
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

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

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 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 -
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 风力发电机组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 -

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。

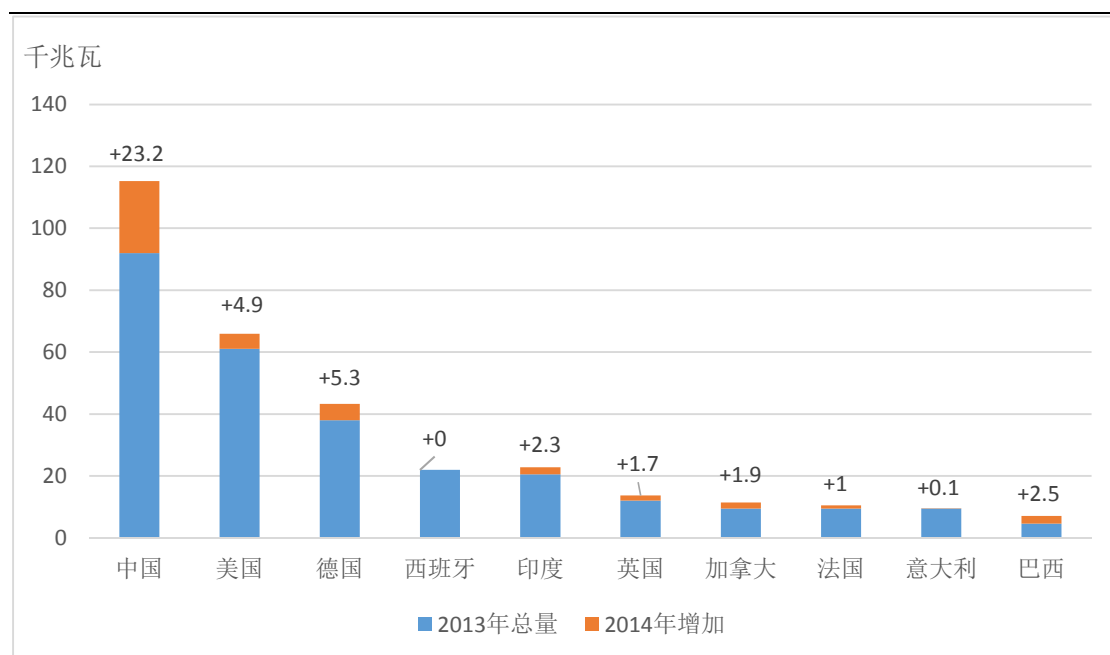
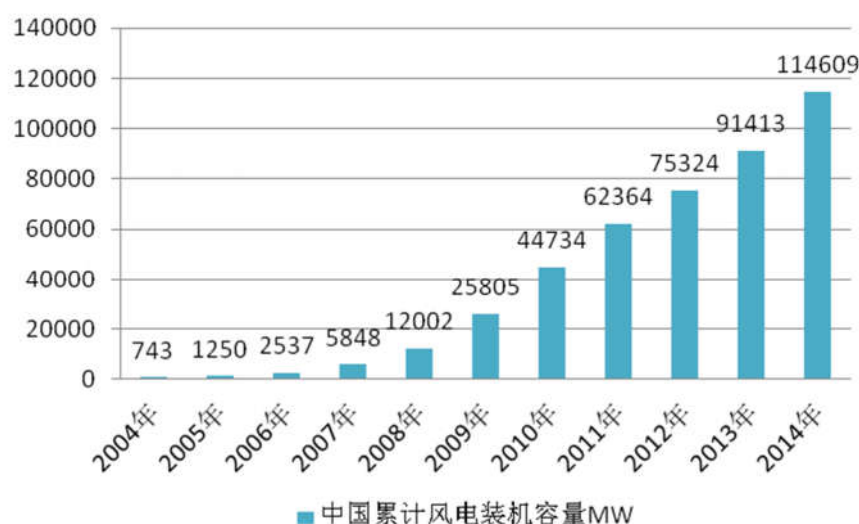


