
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

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

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

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	- 39 -
4.2.2 系统稳定域分析	- 41 -
4.2.3 系统仿真结果	- 42 -
4.3 考虑损耗系数下仿真	- 46 -
4.3.1 低风速仿真	- 47 -
4.3.2 高风速仿真	- 49 -
第五章 结论和展望	- 51 -
5.1 本文总结	- 51 -
5.2 本文展望	- 52 -
参考文献.....	- 53 -
攻读学位期间所取得的相关科研成果.....	- 57 -
致 谢.....	- 58 -

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很多，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。

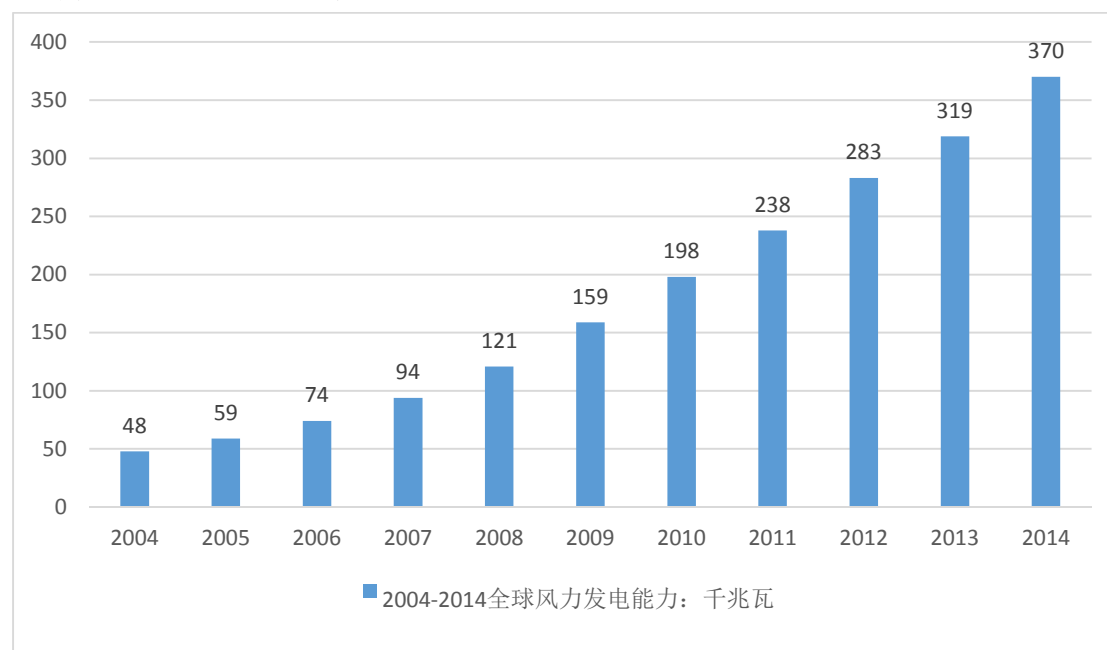
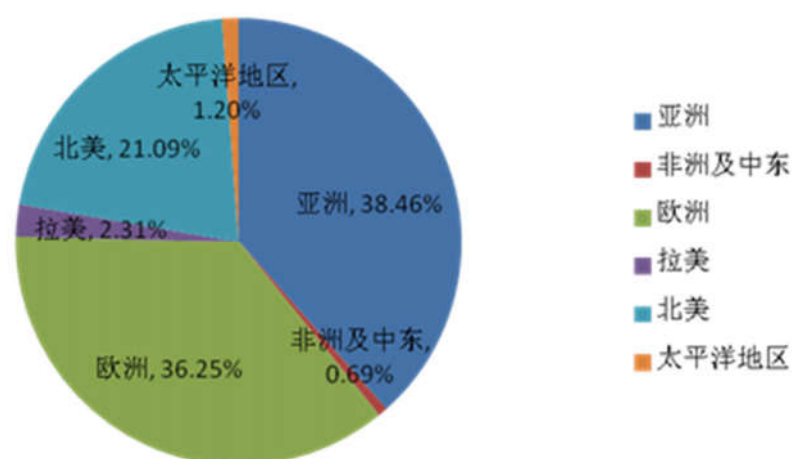


图 1 2004-2014 全球风力发电能力：千兆瓦

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。

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

第三章将风力发电机组模型分解为风速模型、风力机模型、传动系统模型、发电机模型和变桨执行机构模型，并对各个模型都进行了建模，最后根据各个模型搭建了风力发电机组控制系统仿真平台。之后介绍了常用的一些控制方法，包括状态反馈控制、PID 控制和滑模控制等，设计控制器奠定了理论基础，最后介绍了风力发电机组运行稳定域的重要性及其估算方法。

第四章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。最后利用本文所建立的风力发电机组控制仿真平台，分别在多种风速下验证控制器的控制效果，结果得出，在控制器能够在低风速阶段达到输出最大功率的控制目标，在高风速阶段达到输出功率稳定的控制目标。

