

风电系统 故障诊断与容错控制

王 磊 高瑞贞 陈 柳 宋永端 / 著

Wind Power System:
Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Control



科学出版社

风电系统故障诊断与 容错控制

王 磊 高瑞贞 著
陈 柳 宋永端

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书共分7章:第1章介绍了风力发电技术的研究背景和意义,以及当前国内外在风电机组故障诊断与容错控制方面的研究现状;第2章建立了非线性变速变桨风力发电机的数学模型;第3章介绍了风电机组控制系统的故障分析方法;第4章考虑风电机组中的突发性故障和潜在故障,用假设检验和参数估计两种方法设计了相应的故障诊断算法;第5章介绍基于信号修正的容错控制算法,并对信号修正算法进行设计;第6章介绍了LPV容错控制方法;第7章介绍了SCADA数据采集和监控系统的应用范围、系统组成、功能描述及使用说明。书中涉及的一些标准和条例由于篇幅所限,没有一一列出,感兴趣的读者可以查阅能源行业标准和技术规范。

本书在内容安排上力求做到深入浅出、理论与实际应用相结合,既注意反映本学科的基础理论、新技术和新发展,又注重理论联系实际和突出工程应用性。本书可作为高等学校本科、研究生教学参考用书,也可供从事风力发电技术研究的工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

风电系统故障诊断与容错控制 / 王磊等著. — 北京:科学出版社, 2016.3
ISBN 978-7-03-047452-0

I. ①风… II. ①王… III. ①风力发电系统-故障诊断 ②风力发电系统-容错技术 IV. ①TM614

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 043319 号

责任编辑:李小锐 杨 岭 / 责任校对:韩雨舟

责任印制:余少力 / 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>

成都创新包装印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016年3月第 一 版 开本:B5 (720×1000)

2016年3月第一次印刷 印张:13.75

字数:269千字

定价:79.00元

前 言

随着现代科学技术水平的不断发展,各类工程系统的复杂性大大增加,系统的可靠性与安全性已成为保障经济效益和社会效益的关键因素,并得到各行各业的广泛重视。风电场一般地处偏远地区,工作环境复杂恶劣,风力发电机组发生故障的概率较大,当其关键零部件发生故障时,将会引起设备损坏,甚至导致机组停机,造成巨大的经济损失。为了保证风力发电的经济可靠性,对风电机组进行状态监测、故障诊断和容错控制就显得尤为必要。在大力发展“中国制造2025”、国家能源发展战略行动计划(2014—2020年)和全球能源互联网的背景下,本书针对当前风能利用技术的发展新动态,对风电场在状态监控、故障诊断以及容错控制等方面中的关键技术进行了重点研究,这一技术的研究应用可以有效降低风电机组的运行风险,提高风电场的经济效益,保证机组的安全运行。

本书主要对额定功率为4.8MW的变速变桨风力发电机的故障诊断与容错控制方法进行研究。首先建立非线性变速变桨风机模型,其次针对风机的实际运行特性进行故障分析,接着对相应的故障诊断与容错控制方法进行重点研究,最后简要介绍如何利用SCADA软件进行状态监测。

在故障诊断设计中,基于对机组故障发生率和严重程度的分析,确定了本书所要考虑的主要故障,即传感器故障和执行器故障。与基于信号的故障诊断方法相比,基于模型的故障诊断算法能够提高针对错误决策的恢复能力,因此该算法在本书中被重点研究。在容错控制器设计中,本书重点针对能够影响系统动态特性的故障,设计相应的主动容错控制器和被动容错控制器,并在不同的故障情形下进行比较分析。实验结果表明,对于早期的故障,控制系统可以通过参数估计的方法进行故障调节,最大限度地减少了机械负载,同时提高了风力发电机组在故障条件下的效率和性能。对于多个并发的故障,容错控制系统通过在结构中加入故障诊断算法,利用获得的故障信息校正状态估计可以维持风电机组的正常运行。