图 2 2014 风力发电容量增加前十的国家

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

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,

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

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。

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。

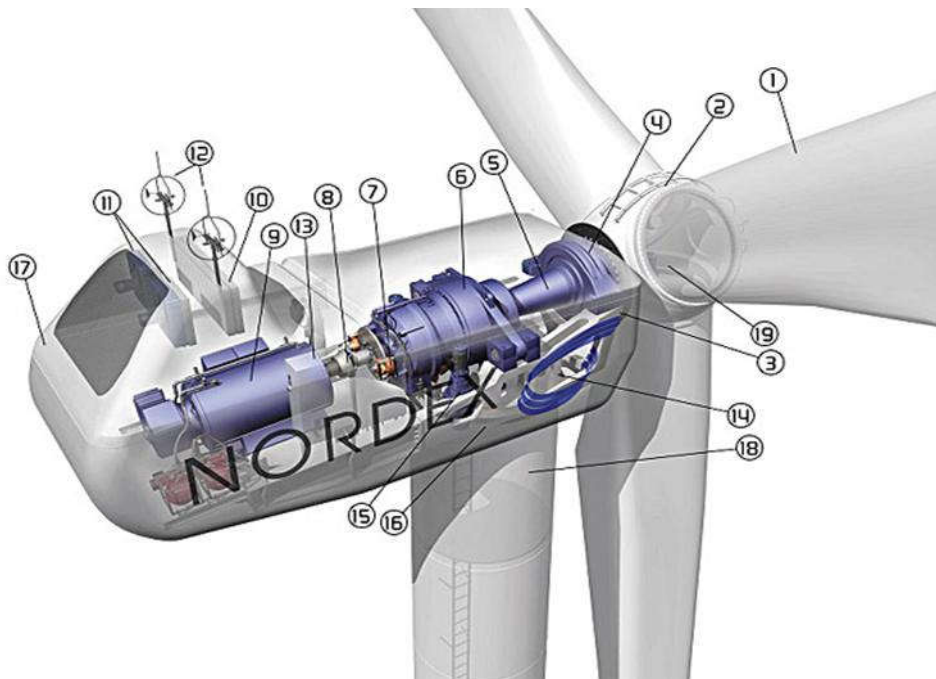


图 风力发电机组结构

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，

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。

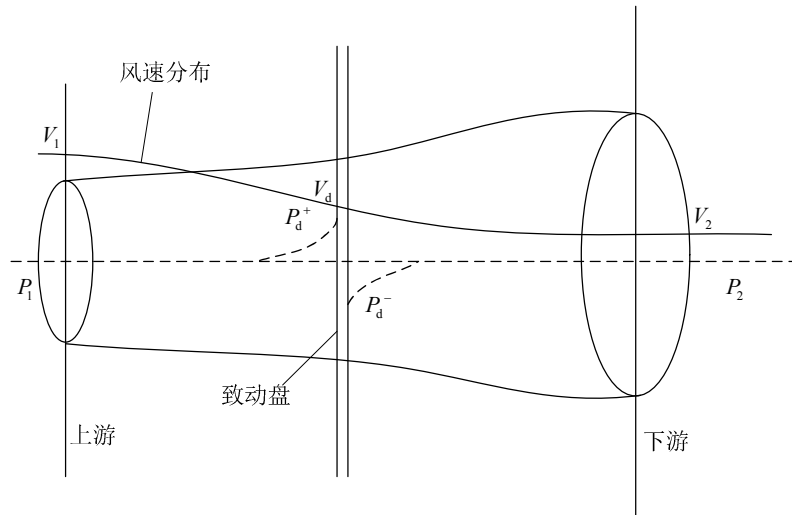


图 2.2 致动盘模型

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：

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

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

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。

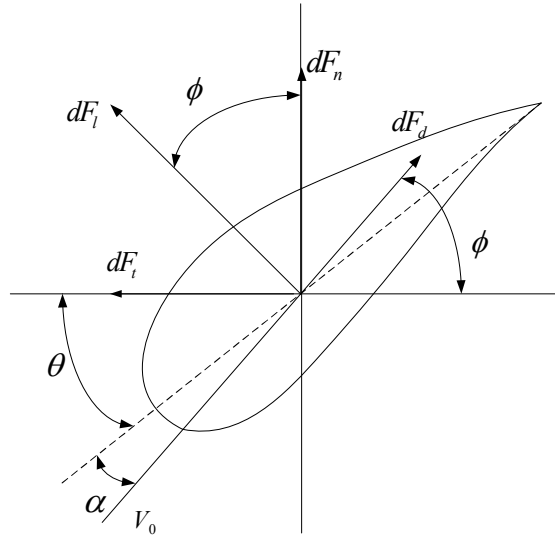


图 2.3 叶素几何图

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

