
分类号: TP13

密级: _____

UDC: 621.3

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

论文作者: 杜捷先

学生类别: 全日制

学科门类: 工学硕士

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

by
Du Jiexian

Supervisor: Associate Prof. 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：赵微微

日期：2014.12.11

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：赵微微

日期：2014.12.11

导师签名：张磊

日期：2014.12.11

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,世界各国都在寻找可再生能源来替代常规能源,可在生能源在世界能源结构中占据越来越大的比重。风能作为一种开发方便、成本低、无污染的可在生能源,受到了各国的重视,风力发电技术随着风电市场的不断扩大也在不断趋于成熟。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,可能会导致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。本文以变速变桨风力发电机组为研究对象,以最大风能捕获和输出功率平滑为优化目标,运用状态反馈设计了控制器,实现了变速变桨风力发电机组的控制,并估算出了系统运行的稳定域。

论文从空气动力学理论切入,基于动量理论分析了风力发电机组的气动特性,推导出在理想状态下的最大风能利用系数,并论述了变速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。

为了保证风力发电机组的稳定运行,设计了一个稳定的状态反馈控制器,在风速低于额定风速的时,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。通过状态转换将原问题转换成系统在原点稳定的问题,再通过李雅普诺夫函数找到合适的参数,进而设计出控制器。之后给出了该系统的稳定性证明,并基于该控制器,计算出了风机运行的稳定域。最后利用 Simulink 搭建了风力发电机组控制仿真平台,并进行了数值仿真,结果显示控制系统具有良好的稳定性和期望的动态特性,表明该控制器取得了较好的控制效果,且在风机运行稳定域内,系统能稳定运行。该方法设计简单,具有一定的实用价值。稳定域的提出,为风机正常运行提供了理论依据。

关键字: 风力发电机 状态反馈控制 稳定域

ABSTRACT

With growing concerns about environmental pollution and a possible energy shortage, Wind energy seems certain to play a major part in the world's energy future. Steady development of wind turbine technology and the accumulation of wind farm operating experience have resulted in the expanding of wind power. Large wind turbine is a complicated multivariable system with strong nonlinearity. It is difficult to establish the precise mathematical model. PID controller or PI controller are generally applied in actual wind farm, whose control parameters are obtained relying on engineering experience but not theoretical instruction and lack of stability proof. So a method named additive decomposition method is proposed in this paper to design the wind turbine controller.

Aerodynamic characteristics of wind turbines are introduced based on the momentum theory, blade element theory and momentum-blade element theory. Then establishing wind model, wind turbine model, transmission model, generator model and pitch actuator model. The simulation platform of wind power system has been set up.

Considering from the point of engineering application, there are not standards and formal methods to design the controller parameters. This thesis adopts additive decomposition method to normalize the design parameter of wind turbine controllers. The control problem of wind power generating unit is decomposed into two simple sub-problems(main system and auxiliary system). For main system, the proposed controllers can be finally replaced by PI controllers based on additive decomposition. When the wind speed is lower than the rated wind speed, torque PI controller is designed to capture the maximum power by controlling the wind rotor speed. And the rotor speed is adjusted by generator torque. When the wind speed is higher than the rated wind speed, pitch PI controller is designed to limit the wind energy to stabilize the output power as rated power by adjusting the pitch actuator. For original system, the stability can be proved. Finally, the results are validated through Matlab/Simulink. The method proposed by this thesis will provide theoretical reference for PI controller designing.

KEYWORDS: Wind turbine Additive decomposition method Torque controller Pitch controller Stability

目 录

第一章 绪论	- 1 -
1.1 背景研究	- 1 -
1.2 国内外风力发电发展现状	- 2 -
1.2.1 国内风力发电发展现状	- 3 -
1.2.2 国外风力发电发展现状	- 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 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 -
第三章 风力发电机组建模与控制方法研究	- 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	- 22 -
3.1.3 变桨距机构模型	- 24 -
3.1.4 发电机模型	- 25 -
3.2 风力发电机组控制方法	- 26 -
3.2.1 状态反馈控制	- 26 -
3.2.2 PID 控制	- 27 -
3.2.3 滑模控制	- 28 -
3.3 风力发电机组运行稳定域	- 29 -
第四章 状态反馈控制器设计及稳定域分析	- 31 -
4.1 转矩控制器设计	- 32 -
4.1.1 状态反馈控制器设计	- 32 -
4.1.2 系统稳定域分析	- 34 -
4.1.3 系统仿真结果	- 35 -

4.2 变桨控制器设计	- 39 -
4.2.1 状态反馈控制器设计	- 40 -
4.2.2 系统稳定域分析	- 42 -
4.2.3 系统仿真结果	- 43 -
4.3 系统仿真结果	错误!未定义书签。
4.3.1 低风速仿真	- 49 -
4.3.2 高风速仿真	- 53 -
4.3.3 考虑损耗系数下仿真	错误!未定义书签。
第五章 结论和展望	- 60 -
5.1 本文总结	- 60 -
5.2 本文展望	- 61 -
参考文献.....	- 62 -
攻读学位期间所取得的相关科研成果.....	- 66 -
致 谢.....	- 67 -

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^[1]。随着中国经济的快速发展,能源短缺问题越来越严重^[2]。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^[3],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 背景研究

由于石油、煤、天然气等常规能源日益枯竭,且会造成严重的环境污染,因此开发清洁的可再生能源刻不容缓。风能作为一种可再生能源,不但取之不尽、用之不竭,而且不受地域的限制,对环境无污染。为了减少环境污染,缓解能源危机,必须合理利用风能,发展风电事业^[4]。

风力发电具有良好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对口能源的依赖,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了当今的能源问题。据统计,到 2020 年,整个世界预期电力需求只占全球风能资源的二分之一。我国的风能资源也十分丰富,尤其是近海风能资源,据相关部门统计,近海风能资源约为陆地的 3 倍。所以说中国有巨大的开发风能资源的潜力。既然有这么充裕的风能资源,无疑是人类一笔宝贵的财富,尤其是现在正值常规能源日益匮乏。但是,由于风能资源有其本身随机性和不确定性,这就给开发利用风能带来了一定的难度。虽然近几十年来风能利用技术的发展有了很大进步,但是在一些关键技术上,还存在许多难题没有解决,所以,大力研究风力发电技术,对缓解能源危机、减少环境污染等等意义重大。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^[5]。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,对风电机组控制系统的设计日益重视。

由于风电技术涉及材料、机械、空气动力学、控制理论、电机学等多个领域，是一个复杂的系统工程，而控制系统目的是实现风电机组运行的稳定性，故风电机组的控制系统设计成为风电技术研究的难点。随着风力发电机组技术的稳步提高，每台风力发电机组的发电量提高了约 100 倍，重量和噪音都减轻了约一半，形式也由之前的垂直轴风力发电机组发展为现在的水平轴风力发电机组，之前的陆上风力发电机组发展为现在的海上风力发电机组。由于大型风力发电机组是个极其复杂的非线性系统，且具有不确定性和多干扰性，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 [8]。

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 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 51GW。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 和 4.9 千兆瓦（如图 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。

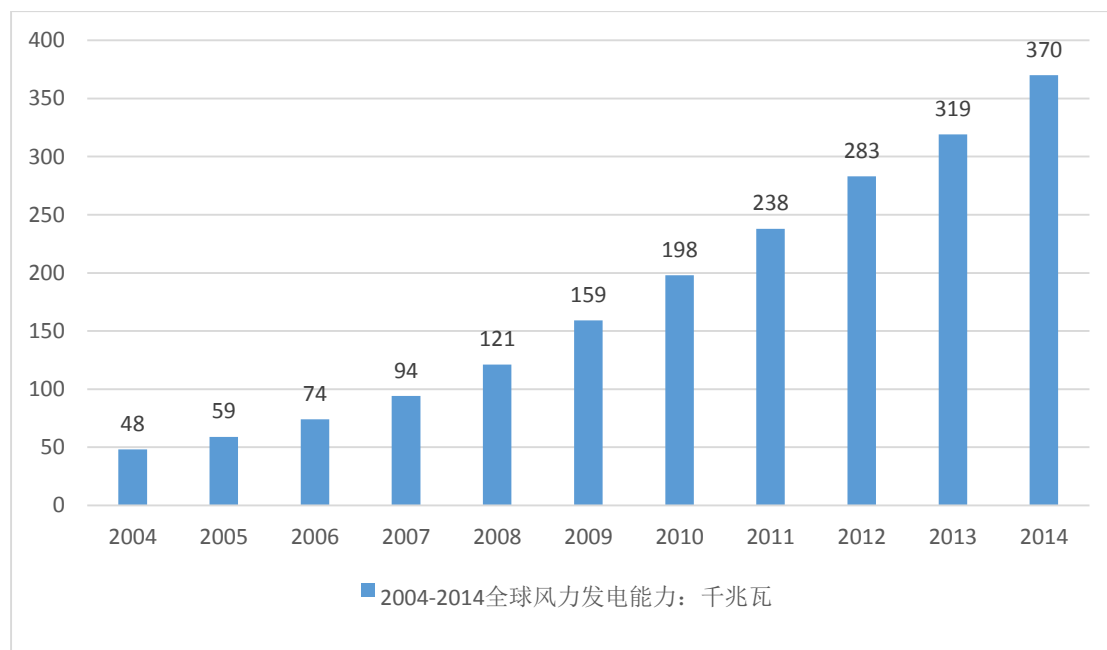


图 1 2004-2014 全球风力发电能力：千兆瓦

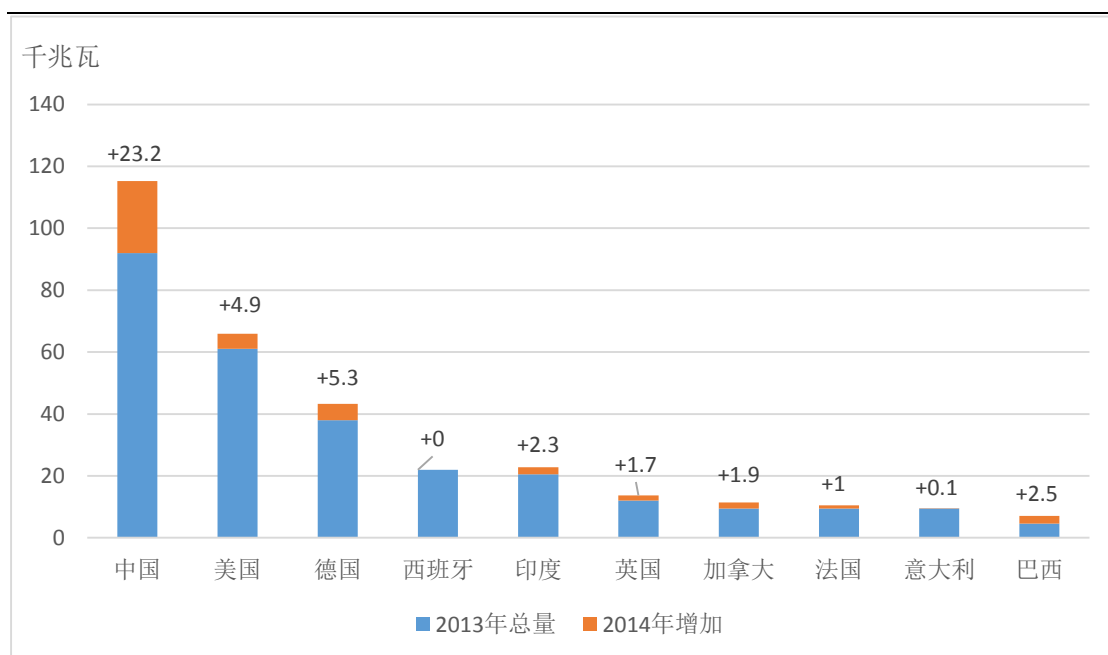
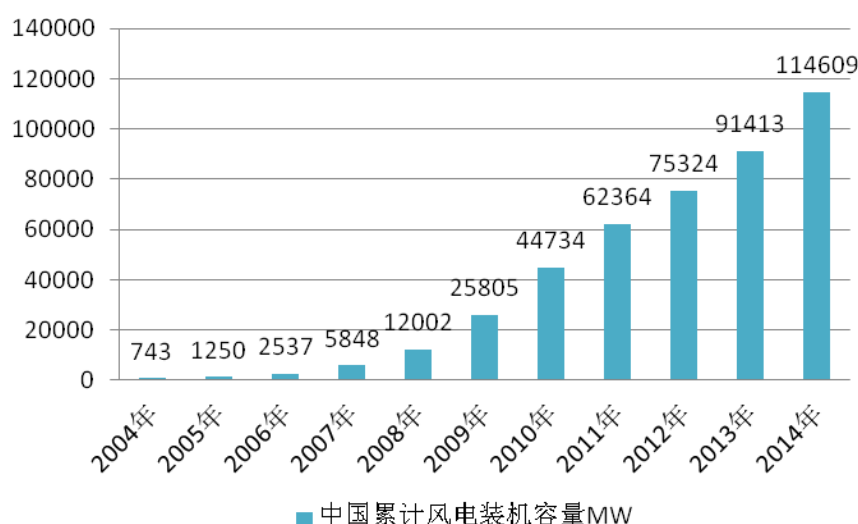


图 2 2014 风力发电容量增加前十的国家

1.2.1 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 23196MW，同比增长 44.2%；累计安装风力发电机组 76241 台，装机容量 114609MW，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 1.1 是 2004 年至 2014 年中国累计风电装机容量^[6]。

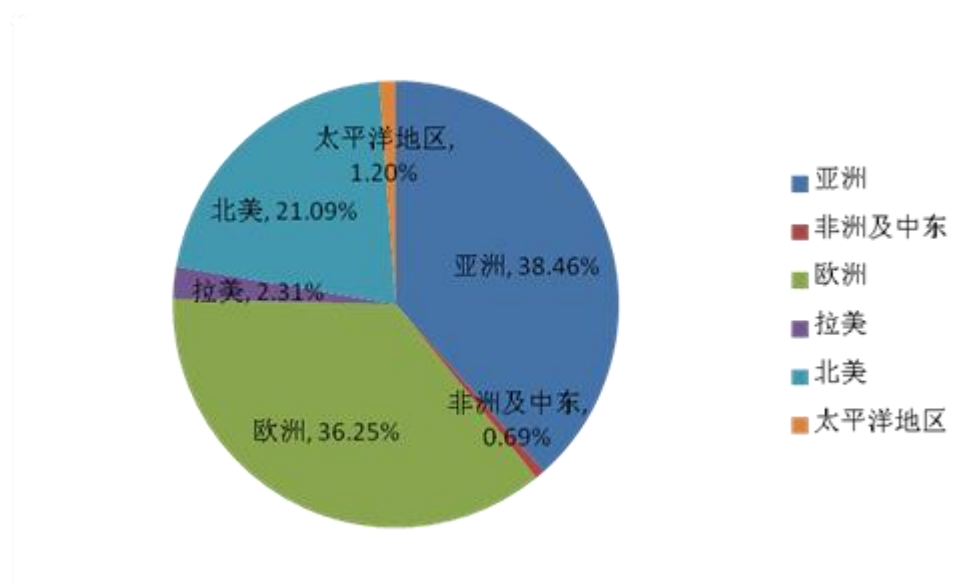


2006 年到 2009 年三年间，中国风电累计装机年增长率平均在 100% 以上，在 2009 年与 2011 年间，中国风电实现了每年超过 16000MW 吊装规模。2015

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 114609MW，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。

1.2.2 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 133969MW，占世界装机总量的 36.25%，亚洲风电累计装机总量达到 142119MW，占世界装机总量的 38.46%；北美累计装机总量达到 77953MW，占世界装机总量的 21.09%。



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 34250 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 61,091MW，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。

1.3 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

定桨距风力发电机组的主要结构特点是:桨叶与轮毂的连接是固定的,即当风速变化时,桨叶的迎风角度不能随之变化。这就使得定桨距风力发电机组当风速高于风轮的设计点风速即额定风速时,桨叶必须能够自动地将功率限制在额定值附近,因为风力机上所有材料的物理性能是有限度的。桨叶的这一特性被称为自动失速性能。失速调节方式依赖于叶片独特的翼型结构,一般用于恒速运行的风力发电机中。在大风时,流过叶片背风面的气流产生紊流,降低叶片气动效率,影响能量捕获,产生失速。采用失速功率调节方式机组的叶片在发电时迎风角度不能随风速变化,功率调节通过叶片自身的失速特性实现。这种方式有结构简单、故障概率低的优点,其缺点主要是风力发电机组在风速超过额定值时发电功率反而有所下降。

1.3.2 变速控制技术

变速控制的主要控制目标是在风速低于额定风速时,保证功率输出最大化。按照控制模式,可分为转速控制、功率控制和转矩控制三种。基于转速控制模式,叶杭冶提出通过风力发电机的输出转矩控制风轮转速,当风轮转速达到额定转速,转矩控制器控制转速使其稳定在额定值^[16]。B. Boukhezzar 设计了一个级联非线性控制器用于捕获风能并同时避免风力发电机组部件特别是传动系统的瞬时载荷冲击。其内环控制器保证发电机转矩和定子磁通的有效跟踪,外环控制器通过风轮转速的跟踪实现最大风能捕获^[17]。基于功率控制模式,Brice Beltran 提出了变速风力发电机组的滑模功率控制,保证高风速运行区域的稳定性和模型不确定条件下的理想反馈控制跟踪问题^[18],后又在此研究基础上提出了高阶滑模控制算法,其算法简单可靠,得到的发电机转矩输出平滑,不产生颤振,大大提高了风能转换系统的效率^[19]。基于转矩控制模式,有传统转矩控制方法,通过发电机转矩与转速之间的比例关系控制实际转矩输出。在传统的转矩控制方法基础上,