本书主要内容在研究过程得到了国家自然科学基金(NO.51205046)、中国博士后面上项目(NO.2014M562283)、重庆博士后特别资助项目(NO.Xm2014003)、中央高校重点项目(NO.CDJZR175501)和国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2012CB215202和2014CB249200)的经费支持,在此致

以诚挚的感谢！本书在编写过程中参阅了大量国内外文献、专著和学位论文，特别是托马斯和克里斯托弗在这方面所做的工作，在此向文献作者及相关单位和个人表示诚挚的感谢。

此外，非常感谢重庆大学 CPS-DSC 教育部重点实验室、重庆大学智慧系统与新能源技术研究院的领导和同事对本书的大力支持，在本书编辑过程中提出了许多宝贵的修改意见和建议，在此表示衷心的感谢。研究生沈涛、陈晨、卢颖、颜秋林、张虎、文杰、罗治伟等同学完成了本书的文字录入和部分编辑工作，感谢他们大力支持与辛勤付出。特变电工新疆新能源股份有限公司的黄文高级工程师为本书提供重要指导。

限于作者理论水平以及研究工作的局限性，加之现代故障诊断与容错控制技术正处在不断的发展之中，书中难免存在疏漏与不妥之处，敬请广大读者批评指正。

作 者

2015 年 12 月

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 风电背景及意义	1
1.2 风电机组的结构	3
1.3 风电机组的常规控制策略	5
1.4 故障诊断与容错控制	10
1.4.1 故障诊断	10
1.4.2 容错控制	13
1.5 风电机组故障诊断与容错控制国内外研究现状	16
1.6 本章小结	17
第 2 章 风电机组的结构模型	18
2.1 模型结构	18
2.2 风速模型	19
2.2.1 风切变	19
2.2.2 塔影效应	20
2.2.3 湍流	21
2.2.4 整合的风速模型	22
2.3 空气动力学模型	23
2.4 传动系模型	25
2.5 塔架模型	26
2.5.1 塔架数学模型	27
2.5.2 塔架前后振动动态特性	28
2.5.3 塔架侧向振动动态特性	29
2.6 电力系统模型	29
2.7 变桨系统模型	30
2.8 简化的动力学模型	31
2.9 组合模型	32
2.10 传感器参数	34
2.11 本章小结	35

第3章 故障分析	36
3.1 模型划分	37
3.2 故障传播分析	38
3.3 故障评估	41
3.4 结构分析	45
3.5 故障设定	50
3.5.1 桨距传感器故障	51
3.5.2 变桨执行器故障	51
3.5.3 发电机转速传感器故障	53
3.6 矫正措施的选择	53
3.6.1 桨距传感器故障的矫正措施	54
3.6.2 变桨执行器故障的矫正措施	54
3.6.3 发电机转速传感器故障的矫正措施	55
3.7 本章小结	56
第4章 故障诊断	57
4.1 可重构的风速估计器	58
4.1.1 状态估计器	59
4.1.2 输入估计器	60
4.1.3 有效风速的计算	60
4.1.4 可重构风速估计器的验证	61
4.2 可重构的扩展卡尔曼滤波器	63
4.2.1 扩展卡尔曼滤波器算法	63
4.2.2 可重构扩展卡尔曼滤波器的调度	64
4.2.3 可重构扩展卡尔曼滤波器的验证	64
4.3 单个桨距传感器偏差的诊断	66
4.3.1 单个桨距传感器偏差的初步研究	66
4.3.2 单个桨距传感器偏差的故障诊断	69
4.3.3 单个桨距传感器偏差的检测	70
4.3.4 单个桨距传感器偏差的分离	72
4.3.5 单个桨距传感器偏差的估计	72
4.3.6 单个桨距传感器偏差诊断算法的验证	73
4.4 多个桨距传感器偏差的诊断	75
4.4.1 多个桨距传感器偏差的检测	76
4.4.2 多个桨距传感器偏差的分离	76
4.4.3 多个桨距传感器偏差的估计	77
4.4.4 多个桨距传感器偏差诊断算法的验证	78

