

分类号: \_\_\_\_\_

密级: \_\_\_\_\_

UDC: \_\_\_\_\_

编号: \_\_\_\_\_

## 河北工业大学硕士学位论文

# 风力发电机组控制器设计及稳定域分析

论文作者: 杜捷先

学生类别: 全日制

专业学位类别: 工程硕士

学科专业: 控制工程

指导教师: 周颖

职 称: 副教授

Thesis Submitted to  
Hebei University of Technology  
for  
The Master Degree of  
Control Engineering

**THE WIND TURBINE CONTROLLER DESIGN AND  
ANALYSIS OF STABILITY REGION**

by  
Du Jiexian

Supervisor: Zhou Ying

December 2015

## 原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本学位论文不包含任何他人或集体已经发表的作品内容，也不包含本人为获得其他学位而使用过的材料。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人或集体，均已在文中以明确方式标明。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：杜捷先

日期：2015.12.15

## 关于学位论文版权使用授权的说明

本人完全了解河北工业大学关于收集、保存、使用学位论文的以下规定：学校有权采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供本学位论文全文或者部分内容的阅览服务；学校有权将学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索、交流；学校有权向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版。

（保密的学位论文在解密后适用本授权说明）

学位论文作者签名：杜捷先

日期：2015.12.15

导师签名：周颖

日期：2015.12.15

## 摘 要

常规能源的过度使用,使得环境污染问题愈加严重,为解决环境污染问题,风力发电受到了越来越多的关注。大型风力发电机组是复杂的多变量非线性动力学系统,具有不确定性和多干扰性,导致难以获取风电机组精确的数学模型,使得风电机组控制器设计成为难点;且在风电机组运行过程中可能会发生一些故障,导致风力发电机组系统轨线偏离稳定点,对风机造成损坏,给出系统的稳定域对指导风机安全运行具有重要意义。

本文以变速变桨风力发电机组为研究对象,首先在空气动力学基础上分析了风力发电机组的动力学特性,并根据其特性得出了理想状态下的最大风能利用系数,之后介绍了目前变桨风力发电机组的基本控制策略。随后建立了风速模型、风力机模型、传动系统模型、发电机模型和变桨执行机构模型,并以此为基础搭建了风力发电机组控制系统仿真平台。

本文首先将原控制问题转换为系统在平衡点稳定的问题,通过状态反馈方法分别设计了一个转矩控制器和一个变桨控制器,在风速低于额定风速时,通过转矩控制器调节转矩实现输出功率最大化;在风速高于额定风速时,通过调节桨距角限制风能捕获,实现输出功率稳定。之后利用李雅普诺夫方法估算出风电机组运行的稳定域,为验证该稳定域在其它控制器下有效,利用加性分解原理重新设计了控制器,分析了其运行状态与稳定域关系。最后利用风力发电机组控制系统仿真平台进行了数值仿真。

结果表明该控制器取得了良好的控制效果,且在风机运行的稳定域内,系统能稳定运行。该方法具有一定的实用前景,稳定域的提出,为风机的正常运行和维护提供了一定依据。

关键字: 风力发电机 状态反馈控制 转矩控制器 变桨控制器 稳定域

# ABSTRACT

Excessive use of conventional energy sources, making the problem even more serious environmental pollution, in order to solve environmental problems, people have paid more and more attention on wind power. Large wind turbines are complex multi-variable nonlinear dynamical system with uncertainties and multiple interference, making it difficult to obtain wind turbines precise mathematical model, so that the wind turbine controller is difficulty to design; Some fault may occur when the turbine is running, making the wind turbine system deviate from the stable point, and this may destroy the turbine, so the stability region is important to guide the wind turbine operation.

In this thesis, variable speed pitch wind turbines are used for the study. First, the dynamic characteristics of wind turbines are analyzed and wind energy utilization coefficient is obtained. Then the basic control strategies are described. The wind speed model, wind turbine model, transmission model, generator model and pitch actuators model are established. Based on these models, the wind turbine control system simulation platform is built.

In this thesis, the original control problems for are transferred into stability issues, and a torque controller and a pitch controller are designed. When the wind speed is less than the rated speed, the torque adjusts the torque controller to achieve maximum power output; when wind speed is higher than the rated wind speed, the pitch angle is adjusted to limit wind capture and achieve the output power stability. The stability region is estimated by Lyapunov method. To verify the stability region is active in other controllers, the controllers are designed by the additive decomposition method and the relationship of the status and stability region are analyzed. Finally, the numerical simulation is accomplished.

The results show that the controller has achieved good control effect, and the turbine runs stably in the stable region. The method has certain practical possibility, and the stability region provides a basis for the maintenance of the wind turbine.

**KEYWORDS:** Wind turbine    State feedback control    Torque controller    Pitch controller    Stability Region

# 目 录

第一章 绪论.....	- 1 -
1.1 研究背景.....	- 1 -
1.2 国内外风力发电发展现状.....	- 2 -
1.2.1 国外风力发电发展现状 .....	- 3 -
1.2.2 国内风力发电发展现状 .....	- 4 -
1.3 风力发电机组控制技术发展现状.....	- 5 -
1.3.1 定桨距控制技术 .....	- 5 -
1.3.2 变速控制技术 .....	- 5 -
1.3.3 变桨控制技术 .....	- 6 -
1.4 课题的研究意义和研究内容.....	- 7 -
第二章 风力发电机组基本控制理论.....	- 9 -
2.1 风力发电机组基本结构和分类.....	- 9 -
2.2 空气动力学.....	- 11 -
2.2.1 动量理论 .....	- 11 -
2.2.2 叶素理论 .....	- 13 -
2.2.3 风力机的特性系数 .....	- 14 -
2.3 变速变桨控制理论.....	- 15 -
2.3.1 变速控制理论 .....	- 15 -
2.3.2 变桨控制理论 .....	- 17 -
2.4 本章小结.....	- 18 -
第三章 风力发电机组建模与控制方法.....	- 19 -
3.1 风力发电机组建模.....	- 19 -
3.1.1 风速模型 .....	- 19 -
3.1.2 传动链模型 .....	- 21 -
3.1.3 变桨距机构模型 .....	- 24 -
3.1.4 发电机模型 .....	- 24 -
3.2 风力发电机组控制方法及稳定域.....	- 25 -
3.2.1 状态反馈控制 .....	- 25 -
3.2.2 稳定域理论 .....	- 26 -
3.2.3 风力发电机组系统运行稳定域 .....	- 27 -
3.3 本章小结.....	- 28 -

第四章 风电机组转矩控制器 .....	- 29 -
4.1 转矩控制器设计 .....	- 30 -
4.1.1 状态反馈控制器设计 .....	- 30 -
4.1.2 系统稳定性证明及稳定域估计 .....	- 32 -
4.1.3 系统稳定域分析 .....	- 33 -
4.2 系统仿真结果 .....	- 34 -
4.2.1 不考虑损耗系数下仿真 .....	- 35 -
4.2.2 考虑损耗系数下仿真 .....	- 39 -
4.3 本章小结 .....	- 42 -
第五章 风电机组变桨控制器 .....	- 43 -
5.1 变桨控制器设计 .....	- 43 -
5.1.1 状态反馈控制器设计 .....	- 44 -
5.1.2 系统稳定性证明及稳定域估计 .....	- 46 -
5.1.3 系统稳定域分析 .....	- 46 -
5.2 系统仿真结果 .....	- 48 -
5.2.1 不考虑损耗系数下仿真 .....	- 49 -
5.2.2 考虑损耗系数下仿真 .....	- 51 -
5.3 本章小结 .....	- 54 -
第六章 结论和展望 .....	- 55 -
6.1 本文总结 .....	- 55 -
6.2 工作展望 .....	- 56 -
参考文献 .....	- 57 -
攻读学位期间所取得的相关科研成果 .....	- 61 -
致    谢 .....	- 62 -

# 第一章 绪论

作为国民经济的物质基础和人类赖以生存的基本条件，能源的匮乏严重影响着国民经济发展<sup>[1,2]</sup>。随着中国经济的快速发展，能源短缺问题越来越严重<sup>[3,4]</sup>。煤、石油、天然气等常规能源占据了人类生活的重要部分，但是常规能源是不可再生、存储有限且会严重污染环境，对人类健康造成了一定的危害，为实现可持续发展，是不能依赖常规能源的。由此可以看出，开发和利用可再生能源是极其重要的。可再生能源包括风能、水能、太阳能等，具有可再生和无污染的特点，由于各国发展新能源技术的需求<sup>[5]</sup>，很多国家都在寻找适合本国国情的可再生能源，风能作为取之不尽的新能源，凭借低廉的开发成本及风电行业成熟的技术和商业化的应用成为目前最具应用规模的可再生能源之一。在全球对环境保护日益重视的今天，大力发展风能已成为人类可持续发展战略下的重点。

## 1.1 研究背景

由于石油、煤、天然气等常规能源日益枯竭，并且常规能源的使用会产生一些有害物质，造成环境污染，因此迫切需要开发绿色的可再生能源。风能作为一种可再生能源，相比于常规能源，具有取之不尽、用之不竭和清洁无污染的优点。为了应对环境污染和能源危机，有必要加大风能利用力度，积极发展风电产业<sup>[6]</sup>。

风力发电可以产生很高的社会效益和经济效益，风电行业的发展能够减少能源匮乏国家对进口能源的依赖，有效缓解能源短缺问题，并能减少空气污染，可以用较低的成本解决能源问题和环境问题。全球具有十分丰富的风能资源，预计到 2020 年只需使用全球一半的风能资源便可供应世界的电力需求，我国的风能资源也相当丰富，在常规能源日益匮乏的今天，中国也在充分发挥丰富的风能资源优势，大力发展风电事业。近年来，风电技术取得了长足地进步，许多国家也都在研究风力发电技术，但由于风电技术本身的复杂性，导致在风电利用上还存在一些问题。所以，加大风力发电技术研究力度，对缓解能源危机及人类的可持续发展具有重要意义。

风电设备一般安装在人烟稀少的偏远地带，具有安装周期短、占地空间小、安装简单等特点，其运行过程中不会产生有害物质，且安装不受地形限制，给边区牧民、海岛驻军等这些难以进行电线架接的地方带来了极大的便利<sup>[7]</sup>。基于以上种种原因，



风力发电产业正逐渐发展为一项全球性的业务。

随着全球风力发电产业的日益壮大，风电机组控制系统的设计受到了越来越多的重视。由于风电技术涉及领域相当广泛，包括材料、机械、空气动力学、控制理论、电机学等多个领域<sup>[8]</sup>，是一个多学科交叉的复杂的系统工程，而控制系统目的是实现风电机组运行的稳定性，因此风电机组的控制系统设计成为当今风电技术研究的难点。随着风电技术的稳步提高，风力发电机组的发电量相较之前也产生了质的飞跃，机械方面机组重量大幅减小，运行期间也不会产生很大的噪声，形式也由之前的垂直轴风机发展为现在的水平轴风机。由于大型风力发电机组是个极其复杂的非线性系统，且存在很多干扰，为了解决这些问题，风电的研究领域主要集中在优化控制和高效控制，以此保证风力发电机组高效、稳定运行。

## 1.2 国内外风力发电发展现状

从 2007 年起，全球风电行业一直以超出其预期的速度不断壮大。据全球风能理事会统计，截止到 2014 年年底，全球风电累计装机容量达到 370 千兆瓦（如图 1.1 所示），同比增长 15.9%。2014 年，随着国家政策的调整，风电行业整体呈现回暖趋势，对比 2013 年风电累计装机容量增加了 51 千兆瓦。2014 年全球风力发电容量增加最多的国家为中国，增加了 23.2 千兆瓦，其次为德国和美国，分别为 5.3 千兆瓦和 4.9 千兆瓦（如图 1.2 所示）。风在丹麦，尼加拉瓜，葡萄牙和西班牙这些国家产生超过 20% 的电力。

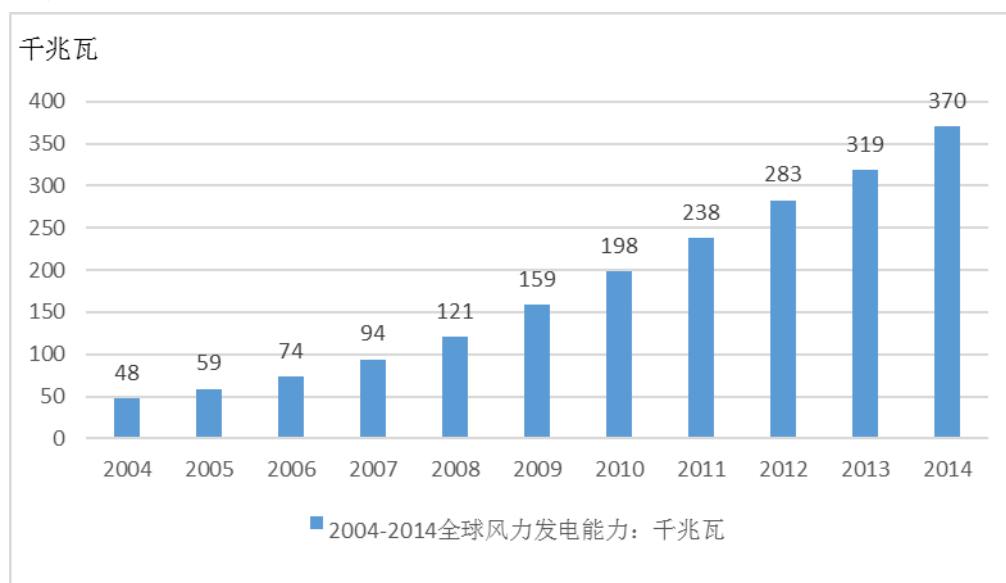


图 1.1 2004-2014 全球风力发电能力：千兆瓦

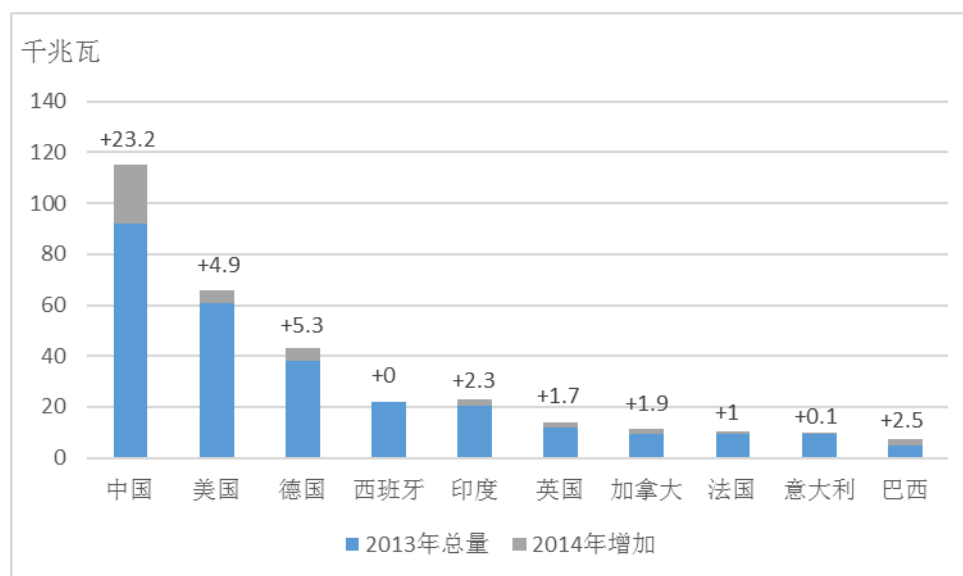


图 1.2 2014 年风力发电容量增加前十的国家

### 1.2.1 国外风力发电发展现状

第一台风力发电机与 1981 年在丹麦诞生，风能的开发利用在国外发达国家已经相当普及，尤其在德国、荷兰、西班牙、丹麦等欧洲国家，截止到 2014 年底，欧洲累计装机总量达到 133 千兆瓦，占世界装机总量的 36.25%，亚洲风电累计装机总量达到 142 千兆瓦，占世界装机总量的 38.46%；北美累计装机总量达到 78 千兆瓦，占世界装机总量的 21.09%。

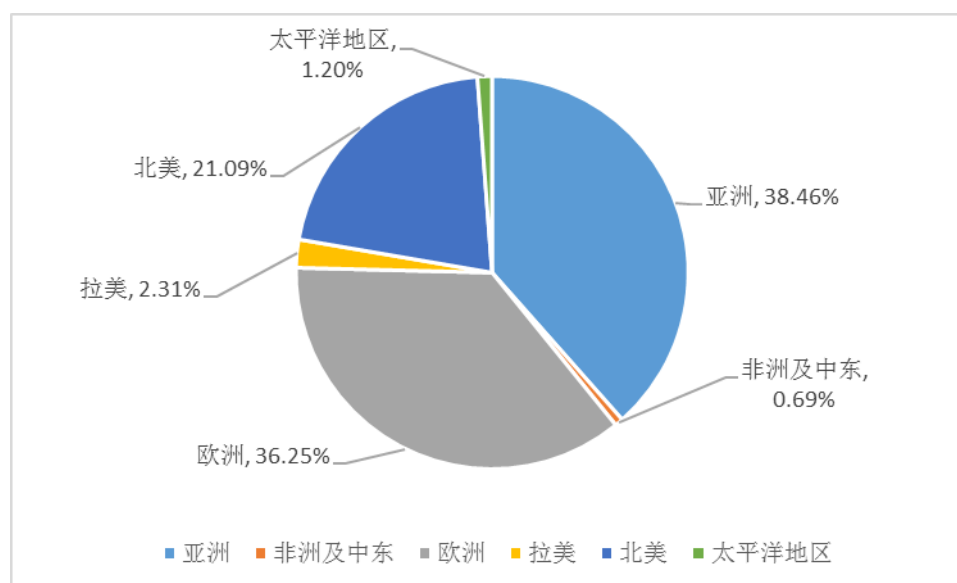


图 1.3 全球装机地域分布图

亚洲风电赶超欧洲，占世界装机总量的 38.46%，其中中国风电一直保持强劲的增

长势头，成为亚洲风电的主力军，此外还有印度，韩国和日本的风电产业均出现不同程度的增长。

由于德国政府的支持，德国的风电产业呈现稳定增长，成为欧洲风电发展最快的国家。从风力资源丰富的州市开始发展，逐渐向山区延伸，待陆上风电饱和，又开始在海上平铺，根据德国政府制定的风电发展战略，未来几年重点在海上扩展风电事业。2013 年年底，德国的风电装机总量接近 34 千兆瓦，德国电力需求的 10% 都由风电行业供应，风能已成为德国最重要的可再生能源。

美国在北美的风电产业占主导地位。到 2013 年底，美国地区风电装机容量为 61 千兆瓦，占世界装机容量的 19.2%。美国政府针对风电发布了一些优惠政策，促进了美国风电的发展。美国在风电项目运行之前便已开展的一些前期研究工作，也给美国风电产业发展带来了很有利的影响。

### 1.2.2 国内风力发电发展现状

据中国可再生能源学会风能专业委员会统计，2014 年中国（除台湾地区）新增安装风力发电机组 13121 台，新增装机容量 23 千兆瓦，同比增长 44.2%；累计安装风力发电机组 76241 台，装机容量 114 千兆瓦，同比增长 25.4%。2014 年较 2013 年，除东北地区装机容量所下降外，其他区域的新增装机容量均呈上升态势。图 1.4 是 2004 年至 2014 年中国累计风电装机容量<sup>[9]</sup>。

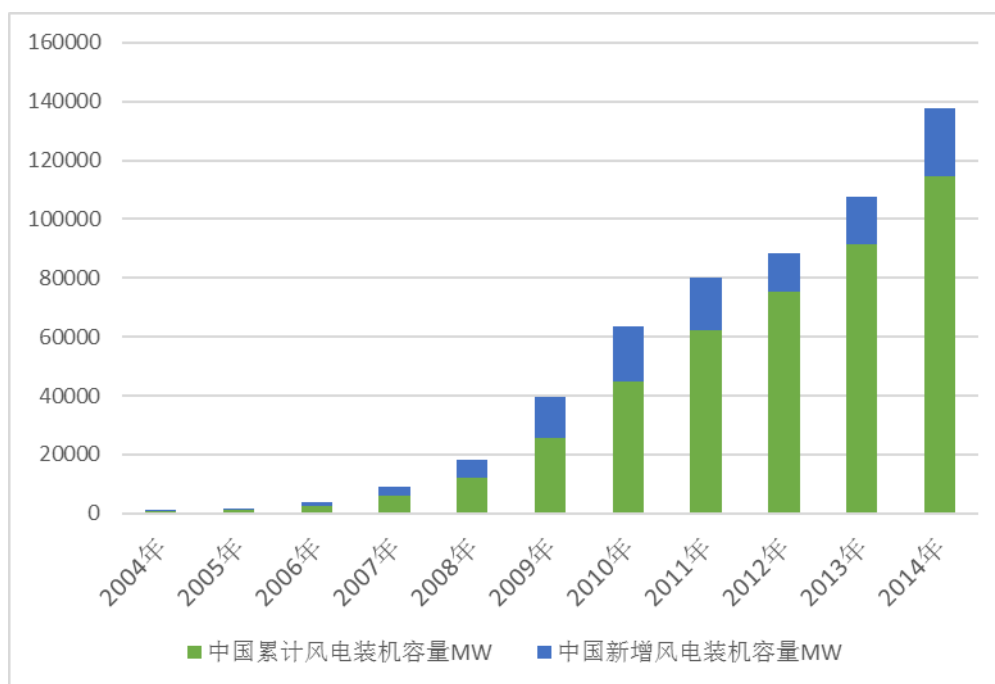


图 1.4 2004 年-2014 年中国累计风电装机容量

2006 年到 2009 年三年间,中国风电累计装机年增长率平均在 100% 以上,在 2009 年与 2011 年间,中国风电实现了每年超过 16 千兆瓦吊装规模。2015 年,中国风电新增装机容量达到 23.2 千兆瓦,同比增长 24.1%,累计装机容量实现 114.6 千兆瓦,同比增长 25.3%,新增装机容量和累计装机容量均位于全球第一。

## 1.3 风力发电机组控制技术发展现状

目前世界风力发电市场的单机容量正持续增大,在这种情况下,保证风力发电机组的安全稳定运行,对大型风力发电机组的控制技术提出更高的要求。风力发电机组模型可分为若干相互关联的子系统,包括风、风轮、传动系统、发电机、变桨执行机构、控制器等,具有高度复杂性和非线性。目前,风力发电机组主要有定桨距控制、变速恒频控制和变桨距控制三种方法,国内外很多学者基于这些方法做了深入的研究。

