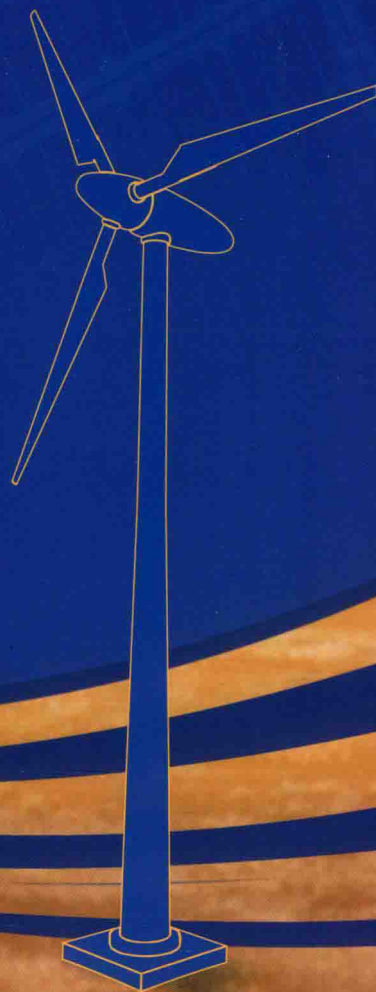


风力发电系统

功率控制与载荷抑制技术

陈家伟 / 著

Power Control and Dynamic Load
Reduction Strategies for Wind Energy Conversion System



科学出版社

风力发电系统功率控制 与载荷抑制技术

陈家伟 著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书主要围绕变速风力发电系统在运行过程中的功率控制和载荷抑制问题展开深入的研究,为实现风力发电系统单位发电功率所需成本最小化的目标提供有效的解决方法。本书内容分为三部分:第一部分阐述变速风力发电系统的结构和工作原理,建立并分析永磁直驱风力发电系统的模型,为全面掌握其运行特性打下坚实基础;第二部分研究风力发电系统的功率控制技术,提出一种较为通用的新型全风速范围功率控制器及其设计方法,解决采用现有控制器时系统最大功率跟踪速度随风速时刻变化,无法按需设计跟踪速度的难题;第三部分深入分析风力发电系统中的传动链在运行过程中承受的不同动态载荷的产生机理,提出相应的抑制策略,保证机组的长期服役。

本书既讲述风力发电系统的控制技术基础,又介绍其工程实现方式,可为从事风力发电领域研究工作的科研人员及工程师提供有益参考。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电系统功率控制与载荷抑制技术 / 陈家伟著. —北京: 科学出版社, 2018.3

ISBN 978-7-03-056759-8

I. 风… II. 陈… III. 风力发电系统-研究 IV. TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 047895 号

责任编辑: 张 展 陈 杰 / 责任校对: 彭 映 周小艳

责任印制: 罗 科 / 封面设计: 墨创文化

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>

四川煤田地质制图印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年3月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

2018年3月第一次印刷 印张: 10

字数: 220千字

定价: 88.00元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



前言

风能作为可再生能源中发展最为迅速的能源之一,因其丰富的资源和技术优势,已成为当前国内外研究和发展的重点。风力发电系统的研究目标为增加机组捕获的功率,提高机组的可靠性、延长使用寿命,最大限度地降低机组单位发电功率所需的成本。为实现这一目标,书中围绕变速风力发电系统在全风速范围内的功率控制和载荷抑制技术展开深入的研究。本书共6章,主要包括:

第1章为绪论,介绍风力发电的意义、研究现状和目前存在的技术难题。

第2章介绍风力发电系统的常用结构,并以永磁直驱风力发电系统为例,建立两质量块模型,通过模型分析,掌握机组的运行特性,为其控制系统的设计奠定理论基础。

第3章详细介绍风力发电机组的动态模拟技术,可为快速开发风力发电机组的控制系统提供简单有效的实验验证平台。

第4章围绕风力发电机组在全风速运行范围内的功率控制技术展开深入分析:针对目前常用的最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制策略存在通用性差且跟踪速度随风速变化而变化的问题,先后提出一种具有较强通用性的MPPT控制方法和维持MPPT速度恒定的方法,大大优化了机组的MPPT运行性能;针对定桨距机组在高风速区恒功率控制实现困难的问题,提出恒功率控制策略,并针对机组在高风速区运行时存在稳定性差的问题提出相应的解决方案。

第5章详细地探讨风力发电机组在运行中承受的不同动态载荷分类及相应抑制策略,包括:针对由机组跟踪转速指令引起的瞬态载荷,提出MPPT速度的优化设计原则,达到了机组捕获能量和承受载荷的合理平衡;针对风轮叶片对三维风场的旋转采样引起的气动载荷,提出有源阻尼注入的控制方法,使其大幅衰减;针对定桨距机组运行模式变化时承受的过渡载荷,提出软失速控制方法,使机组承受的过渡载荷较常规失速下降了近80%;对于采用二极管不控整流的微型、小型风力发电机组,提出一种低成本的高频载荷抑制策略,使高频载荷得到了大大的衰减。