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。

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

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

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:

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

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。

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。

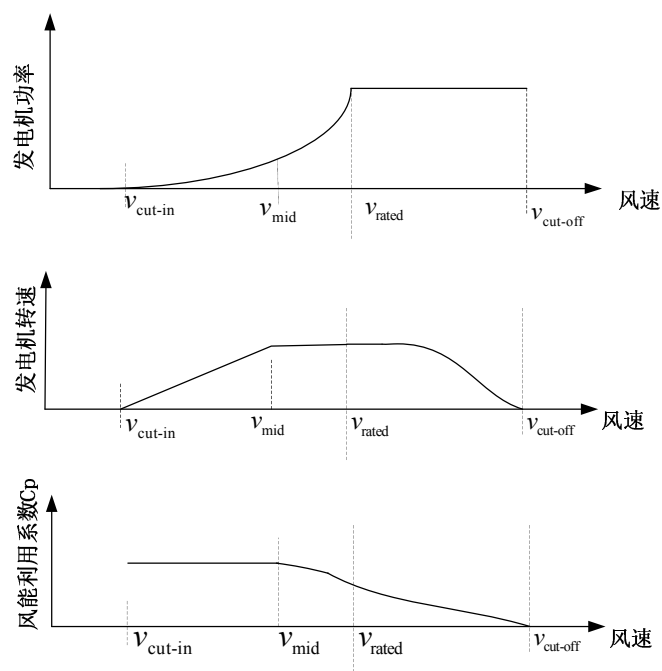


图 2.4 风力发电机组运行区域划分

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

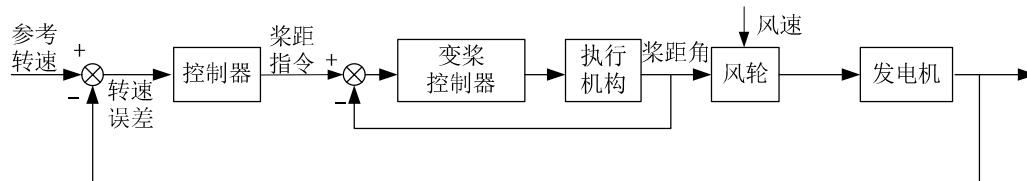


图 2.5 统一变桨控制框图

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：

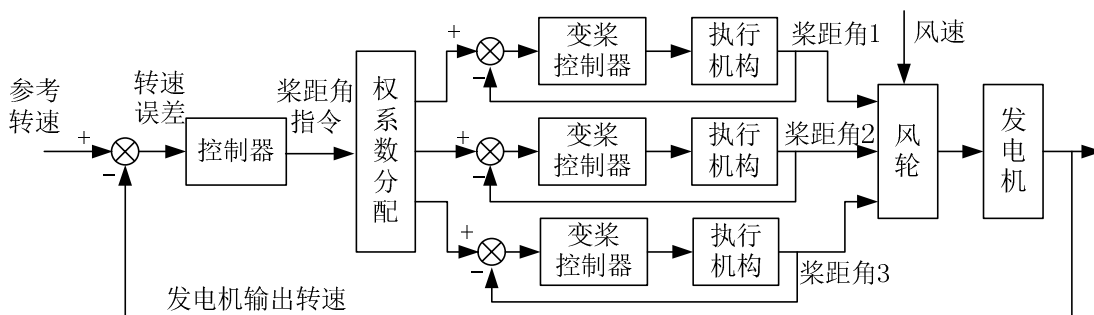


图 2.6 独立变桨控制框图

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。

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

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。