4.5 变桨系统动态估计	79
4.5.1 基于极限值方法的多模型估计	80
4.5.2 基于所有执行器模型的估计	81
4.5.3 使用扩展卡尔曼滤波器的多模型估计	82
4.5.4 约束实现	84
4.5.5 验证对变桨系统动态特性的估计	84
4.6 液压泄漏的检测	85
4.7 变桨执行器卡死的检测	87
4.7.1 采用多重假设检验对变桨执行器卡死的检测	88
4.7.2 变桨执行器卡死检测的鲁棒性	90
4.7.3 满负载运行下变桨执行器卡死检测的验证	90
4.7.4 使用辅助信号设计对变桨执行器卡死的检测	91
4.8 比例速度误差诊断	98
4.8.1 比例速度误差检测	99
4.8.2 基于峰值检测的窗函数估计	100
4.8.3 基于振子模型找出三相频率的估计	102
4.8.4 比例速度误差估计的证明	103
4.8.5 部分载荷运行结果	103
4.8.6 满载运行结果	104
4.9 发电机转速传感器中固定输出的检测	105
4.10 本章小结	106
第5章 基于信号修正的容错控制	107
5.1 单个桨距传感器偏差的调节	108
5.1.1 单个桨距传感器偏差调节的设计	108
5.1.2 单个桨距传感器偏差的证明	108
5.2 多桨距传感器偏差的调节	110
5.2.1 多桨距传感器偏差的调节设计	110
5.2.2 多桨距传感器偏差的证明	110
5.3 比例速度误差的调节	111
5.3.1 比例速度误差的调节设计	112
5.3.2 比例速度误差的证明	112
5.4 发电机转速传感器固定输出的调节	113
5.4.1 发电机转速传感器固定输出调节的设计	113
5.4.2 发电机转速传感器固定输出的证明	114
5.5 本章小结	115

第 6 章 LPV 容错控制方法	116
6.1 主动容错和被动容错 LPV 控制方法的介绍	117
6.1.1 主动容错和被动容错控制系统的结构	117
6.1.2 容错 LPV 控制系统结构	118
6.1.3 主动容错和被动容错控制器设计方法	118
6.2 主动容错 LPV 控制器设计过程	119
6.2.1 主动容错 LPV 系统描述	119
6.2.2 主动容错 LPV 控制器优化问题	120
6.2.3 主动容错 LPV 控制器的综合	123
6.3 被动容错 LPV 控制器设计过程	124
6.3.1 被动容错 LPV 系统描述	124
6.3.2 被动容错 LPV 控制器最优化问题	125
6.3.3 被动容错 LPV 控制器的综合	128
6.4 常规 LPV 系统描述	129
6.4.1 仿射 LPV 系统描述	129
6.4.2 速率范围	132
6.4.3 带性能指标的系统	132
6.5 主动容错控制器的设计	133
6.5.1 AFTC 的证明	134
6.5.2 两个控制器间切换的证明	134
6.6 被动容错控制器的设计	135
6.7 AFTC 与 PFTC 的比较	138
6.8 集成测试	141
6.9 本章小结	143
第 7 章 风电机组的状态监测	145
7.1 SCADA 系统概述	145
7.2 SCADA 系统组成	145
7.2.1 SCADA 系统结构	146
7.2.2 数据检测和预处理	147
7.2.3 通信模块	151
7.2.4 SCADA 功能描述	153
7.3 SCADA 使用说明	153
7.3.1 登录界面	153
7.3.2 风场主界面	154
7.3.3 风场地理信息界面	162
7.3.4 风机界面	162

7.3.5 SQL Server 2005 数据库访问	166
参考文献	169
附录 A 严重程度及发生率分析	172
附录 B 线性化	186
附录 C 参考控制器	190
附录 D 性能可靠的 LPV 控制器设计过程推导	202

第 1 章 绪 论

1.1 风电背景及意义

随着科学技术的不断发展,现代化的电气设备需要更多的能源来维持运转,这一形势增加了对化石燃料的需求,同时也使电能变得更加昂贵。面对如此高的能源需求,同时考虑到化石燃料资源的有限性,关注可再生能源的发展就显得尤为重要。目前,在可再生能源中,风能是可再生能源的重要组成部分,积极地开发风能对于改善能源系统结构、缓解能源危机、保护生态环境具有深远的意义。