第6章详细设计一台10kW的户用型风力发电系统,并对其功率控制、能量管理、启动、停机、偏航、解缆等辅助功能的实现方法进行详细分析与设计,为科研人员和工程师掌握风力发电系统的设计提供参考。

本书由陈家伟主笔,陈杰参与了第3章及第4.4节的编写工作,龚春英教授对本书的编写提出了宝贵的修改意见。本书受国家重点基础研究计划(973计划, 2007CB210303)、国家自然科学基金项目(51307084)及重庆大学百人计划启动经费资助,

在此表示感谢。

由于作者水平有限，错误及疏漏之处在所难免，敬请各位专家和广大读者指正。

目 录

第1章 绪论	1
1.1 风力发电的发展背景	1
1.1.1 发展清洁能源, 筑建绿色家园	1
1.1.2 风能的开发利用	2
1.2 风力发电的现状	3
1.2.1 全球风力发电的现状	3
1.2.2 我国风力发电的现状	5
1.3 风力发电系统中的控制技术	6
1.3.1 风力发电系统的基本控制目标	6
1.3.2 功率控制技术的研究现状	7
1.3.3 载荷抑制策略的研究现状	9
1.4 本章小结	10
第2章 风力发电系统建模及运行特性分析	11
2.1 风力发电系统组成及常用结构	11
2.1.1 恒速运行机组结构	12
2.1.2 有级变速运行机组结构	13
2.1.3 带部分功率变换结构	13
2.1.4 带全功率变换结构	14
2.1.5 本书实例分析中采用的机组结构	14
2.2 风速模型	15
2.2.1 平均风速模型	16
2.2.2 湍流风速模型	17
2.3 风力发电系统模型的建立	18
2.3.1 风力机的空气动力学	18
2.3.2 传动链模型	19
2.3.3 电气子系统模型	20
2.3.4 风力发电系统的模型	21
2.4 风力发电系统特性分析	22
2.5 本章小结	26
第3章 风力机特性模拟技术	27
3.1 风力机模拟的必要性	27

3.2 风力机模拟系统原动机的选取	28
3.2.1 直流电动机	28
3.2.2 异步电动机	29
3.2.3 永磁同步电动机	29
3.2.4 三种电动机的简单比较	29
3.3 风力机的模拟	30
3.3.1 风力机的静态模拟	30
3.3.2 风力机的动态模拟	31
3.3.3 转速加速度的计算方法	32
3.4 风力机模拟系统的设计	36
3.4.1 硬件设计	36
3.4.2 软件设计	38
3.5 本章小结	39
第4章 变速风力发电系统的功率控制技术	40
4.1 风力发电系统功率控制概述	40
4.2 低风速区的最大功率点跟踪控制策略研究	41
4.2.1 MPPT 基本策略原理分析	41
4.2.2 新型最大功率点跟踪控制策略	45
4.2.3 MPPT 跟踪速度分析及跟踪系统带宽恒定方法	53
4.3 高风速区限转速及限功率控制策略研究	61
4.3.1 恒转速控制策略	62
4.3.2 恒功率控制策略	63
4.4 全风速功率控制策略实验研究	71
4.5 风力发电系统的智能控制技术初探	72
4.5.1 自适应模糊控制技术	73
4.5.2 单神经元控制技术	88
4.6 本章小结	89
第5章 变速定桨风力发电系统的载荷抑制技术	91
5.1 风力发电系统承受的传动链载荷	91
5.1.1 载荷分类及其定义	91
5.1.2 载荷的相互影响关系	95
5.2 瞬态载荷的优化控制技术	96
5.2.1 瞬态载荷与 MPPT 系统带宽关系分析	96
5.2.2 MPPT 带宽优化选取原则	97
5.3 气动载荷的抑制技术	98
5.3.1 系统阻尼分析	99
5.3.2 阻尼注入后系统性能分析	100
5.3.3 阻尼注入方法	102

5.4 定桨距机组的过渡载荷抑制技术	108
5.4.1 过渡载荷的测试	108
5.4.2 软失速控制策略	109
5.4.3 软失速控制运行性能实验研究	111
5.5 小功率机组高频载荷抑制技术	114
5.5.1 高频载荷抑制原理分析	115
5.5.2 一种简单的高频载荷抑制方法	117
5.5.3 高频载荷抑制策略实验分析	118
5.6 本章小结	120
第 6 章 10kW 离网风力发电系统研制实例	121
6.1 10kW 离网风力发电系统设计要求	121
6.2 系统总体设计	122
6.3 主功率电路设计	123
6.3.1 交错并联 Boost 变换器	123
6.3.2 Buck/Boost 双向直直变换器的设计	124
6.3.3 逆变器的选择	125
6.3.4 偏航与制动电机驱动器设计	125
6.4 离网风力发电系统的功率控制与能量管理策略	126
6.4.1 机组工况分析	127
6.4.2 能量管理策略	128
6.5 辅助控制系统设计	130
6.5.1 启动与停机控制	130
6.5.2 自动偏航控制	131
6.5.3 自动解缆控制	132
6.6 离网风力发电系统实验研究	133
6.7 本章小结	134
参考文献	135
附录	143
附录一: 风力发电系统实验平台与数据检测系统图	143
附录二: 程序流程图	144
附录三: 功率谱密度 MATLAB 计算方法	147
附录四: Boost 和 BDC 电感磁芯设计方法	148