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。

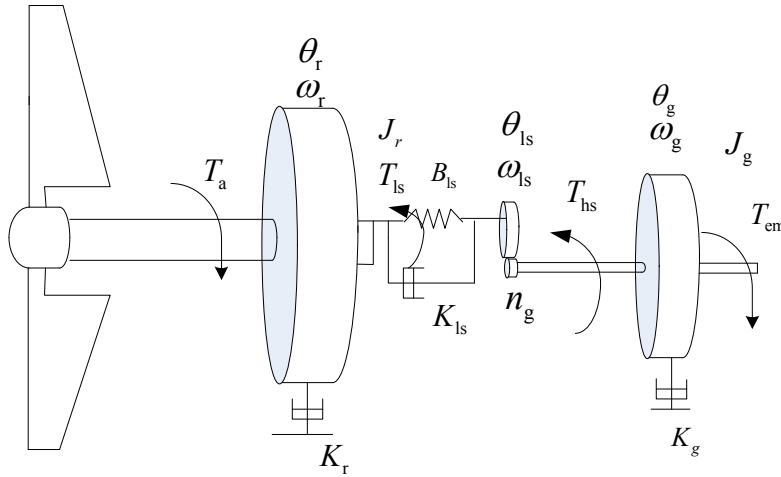


图 3.7 风力发电传动系统二质量块模型

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。

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。

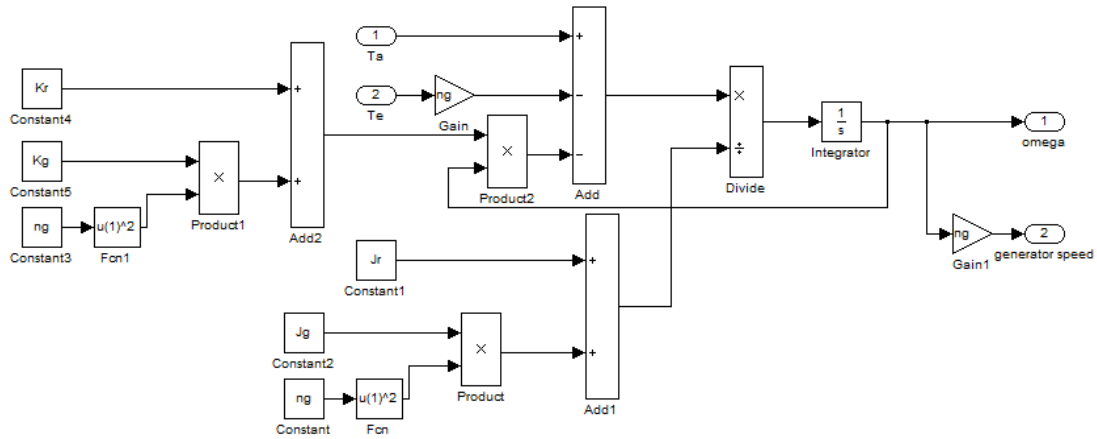


图 3.9 传动系统模型

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

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：

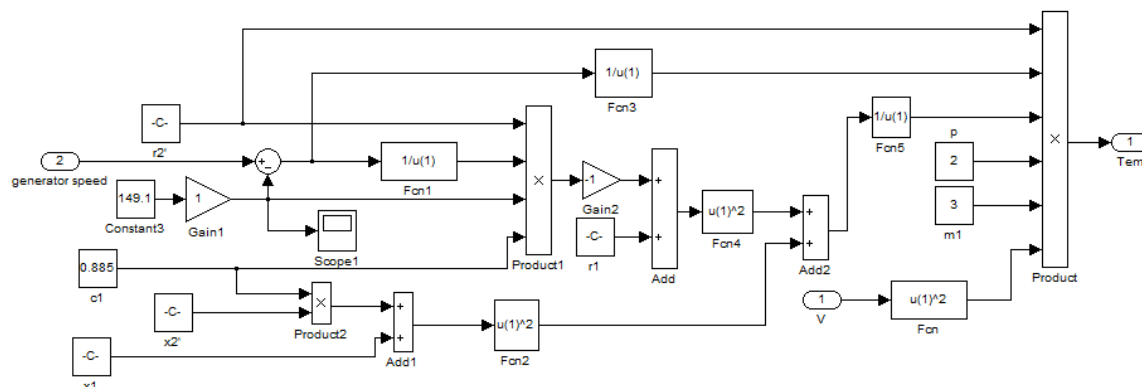


图 3.10 发电机仿真结构图

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：

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

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

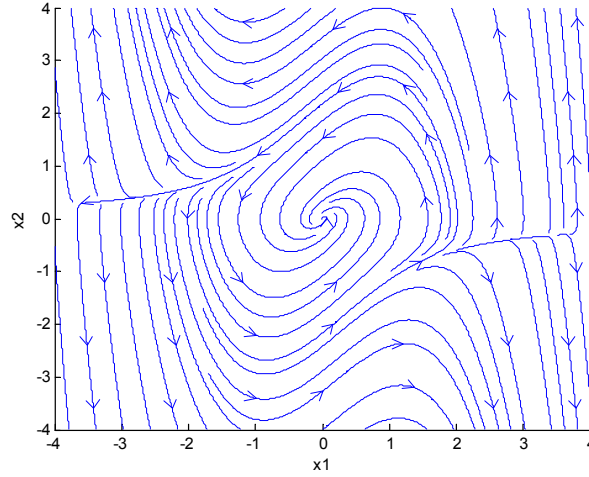


图 3.1 二阶系统相图

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

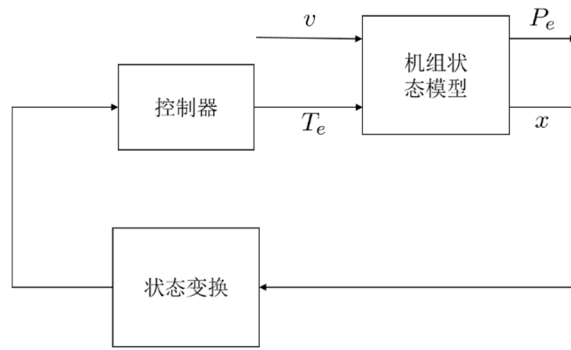
$$c < \min \frac{r_i^2}{b_i^T P^{-1} b_i} \quad 1 \leq i \leq p$$