又通过改变发电机转速加速度或者气动转矩来快速响应风速变化,达到更可靠的控制目的。

目前,最佳叶尖速比查表法、爬山搜索法、模糊控制和自适应控制法等是描述最大功率捕获的主要方法。因风速测量困难,所以对查表法准确性产生很大的影响,爬山搜索法需要不断的进行转速调节,传动链会造成疲劳过度,产生转矩高频脉动。李树江等人在最佳叶尖速比查表法和爬山搜索法的基础上进行改进,提出了变步长策略,加快了搜索速度,使得动态响应更快,收敛性能更好^[20]。模糊控制和自适应控制等智能控制算法虽能取得良好的控制结果,但因算法复杂,对控制器的性能要求较高,所以在风电场中并不实用^[21]。

1.3.3 变桨控制技术

目前采用非线性模型描述变桨控制系统的方法主要有两种,第一种是针对特定型号的风力发电机组,通过重复仿真和大量实验建立带有约束条件的简化非线性模型,取得了较好的控制效果。Fernando V 基于变结构基础理论和李雅普诺夫理论相结合的控制理论设计了一种多输入多输出鲁棒控制器以达到风能转换效率最大化的目标^[22]。Kelouwani S. 采用平均风速,标准偏差和输出功率作为神经网络模型的输入进行风力发电机组非线性模型控制,提高控制精度。第二种是建立可反馈线性化的非线性模型,进而采用成熟的线性控制方法获得理想的控制效果^[23, 24]。如陈思哲提出采用微分几何原理将非线性模型进行全局线性化,对线性化后的模型设计非线性控制器,实现变速变桨风力发电机组的最优功率控制^[25]。杨俊华基于反馈线性化模型建立放射非线性模型,设计桨距角控制器^[26],方法具有较好的鲁棒性和适应性。采用线性模型描述变桨控制系统的方法主要有三种,第一种是选择风力发电机组特定的稳定工作点(如额定功率点等),并在此工作点处建立线性模型。Nam Yoonsu 根据空气动力学力矩、风速动态变化量和前馈变桨量设计了一个前馈变桨控制器,减少发电机转速和输出功率等参数的波动^[27]。王东风针对风力发电机组的高度非线性,选择在某个工况点建立线性模型,并通过滑模变结构对被控对象进行控制,使得系统达到很好的鲁棒性^[28]。第二种是选择若干物理量作为参数变量(如风速、叶轮转速等),建立线性变参数模型。Bakka Tore 提出的控制方法是在某些工作点附近将风力机模型线性化,通过一族李雅普诺夫函数得到的参数和线性矩阵不等式去约束控制器模型,实现减轻机组振动的目的。后在此研究的基础上又提出了海上风力发电机组控制器的设计方法^[29]。第三种是选择若干工作点(如风速等),建立线性切换模型。Li, Liuying 采用的控制方法是从切入风速到切出风速整个完整的风速区域设计切换控制器使得他们能够顺利切换,平稳过渡^[30]。Jelavic Mate 提出采用模糊控

制解决多线性模型之间由于切换频繁造成的振荡问题[31]。

从七十多年前开始到今天，比例—积分—微分 (proportional integral differential, PID) 控制器(或比例—积分((proportional integral, PI))以其结构简单，理论成熟，控制效果理想，逐渐成为工业控制的重要手段。近年来，PID 控制策略随着智能控制算法的发展也得到深入研究，构成具有自学习、自适应能力的控制算法，以提高变桨控制器的适应性[32, 33]；模糊控制对系统不确定参数的变化具有较强的鲁棒性，文献[34-36]通过模糊 PID 控制方法调节桨距角，有效稳定了风力发电机组的输出功率，以及实现最大风能捕获。文献[37-39]利用神经网络自学习的能力，使变桨控制系统与风速随机变化等不确定因素形成对应关系，改善控制系统的动态性能。神经网络控制利用数据建立变桨控制系统的“黑箱”模型并加以控制，但建模具有较大偏差；自适应控制根据环境、状态输出、控制输出等信息调整变桨控制器参数，保证控制系统运行在最佳状态[40,41]，但参考模型建立和系统参数辨识比较困难。Kim, Jin-Sung 提出采用新型自适应 PID 控制器，其由新型的执行器-评价器结构组成，能够适合所有的工作点[42]。

1.4 课题的研究意义和研究内容

全球能源日益枯竭，环境污染越来越严重，各国都在致力于开发和利用新能源，风电依靠其独特的优势发展迅速，风电控制技术也逐渐成为研究热点。本课题针对大型风力发电机组的变速变桨控制策略进行分析研究。

由上述可知，风速的随机性和风力发电机组控制系统的复杂性导致难以获取风力发电机组精确的数学模型，而且从设备和工程费用的角度考虑，风电工程甚少采用复杂的智能控制算法进行控制器设计。在实际风场中风力发电机组广泛使用的是转矩 PI 控制器和变桨 PI 控制器，但是其控制参数大多是基于现场经验及调试得来，没有规范的理论分析做依据。因此本文选择从工程应用角度出发，提出将加性分解原理的方法运用于变速变桨风力发电机组控制器设计中，以实现控制器简单可靠，输出功率达到最优的目的。

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，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，最后从工程应用角度出发明确本课题的控制方法。

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。

第三章建立了风力发电机组各个部分的模型，包括风速模型、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，为下文的理论证明和仿真分析奠定了基础。然后，从工程应用角度指出实际风电场中常用的 PID 控制器或 PI 控制器在参数调节上缺乏理论支撑及稳定性证明，从而引出了加性分解原理的概念，并通过一个典型的非线性系统论证了该方法适用于复杂的非线性模型。

第四章将加性分解原理用于风力发电机组转矩控制器设计和变桨控制器设计中，将一个复杂的非线性模型分解为主系统和辅系统两个子系统，针对主系统，通过增加不同的低通滤波器分别设计得到转矩 PI 控制器和变桨 PI 控制器，然后通过理论推导，证明原系统的稳定性。最后还通过 MATLAB 仿真验证该控制策略能够满足控制目标。

第五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。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[44]，如图 2.1 所示。各部分名称和用途如表 所示。

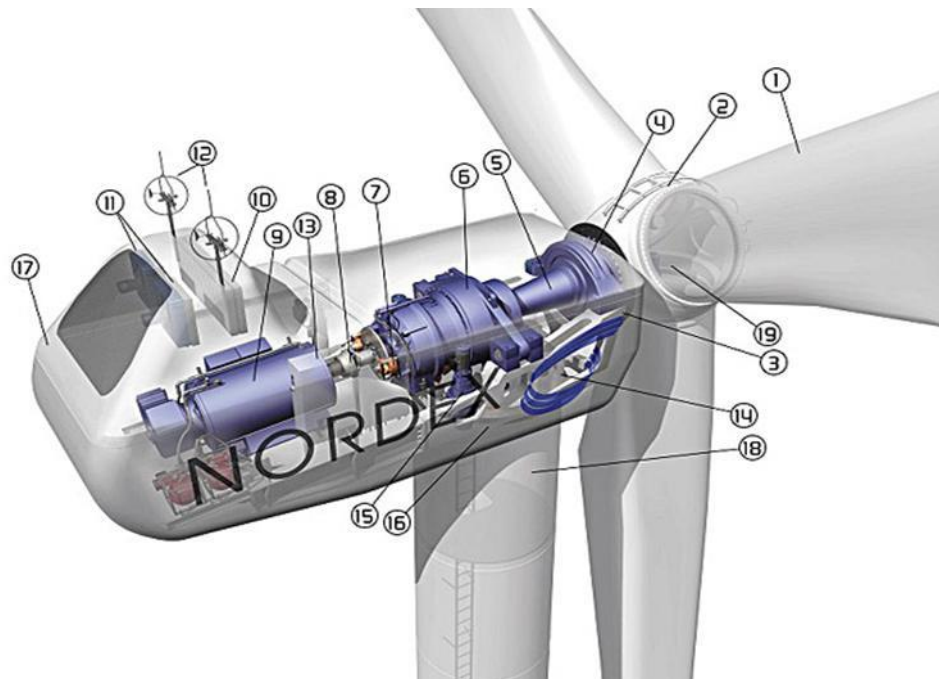


图 风力发电机组结构

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，为了最大程度捕获风能，其叶片叶尖翼型设计相对厚度较小，而根部为了承受载荷设计的厚度相对较大。

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 风电机组各部件名称及用途

标号	名称	用途
1	叶轮	捕获气动功率
2	轮毂	安装桨叶
3	机舱内框架	固定机舱内设备
4	叶轮轴与主轴连接	支撑风轮及主轴
5	主轴	传递风轮扭矩至增速箱
6	增速齿轮箱	将低速旋转扭矩转化成高速旋转扭矩
7	刹车盘	机械传动系统制动
8	发电机连接	连接齿轮箱输出轴与发电机转轴
9	发电机	将机械能转化成电能
10	散热器	限制舱内温度
11	冷却风扇	保护机舱内空气流通
12	风测量系统	测量风向风速
13	控制系统	安装机组的监控系统和通讯系统
14	液压系统	实现桨叶与轮毂的相对转动
15	偏航驱动	调整风轮的朝向方位
16	偏航轴承	实现机舱与塔架的相对转动
17	机舱盖	保护机舱内的各种设备
18	塔架	支撑机舱及内部设备
19	变桨距系统	调整桨叶的桨距角

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^[47]。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致动盘，在空气流经致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。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。

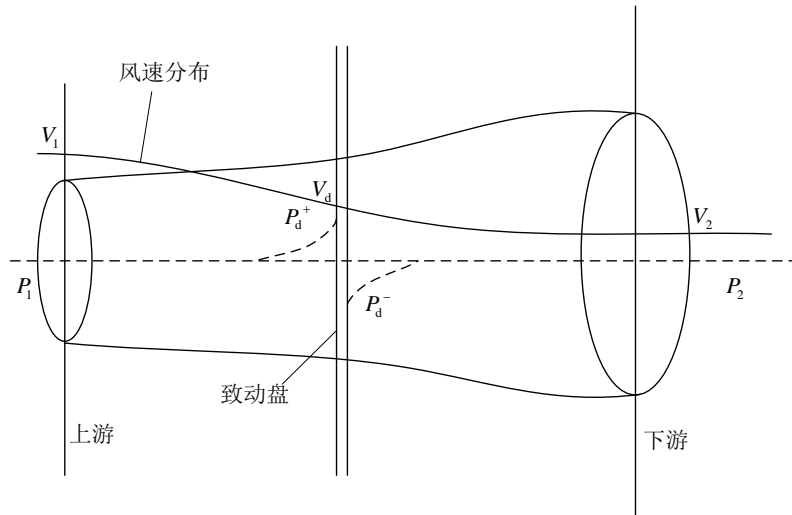


图 2.2 致动盘模型

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, ρ 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

叶素理论^[49]的提出是为了分析力与桨叶各部分之间的相互作用关系。将叶片分为若干小部分进行分析，每个小部分称为叶素，假设各个叶素之间的流动没有互相干涉，在风对叶素作用时，会产生力。在相对风速垂直方向产生的力叫升力 F_l ，在相对风速平行的方向产生的力叫阻力 F_d ，对叶片轴向方向和切线方向作用的矢量和为相对风速 V_0 的方向。相对风速与风轮旋转平面的角度叫做入流角 ϕ ，与叶素弦线之间的夹角叫做攻角 α ，入流角与攻角之差为桨距角 θ 。详细的叶素几何分量图如图 2.3 所示。

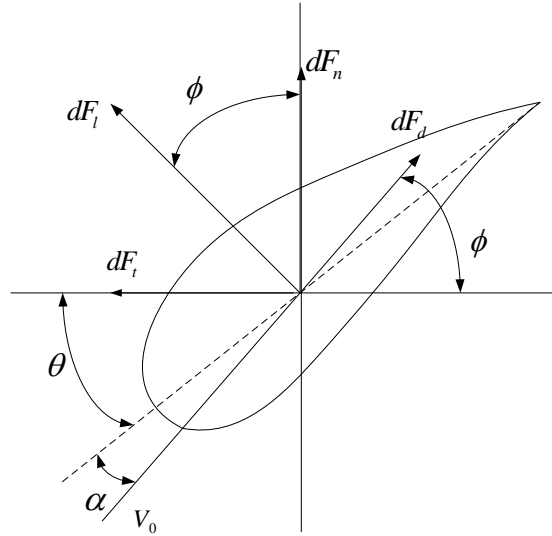


图 2.3 叶素几何图

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， ω 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。

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:

$$P = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (2.16)$$

式中: ρ 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。

β 为桨距角， λ 为叶尖速比，定义为叶片顶端的线速度与风速之比：

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{v} \quad (2.17)$$

式中： ω_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：

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{-c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (2.18)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (2.19)$$

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 λ 和桨距角 β 决定，风力机的特性曲线如下图所示。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。

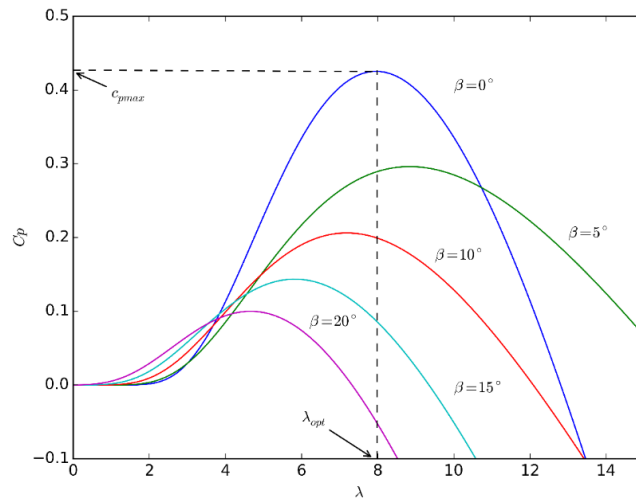


图 变桨距风机特性曲线

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。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

率最大化的控制目标。在搞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。

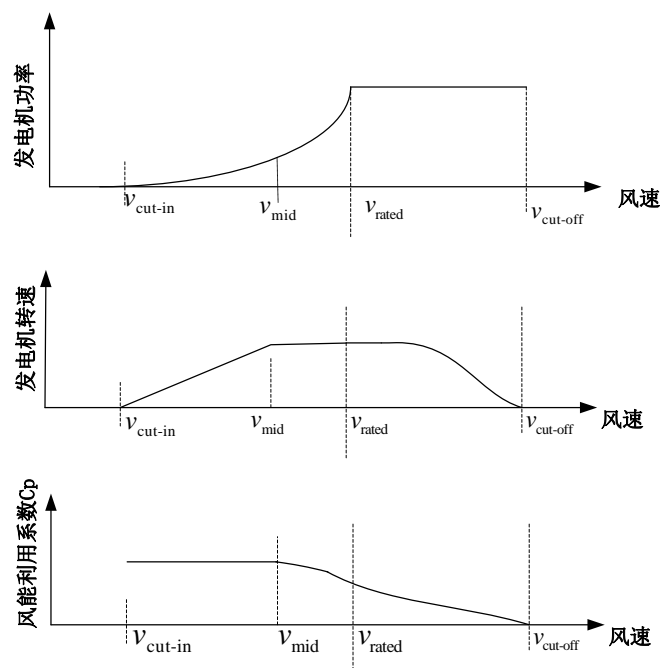


图 2.4 风力发电机组运行区域划分

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 2.4 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 [50]。

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° 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° ，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^[51-54]。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° 状态；当风速达到切入风速时，桨距角开始向 0° 方向偏转，使得风机获得较大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° 。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° 时，风轮可以捕获到最大风能^[55]。在功率输出未达到额定功率前，变桨执行机构不动作。

2) 高速时的功率限制作用

当风速高于额定风速时，如果桨距角继续保持在 0° ，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° 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。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^[56]。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：

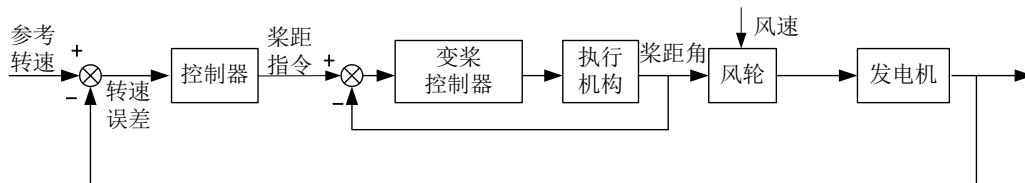


图 2.5 统一变桨控制框图

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，故需要对三个叶片进行独立控制，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：