### 1.3.1 定桨距控制技术

定桨距风机结构的明显特点是,叶片和轮毂固定在一起,也就是说,任意时刻,所有的叶片只能变化相同的角度,无论风速变化与否。这就决定了,叶片必须具备自动失速的功能,即风速在风机的额定风速之上时,叶片能够把输出功率调节在额定功率左右。突甩负载时,运行的风机叶片只有依靠其自己的制动系统使机组在不稳风况下停止工作,以确保风机的安全。20 世纪 70 年代研究出拥有优良失速功能叶片,满足了第一种情况,进而在 20 世纪 80 年代叶尖扰流器的出现,满足了第二种情况。这些都为统一变桨距失速型风机在过去的几十年中奠定了重要基础,使其成为当时的主流风机,现在,这项技术依旧应用广泛。定桨距风机的控制原理简单,而且便于生产,可靠性相对较高。但其缺点是当风速超过额定风速时,其电机输出功率可能会降低,这也在一定程度上制约了定桨距风力发电机组的发展。

### 1.3.2 变速控制技术

风速在低于额定风速时,需要调节转速使其能够跟随风速的变化而变化,从而保持最佳叶尖速比,获得最大风能捕获,这种控制技术为变速控制技术。常用的变速控制技术有基于功率控制和基于转矩控制<sup>[10]</sup>,无论哪种控制算法都需要设计适合的控制算法,国内外学者对此进行了深入的研究。叶杭冶提出了转矩控制对传动系统扭转震动的影响力和控制方案<sup>[11]</sup>。Boubekeur Boukhezzer 基于现有的一些控制方法,提出了一个带有风速估计的非线性静态和动态状态反馈控制器,获得了比较好的控制性能

<sup>[12]</sup>。Kyung-Hyun Kim 提出了一种新的最大功率点跟踪 (MPPT) 算法用于变速变桨风力发电机组, 该方法利用了转子惯性力的优势, 通过添加一个比例控制到功率控制环节中, 从而有效地降低了风机的转动惯量, 进而提高了最大功率点追踪控制的性能<sup>[13]</sup>。Maria Letizia Corradini 提出了一个带有气动转矩的鲁棒观测器的控制策略, 通过一种简单的方法获取转子的位置和速度, 并提出一个基于定向场的滑模控制策略, 该方法可以有效地获得最大化功率, 且对机械系统的参数变化具有较高的鲁棒性<sup>[14]</sup>。Jovan Merida 提出了两种方法用于最大风能捕获同时降低机械载荷, 第一种方法是利用跟踪控制器, 确保最佳转子角速度; 第二种方法是利用拟连续高阶滑模控制器保证最大功率跟踪。两种方法都表现出较好地控制效果<sup>[15]</sup>。

为获得最大风能捕获, 国内外学者提出了多种算法, 包括功率反馈法、叶尖速比法和爬山搜索法等。功率反馈法需要通过最佳功率曲线根据功率与风速的关系来得到, 且在应用中需要复杂的计算, 不适合实际应用<sup>[16, 17]</sup>。最佳叶尖速比法需要通过查表获得需要的转矩, 误差比较大。爬山搜索法捕获最大功率点需要时间比较长, 对风机运行效果产生很大影响, 不适用于实际工作中<sup>[18]</sup>。目前一些智能控制算法如模糊控制、神经网络和支持向量机等也应用到了风电机组控制中, 并取得了一定的控制效果, 但因其算法复杂, 并不适用于实际应用中, 但具有很高的理论研究价值和一定的应用前景<sup>[19]</sup>。

### 1.3.3 变桨控制技术

当风速超过额定风速后, 变桨控制系统开始工作, 调节桨距角增大使得风能利用系数变小, 从而丢弃一部分风能, 使得发电机输出功率可以稳定在额定功率附近, 这种控制技术便是变桨控制技术。由于风电机组模型的复杂性使得变桨控制技术具有较高的难度。目前变桨控制系统的设计方法主要有三种: 第一种为 PID 控制, 该方法不需要得到精确的设计模型, 且设计方法十分简单, 是一种非常成熟的控制方法, 目前已经广泛应用于各种工业控制中。但其控制参数的设计需要根据经验来获得, 且需要大量实验来调整控制效果。随着一些智能算法的兴起, 一些学者开始将 PID 与智能算法相结合形成了一些新的控制方法, 如模糊 PID、神经网络 PID 等, 并将这些控制方法用于风电变桨控制系统中。文献[20-30]通过使用模糊 PID 控制桨距角, 通过定义模糊规则, 利用 PID 控制取得了不错的控制效果。文献[31-39]利用 BP 神经网络和 RBF 神经网络通过训练后获得较好地控制参数, 使得系统具有较好地控制性能; 第二种方法是简化非线性模型, 这种方法通过一定的约束条件将风机模型简化, 之后利用传统的控制器设计方法应用到简化后的模型上, 该方法需要多次试验进行验证。Fernando Valenciaga 将变结构技术与李雅普诺夫方法相结合, 使得系统具有较高的鲁棒性<sup>[40]</sup>。

第三种方法是首先通过反馈线性化将非线性模型转化成线性模型，之后再通过经典控制理论中的控制方法对系统进行控制。杨锡运通过使用反馈线性化方法，设计了基于自适应模糊控制策略的滑模控制器，该方法可有效抑制风速扰动，达到了较好地控制效果<sup>[41]</sup>。秦生升基于反馈线性化，采用将自适应方法和滑模控制方法相结合和策略设计了风机变桨控制器，该控制器在稳定风力发电机组系统方面取得了很好地成果<sup>[42]</sup>。杨俊华基于微分几何反馈线性化方法，对风机系统模型进行了精确反馈线性化，并在线性化后的模型上设计了变桨控制器，该方法能够较好地解决功率恒定问题<sup>[43]</sup>。

变桨控制系统在进行反馈线性化时一般采用在某个稳定的工作点进行线性化或者根据某个参数（如风轮转速等）进行线性化。王东风选择一个工作点对风力发电机组模型进行线性化，并建立了滑模控制器，取得了较好地控制效果<sup>[44]</sup>。Bakka Tore 基于风电机组的非线性模型建立了线性模型，将控制问题转化为线性矩阵不等式问题，并根据线性模型设计了控制器，取得了良好的控制效果<sup>[45]</sup>。

## 1.4课题的研究意义和研究内容

由于煤、石油、天然气等常规能源遭到了过度使用，导致常规能源日益枯竭，且环境污染问题愈加严重，严重影响了国民经济的发展。为解决这些问题，人们把注意力放在了开发和利用可再生能源上，风能作为一种可再生能源也受到了世界各国的青睐，风力发电技术也随之发展起来。

本论文通过阅读国内外风电控制系统相关文献，对风力发电技术原理和控制技术有了一定的认识 and 了解。由于大型风力发电机组具有高度非线性和不确定性，使得控制器设计至关重要。本文利用状态反馈对风电机组设计了控制器，并证明了其稳定性，之后估算出了在该控制器下风电机组运行的稳定域，这对风机正常运行范围和故障修复时间的估计提供了一定的理论依据。

本文主要研究内容如下：

第一章首先介绍了课题的研究背景，之后介绍了世界风力发电的发展现状，及现下风力发电机组的一些新型控制技术，包括智能变速控制技术、智能变桨控制技术以及工程中常用的 PID 控制技术，最后明确了本课题的控制方法。

第二章对首先对风力发电机组的结构和分类做了简单介绍，之后对风机的空气动力学原理进行了介绍，包括动量理论，风力机的特性系数。然后针对变速变桨风电机组运行，划分了其工作区间，并对最佳叶尖速比区、转速恒定区和功率恒定区三个运行区域工作状态分别进行了详细的描述。

第三章将风力发电机组模型分解为风速模型、风力机模型、传动系统模型、发电机模型和变桨执行机构模型，并对各个模型都进行了建模，最后根据各个模型搭建了风力发电机组控制系统仿真平台。之后介绍了状态反馈控制，为设计控制器奠定了理论基础，最后介绍了稳定域的理论基础和其估算方法，以及在风力发电机组运行中稳定域的重要性的意义。

第四章针对变速变桨风力发电机组在低风速阶段，首先将原控制问题转换为系统在平衡点稳定的问题，之后设计出状态反馈控制器并利用李雅普诺夫方法确定控制器参数，最终设计出转矩控制器，并在所设计的控制器的基础上，估算出了其运行的稳定域，之后利用加性分解原理重新设计控制器，并验证稳定域在新控制器下依然有效。最后利用本文所建立的风力发电机组控制仿真平台，分别在多种风速下验证控制器的控制效果。结果得出，在控制器能够在低风速阶段达到输出最大功率的控制目标，且在风机损耗状态下仍能取得较好地控制效果，该方法设计简单，具有一定的实用前景。稳定域估计值的得出，对指导风场维护人员维护风机，保障风机安全运行提供了一定的指导。

第五章针对变速变桨风力发电机组在高风速阶段，设计了变桨控制器。之后利用李雅普诺夫方法证明了其稳定性，并估算出了风力发电机组系统在该控制器下的稳定域，之后利用加性分解原理重新设计控制器，并验证稳定域在新控制器下依然有效。最后在风力发电机组控制仿真平台上进行了数值仿真，仿真结果表明该控制器能够达到风机输出功率稳定的控制目标，且在风机损耗状态下仍能取得较好地控制效果，该方法设计简单，具有一定的实用前景。稳定域估计值的得出，对指导风场维护人员维护风机，保障风机安全运行提供了一定的指导。

第六章总结了论文的主要研究内容和研究成果，并对论文下一步工作进行了展望。

## 第二章 风力发电机组基本控制理论

风力发电是将风能转化成机械能，再将机械能转化成电能的过程<sup>[46, 47]</sup>。风力发电机组包括风轮、机舱、塔架、风电机组的偏航装置、调速装置、传动装置、制动装置、发电机、控制器等部分。风轮用于捕获风能并将机械能提供给发电机作为原动力，发电机利用电磁感应现象把风轮输出的机械能转换成电能其中控制系统对风机的运行起到关键作用，最终控制目标为风力发电机组在整个运行区域内能够安全稳定运行，以便获取最大能量，提供安全可靠的电力质量。

### 2.1 风力发电机组基本结构和分类

目前主流风力发电机组基本结构主要包括叶片、变桨系统、传动系统、偏航系统等部件，如图 2.1 所示。各部分名称和用途如表 2.1 所示。

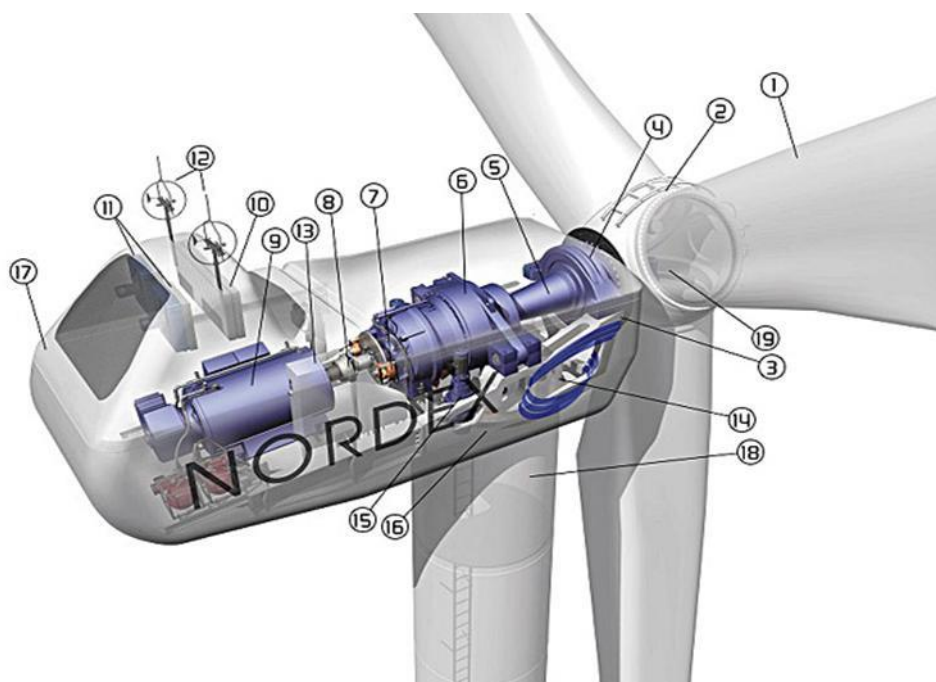


图 2.1 风力发电机组结构

叶片是风力发电机组的重要部件，其外形设计直接影响到风机的功率捕获，故其外形设计至关重要，通常情况下其叶片叶尖翼型设计相对厚度较小，以保证风能最大捕获，而根部设计的厚度相对较大，以保证叶片能够承受较大的载荷。



变桨系统安装在轮毂上，通过控制桨距角控制风力发电机组的输出功率，并能够通过空气动力的方式使风力发电机组安全停机。传动系统主要包括风轮转子、低速轴、齿轮箱、联轴器和发电机转子等部件，是风电机组运行的重要部件。偏航系统与风力发电机组的控制系统配合发出指令要求风轮一直处于对风状态，以便充分利用风能，提高风能捕获率。

表 2.1 风电机组各部件名称及用途

标号	名称	用途
1	叶轮	将风能转化为机械能
2	轮毂	安装和固定桨叶
3	机舱内框架	放置设备
4	叶轮轴与主轴连接	固定与支撑风轮
5	主轴	将风轮扭矩传递至增速箱
6	增速齿轮箱	转化扭矩
7	刹车盘	系统制动
8	发电机连接	连发电机与齿轮箱
9	发电机	将机械能转化成电能
10	散热器	散热，降低温度
11	冷却风扇	保持空气流通
12	风测量系统	测量风向风速
13	控制系统	控制风电机组运行
14	液压系统	转动轮毂和桨叶
15	偏航驱动	转动风轮，改变其方向
16	偏航轴承	转动机舱和轮毂
17	机舱盖	保护设备
18	塔架	支撑和固定机舱
19	变桨距系统	控制和调节桨叶的桨距角

风力发电机组种类各式各样，结构多有不同，分类方法也多种多样。可以依据额定功率、风机旋转主轴方向，有无齿轮箱等方法分类。

按照额定功率一般可分为：微型机、小型机、中型机和大型机。其中微型机：10kw 以下；小型机：10kw 至 100kw；中型机：100kw 至 1000kw；大型机：1000kw 以上。

风力发电机组按照风机旋转主轴方向可以分为垂直轴和水平轴。其中水平轴风机转动轴与地面平行，运行时叶轮需要随风向调整。垂直轴风力发电机组转动轴与地面

垂直，叶轮不必随风向改变而调整方向但垂直轴风力发电机组与水平轴风力发电机组相比优越性较差，所以市场上使用的几乎都是上风向水平轴机型。

风力发电机组按照有无齿轮箱可以分为直驱型和双馈型，直驱型风力发电机组的多极电机与风轮直接连接，由风力直接驱动发电机，使风能转换变幅变频的三相交流电，经过整流之后转变为直流，然后通过逆变器变换为幅值频率恒定的三相交流电后并入电网，实现最大功率跟踪。但它的缺点也很明显，由于没有齿轮箱，各种冲击载荷都由发电机系统承受，对发电机有很高的要求。双馈电机在风轮和发电机之间采用齿轮箱连接，噪音大，故障高，且机械损耗大。但是其利用励磁电流，既可以在不同转速下发电，又可以独立调节发电机有功功率和无功功率，提高电力系统的性能。

## 2.2 空气动力学

### 2.2.1 动量理论

在 1900 年之前 Rankine 和 Froude 建立了激励圆盘模型，用来考虑气流在风力机轴向的动量变化。本文通过能量转换方法展开空气动力学分析。风机的制动盘模型如图 2.2 所示。

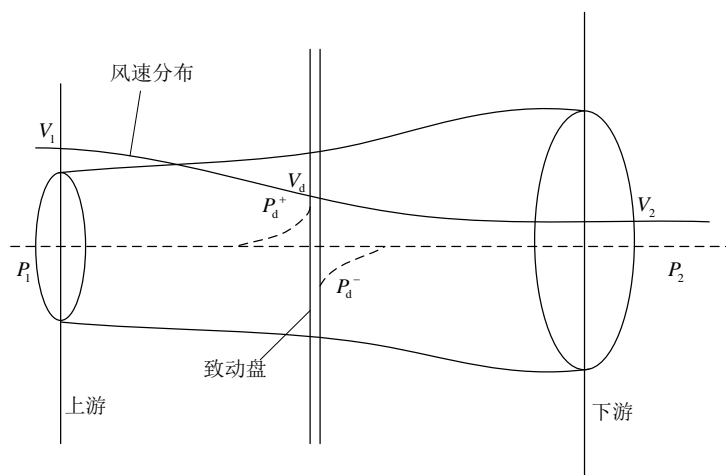


图 2.2 制动盘模型

本文以水平轴风力发电机组为研究对象，假设流经风力机的气流均匀稳定的且没有阻力，风机为一个具有无限个桨叶的制动盘，在空气流经制动盘时气流速度开始降低，动能减小，减少的这部分能量就转化成了风机的机械能。

风通过制动盘时，速度会减小，根据能量守恒，减少的动能转化成了机械能，因此可以采用伯努利方程和质量守恒定理进行分析。

作用在风轮上的推力如公式(2.1)(2.2)所示：

$$T = mV_1 - mV_2 \quad (2.1)$$

$$m = \rho V_d A \quad (2.2)$$

其中,  $m$  为单位时间内流通空气的质量,  $V_1$  为上游空气流动速度,  $V_2$  为下游空气流动速度,  $\rho$  为空气密度,  $V_d$  为制动盘处空气流动速度,  $A$  为制动盘横截面积。

将(2.2)代入到公式(2.1)中得到:

$$T = \rho A V_d (V_1 - V_2) \quad (2.3)$$

推力也可以用上下游之间的压力差表示。在制动盘处采用推力公式和伯努利方程, 解决来流方向风速问题。

$$T = (P_d^+ - P_d^-) A \quad (2.4)$$

其中,  $P_d^+$  为制动盘前受到的压力,  $P_d^-$  为制动盘后受到的压力。

已知伯努利方程

$$P + \frac{1}{2} m V^2 = \text{常数} \quad (2.5)$$

上游处平衡方程

$$P_1 + \frac{1}{2} m V_1^2 = P_d^+ + \frac{1}{2} m V_d^2 \quad (2.6)$$

其中,  $P_1$  为上游压力。

下游处平衡方程

$$P_2 + \frac{1}{2} m V_2^2 = P_d^- + \frac{1}{2} m V_d^2 \quad (2.7)$$

其中,  $P_2$  为下游压力。

由公式(2.4)~(2.7)可推出, 推力可以表示为

$$T = \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_2^2) A \quad (2.8)$$

$$V_d = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (2.9)$$

当气流穿过风轮时, 部分气流发生方向偏转, 使得下游风速降低, 引入轴向诱导因子  $a = \frac{(V_1 - V_d)}{V_1}$ , 那么上游风速和下游风速的关系可表示为:

$$V_2 = V_1 (1 - 2a) \quad (2.10)$$

已知风轮的功率表达式为:

$$P_w = m \left( \frac{V_1^2}{2} - \frac{V_2^2}{2} \right) \quad (2.11)$$

将公式(2.9)和诱导因子  $a$  代入公式(2.11)得到:

$$P_w = 2 \rho A V_1^3 a (1 - a)^3 \quad (2.12)$$

求导后得:

$$\frac{dP_w}{da} = 2 \rho A V_1^3 (1 - 4a + 3a^2) \quad (2.13)$$

计算得出：

$$P_{max} = \frac{16}{27} \left( \frac{1}{2} \rho A V_1^3 \right) \quad (2.14)$$

由此得到风能利用系数

$$C_p = \frac{P_{max}}{\frac{1}{2} \rho A V_1^3} \quad (2.15)$$

计算最大风能利用系数  $C_{pmax} = \frac{16}{27}$ 。  $C_{pmax}$  为贝兹极限值，是理想风机的最大理论效率值，实际应用中，风力机获取的能量不会超过贝兹极限值。

### 2.2.2 叶素理论

力与叶各部分之间具有一定的关系，为了分析这种关系，叶素理论<sup>[48, 49]</sup>将叶片分成多个部分进行分析，其中每个部分叫做叶素，过各个叶素是相互独立的，之间的流动没有干涉，在风对叶素作用时，会产生力。详细的叶素几何分量图如图 2.3 所示。

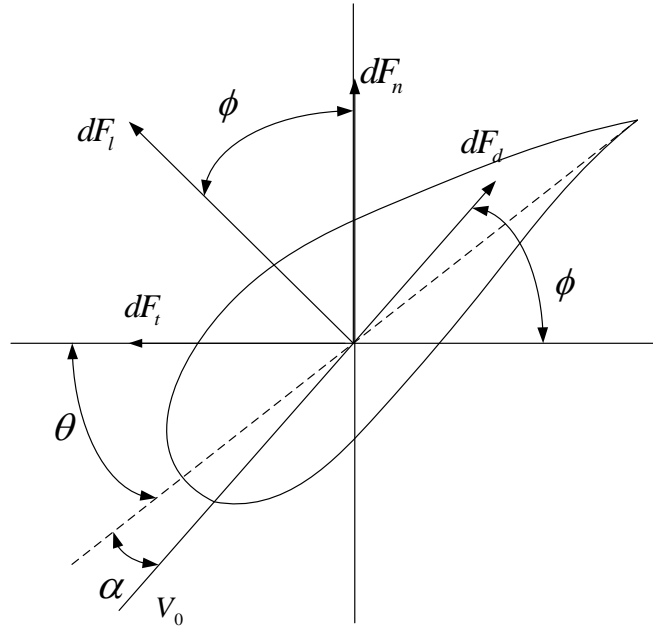


图 2.3 叶素几何图

图中  $F_l$  为垂直于风速方向产生的升力， $F_d$  为平行于风速方向产生的阻力， $V_0$  为对叶片轴向方向和切线方向作用的矢量和， $\phi$  称为入流角，是相对风速与风轮旋转平面之间的角度， $\alpha$  称为攻角，是与叶素弦线之间的夹角， $\theta$  为桨距角，是入流角与攻角之差。

考虑到风轮后尾流旋转时，速度三角公式如下所示：

$$\begin{cases} V_x = V_1 (1 - a) \\ V_y = \omega r (1 + b) \end{cases} \quad (2.16)$$

其中， $V_1$  为来流风速， $V_x$  为叶素的相对轴向速度， $V_y$  为叶素的相对切向速度， $r$  为

风轮半径， $\omega$ 为风轮转速。

相对速度 $V_0$ 可表示为

$$V_0 = \sqrt{V_x^2 + V_y^2} = \sqrt{(1-a)^2 V_1^2 + (1+b)^2 (\omega r)^2} \quad (2.17)$$