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

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 $\omega_r^* = \frac{\lambda^* v}{R}$ ，

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 $K_2 = -200000000$ 时, 满足 $\dot{V} < 0$, 故设计控制器为:

$$T_e = -0.001\theta_r - 200000000e_r - \bar{T}_e \quad (4.9)$$

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。

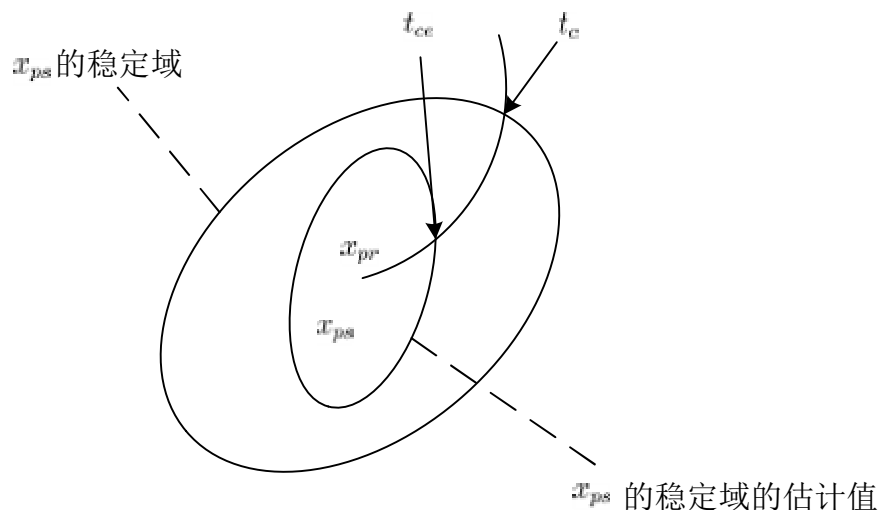
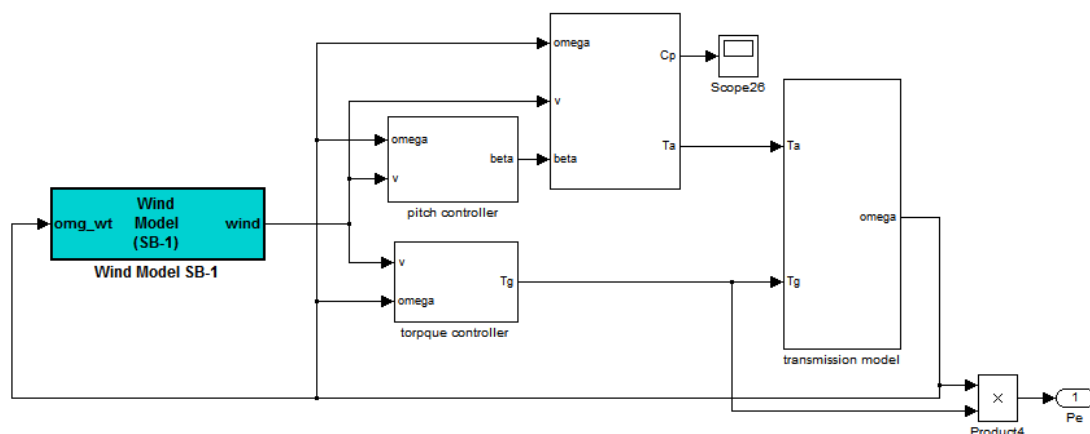


图 4.1 系统稳定域

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 $K_1 = -0.001$, $K_2 = -200000000$, $K_3 = -1$, $3 < V < 15$,