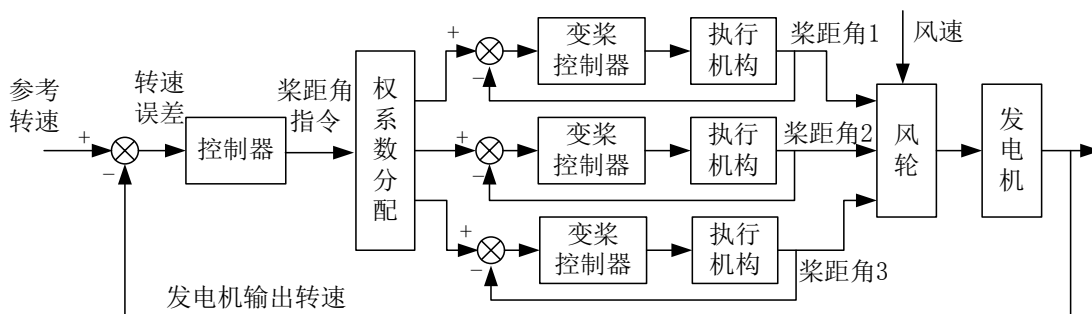


图 2.6 独立变桨控制框图

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研究

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。

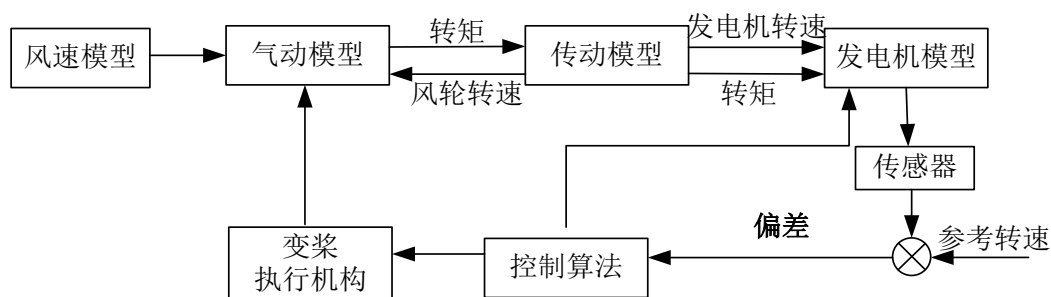


图 3.1 风力发电机组基本构成

3.1 风力发电机组建模

3.1.1 风速模型

风是风机发电的原动力，风力机的动态特性与风况息息相关。建立接近自然风的风速模型，是验证风力机模型精确性和控制策略有效性的关键。文献[29, 30]认为风速的变化包括方向和大小，其时空变化都具有随机性和时变性，认为自然风是基本风、渐变风、阵风和随机风四部分矢量和。文献[31]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。文献[32]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, μ 为相对高度的平均风速, φ_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^[59], 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, 风速模型如下图 3.2 所示。

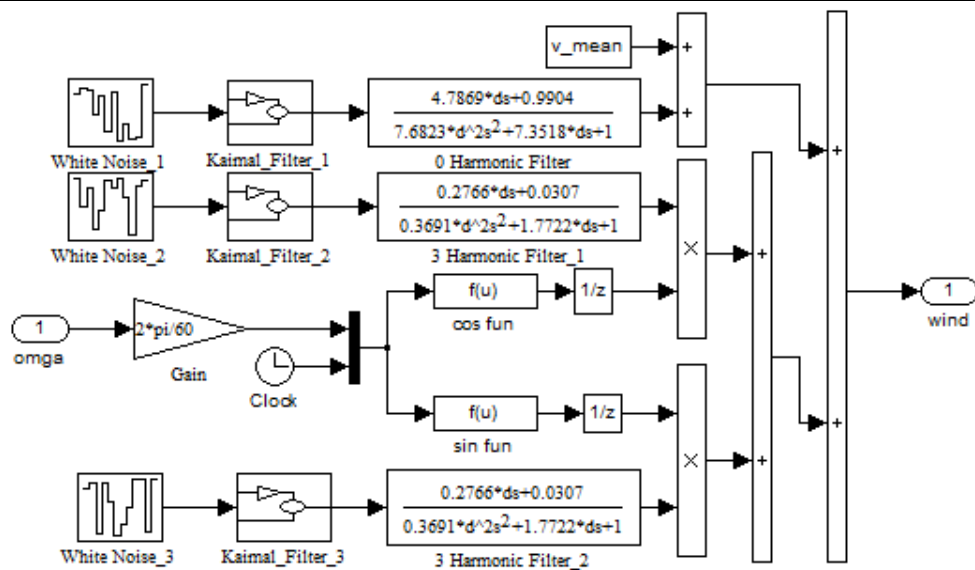


图 3.2 风速模型

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 3.3 所示：

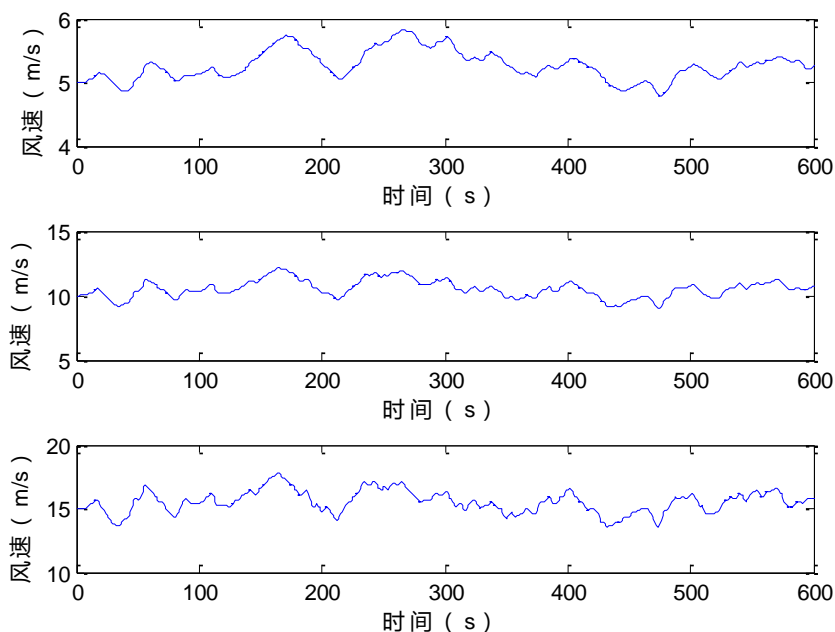


图 3.3 风速曲线

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。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 3.7 所示。

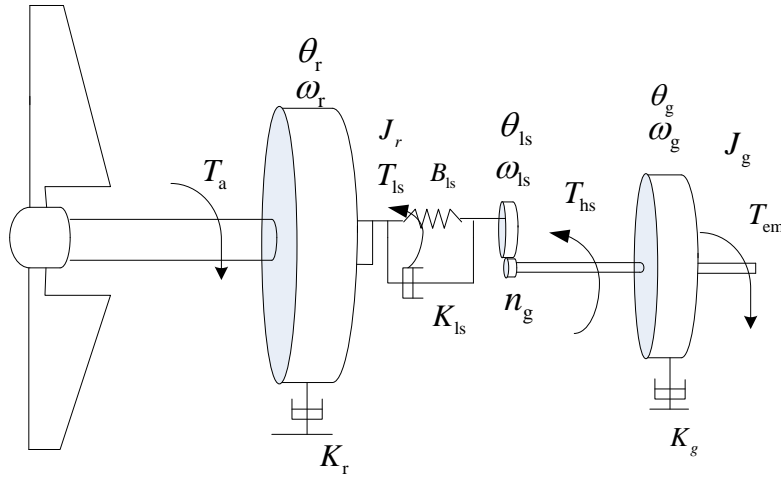


图 3.7 风力发电传动系统二质量块模型

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($\text{N} \cdot \text{m} / \text{rad} / \text{s}$)； θ_r 为风轮旋转位置角($^\circ$)； θ_{ls} 为低速轴旋转位置角； B_{ls} 为低速轴刚度系数 ($\text{N} \cdot \text{m} / \text{rad}$)； ω_r 为风轮旋转角速度 (rad / s)； ω_{ls} 为低速轴旋转角速度(rad / 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， θ_g 为发电机的旋转位置角(°)； ω_g 为发电机转速(rad/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(kg·m²)； K_g 为发电机阻尼系数(N·m/rad/s)； T_{em} 为发电机电磁转矩(N·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 3.8 所示。

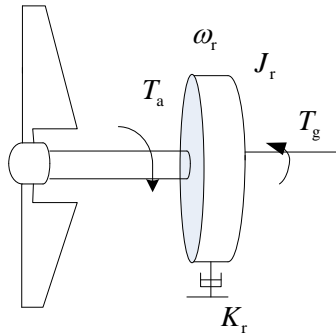


图 3.8 风力发电传动系统单质量块模型

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，忽略转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(N·m)，且存在关系式： $J_t = J_r + n_g^2 J_g$ ； $K_t = K_r + n_g^2 K_g$ ；

$$T_g = n_g T_{em}。$$

采用公式(3.18)得到仿真模块，如下图 3.9 所示。

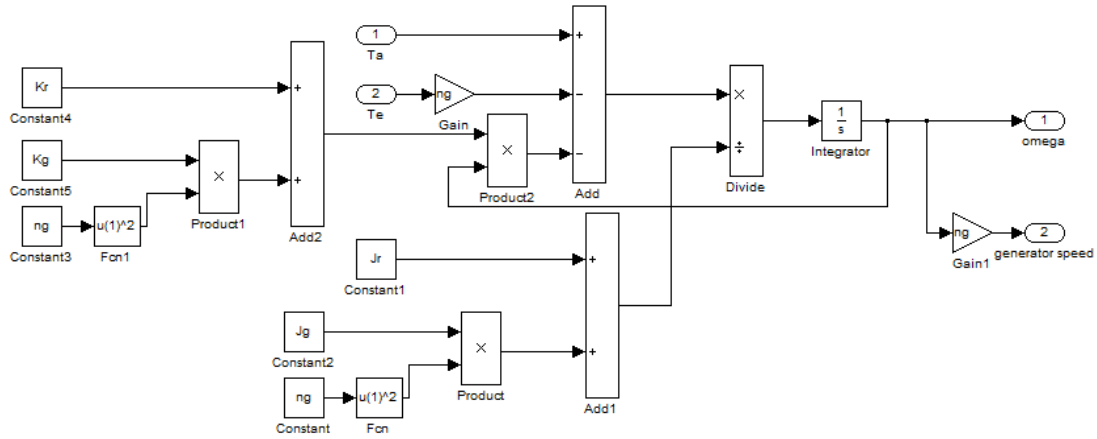


图 3.9 传动系统模型

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(3.30)：

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

其中， β_{ref} 为桨距角的参考值(°)； β 为实际输出的桨距角值(°)； τ 为时间常数。

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

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； θ_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， β 为统一变桨的桨距角。

根据公式(3.19)~(3.22)，独立变桨风力发电机组的执行机构的仿真结构图如下所示。

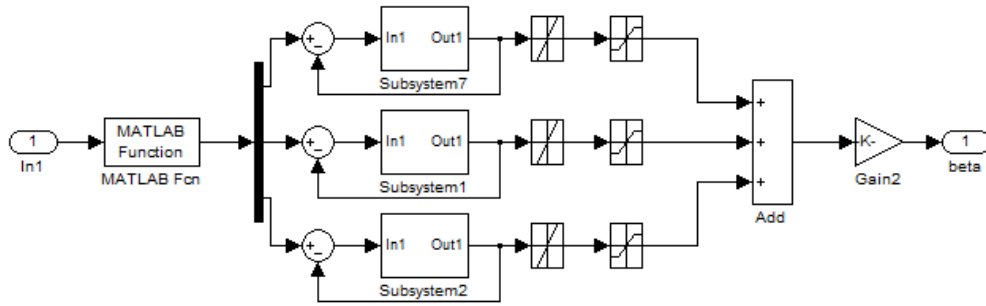


图 3.11 独立变桨执行机构

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^[63]：

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

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

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； ω_g 为发电机转速(rad/s)； ω_r 为风轮转速(rad/s)； ω_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(Ω)； r_2' 和 x_2' 分别为转子绕组电阻和漏抗(Ω)。

利用公式(3.23)搭建的发电机仿真结构图，如图 3.10 所示：

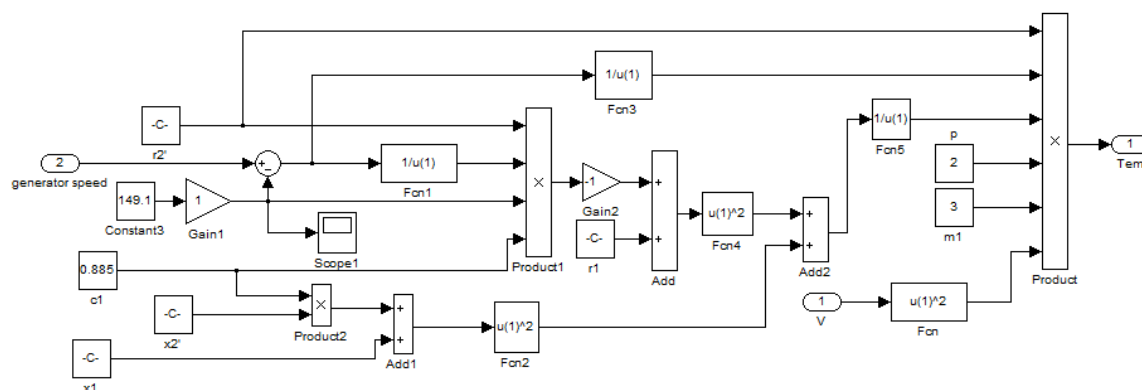


图 3.10 发电机仿真结构图

3.2 风力发电机组控制方法

对风力发电控制系统模型的非线性主要体现在风轮所捕获的风能大小上，风力机实际捕获的机械功率与空气密度、风速、风轮扫掠面积、风能利用系数等因素相关。由此不难看出风速的随机性及风能利用系数的复杂性使得控制系统的非线性模型难于建立。因此需要根据被控对象的物理特征，以及相应的基础理论建立出能够反映被控对象特征的非线性模型。

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。

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，形成新的控制率。下图是状态反馈的系统结构图：

添加图片

图中为状态反馈的基本形式。其中是状态变量的估计值， K 是一个常系数矩阵（比例环节），通常称为反馈增益矩阵。如果原系统是定常线性系统(A , B , C)，则在引入状态反馈 K 以后，系统就化成($A-BK$, B , C)。状态反馈把系统的动态矩阵 A 变成 $A-BK$ ，但不影响输入矩阵 B 和输出矩阵 C 。

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

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

的原点是渐进稳定的。故当矩阵 $A - BK$ 是 Hurwitz 矩阵时便可满足闭环系统渐进稳定。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，随着状态观测器理论和状态估计方法的发展（特别是由于卡尔曼-布什滤波方法的出现），在很多情况下已不难获得状态变量的良好实时估计值，状态反馈方法已进入了实用阶段。

3.2.2 PID 控制

PID 控制，即比例积分微分控制，是由比例单元、积分单元和微分单元三部分组成。PID 控制器由于结构简单、控制效果理想，在工业系统中得到了广泛地应用^[64]。有些应用场景不需要使用所有的单元，因此 PID 控制器又可变化为 PI 控制器、PD 控制器、P 控制器或 I 控制器。PID 算法可以表示为：

$$\begin{aligned} u(t) &= k_p[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t)dt + T_d \frac{d}{dt}e(t)] \\ &= k_p e(t) + k_i \int_0^t e(t)dt + k_d \frac{d}{dt}e(t) \end{aligned} \quad (3.27)$$

其中， k_p 为比例系数； T_i 为积分时间常数； T_d 为微分时间常数； k_i 为积分系数； k_d 为微分系数。

1) 比例环节

比例控制是控制器的输出与输入误差信号成比例关系，当仅有比例控制时系统输出存在稳态误差。比例环节的作用是成比例的反应系统反馈信号与设定之间的偏差，通过给出相应的控制指令来减小系统的偏差。

比例系数 k_p 的作用是加快系统的响应速度，提高系统的调节精度。比例系数的设置会对系统带来一定的影响，如果比例系数过大，虽然会加快系统的响应速度，减小稳态误差，但是容易产生超调，带来系统的不稳定；如果比例系数过小，会影响控制精度使控制品质降低，系统的响应时间变长，增加系统的调节时间，导致系统的动态特性和静态特性都变差，选取合理的比例系数十分必要。

2) 积分环节

积分环节的作用是消除静差，使系统的误差减小到零。积分程度的强弱是有积分时间常数 T_i 来确定， T_i 的值越大积分作用效果越弱，反之 T_i 的值越小积分作用效果越强。如果积分作用过强，在响应过程的初期会导致积分饱和现象的产生，

使系统响应过程有很大的超调量。

3) 微分环节

微分环节是起到提前预判的作用，是通过检测输出信号与给定之间的差值变化，来调节系统的控制量，使系统的动态性能得到改善，微分环节可以理解为一个简单的超前控制。在系统的误差信号出现过大大之前，就将对应的控制信号输入系统中，这样就加快了系统的响应动作。对于微分时间常数 T_d 的设定不能过大，设定的 T_d 如果过大，这将导致系统的调节时间变长同时使系统的抗干扰性能下降。

若 PID 控制器的参数未挑选妥当，其控制器输出可能是不稳定的，也就是其输出发散，过程中可能有震荡，也可能没有震荡，且其输出只受饱和或是机械损坏等原因所限制。不稳定一般是因为过大增益造成，特别是针对延迟时间很长的系统。

一般而言，PID 控制器会要求响应的稳定，不论程序条件及设定值如何组合，都不能出现大幅振荡的情形，不过有时可以接受临界稳定的情形

3.2.3 滑模控制

20 世纪 50 年代前苏联学者提出变结构控制，变结构控制起源于继电器控制和 Bang-Bang 控制，它与常规控制的区别在于控制的不连续性。滑模控制是变结构控制的一个分支。它是一种非线性控制，通过切换函数来实现，根据系统状态偏离滑模的程度来切换控制器的结构（控制律或控制器参数），从而使系统按照滑模规定的规律运行的控制方法。滑模控制现在已形成一套比较完整的理论体系，并已广泛应用到各种工业控制对象之中。滑模控制得到广泛应用的主要原因是，对非线性系统的良好控制性能，对多输入多输出系统的可应用性，对离散时间系统的建立良好的设计标准。滑模控制的重要的优点是健壮性，当系统处于滑动模型，对被控对象的模型误差、对象参数的变化以及外部干扰有极佳的不敏感性。