其中， $a$ 为轴向诱导因子， $b$ 为周向诱导因子。

那么入流角有关系式：

$$\sin \phi = \frac{V_1 (1-a)}{V_0} \quad (2.18)$$

在风轮旋转轴上的作用力包括与旋转轴平行的法向力 $F_n$ 和与旋转轴垂直的切向力 $F_t$ 。在旋转轴上，升力增量 $dF_l$ 与阻力增量 $dF_d$ 对法向力增量 $dF_n$ 影响很大，法向力增量表示如下：

$$dF_n = \frac{1}{2} \rho V_0^2 C_n c dr \quad (2.19)$$

切向力增量表示：

$$dF_t = \frac{1}{2} \rho V_0^2 C_t c dr \quad (2.20)$$

其中， $c$ 为叶素弦长，切向力系数 $C_n = C_l \cos \phi + C_d \sin \phi$ ，法向力系数 $C_t = C_l \sin \phi - C_d \cos \phi$ 。

由此可得到作用在叶素圆环上的推力和转矩为：

$$dT = \frac{1}{2} B \rho c V_0^2 C_n dr \quad (2.21)$$

$$dM = \frac{1}{2} B \rho c V_0^2 C_t dr \quad (2.22)$$

其中， $B$ 为叶片数目。通常一个叶片分割为 10-20 个叶素。

### 2.2.3 风力机的特性系数

风机的特性可以用功率系数来描述，功率系数越大，则风机的风能利用率越高。一般风机的运行状态主要由风轮的叶尖速比和叶片的桨距角决定，因此，通常用叶尖速比来表示风机的功率系数。风机运行过程中，桨距角的变化会引起风机功率显著变化，故可以通过对叶片桨距角和叶尖速比的调节，使风机运行在最佳状态<sup>[50]</sup>。

#### 1. 风能利用系数 $C_p$

当风通过风轮叶片时，会推动风轮叶片旋转，从而产生机械能，进而带动发电机发电，风力机捕获的能量为<sup>[51, 52]</sup>：

$$P = \frac{1}{2} \rho A C_p (\lambda, \beta) v^3 \quad (2.23)$$

式中： $\rho$ 为空气密度， $A$ 为风轮扫掠截面面积， $v$ 为风速； $C_p$ 为风能利用系数。 $\beta$ 为桨距角， $\lambda$ 为叶尖速比，定义为叶片顶端的线速度与风速之比：

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v} \quad (2.24)$$

式中： $\omega_r$ 为风轮角速度，单位为 $rad/s$ ；

$R$ 为风轮半径，单位为 $m$ 。

风能利用系数 $C_p$ 可表示为：

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (2.25)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.26)$$

式中： $c_1 = 0.5176$ ,  $c_2 = 116$ ,  $c_3 = 0.4$ ,  $c_4 = 5$ ,  $c_5 = 21$ ,  $c_6 = 0.0068$ 。

从上式可以看出：风能利用系数由叶尖速比 $\lambda$ 和桨距角 $\beta$ 决定，风力机的特性曲线如图 2.4 所示。

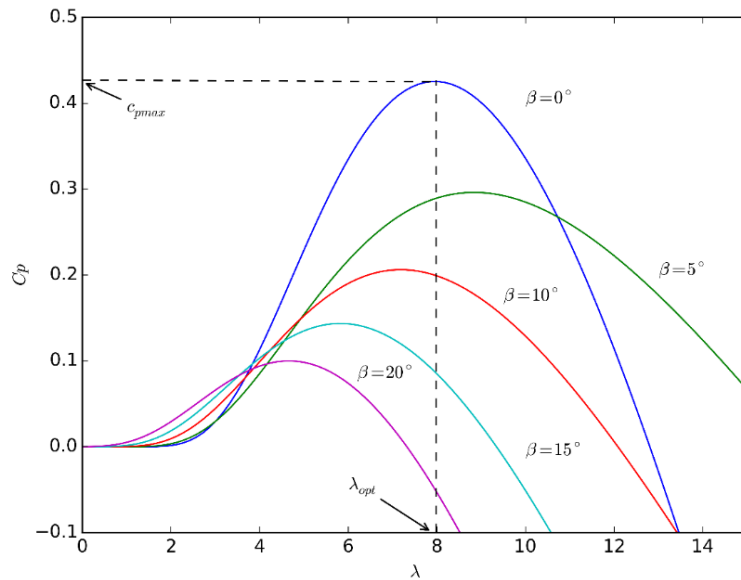


图 2.4 变桨距风机特性曲线

从图中可以看出，叶尖速比不变时，桨距角增大，风能利用系数减小；桨距角不变，随着叶尖速比增大，风能利用系数会先增大后减小。故可通过改变桨距角来改变风能利用系数，进而调节风轮捕获的风能，从而达到控制风机的输出功率的目的。

## 2.3 变速变桨控制理论

### 2.3.1 变速控制理论

变速变桨风力发电机组在并网之后，可根据风速来划分工作状态，其运行区域可

以分为：低风速叶尖速比区、转矩恒定区和功率恒定区三部分<sup>[53]</sup>。在低风速控制区域可以通过调节发电机转矩得到最大风能利用系数，从而实现发电机输出功率最大化的控制目标。在高风速功率恒定区可以通过调节桨距角来改变风能利用系数，进而实现发电机输出功率稳定在额定功率的控制目标。变速变桨风力发电机组运行区域划分如下所示：

区域一： $v_{\text{cut-in}} < v < v_{\text{mid}}$ ，最佳叶尖速比区；

区域二： $v_{\text{mid}} < v < v_{\text{rated}}$ ，转速恒定区；

区域三： $v_{\text{mid}} < v < v_{\text{cut-off}}$ ，功率恒定区。

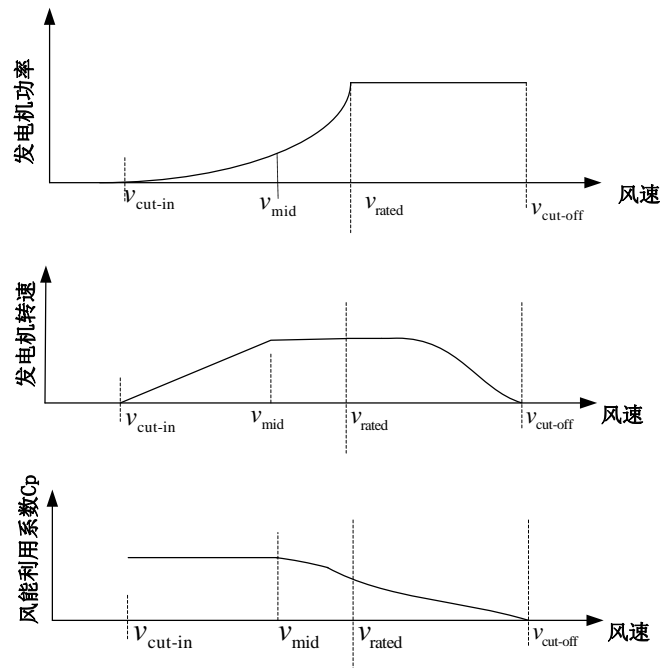


图 2.5 风力发电机组运行区域划分

风力发电机组在变速阶段的目标是最大化风机输出功率，当风速未达到额定风速时，通过调节转矩实现风能利用最大化；当风速到达额定风速时，风力发电机组输出额定功率；当风速高于额定风速时，为避免风力发电机组受到破坏，必须舍弃一部分风能以实现输出功率稳定在额定功率。由图 2.5 可看出，在风速未达到额定风速之前属于变速运行区域，分为三个运行阶段。

1) 启动阶段：在该阶段，风速小于切入风速  $v_{\text{cut-in}}$ ，此时发电机不工作，只有风轮随风旋转。桨距角为  $90^\circ$  顺桨状态，这样风轮可以得到一个比较大的启动力矩。

2) 最佳叶尖速比阶段（ $C_p$  恒定区）：当风速达到切入风速  $v_{\text{cut-in}}$  时，风力发电机组开始工作，并切入电网，这时的发电机输出功率低于额定功率，捕获最大风能得到最大功率输出成为该阶段的主要控制目标。为实现该目标可通过调节发电机转速使得风能利用系数保持在最大值  $C_{p\text{max}}$ ，从而实现最大能量捕获；

3) 转速恒定阶段: 当风速达到中间风速 $v_{mid}$ 时, 发电机转速达到了额定转速, 受机械性能影响, 发电机转速不能再增加。此时便进入了转速恒定区, 但功率仍小于额定值, 需控制发电机转矩使其增加, 使得当风速达到额定风速时可以输出额定功率。

在变速阶段, 理想状态下桨距角为 $0^\circ$ ; 此时变桨系统不工作, 风力发电机组通过控制发电机转矩使发电机最大化捕获风能<sup>[54-57]</sup>。目前风电场通常采用成熟的 PID 控制器来控制风力发电机组, 该控制器设计简单, 具有快速响应和较低的稳态误差, 故得到了广泛地应用。其缺点是 PID 参数设计基本是靠经验来设计, 并需要进行多次试验才能获得较好地控制效果。

### 2.3.2 变桨控制理论

变桨距控制技术是通过控制桨距角从而改变风轮对风能的吸收程度进而调整输出功率, 保证输出功率稳定在额定功率。变桨系统的主要作用为: 在低风速时的启动作用和在高风速时的功率限制作用。

#### 1) 低风速下的启动作用

在风速未达到切入风速时, 风力发电机组不工作, 此时桨距角处于顺桨 $90^\circ$ 状态; 当风速达到切入风速时, 桨距角开始向 $0^\circ$ 方向偏转, 使得风机获得较大地启动转矩从而克服驱动系统的空载阻力矩, 使风轮启动。风机运行后, 为达到输出功率最大, 桨距角应该为 $0^\circ$ 。然而在实际运行中, 由于叶片的形状及一些其他因素使得在桨距角为 $3^\circ$ 时, 风轮可以捕获到最大风能。在功率输出未达到额定功率前, 变桨执行机构不动作。

#### 2) 高风速下的功率限制作用

当风速高于额定风速时, 如果桨距角继续保持在 $0^\circ$ , 则输出功率会高于额定功率, 在这种情况下长期运行会对风力发电机组造成损坏。为保护风力发电机组, 必须舍弃一部分风能, 保持输出功率稳定在额定功率。这时就需要调节桨距角, 使其向 $90^\circ$ 方向旋转, 从而减小风能利用系数, 维持输出功率稳定。

目前比较常用的变桨控制方式主要有统一变桨控制方式和独立变桨控制方式两种<sup>[58, 59]</sup>。统一变桨控制的方式是最早发展起来的, 应用比较广泛, 目前技术也比较成熟。独立变桨控制方式是近几年才发展起来的新方法, 相对于统一变桨控制能够解决叶片和塔架等部件载荷不均匀的问题, 并且可以很好地控制输出功率。故其受到了越来越多的重视, 理论也越来越完善。

统一变桨控制是指不论风力机有多少个叶片, 统一控制风力机所有叶片的桨距角, 所有叶片桨距角的变化相同。变桨控制系统将参考转速与实际转速之差作为控制器的输入, 控制器根据转速误差输出桨距控制指令, 通过变桨控制器和执行机构改变



桨距角。其控制流程如下图所示：

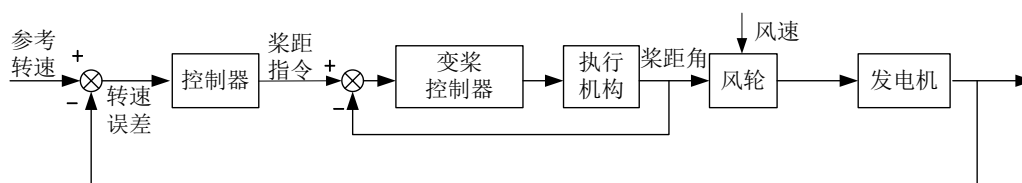


图 2.6 统一变桨控制框图

独立变桨控制是对风力机的每个叶片都进行独立地驱动变桨，在不同的高度和不同的风速下，需要调节的桨距角也不同，故需要对三个也变进行独立控制，给每个叶片分配控制系数。与统一变桨控制相比，独立变桨控制有多个执行机构，在一个变桨执行机构发生故障的情况下，不影响其他叶片的桨距角控制，可靠性较高。

目前有两种独立变桨控制策略：基于桨叶加速度控制和基于桨叶方位角控制。前者需要在叶片上安装加速度传感器，后者是通过在叶片上安装方位角检测装置，相较于前者，基于桨叶方位角的策略更容易实现。独立变桨控制框图如下所示：

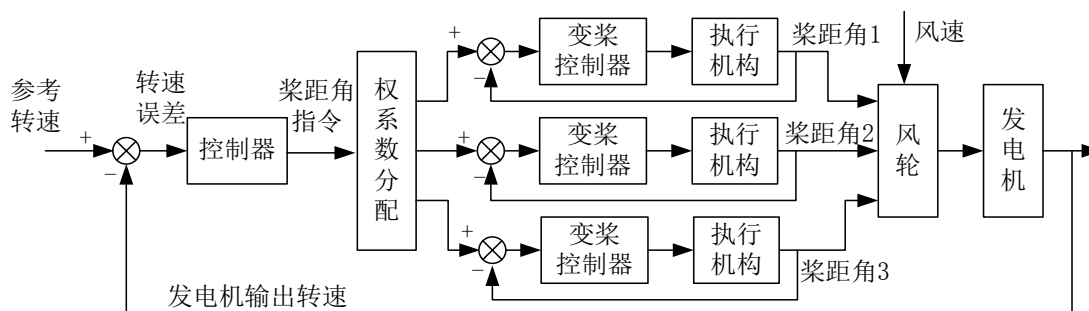


图 2.7 独立变桨控制框图

## 2.4本章小结

本章首先介绍了风力发电机组的基本结构和分类，并对其主要结构和功能进行了描述。随后介绍了风力发电机组的空气动力学特性，包括动量理论和风力发电机组的一些特性系数，推导出了在理想状态下的风能利用系数。最后介绍了变桨变速风力发电机组的控制理论，对风力发电机组的三个运行区域进行了详细地描述，并介绍了两种控制理论的基本控制结构和所运行的区域，为后续地研究奠定了基础。

### 第三章 风力发电机组建模与控制方法

风力机模型的搭建对整个风机系统的动态特性和控制规律的研究有着极为重要的意义，建立的风机模型应能够描述整个机组的所有基本特性，而且还要适合控制器的控制仿真。变桨距风力机模型的基本结构应包括风气动系统、机械系统、电气系统及控制系统等模型。其中气动系统建模主要包括风速模块，将风能转换为机械能，机械系统主要包括传动模块，电气系统主要包括发电机模块，主要任务为将传动轴的机械能转换为电能。最后需要控制系统调节桨距角或转矩进行控制策略调整，从而实现控制目标。

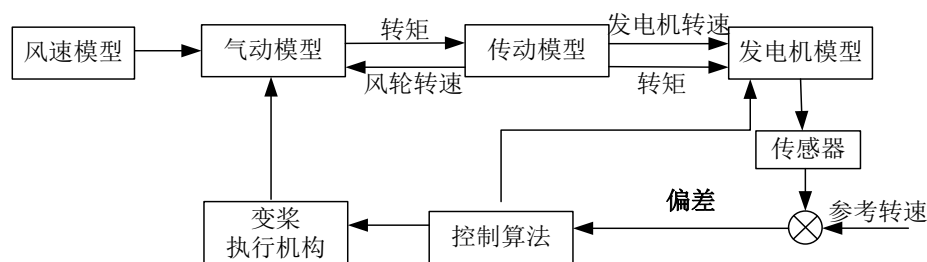


图 3.1 风力发电机组基本构成

#### 3.1 风力发电机组建模

##### 3.1.1 风速模型

风力发电机组是利用风作为原动力，经过一系列的能量转化最终转化成电能，风电机组的模型与风的模型密切相关，只有建立精确的风的模型，才能进行后续地风电机组建模和验证控制策略的可行性。风速建模有多种方法，

文献<sup>[60]</sup>将自然风分成四个部分，每个部分都是矢量，具有大小和方向，这四个部分分别为基本风、渐变风、阵风和随机风。Vander Hoven 将风能看成是一个稳态的随机过程，建立了 Vander Hoven 风速模型，这种模型能很好地反映风的中长期变化特性，但不能反映风在短时间内的变化。Von Karman 将风速的紊流分量特性看作与某段时间内的平均风速有关，建立的 Von Karman 风速模型很好地模拟风在短时间内的变化特性。

本课题选用风速典型的四分量模型，即由基本风 $V$ 、阵风 $V_{WG}$ 、渐变风 $V_{WR}$ 和随

机风 $V_{WN}$ 叠加而成。

基本风 $V$ 是一直存在于自然界中的，用来反映风场中平均风速的变化，通过威布尔分布函数可以近似得到

$$V = A \cdot \Gamma(1 + 1/K) \quad (3.1)$$

其中， $A$ 为威布尔分布的尺度参数， $\Gamma(\cdot)$ 为伽玛函数， $K$ 为威布尔分布的形状参数。在一般情况下基本风不会随着时间变化，一般可以用常值在仿真中来模拟。

阵风 $V_{WG}$ 用来描述在某个时间段内风突然变化的现象，其数学公式可以表示为：

$$V_{WG} = \begin{cases} 0 & t < T_1 \\ V_{\cos} & T_1 < t < T_1 + T \\ 0 & t \geq T_1 + T \end{cases} \quad (3.2)$$

其中， $V_{\cos} = (V_{WG\max} / 2) \{1 - \cos 2\pi[(t/T) - (T_1/T)]\}$ ， $V_{WG}$ 为阵风风速(m/s)， $T_1$ 为阵风启动时间(s)， $T$ 为阵风周期(s)， $V_{WG\max}$ 为阵风的最大风速(m/s)。

渐变风 $V_{WR}$ 可以随着时间发生缓慢的变化，其数学公式可以表示如下：

$$V_{WR} = \begin{cases} 0 & t < T_1 \\ V_{\text{ramp}} & T_1 < t < T_2 \\ V_{WR\max} & T_2 < t < T_2 + T \\ 0 & t \geq T_2 + T \end{cases} \quad (3.3)$$

其中， $V_{\text{ramp}} = V_{WR\max} [1 - (t - T_2) / (T_1 - T_2)]$ ， $V_{WR}$ 为渐变风速(m/s)， $T_1, T_2$ 为渐变风起止时间(s)， $T$ 为渐变保持时间(s)。

随机风 $V_{WN}$ 的变化具有不确定性，它受到多种因素的影响，包括地表粗糙系数、相对高度的风速及各种外来扰动等，其数学公式可以表示如下：

$$V_{WN} = 2 \sum_{i=1}^M [S_V(\omega_i) \Delta\omega]^{\frac{1}{2}} \cos(\omega_i + \varphi_i) \quad (3.4)$$

其中， $M$ 为频谱取样点数， $S_V(\omega_i) = \frac{2K_N F^2 |\omega_i|}{\pi^2 [1 + (F\omega_i / \mu\pi)^2]^{4/3}}$ ，取样频率

$\omega_i = (i-1) \cdot \Delta\omega$ ， $K_N$ 为地表粗糙系数， $F$ 为扰动范围， $\mu$ 为相对高度的平均风速， $\varphi_i$ 为在 $0 \sim 2\pi$ 之间均匀分布的随机变量。

本文采用的风速模型为基于Matlab/Simulink的风力发电建模系统中的风速模块，与四分量风速模型效果相比，该风速模型考虑到了塔影效应，更加接近风场的实际风速。

使用该风速模块分别对平均风速为 5m/s、10m/s 和 15m/s 三种风况进行仿真，仿真时间为 10 分钟，即 600 秒。仿真结果如图 3.2 所示：

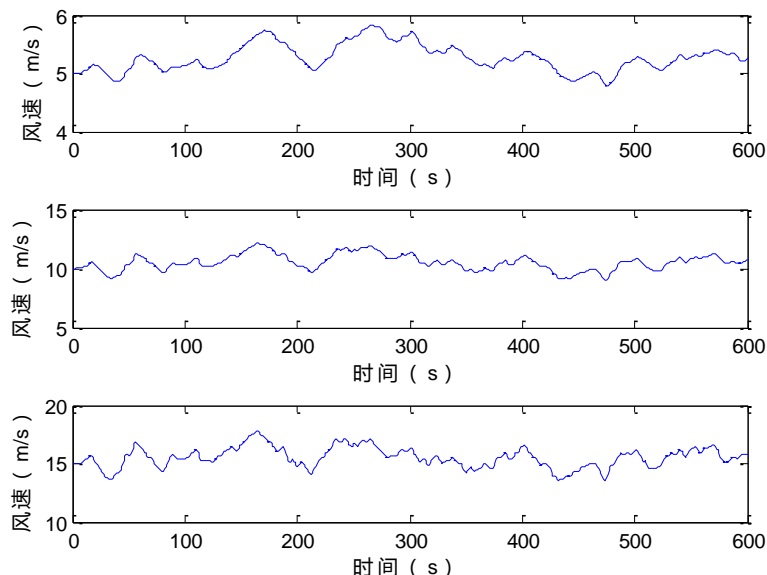


图 3.2 风速曲线

从图中可以看出，风速在平均风速附近小范围震荡，误差不超过 12%，变化速率有的部分比较平缓，有的部分会出现较大地变化，符合实际状况下风速的突变性。该模块比较准确地模拟了三种平均风速下的风况，表明该模块可以模拟多种风速，具有较广的适用性且可以较好地反映出风场中的实际风速。因此可以使用该风速模块模拟风速来验证之后设计的控制策略和风机模型。

### 3.1.2 传动链模型

风力发电机组的传动系统一般由风轮转子、高速轴、齿轮箱、低速轴和发电机转子等部分组成。在研究传动系统时，一般根据轴系的等效和建模方法的不同将传动系统分为单质量块模型、二质量块模型和三质量块模型三种<sup>[61]</sup>。考虑到模型的复杂度，在一般研究中通常使用二质量块模型或单质量块模型。

#### 1) 二质量块模型

二质量块模型可以通过三质量块模型折算过来，齿轮箱的转动惯量可以折算到风轮和发电机中，低速轴的转矩和转速可以折算到高速轴部分，齿轮箱以及高低速轴的弹性作用和转动阻尼作用可以等效成一个弹性和阻尼环节。二质量块模型如图 3.3 所示。

