共七章。第一章介绍了风力发电系统的发展历程与永磁风力发电技术的研究现状。第二章针对永磁风力发电系统中的主要环节建立了数学模型,包括发电机模型及多种功率变换器模型。第三章介绍了永磁风力发电机的电磁结构与特点,建立了磁场解析模型,并进行了参数设计以改善电机磁场分布。第四章针对永磁风力发电 Boost 斩波型功率变换系统,论述了电机侧变换器状态反馈精确线性化的控制策略和网侧变换器恒频直接功率控制策略,并对系统运行特性进行了分析。第五章基于永磁风力发电 Boost 斩波三电平功率变换系统,重点分析了 Boost 三电平斩波器的相差控制方式及其在网侧三电平变换器直流侧中点电位平衡控制中的作用,并论述了网侧三电平变换器的矢量控制策略。第六章介绍了永磁风力发电多重化功率变换系统的控制方法,分析了电机侧级联方式可切换型升压斩波变换器与网侧线电压级联型功率变换器的控制方式及运行特性。第七章通过列举典型的商业化永磁风力发电系统及其技术特征,对永磁风力发电技术未来的发展趋势进行了展望。

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和省部级基金项目的成果汇总,包括作者所指导的多名博士研究生和硕士研究生的研究工作,其中陈炜、宋战锋、阎彦、王慧敏、谷鑫、耿强、王志强、乔照威、刘涛、魏玉春等参与了本书部分章节的编写工作。

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

因作者水平有限,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。



2012 年 5 月

目 录

前言

第一章 绪论	1
1.1 风力发电系统发展历程	1
1.2 风力发电系统研究现状	6
1.2.1 风力发电系统运行特性	6
1.2.2 风力发电系统典型结构及特点	13
1.2.3 风力发电系统中的功率变换器	17
参考文献	21
第二章 永磁风力发电系统数学模型	22
2.1 永磁风力发电机模型	22
2.1.1 坐标变换理论	22
2.1.2 发电机数学模型	24
2.2 功率变换器模型	27
2.2.1 Boost 斩波型功率变换器	28
2.2.2 三电平功率变换器	32
2.2.3 多重化功率变换器	39
参考文献	43
第三章 永磁风力发电机磁场分析与参数设计	44
3.1 永磁风力发电机电磁结构与特点	44
3.1.1 拓扑结构	44
3.1.2 电磁设计特点	51
3.2 永磁风力发电机磁场解析建模	56
3.2.1 理想气隙模型	56
3.2.2 非理想气隙模型	75
3.3 基于 Taguchi 法的永磁风力发电机参数设计	86
3.3.1 Taguchi 法设计理论	86
3.3.2 参数设计与分析	91
参考文献	102
第四章 永磁风力发电 Boost 斩波型功率变换系统控制	104
4.1 电机侧变换器非线性控制	104

4.1.1	微分几何基础理论及反馈线性化方法	104
4.1.2	二阶非线性控制器设计	109
4.1.3	三阶非线性控制器设计	114
4.1.4	运行特性分析	119
4.2	网侧变换器直接功率控制	127
4.2.1	电网电压平衡情况下网侧变换器恒频功率控制	128
4.2.2	电网电压不平衡情况下网侧变换器恒频功率控制	131
4.2.3	运行特性分析	138
	参考文献	146
第五章	永磁风力发电 Boost 斩波三电平功率变换系统控制	148
5.1	相差控制方式下 Boost 三电平斩波器特性分析	148
5.1.1	Boost 三电平斩波器的相差控制方式	148
5.1.2	相差控制方式下 Boost 三电平斩波器工作模式分析	150
5.1.3	Boost 三电平斩波器的升压电感	154
5.2	功率变换系统控制策略	163
5.2.1	发电机转速控制	163
5.2.2	网侧三电平变换器直流侧中点电位平衡控制	167
5.2.3	网侧三电平变换器矢量控制	173
5.2.4	运行特性分析	178
	参考文献	189
第六章	永磁风力发电多重化功率变换系统控制	192
6.1	电机侧级联方式可切换型 Boost 斩波变换器	192
6.1.1	SCMBC 运行模式分析	195
6.1.2	SCMBC 调速范围分析	200
6.1.3	基于 SCMBC 的永磁风力发电机转速控制	201
6.1.4	运行特性分析	205
6.2	网侧线电压级联型功率变换器	213
6.2.1	三重化 LVC-VSC 载波移相 SVPWM 调制	214
6.2.2	传输功率均衡下三重化 LVC-VSC 运行控制	215
6.2.3	传输功率不均衡下三重化 LVC-VSC 运行控制	219
6.2.4	运行特性分析	237
	参考文献	243
第七章	永磁风力发电系统发展趋势	244
7.1	商业化永磁风力发电系统	244
7.2	永磁风力发电技术发展趋势	246
	参考文献	248