滑模变结构控制的原理，是根据系统所期望的动态特性来设计系统的切换超平面，通过滑动模态控制器使系统状态从超平面之外向切换超平面收束。系统一旦到达切换超平面，控制作用将保证系统沿切换超平面到达系统原点，这一沿切换超平面向原点滑动的过程称为滑模控制。由于系统的特性和参数只取决于设计的切换超平面而与外界干扰没有关系，所以滑模变结构控制具有很强的鲁棒性。超平面的设计方法有极点配置，特征向量配置设计法，最优化设计方法等，所设计的切换超平面需满足达到条件，即系统在滑模平面后将保持在该平面的条件。控制器的设计有固定顺序控制器设计、自由顺序控制器设计和最终滑动控制

3.3 风力发电机组运行稳定域

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^[7]。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：

$$\dot{x} = f(x) \quad (3.28)$$

设原点为该系统的渐进稳定平衡点，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(3.28)在 $t = 0$ 时刻初始状态的解。原点的吸引区记为 R_A ，定义为：

$$R_A = \{x \in D \mid \phi(t; x), \quad \forall t \geq 0, \phi(t; x) \rightarrow 0, t \rightarrow \infty\} \quad (3.29)$$

引理 3.1 若 $x = 0$ 是系统(3.28)的渐进稳定平衡点，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。例 3.1 给出了通过几何法确定吸引区的情况。

例 3.1 考虑二阶系统：

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

系统在原点有一个平衡点和一个非稳定极限环，由图 3.1 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。

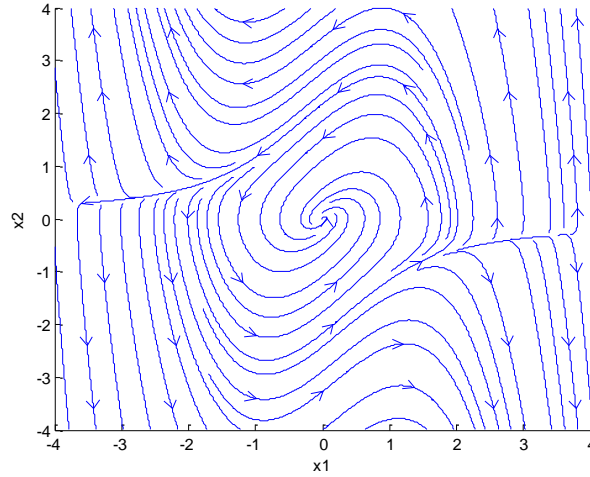


图 3.1 二阶系统相图

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 Ω 的轨线在之后的所有时刻都会保持在 Ω 内, 估计值可以表示为集合:

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

其中, Ω_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。

第四章 风力发电机组控制器设计及稳定域分析

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。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。本文从工程应用角度出发,基于状态反馈对风力发电机组分别设计了变速控制器和变桨控制器,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,并通过仿真验证了风力发电机组的稳定域。控制总框图如图 4.1 所示。

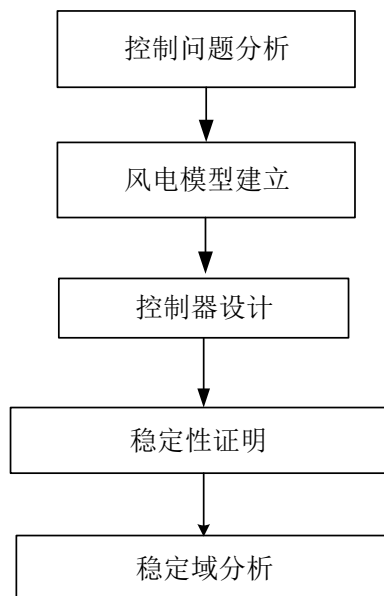
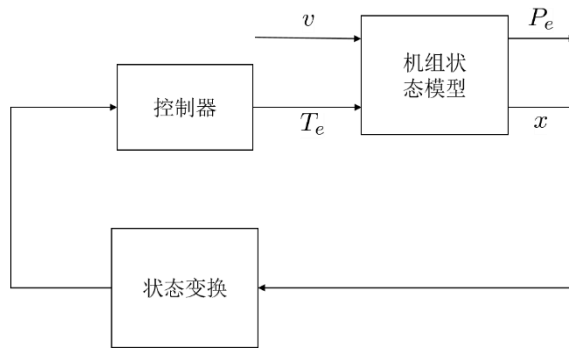


图 4.1 风电机组控制总框图

4.1 转矩控制器设计

在风速未达到额定风速时，变桨机构不动作，假设理想状态下桨距角为 0° 。风力发电机组做变速动作，随着风速的变化，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^[67]。

如图 4.2 所示变速风力发电机组的转矩-转速关系图，一般在 AB 段和 CD 段，理想的风力发电机组的发电机做恒转速运动，通过转矩 PI 控制器调整发电机给定转矩使发电机转速能够维持在恒定转速。在 AB 段，发电机转速维持在最低转速 ω_{\min} ，在 CD 段发电机转速维持在额定转速 ω_{rate} 。



4.1.1 状态反馈控制器设计

风力发电机组数学模型表达形式如(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， θ_r 为转子转动角度， ω_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， μ 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， ρ 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， ω_r^* 为风轮期望转速，且 $\omega_r^* = \frac{\lambda^* v}{R}$ ，

$\dot{\omega}_r^* = \frac{\lambda^* \dot{v}}{R}$, λ^* 最佳叶尖速比, ω_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 为传动转矩, 则状态转换后方程为:

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

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:

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

令 $K_1 = -B$ 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 $\dot{V} < 0$, 故设计控制器为:

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

稳定性证明: 将(4.9)代入(4.5), 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 $\dot{\bar{V}} < 0$, 即该系统稳定。

4.1.2 系统稳定域分析

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进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。风力发电机组运行过程中可能会发生一些故障, 包括**变桨故障等**, 这些故障会改变系统的结构, 可能会导致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。

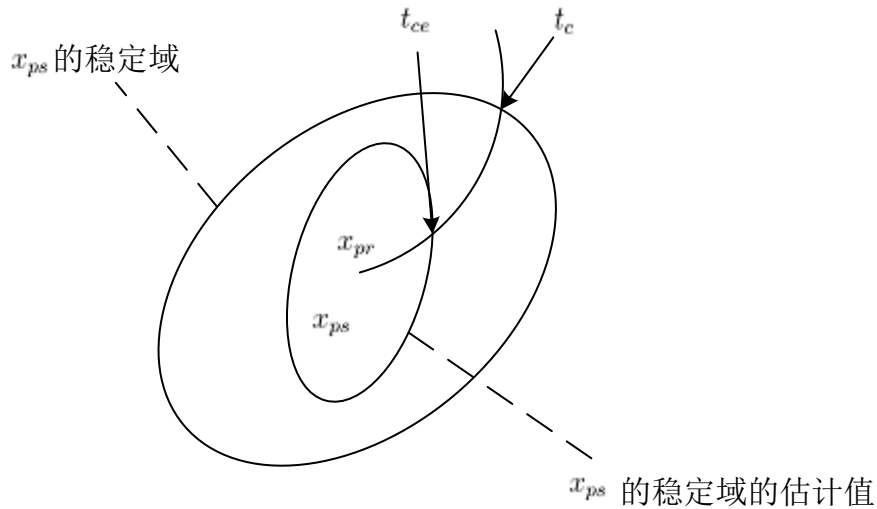


图 4.1 系统稳定域

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。

在式(4.8)中, 给定 $K_1 = -0.001$, $K_2 = -20000000$, $K_3 = -1$, $3 < V < 15$,

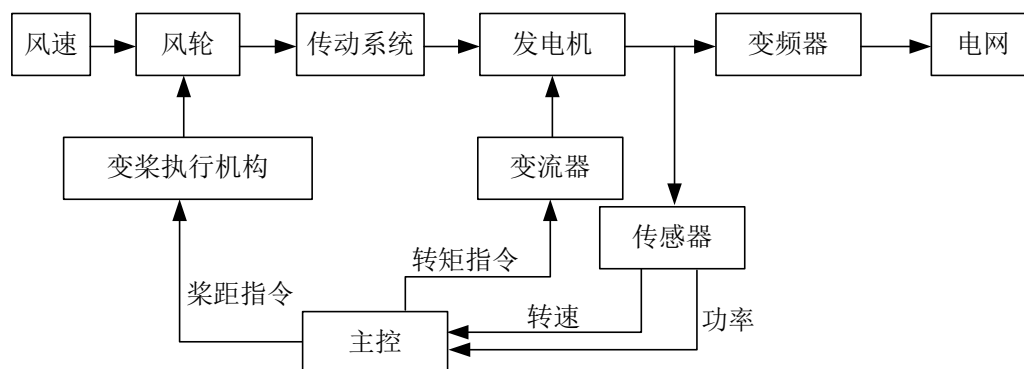
$\dot{\omega}_r^* = \frac{\lambda^* \dot{v}}{R}$, $-2 < \dot{v} < 2$, $\lambda^* = 7.9$, 为保证 $\dot{V} < 0$, 则 e_r 应满足一定条件, 经验证在 $-2 < e_r < 3$ 的条件下, $\dot{V} < 0$ 。又 $\omega_r = \omega_r^* - e_r$, $\omega_r^* = 2$ 则:

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

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。系统仿真框图如下所示。

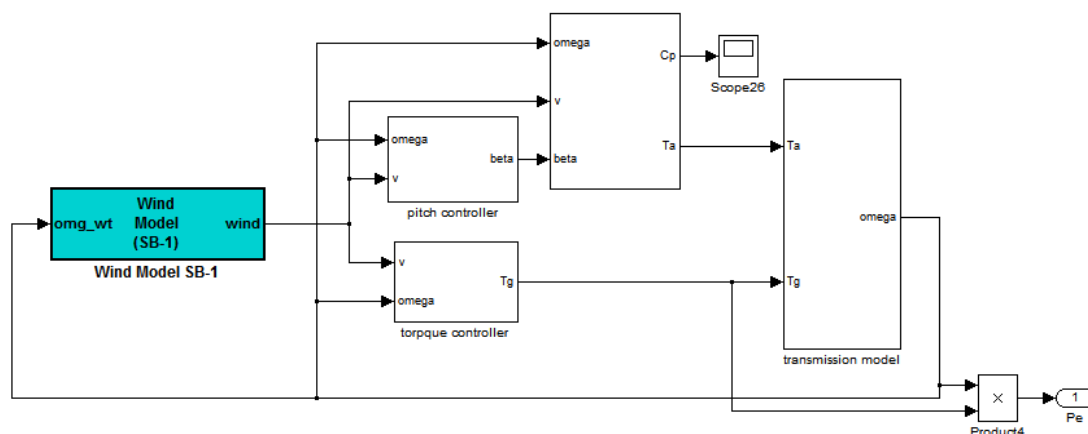


本文选择额定功率为 1.5MW 风力发电机组为研究对象, 风力发电机组相关参数为: 额定风速为 11 m/s, 风轮额定转速为 1.97 rad/s, 风轮半径为 38.5 m, 风轮转动惯量 J_r 为 $3.28 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 风轮阻尼系数 K_r 为 270.36 N·m/rad/s, 齿轮箱齿速比 n_g 为 75.76, 最大风能利用系数 $C_{p\max}$ 为 0.436, 最佳叶尖速比 λ_{opt} 为 6.3, 仿真时间设置为 300 s。其中转矩控制器和变桨控制器内部设置简单的逻辑切换装置, 保证不同的风况下相应的控制环起作用。整体仿真平台如图 4.10 所示。

表 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 ³
风轮转动惯量	3.28×10^6	Kg m ²
风轮额定转速	1.97	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	1.5×10^6	W



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，其仿真结果如下所示：

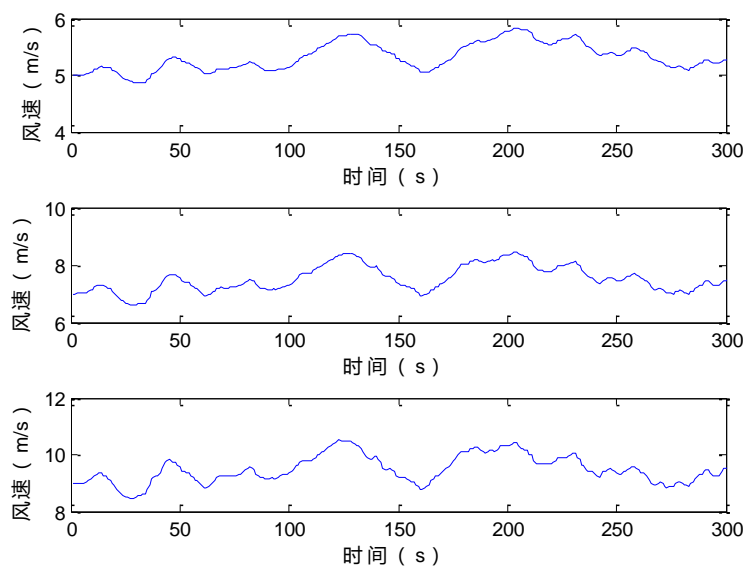


图 4.13 风速曲线图

从图中可以看出，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。

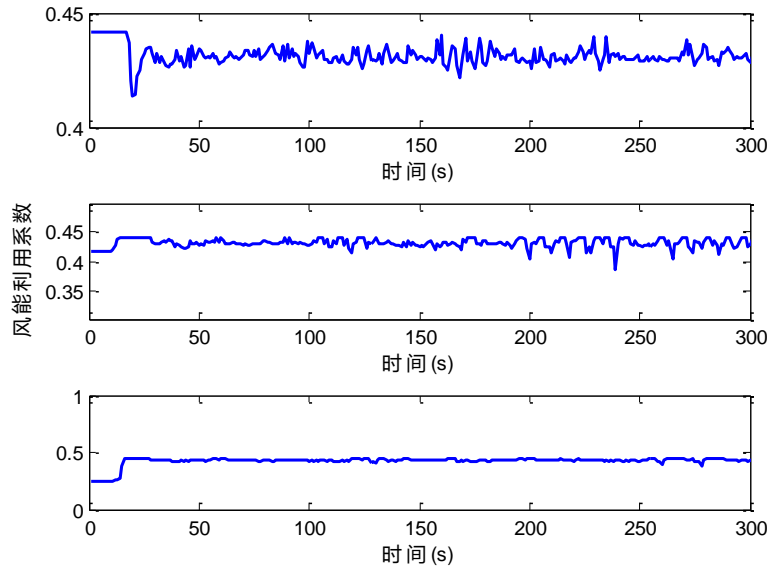


图 4.14 风能利用系数曲线图

图中从上往下依次为 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。

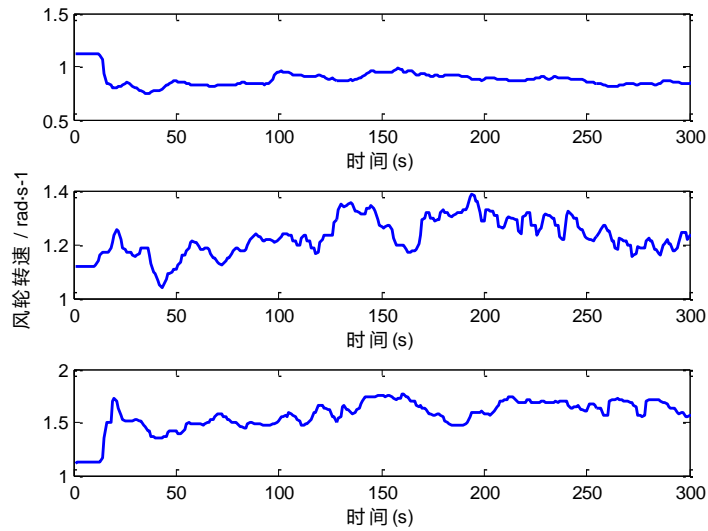


图 4.15 风轮转速曲线图

图中从上往下依次为 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，

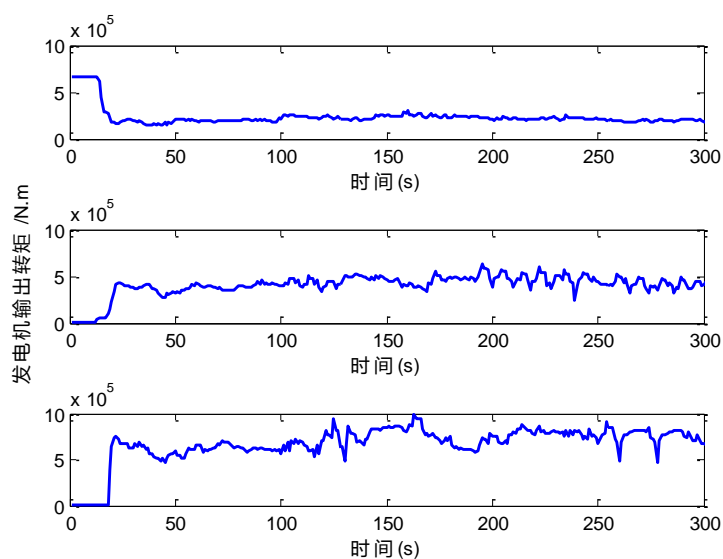


图 4.16 发电机转矩曲线图

图中从上往下依次为 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 200000N m ；风速为 7m/s 下，发电机输出转矩平均值为 500000N m ；风速为 9m/s 下，发电机输出转矩平均值为 800000N 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。