近年来我国政府将风力发电(简称风电)的发展作为能源革命、能源结构调整和国家能源安全的重要一环,对其大力支持。2014 年在核准计划或建设方案方面,我国相关主管部门发布了三个很受关注的文件。第一个文件是与核准计划相关的《关于印发“十二五”第四批风电项目核准计划的通知》。其中列出了“十二五”期间第四批风电核准计划的项目总装机容量 2760 万千瓦,并明确要求电网公司做好这些列入核准计划项目的配套电网建设、并网支持性文件办理、电网接入和消纳等工作,从而确保配套电网建设与风电项目建设同步投产和运行。第二个文件是国家能源局发布的《关于加强风电项目核准计划管理有关工作的通知》。文件中取消了纳入“十二五”第一批核准计划管理的 30 个项目,共计 174.35 万千瓦。与前面两个文件有所不同的是,第三个文件《关于印发全国海上风电开发建设方案(2014—2016)的通知》主要涉及我国海上风电项目的建设计划。该“方案”涉及天津、河北、辽宁、江苏、浙江、福建、广东和海南八个省市,共 44 个项目,总装机容量为 1053 万千瓦。

从这些政策可以看出,关于风电的工作计划和未来的战略发展是备受国家关注的,而且相关的政策已经取得了较为明显的成效,如图 1.1 所示为我国风电装机容量的逐年递增趋势图,从 2004 年的装机容量为 743MW 到 2013 年总的累计装机容量 91 413MW,装机量居世界第一,2014 年新增风电装机量更是刷新了历史纪录,全国新增风力发电机组(简称风电机组或风机)13121 台,新增装机容量 23 196MW,同比增长 44.2%,累计安装风电机组 76241 台,累计容量 114 609MW,其中海上风电装机容量只有 657.88MW。

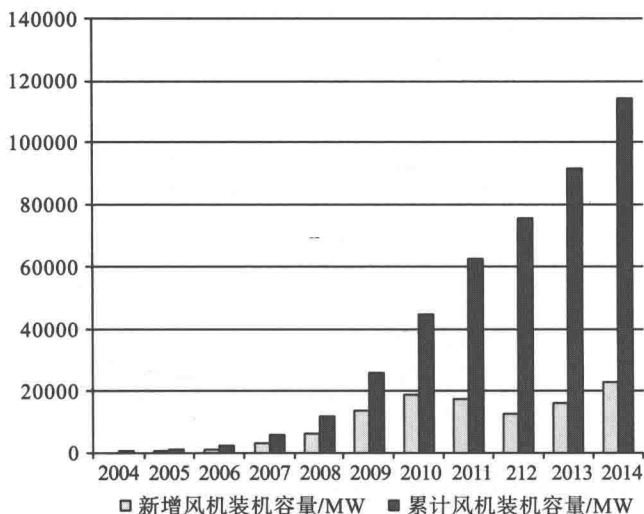


图 1.1 2004~2014 年中国新增和累计风电装机容量

上述一系列数据表明风电在我国得到了迅猛的发展,但早期的风电能源开发主要集中在陆上,且陆上的风资源开发已经比较成熟。随着风电技术逐渐由陆上延伸到海上,海上风力发电已经成为世界可再生能源发展领域的焦点。海上风电场具有高风速、低风切变、低湍流、高产出等显著优点,加之对人类的影响较小,且可充分借鉴陆上的风电技术经验,海上风电将在未来的风电产业中占据越来越重要的地位,为风电在未来能源结构中扮演重要角色做出积极的贡献。同时,在 2014 年新年伊始,针对当年的能源工作,国家能源局发布了《关于印发 2014 年能源工作指导意见的通知》,提出坚持集中式与分布式并重、集中送出与就地消纳结合,稳步推进风电等可再生能源发展,其中就有要求稳步发展海上风电。由此可见,随着海上风电的陆续开发,风电在我国将会占据更大的比重,在缓解部分地区的供电压力,实现节能减排,促进国民经济的快速增长等方面做出巨大贡献。