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。

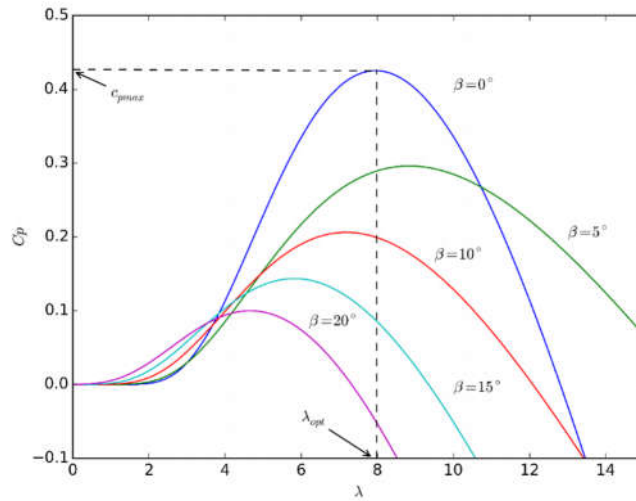


图 变桨距风机特性曲线

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

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：

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。

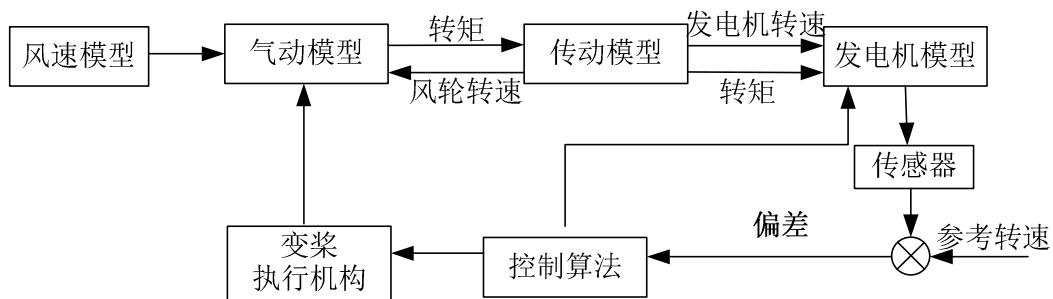


图 3.1 风力发电机组基本构成

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

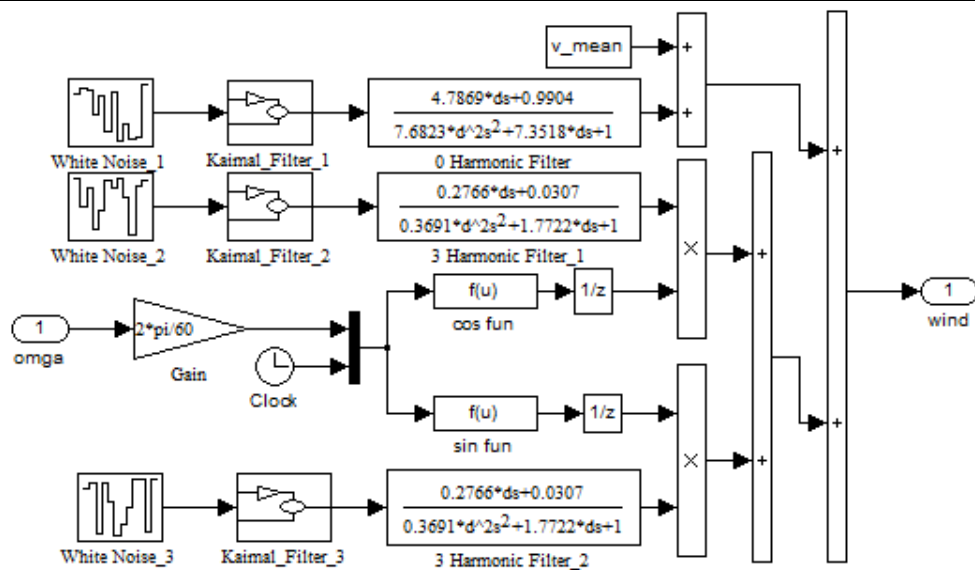


图 3.2 风速模型

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：

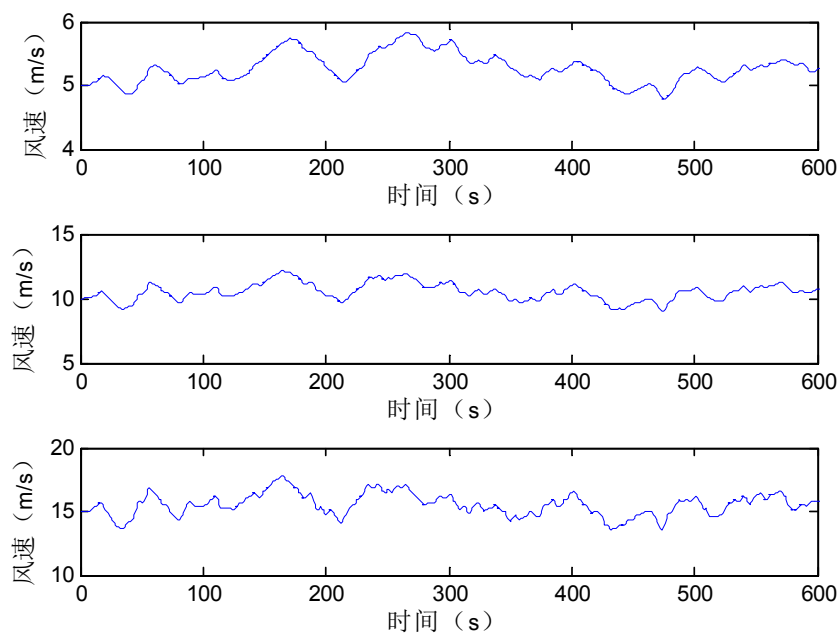


图 3.3 风速曲线

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。

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($^\circ$)； 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($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)； 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 3.8 所示。