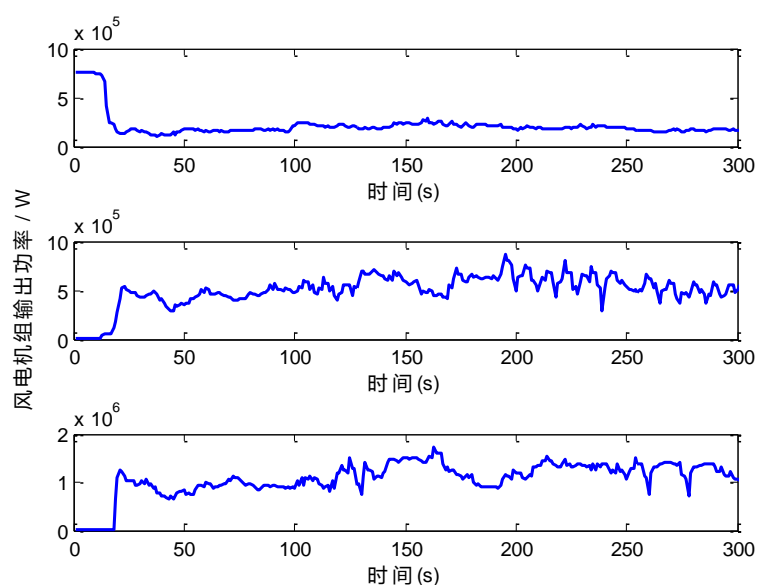


图 4.17 风力发电机组输出功率曲线图

图中从上往下依次为 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。

图 4.16、图 4.17 仿真结果表示，在风速未达到额定风速时，发电机转矩和风力发电机组输出功率都未达到额定值，风力发电机组追踪最佳功率曲线运行，这时的发电机输出转矩和风力发电机组输出功率达到最大化，满足基本控制目标。

图 6 和图 7 分别为风轮转速初始值为 4.5m/s 和 8m/s 下的风轮转速曲线图，图 6 中的风轮转速初始值在风机正常运行的稳定域内，故系统可以稳定；而图 7 中的风轮转速从 26 秒之后开始发散，由于其初始值不在风机正常运行稳定域内，故系统不能稳定。

4.2 变桨控制器设计

在风速达到额定风速时，理想状态下的风力发电机组输出功率为额定功率。当风速高于额定风速时，受风力发电机组载荷极限和机械极限等的限制，需要限制风能转换效率，使得发电机输出功率保持在额定功率。为了达到该控制目标，本节通过加性分解原理调节变桨 PI 控制器的增益，保证在高风速区，变桨系统具有良好的动态响应和稳定裕度。

在风速高于额定风速时，本文采用的变桨控制方案如图 4.6 所示，通过调整控制策略，即由额定转速和实际转速误差调节桨距角，继而控制风轮转速和风力发电机组输出功率。所设计的控制器的基本目标为在风速高于额定风速时保持功率输出稳定在额定功率。

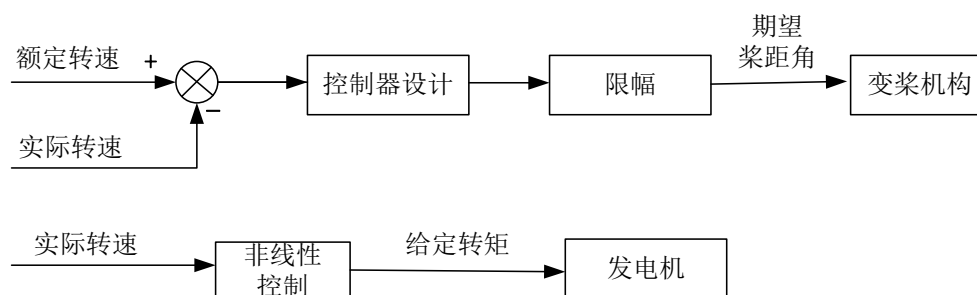


图 4.6 风力发电机组变桨控制方案

4.2.1 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，通过非线性控制给定发电机转矩，利用状态反馈设计变桨控制器提高发电质量。高速控制框图如下所示：

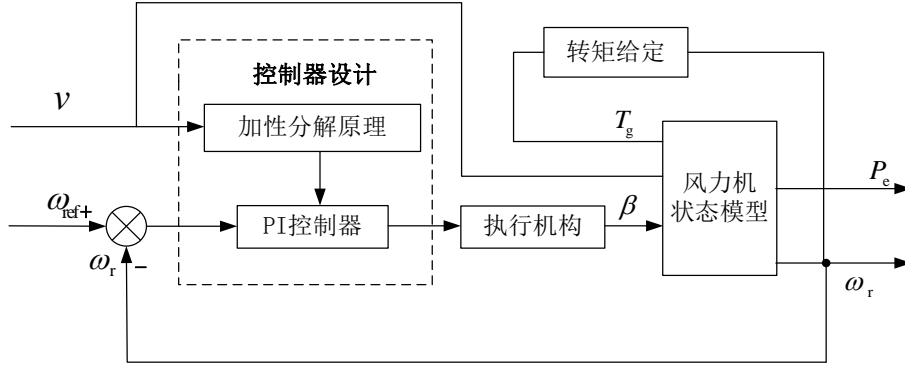


图 4.7 高速变桨控制方案

风力发电机组数学模型表达形式如(4.1)所示：

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

式中， θ_r 为转子转动角度， ω_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， μ 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：

$$T_a \approx \frac{1}{2} \rho \pi R^3 (-0.0026 \omega_r^2 R^2 + 0.0372 \omega_r R v - 0.0678 v^2) \quad (4.13)$$

其中， ρ 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：

$$\begin{cases} e_r = \omega_r^* - \omega_r \\ e_{T_e} = T_e - \bar{T}_e \end{cases} \quad (4.14)$$

其中， e_r 为风轮期望转速与实际转速之差， ω_r^* 为风轮期望转速，且 $\omega_r^* = \frac{\lambda^* v}{R}$ ， $\dot{\omega}_r^* = \frac{\lambda^* \dot{v}}{R}$ ， λ^* 最佳叶尖速比， ω_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 为传动转矩，则状态转换后方程为：

$$\begin{cases} \dot{\theta}_r = \omega_r \\ \dot{e}_r = \dot{\omega}_r^* - \frac{1}{J_r}(-K(\omega_r^* - e_r) - B\theta_r - (T_e - e_{T_e})) \\ \quad + \frac{1}{2}\mu\rho\pi R^3(-0.0026(\omega_r^* - e_r)^2 R^2 \\ \quad + 0.0372(\omega_r^* - e_r)RV - 0.0678V^2) \\ \dot{e}_{T_e} = \dot{T}_e - \left(-\frac{1}{\tau}(T_e - e_{T_e}) + \frac{1}{\tau}T_e\right) \end{cases} \quad (4.15)$$

整理，得：

$$\begin{cases} \dot{\theta}_r = \omega_r \\ \dot{e}_r = F(e_r, v, \mu) + \frac{B}{J_r}\theta_r + \frac{1}{J_r}e_{T_e} + \frac{1}{J_r}T_e \\ \dot{e}_{T_e} = -\frac{1}{\tau}e_{T_e} + \dot{T}_e \end{cases} \quad (4.16)$$

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：

$$T_e = [K_1 \quad K_2 \quad K_3] \begin{bmatrix} \theta_r \\ e_r \\ e_{T_e} \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

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

$$\begin{cases} \dot{\theta}_r = \omega_r \\ \dot{e}_r = F(e_r, V, \mu) + \frac{B}{J_r}\theta_r + \frac{1}{J_r}e_{T_e} + \frac{K_1}{J_r}\theta_r + \frac{K_2}{J_r}e_r + \frac{K_3}{J_r}e_{T_e} \\ \dot{e}_{T_e} = -\frac{1}{\tau}e_{T_e} + \dot{T}_e \end{cases} \quad (4.18)$$

令 $K_1 = -B$ 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：

$$\dot{\bar{V}} = e_r \dot{e}_r = e_r \left[F(e_r, V, \mu) + \frac{K_2}{J_r}e_r \right] \quad (4.19)$$

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：

$$T_e = -0.001\theta_r - 20000000e_r - \bar{T}_e \quad (4.20)$$

稳定性证明：将(4.9)代入(4.5)，得：

$$\begin{cases} \dot{\theta}_r = \omega_r \\ \dot{e}_r = F(e_r, V, \mu) - \frac{20000}{J_r} e_r \\ \dot{e}_{T_e} = -\frac{1}{\tau} e_{T_e} + \dot{T}_e \end{cases} \quad (4.21)$$

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

4.2.2 系统稳定域分析

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进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。风力发电机组运行过程中可能会发生一些故障，包括变桨故障等，这些故障会改变系统的结构，可能会导致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。

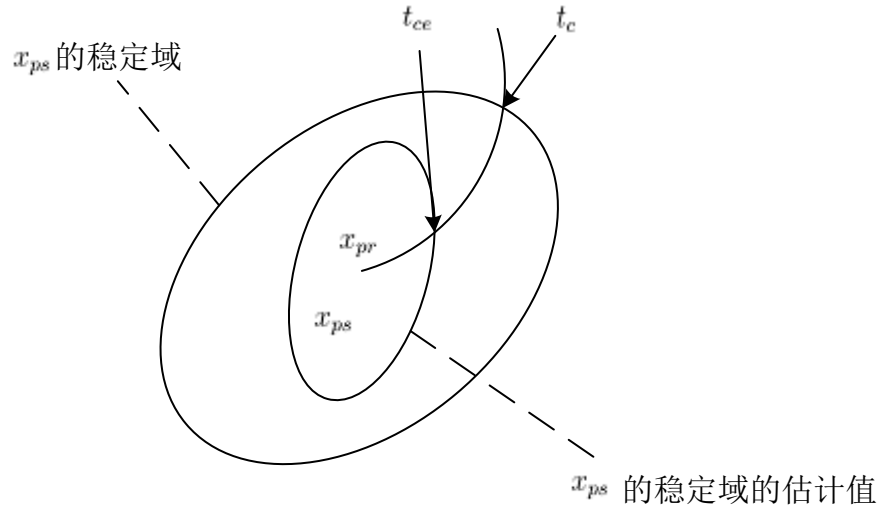


图 4.1 系统稳定域

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。

在式(4.8)中，给定 $K_1 = -0.001$ ， $K_2 = -20000000$ ， $K_3 = -1$ ， $3 < V < 15$ ，

$\dot{\omega}_r^* = \frac{\lambda^* \dot{v}}{R}$ ， $-2 < \dot{v} < 2$ ， $\lambda^* = 7.9$ ，为保证 $\dot{\bar{V}} < 0$ ，则 e_r 应满足一定条件，经验证在

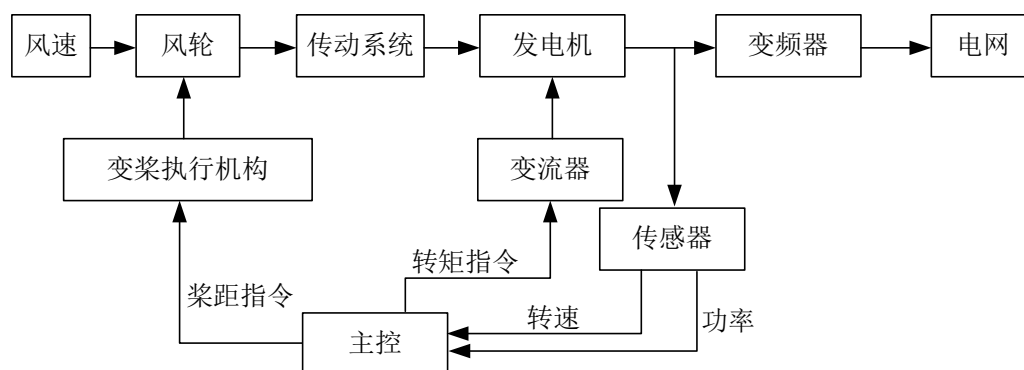
$-2 < e_r < 3$ 的条件下, $\dot{V} < 0$ 。又 $\omega_r = \omega_r^* - e_r$, $\omega_r^* = 2$ 则:

$$0 \leq \omega_r < 5 \quad (4.22)$$

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。

4.2.3 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。系统仿真框图如下所示。



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 1.97 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 λ_{opt} 为 6.3, 仿真时间设置为 120 s。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 4.10 所示。

表 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 ³
风轮转动惯量	3.28×10^6	Kg m ²
风轮额定转速	1.97	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	1.5×10^6	W

表 600KW 风电机组参数

参数	值	单位
风轮半径	21.65	m
空气密度	1.308	Kg/m ³
风轮转动惯量	3.25×10^5	Kg m ²
风轮额定转速	1.97	rad/s
风轮阻尼系数	270.36	N m/rad/s
齿轮箱齿速比	43.165	
最大风能利用系数	0.436	
额定功率	0.6×10^6	W

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，其仿真结果如下所示：

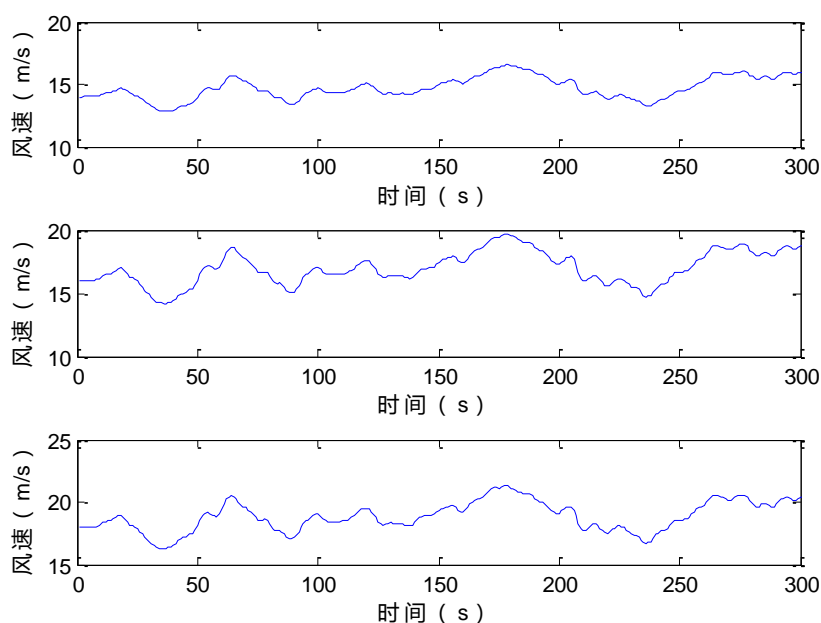
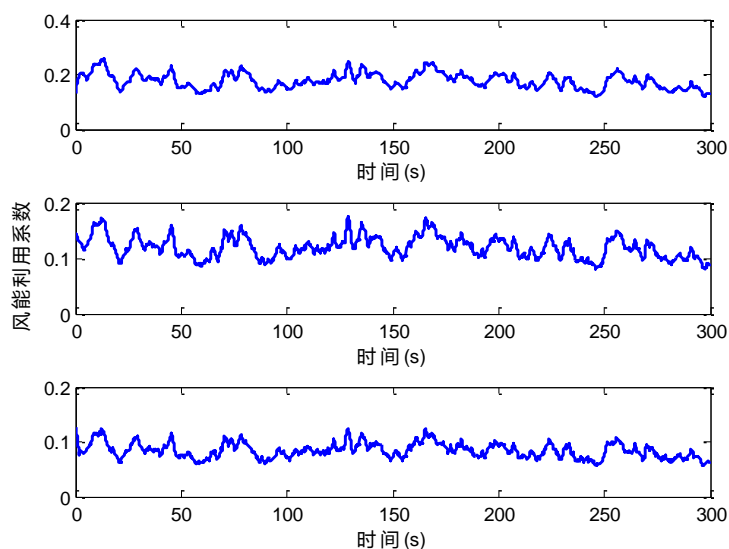


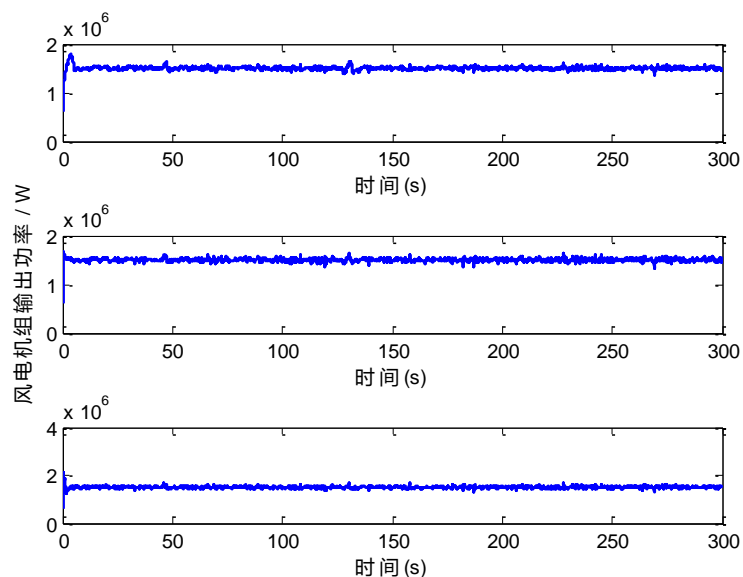
图 4.13 风速曲线图

从图中可以看出，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。

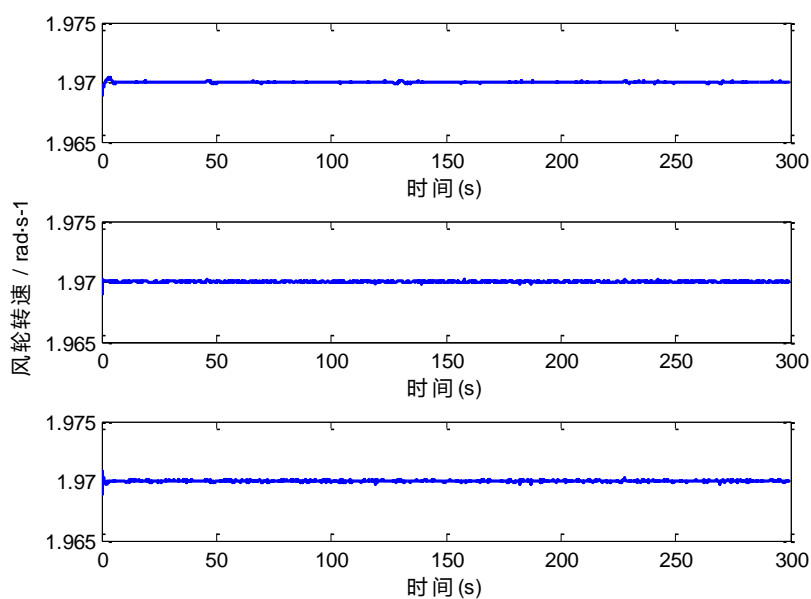


图中，从上往下依次是风速为 14m/s、16m/s 和 18m/s 状况下风能利用系数仿真结果。从图中可以看出，风速为 14m/s 时，风能利用系数平均值为 0.2，最