第1章 绪 论

在众多可再生能源发电技术快速发展的今天,风力发电技术因政策和技术上的优势已被世界各国视为解决能源危机和环境污染问题的重要手段。本章将对风力发电系统的发展背景、现状及功率控制的研究现状进行简要的分析,指出目前的研究热点和技术难点。

1.1 风力发电的发展背景

1.1.1 发展清洁能源, 筑建绿色家园

世界能源发展主要经历了三次重要的更迭:第一次是煤炭取代薪柴成为主要能源;第二次是石油取代煤炭占据主要地位;第三次则是当今世界在石油能源日益枯竭的情况下向多能源结构的过渡。目前,世界能源结构仍是以石油、天然气和煤炭三大传统能源为主。为适应未来能源发展需求,风能、水能和太阳能等清洁能源得到了快速的发展。

随着人类社会的不断进步、科技水平的不断提高,人类对能源的需求越来越大,能源的消耗量急速上升。据有关资料介绍,世界原油储量还能开采使用约 76 年,天然气储量还能开采使用约 96 年,煤储量还能开采使用约 220 年,核燃料储量还能开采使用约 86 年,全球面临着能源紧缺的危机。同时,化石燃料发电在燃烧过程中排放的大量温室气体和污染物质与全球气候变暖及环境恶化有着直接的联系。目前通用的方法是对排放气体进行脱硫脱硝等处理,但这只能在一定程度上减少污染物的排放量,并不能减少温室气体的排放量。因此,利用新能源进行发电的构想被提上日程,并在世界范围内得到快速发展。

能源是国民经济的基础,是推动人类社会前进的源泉。自工业革命以来,随着工业化和全球化浪潮的不断推进,人类对能源的需求急剧膨胀。然而,作为当前世界能源支柱的煤炭、石油、天然气等不可再生的常规化石能源的储量有限,按 2002 年全球已探明的资源储量以及当年的年产量计算,煤炭的储采比为 200 年、天然气为 60 年、石油则只有 40 年,人类社会正面临着能源枯竭的困境。我国人口众多,约占世界总人口的 20%,然而能源储量则相对匮乏,已探明的煤炭储量占世界储量的 11%、石油占 2.4%、天然气仅占 1.2%,常规能源的人均拥有量低^[1]。但是,在能源消耗方面,我国已经超过美国,成为全球能源消耗第一大国。我国能源储量和需求比例严重失调,解决能源问题迫在眉睫。

另一方面,能源的利用技术滞后、效率低下。常规化石能源的大量使用,使得一些主

要污染物的排放量超过了环境的承载能力,各种环境问题接踵而来。城市河流和空气污染日益严重,酸雨沉积面积逐渐扩大,持久性有机污染物的危害开始显现,土地污染面积扩大。尤其是 CO_2 等温室气体的大量排放,导致全球气候变暖、冰川消融、海平面上升,土地荒漠化以及自然灾害频发。环境污染和生态破坏不仅造成了巨大的经济损失,更危害着社会稳定和国家的长治久安。

能源危机和环境问题已经成为制约社会经济发展的两大瓶颈。因此,因地制宜,大力发展风能、太阳能、地热能、潮汐能等绿色可再生能源,突破能源瓶颈,使得传统能源的利用与新能源的开发并举,实现能源利用与环境保护共进,成为改善能源结构、推动能源结构的调整与改革、保障能源安全的重要举措,得到了各国政府的普遍重视。

1.1.2 风能的开发利用

在可再生能源的开发和利用中,发展最快、商业化应用最广和普及率最高的是风能。风能的开发利用,最早可以追溯到几千年前。在当时,风能的主要用途是碾磨粮食和提水浇灌。风能真正用于发电始于 1973 年的石油危机,之后逐渐发展为可再生能源开发利用的主要形式。

风力发电之所以能够从诸多新能源发电技术中脱颖而出,主要得益于它在以下几个方面得天独厚的优势:

(1) 风能是一种洁净的可再生能源,对环境的负面影响小,且资源丰富,取之不尽用之不竭。据统计,地球上的风能约为 2.74×10^7 亿 kW,其中可利用的风能有 2×10^5 亿 kW,比地球上可开发利用的水能总量大 10 倍。我国的风能资源也非常丰富,据国家统计局统计,在距地表 10m 高度以内可开发利用的风能资源约为 10 亿 kW,其中陆地为 2.5 亿 kW,海上为 7.5 亿 kW。如果将高度扩展到 50~60m 以上,风能资源将有望增加到 20 亿~25 亿 kW,位居世界第三位。

(2) 风力发电相关技术日趋成熟。空气动力学理论的建立,新型高强度、轻质材料的出现,自动控制技术的不断突破以及计算机技术的应用和蓬勃发展,为风力发电技术向大功率、高效率、高可靠性和高智能化等方向发展提供了充足的条件。机组的运行可靠性不断提高,制造及维修成本逐渐降低。