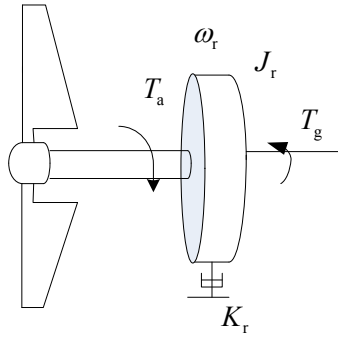


图 3.8 风力发电传动系统单质量块模型

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

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

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。

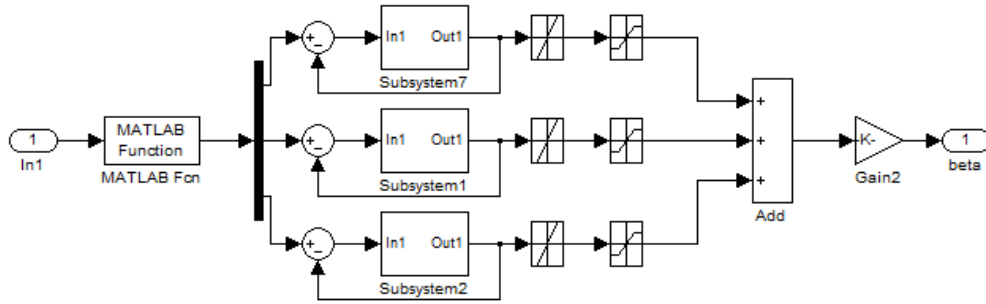


图 3.11 独立变桨执行机构

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

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

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。

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。

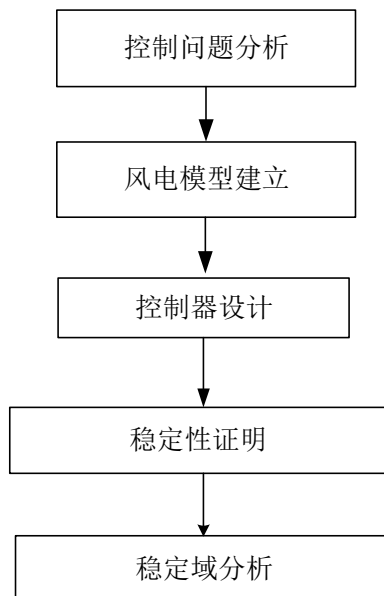


图 4.1 风电机组控制总框图

$\dot{\omega}_r^* = \frac{\lambda^* \dot{v}}{R}$, 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**转矩执行装置**, 则状态转换后方程为:

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

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。

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

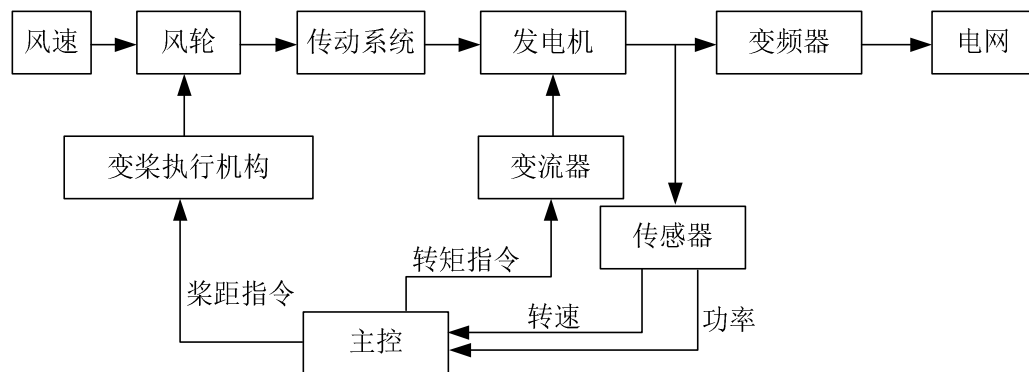
在 $-2 < e_r < 3$ 的条件下, $\dot{V} < 0$ 。又 $\omega_r = \omega_r^* - e_r$, $\omega_r^* = \lambda v / R$ 则:

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

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

该风速仿真模块比较精确，可以作为仿真系统输入。

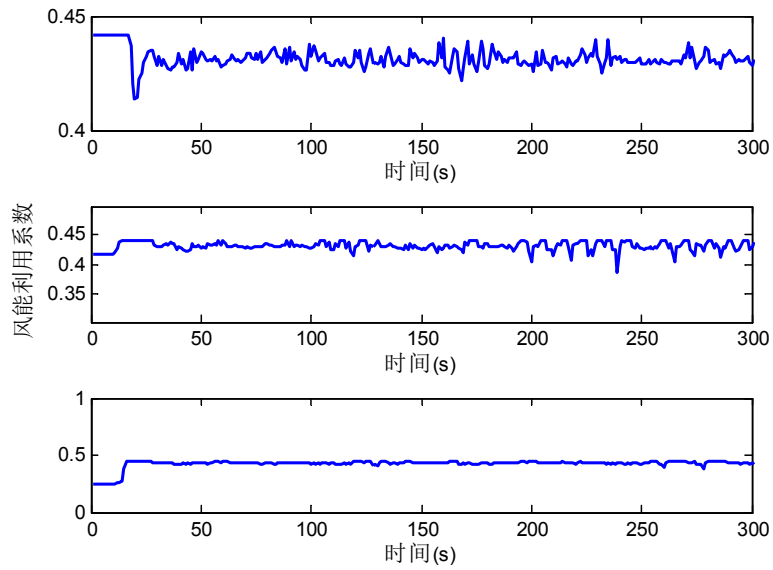


图 4.14 风能利用系数曲线图

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。

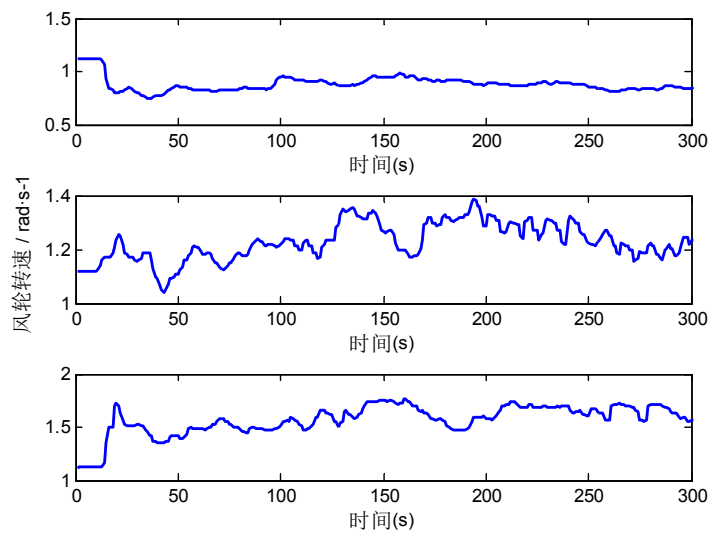


图 4.15 风轮转速曲线图

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

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。

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。

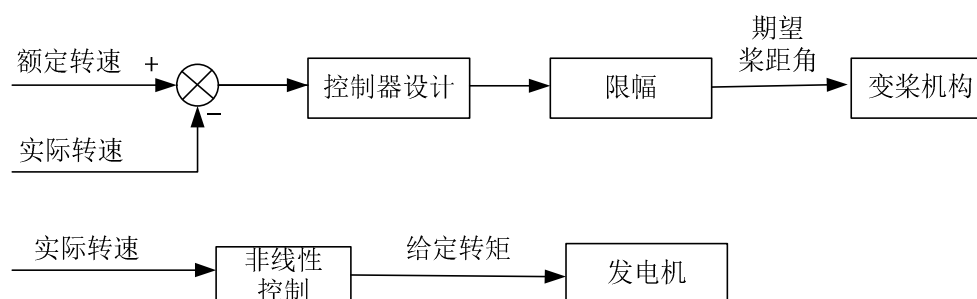


图 4.6 风力发电机组变桨控制方案

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。高风速控制框图如下所示：

$$\begin{aligned}
z_1 &= h(X) = \omega_{rm}^* - \omega_{rm} = x_3^* - x_3 \\
z_2 &= L_f h(X) = -\frac{1}{T_w}(\omega_r - \omega_{rm}) = -\frac{1}{T_w}(x_2 - x_3) \\
z_3 &= L_f^2 h(X) = -\frac{1}{J_r T_w}(T_a - T_e) + \frac{1}{T_w^2}(x_2 - x_3)
\end{aligned} \tag{4.17}$$

令

$$u = -\frac{L_f^3 h(X)}{L_g L_f^2 h(X)} + \frac{1}{L_g L_f^2 h(X)} v \tag{4.18}$$

则该系统转化为:

$$\dot{Z} = AZ + Bv \tag{4.19}$$

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:

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \tag{4.20}$$

选取 $R = 1$, $Q = \text{diag}(500, 500, 0)$, 则由式(4.20)可求出 K 的值为

$$K = [22.3607 \quad 28.9921 \quad 7.6147] \tag{4.21}$$

故控制器可设计为:

$$\begin{aligned}
u &= -\frac{L_f^3 h(X)}{L_g L_f^2 h(X)} + \frac{1}{L_g L_f^2 h(X)} (-22.3607(\omega_{rm}^* - \omega_{rm}) \\
&\quad - 28.9921(-\frac{1}{T_w}(\omega_r - \omega_{rm})) - 7.6147(-\frac{1}{J_r T_w}(T_a - T_e) + \frac{1}{T_w^2}(\omega_r - \omega_{rm})))
\end{aligned} \tag{4.22}$$

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, 故系统在原点是渐进稳定的。

4.2.2 系统稳定域分析

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:

$$V(z) = z^T P z \tag{4.23}$$

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

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 $-2 < z_1 < 2$ 的条件下, $\dot{V}(z) < 0$ 。因为 $z_1 = h(X) = \omega_{rm}^* - \omega_{rm}$, $\omega_{rm}^* = 2$,

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

在风速高于于额定风速阶段，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：

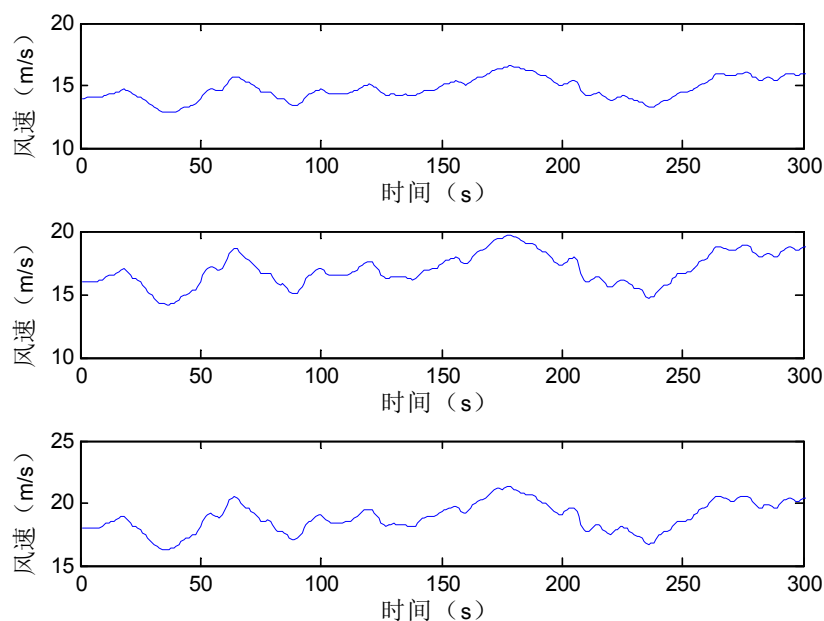
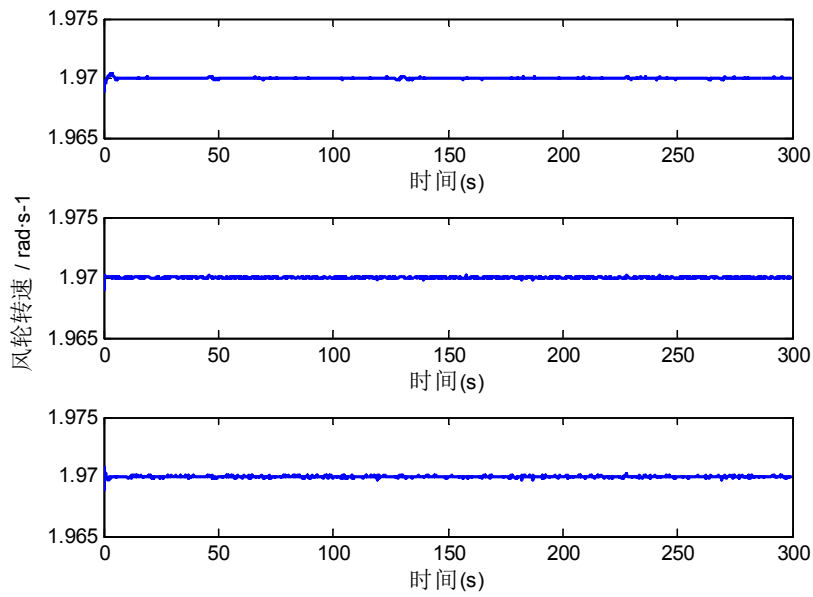
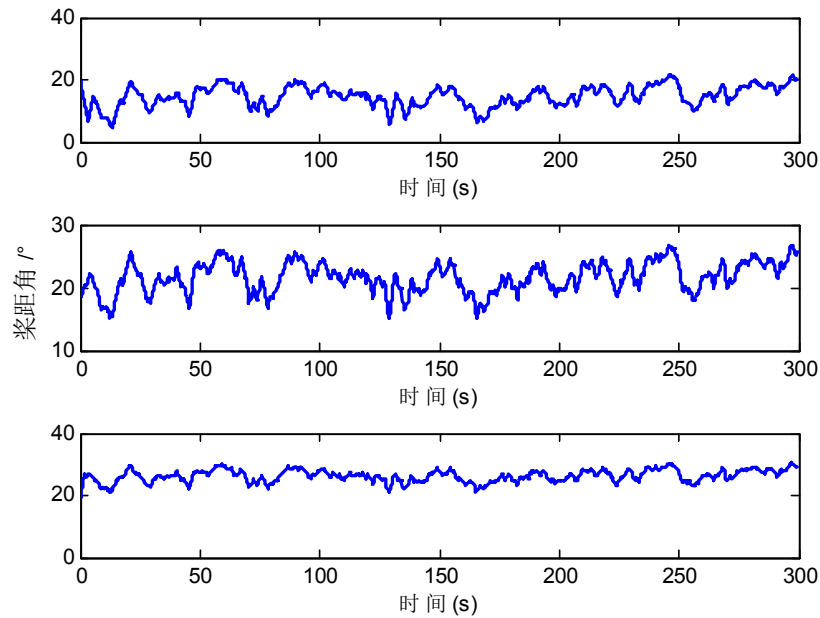