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：

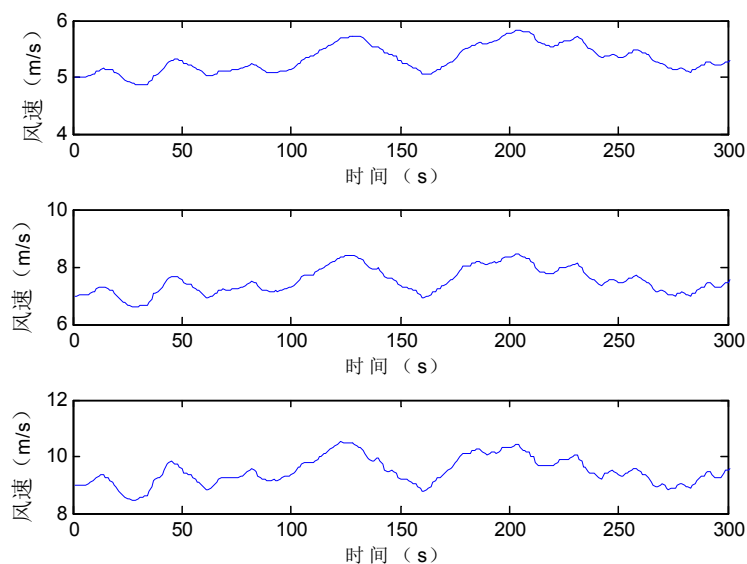


图 4.13 风速曲线图

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

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，

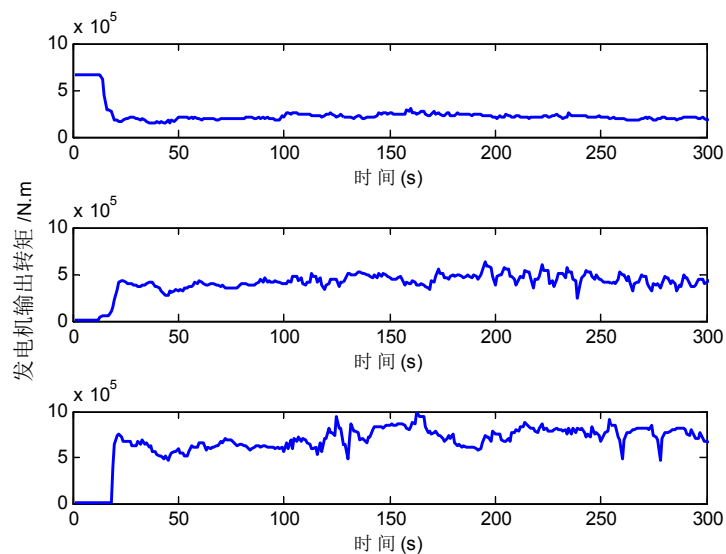
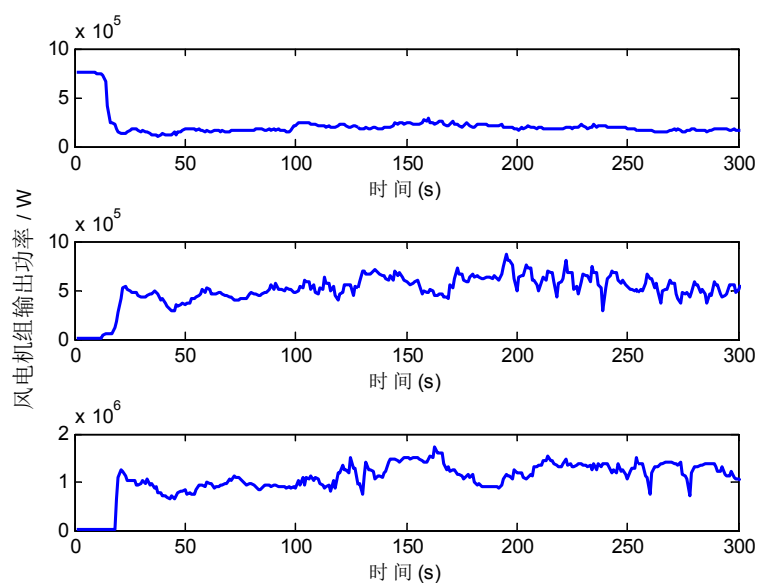


图 4.16 发电机转矩曲线图

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。



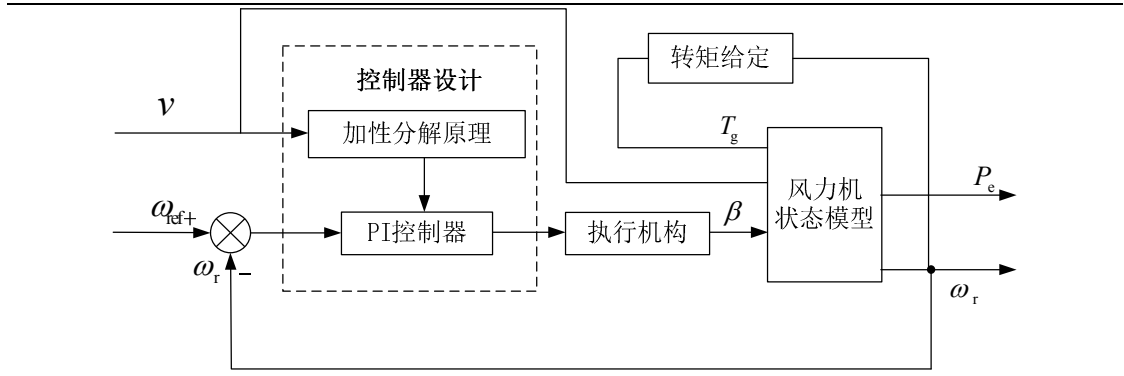


图 4.7 高风速变桨控制方案

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

$$\dot{\beta} = \frac{1}{T_\beta}(\beta_r - \beta) \quad (4.12)$$

其中， T_β 为时间常数。

风力发电机组模型可表示如(4.13)所示：

$$\begin{cases} \dot{\beta} = \frac{1}{T_\beta}(\beta_r - \beta) \\ \dot{\omega}_r = \frac{1}{J_r}(T_a - T_e) \\ \dot{\omega}_{rm} = \frac{1}{T_w}(\omega_r - \omega_{rm}) \end{cases} \quad (4.13)$$