(3) 政策上的扶持。自 1997 年《京都议定书》(Kyoto Protocol)签订以后,减少温室气体排放等一系列具体目标已经落实到地区和国家层面,从而促使世界各国相继出台一系列扶持和优惠政策,对风能的开发和利用加以引导和鼓励,旨在占领风力发电的技术和市场优势。中国政府将风力发电作为改善能源结构、应对气候变化和能源安全问题的主要替代能源技术之一,出台了一系列的相关政策,对风力发电的相关研究给予了大力的扶持,制定了风电设备国产化相关政策和 2020 年风电装机容量达到 3000 万 kW 的目标,并辅以“风电特许权招标”等措施,推动技术创新、市场培育和产业化发展^[2]。

(4) 价格优势显现。随着技术的不断进步和突破,风电每千瓦时的成本从 20 世纪 80 年代的 0.3 美元降至目前的 0.05 美元,已经接近煤电,低于油电和核电。若考虑煤电在环境治理和交通运输等方面的投入,风电的经济性甚至要优于煤电。

(5) 建设周期短。风力发电机组的建设和安装仅需几个星期，并可多台机组同步进行。而建设一个风电场，从基建、安装到投产，也只要半年至一年的时间，远远小于核电、水电等需要三到十年的建设周期。

(6) 占地面积小。塔架与监控系统及输配电建筑仅占风电场的 1%，其余 99% 的土地仍可正常使用，提高了土地的利用率。若是小功率机组，可选择屋顶等位置安装，灵活美观。

1.2 风力发电的现状

1.2.1 全球风力发电的现状

世界风能理事会 2017 年 4 月 25 日在印度新德里发布了其旗舰出版物《全球风电报告：年度市场发展》^[3]。报告显示：

(1) 2016 年全球风电新增装机容量超过 54GW，其中中国以 42.8% 的年增长率高居榜首，美国年增长率则从 2008 年的第一位退居第二，详情如图 1.1 所示。

(2) 截至 2016 年底，全球累计风电装机容量达到 486.8GW，2005~2016 年新增装机容量年平均增长率超过 22%，如图 1.2 所示。

(3) 2016 年的风电市场由中国、美国、德国和印度引领，法国、土耳其和荷兰等国的表现超过预期，尽管在年新增装机容量上 2016 年未能超过创纪录的 2015 年，但仍达到了较高水平，如图 1.3 所示。

(4) 预计未来五年全球风电行业仍将保持稳定增长，且增幅在 10% 以上。未来五年中国将继续在全球风电行业处于领先地位，北美和欧洲的增长依旧非常强劲，印度风电未来的发展潜力巨大，而非洲也将经历强劲增长，由肯尼亚、南非和摩洛哥引领，非洲大陆上的未来发展图景非常乐观，如图 1.4 所示。