第一章 绪 论

长久以来,能源始终是人类社会赖以生存和发展的重要物质基础之一。没有能源以及对能源的开发与利用作保证,人类文明发展到今天将步履维艰,甚至可能早已湮灭在历史的长河中。在人类利用能源的过程中,煤、石油、天然气等化石能源资源日趋枯竭,能源安全问题越来越受到世界各国的关注。此外,长期大量使用煤炭、石油及天然气导致的气候、生态及环境恶化也在不断升级。因此,在节能减排、提高能源利用效率的同时,通过寻求新的清洁型能源应对能源枯竭与环境恶化等严峻形势,已经成为人类社会亟待解决的问题之一。风能作为一种洁净且开发利用技术相对成熟的可再生能源,其发展前景较为广阔,风能的合理开发与利用已成为保障人类社会能源安全的重要手段之一。

1.1 风力发电系统发展历程

在电气化革命以前,风能就被人类广泛利用。大约在公元前 3200 年,古埃及人就开始利用风帆为船只提供动力。公元 1 世纪,古希腊工程师希罗发明的风轮是所有欧洲风车的雏形,欧洲第一架风车大约出现在 12 世纪的诺曼底附近。东方最早的风车出现在 4 世纪的中国,说明早在距今 1700 多年前中国人就懂得利用风车获得动力。到 19 世纪风车的使用达到全盛时期,截至 1900 年丹麦拥有大约 2500 台风车,主要用于抽水灌溉和风力磨坊,总共的峰值功率估计可达 30MW,到 20 世纪初,丹麦仍保留有十多万架风车。美国、英国、希腊等国家的乡村也广泛地使用风车。至今,在一些动力资源缺乏和交通不便的草原牧区、沿海岛屿,仍然利用风车来提供动力。

电气化革命以来,风力发电技术更是得到了长足发展。1887 年安德森学院的工程师布莱斯建造了第一台用于生产电能的风机,该风机高约 10m,其叶片由帆布包覆,用于为蓄电池充电及农舍的照明。与此同时,美国人布拉什主持建造了第一台能够自动运行的风机,如图 1.1 所示。以现今的标准衡量,该风机也较为庞大,其风轮总共由 114 个叶片组成,直径长达 17m,然而该风机的输出功率却非常低,只有 12kW。该风机的优点是采用了全自动化的电气控制系统,风机的辅助风标能使风轮始终正面迎风,而专门设计的控制器则保证风轮以 330r/min 的额定转速运行,并且在任意转速下发电机的电动势均不会高于 90V。

19 世纪 90 年代,丹麦科学家库尔在阿斯科夫人民高等学校主持建造了两座

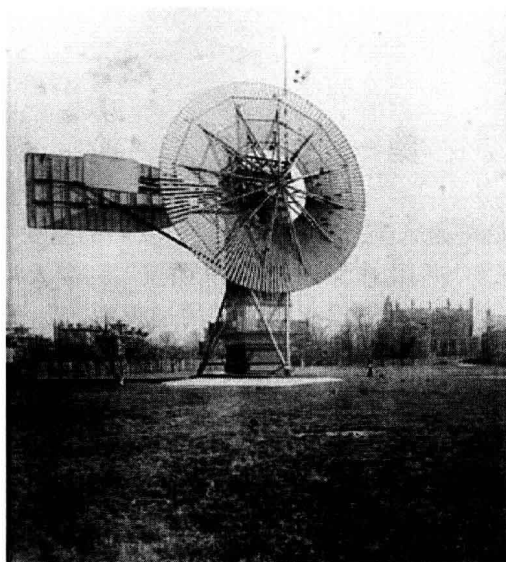


图 1.1 布拉什的风机

试验风机,如图 1.2 所示。该风机产生的电能用于电解水以获得氢气,供给学校煤气灯照明。布拉什的风机之所以效率较低,主要是其叶片过多且旋转缓慢造成的,而库尔发现具有较少叶片且高速旋转的风机比低速风机拥有更高的效率。