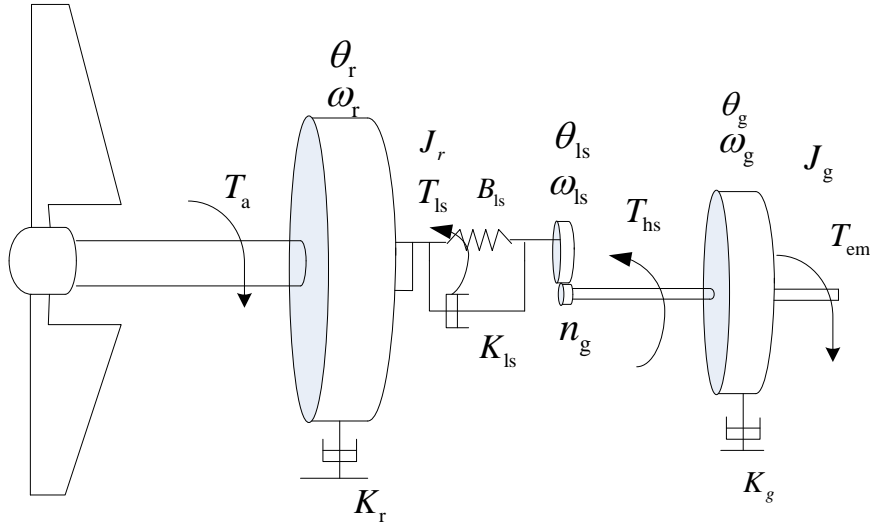


图 3.3 风力发电传动系统二质量块模型

当风轮转速达到一定速度后，在启动转矩和低速轴转矩的相互作用下，风轮开始转动，其作用关系如(3.5)所示：

$$J_r \dot{\omega}_r = T_a - K_r \omega_r - T_{ls} \quad (3.5)$$

其中， $J_r$  为风轮转动惯量( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )； $K_r$  为风轮阻尼系数( $\text{N} \cdot \text{m} / \text{rad} / \text{s}$ )； $T_{ls}$  为低速轴转矩( $\text{N} \cdot \text{m}$ )，在其中发挥制动作用，用公式表示如下所示：

$$T_{ls} = K_{ls} (\theta_r - \theta_{ls}) + B_{ls} (\omega_r - \omega_{ls}) \quad (3.6)$$

其中， $K_{ls}$  为低速轴阻尼系数( $\text{N} \cdot \text{m} / \text{rad} / \text{s}$ )； $\theta_r$  为风轮旋转位置角( $^\circ$ )； $\theta_{ls}$  为低速轴旋转位置角； $B_{ls}$  为低速轴刚度系数 ( $\text{N} \cdot \text{m} / \text{rad}$ )； $\omega_r$  为风轮旋转角速度( $\text{rad} / \text{s}$ )； $\omega_{ls}$  为低速轴旋转角速度( $\text{rad} / \text{s}$ )。

低速轴转矩以齿轮箱转速比的倍率传输到高速轴。

$$T_{hs} = \frac{T_{ls}}{n_g} \quad (3.7)$$

其中， $T_{hs}$  为高速轴转矩( $\text{N} \cdot \text{m}$ )； $n_g$  为齿轮箱齿速比。

发电机的旋转位置角、转速与低速轴旋转位置角、转速关系如下：

$$\theta_g = n_g \theta_{ls} \quad (3.8)$$

$$\omega_g = n_g \omega_{ls} \quad (3.9)$$

其中， $\theta_g$  为发电机的旋转位置角( $^\circ$ )； $\omega_g$  为发电机转速( $\text{rad} / \text{s}$ )。

在风力发电机组的实际运行过程中，齿轮箱会造成一定的能量的损耗（约相当于0.5%的额定功率），考虑到齿轮箱造成的损耗，则输出的高速轴转矩的表达式应该在公式(3.7)的基础上乘以一个效率系数。

$$T_{hs} = \eta_g \frac{T_{ls}}{n_g} \quad (3.10)$$

假设风力发电机组是在理想的工作条件下运行的，即运行过程中没有损耗，那么由公式(3.7)、(3.8)和(3.9)可知：

$$n_g = \frac{T_{ls}}{T_{hs}} = \frac{\omega_g}{\omega_{ls}} = \frac{\theta_g}{\theta_{ls}} \quad (3.11)$$

发电机在高速轴转矩和电磁转矩的相互作用工作，其表达式为：

$$J_g \dot{\omega}_g = T_{hs} - K_g \omega_g - T_{em} \quad (3.12)$$

其中， $J_g$  为发电机转动惯量( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )； $K_g$  为发电机阻尼系数( $\text{N} \cdot \text{m} / \text{rad} / \text{s}$ )； $T_{em}$  为发电机电磁转矩( $\text{N} \cdot \text{m}$ )。

## 2) 单质量块模型

单质量块模型可由二质量块模型简化而来，其目标是降低传动系统模型复杂度，将研究侧重点放在风力发电机组的电气部分的动态特性上。单质量块模型如图 3.4 所示。

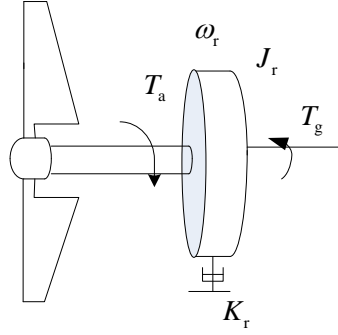


图 3.4 风力发电传动系统单质量块模型

风轮的转动惯量和发电机的转动惯量反馈到输出轴上，假设轴为理想刚度，忽略传动系统的刚度和阻尼，那么：

$$\theta_r = \theta_{ls} \quad (3.13)$$

$$\omega_r = \omega_{ls} \quad (3.14)$$

综合公式(3.11)、(3.13)和(3.14)，可以得到

$$n_g = \frac{T_{ls}}{T_{hs}} = \frac{\omega_g}{\omega_r} = \frac{\theta_g}{\theta_r} \quad (3.15)$$

因此，公式(3.5)和(3.12)可描述为：

$$J_r \dot{\omega}_r = T_a - K_r \omega_r - n_g T_{hs} \quad (3.16)$$

$$n_g J_g \dot{\omega}_r = T_{hs} - K_g n_g \omega_r - T_{em} \quad (3.17)$$

公式(3.17)与  $n_g$  相乘后再与公式(3.6)求和可得到下式：

$$J_t \dot{\omega}_r = T_a - T_g - K_t \omega_r \quad (3.18)$$

其中， $T_g$  为发电机转矩( $\text{N} \cdot \text{m}$ )，且存在关系式： $J_t = J_r + n_g^2 J_g$ ； $K_t = K_r + n_g^2 K_g$ ；

$$T_g = n_g T_{em}。$$

### 3.1.3 变桨距机构模型

当风速超过额定风速时，为避免风电机组受到损坏，保证输出功率稳定在额定功率，需要启动变桨执行机构限制风力发电机组的风能捕获。根据风速大小得出桨距角，并输出桨距角控制指令，经控制系统调节，由执行机构驱动叶片变桨，数学模型如公式(3.19)，拉式变换如公式(3.20)：

$$\dot{\beta} = \frac{1}{\tau} (\beta_{\text{ref}} - \beta) \quad (3.19)$$

其中， $\beta_{\text{ref}}$  为桨距角的参考值(°)； $\beta$  为实际输出的桨距角值(°)； $\tau$  为时间常数。

$$G_P(s) = \frac{\beta(s)}{\beta_{\text{ref}}(s)} = \frac{1}{\tau \cdot s + 1} \quad (3.20)$$

由于控制系统和驱动系统会存在一定的计算延迟和条件延迟等情况，所以变桨执行机构会出现一定程度的延迟响应。

独立变桨控制中，每个叶片的桨距角是有控制系统独立控制的，控制机构会根据每个桨叶的受风情况，得到权系数，权系数表达式可由经验得到，可表示为为：

$$K_i = \frac{3 \times [1 + \frac{kl}{H_0} \sin(\theta_i + (i-1) \times \frac{2\pi}{3})]^{2n}}{\sum_{i=1}^3 [1 + \frac{kl}{H_0} \sin(\theta_i + (i-1) \times \frac{2\pi}{3})]^{2n}} \quad (3.21)$$

其中， $l$  为叶片长度； $kl$  为叶片平均风速点的等效长度； $H_0$  为风力发电机组机舱处的位置与轮毂中心处的距离到地面的高度； $\theta_i$  为叶片  $i$  的方位角。

经过权系数分配后，计算得到桨距角值

$$\beta_i = K_i \beta \quad (3.22)$$

其中， $\beta$  为统一变桨的桨距角。

### 3.1.4 发电机模型

风力发电的过程是风能转化成机械能，再由机械能转化成电能。其中，风力机完成了风能到机械能的转化，发电机完成了机械能到电能的转化，在能量转化过程中，发电机扮演着极其重要的角色，它不仅关系到输出电能的质量，还影响了风力发电机组的效率。发电机选择时需要考虑其稳定可靠性和使用寿命以及是否能够适应风况的变化等。

目前在变桨控制中主要采用异步发电机，异步发电机通过改变定子电压来改变发电机电力矩，本文对异步发电机的模型进行简化，其数学模型可表示为为：

$$T_{\text{em}} = \frac{gm_1 U_1^2 r_2'}{(\omega_g - \omega_1) [(r_1 - \frac{C_1}{\omega_g - \omega_1})^2 + (x_1 + C_1 x_2')^2]} \quad (3.23)$$

$$\omega_g = n_g \omega_r \quad (3.24)$$

其中,  $g$  为发电机极对数;  $m_1$  为相对数;  $U_1$  为电网电压(V);  $C_1$  为修正系数;  $\omega_g$  为发电机转速(rad/s);  $\omega_r$  为风轮转速(rad/s);  $\omega_1$  为发电机同步转速(rad/s);  $r_1$  和  $x_1$  分别为定子绕组电阻和漏抗( $\Omega$ );  $r_2'$  和  $x_2'$  分别为转子绕组电阻和漏抗( $\Omega$ )。

## 3.2 风力发电机组控制方法及稳定域

风力发电机组是一个极其复杂的非线性系统, 风机所捕获的风能与多种因素有关, 包括风机自身的设计参数、空气密度和风速等, 运行过程中存在很多随机性和不确定性, 因此需要针对风机模型设计出合适的控制器, 保证能够获得在低风速下最大风能捕获和高风速下功率恒定。

### 3.2.1 状态反馈控制

状态反馈是现代控制理论中的一种基本控制方式, 在经典控制理论中通常采用输出反馈, 状态反馈相比于输出反馈, 优点在于能够提供更丰富的状态信息和可供选择的自由度, 可以使系统容易获得更好的性能, 故得到了广泛地使用<sup>[62]</sup>。

状态反馈是将系统的状态变量乘以一个反馈系数, 然后将结果反馈到输入端与参考输入公共作用作为输入, 形成新的控制律。

考虑线性时不变系统:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ \dot{y} &= Cx + Du \end{aligned} \quad (3.25)$$

为使系统稳定, 设计状态反馈控制器  $u = -Kx$ , 则控制器须满足开环系统保持线性, 且闭环系统

$$\dot{x} = (A - BK)x \quad (3.26)$$

的原点是渐近稳定的。故当矩阵  $A - BK$  是 Hurwitz 矩阵时便可满足闭环系统渐近稳定。因此, 状态反馈稳定问题就转化成了设计一个矩阵  $K$ , 满足矩阵  $A - BK$  的特征值位于复平面的左半平面。由现代控制理论可知, 若矩阵对  $(A, B)$  是可控的, 则可以任意设计  $A - BK$  的特征值。即使  $A$  的某些特征值不可控, 只要不可控的特征值具有负实部, 系统仍然有可能达到稳定。

目前, 在状态反馈方法应用中, 由于卡尔曼滤波方法的出现以及状态观测器理论和状态估计方法的发展, 使得状态变量的精确估计值越来越容易获得, 进一步增加了状态反馈方法的实用性。



### 3.2.2 稳定域理论

李雅普诺夫稳定性理论指出：非线性动力系统的稳定平衡点一定存在一个邻域，从该邻域内出发的轨线都收敛于该稳定平衡点，这个邻域就称为该稳定平衡点的吸引域，简称稳定域<sup>[63, 64]</sup>。风力发电机组的暂态稳定对风机的安全运行具有重大的影响，风力发电机组的暂态失稳会导致风机损坏进而发生故障，对风电场造成大量损失，故研究风力发电机组运行稳定域具有重要意义。

考虑非线性系统：

$$\dot{x} = f(x) \quad (3.27)$$

设原点为该系统的渐近稳定平衡点，其中  $f: D \rightarrow R^n$  是局部 Lipschitz 的，且  $D \subset R^n$  是包含原点在内的定义域。设  $\phi(t; x)$  是系统(3.27)在  $t = 0$  时刻初始状态的解。原点的吸引区记为  $R_A$ ，定义为：

$$R_A = \{x \in D \mid \phi(t; x), \quad \forall t \geq 0, \phi(t; x) \rightarrow 0, t \rightarrow \infty\} \quad (3.28)$$

**引理 3.1** 若  $x = 0$  是系统(3.27)的渐近稳定平衡点，则其吸引区  $R_A$  是一个开连通不变集，而且  $R_A$  的边界由系统轨线构成。

引理 3.1 提出一种确定吸引区的方法，该方法通过描述在  $R_A$  的边界上的轨线的特征来确定其吸引区。在二阶系统中，通过运用相图来应用动力学系统的几何表示法可以确定吸引区。下面给出了通过几何法确定吸引区的情况。

考虑二阶系统：

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -x_2 \\ \dot{x}_2 &= x_1 + (x_1^2 - 1)x_2 \end{aligned}$$

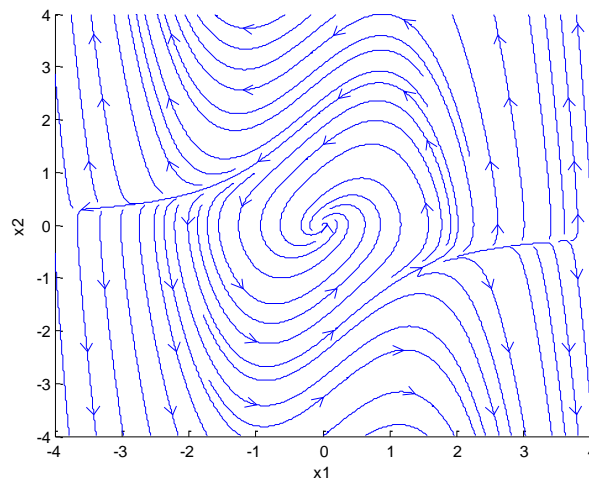


图 3.5 二阶系统相图

系统在原点有一个平衡点和一个非稳定极限环，由图 3.5 可知原点是稳定的，因为始于极限环外面的轨线不能通过极限环到达原点，且不存在其他平衡点，故  $R_A$  的边界一定为该极限环，通过相图可知，所有从极限环内开始的轨线都趋向原点。

应用 Lyapunov 方法可以求出或估算出吸引区  $R_A$ ，若  $R_A$  是由  $D$  的一个正不变紧子集估算时，即紧集  $\Omega \subset D$  使得每条始于  $\Omega$  的轨线在之后的所有时刻都会保持在  $\Omega$  内，估计值可以表示为集合：

$$\Omega_c = \{x \in R^n \mid V(x) \leq c\}$$

其中， $\Omega_c$  包含于  $D$  内且有界。对于 Lyapunov 函数  $V(x) = x^T P x$ ,  $D = \{ \|x\|_2 < R \}$ ，选择

$$c < \min x^T P x = \lambda_{\min}(P) r^2$$

可以保证当  $D = \{ \|b^T x\| < r \}$  时，有

$$\min x^T P x = \frac{r^2}{b^T P^{-1} b}$$

若选取

$$c < \min \frac{r_i^2}{b_i^T P^{-1} b_i} \quad 1 \leq i \leq p$$

则  $\{x^T P x \leq c\}$  是  $D = \{ \|b_i^T x\| < r_i, i = 1, \dots, p \}$  的一个子集。

### 3.2.3 风力发电机组系统运行稳定域

风力发电机组控制器设计完成之后，仅仅确定系统有一个渐近稳定点是远远不够的，能够求出平衡点的稳定域或给出稳定域边界更加重要。风力发电机组系统稳定域可由图 3.6 所示。

假设风力发电机组系统运行时具有一个平衡点  $x_{pr}$ ，假设系统在该平衡点稳定运行，若某时刻，由于风力发电机组运行过程中的一些故障改变了系统的结构，则风力发电机组系统轨线偏离稳定点，假如故障恢复后，该系统运行在平衡点的稳定域内，则该系统可以回到稳定状态；若该系统运行在平衡点的稳定域外，则该系统不会回到稳定状态，这会进一步造成风电机组的损坏。由此可见，系统能否回到稳定状态取决于系统运行点是否在稳定域内，若不在稳定域内，必须停机，避免风机受到损坏。且根据稳定域的大小可以计算出系统的清除故障的时间，对于风电机组维护人员来说，需要多长时间修复故障是一个关键问题，如果能在故障临界清除时间内修复故障，则可保证风机在不停机状态下修复故障，为风场减少了一定损失。风力发电机组系统稳定域的精确值通常情况下很难求出，但可以求出一个不太保守的稳定域的估计值，该

估计值必须在实际的稳定域内。

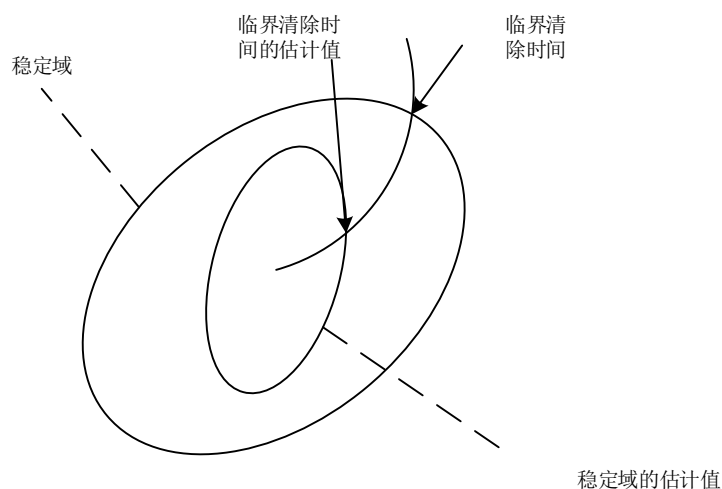


图 3.6 系统稳定域

由此可见，设计风电机组控制器时给出其稳定域具有重要意义，根据其稳定域可以估算出故障恢复时间临界点，可用来指导维修人员需要在多长时间内修复故障，且设计的控制器稳定域边界越大，说明系统的抗干扰能力越强，可在系统故障的情况下安全运行更长时间，这给维修人员提供了更多时间用来修复故障。若风电机组运行超出稳定域，则立刻停机，避免风机受到损坏，减少风场损失。

### 3.3 本章小结

本章建立了风速模型、风力机模型、传动系统模型、发电机模型和变桨执行机构模型，最后根据各个模型搭建了风力发电机组控制系统仿真平台。之后介绍了状态反馈的一些理论，为设计控制器奠定了理论基础，最后介绍了风力发电机组运行稳定域的重要性及其估算方法。

## 第四章 风电机组转矩控制器

风力发电的主要目的是最大化利用风能，但由于风的随机性和不可预测性使得风产生的能量也是时刻变化的，这就需要采用一些控制策略对风力发电机组进行控制，保证风力发电机组在安全运行的前提下，功率输出最大化<sup>[65, 66]</sup>。上世纪 90 年代，变桨距风力发电机组进入风力发电市场，采用变桨距控制使得风力发电机组的功率输出特性得到了显著地提高，然而风力发电机组在低风速段的风能转换效率仍然较低。目前，变速变桨风力发电机组已经成为并网型风力发电机组发展的主流机型，变速变桨风力发电机组能够根据风速的变化不断的调节风轮转速，保证在低风速阶段最大化风能利用率。将变速技术与变桨技术集于一体的变速变桨控制技术是目前最优化的控制技术，这种技术还能够减少阵风对风力发电机组造成的损坏，降低噪声，延长机组使用寿命，改善电能质量。本章从工程应用角度出发，基于状态反馈对风力发电机组设计了变速控制器，并通过理论推导证明该系统的稳定性，最后通过仿真验证所设计的控制器能够达到功率输出最优的控制目标，并基于该控制器对风力发电机组的稳定域进行了分析。控制总框图如图 4.1 所示。

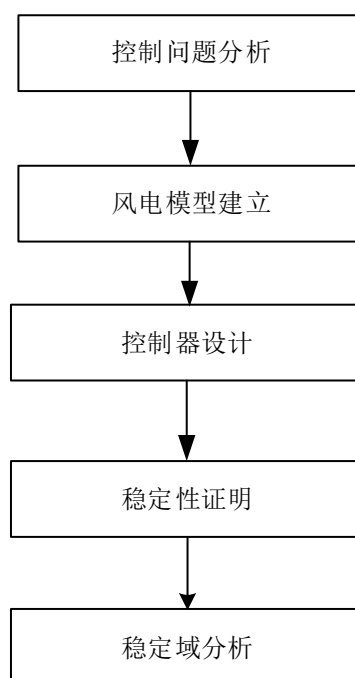


图 4.1 风电机组控制总框图

## 4.1 转矩控制器设计

当风速小于额定风速时，变桨执行机构不工作，此时桨距角被设置为  $0^\circ$ ，可获得较大地力矩。风力发电机组的转矩控制机构开始工作，根据风速的大小不同，调节发电机转矩进而调节发电机的转速，带动风轮达到期望的转速，最终获得最大的风能。

图 4.2 为变速变桨风力发电机组的转矩与转速关系图，从图中可以看出，在 AB 和 CD 区域内，发电机转速恒定，此时控制系统通过调节发电机转矩调节发电机维持在恒定转速。在 BC 区域，风力发电机组调节发电机转矩使得风机获得最佳叶尖速比。

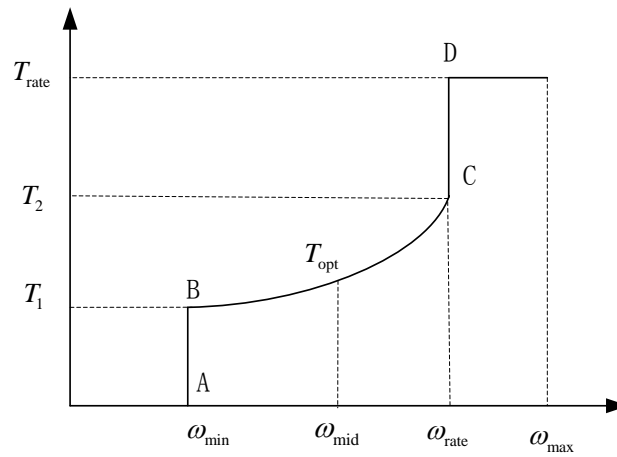


图 4.2 转矩-转速运行曲线图

### 4.1.1 状态反馈控制器设计

转矩控制的最终目标是最大化风能捕获，当风速低于额定风速时，转矩控制器通过调节发电机转矩使风轮达到期望转速，达到最佳叶尖速比，最终捕获最大风能。本文通过状态反馈进行了转矩控制器的设计，首先对风力发电机组模型进行了转换，使其转换为在平衡点稳定的问题，之后通过状态反馈方法设计控制器并利用李雅普诺夫函数确定控制器参数。