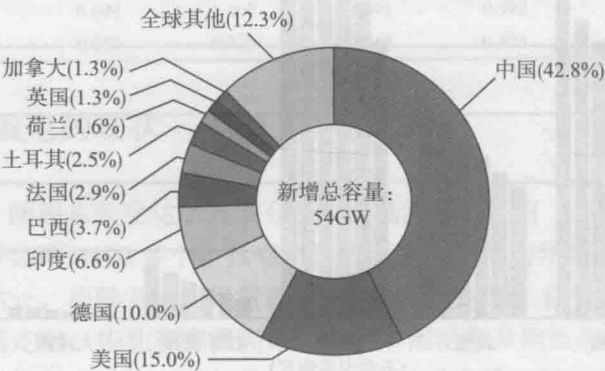


图 1.1 2016 年全球各国新增装机容量分布图

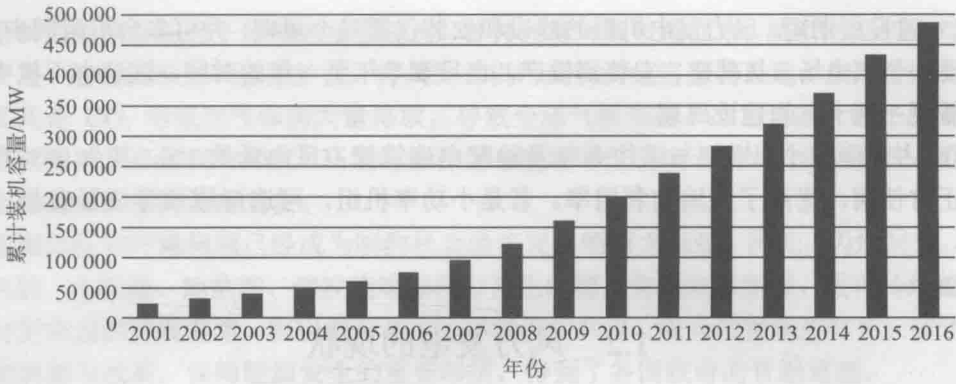


图 1.2 2001~2016 年全球累计装机容量

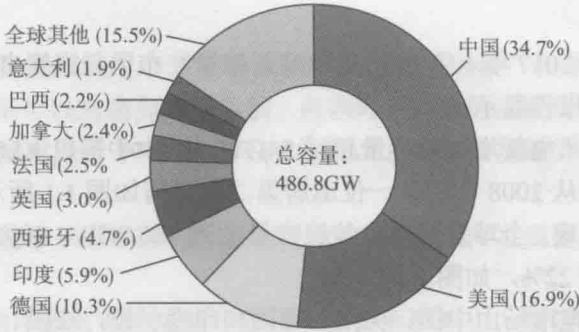
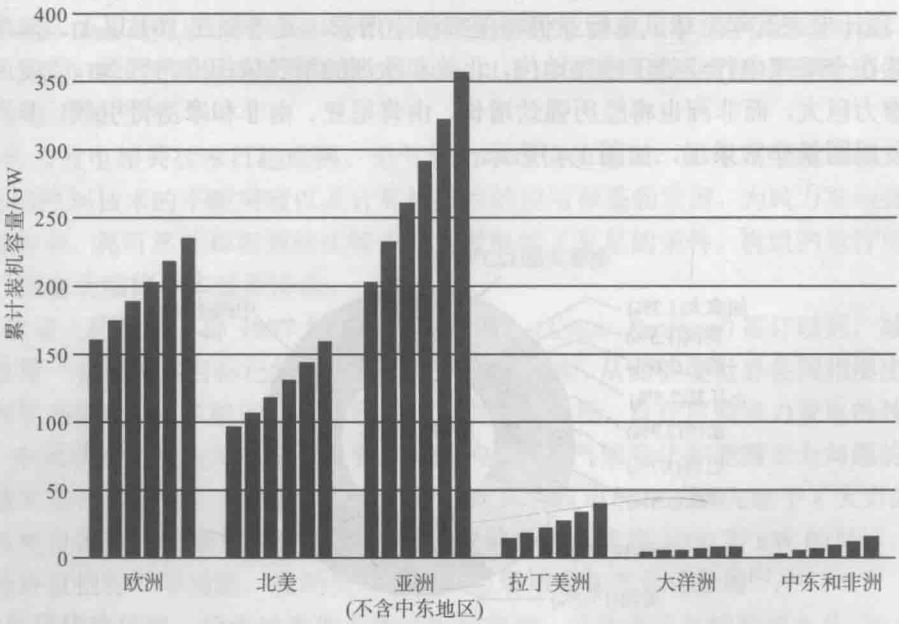


图 1.3 2016 年全球各国累计装机容量分布图



注：从左到右分别表示 2016~2021 年

图 1.4 2016~2021 年各大洲(地区)累计装机容量预测

此外，纵观风电市场的统计数据和全球各国的风电政策，可以看到风电产业开始呈现出两极分化的趋势，新增风电机组主要集中于兆瓦以上的大型机组和功率等级在 100kW 以下的中小型机组。虽然在一些大型风电企业的宣传作用下，人们感觉似乎是兆瓦级以上的大型机组一枝独秀，但是在世界各国大力发展分布式发电与微电网技术的当下，作为其主要微源，功率等级在 100kW 以下的中小型风力发电机组的发展势头也非常强劲。

美国发展中小型风电机组的时间较早，早在 2008 年 10 月，美国国会就通过了一个为期 8 年的投资税减免 (investment tax credit) 30% 的优惠政策。美国能源协会 (DOE) 公布的 2016 年中小型风力发电机组市场调查报告显示^[4]，在 2013~2016 年期间，美国累计新增中小型风机装机容量达到 146.6MW，总销售额超过 9100 万美元。

英国是全球第二大中小型风力发电机组安装和生产的国家，仅次于美国。英国新能源协会 (Renewable UK) 的统计数据显示^[5]，2015 年英国的中小型风力发电机组的装机总容量达到了 284MW，总发电量达到 391GW·h。为了鼓励和扶持新能源的发展，尤其是分布式中小型风力发电，从 2010 年 4 月开始，英国开始推行创新性的风电上网电价 (feed-in-tariffs) 政策，如表 1.1 所示。可以看出，微型机组 (<1.5kW) 的风电价格是大型机组 (>1.5MW) 的 7.7 倍，足以看出英国对中小功率风电产业的重视程度。

根据世界风能理事会最新数据，截止到 2016 年，全球中小型风电累计装机容量超过 1.6GW，年均增长率超过 10%^[6]。目前，已经有越来越多的国家和机构认识到中小型风力发电机组的优势，并纷纷出台了旨在促进中小型风电发展上网的电价政策。随着“居民”发电上网政策在全球范围的推行和完善，以及分布式发电在全球范围内的快速增长，相信在今后的几十年中小功率风力发电机组将会持续增长。

表 1.1 英国风电上网电价政策

功率等级	2010 年		2011 年		2012 年	
	£/(kW·h)	¥/(kW·h)	£/(kW·h)	¥/(kW·h)	£/(kW·h)	¥/(kW·h)
<1.5kW	0.345	3.64	0.345	3.640	0.33	3.48
1.5kW~15kW	0.267	2.817	0.267	2.817	0.255	2.690
15kW~100kW	0.241	2.543	0.241	2.543	0.230	2.427
100kW~500kW	0.188	1.983	0.188	1.983	0.188	1.983
500kW~1.5MW	0.095	1.002	0.094	0.992	0.094	0.993
1.5MW~5MW	0.045	0.475	0.045	0.475	0.045	0.475