图 1.2 库尔的两台风机

之后,风力发电逐渐得到了大规模的应用。由于库尔的贡献,丹麦在整个 20 世纪的风力发电历史中占有举足轻重的地位。截至 1908 年,已经有 72 台风机

建成,功率从 5~25kW 不等,其中最大风机的叶轮采用四叶片设计,整个叶轮直径达 23m,风机塔高 24m。1957 年,一台三叶片、水平轴失速型风机在丹麦建成,该风机与现今的商业型风机已十分相似。

1931 年第一台用于公共事业的并网型风机在苏联雅尔塔建成,该风机功率为 100kW,采用三叶片、水平轴形式,并连接至当地 6.3kV 的配电系统中。1941 年,史密斯普特南风机在美国建成(图 1.3),该风机测试输出功率最大可达 700kW。

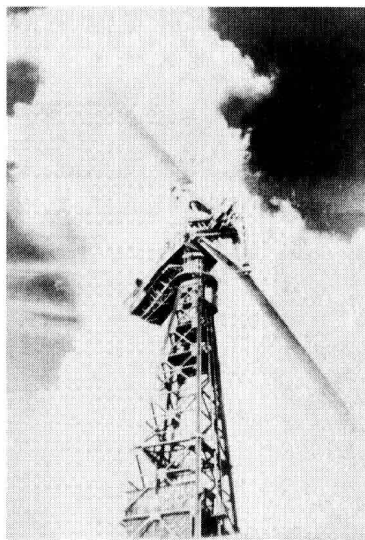


图 1.3 史密斯普特南风机

在风机功率大幅提高的同时,小型风机也引起了广泛关注。1927 年,雅各布兄弟在明尼阿波利斯开设工厂,生产专门用于农场的风机,30 年间该公司生产了约 30 000 个小型风力发电机,其中一些甚至销售到了非洲的偏远地区。此后很多公司也加入到了小型风机的竞争市场,包括 Wincharger、Miller Airlite、Universal Aeroelectric、Paris-Dunn、Airline 以及 Winpower 等公司。图 1.4 为坐落于美国印第安纳州的一台小型风机。

1930 年,垂直轴风机出现,该风机与传统的水平轴风机不同,其主动轴与地平面垂直,如图 1.5 所示。垂直轴风机主要分为两类,即以达里厄型(Darrieus)风机为代表的升力型垂直轴风机和以萨渥纽斯(Savonius)风机为代表的阻力型垂直轴风机。相比水平轴风机,垂直轴风机的旋转轴垂直于地面,发电机连接于旋转轴的底部,维护十分方便,而风轮能接受来自任意方向的风,无需偏航装置。但垂直轴风机的缺点也较为突出,如风能利用率较低、不能自行启动等。

1978 年,第一台兆瓦级风机在丹麦建成(图 1.6),该风机装机容量达到 2MW,采用了大量现代风机技术,如管状塔身、三叶片设计、变桨距技术等,其外形

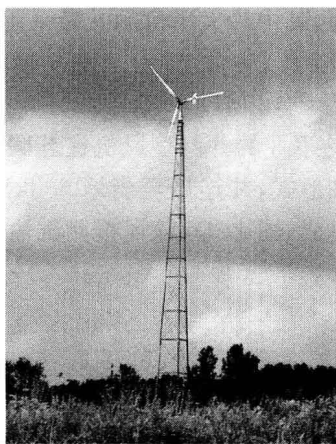
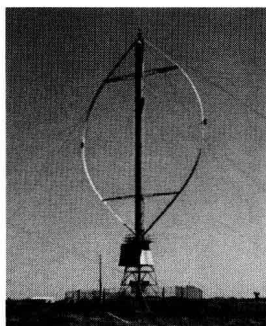