图 4.13 风速曲线图

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。



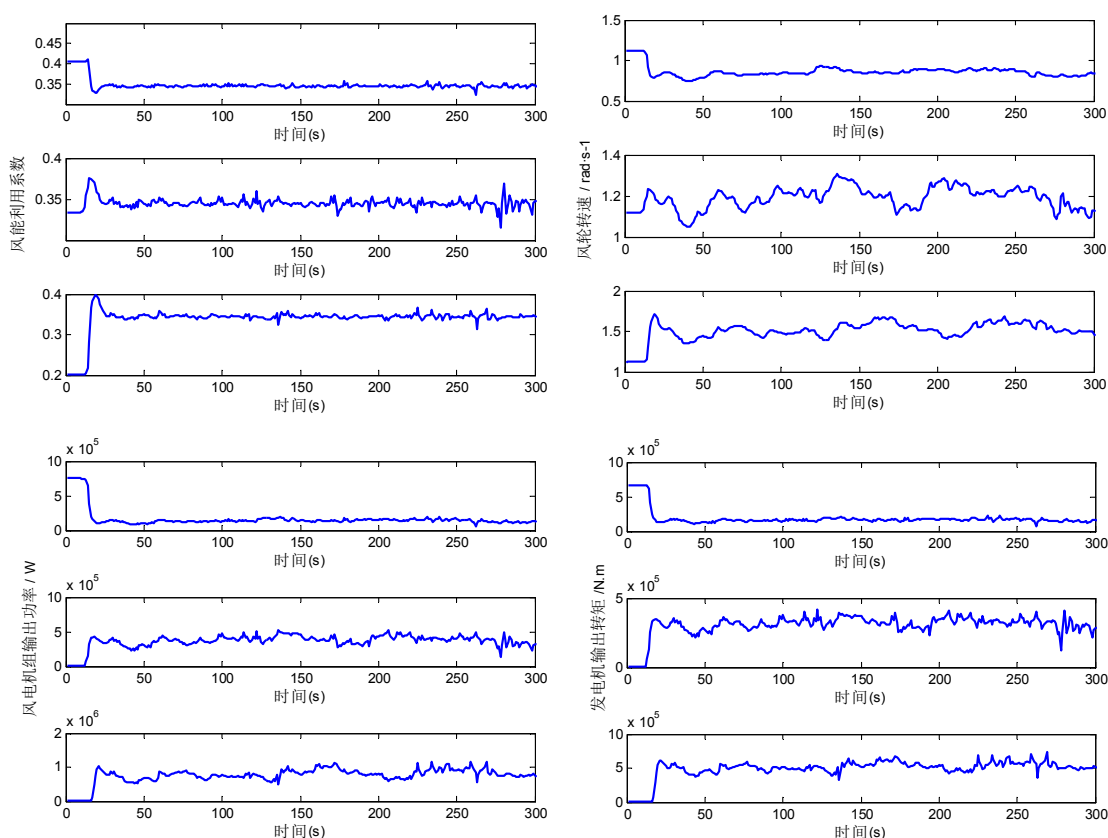
图中，从上往下依次是风速为 14m/s、16m/s 和 18m/s 状况下桨距角的仿真结果。从图中可以看出，风速为 14m/s 时，桨距角平均值为 12° ；风速为 16m/s