随着风电装机总量的不断增加,因机组故障造成的经济损失将会越加严重。这不仅浪费了大量风能,增加了维修成本,一定程度上还缩短了风机的运行寿命,所以必须对风电机组的一些潜在故障进行检测和容错控制,对机组的运行状况进行监测,以此保证风电机组的安全运行。事实上风力发电系统在实际安装运行中已经出现了大量的故障,影响了风电机组的正常运行。据统计,国内某电力公司的三百多台风电机组,由于各种故障实际能够运行的只有三分之一,而国外很多风电公司在风场的风电机组安装初期,也会出现大量的故障,严重影响了设备的运行效率。考虑到我国现有很多风电机组安装在环境恶劣的地区,受多种环境因素的影响,故障率较多,并且非计划的维修服务费用是非常昂贵的,如果能够采用故障检测、诊断和容错控制方案可以对涡轮机从检测出故障到下一次计

划维护期间产生一些作用,那么它将对风电运行成本的降低和机组寿命的提高有很明显的帮助,并能有效地促进风能的开发利用。

总的来说,对风电机组执行状态监测、故障诊断和容错控制策略可以提供如下一些好处。

(1)通过提早进行故障检测和调节,可以预防灾难性的故障和因故障带来的风电机组其他部件性能的退化。

(2)通过应用基于运行状况而不是基于时间的维护方法,可以避免更换功能部件,从而降低维护成本。

(3)通过远程诊断向维修人员提供详细诊断信息。

(4)当故障发生时通过故障容错控制方法可以提高能源的生产质量。

对于风电机组,它的运行状态是可监测的、故障是可诊断的、隐患是可预测的、故障也是可以调节的,尤其是针对当前主流的双馈风电机组旋转部件的故障分析和诊断,这些控制策略在机组的运行和维护中显得尤为重要,是维持机组稳定可靠运行的技术保证和有效手段。

本书旨在讨论风能开发的重要性和风电机组的故障诊断和容错控制策略,利用 SCADA 系统对风电机组的状态进行监测,结合基于特征和模型的故障诊断和容错控制方法在多个同时故障下的特定应用,以此来改善风电机组在运行过程中的安全性和可靠性。

1.2 风电机组的结构

本节介绍了一些与本书内容相关的风电机组部分组件的基本知识。主要是受到 Esbensen et al. (2008)的启发而编写,部分地方有轻微修改。

本书所研究的风电机组模型是基于 kk-electronic a/s 公司的产品,它是一个丹麦式理念的风电机组,更加符合现代风电机组的设计标准。丹麦式理念的风电机组是一个带有能够保持转子定向逆风旋转的主动偏航系统的三桨叶水平轴风电机组(Krohn, 2002)。水平轴风电机组的基本原理是利用风力带动叶片旋转,使风能转化为机械能,叶轮通过一个增速齿轮箱带动发电机旋转,发电机再将机械能转化为电能送入电网供用户使用,其主要的组成部件如图 1.2 所示。

对于风电机组的并网需求,基本要求还包括考虑在所处环境的风况、气候和电网条件下能够长期安全运行,取得最大的年发电量和最低的发电成本。但由于风的速度和方向在不断变化,风电机组各个部件随时承受着交变载荷,疲劳载荷是影响机组运行和寿命的主要因素,因此风电机组对材料、结构、工艺和控制策略都有着严格的要求。图 1.2 介绍了风电机组的主要部件和它们之间的联系,下面对其部件结构和用途进行简要的阐述。