图 1.4 小型风机



(a) 达里厄型风机



(b) 萨渥纽斯风机

图 1.5 垂直轴风机



图 1.6 第一台兆瓦级风机

与当今的风机基本相同。目前,该风机仍在运行,它的建成为后来风力发电技术的蓬勃发展奠定了基础。此外,该风机是由 Tvind 学校的师生共同建造的,这也表明高等院校在推进风电技术发展的过程中起着极为重要的作用。

1973 年以后,随着能源安全问题日益突出,世界各国加大了对风能的开发与利用。进入 21 世纪以后,风力发电更是取得了突飞猛进的发展,据全球风能协会的最新统计,2000 年以来全球风力发电总装机容量和新增装机容量大幅提升(图 1.7);2009 年新增装机容量达到 38 610MW,增长率更是达到了 45.3%;2010 年全球总装机容量已接近 200 000MW^[1];另据该协会保守估计,至 2015 年全球风力发电总装机容量将接近 300 000MW;至 21 世纪中叶,将很有可能突破 3 000 000MW^[1]。由此可见,在未来的几十年中风力发电装机容量将继续保持相当可观的增长速度。

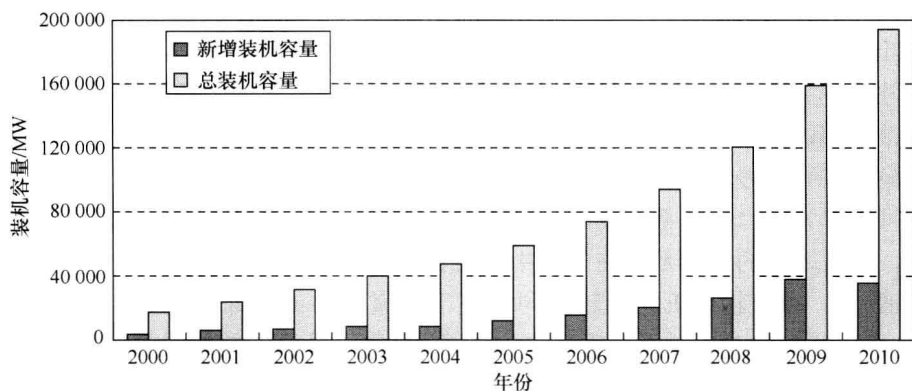


图 1.7 全球风力发电系统装机容量

相关统计表明,在推动风力发电发展方面北美、亚洲及欧洲占据了主导地位,特别是中国在 2009 年和 2010 年连续两年新增装机容量位居世界首位,总装机容量在 2010 年达到 42 287MW,首次超越美国,位居世界首位。这一数据已远远超出我国《可再生能源发展“十一五”规划》中制定的到 2010 年风力发电系统总装机容量 10 000MW 的发展目标^[2]。

风力发电装机容量的激增,市场需求的加大,促使风力发电装备制造业异军突起。特别是近年来,我国一些具有部分自主知识产权的风电设备制造企业已经打破了如 Vestas、Gemasa 和 GE 等国外著名风电企业对市场的垄断,占据了越来越多的国内甚至国际市场份额。由此可见,在世界各国政策、法规及财政的支持下,随着开发商大量资金的持续注入、风力发电技术的不断进步以及对该领域高水平人才培养的进一步加强,风力发电将保持良好的发展势头,并已经成为可再生能源发展的一支主导力量。

1.2 风力发电系统研究现状

随着风力发电相关研究的深入以及计算机与控制技术的飞速发展,风力发电技术的革新极为迅速,其单机容量从最初的千瓦级系统发展到目前应用最为广泛的兆瓦级系统,控制方式从单一的定桨距失速控制技术发展到变桨距控制技术,系统的运行可靠性不断提升。下面将围绕商业化风力发电系统的运行特点,从风力发电系统运行特性、典型结构及特点、功率变换器等方面对风力发电技术进行阐述。