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，丢失的风能越多。

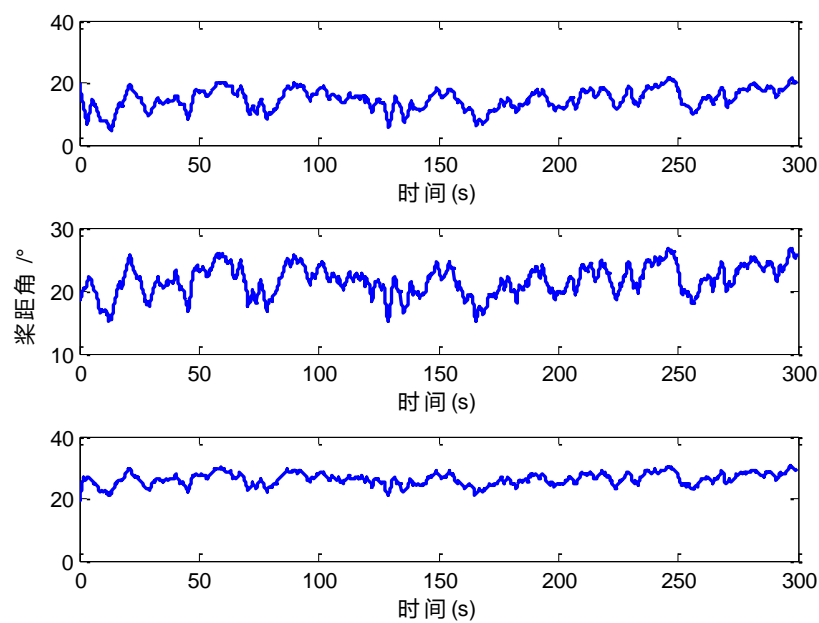


图中，从上往下依次是风速为 14m/s、16m/s 和 18m/s 状况下风电机组输出功率仿真结果。其中，三种风速下风电机组的输出功率都在额定功率范围内浮动，误差小于 8%，表明该控制器控制效果良好，且在在较广的风速范围内正常工作。



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° ；风速为 16m/s 时，桨距角平均值为 20° ；风速为 18m/s 时，桨距角平均值为 25° 。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。

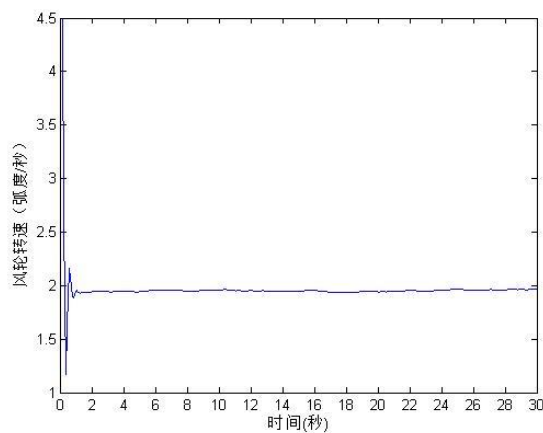


图 6 和图 7 分别为风轮转速初始值为 4.5m/s 和 8m/s 下的风轮转速曲线图，图 6 中的风轮转速初始值在风机正常运行的稳定域内，故系统可以稳定；而图 7

中的风轮转速从 26 秒之后开始发散, 由于其初始值不在风机正常运行稳定域内, 故系统不能稳定。

4.3 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 μ , 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 μ 的关系为:

$$C_p = \mu C_p(\lambda, \beta) \tag{4.23}$$

风电机组模型变为:

$$J_r \dot{\omega}_r = (-K_t \omega_r - B \theta_r + \mu T_a - \bar{T}_e) \tag{4.24}$$

其中, θ_r 为转子转动角度, ω_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, μ 为利用系数。 T_e 为发电机电磁转矩, $\tau = 0.01$ 。

本文在 $\mu = 0.8$ 和 $\mu = 0.6$ 这两个损耗系数下, 分别对低风速下和高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; 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所示:

表 仿真分组

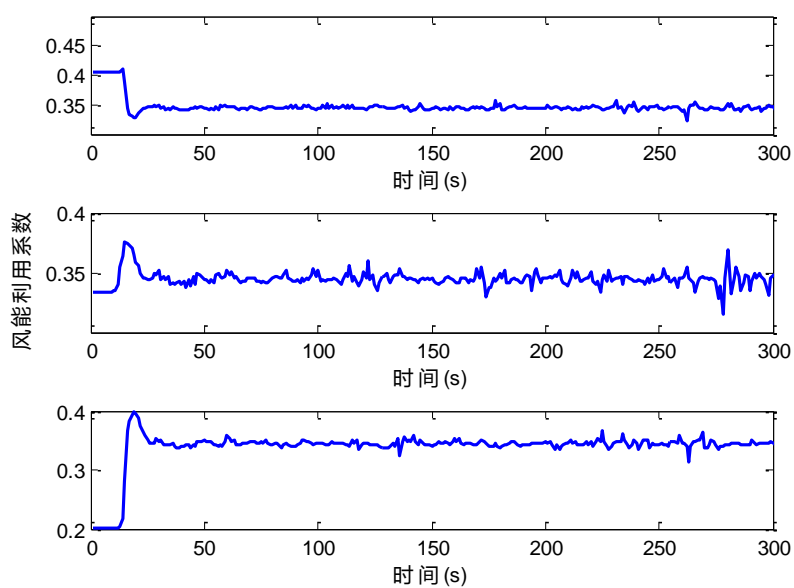
风机损耗系数	低风速 (m/s)	高风速 (m/s)
0.8	5	14
	7	16
	9	18
0.6	5	14
	7	16
	9	18

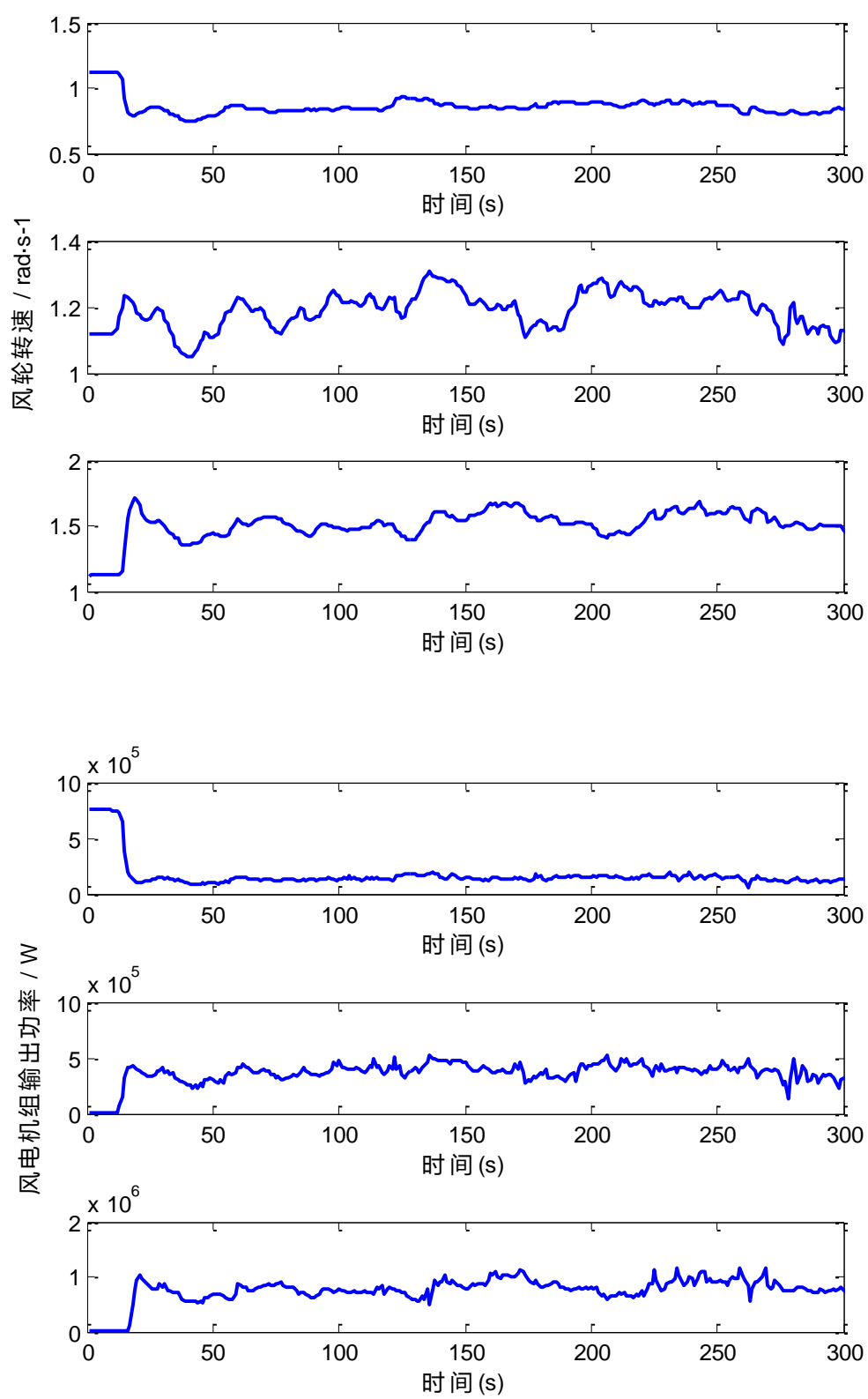
4.3.1 低风速仿真

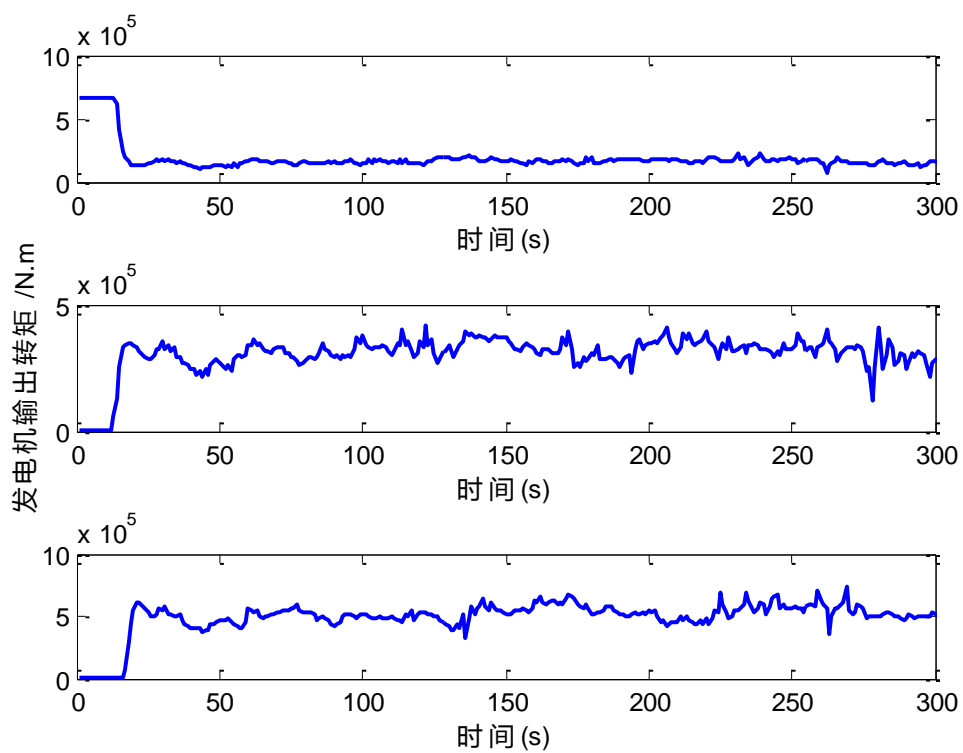
在风速低于额定风速阶段，通过逻辑切换激活低风速控制环，通过风轮的实际转速与期望转速误差进行控制调节，输出相应的给定转矩，使输出功率最大化。