其中， T_w 为时间常数。由于 T_a 具有高度非线性，为设计控制器，需将其进行线性化，将(4.13)改写为 $\dot{X} = f(x) + g(X)u$ 的形式，则可表示为：

$$f(X) = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_\beta}\beta \\ \frac{1}{J_r}(T_a - T_e) \\ \frac{1}{T_w}(\omega_r - \omega_{rm}) \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

$$g(X) = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_\beta} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

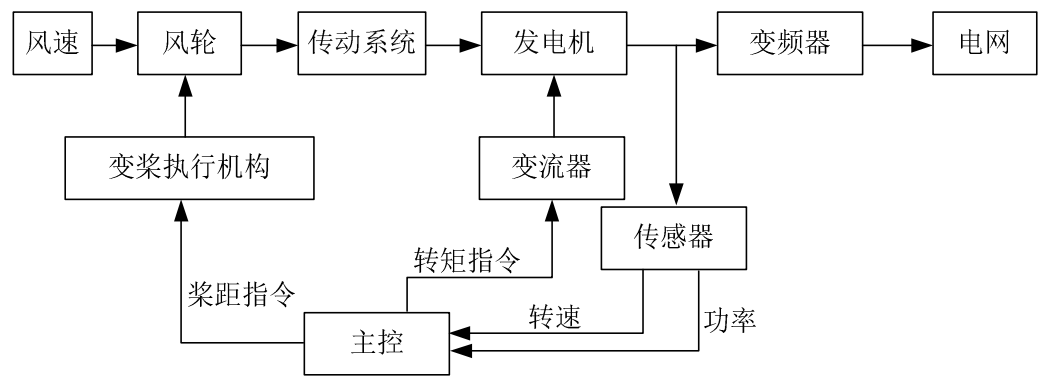
$$u = \beta_r \quad (4.16)$$

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

故 $0 < \omega_{rm} < 4$ 。故在该控制器下的风力发电机组运行的稳定域为 $0 < \omega_{rm} < 4$ ，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

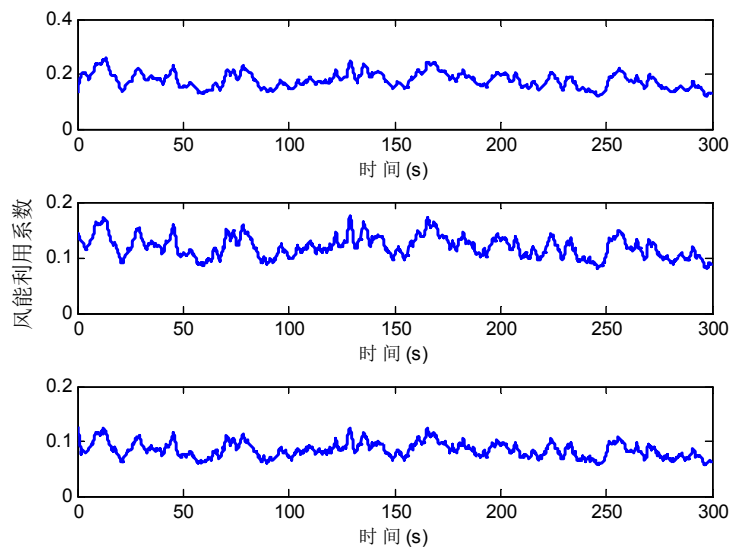
在风力发电机组整体控制中，所测的发电机转速信号经过传感器传递给主控系统，主控系统输出桨距角指令及转矩指令分别给变桨执行机构和发电机实现调节桨距角和转矩的目的，达到相应工况的控制目标。系统仿真框图如下所示。