1.2.1 风力发电系统运行特性

风力发电是将风能转换为机械能进而转换为电能的过程,其主要组成部分包括风机、发电机、功率变换器和控制系统等。其中,风机将自然界中的随机风能转化为叶片的旋转机械能;发电机将机械能转换为电能;功率变换器则通过功率半导体器件的开关动作,将发电机输出的电能变换成符合要求的工频交流电并输送至电网;控制系统主要通过对系统中各部分工作状态的监测,利用其强大的运算处理功能输出控制信号,从而保证整个风力发电系统的正常、稳定运行。

风机作为风力发电系统的关键部件之一,直接影响着风力发电系统的性能和效率。根据风机的结构及其在气流中位置的不同,其结构形式主要包括水平轴和垂直轴^[3,4]。垂直轴风机的旋转方向垂直于气流方向或地面,可从任意方向获得风力,在风速方向改变时无需重新定位转子,简化了风机的结构设计,减少了风机对风时的陀螺力,而且由于减速箱、发电机及其相邻的电气控制柜等装置可以放置在地面上,便于风机的安装与维护。同时,垂直轴风机的缺点也非常明显,即只能在一定的风速下达到最大的风能利用率,对其吸收风能的控制调节较难实现;旋转部分不易供电,信号检测及传输困难,风机启动、调速以及制动过程的控制复杂,稳定性较差。此外,叶片的不均衡受力导致风机易产生振动,运行时噪声大。因此,在实际中垂直轴风机并未获得广泛应用。

水平轴风机的旋转轴与风向平行,其特点是风能利用率较高,并且可灵活地控制其吸收风能的大小。水平轴风机按风机与塔架相对位置的不同而有上风向与下风向之分。上风向风机在塔架的前方迎风旋转,运行时需要偏航装置以保持风机的迎风状态。下风向风机安装在塔架的下风位置,能够自动对准风向,无需对风调向装置,但由于一部分空气通过塔架后再吹向风机,塔架干扰了流过叶片的气流而形成塔影效应,使风机的运行性能有所降低。目前商业化兆瓦级风力发电系统中多采用水平轴上风向风机。

电机及其控制系统是风力发电系统的核心部分,其运行状况和控制技术决定着整个风电系统的性能、效率和输出电能的质量。根据电机的运行特征和控制技术的

不同,风力发电系统的发电方式可分为恒速恒频发电方式和变速恒频发电方式。

风能是一种具有随机性、爆发性和不稳定性特征的能源。对于不同的风速,风机存在不同的最佳运行转速与风速对应,风机运行于此转速下能够最大限度地捕获风能且承受的机械载荷最小,所以应该根据风速实时调整风机转速。传统的恒速恒频发电方式只能运行于某一特定转速,当风速改变时风机的风能利用系数偏离最大值,导致运行效率下降、浪费风能资源、增大系统机械载荷及风机磨损、缩短风机寿命。为了提高效率,一般采用两台不同容量、不同极数的电机,风速低时用大容量电机发电,风速高时则用大容量电机发电,同时通过改变叶片节距角调整系统的输出功率,这仅能在两个风速下使风力发电系统具最佳风能利用系数,不能保证系统在整个运行过程中达到最大风能捕获,效率较低。

随着风力发电系统单机容量的增大,发电效率就愈显重要,追踪风速实现最大风能捕获、提高整个风力发电系统的运行效率成为当务之急。电力电子技术、计算机控制技术及风机制造和控制技术的发展使得大容量风电系统实现最大风能追踪运行已成为可能,这就是近十年发展起来的能够连续调速的变速恒频风力发电技术。与恒速恒频风力发电系统相比,它突破了机电系统必须严格同步运行的传统观念,风机转速不受电机输出频率限制,而其输出电压的频率、幅值和相位也不受转子转速的影响。风电系统通过励磁控制和变桨距调节可运行于最佳工作状态,在很宽的风速范围内保持近乎恒定的最佳叶尖速比,从而提高了系统的运行效率和稳定性。风速跃变产生的转矩波动,通过风机的加速过程以动能的形式存储于风机中,避免了主轴及传动机构承受过大的扭矩及应力^[5,6]。此外,通过对变速恒频风力发电系统的励磁控制,能够实现无电流冲击的软并网,使系统的运行更加平稳和安全。