本章针对风力发电机组提出变速阶段控制方法：在额定风速以下，通过调整控制策略，即根据风速和风轮转速情况寻找最大功率点，控制发电机转矩，使转速跟随风速变化做快速调整，以达到最佳叶尖速比，最大限度利用风能转换效率。转矩控制方案如图 4.3 所示：

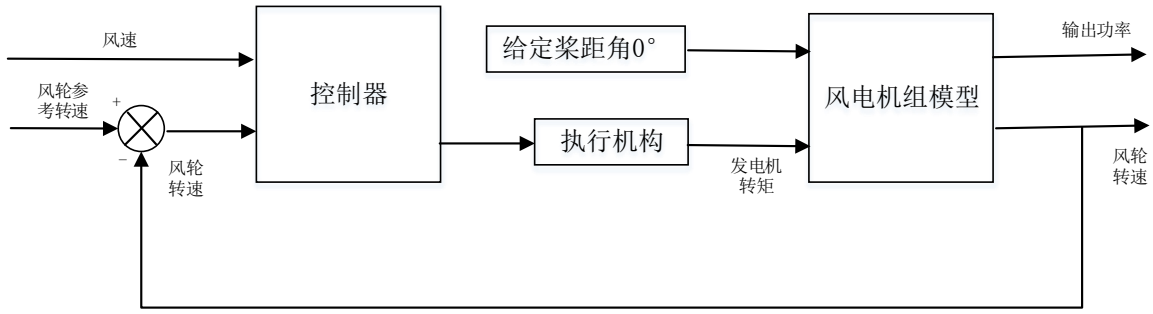


图 4.3 低风速转矩控制方案

风力发电机组数学模型表达形式如公式(4.1)所示：

$$\begin{cases} \dot{\theta}_r = \omega_r \\ \dot{\omega}_r = \frac{1}{J_r} (-K_t \omega_r - B \theta_r + \mu T_a - \bar{T}_e) \\ \dot{\bar{T}}_e = -\frac{1}{\tau} \bar{T}_e + \frac{1}{\tau} T_e \end{cases} \quad (4.1)$$

式中， $\theta_r$  为转子转动角度， $\omega_r$  为风轮转动角速度， $J_r$  是总的机械惯性， $K_t$  和  $B$  分别为粘滞摩擦系数和刚度系数， $T_a$  为气动转矩， $\mu$  为利用系数。 $T_e$  为发电机电磁转矩， $\tau = 0.01$ 。为简化计算， $T_a$  简化为：

$$T_a \approx \frac{1}{2} \rho \pi R^3 (-0.0026 \omega_r^2 R^2 + 0.0372 \omega_r R v - 0.0678 v^2) \quad (4.2)$$

其中， $\rho$  为空气密度， $R$  为风轮半径。原问题为控制风轮转速达到期望转速，从而最大限度的捕获风能。为设计状态反馈控制器，首先通过状态转换，将原问题转换成系统在原点稳定的问题。状态转换方程如(4.3)所示：

$$\begin{cases} e_r = \omega_r^* - \omega_r \\ e_{T_e} = T_e - \bar{T}_e \end{cases} \quad (4.3)$$

其中， $e_r$  为风轮期望转速与实际转速之差， $\omega_r^*$  为风轮期望转速，且  $\omega_r^* = \frac{\lambda^* v}{R}$ ， $\dot{\omega}_r^* = \frac{\lambda^* \dot{v}}{R}$ ， $\lambda^*$  最佳叶尖速比， $\omega_r$  为风轮转速。 $e_{T_e}$  为转矩偏差， $T_e$  为发电机电磁转矩， $\bar{T}_e$  为转矩执行装置，则状态转换后方程为：

$$\begin{cases} \dot{\theta}_r = \omega_r \\ \dot{e}_r = \dot{\omega}_r^* - \frac{1}{J_r} (-K(\omega_r^* - e_r) - B \theta_r - (T_e - e_{T_e})) \\ \quad + \frac{1}{2} \mu \rho \pi R^3 (-0.0026 (\omega_r^* - e_r)^2 R^2 \\ \quad + 0.0372 (\omega_r^* - e_r) R v - 0.0678 v^2) \\ \dot{e}_{T_e} = \dot{T}_e - \left( -\frac{1}{\tau} (T_e - e_{T_e}) + \frac{1}{\tau} T_e \right) \end{cases} \quad (4.4)$$

整理，得：

$$\begin{cases} \dot{\theta}_r = \omega_r \\ \dot{e}_r = F(e_r, v, \mu) + \frac{B}{J_r}\theta_r + \frac{1}{J_r}e_{T_e} + \frac{1}{J_r}T_e \\ \dot{e}_{T_e} = -\frac{1}{\tau}e_{T_e} + \dot{T}_e \end{cases} \quad (4.5)$$

其中:

$$F(e_r, v, \mu) = \dot{\omega}_r^* - \frac{1}{J_r}(-K\omega_r^* + \frac{1}{2}\mu\rho\pi R^3(-0.0026(\omega_r^* - e_r)^2 R^2 + 0.0372\omega_r^* Rv - 0.0678V^2))$$

设计控制器:

$$T_e = [K_1 \quad K_2 \quad K_3] \begin{bmatrix} \theta_r \\ e_r \\ e_{T_e} \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

其中,  $K_1, K_2, K_3$  为控制器参数, 将(4.6)代入(4.5)中, 得:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_r = \omega_r \\ \dot{e}_r = F(e_r, V, \mu) + \frac{B}{J_r}\theta_r + \frac{1}{J_r}e_{T_e} + \frac{K_1}{J_r}\theta_r + \frac{K_2}{J_r}e_r + \frac{K_3}{J_r}e_{T_e} \\ \dot{e}_{T_e} = -\frac{1}{\tau}e_{T_e} + \dot{T}_e \end{cases} \quad (4.7)$$

在工程应用中, 转矩控制器的控制目标为控制风轮转速达到期望转速, 从而得到最佳叶尖速比, 进而获得最大风能捕获。故在工程应用中, 当风轮转速偏差  $e_r$  等于 0 时, 便可认为是工程意义上的稳定。

为保证工程意义上稳定, 可选取  $K_1 = -B$  和  $K_3 = -J_r$ , 则:

$$\dot{e}_r = F(e_r, V, \mu) + \frac{K_2}{J_r}e_r$$

选取李雅普诺夫函数  $\bar{V} = \frac{1}{2}e_r^2$ , 则:

$$\dot{\bar{V}} = e_r \dot{e}_r = e_r \left[ F(e_r, V, \mu) + \frac{K_2}{J_r}e_r \right] \quad (4.8)$$

为使系统稳定, 只需满足  $\dot{\bar{V}} < 0$ 。已知风轮半径为 38.5m, 额定转速为 2rad/s, 额定风速为 12m/s, 额定功率为 1.5MW, 切入风速为 3m/s, 切出风速为 25m/s。选取  $-0.5 < e_r < 0.5$ ,  $3 < v < 15$ ,  $\dot{\omega}_r^* = \frac{\lambda^* \dot{v}}{R}$ ,  $-2 < \dot{v} < 2$ ,  $\lambda^* = 7.9$ 。当  $K_2 = -20000000$  时, 满足  $\dot{\bar{V}} < 0$ , 故设计控制器为:

$$T_e = -0.001\theta_r - 20000000e_r - \bar{T}_e \quad (4.9)$$

#### 4.1.2 系统稳定性证明及稳定域估计

稳定性证明: 将公式(4.9)代入公式(4.5)中, 得:

$$\begin{cases} \dot{\theta}_r = \omega_r \\ \dot{e}_r = F(e_r, V, \mu) - \frac{20000}{J_r} e_r \\ \dot{e}_{T_e} = -\frac{1}{\tau} e_{T_e} + \dot{T}_e \end{cases} \quad (4.10)$$

选取李雅普诺夫函数  $\bar{V} = \frac{1}{2} e_r^2$ ，由(4.8)可知  $\dot{\bar{V}} < 0$ ，即该系统在工程意义上稳定。

在式(4.8)中，给定  $K_1 = -0.001$ ， $K_2 = -20000000$ ， $K_3 = -1$ ， $3 < v < 15$ ， $\dot{\omega}_r^* = \frac{\lambda^* \dot{v}}{R}$ ， $-2 < \dot{v} < 2$ ， $\lambda^* = 6.3$ ，为保证  $\dot{\bar{V}} < 0$ ，则  $e_r$  应满足一定条件，经验证在  $-2 < e_r < 3$  的条件下， $\dot{\bar{V}} < 0$ 。又  $\omega_r = \omega_r^* - e_r$ ， $\omega_r^* = \lambda v / R$  则：

$$0 \leq \omega_r < 5 \quad (4.11)$$

故在该控制器下的风力发电机组运行的稳定域为  $0 \leq \omega_r < 5$ ，在此范围内，风力发电机组可正常运行。

### 4.1.3 系统稳定域分析

公式(4.11)给出了变速变桨风力发电机组在转矩控制器下作用下的稳定域，该稳定域应主要由风力发电机组自身系统特性决定，控制器对稳定域的范围影响较小。故本节利用加性分解原理设计一个转矩控制器，之后通过此控制器的运行状态验证之前提出的稳定域估值的正确性。

对于系统：

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{J_r} (-K_t \omega_r - B \theta_r + \mu T_a - \bar{T}_e) \quad (4.12)$$

利用加性分解原理<sup>[67,68]</sup>，可将式(4.12)转换为：

$$\begin{aligned} \dot{\omega}_r &= \frac{-K_t}{J_r} \omega_r + \frac{1}{J_r} (-B \theta_r + \mu T_a - \bar{T}_e) \\ &= \left( \frac{-K_t}{J_r} + \frac{K_g}{J_r} \right) \omega_r + \frac{1}{J_r} (-B \theta_r + \mu T_a - \bar{T}_e - K_g \omega_r) \end{aligned} \quad (4.13)$$

式中， $k_g$  为控制参数。令  $a_1 = J_r$ ， $a_3 = K_t$ ， $a_g = -\frac{K_t}{J_r}$ ， $b_g = \frac{1}{J_r}$ ，控制量  $u_g = -\bar{T}_e$ 。将式(4.13)作为原始系统，根据加性分解原理，可将式(4.13)分解成主系统(4.14)和辅系统(4.15)两个子系统。

$$\dot{\omega}_{r,p} = (a_g + b_g k_g) \omega_{r,p} + b_g u_g \quad (4.14)$$

$$\dot{\omega}_{r,s} = (a_g + b_g k_g) \omega_{r,s} + b_g (-B \theta_r + \mu T_a - k_g \omega_r) \quad (4.15)$$

其中， $\dot{\omega}_r = \omega_{r,p} + \omega_{r,s}$ ，定义传递函数：

$$G(s) = \frac{b_g}{s - (a_g + b_g k_g)} \quad (4.16)$$



设计控制器为:

$$u_g = \frac{1}{\alpha_g s + 1} G^{-1}(s) (r - y + G u_g) \quad (4.17)$$

其中,  $\alpha_g > 0$ ,  $r$  为期望风轮转速,  $y$  为实际风轮转速, 将式(4.17)化简得:

$$u_g = \frac{a_1}{\alpha_g} e + \frac{a_3 - k_g}{\alpha_g} \int e dt \quad (4.18)$$

式中,  $e$  为期望转速与实际转速之差。

在风速为 7m/s 时, 使用式(4.18)的控制器, 风轮转速曲线如图 4.4 所示:

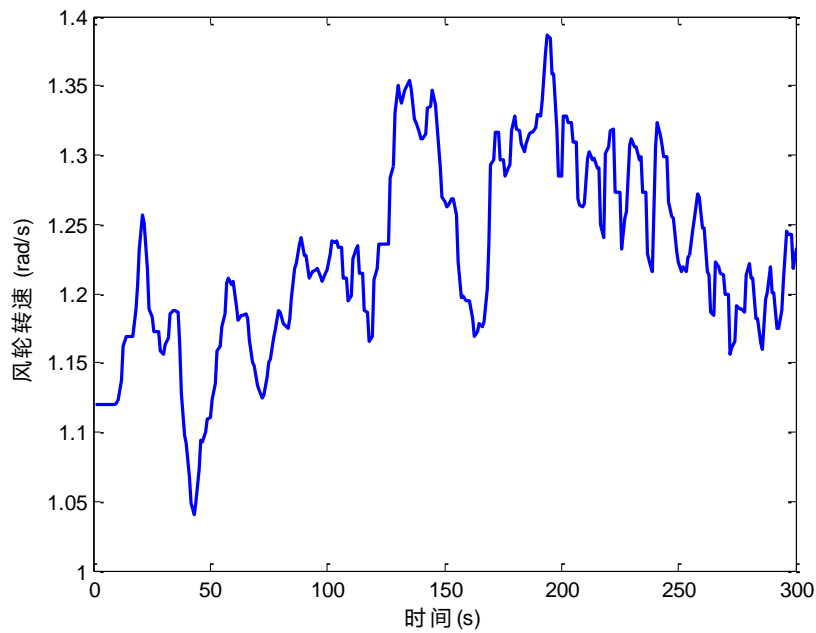


图 4.4 风轮转速

从图 4.4 中可以看出, 风轮转速平均值约为 1.2rad/s, 运行范围在 1rad/s~1.4rad/s 之间, 在稳定域中运行, 说明所估计的稳定域不受控制器限制, 对风电机组安全运行具有一定指导意义。

## 4.2 系统仿真结果

在风力发电机组整体控制中, 所测的发电机转速信号经过传感器传递给主控系统, 主控系统输出桨距角指令及转矩指令分别给变桨执行机构和发电机实现调节桨距角和转矩的目的, 达到相应工况的控制目标。系统仿真框图如图 4.5 所示。

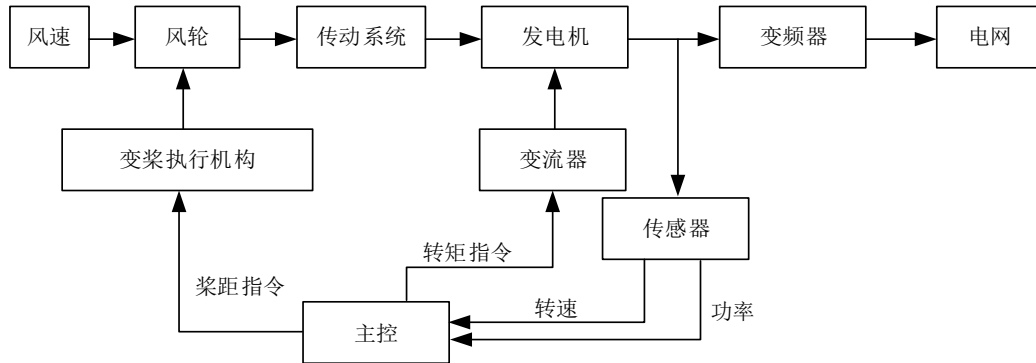


图 4.5 系统仿真结构图

本文选择额定功率为 1.5MW 风力发电机组为研究对象，风力发电机组相关参数为：额定风速为 11 m/s，风轮额定转速为 2 rad/s，风轮半径为 38.5 m，风轮转动惯量  $J_r$  为  $3.28 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ，风轮阻尼系数  $K_r$  为  $270.36 \text{ N} \cdot \text{m}/\text{rad}/\text{s}$ ，齿轮箱齿速比  $n_g$  为 75.76，最大风能利用系数  $C_{p\max}$  为 0.436，最佳叶尖速比  $\lambda_{\text{opt}}$  为 6.3，仿真时间设置为 300s。其中转矩控制器和变桨控制器内部设置简单的逻辑切换装置，保证不同的风况下相应的控制环起作用。整体仿真平台如图 4.4 所示。

表 4.1 1.5MW 风电机组参数

参数	值	单位
风轮半径	38.5	m
空气密度	1.308	Kg/m <sup>3</sup>
风轮转动惯量	$3.28 \times 10^6$	Kg m <sup>2</sup>
风轮额定转速	2	rad/s
风轮阻尼系数	270.36	N · m /rad/s
齿轮箱齿速比	75.76	—
最大风能利用系数	0.436	—
额定功率	$1.5 \times 10^6$	W

#### 4.2.1 不考虑损耗系数下仿真

在风速低于额定风速阶段，控制目标为输出功率最大化，此时控制系统会通过逻辑切换至转矩控制模块，通过设计的状态反馈控制器进行调节。本文分别在风速为 5m/s、7m/s 和 9m/s 三种风况下进行仿真，其仿真结果如图 4.6~图 4.10 所示：

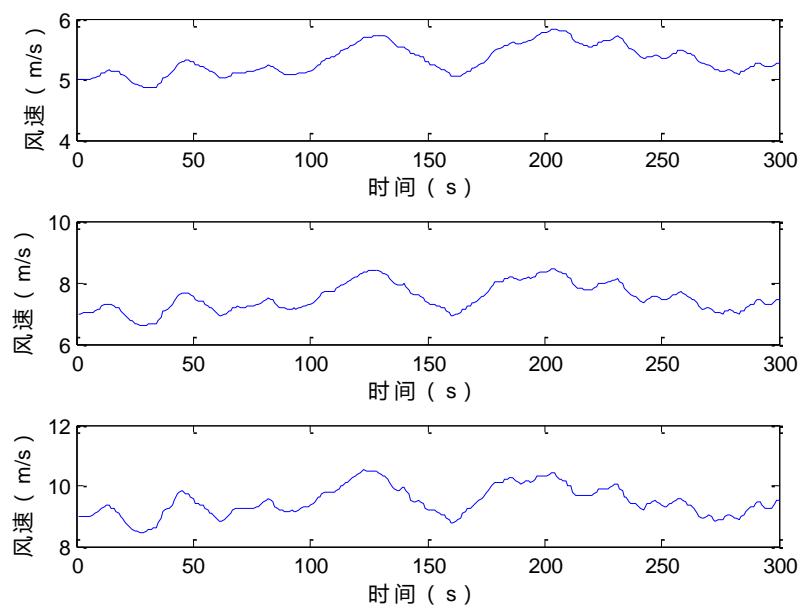


图 4.6 风速曲线图

从图 4.6 中可以看出, 平均风速分别为 5m/s、7m/s 和 9m/s, 其中平均风速为 5m/s 的情况中, 最大风速为 5.87m/s, 最小风速为 4.73m/s; 平均风速为 7m/s 的情况中, 最大风速为 8.31m/s, 最小风速为 6.44m/s; 平均风速为 9m/s 的情况中, 最大风速为 10.23m/s, 最小风速为 8.39m/s; 三种风速下误差都不超过 12%, 表明该风速仿真模块比较精确, 可以作为仿真系统输入。

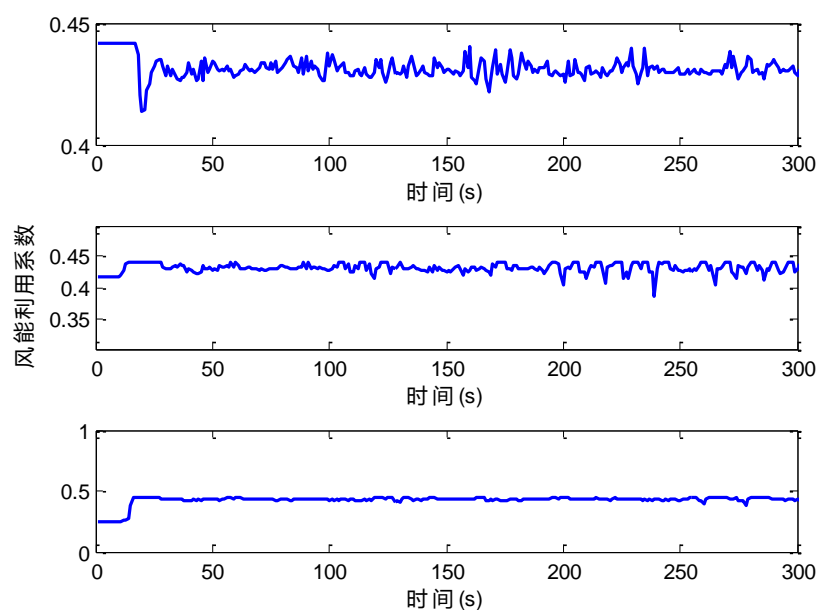


图 4.7 风能利用系数曲线图

图 4.7 中从上往下依次为 5m/s、7m/s 和 9m/s 下风能利用系数的仿真结果，从图中可以看出在三种风速下，风能利用系数都能稳定在 0.436，即都能到达并稳定在最佳风能利用系数上。在系统稳定后，风能利用系数波动值在 $[-0.02, 0.02]$ 之间，波动幅度较小，表明控制器达到了追踪最大功率的目标。

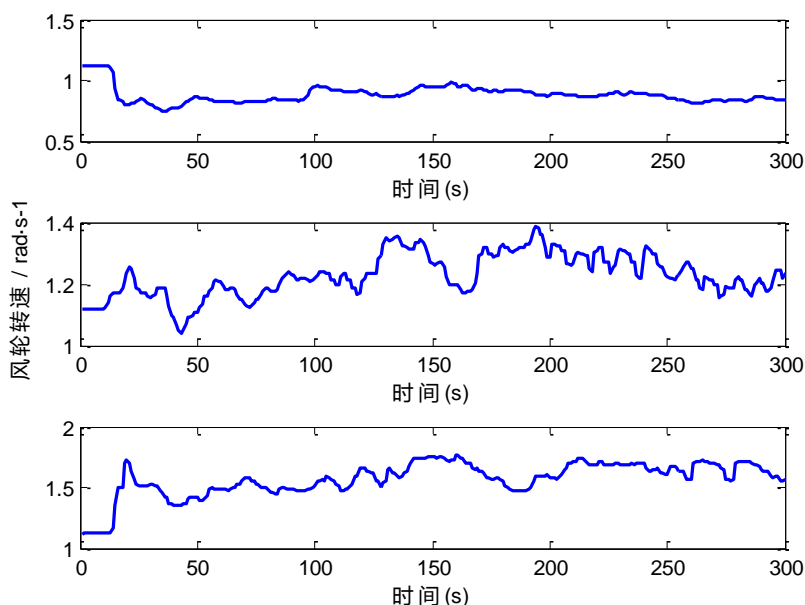


图 4.8 风轮转速曲线图

图 4.8 中从上往下依次为 5m/s、7m/s 和 9m/s 下风轮转速的仿真结果，从图中可以看出在风速为 5m/s 下，风轮转速平均值为 0.8rad/s；风速为 7m/s 下，风轮转速平均值为 1.2rad/s；风速为 9m/s 下，风轮转速平均值为 1.5rad/s。表明随着风速增大风轮转速也随着增大，

图 4.9 中从上往下依次为 5m/s、7m/s 和 9m/s 下发电机输出转矩的仿真结果，从图中可以看出风速为 5m/s 下，发电机输出转矩平均值为 200000 N·m；风速为 7m/s 下，发电机输出转矩平均值为 500000 N·m；风速为 9m/s 下，发电机输出转矩平均值为 800000 N·m。随着风速增加，发电机输出转矩也随着增加，风力发电机组通过控制发电机转矩调整发电机的转速，使风轮转速达到期望转速，最大限度的捕获风能。