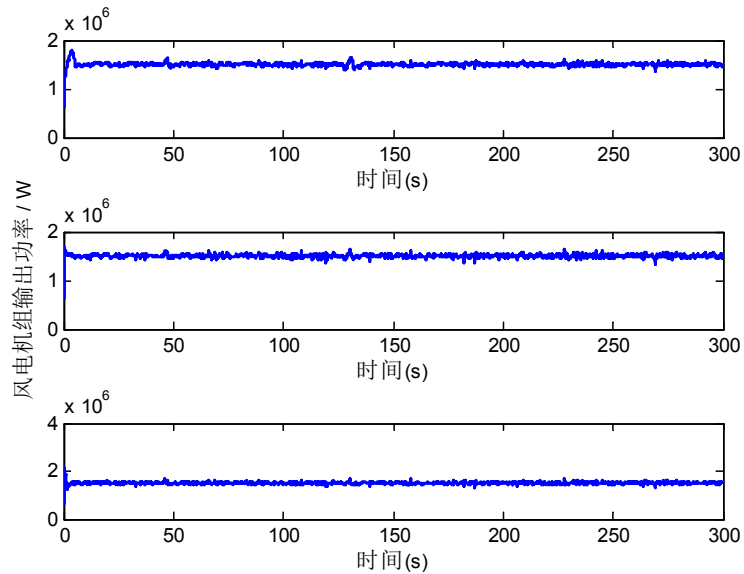
本文选择额定功率为 1.5MW 风力发电机组为研究对象，风力发电机组相关参数为：额定风速为 11 m/s，风轮额定转速为 1.97 rad/s，风轮半径为 38.5 m，风轮转动惯量 J_r 为 $3.28 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ，风轮阻尼系数 K_r 为 270.36 N·m/rad/s，齿轮箱齿速比 n_g 为 75.76，最大风能利用系数 C_{pmax} 为 0.436，最佳叶尖速比 λ_{opt} 为 6.3，仿真时间设置为 120 s。其中转矩控制器和变桨控制器内部设置简单的逻辑切换装置，保证不同的风况下相应的控制环起作用。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



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，丢弃的风能越多。



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。

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。

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：

$$C_p = \mu C_p(\lambda, \beta) \quad (4.24)$$

风电机组模型变为：

$$J_r \dot{\omega}_r = (-K_t \omega_r - B \theta_r + \mu T_a - \bar{T}_e) \quad (4.25)$$

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， $\tau = 0.01$ 。

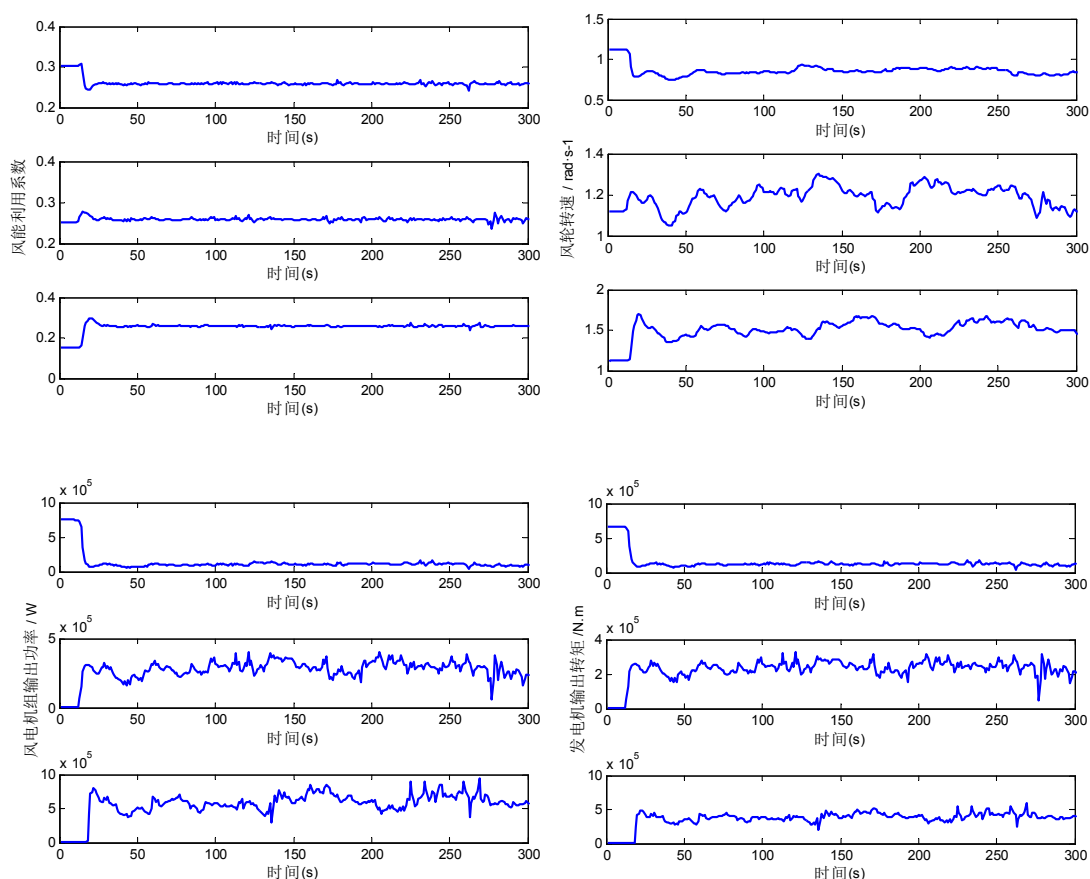
本文在 $\mu = 0.8$ 和 $\mu = 0.6$ 这两个损耗系数下，分别对低风速下和高风速下风电机组进行仿真，其中低风速选择风速为 5m/s 、 7m/s 和 9m/s ；高风速选择风速为 14m/s 、 16m/s 和 18m/s ；风电机组使用 1.5MW 风机。仿真分组情况如下表所示：