变速恒频风力发电系统并网运行过程的控制目标主要是最大限度地将穿越风机的风能转换为电能。同时,在风速较高时,受风力发电系统机械和电气元件安全因素的限制,风机转速以及系统功率输出应维持在额定值附近。因此,变速恒频双馈风力发电系统的并网运行基本控制策略包括额定风速以下的最优功率输出控制以及高于额定风速时的恒功率控制。这种控制策略反映在两个静态最优曲线,如图 1.8 所示。

由图中可以看出,根据不同的风速范围,变速恒频风电系统的运行又可以分为启动(A~B)、低风速时的最优功率输出(B~D)以及高于额定风速时的恒功率输出(D~E)等阶段。其中,启动阶段完成风力发电系统由停机到并网的操作;低风速时控制系统通过调节电机电磁转矩实现系统的变速运行,保证系统在不同风速条件下均能最大限度地捕获风能;在高风速状态下,风机能量的获取将受到功率变换器容量等物理性能的限制。控制系统的控制目标是保持风力发电系统恒定的功率输出并使传动系统具有良好的柔性。

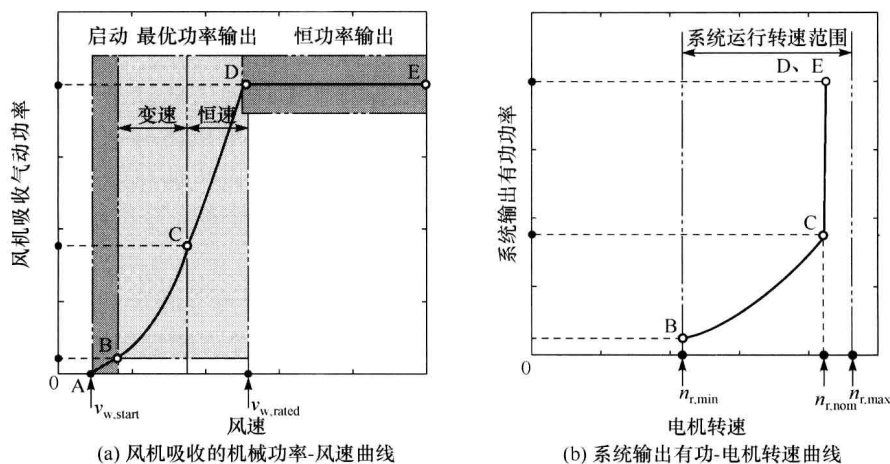


图 1.8 变速恒频风力发电系统运行曲线

1. 启动阶段

目前,大、中型风力发电系统主要利用风能的作用实现启动过程。风机启动前处于静止状态,叶片节距角为 90° ,此时穿过风机的气流对叶片不产生转矩。当风速达到启动风速时,叶片向 0° 节距角方向转动,气流与叶片间的攻角逐渐增大,风机开始启动。由于此时的风速较低,风力发电系统处于非工作状态,即并未向电网供电,风机在风能作用下作非受控性机械转动。当电机转速达到切入速度后,控制系统通过变桨距执行机构改变叶片节距角来调节风机转速,使其保持恒定或在允许范围内变化。同时,调节电机状态以满足并网条件并在适当时刻进行并网操作。

2. 最优功率输出阶段

该阶段对应于风力发电系统并入电网,运行在额定风速以下的区域。此时,风力发电系统开始将风机捕获的风能转换成电能输送到电网。在最优功率输出阶段,系统的输出功率低于系统额定功率,叶片节距角保持在 0° 附近不作变化,可认为等同于定桨距风力发电系统。控制系统的主要任务是根据风速的变化连续调节风机转速以最大限度地吸收风能。然而,由于受到风机机械性能的限制,最优功率输出阶段又可分为 2 个运行区域,即变速运行区域和恒速运行区域。