1.2.2 我国风力发电的现状

我国幅员辽阔，陆疆总长度达 2 万多公里，大陆海岸线则有 1.8 万多公里，还有分布在边缘海域中的各种岛屿 5000 多个，具有丰富的风能资源，为风电产业的发展奠定了良好的资源基础。据估计，内陆及近海风资源可开发总量约为 10 亿 kW，主要分布在内蒙古、新疆、甘肃河西走廊、华北和青藏高原，以及东南沿海及附近岛屿等部分地区。

我国风电场建设始于 20 世纪 80 年代，在其后的十余年中，经历了初期示范阶段和产业化建立阶段，装机容量平稳、缓慢增长。自 2003 年起，随着国家发展和改革委员会首期风电特许权项目的招标，风电场建设进入规模化及国产化阶段，装机容量增长迅速。2006

年开始,连续四年装机容量翻番,形成了爆发式的增长。2011 年前后,风电行业步入低谷,“弃风限电”成为行业阵痛期的主题。2011 年我国新增风电装机容量同比首次出现萎缩,2012 年我国弃风率达到历史最高的 17.12%,新增风电装机更是同比减少 26.49%。风电行业的过度发展导致了众多问题,风机脱网事故频发,弃风限电现象严重,产能过剩严重。2011 年上半年,国家发展和改革委员会收回风电项目的审批权,要求各省核准风电项目前须先向国家能源局上报核准计划,通过限制项目审批遏制地方政府冲动,缓解风电过剩风险。2011~2013 年,风电行业经历了大规模的整合,缺乏竞争力的企业遭到淘汰,企业更加关注自主研发以提升自身的竞争实力,在此过程中整个行业逐渐走向成熟,进入稳定有序的增长阶段。近年来,我国风电的快速发展,得益于明确的规划和不断更新升级的发展目标,使得地方政府、电网企业、运营企业和制造企业坚定了对风电发展的信心,并且有了一个努力的方向和目标;风电的快速发展,也促使规划目标不断地修正和完善。

中国政府将风力发电作为改善能源结构、应对气候变化和能源安全问题的主要替代能源技术之一,并给予了大力的扶持。近年来,中国风电产业持续快速增长。图 1.5 为 2001~2016 年我国风电累计装机容量增长情况。目前,我国已成为全球风力发电规模最大、增长最快的市场。据世界风能理事会的统计,2016 年我国新增风电装机容量 23 328MW,占当年全球新增装机容量的 42.7%,截至 2016 年底,我国风电累计装机容量为 168 690MW,占全球累计装机容量的 34.7%,位居全球第一^[3]。

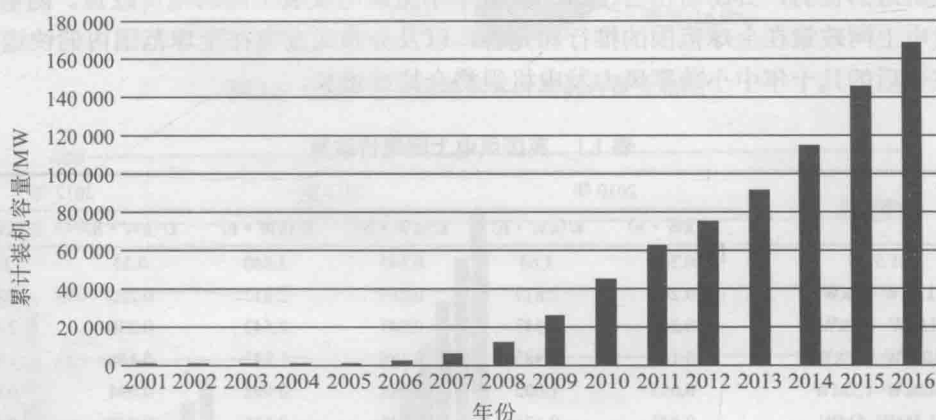


图 1.5 2001~2016 年中国风电累计装机容量增长情况

1.3 风力发电系统中的控制技术

1.3.1 风力发电系统的基本控制目标

风力发电系统的本质为捕获部分的风能并将其转化为电能,供用户使用。总体而言,对风力发电系统的基本要求为提高机组的可靠性、延长机组的使用寿命,并保证机组发电的电能质量,避免对电网造成闪变(并网结构)或对用户用电设备(离网结构)带来不利影

响。为了实现该目的，需要对机组进行控制，控制的基本目标主要可概括为三方面：

- (1) 优化机组承受的动态载荷。主要包含减小机组的瞬态载荷、过渡载荷以及为传动链提供足够的阻尼以减小气动载荷，避免机组固有谐振状态被激发^[7-9]。
- (2) 平滑输出功率，提高电能质量。需要提高机组发出的电能质量，满足并网需求(或用户用电设备需求)，减小闪变^[10-13]。
- (3) 提高机组的发电量。额定风速以下应采用优化的最大功率跟踪控制，额定风速以上的高风速区应对机组的转速和功率实施限制，在保证机组安全稳定运行的前提下，实现能量捕获的最大化^[14-18]。