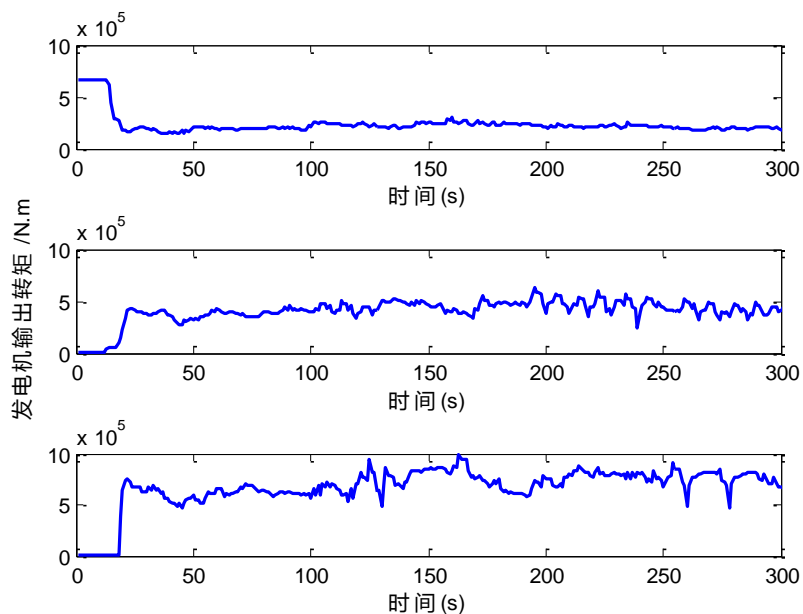


图 4.9 发电机转矩曲线图

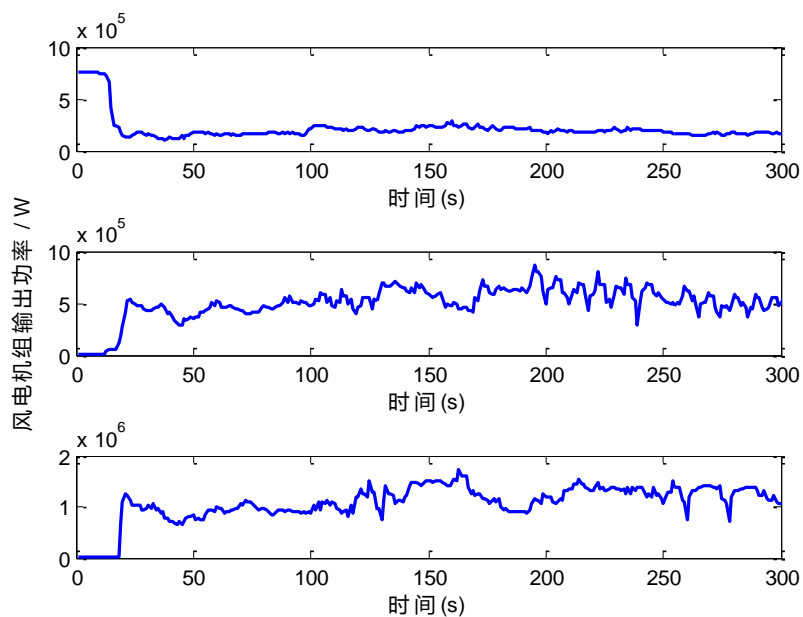


图 4.10 风力发电机组输出功率曲线图

图 4.10 中从上往下依次为 5m/s、7m/s 和 9m/s 下发电机输出功率的仿真结果，从图中可以看出风速为 5m/s 下，发电机输出功率平均值为 200000W；风速为 7m/s 下，发电机输出功率平均值为 700000W；风速为 9m/s 下，发电机输出功率平均值为 1100000W。随着风速增加，发电机输出功率也随着增加，风力发电机组通过控制发

电机转矩调整发电机的转速，进而调节发电机的输出功率，使输出功率最大化。

#### 4.2.2 考虑损耗系数下仿真

风电机组长期运行会造成一定地损耗，导致风能利用率降低，此时风电机组模型会发生一定地变化，这对控制器的控制效果会造成一定程度的影响，严重地可能会导致控制系统无法工作。控制器能否在风机损耗状况下保持一定地控制效果，可作为风电机组控制器设计的一项重要指标。

为考虑风机损耗对控制器的影响，本文引入风机损耗系数 $\mu$ ，在风机出厂时，风电机组无损耗，即 $\mu = 1$ 。随着风电机组运行时间增加，风机损耗系数也会逐渐减小，风能利用系数也会减小，风能利用系数 $C_p$ 与风机损耗系数 $\mu$ 的关系为：

$$C_p = \mu C_p(\lambda, \beta) \quad (4.19)$$

风电机组模型变为：

$$J_r \dot{\omega}_r = (-K_t \omega_r - B \theta_r + \mu T_a - \bar{T}_e) \quad (4.20)$$

其中 $\theta_r$ 为转子转动角度， $\omega_r$ 为风轮转动角速度， $J_r$ 是总的机械惯性， $K_t$ 为粘滞摩擦系数， $B$ 为刚度系数， $T_a$ 为气动转矩， $\mu$ 为利用系数。 $T_e$ 为发电机电磁转矩， $\tau$ 为时间常数。

本文在 $\mu = 0.8$ 和 $\mu = 0.6$ 这两个损耗系数下，分别对低风速下风电机组进行仿真，其中低风速选择风速为5m/s、7m/s和9m/s，风电机组使用1.5MW风机。仿真分组情况如表4.2所示：

表 4.2 仿真分组

风机损耗系数	风速
0.8	5m/s
	7m/s
	9m/s
0.6	5m/s
	7m/s
	9m/s

在风速低于额定风速阶段，通过逻辑切换激活低风速控制环，通过风轮的实际转速与期望转速误差进行控制调节，输出相应的给定转矩，使输出功率最大化。仿真结果如下所示，分别对应风速曲线、风能利用系数曲线、风轮转速曲线、发电机转矩曲线和风力发电机组功率输出曲线。耗系数为0.8时，系统仿真结果为：

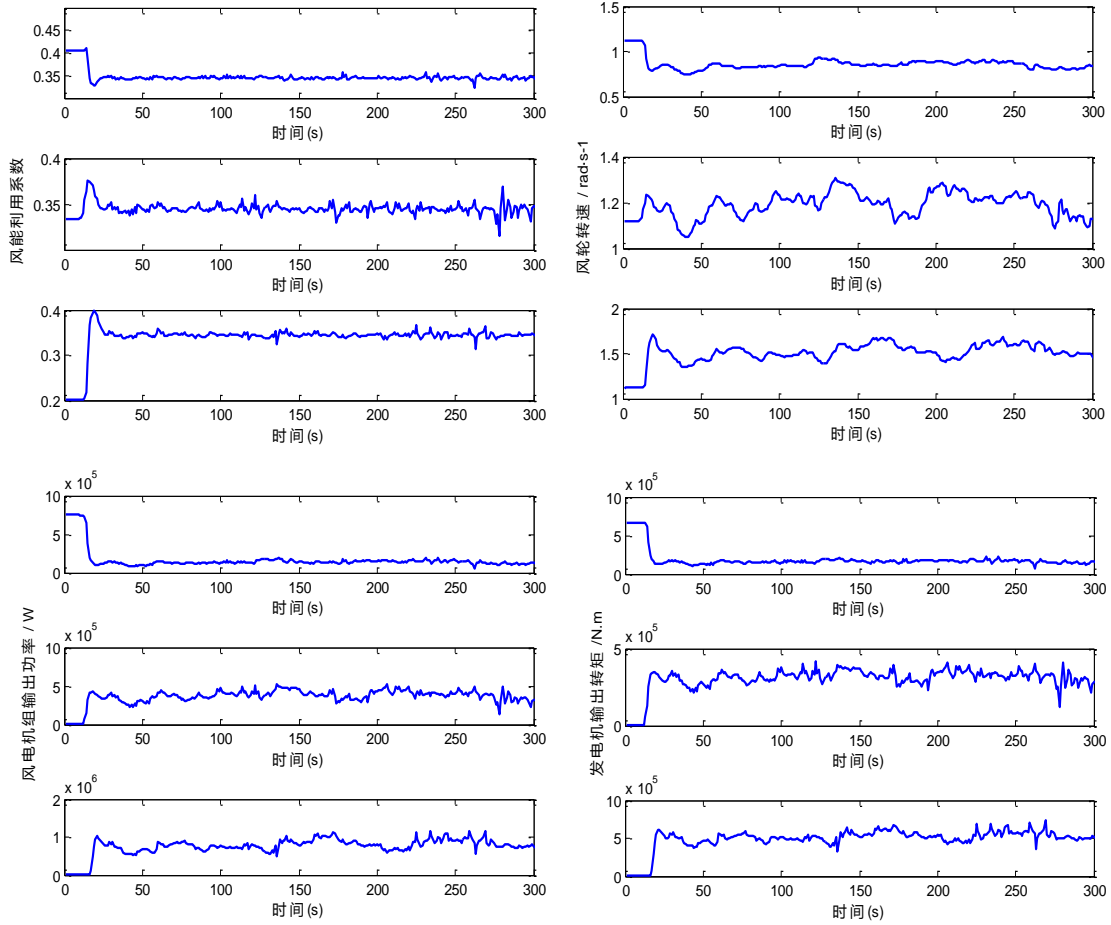


图 4.11 低风速下损耗系数为 0.8 时系统仿真

图 4.11 分别为在风速为 5m/s、7m/s 和 9m/s 状况下风能利用系数曲线、风轮转速曲线、发电机转矩曲线和风力发电机组功率输出曲线。从图中可以看出，在三种风速下风能利用系数稳定在 0.35，当风机损耗系数为 1 时，最佳风能利用系数为 0.436，在风机损耗系数为 0.8 时风能利用系数约为无损耗时的 0.8 倍；在风速为 5m/s 下，风轮转速平均值为 0.8rad/s；风速为 7m/s 下，风轮转速平均值为 1.2rad/s；风速为 9m/s 下，风轮转速平均值为 1.5rad/s。相较于无损耗状态，在三种风速下损耗系数为 0.8 时风轮转速与无损耗状态下风轮转速相同，表明在损耗系数为 0.8 时，该控制器仍可控制风轮达到最佳转速。风速为 5m/s 下，发电机输出功率平均值为 160000W；风速为 7m/s 下，发电机输出功率平均值为 500000W；风速为 9m/s 下，发电机输出功率平均值为 900000W。相较于无损耗状态，由于风能利用系数减小，风电机组输出功率也随之减小，约为无损耗状态的 0.8 倍，输出功率仍然达到了在损耗系数为 0.8 时的最大功率。风速为 5m/s 下，发电机输出转矩平均值为 160000N·m；风速为 7m/s 下发电机输出转矩平均值为 400000 N·m；风速为 9m/s 下发电机输出转矩平均值为 600000

$\text{N} \cdot \text{m}$ 。相较于无损耗状态，发电机输出转矩约为无损耗状态的 0.8 倍。损耗系数为 0.6 时，系统仿真结果为：

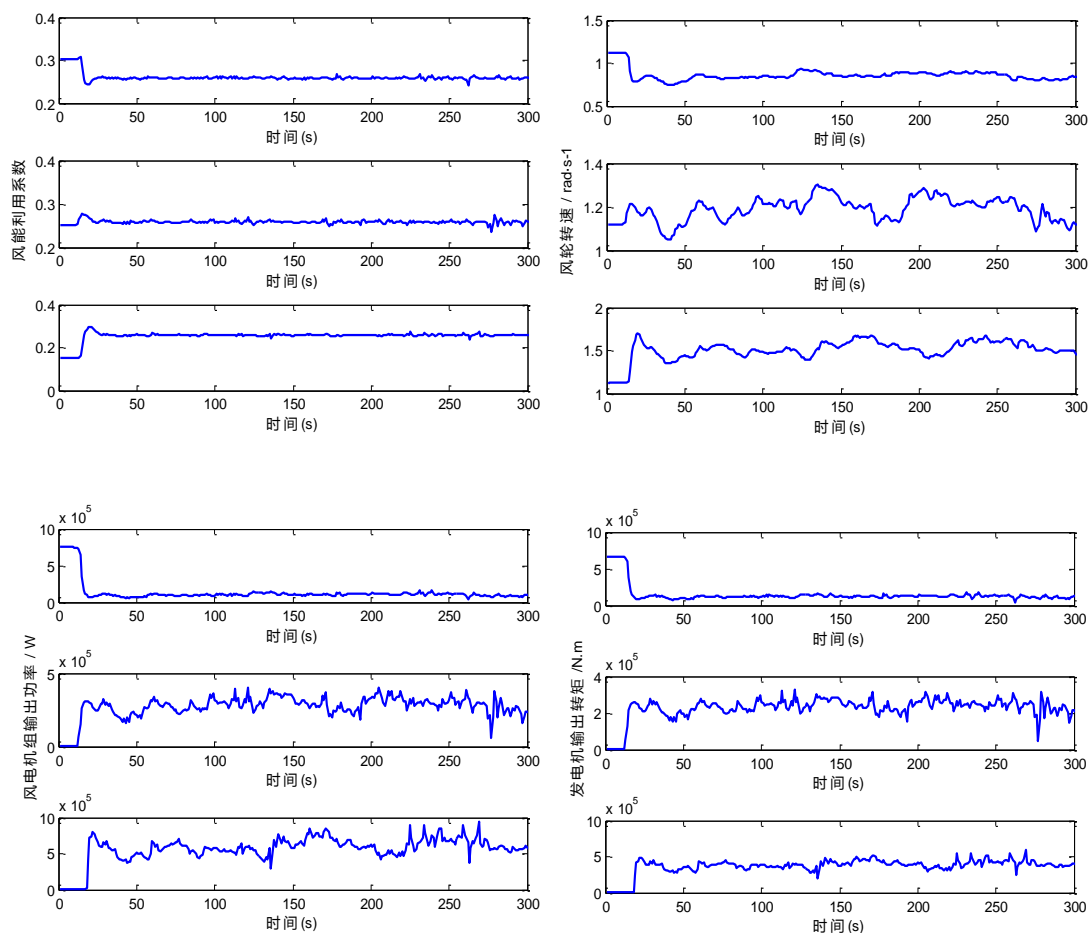


图 4.12 低风速下损耗系数为 0.6 时系统仿真

图 4.12 分别为在风速为 5m/s、7m/s 和 9m/s 状况下风能利用系数曲线、风轮转速曲线、发电机转矩曲线和风力发电机组功率输出曲线。从图中可以看出，在三种风速下风能利用系数稳定在 0.26，当风机损耗系数为 1 时，最佳风能利用系数为 0.436，在风机损耗系数为 0.6 时风能利用系数约为无损耗时的 0.6 倍；在风速为 5m/s 下，风轮转速平均值为 0.8rad/s；风速为 7m/s 下，风轮转速平均值为 1.2rad/s；风速为 9m/s 下，风轮转速平均值为 1.5rad/s。相较于无损耗状态和损耗系数为 0.8 状态，在三种风速下损耗系数为 0.6 时风轮转速与其他两种状态风轮转速相同，表明在损耗系数为 0.6 时，该控制器仍可控制风轮达到最佳转速。风速为 5m/s 下，发电机输出功率平均值为 120000W；风速为 7m/s 下，发电机输出功率平均值为 350000W；风速为 9m/s 下，发电机输出功率平均值为 700000W。相较于无损耗状态，由于风能利用系数减小，风电机组输出功率也随之减小，约为无损耗状态的 0.6 倍，输出功率仍然达到了在损耗



系数为 0.6 时的最大功率。风速为 5m/s 下，发电机输出转矩平均值为 120000 N·m；风速为 7m/s 下，发电机输出转矩平均值为 200000 N·m；风速为 9m/s 下，发电机输出转矩平均值为 400000 N·m。相较于无损耗状态，发电机输出转矩约为无损耗状态的 0.6 倍。

### 4.3 本章小结

本章利用状态反馈方法对风力发电机组系统设计了一个转矩控制器，之后利用李雅普诺夫方法证明了该控制器在工程意义上的稳定性，并估算出了风力发电机组系统在该控制器下的稳定域，最后在风力发电机组控制仿真平台上进行了数值仿真，仿真结果表明该控制器取得了良好的控制效果，且在风机损耗状态下仍能取得较好地控制效果，该方法设计简单，具有一定的实用前景。稳定域估计值的得出，对指导风场维护人员维护风机，保障风机安全运行提供了一定的指导。

## 第五章 风电机组变桨控制器

上世纪 90 年代，变桨距风力发电机组进入风力发电市场，采用变桨距控制使得风力发电机组的功率输出特性得到了显著地提高。目前，变速变桨风力发电机组已经成为并网型风力发电机组发展的主流机型，将变速技术与变桨技术集于一体的变速变桨控制技术是目前最优化的控制技术，在风速高于额定风速阶段，通过变桨控制器调节桨距角，保证风电机组输出功率稳定。本章从工程应用角度出发，基于状态反馈对风力发电机组设计了变桨控制器，并通过理论推导证明该系统的稳定性，之后基于该控制器对风力发电机组的稳定域进行了分析，最后通过仿真验证所设计的控制器能够达到功率输出最优的控制目标。

### 5.1 变桨控制器设计

当风速大于额定风速时，控制目标是使发电机输出功率稳定，此时变桨机构开始工作，调节桨距角使得风能利用系数减小，从而丢弃一部分风能，使得发电机输出功率可以稳定在额定功率附近。由于风电机组模型的复杂性使得变桨控制技术具有较高的难度。

本章通过状态反馈对风电机组模型进行了线性化，将控制问题转化为在期望转速下系统稳定的问题，之后利用线性系统的设计方法设计了控制器，使得输出功率稳定在额定功率。本文的控制流程如图 5.1 所示：

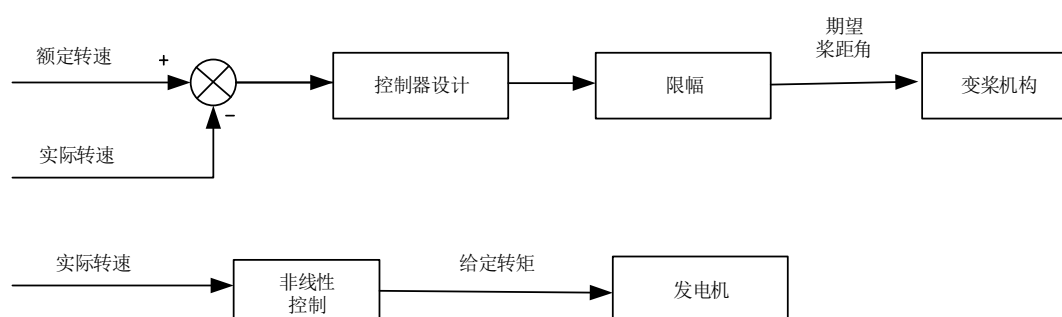


图 5.1 风力发电机组变桨控制方案

### 5.1.1 状态反馈控制器设计

变桨控制的最终目标是输出稳定的功率，当风速超过额定风速时，变桨控制器通过调节桨距角的大小调节风电机组输出功率，本文通过状态反馈进行了变桨控制器的设计，由于风力发电机组具有高度非线性，为实现控制器的设计，首先在工作点对风力发电机组模型进行了线性化，之后通过状态反馈方法设计控制器并利用线性控制理论确定控制器参数。

通过变桨控制器控制风机桨距角，使得发电输出功率稳定在额定值附近，有效提高了发电质量。高风速变桨控制方案如图 5.2 所示：

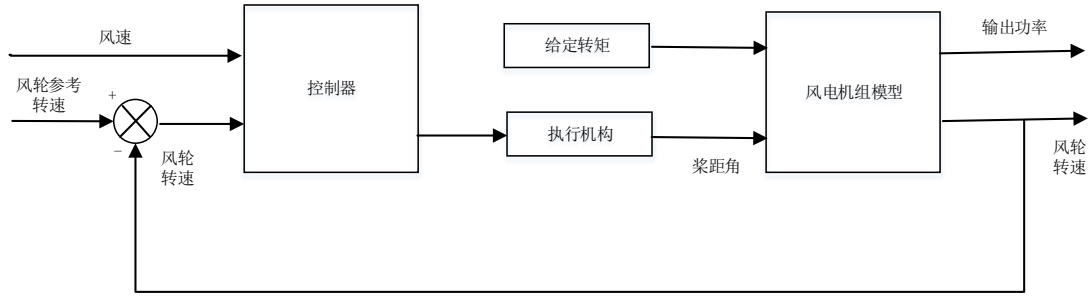


图 5.2 高风速变桨控制方案

当风速大于额定风速时，风力发电机组主要通过控制桨距角来调节输出功率，使得输出功率稳定在额定功率，故控制量为桨距角 $\beta$ ，为简化模型可将发电机的电磁转矩 $T_e$ 设置为定值。桨距角的执行机构一般采用一阶惯性环节：

$$\dot{\beta} = \frac{1}{T_\beta}(\beta_r - \beta) \quad (5.1)$$

其中， $T_\beta$ 为时间常数。

风力发电机组模型可表示如公式(5.2)所示：

$$\begin{cases} \dot{\beta} = \frac{1}{T_\beta}(\beta_r - \beta) \\ \dot{\omega}_r = \frac{1}{J_r}(T_a - T_e) \\ \dot{\omega}_{rm} = \frac{1}{T_w}(\omega_r - \omega_{rm}) \end{cases} \quad (5.2)$$

其中， $T_w$ 为时间常数。由于 $T_a$ 具有高度非线性，为设计控制器，需将其进行线性化，将(5.2)改写为 $\dot{X} = f(x) + g(X)u$ 的形式，则可表示为：

$$f(X) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_\beta}\beta \\ \frac{1}{J_r}(T_a - T_e) \\ \frac{1}{T_w}(\omega_r - \omega_{rm}) \end{bmatrix} \quad (5.3)$$

$$g(X) = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_\beta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5.4)$$

$$u = \beta_r \quad (5.5)$$

选定输出函数 $h(X)$ 为 $h(x) = \omega_{rm} - \omega_{rm}^*$ ，其中 $\omega_{rm}^*$ 为风电机组的额定转速，则进行坐标变换和状态反馈得：

$$\begin{aligned} z_1 &= h(X) = \omega_{rm}^* - \omega_{rm} = x_3^* - x_3 \\ z_2 &= L_f h(X) = -\frac{1}{T_w}(\omega_r - \omega_{rm}) = -\frac{1}{T_w}(x_2 - x_3) \\ z_3 &= L_f^2 h(X) = -\frac{1}{J_r T_w}(T_a - T_e) + \frac{1}{T_w^2}(x_2 - x_3) \end{aligned} \quad (5.6)$$