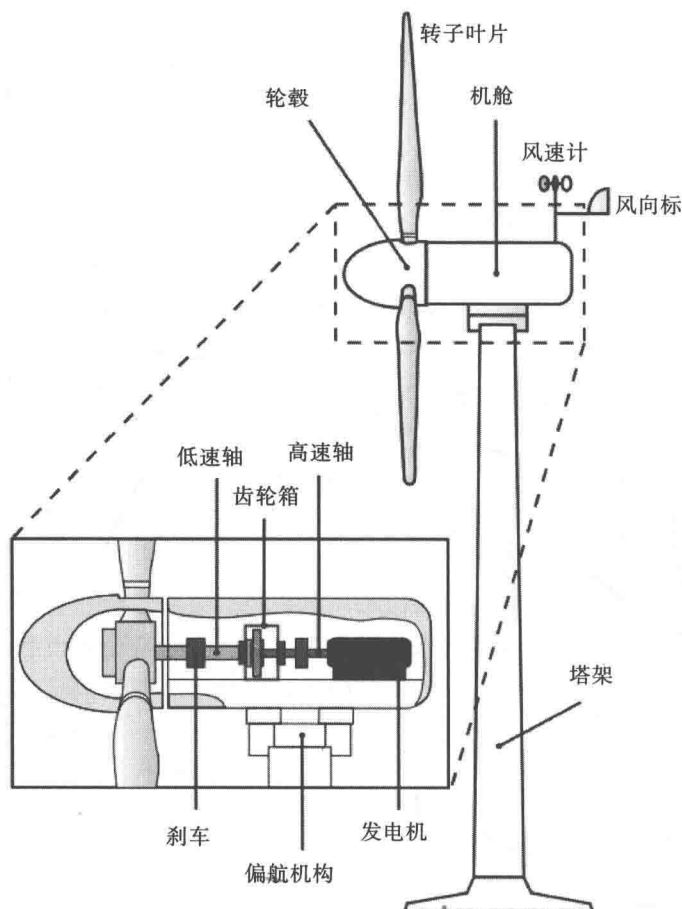


图 1.2 风电机组的主要部件

(1) 风速计：用于测量空气流速，最常用的是风杯风速计，由 3 个互成 120° 固定在支架上的抛物锥空杯组成感应部分，空杯的凹面都顺向一个方向。整个感应部分安装在一根垂直旋转轴上，在风力作用下，风杯绕轴以正比于风速的转速旋转。当风速达到风机启动下限时风电机组开始运转，而当风速过高时风电机组停止运行。

(2) 刹车：可以是机械式、电力式或液压式，其功能类似于停车制动器，实现风机停止运行。

(3) 齿轮箱：连接着低速轴和高速轴，可以将高速轴的转速提高至低速轴转速的 50 倍，从而使转速增加到发电机产生电能所需要的大小。

(4) 发电机：通常被称为感应电机或异步发电机，将机械能转换成电能。在现代风力发电机上，最大输出功率通常为 $500\text{k}\sim 1500\text{kW}$ 。

(5) 高速轴：最大电力输出通常为 $500\text{k}\sim 1500\text{kW}$ ，并用于驱动发电机。

(6) 轮毂和叶片：一起构成风力发电机的风轮，轮毂连接着低速轴与旋转叶片。在低风速时调节风轮转速实现最大功率跟踪，在高风速时调节桨距角可以降低其风能利用率，实现额定功率输出，以便保护风电机组不受到结构损害。

(7) 低速轴：风力发电机的低速轴将转子轴心与齿轮箱连接在一起。在现代 600kW 的风力发电机上，转子转速相当慢，为 19~30r/min。轴中有用于液压系统的导管，可以激发空气动力闸的运行。

(8) 机舱：机舱包容着风电机组的关键设备，包括齿轮箱、低速轴、高速轴、发电机和制动器。维护人员可以通过风电机组塔架进入机舱。机舱左端是风轮，即叶片及轴。

(9) 塔架：风电机组塔架载有机舱及转子。由于风速随高度增加而增加，塔架离地面越高风速越大，相应的风力发电机所产生的电能就越多。现代 600kW 风电机组的塔架高为 40~60m，它可以为管状塔架，也可以是格子状塔架。管状塔架对于维修人员来说更为安全，因为他们可以通过内部的梯子到达塔架顶端。