实际上，上述三个控制目标又与机组所采取的控制策略相互关联：①机组承受的动态载荷(包括瞬态载荷、过渡载荷以及气动载荷)与所采用的功率控制策略紧密相关，优化控制策略是改善动态载荷的有效手段；②平滑输出功率除了增加必要的储能环节外，正确合理的功率控制策略也是其必要的保证；③由于现代风力发电机组多采用变速运行，发电机与用电设备之间需增加功率电子变换器连接以实现电机转速与电网(或用电设备)频率的解耦，机组传动链阻尼小(尤其是采用多级永磁同步发电机后，阻尼变得更小^[19])，易引发谐振，需要通过控制手段(如注入阻尼)来加以避免；④机组能量捕获也与所选择的控制策略以及实现该控制策略所采用的调节器的有效性有关。

由以上分析可知，对机组的优化控制可合并为：提高机组捕获的能量(功率控制)以及减小机组承受的动态载荷(载荷抑制)。下面将对功率控制和载荷抑制技术的国内外研究现状做简要的分析。

1.3.2 功率控制技术的研究现状

为了提高风力发电机组的综合性能，一方面，需要对机组的输出功率进行优化控制，提高机组的发电量；另一方面，需要保证机组的安全运行，防止机组过速飞车以及过功率损坏。这就要求控制机组的发电功率在全风速运行范围内(切入风速 v_{min} 至切出风速 v_{max})跟踪如图 1.6 所示的最佳功率曲线^[14, 15]。从图中可知，对机组功率的优化控制主要包含三个状态：切入风速 (v_{min}) 至额定转速对应的风速 (v_{QN}) 间的最大功率点跟踪 (maximum power point tracking, MPPT) 运行、额定风速 (v_N) 至切出风速 (v_{max}) 间的恒功率 (constant power, CP) 运行，以及上述两者之间 (v_{QN} 至 v_N) 的恒转速 (constant speed, CS) 运行。

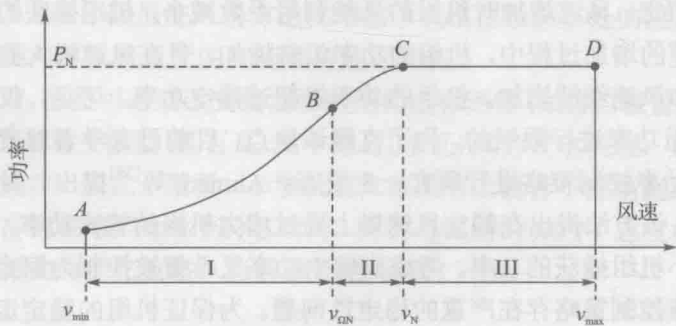


图 1.6 理想运行曲线

当机组在额定风速以下运行时,可通过电气控制(即控制发电机的电磁转矩)来实现对功率的优化控制,包括 MPPT 控制和恒转速控制;机组在高风速区运行时,变桨距机组可采用变桨控制(机械控制)的方法来实现对机组功率的限制。而定桨距机组因桨距角固定不可调节,只能通过电气控制使机组进入失速区运行,以达到限制机组捕获功率的目的。根据现有的文献报道,国内外对机组能量捕获技术的研究现状具有以下两个特点:

(1)低风速区的 MPPT 控制:研究重点为提出新型的 MPPT 控制策略来提高机组的 MPPT 速度,从而最大限度地提高机组捕获的风能。具有代表性的几篇文献报道为:Agarwal 等^[20]引入 MPPT 中间变量因子 β 来划分机组的运行区间,通过判断机组所运行的区间而施以相对应的 MPPT 控制策略,提高了 MPPT 的速度;Pan 等^[21]提出了一种基于气动转矩反馈的控制方法,因气动转矩的引入克服了采用电磁转矩反馈时转动惯量带来的延时,大大提高了机组 MPPT 速度;Kazmi 等^[22]引入了变步长的扰动观察 MPPT 控制方法,在检测到机组工作点远离最大功率点时,控制策略采用较大步长扰动,加快机组接近最大功率点速度,而当机组工作点靠近最大功率点时,则改用较小步长,以减小机组功率脉动,该方法也提高了跟踪的速度。此外, Lin、Galdi 等学者将模糊、神经网络等智能算法引入 MPPT 控制策略中,同样旨在加快 MPPT 的跟踪速度并提高 MPPT 控制的精度^[23-30]。

实际上,现有的 MPPT 控制方法仍然存在三个缺点:①MPPT 跟踪速度虽然得到提高,但相关结论均为定性分析得到,缺乏对 MPPT 速度的定量分析。②MPPT 控制策略大都采用了基于最佳关系曲线的功率反馈方法,需要预知机组的气动特性曲线;虽然采用扰动观察法可避免获取机组的气动特性曲线,但机组稳态运行时仍然存在功率脉动,不仅降低了机组发电的电能质量,而且使机组传动链承受了额外的动态载荷。因此,MPPT 控制策略缺乏通用性。③机组 MPPT 速度增加的同时,机组传动链上转矩脉动增大(后文定义为瞬态载荷),这是因为 MPPT 跟踪速度的增加意味着需要增大机组的转速变化率($d\omega/dt$),而由机组传动链近似转矩方程 $d\omega/dt = T_r - T_g$ 可知,较大的转速变化率需要快速、大幅地变化电磁转矩 T_g 。瞬态载荷增大,不仅恶化了机组的电能质量,而且使传动链更易疲劳损坏,缩短了机组的服役年限,增加了运营成本。