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

用系数减小，风电机组输出功率也随之减小，约为无损耗状态的 0.8 倍，输出功率仍然达到了在损耗系数为 0.8 时的最大功率。风速为 5m/s 下，发电机输出转矩平均值为 160000N m；风速为 7m/s 下，发电机输出转矩平均值为 400000N m；风速为 9m/s 下，发电机输出转矩平均值为 600000N m。相较于无损耗状态，发电机输出转矩约为无损耗状态的 0.8 倍。

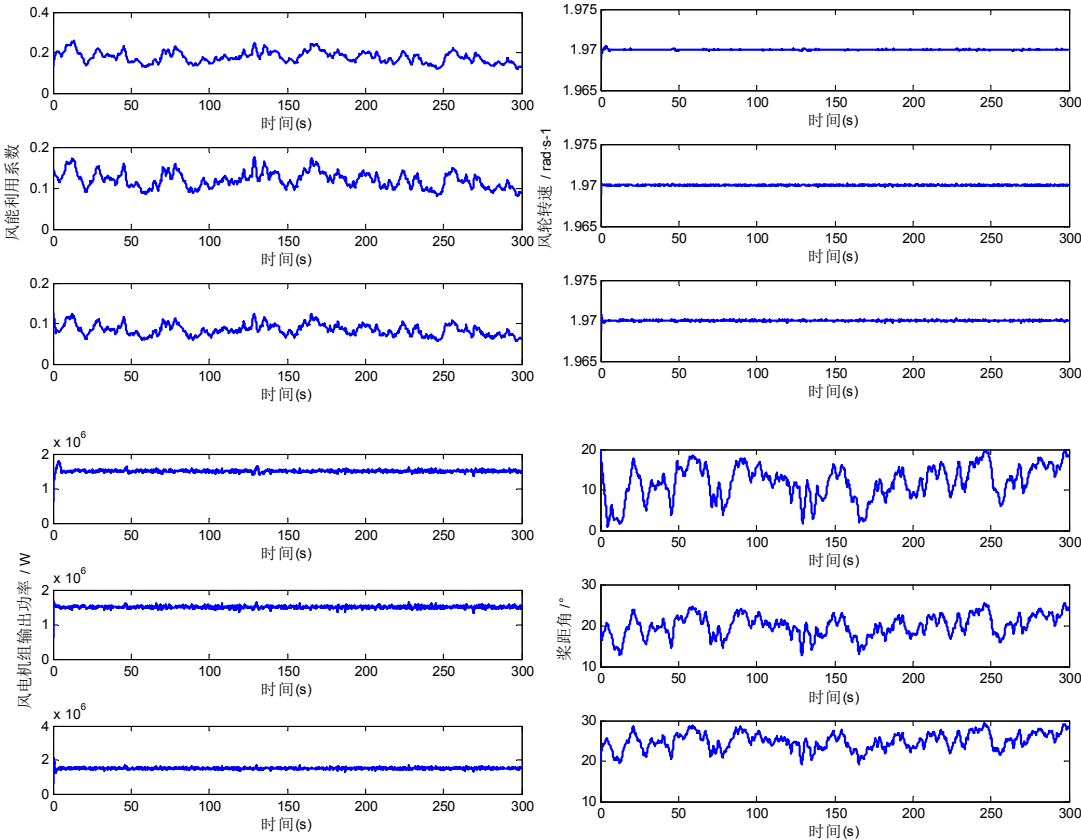
损耗系数为 0.6 时：



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 0.26，当风机损耗系数为 1 时，最佳风能利用系数为 0.436，在风机损耗系数为 0.6 时风能利用系数约为无损耗时的 0.6 倍；在风速为 5m/s 下，风轮转速平均值为 0.8rad/s；风速为 7m/s 下，风轮转速平均值为 1.2rad/s；风速为 9m/s 下，风轮转速平均值为 1.5rad/s。相较于无损耗状态和损耗系数为 0.8 状态，在三种风速下损耗系数为 0.6 时风轮转速与其他两种状态风轮转速相同，表明在损耗系数为 0.6 时，该控制器仍可控制风轮达到最佳转速。风速为 5m/s 下，发电机输出功率平均值为 120000W；风速为 7m/s 下，发电机输出功率平均值为 350000W；风速为 9m/s 下，发电机输出功率平均值为 700000W。相较于无

且在在较广的风速范围内正常工作。桨距角相较于无损耗状态，略有减小。表明当风机损耗时，为保证功率输出为额定功率，丢弃的风能相较于无损耗状态要少，使得桨距角比无损耗状态时要大，而风能利用系数、风轮转速和风电机组输出功率与无损耗状态时相同。

损耗系数为 0.6 时：



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

5.2 本文展望

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

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

-
- [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.

-
- [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.

致 谢

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

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

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