1) 变速运行区域

风力发电系统实现并网后即进入变速运行区域。由空气动力学原理可知,通过水平轴上风向风机的气动功率不能被全部吸收^[7]。贝兹公式指出,风机可吸收的最大功率为

$$P_{m,\max} = \frac{8}{27} \rho S v_w^3 \quad (1.1)$$

式中, $P_{m,\max}$ 为风机可吸收的最大功率; ρ 为空气密度; S 为风机扫过面积; v_w 为风速。

由此可以推得风机的理论最大效率, 即

$$\eta_{m,\max} = \frac{P_{m,\max}}{P_w} = \frac{\frac{8\rho S v_w^3}{27}}{\frac{\rho S v_w^3}{2}} = \frac{16}{27} \approx 0.593 \quad (1.2)$$

式中, $\eta_{m,\max}$ 为风机理论最大效率; P_w 为穿过风机的气流具有的动能。

实际中, 风机的平均效率均小于 0.593。为了反映风能利用率, 定义风机吸收的功率和气流通过风机时具有的动能比为风能利用系数 C_p , 它与风速、风机转速以及叶片节距角 θ 有关。风机在不同风速下的状态通常用风机叶片的叶尖速度与风速间的比值来衡量, 称之为叶尖速比, 即

$$\lambda = \frac{\omega_T R_T}{v_w} \quad (1.3)$$

式中, λ 为叶尖速比; ω_T 为风机旋转机械角速度; R_T 为风轮半径。

风机的风能利用系数 C_p 与叶尖速比 λ 及叶片节距角 θ 之间的关系, 即风机功率特性曲线, 如图 1.9 所示。

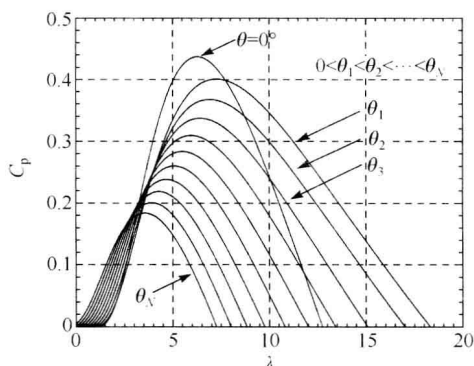


图 1.9 风机风能利用系数 C_p 与叶尖速比 λ 及叶片节距角 θ 的函数关系图

节距角 θ 为 0° 时, 在不同风速下得到的风机输出功率特性曲线如图 1.10 所示。可以看出, 当风机叶片节距角 θ 保持恒定时, 总存在着一个对应着最大风能利用系数 $C_{p,\max}$ 的最佳叶尖速比 λ_{opt} , 此时风机的转换效率最高。换言之, 在某一风速下风机只有运行于一个特定的转速 ω_T 时, 风力发电系统才能处于最佳工作状态。因此, 为了最大限度地捕获风能, 风速变化时系统应做变速运行。此时, 控制系统的主要任务是根据风速实时调节风机转速, 使风机运行于最佳叶尖速比 λ_{opt} , 确保

风机的风能利用系数 C_p 始终保持为最大值 $C_{p,\max}$ 。风机转速的调节过程是通过控制风力发电机定子侧的有功输出,即通过控制电磁转矩实现。

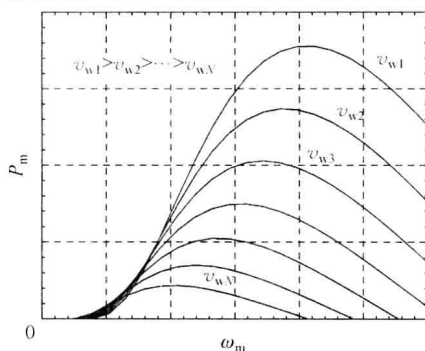


图 1.10 风机输出功率曲线

在风速可测的情况下,依据风机的功率特性曲线将任一给定时刻最佳发电机转速设置为风速的函数,利用测量出的风速经过查表得出发电机最佳转速,最佳转速指令与反馈的实际转速之差经过调节器处理后,获得发电机的转矩电流指令信号。这种控制方法要求测量的风速与作用在风机叶片的风速具有良好的关联性。然而,风速必须在到达风机之前测出且风速在整个风机扫掠面积上略有不同,所以这种控制策略难度较大。