(10) 风向标：用来测量风的方向。通过偏航机械装置，风向用来使风轮的方向垂直于风的方向。

(11) 偏航机构：借助电动机转动机舱，以使风轮正对着风。偏航装置由电子控制器操作，电子控制器可以通过风向标来感觉风向。通常，当风的方向发生改变时，风电机组一次只会偏转几度。

本节介绍了风电机组的主要组成部件，下面将介绍一些风电机组在运行过程中的常规控制技术。

1.3 风电机组的常规控制策略

风速的大小和方向是随机变化的，受风电机组切入电网功率、切出电网功率和输入功率的限制，风轮的主动对风以及运行过程中故障检测和容错控制都必须能够实现自动调节。风力发电系统的控制技术从定桨距恒速运行至变桨距变速运行，已基本实现了风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最终目标。

在风速低于额定风速时，采用的是变速控制方式，此时风能利用效率高于采用失速控制风电机组的风能利用效率，具有优化的气动特性；在风速高于额定风速时，采用的是变桨距角控制方式，通过桨距角的改变，改变作用在风轮上的气动扭矩，使功率保持在额定值。变速变桨风电机组的主要结构特点是：①输出功率平稳特性。变桨风电机组与定桨风电机组相比，具有在额定功率点上输出功率平稳的特点。②在额定点具有较高的风能利用系数。③确保高风速段的额定功率。变桨风电机组的桨距角是根据发电机输出功率的反馈信号来确定的，不受气

流密度的影响。④启动性能与制动性能。变桨风电机组在低风速时，桨距角可以转动到合适的角度，使风轮具有最大的动力矩，容易启动。当风电机组需要脱离电网时，变桨系统可以转动叶片使之减小功率，在发电机与电网断开时，功率减小至零，避免了定桨风电机组每次脱网时所经历的突甩负载的过程。⑤低风速时它能根据风速变化，在运行中保持最佳叶尖速比以获得最大风能。⑥高风速时利用风轮转速的变化，储存或释放部分能量，提高传动系统的柔性，使功率输出更加平稳。

在风电机组的控制过程中，总体目标是减少运行成本而不是最大化生产电能。这个成本取决于风电机组发电的条件，同时也意味着风电机组要在一个指定的轨迹上运行，正如图 1.3 所示的轨迹曲线。这个轨迹是通过图 1.4 所示的控制策略来实现的，控制策略图展示了为获得期望的输出功率所需的对应桨距角和电磁转矩。

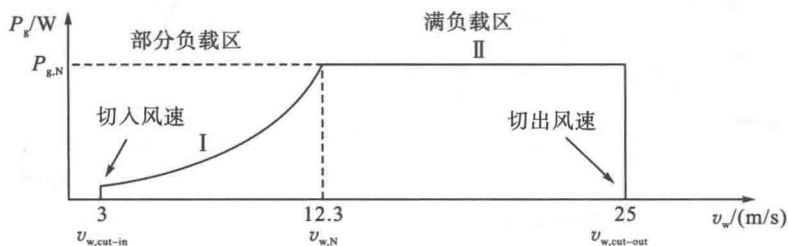


图 1.3 理想的风电机组功率曲线

从理想的输出功率曲线可以很明显地看出风电机组仅能在有限的风速范围内工作，在高风速时限制输出功率为 4.8MW 的额定值，风速区间被分为 I 和 II 两个区域。两个区域内存在不同的控制目标。I 为部分负载区域，II 为满负载区域。当风速低于切入风速 $v_{w, cut-in}$ 时，风机不工作，不产生任何电能，处于待机状态，因为在此区域内运行成本超过了其所产生电能的价值。同样的，当风速超过切出风速 $v_{w, cut-out}$ 时，也没有电能产生，因为在超出切出风速时风电机组将停止运行，从而保护它免受结构性过载。