令

$$u = -\frac{L_f^3 h(X)}{L_g L_f^2 h(X)} + \frac{1}{L_g L_f^2 h(X)} v \quad (5.7)$$

则该系统转化为：

$$\dot{Z} = AZ + Bv \quad (5.8)$$

其中： $A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ ， $B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$ 。可以看出，只需求出 $v$ ，便可以得到控制量

$u$ 。所以，原系统的控制问题转化为一个线性系统的控制器设计问题。

对于该系统，可设计控制量 $V = -K^*Z$ ，其中 $K^*$ 为最优反馈增益矩阵，且有 $K^* = R^{-1}B^T P^*$ ， $R$ 为权系数， $P^*$ 为黎卡提矩阵方程：

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (5.9)$$

选取 $R = I_3$ ， $Q = \begin{bmatrix} 500 & 0 & 0 \\ 0 & 500 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ ，则由式(5.9)可求出 $K$ 的值为

$$K = [22.3607 \quad 28.9921 \quad 7.6147] \quad (5.10)$$

故控制器可设计为：

$$\begin{aligned}
 u = & -\frac{L_f^3 h(X)}{L_g L_f^2 h(X)} + \frac{1}{L_g L_f^2 h(X)} (-22.3607(\omega_{rm}^* - \omega_{rm}) \\
 & - 28.9921(-\frac{1}{T_w}(\omega_r - \omega_{rm})) - 7.6147(-\frac{1}{J_r T_w}(T_a - T_e) \\
 & + \frac{1}{T_a^2}(\omega_r - \omega_{rm})))
 \end{aligned} \quad (5.11)$$

### 5.1.2 系统稳定性证明及稳定域估计

稳定性证明：  $A - BK = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -22.3607 & -28.9921 & -7.6147 \end{bmatrix}$ ，  $A - BK$  的特征值为  $\begin{bmatrix} -0.999 \\ -3.3078 + 3.3825i \\ -3.3078 - 3.3825i \end{bmatrix}$ ，特征值都在复平面的左半平面上，即满足 Hurwitz 矩阵，故系统在原点是渐近稳定的。

稳定域分析：由于  $A - BK$  是 Hurwitz 的，所以该系统的李雅普诺夫函数可以表示为：

$$V(z) = z^T P z \quad (5.12)$$

其中  $P(A - BK) + (A - BK)^T P = -I$ ，可解得正定矩阵

$$P = \begin{bmatrix} 2.4775 & 1.8754 & 0.0224 \\ 1.8754 & 2.8171 & 0.0819 \\ 0.0224 & 0.0819 & 0.0764 \end{bmatrix}$$

只需求出  $z_1$  的范围，满足  $\dot{V}(z) < 0$ ，则  $z_1$  的范围即为该系统的稳定域。经验证在  $-1.5 < z_1 < 2$  的条件下， $\dot{V}(z) < 0$ 。因为  $z_1 = h(X) = \omega_{rm}^* - \omega_{rm}$ ， $\omega_{rm}^* = 2$ ，故  $0 < \omega_{rm} < 3.5$ 。故在该控制器下的风力发电机组运行的稳定域为  $0 < \omega_{rm} < 3.5$ ，在此范围内，风力发电机组可正常运行。

### 5.1.3 系统稳定域分析

上节给出了变速变桨风力发电机组在转矩控制器下作用下的稳定域，该稳定域应主要由风力发电机组自身系统特性决定，控制器对稳定域的范围影响较小。故本节利用加性分解原理设计一个变桨控制器，之后通过此控制器的运行状态验证之前提出的稳定域估值的正确性。

对于系统：

$$\dot{\omega}_r = \frac{1}{J_r} (-K_t \omega_r - B \theta_r + \mu T_a - \bar{T}_e) \quad (5.13)$$

利用加性分解原理，可将式(5.13)转换为：

$$\begin{aligned}\dot{\omega}_r &= \frac{-K_t}{J_r}\omega_r + \frac{1}{J_r}(-B\theta_r + \mu T_a - \bar{T}_e) \\ &= \left(\frac{-K_t}{J_r} + \frac{K_g}{J_r}\right)\omega_r + \frac{1}{J_r}(-B\theta_r + \mu T_a - \bar{T}_e - K_g\omega_r)\end{aligned}\quad (5.14)$$

式中， $k_\beta$  为控制参数。令  $a_1 = J_r$ ， $a_3 = K_t$ ， $a_\beta = -\frac{K_t}{J_r}$ ， $b_\beta = \frac{1}{J_r}$ ，控制量  $u_\beta = \beta$ 。将式(5.14)作为原始系统，根据加性分解原理，可将式(5.14)分解成主系统(5.15)和辅系统(5.16)两个子系统。

$$\dot{\omega}_{r,p} = (a_\beta + b_\beta k_\beta)\omega_{r,p} + b_\beta u_\beta \quad (5.15)$$

$$\dot{\omega}_{r,s} = (a_\beta + b_\beta k_\beta)\omega_{r,s} + b_\beta (-B\theta_r + \mu T_a - k_\beta \omega_r - \bar{T}_e - u_\beta) \quad (5.16)$$

其中， $\dot{\omega}_r = \omega_{r,p} + \omega_{r,s}$ ，定义传递函数：

$$G(s) = \frac{b_\beta}{s - (a_\beta + b_\beta k_\beta)} \quad (5.17)$$

设计控制器为：

$$u_\beta = \frac{1}{\alpha_g s + 1} G^{-1}(s) (r - y + G u_\beta) \quad (5.18)$$

其中， $\alpha_g > 0$ ， $r$  为期望风轮转速， $y$  为实际风轮转速，将式(5.18)化简得：

$$u_g = \frac{1}{\alpha_g b_\beta} e - \frac{a_\beta + b_\beta k_\beta}{\alpha_g b_\beta} \int e dt \quad (5.19)$$

式中， $e$  为期望转速与实际转速之差。

在风速为 16m/s 时，使用式(5.19)的控制器，风轮转速曲线如图 5.3 所示：

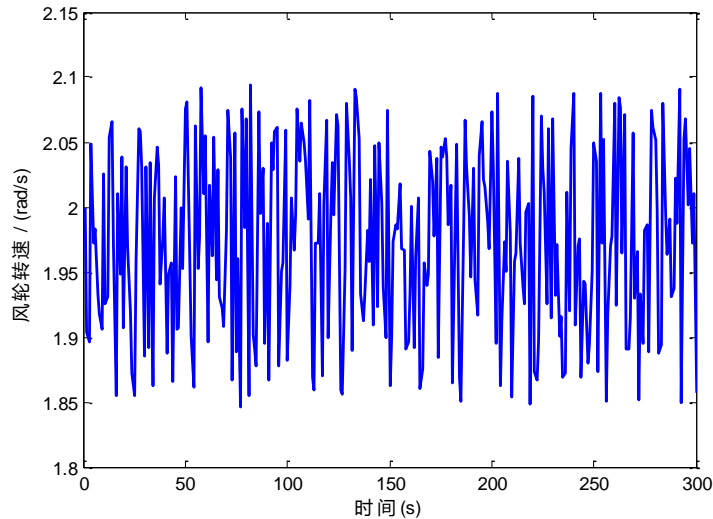


图 5.3 风轮转速

从图 5.3 中可以看出，在风速为 17m/s 时，风轮转速平均值为 2rad/s，运行范围在 1.8rad/s~2.1rad/s 之间，在稳定域范围内运行，可以看出所计算的稳定域的估值不

受控制器限制，可以用来指导风电机组的安全运行。

## 5.2 系统仿真结果

在风力发电机组整体控制中，所测的发电机转速信号经过传感器传递给主控系统，主控系统输出桨距角指令及转矩指令分别给变桨执行机构和发电机实现调节桨距角和转矩的目的，达到相应工况的控制目标。系统仿真框图如图 5.4 所示。

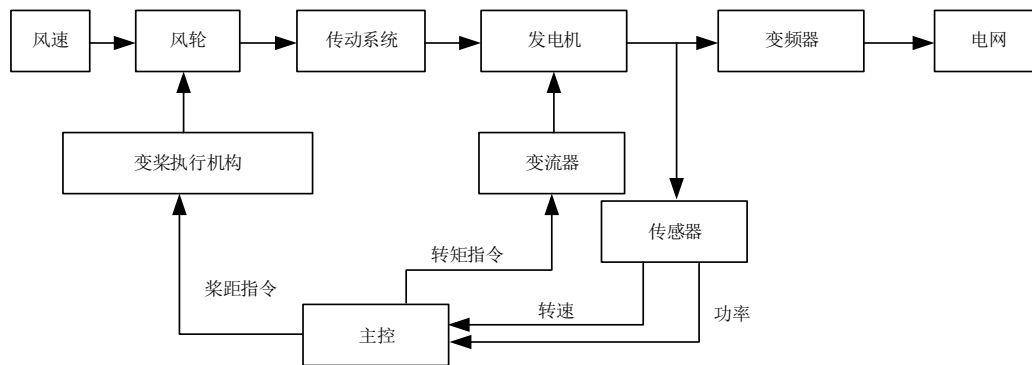


图 5.4 系统仿真结构图

本文选择额定功率为 1.5MW 风力发电机组为研究对象，风力发电机组相关参数为：额定风速为 11 m/s，风轮额定转速为 2 rad/s，风轮半径为 38.5 m，风轮转动惯量  $J_r$  为  $3.28 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ，风轮阻尼系数  $K_r$  为 270.36 N·m/rad/s，齿轮箱齿速比  $n_g$  为 75.76，最大风能利用系数  $C_{p\max}$  为 0.436，最佳叶尖速比  $\lambda_{\text{opt}}$  为 6，仿真时间设置为 300s。其中转矩控制器和变桨控制器内部设置简单的逻辑切换装置，保证不同的风况下相应的控制环起作用。风电机组参数如表 5.1 所示：

表 5.1 1.5MW 风电机组参数

参数	值	单位
风轮半径	38.5	m
空气密度	1.308	Kg/m <sup>3</sup>
风轮转动惯量	$3.28 \times 10^6$	Kg m <sup>2</sup>
风轮额定转速	2	rad/s
风轮阻尼系数	270.36	N · m /rad/s
齿轮箱齿速比	75.76	—
最大风能利用系数	0.436	—
额定功率	$1.5 \times 10^6$	W

### 5.2.1 不考虑损耗系数下仿真

在风速高于额定风速阶段，控制目标为输出功率稳定，此时控制系统会通过逻辑切换至变桨控制模块，通过设计的状态反馈控制器进行调节。本文分别在风速为 14m/s、16m/s 和 18m/s 三种风况下进行仿真，其仿真结果如图 5.5~图 5.9 所示：

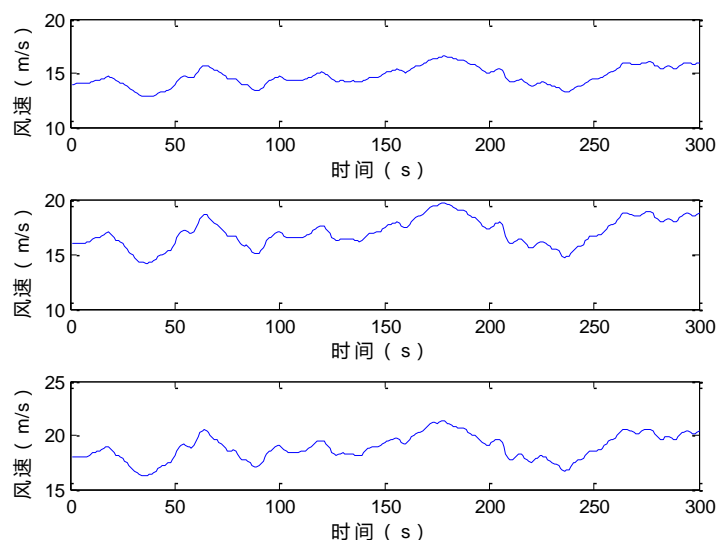


图 5.5 风速曲线图

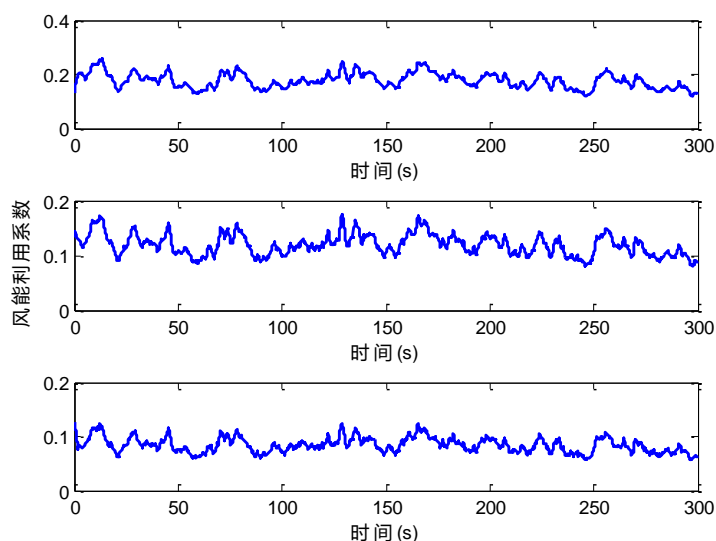


图 5.6 风能利用系数图

从图 5.5 中可以看出，平均风速分别为 14m/s、16m/s 和 18m/s，其中平均风速为 14m/s 的情况中，最大风速为 15.87m/s，最小风速为 12.83m/s；平均风速为 16m/s 的情况中，最大风速为 19.31m/s，最小风速为 14.44m/s；平均风速为 18m/s 的情况中，



最大风速为 21.23m/s，最小风速为 16.39m/s；三种风速下误差都不超过 14%，表明该风速仿真模块比较精确，可以作为仿真系统输入。

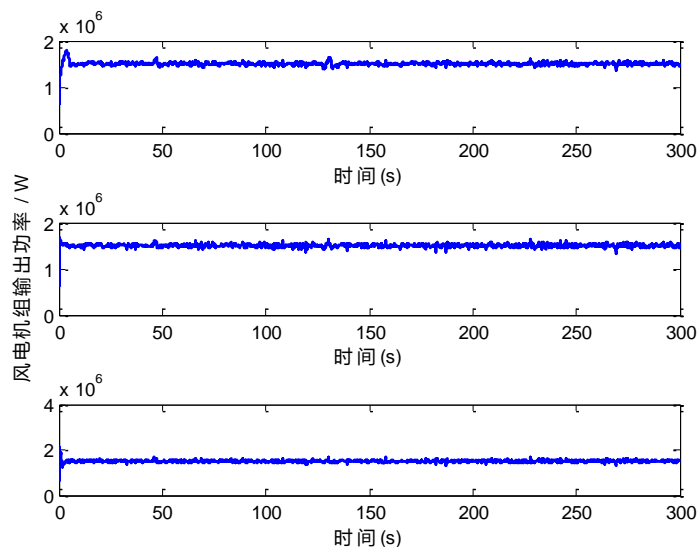


图 5.7 风电机组输出功率图

图 5.6 从上往下依次是风速为 14m/s、16m/s 和 18m/s 状况下风能利用系数仿真结果。从图中可以看出，风速为 14m/s 时，风能利用系数平均值为 0.2，最大值为 0.28，最小值为 0.17；风速为 16m/s 时，风能利用系数平均值为 0.15，最大值为 0.18，最小值为 0.09；风速为 18m/s 时，风能利用系数平均值为 0.1，最大值为 0.12，最小值为 0.07。随着风速增加，风能利用系数减小，说明风速越大，丢弃的风能越多。

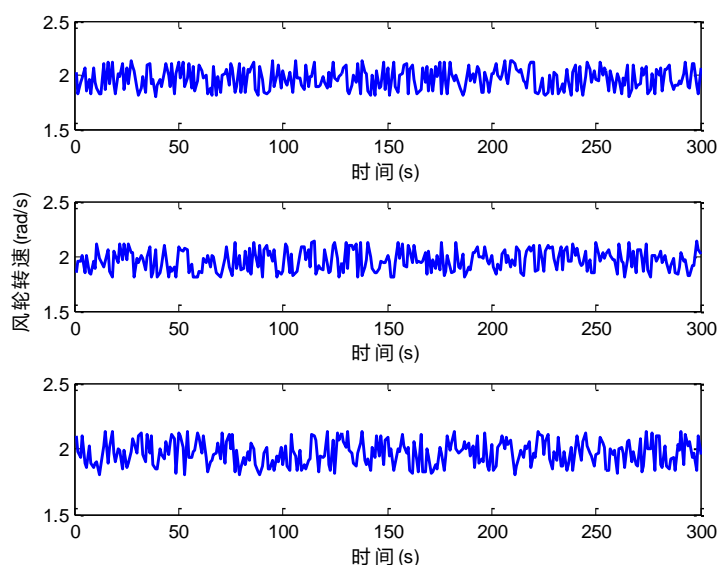


图 5.8 风轮转速图

图 5.7 中从上往下依次是风速为 14m/s、16m/s 和 18m/s 状况下风电机组输出功率仿真结果。其中，三种风速下风电机组的输出功率都在额定功率范围内浮动，误差小于 8%，表明该控制器控制效果良好，且在在较广的风速范围内正常工作。

图 5.8 中从上往下依次是风速为 14m/s、16m/s 和 18m/s 状况下风轮转速仿真结果。从图中可以看出，在三种风速下，风轮转速都稳定在 1.97rad/s，且随着时间增加，风轮转速比较平稳，未出现较大抖动。风轮额定转速为 2rad/s，在控制器作用下输出转速与额定转速偏差为 0.015%，表明该控制器达到了较好地控制效果。

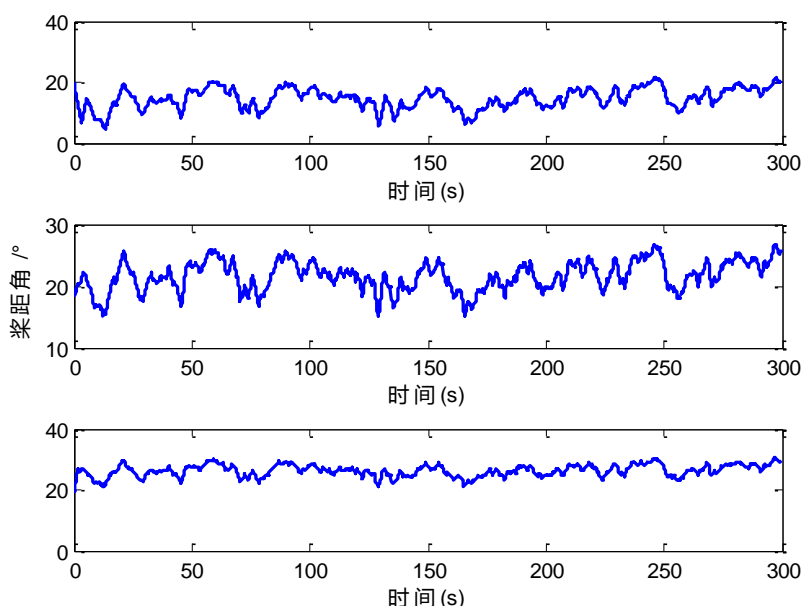


图 5.9 桨距角图

图 5.9 中从上往下依次是风速为 14m/s、16m/s 和 18m/s 状况下桨距角的仿真结果。从图中可以看出，风速为 14m/s 时，桨距角平均值为  $12^{\circ}$ ；风速为 16m/s 时，桨距角平均值为  $20^{\circ}$ ；风速为 18m/s 时，桨距角平均值为  $25^{\circ}$ 。随着风速增加，桨距角也增大，桨距角增大将会导致风能利用率降低，进而使输出功率稳定，表明该控制器达到了预期的控制效果。

### 5.2.2 考虑损耗系数下仿真

本文在  $\mu = 0.8$  和  $\mu = 0.6$  这两个损耗系数下，对高风速下风电机组进行仿真，其中低高风速选择风速为 14m/s、16m/s 和 18m/s，风电机组使用 1.5MW 风机。仿真分组情况如下表 5.2 所示：

表 5.2 仿真分组

风机损耗系数	风速
0.8	14m/s
	16m/s
	18m/s
0.6	14m/s
	16m/s
	18m/s

损耗系数为 0.8 时，系统仿真结果如图 5.10 所示：

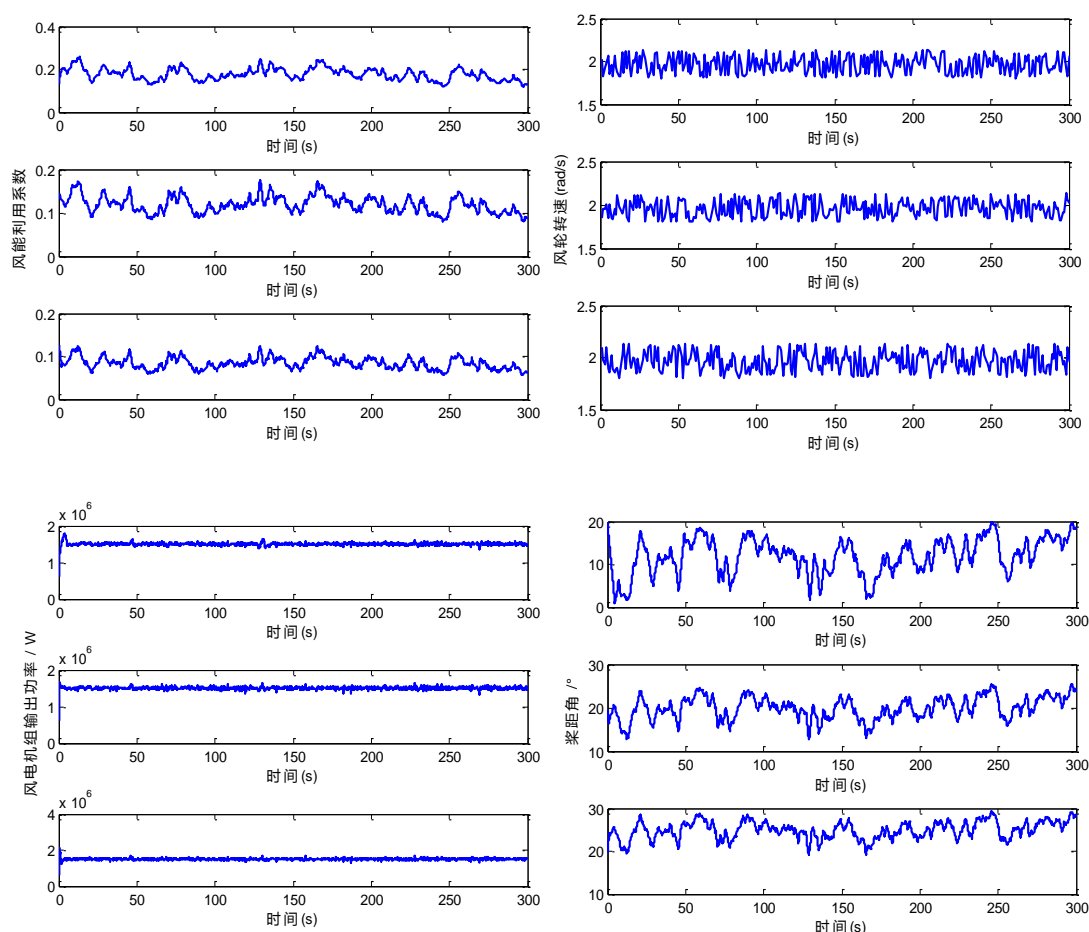


图 5.10 高风速下损耗系数为 0.8 时系统仿真

图 5.10 分别为在风速为 14m/s、16m/s 和 18m/s 状况下风能利用系数曲线、风轮转速曲线、风力发电机组功率输出曲线和桨距角曲线。从图中可以看出，风速为 14m/s 时，风能利用系数平均值为 0.2，最大值为 0.28，最小值为 0.17；风速为 16m/s 时，