仿真结果如图 4.13~图 4.17 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。

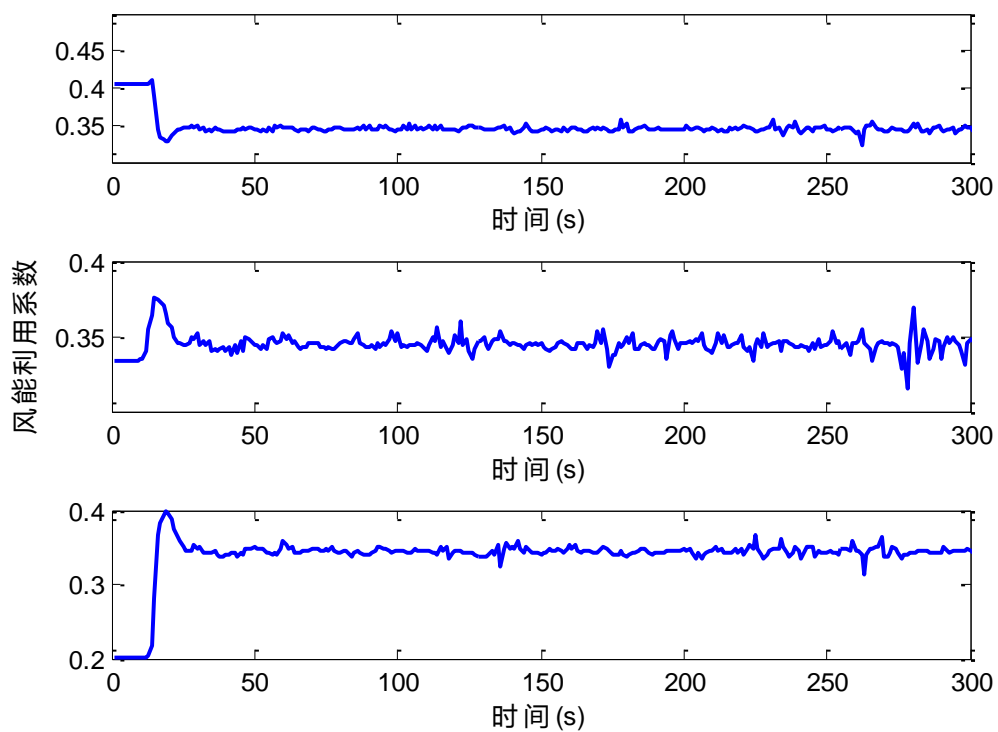
损耗系数为 0.8 时：

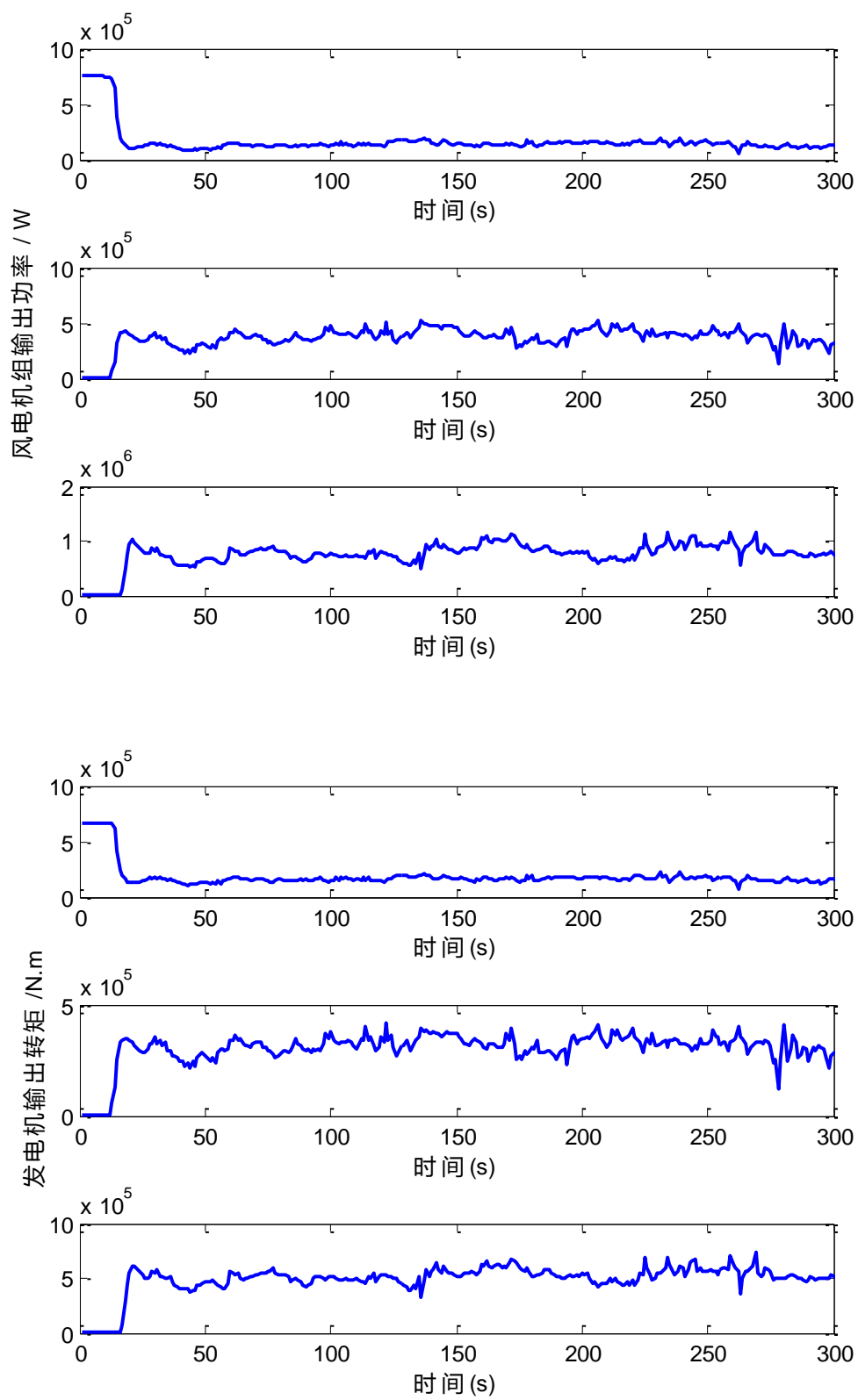


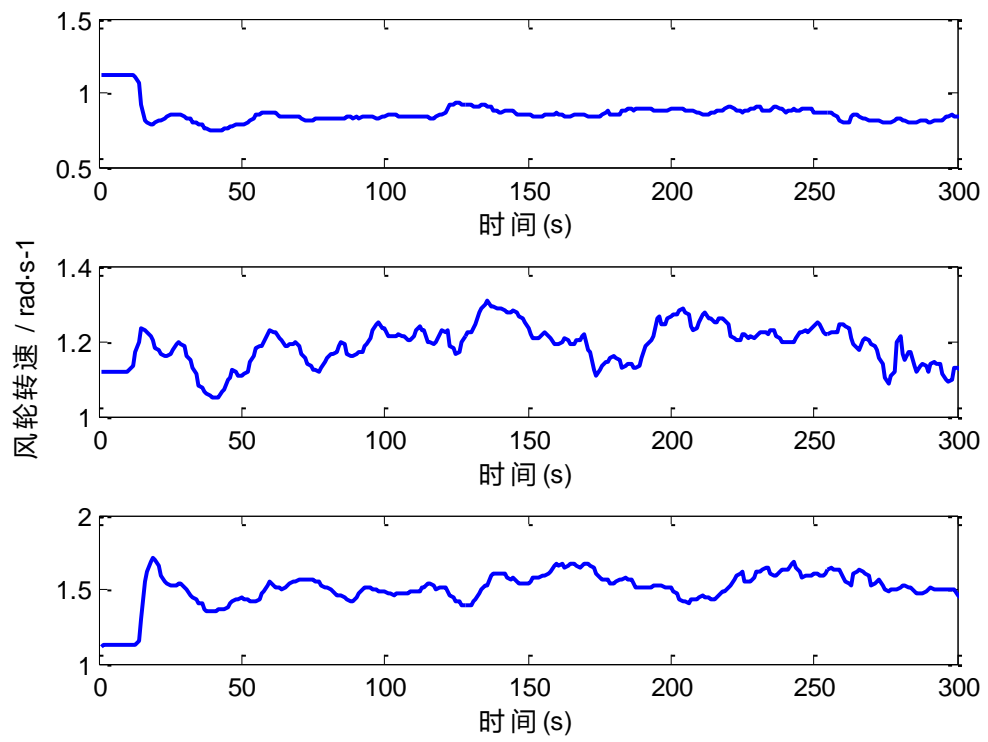




损耗系数为 0.6 时:

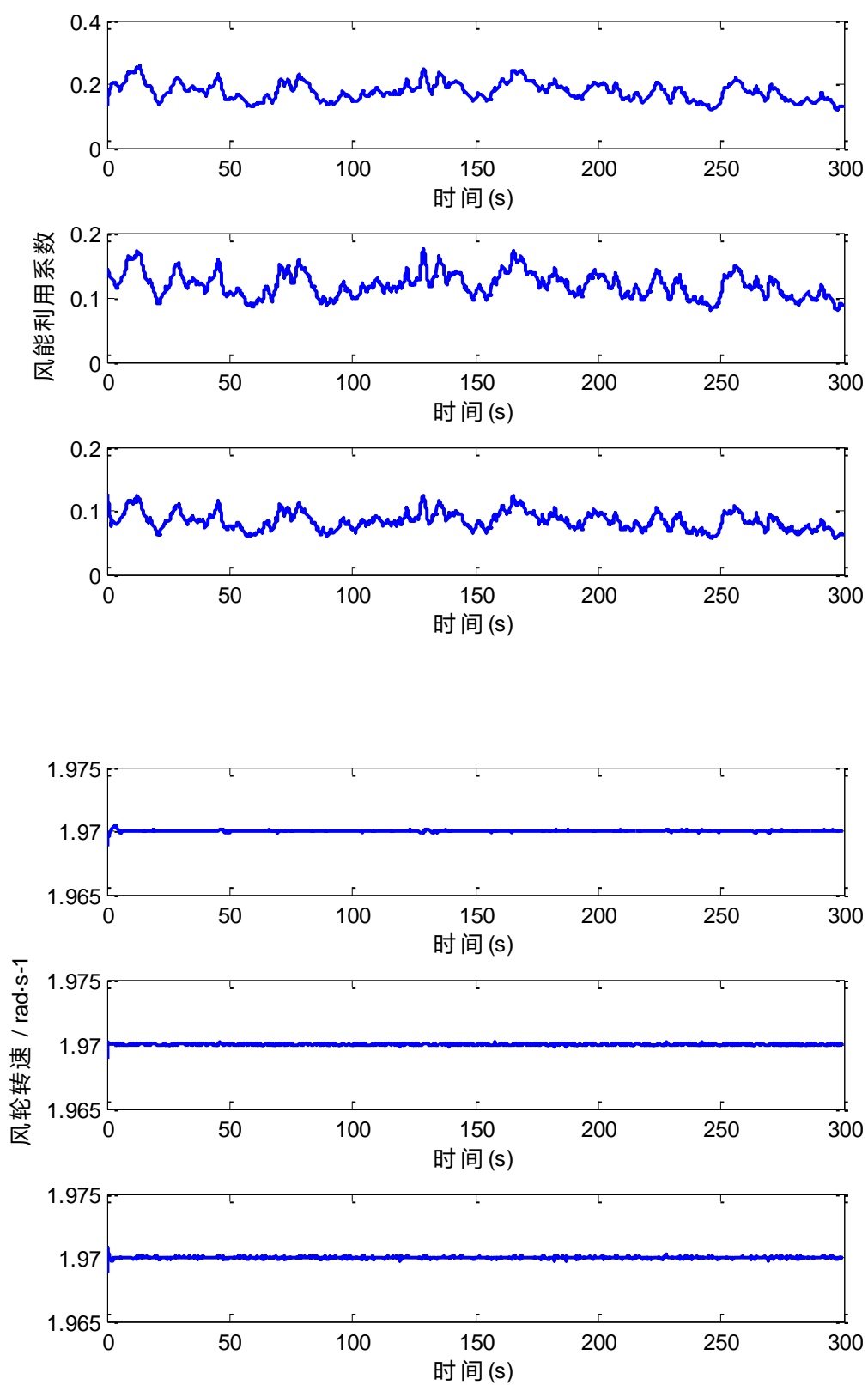


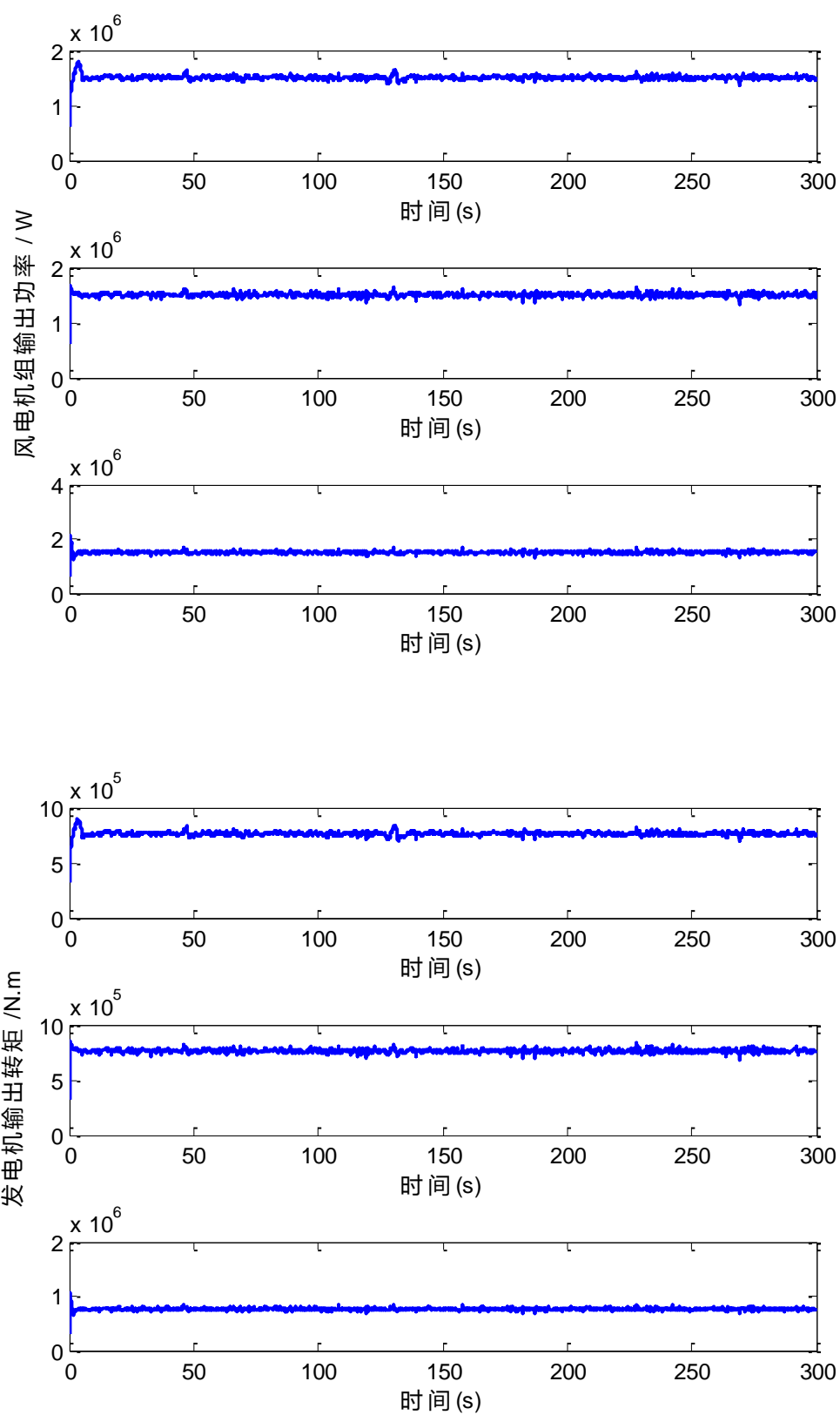


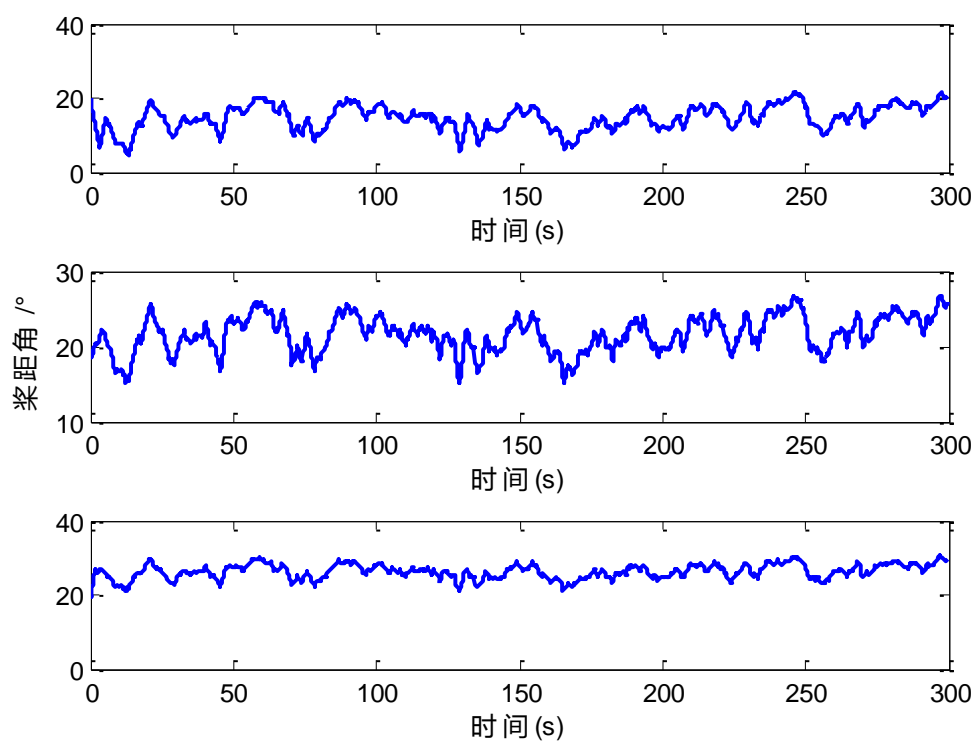


4.3.2 高风速仿真

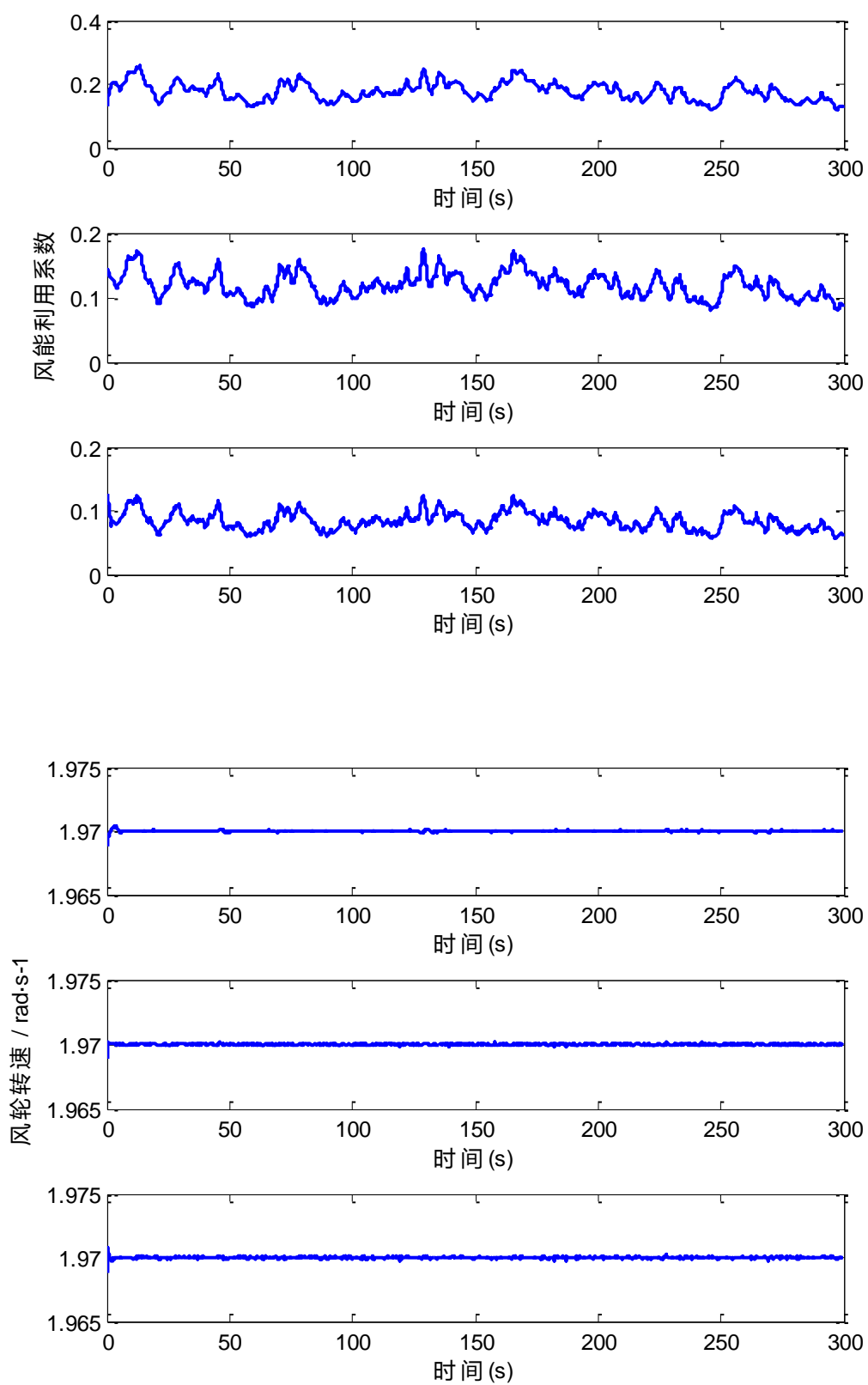
损耗系数为 0.8 时:

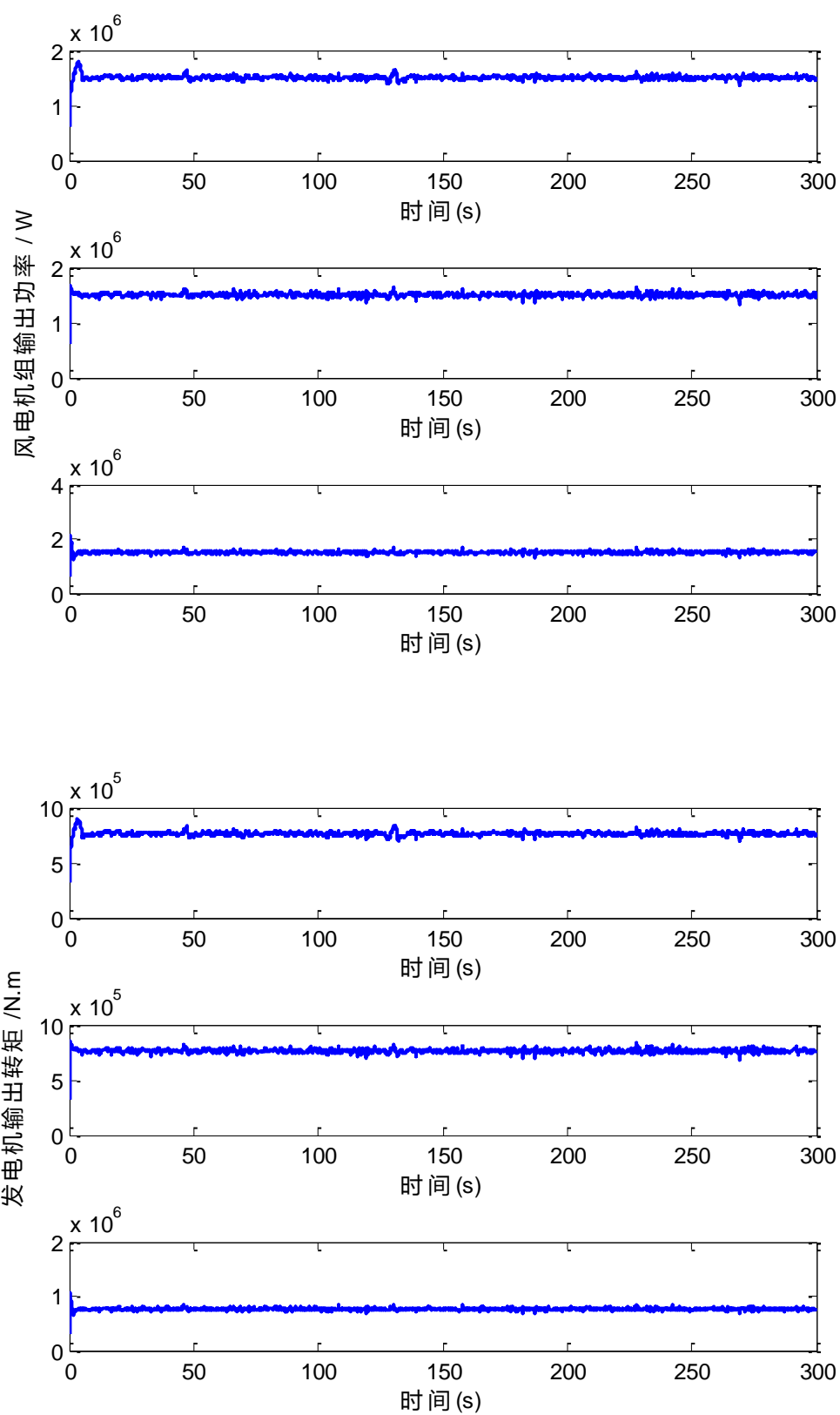


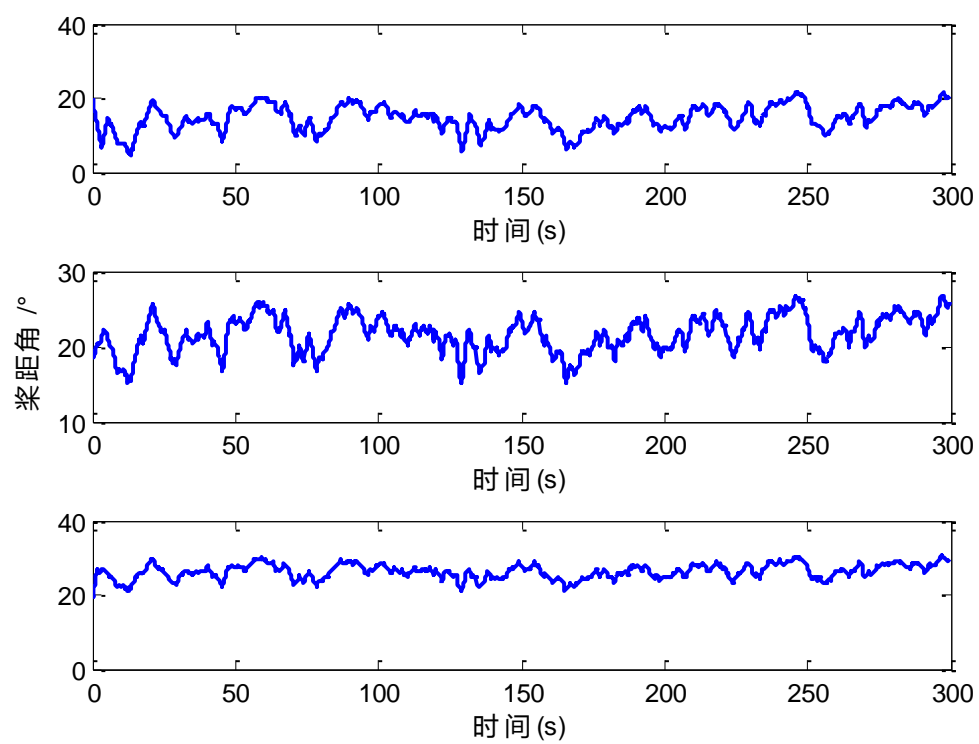




损耗系数为 0.6 时：







第五章 结论和展望

5.1 本文总结

常规能源过度使用，环境污染问题日益严重，风能作为可再生能源越来越受到各国的青睐，同时，风力发电控制技术也逐渐成熟。本论文通过阅读大量国内外文献对风电的发展及控制技术有了一定的认识。由于大型风力发电机组是复杂的非线性系统，具有不确定性和多干扰性，数学模型难以精确建立，并且智能控制算法计算量复杂且开发费用昂贵，于是结合风电场实际运行情况，提出将加性分解原理用于风力发电机组，规范变速变桨风力发电机组控制器的设计，提供稳定性证明。

主要研究内容和成果如下：

1) 全面深入的综述了变速变桨控制技术的相关研究工作

针对大型变速变桨风力发电机组，介绍了目前学术领域中所研究的控制技术，并针对实际工程中所采用的控制技术(PID 控制技术或 PI 控制技术)原理做了简单的介绍，然后从工程应用的角度提出基于加性分解原理规范 PID 控制器参数设计的必要性。

2) 建立风电仿真平台

由空气动力学知识，理论分析风力发电机组的基本工作原理和能量转换过程，分别建立风速模型、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，在各个模型的基础上搭建风力发电机组控制系统仿真平台。

3) 将加性分解原理应用于风力发电机组控制器设计中

基于加性分解原理将风力发电机组复杂的非线性模型分解为主系统和辅系统两个子系统，针对主系统，通过选择一个特殊的低通滤波器，最终设计出简单的转矩 PI 控制器和变桨 PI 控制器，并且对原系统通过理论推导证明稳定性。

4) 采用 Matlab/Simulink 工具仿真验证课题提出的控制策略

将设计的转矩 PI 控制器和变桨 PI 控制器分别应用到低风速仿真平台和高风速仿真平台中，由仿真结果分析得出，低风速控制阶段能够达到跟踪最佳功率系数，获得最大功率的控制目标，高风速阶段能够达到将输出功率稳定在额定功率的控制目标。

5.2 本文展望

本论文取得了一定性的成果，但由于风力发电机组是一个十分复杂的系统，综合了电气、机电、液压、流体力学等各个学科，本论文只是在理想的状态下分别对风速低于额定风速的转矩控制部分和风速高于额定风速的变桨控制部分进行了研究，没有考虑机组运行时带来的一些损耗，由于个人能力有限，论文还存在不足之处，在下一步工作中会综合考虑各方面因素影响对改进控制策略的影响。

结合到目前所做的工作和出现的问题，对论文的后续工作展望为：在进行风力发电机组建模时，需考虑到风力发电机组运行时出现的抖动情况及损耗情况，进一步完善风力发电机组模型，增加整个系统可靠性。本论文只是基于理论进行了控制器设计，下一步希望用实践验证理论，这才是进行学术工作的真正意义所在。

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] 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.
- [3] 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.
- [4] 王浩. 大型风力发电机组变桨距控制技术的研究 [D]. 湖南; 中南大学, 2011.
- [5] 何满. 中国风电产业政策研究 [D]. 武汉; 华中师范大学, 2013.
- [6] CWEA. 2014 年中国风电装机容量统计 [J]. 风能, 2015(02): 36-49.
- [7] 马进, 程代展, 梅生伟, et al. 基于半张量理论的电力系统稳定域边界逼近 (二)应用 [J]. 电力系统自动化, 2006, 11): 7-12.
- [1] Shikha, Bhatti T S, Kothari D P. Aspects of technological development of wind turbines[J]. Journal of Energy Engineering, 2003, 129(3): 81-95.
- [2] 梁婷婷. 大型风力发电机的鲁棒自适应控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2012.
- [3] 龚宇琴. 风电机组独立变桨控制策略的研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
- [4] 徐琴, 楼俊尚. 风电并网现状及产业前景分析[J]. 华东电力, 2012, 40(12): 2145-2147.
- [5] 韩超. 新能源产业发展态势、政府扶持逻辑与政策调整方向——基于国际比较的视角 [J]. 国际贸易, 2013(9): 29-35.
- [6] 李军军, 吴政球, 谭勋琼, 等. 风力发电及其技术发展综述[J]. 电力建设, 2011, 32(8): 64-72.
- [7] 谢双义. 变速变桨风力发电机组的运行控制策略研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [8] 陈前程. 风电场输出功率的短期预测研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012.
- [9] Chae, Wook Lim. Torque control methods for wind turbines and their responses[C]. 2012 12th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), Republic of Korea, Jeju, 2012: 1788-1790.
- [10] 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, 28(12): 1321-1328.
- [11] Boukhezzar B, Siguerdidjane H. Nonlinear control with wind estimation of a DFIG variable speed wind turbine for power capture optimization[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(4): 885-892.
- [12] Beltran B, Ahmed-Ali T, Benbouzid M E H, et al. Sliding mode power control of variable-speed wind energy conversion systems[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2008, 23(2): 551-588.
- [13] Beltran B, Ahmed-Ali T, Benbouzid M E H, et al. High-order sliding-mode control of variable-speed wind turbines[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2009, 56(9): 3314-3321.
- [14] 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, 19(1): 69-72.
- [15] 赵佩宏, 李建林, 鄂春良. 变速风力机的最大风能捕获控制策略研究[J]. 电气传动, 2009, 39(6): 3-6.

-
- [16] Fernando V, Puleston P F. Variable structure control of a wind energy conversion system based on a brushless doubly fed reluctance generator[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2007, 22(2): 499-506.
 - [17] Ralph B, Kostas M, John L. Nonlinear control of wind turbines: an approach based on switched linear systems and feedback linearization[C]. 50th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference, Hilton Orlando Bonnet Creek, 2011: 5485-5490.
 - [18] Kumar A, Stol K. Simulating feedback linearization control of wind turbines using high-order models[J]. Wind Energy, 2010, 13(5): 419-432.
 - [19] 陈思哲, 吴捷, 姚国兴, 等. 基于微分几何的风力发电机组恒功率控制[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(2): 336-340.
 - [20] 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.
 - [21] Yoonsu N, Jeonggi K, Insu P, et al. Feed forward pitch control using wind speed estimation[J]. Journal of Power Electronics, 2011, 11(2): 211-217.
 - [22] 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(自然科学版), 2008, 35(1): 1-8.
 - [23] Bakka Tore, Karimi Hamid Reza. A linear parameter-varying approach to H_∞ control of an offshore wind turbine[C]. Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference, United states, Anchorage, 2013: 434-439.
 - [24] Li Liuying, Ren Yaxing, Jiang Lin, et al. Hardware implementation of smooth region switching for wind turbine control using PDF controller[C]. Proceedings of 2013 International Conference on Renewable Energy Research and Applications, Madrid, 2013: 115-120.
 - [25] Jelavic M, Peric N, Petrovic I. Identification of wind turbine model for controller design[C]. 2006 12th International Conference on Power Electronics and Motion Control, Portoroz, Slovenia, 2006: 1608-1613.
 - [26] Camblong H. Digital robust control of a variable speed pitch regulated wind turbine for above rated wind speeds[J]. Control Engineering Practice, 2008(16): 946-958.
 - [27] Geng H, Yang G. Output power control for variable-speed variable-pitch wind generation Systems[J]. IEEE Transaction on Energy Conversion, 2010, 25(2): 494-503.
 - [28] 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(5): 63-65.
 - [29] Chen Fuqing, Yang Jinming. Fuzzy PID controller used in yaw system of wind turbine[C]. 2009 3rd International Conference on Power Electronics Systems and Applications, Hong Kong, 2009: 1-4.
 - [30] Wang Zhijie, Liu Sanming, Liu Tianyu. Intelligent controlling of wind turbine based on fuzzy immunity PID algorithmic[C]. 2010 International Conference on Biomedical Engineering and Computer Science, Wuhan, 2010: 1-4.
 - [31] 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, 28(6): 681-686.

-
- [32] 陈光宇. 基于神经网络 PID 的变速变桨距控制设计[J]. 制造业自动化, 2010, 32(9): 85-87.
- [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(4): 49-53.
- [34] 王飞, 朱金芳. 基于神经网络模型参考的风力机变桨距控制系统的设计[J]. 华东电力, 2012, 40(12): 2207-2210.
- [35] Johnson K E, Fingersh L. Adaptive pitch control of variable-speed wind turbines[J]. Journal of Solar Energy Engineering, Transactions of the ASME, 2008, 130(3): 0310121-0310127.
- [36] Kim Jinsung, Jeon Jonghyun, Heo Hoon. Design of adaptive PID for pitch control of large wind turbine generator[C]. 2011 10th International Conference on Environment and Electrical Engineering, Italy, Rome, 2011: 1-4.
- [37] 任丽娜, 焦晓红, 邵立平. 双馈变速恒频风力发电系统的鲁棒控制[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(4): 377-382.
- [38] 马晓岩. 兆瓦级风电机组独立变桨距控制系统研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2011.
- [39] 叶杭冶. 大型并网风力发电机组控制算法研究[D]. 浙江: 浙江大学, 2008.
- [40] 袁茗, 杨俊, 武美萍. 兆瓦级风机偏航系统仿真分析与优化[J]. 机械设计与制造工程, 2014, 43(8): 18-21.
- [41] 李学伟. 基于数据挖掘的风电机组状态预测及变桨系统异常识别[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [42] 韩毅. 风能资源统计特性与直叶片 H 型垂直轴风力机气动性能分析[D]. 西安: 西北大学, 2014.
- [43] 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.
- [44] 王立鹏, 巫发明. 减小变速变桨型风电机组载荷的控制策略研究[J]. 西华大学学报, 2011, 30(2): 70-74.
- [45] 罗敏. 大型风力发电机组变速变桨距控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013.
- [46] Kim Hongwoo, Kim Sungsoo, Ko Heesang. Modeling and control of PMSG-based variable-speed wind turbine[J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(1): 46-52.
- [47] Lim Chaewook. Study on properties of pitch control for wind turbine[J]. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, 2011, 35(1): 59-65.
- [48] 林勇刚, 李伟, 叶杭冶, 等. 变速恒频风力机组变桨距控制系统[J]. 农业机械学报, 2004, 35(4): 110-114.
- [49] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
- [50] 李倩. 大型风力发电机组统一变桨距控制方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2012.
- [51] Gao Feng. Individual pitch control of wind turbine based on blade element theory[C]. 2012 International Conference on Automatic Control and Artificial Intelligence, 2012, Xiamen, 1218-1221.
- [52] 兰志超. 大型风力发电厂运行仿真及研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [53] Florin Iov, Anca Daniela Hansen, Poul Sørensen. Wind turbine blockset in matlab/simulink[D]. Aalborg University, 2004.
- [54] 吕翔宙. 兆瓦级风力发电机组变桨距控制研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2011.

-
- [55] 赵亮, 吕剑虹, 向文国. 采用极值搜索法的风电机组最大风能追踪控制[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 171-176.
- [56] 向恺. 基于 MATLAB 的风力发电系统仿真研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2007.
- [57] 王立军. 变速变桨距风力发电机组的滑模变结构控制技术研究[D]. 上海: 华东理工大学, 2010.
- [58] 江小林. 小型风力发电机组及其控制技术的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [59] 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.
- [60] 杨巨庆, 黄健, 段丽华. PID 控制技术与应用[J]. 哈尔滨师范大学自然科学学报, 2004, 20(2): 76-79.
- [61] 侯世旭. 大型双馈风电机组多目标优化控制[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2013.
- [62] 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, 2013.
- [63] 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、王贞贞和廖杰对我的帮助，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！