如图 1.4 所示为理想功率的典型控制策略，桨距角和发电机转矩的平面图显示控制信号是如何被操控来获得期望的以风速 v_w 为函数的输出功率曲线。为了解释在 I、II 区域里输出功率曲线产生的过程，下面对其控制策略分别进行详细介绍。

(1) I 部分负荷区域。

I 区域位于切入风速 $v_{w, cut-in}$ 与额定风速 $v_{w,N}$ 之间，在这一区域内，风电机组被要求尽可能多发电。这时通过调节转矩使风能利用系数 C_p 在额定风速以下最大限度地接近最佳值，从而捕获到最大的风能以得到较多的能量输出。

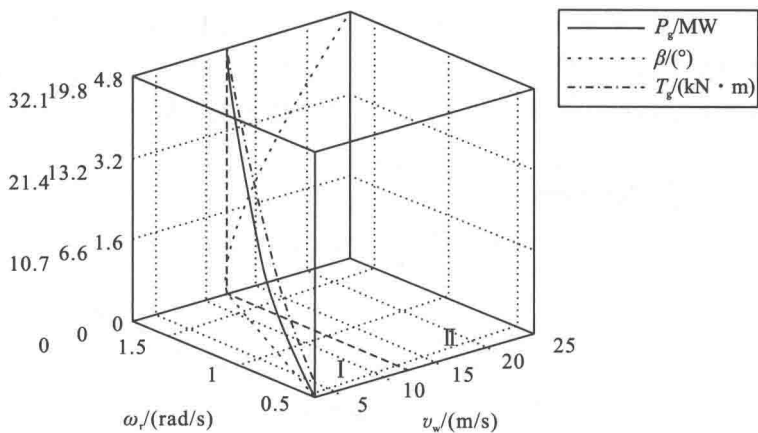


图 1.4 针对理想功率曲线的典型控制策略

为了获得最大的风能利用，实际运行时最好通过调节转矩来保证风力机运行在最大功率曲线上。因此，在任何风速下，只要调节风力机转速，使其叶尖速度与风速之比 λ 保持不变，且都满足 $\lambda = \lambda_{opt}$ (λ_{opt} 为最佳叶尖速比)，就可以维持风力机在最大风能利用系数 C_{pmax} 下运行，这就是风力机最大风能捕获的运行原理。对风力发电系统而言，输入机械转矩特性相当重要，与之相对应的是风力机的机械输出功率和转速的关系曲线。

通过设定一种风速，然后取不同的转速计算出相应的 λ ，由图 1.5 查出对应的 C_p 值，计算可得到该风速下，风力机输出机械功率和转速的关系曲线。设定不同的风速，重复上面的过程，就可以得到风力机在不同风速下输出机械功率和转速的关系，图 1.5 为风力机输出机械功率特性曲线。

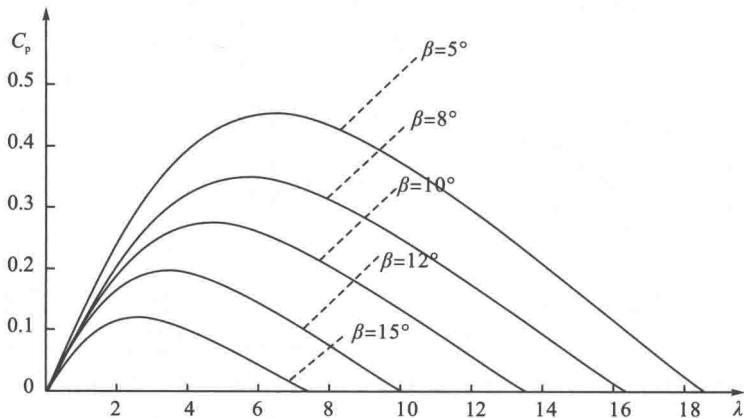


图 1.5 风能利用系数随叶尖速比变化曲线图

由图 1.6 可以看出，不同风速下风力机输出机械功率随风轮转速变化而变化，每一种风速下都存在一个最大输出功率点，对应于最大的风能利用系数