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：

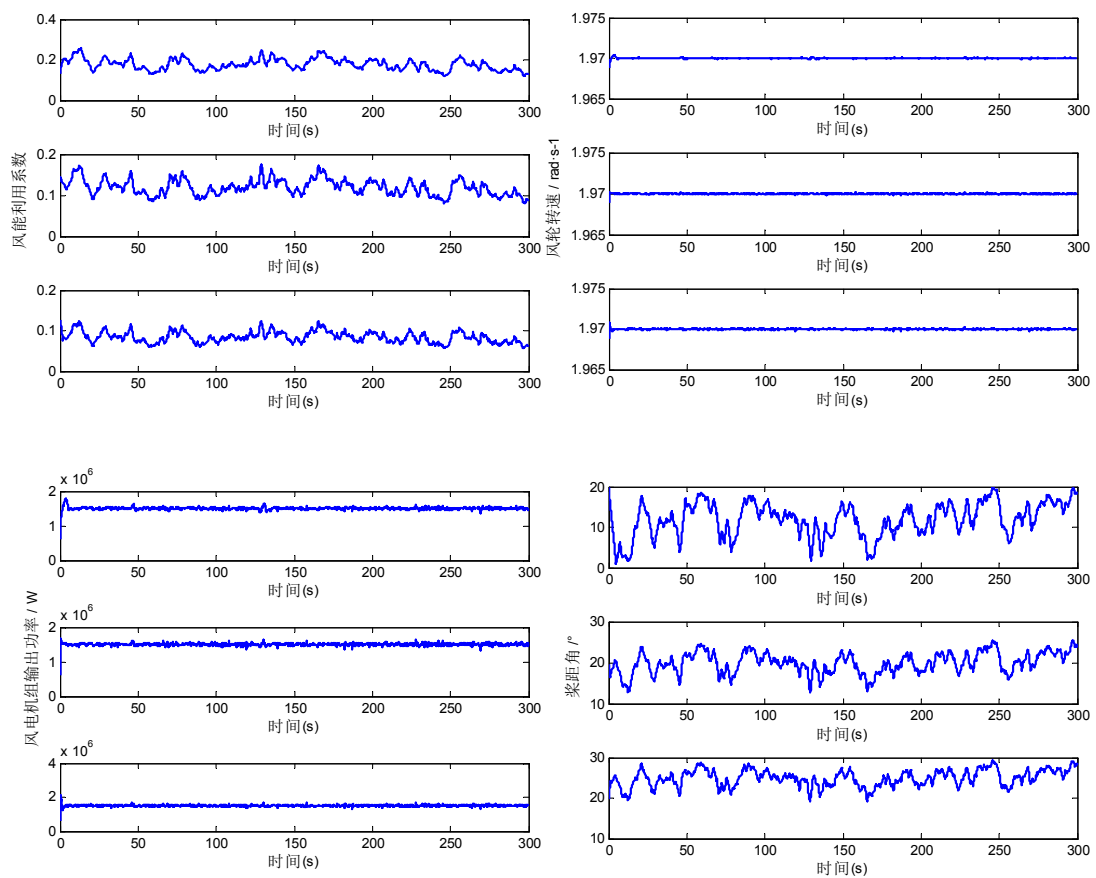


上图分别为在风速为 5m/s、7m/s 和 9m/s 状况下风能利用系数曲线、风轮转速曲线、发电机转矩曲线和风力发电机组功率输出曲线。从图中可以看出，在三种风速下风能利用系数稳定在 0.35，当风机损耗系数为 1 时，最佳风能利用系数为 0.436，在风机损耗系数为 0.8 时风能利用系数约为无损耗时的 0.8 倍；在风速为 5m/s 下，风轮转速平均值为 0.8rad/s；风速为 7m/s 下，风轮转速平均值为 1.2rad/s；风速为 9m/s 下，风轮转速平均值为 1.5rad/s。相较于无损耗状态，在三种风速下损耗系数为 0.8 时风轮转速与无损耗状态下风轮转速相同，表明在损耗系数为 0.8 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

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 120000N m；风速为 7m/s 下，发电机输出转矩平均值为 200000N m；风速为 9m/s 下，发电机输出转矩平均值为 400000N 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。

4.3.2 高风速仿真

损耗系数为 0.8 时：



上图分别为在风速为 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，

第五章 结论和展望

5.1 本文总结

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。

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、PID 控制和滑模控制等常用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和其估算方法。

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

利用状态转换将原控制问题转换为系统在原点稳定的问题，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。

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。

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.

-
- [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.

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.