为了避免风速的测量,通常根据风机的功率特性曲线,利用转矩与转速的平方关系式控制发电机电磁转矩,即

$$T_{e,\text{ref}} = K_{\text{opt}} \omega_m^2 \quad (1.4)$$

式中, $T_{e,\text{ref}}$ 为发电机电磁转矩参考值; K_{opt} 为对应于 $C_{p,\max}$ 的比例系数; ω_m 为发电机机械角速度。

该控制方法省去了风速测量环节,仅需测量风机或发电机转速即可实现控制目标。尽管风机叶片及发电机转子较大的转动惯量使得风速改变时风机转速变化速度相对较慢,以发电机转速为依据的控制策略并不能保证风力发电机准确跟踪最大风能利用系数 $C_{p,\max}$,但接近于最佳曲线,实际的控制效果较为理想,具有较大的实用价值。

为了进一步改善风力发电系统转速对风速变化的跟踪性能,一般将发电机视为风速测量仪器,利用发电机转速方程设计负载转矩观测器以观测风机受到的机械转矩,进而根据风机功率特性曲线获得发电机参考转速,通过调节发电机电磁转矩使风机转速尽快到达参考值。

发电机参考转速可以写为

$$\omega_{m,\text{ref}} = \sqrt{\frac{\hat{T}_m}{K_{\text{opt}}}} \quad (1.5)$$

式中, $\omega_{m, \text{ref}}$ 为发电机机械角速度参考值; $\hat{T}_m$ 为电机机械转矩观测值。

2) 恒速运行区域

在变速运行区域, 风机转速会随着风速的增加不断升高, 但风力发电系统的安全因素决定了其转速必须受到限制。随着风机转速的不断升高, 系统输出即使没有达到额定功率, 电机转速也已经达到允许的最大转速即额定转速, 此后系统进入恒速运行区域。为了保护部件免受损坏, 随着风速的增大控制系统不再进行最大风能捕获控制, 而是将电机转速限制于额定转速附近。恒速运行的风力发电系统对应的风能利用系数偏离最大值 $C_{p, \text{max}}$, 输出功率虽然在达到额定值之前持续增长, 但其变化速度低于变速运行区域输出功率的变化速度。

3. 恒功率输出阶段

最优功率输出控制能够在风速变化时提高系统的发电效率, 增加其捕获的能量, 但在风力发电系统运行于额定风速 ($12 \sim 16 \text{m/s}$) 以上区域时, 由于受机械强度和电机、功率变换器容量等物理性能的限制, 要求控制系统通过调节风机的气动功率将风力发电系统的功率输出稳定于额定值附近, 避免其过载运行, 同时减少叶片承受载荷, 保证风机不受损坏。实际的风力发电系统中风机的气动功率调节主要有定桨距失速调节、变桨距调节和主动失速调节等方式^[8]。

1) 定桨距失速调节

定桨距是指叶片与风机轮毂刚性连接, 系统运行过程中叶片节距角保持不变, 即当风速变化时, 叶片的迎风角度不能随之变化。随着风速增加, 攻角增大, 风机叶片表面逐渐产生涡流, 上下翼面压力差减小, 致使阻力增加、升力减少, 造成叶片失速、效率降低, 从而限制系统的功率输出。这种系统通常采用两个不同功率、不同极对数的异步电机, 大功率高转速电机工作在高风速区, 小功率低转速电机工作在低风速区, 以此来改善风力发电系统的运行性能。

定桨距失速调节不需功率反馈系统和变桨距执行机构, 在风速波动时利用叶片被动失速特性实现对系统输出功率的调节, 控制系统不作任何控制。整机结构简单、造价低、安全系数较高。然而, 这种气动功率调节方式依赖于叶片独特的翼型结构, 叶片本身结构复杂、成型工艺难度较大。随着系统容量增大, 叶片加长、刚度减弱, 失速动态特性不易控制, 因此定桨距失速调节很少应用于兆瓦级及以上容量的大型风力发电系统。

2) 变桨距调节

为了提高风机的风能转换效率、保证风力发电系统输出功率平稳, 风机通常需要进行桨距调整。在定桨距基础上安装桨距调节环节即构成变桨距风力发电系统。此类系统的气动功率调节不完全依靠叶片自身的气动特性, 而通过改变叶片节距角实现。在额定风速以下时叶片节距角不作任何调节变化, 可认为等同于定