风能利用系数平均值为 0.15，最大值为 0.18，最小值为 0.09；风速为 18m/s 时，风能利用系数平均值为 0.1，最大值为 0.12，最小值为 0.07。相较于无损耗状态，风能利用系数相同。在三种风速下，风轮转速都稳定在 1.97rad/s，且随着时间增加，风轮转速比较平稳，未出现较大抖动。三种风速下风电机组的输出功率都在额定功率范围内浮动，误差小于 8%，表明该控制器控制效果良好，且在在较广的风速范围内正常工作。桨距角相较于无损耗状态，略有减小。表明当风机损耗时，为保证功率输出为额定功率，丢弃的风能相较于无损耗状态要少，使得桨距角比无损耗状态时要大，而风能利用系数、风轮转速和风电机组输出功率与无损耗状态时相同。

损耗系数为 0.6 时，系统仿真结果如图 5.11 所示：

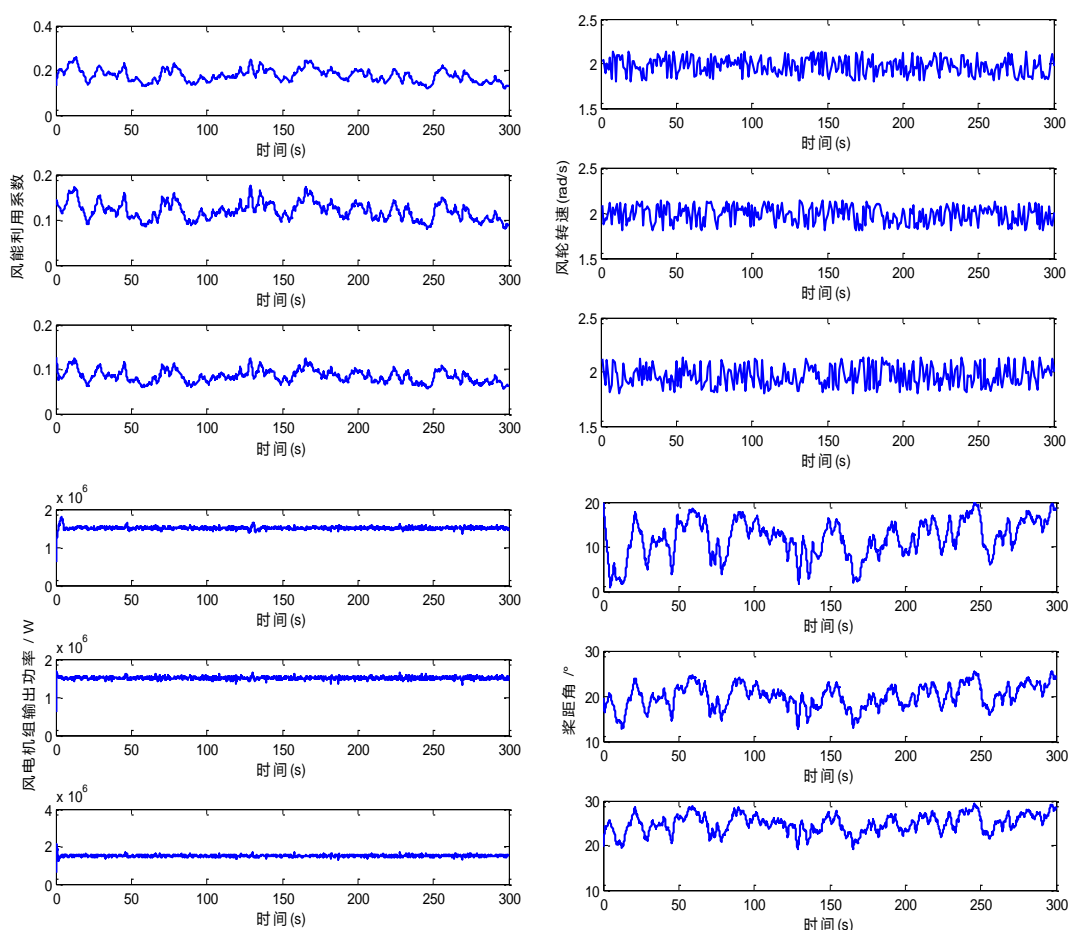


图 5.11 高风速下损耗系数为 0.6 时系统仿真

由损耗系数为 0.8 时得出的结论可知，风能利用系数、风轮转速和风电机组输出功率与应该与无损耗状态时相同，桨距角应该比无损耗状态略小，从图中可以看出，在三种风速下，风能利用系数、风轮转速和风电机组输出功率和桨距角符合上述规律。

### 5.3 本章小结

本章利用状态反馈方法对风力发电机组系统设计了一个变桨控制器，之后利用李雅普诺夫方法证明了其稳定性，并估算出了风力发电机组系统在该控制器下的稳定域，最后在风力发电机组控制仿真平台上进行了数值仿真，仿真结果表明该控制器能够达到风机输出功率稳定的控制目标，且在风机损耗状态下仍能取得较好地控制效果，该方法设计简单，具有一定的实用前景。稳定域估计值的得出，对指导风场维护人员维护风机，保障风机安全运行提供了一定的指导。

## 第六章 结论和展望

由于煤、石油、天然气等常规能源过度使用，导致常规能源日益枯竭，且环境污染问题愈加严重。为解决这些问题，开发和利用可再生能源受到了越来越多的重视，风能作为一种可再生能源也受到了世界各国的青睐，风力发电技术也随之发展起来。本论文通过阅读国内外风电控制系统相关文献，对风力发电技术原理和控制技术有了一定的认识。大型风力发电机组具有高度非线性和不确定性，本文利用状态反馈对风电机组设计了控制器，并证明了其稳定性，之后给出了在该控制器下风电机组运行的稳定域，这对风机正常运行范围和故障修复时间的估计提供了一定的理论依据。

### 6.1 本文总结

本文主要研究内容和成果如下：

#### 1) 全面介绍了国内外变速变桨控制技术发展状况

首先介绍了变桨变速控制技术的原理和发展状况，并介绍了国内外学者的研究成果，之后对状态反馈控制方法做了基本介绍，然后介绍了估算风电机组运行稳定域的重要性的估算方法。

#### 2) 建立风电仿真平台

利用空气动力学相关知识，分析了风力发电机组的基本工作原理，之后将风力发电机组模型分解为风速模型、风力机模型、传动系统模型、发电机模型和变桨执行机构模型，并对各个模型都进行了建模，最后根据各个模型搭建了风力发电机组控制系统仿真平台。

#### 3) 对风力发电机组设计控制器并估算其稳定域

首先将原控制问题转换为系统在平衡点稳定的问题，之后基于状态反馈方法分别设计了转矩控制器和变桨控制器，并在所设计的控制器的基础上，估算出了其运行的稳定域，最后利用加性分解原理重新设计了 PI 控制器，并验证了在此控制器下风机的运行范围在稳定域内。

#### 4) 采用 Matlab/Simulink 工具仿真验证课题提出的控制策略

利用本文所建立的风力发电机组控制仿真平台，分别在多种风速下验证控制器的

控制效果，结果得出，在控制器能够在低风速阶段达到输出最大功率的控制目标，在高风速阶段达到输出功率稳定的控制目标。

## 6.2 工作展望

本论文虽然取得了一定地成果，但由于本文的相关研究和仿真工作都是建立在理想状态下的，而风力发电机组是一个非常复杂的系统，在实际运行过程中需考虑很多因素，如风速的突变等对系统的影响等。由于个人能力有限，本文还有一些不足之处，需要在今后的工作中进行研究和改善，在下一步工作中需要改善的地方如下：

- 1) 将一些智能算法与本文的控制方法相结合，如神经网络、遗传算法等优化控制参数，提升控制器的控制效果，并通过仿真，与之前进行对比，验证其控制效果。
- 2) 设计相关硬件和软件，将控制算法应用到实际的硬件中，并联系厂家将所设计的控制器应用到风电现场进行调试，根据运行结果进一步改进。

## 参考文献

- [1] 郭百顺.风电机组独立变桨距控制技术研究[D]. 湖南:湖南工业大学, 2014.
- [2] 刘细平, 林鹤云. 风力发电机及风力发电控制技术综述[J]. 大电机技术, 2007,(03): 17-20.
- [3] 舒畅. 关于我国清洁能源发展相关问题的探讨[J]. 能源技术经济, 2011, 23(09): 20-23.
- [4] 孔屹刚. 大型风力机功率控制与最大能量捕获策略研究[D]. 上海:上海交通大学, 2009.
- [5] 韩芳. 我国可再生能源发展现状和前景展望[J].可再生能源, 2010, 28(04): 137-140.
- [6] 王浩. 大型风力发电机组变桨距控制技术研究[D]. 湖南:中南大学, 2011.
- [7] 何满. 中国风电产业政策研究[D]. 武汉; 华中师范大学, 2013.
- [8] 邱越. 并网型风力发电系统建模及其网络化控制方法研究[D]. 沈阳:东北大学, 2011.
- [9] CWEA. 2014 年中国风电装机容量统计[J]. 风能, 2015(02): 36-49.
- [10] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 机械工业出版社, 2002.
- [11] 叶杭冶, 潘东浩. 风电机组变速与变桨距控制过程中的动力学问题研究[J]. 太阳能学报, 2007, (12): 1321-1328.
- [12] Boukhezzar B, Siguerdidjane H. Nonlinear Control of a Variable-Speed Wind Turbine Using a Two-Mass Model[J]. Ieee Transactions on Energy Conversion, 2011, 26(01): 149-162.
- [13] Kim K H, Van T L, Lee D C, et al. Maximum Output Power Tracking Control in Variable-Speed Wind Turbine Systems Considering Rotor Inertial Power[J]. Ieee Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(08): 3207-3217.
- [14] Corradini M L, Ippoliti G, Orlando G. Fully sensorless robust control of variable-speed wind turbines for efficiency maximization[J]. Automatica, 2013, 49(10): 3023-3031.
- [15] Mérida J, Aguilar L T, Dávila J. Analysis and synthesis of sliding mode control for large scale variable speed wind turbine for power optimization[J]. Renewable Energy, 2014, 71:715-728.
- [16] 李树江, 蔡海锋, 邓金鹏, 等. 自适应变步长最大风能捕获算法[J]. 控制工程, 2012, (01): 69-72.
- [17] 曾志勇, 冯婧, 周宏范. 基于功率给定的双馈风力发电最大风能捕获策略[J]. 电力自动化设备, 2010, 6(06): 25-30.
- [18] Tan K, Islam S. Optimum control strategies in energy conversion of PMSG wind turbine system without mechanical sensors[J]. Ieee Transactions on Energy Conversion, 2004, 19(02): 392-399.
- [19] Nam Y S, Kim J G, Paek I S, et al. Feedforward Pitch Control Using Wind Speed Estimation[J]. Journal of Power Electronics, 2011, 11(02): 211-217.
- [20] Chen F, Yang J. Fuzzy PID controller used in yaw system of wind turbine[C]. Power Electronics Systems and Applications, 2009. PESA 2009. 3rd International Conference on. IEEE, 2009: 1-4.
- [21] Qi Y, Meng Q. The application of fuzzy PID control in pitch wind turbine[J]. Energy Procedia, 2012, 16: 1635-1641.
- [22] Sedda L, Morley D, Brown H E. Characteristics of Wind-Infective Farms of the 2006 Bluetongue



- Serotype 8 Epidemic in Northern Europe[J]. Ecohealth, 2015:1-7.
- [23] Wang Z J, Liu S, Liu T. Intelligent Controlling of Wind Turbine Based on Fuzzy Immunity PID Algorithmic[C]. Biomedical Engineering and Computer Science (ICBECS), 2010 International Conference on. IEEE, 2010: 1-4.
- [24] Zhang F, Shi Q, Wang Y, et al. Simulation research on wind solar hybrid power system based on fuzzy-PID control[C]. 2007 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). 2007: 338-342.
- [25] 赵辉, 李斌, 朱利强, 等. 基于模糊 PID 的风电系统转速控制仿真研究[J]. 电网与清洁能源, 2011, 27(05): 63-65.
- [26] 郭鹏. 风电机组非线性前馈与模糊 PID 结合变桨距控制研究[J]. 动力工程学报, 2010, (11): 838-843.
- [27] 孙伟, 杨海群, 聂婷. 风力发电统一变桨距的双模糊控制策略研究[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(03): 794-796.
- [28] 肖成, 陈刚, 冯登超, 等. 基于最优模糊推理的风电机组变桨距二维模糊 PID 控制器设计[J]. 国外电子测量技术, 2013, (10): 22-25.
- [29] 姚兴佳, 马佳, 郭庆鼎. 大型风电机组的动态加权模糊独立变桨距控制[J]. 电气应用, 2011, (24): 38-41.
- [30] 于会群, 高扬, 张浩, 等. 变速恒频双馈风电系统风力机转矩模糊 PID 控制[J]. 热力发电, 2014, (05): 49-53.
- [31] Jafarnejadsani H, Pieper J, Ehlers J. Adaptive control of a variable-speed variable-pitch wind turbine using RBF neural network[C]. Electrical Power and Energy Conference (EPEC), 2012 IEEE. IEEE, 2012: 216-222.
- [32] Xing Z X, Zheng Q T. BP Neural Network PID Control in Variable Speed Adjustable Pitch Wind Turbine Control System[C]. The International Conference on Sensing Computing and Automation, Chongqing, China. 2006: 1094-1098.
- [33] 宋新甫, 刘军, 黄戈. 基于 RBF 神经网络整定 PID 的风力发电变桨距控制[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(04): 49-53.
- [34] 邢作霞, 郑琼林, 姚兴佳, 等. 基于 BP 神经网络的 PID 变桨距风电机组控制[J]. 沈阳工业大学学报, 2007, 28(06): 681-686.
- [35] 高文元, 祝振敏, 井明波, 等. 风电机组变桨距系统神经网络模糊自适应控制[J]. 武汉理工大学学报, 2008, (04): 533-536.
- [36] 韩旭杉, 陈翡. 基于模糊 RBF 神经网络的风电机组变桨距控制[J]. 电气传动, 2011, (02): 36-39.
- [37] 刘杰, 杨海群. 小波神经网络 PID 在风电系统最大功率点跟踪中的应用研究[J]. 工矿自动化, 2013, (12): 73-76.
- [38] 童菲, 晁勤, 袁铁江, 等. 基于神经网络的双馈风电机组转速 PID 控制仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2009, (19): 14-18.
- [39] 邢作霞, 郑琼林, 姚兴佳, 等. 基于 BP 神经网络的 PID 变桨距风电机组控制[J]. 沈阳工业大学学报, 2006, (06): 681-686.
- [40] Valenciaga F, Puleston P F. Variable structure control of a wind energy conversion system based on a brushless doubly fed reluctance generator[J]. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2007,

- 22(02): 499-506.
- [41] 杨锡运, 刘欣然. 风力发电机组的桨距角滑模变结构控制[C]. 第二十九届中国控制会议论文集. 2010.
- [42] 秦生升, 顾春雷, 李杜. 基于自适应反演滑模的风电机组变桨距控制器的设计[J]. 煤炭技术, 2011, 30(12): 226-228.
- [43] 杨俊华, 郑俭华, 杨梦丽, 等. 变桨距风力发电机组恒功率反馈线性化控制[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(10): 1365-1370.
- [44] 王东风, 贾增周, 孙剑, 等. 变桨距风力发电系统的滑模变结构控制[J]. 华北电力大学学报, 2008, 35(01): 1-4.
- [45] Bakka T, Karimi H R. Wind turbine modeling using the bond graph[C]. Computer-Aided Control System Design (CACSD), 2011 IEEE International Symposium on. IEEE, 2011: 1208-1213.
- [46] 余梦. 变速恒频风力发电系统最大风能捕获控制研究[D]. 湖北:湖北工业大学, 2013.
- [47] 刘磊. 永磁直驱式风力发电并网系统中变流器的研究[D]. 兰州:兰州交通大学, 2011.
- [48] 毛华锋. 大型变桨距风力发电机叶片优化设计[D]. 浙江:浙江大学, 2013.
- [49] 张耀华. 水平轴风力机叶片气动性能数值模拟[D]. 重庆:重庆大学, 2013.
- [50] 蔺红, 晁勤. 直驱式风电机组建模及最大功率跟踪控制[J]. 水力发电, 2010, (01): 86-88.
- [51] 赵微微, 张磊, 井延伟. 变桨风力发电机组控制器优化设计[J]. 电网技术, 2014, 38(12): 3436-3440.
- [52] 纪志成, 冯海英, 沈艳霞. 基于反馈线性化的风轮机变桨距控制研究[J]. 微特电机, 2011, (11): 40-43.
- [53] 叶远茂, 吴捷, 张先亮, 等. 变桨距风力机分区段模拟方法及其控制策略[J]. 电网技术, 2010, 34(01): 159-163.
- [54] 邓文浪, 段斌, 谢敏. 双级矩阵变换器直驱风力发电系统最大风能追踪[J]. 电网技术, 2012, 36(05): 73-78.
- [55] 何玉林, 黄帅, 苏东旭, 等. 变速风力发电机组最大风能追踪与桨距控制[J]. 控制工程, 2012, 19(03): 523-526.
- [56] 梁立哲, 姚兴佳, 祝贺, 等. 风力发电系统最大风能追踪的非线性控制策略[J]. 华东电力, 2013, 41(02): 353-358.
- [57] 王印松, 海日, 王妹媛. 带有速度观测器的风力发电系统风能捕获控制[J]. 电子技术应用, 2015, 41(01): 135-138.
- [58] 叶杭冶, 李伟, 林勇刚, 等. 基于半物理仿真的变速恒频独立变桨距控制[J]. 机床与液压, 2009, (01): 90-93.
- [59] 邢作霞, 陈雷, 孙宏利, 等. 独立变桨距控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, (26): 131-138.
- [60] 倪焕山. 1.5MW 双馈型风力机变桨距控制算法研究[D]. 四川:电子科技大学, 2012.
- [61] 陈虎, 马建光. 基于 MATLAB 的风力发电机组建模和仿真研究[J]. 节能技术, 2012, 30(1): 24-28.
- [62] 刘豹, 唐万生. 现代控制理论[M]. 机械工业出版社, 1983.
- [63] 马进, 程代展, 梅生伟, 等. 基于半张量理论的电力系统稳定域边界逼近 (一)应用[J]. 电力系统自动化, 2006, (11): 7-12.

- [64] 马进, 程代展, 梅生伟, 等. 基于半张量理论的电力系统稳定域边界逼近 (二)理论基础[J]. 电力系统自动化, 2006, (10): 1-5.
- [65] 王佳雯. 变速变桨距风电系统建模与智能控制技术研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2012.
- [66] 王立军, 贺俊, 焦斌. 变速变桨距风力发电机的模糊滑模变结构控制[J]. 电气自动化, 2009, (05): 18-20.
- [67] Quan Quan, Cai Kaiyuan. Additive decomposition and its applications to internal-model-based tracking [C]. Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference, Shanghai, 2009: 817-822.
- [68] Quan Q , Cai KY . Additive-state-decomposition-based tracking control for TORA benchmark[J]. Journal of Sound and Vibration. 2013, 332(20): 4829-4841.

## 攻读学位期间所取得的相关科研成果

### 论文:

[1] 杜捷先,张磊. 风电机组运行稳定性研究 [J]. 自动化与仪表. (已录用)

### 软著:

[1] 杜捷先,张琨,李楠,常亚君,张磊. 环境工程仿真及优化控制软件,登记号 2015SR019669, 2015 年 2 月 2 日

[2] 杜捷先,张琨,李楠,常亚君,张磊. 风力发电机组仿真软件, 登记号 2015SR021533, 2015 年 2 月 3 日

[3] 杜捷先, 李楠, 常亚君, 王金环, 张磊. 教室查询系统,登记号 2015SR019570, 2015 年 2 月 2 日

[4] 张磊,张琨,杜捷先,李楠,常亚君. 校车管理平台,登记号 2015SR019574, 2015 年 2 月 2 日

### 专利:

[1] 孙曙光,杜太行,江春冬,马琳,杜捷先,刘策. 一种断路器瞬动校验选相合闸装置,实用新型专利,专利号 ZL201420815110.9[P], 2015 年 4 月 8 日.

## 致 谢

三年前，我有幸保送成为了张磊老师的研究生。在这三年中，我时刻提醒自己要努力奋斗，积极进取，从各方面完善自我。在这里我得到了老师无微不至的关心和照顾，为此我深感荣幸。

感谢我的导师张磊教授，在学习方面张老师严谨的科研精神，渊博的学识，引领我在前进；在生活方面张老师做人的态度，刻苦的精神也深深影响着我。论文能够顺利完成得到了张老师的耐心指导和悉心帮助，从论文选题、研究路线，到研究方法以及撰写和修改过程，张老师都严格把关，不留一丝疑问，这种严谨的态度深深的影响着我们每一个人，从张老师身上所学到的是一笔人生财富，相信以后不论在生活中还是工作中都会受益匪浅。因此，在此论文完成之际，向我的导师张磊老师表示衷心的感谢！

其次感谢实验室每一位成员，和你们在一起度过了无比愉悦的三年，在日常的生活和学习中，师姐赵薇薇，师兄杨波、李伟昌、秘春号、吴超和冯旺，还有各位师弟师妹，你们给我的帮助让我感受到咱们这个大家庭的温暖，尤其是同窗马琳、石琼玉、王卫娜、王贞贞和廖洁对我的帮助，谢谢你们对我学习和生活上的关心和帮助。

我还要感谢我的父母亲人，他们给我无微不至的关怀，教育我成人，默默的付出和奉献，让我勇敢的面对人生中的挫折，正是他们的支持和鼓励让我能够顺利地完学业，你们辛苦了。

此外，我要感谢在百忙之中抽出时间来评阅我的论文的专家们！谢谢你们！