(2)高风速区的 CP 控制:变桨距机组的相关研究较多,而定桨距机组因 CP 控制实现困难,相关报道较少^[31-35]。机组在低风速区以 MPPT 模式运行时,随着风速的增大,机组的转速和功率增大。当转速达到机组的额定转速时,为了防止机组因超速而损坏,目前国内外报道的控制策略为对机组实施恒转速失速控制^[36,37],即控制机组以额定转速恒转速运行。因机组转速恒定,风速增加时机组的风能利用系数减小,机组捕获的气动功率随之降低。然而,在风速的增加过程中,机组的功率仍将增加,且在风速增大到额定风速时达到额定值。此后,如风速继续增加,机组的功率将超过额定功率。可见,仅采用恒转速失速控制是无法对机组功率进行限制的。为了克服该缺点,目前已有学者对变速定桨机组在额定风速以上的恒功率控制策略进行研究,主要有:Ahmed 等^[38]提出一种额定风速以上的恒功率控制策略。该方法提出在额定风速以上通过增大机组的输出功率,迫使机组进入失速区运行,以减小机组捕获的功率。考虑到输出功率又希望被控制为恒定输出,即实现恒功率运行,因此该控制策略存在严重的稳定性问题。为保证机组的稳定运行,在控制环路中引入了时间常数大于机组转动惯量的延迟环节。但这不仅影响了机组在额定风速以下

MPPT 运行速度,而且机组从 MPPT 运行切换到恒功率运行时机组瞬态载荷过大。Hoffmann 等^[39]初步探讨了定桨距变速风力发电机组的全风速控制策略,但 MPPT、CS、CP 三种控制模式之间的切换需要依赖于风速和功率等信号的比较判断,在运行状态的切换过程中会出现较大的动态载荷(即过渡载荷),且当风速在切换点处上下波动时,会引起控制模式的频繁切换,引起机组振荡,影响机组的安全可靠运行。

1.3.3 载荷抑制策略的研究现状

为了减小机组全寿命周期成本,控制系统不仅要控制机组跟踪最佳功率曲线,提高发电量,还需要减小机组承受的机械载荷,延长使用寿命。机组承受的机械载荷主要分为两类:静态载荷和动态载荷^[40]。静态载荷由机组跟踪平均风速引起,属于有效载荷,不可避免,也无须避免。真正需要通过控制系统抑制的机械载荷为动态载荷。根据动态载荷的来源不同,可将其分为四类(参见书中定义及详细分析):瞬态载荷、气动载荷、过渡载荷以及高频载荷。瞬态载荷由机组跟踪风速的变化引起,跟踪速度越快,瞬态载荷越大;气动载荷为风轮旋转采样三维立体风场引起,其沿着传动链传播时,可能会激发机组的固有谐振状态,导致机组损坏;过渡载荷则由湍流风引起,它的大小将直接影响发电机及后级电力电子变换器的设计容量;高频载荷则由二极管不控整流产生的谐波电流引起。过大的动态载荷将使机组的传动链及关键部件(如齿轮箱)更易疲劳损坏,使机组的服役年限缩短,变相增加机组单位发电功率所需的成本。

对于过渡载荷,目前国内外也有少量的研究报道,主要有: Bianchi 等^[41]研究了机组由 MPPT 运行切换到恒功率运行时承受的瞬态功率过载问题,提出使机组在额定风速以下时工作在非最佳功率曲线(选择 96%~98%最佳功率曲线运行)的方法,从而在过渡过程中风速增加不致使机组功率过载太多。但该方法减小了机组额定风速以下 MPPT 运行时机组的发电效率; Muljadi 等^[42, 43]提出了一种适用于失速型机组的高风速区抑制过渡载荷的方法,该方法提出在达到额定风速以前使机组提前偏离最佳功率曲线运行,从而减小过渡载荷。但该方法损失了过多的功率捕获,设计过于保守。

对于气动载荷,也有相关方法见诸报道,如: Hansen 等^[44]引入带通滤波器,通过将带通滤波器的中心频率设置在机组谐振点处得到了机组转速振荡分量。该转速分量通过相位补偿后叠加到机组的转速控制环中,增加了谐振点处机组的阻尼,从而避免了机组谐振状态被激发。但该文献中阻尼注入的方法仅增加了机组在谐振点处的阻尼,不能在机组的整个转速运行范围内对机组承受的气动载荷进行抑制。

至于高频载荷,虽然可通过改变整流器的结构进行消除(如将二极管整流替换为 PWM 整流器)^[45, 46],但是对于微型(几百瓦)或小型(几千瓦)风力发电机组,采用 PWM 整流会增加机组的装机成本。因此,微型、小型机组大都采用二极管不控整流结构,需要研究低成本的高频载荷抑制策略。而对于瞬态载荷,因其与机组的 MPPT 速度相互影响,国内外还没有文献报道相关的优化策略,急需展开相关研究工作。