

学校编码: 10384 分类号_密级_

学号: 23220121153056 UDC__

廈門大學

碩 士 学 位 论 文

基于 LPV 模型的风力发电机建模和控制研究

Wind Turbine Modeling and Control Study based on LPV Model

曹力仁

指导教师姓名: 吉国力教授

专 业 名 称: 系统工程

论文提交日期: 2015 年 5 月

论文答辩时间: 2015 年 5 月

学位授予日期:

答辩委员会主席: __

评阅人: __

2015 年 5 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

1.经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

2.不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

厦门大学博硕士学位论文摘要库

摘要

风能是一种清洁可再生能源，其开发和利用越来越受人们的重视。风力发电机是利用风能发电的设备，近年来，风力发电机逐渐向高效率、高可靠性和大型化发展，使风力发电机的动态模型变得更加复杂。为了使风力发电机平稳可靠运行，提高发电效益，对风力发电机进行建模和控制很有必要。本文针对风力发电机的动态非线性特性，基于 LPV 模型辨识方法对风力发电机建模，后用辨识所得 LPV 模型设计 MPC 控制器，对风力发电机进行变桨距控制。论文的主要工作有：

(1) 讨论风力发电机的原理模型，分别分析各分块原理模型和一些常用的计算机仿真工具。

(2) 研究单调度变量和双调度变量的 LPV 模型辨识方法，分别讨论参数插值的 LPV 模型，以线性函数、多项式函数和高斯函数为权重的多模型插值 LPV 模型。针对不同结构的 LPV 模型，采用不同的待定参数求解方法。为了进一步提高辨识模型的精度，提出双环迭代的参数优化方法，交替优化权重函数和局部线性模型的参数。

(3) 用风力发电机仿真系统进行 LPV 建模研究，分析风力发电机的运行特性，设计实验信号并进行辨识实验和采集数据，后分别用单调度变量和双调度变量的 LPV 模型辨识风力发电机模型。对辨识得到的 LPV 模型进行交叉验证和阶跃响应验证，结果表明双调度变量的高斯权重 LPV 模型在输出拟合和阶跃响应上都有比较好的表现。

(4) 分别研究基于阶跃响应的 LPV-MPC 方法和基于状态空间的 LPV-MPC 方法。基于阶跃响应 LPV-MPC 方法设计风力发电机的 DMC-MPC 控制器，并与 PI 控制器进行对比。借助 Simulink 中的 MPC 工具包，以插值多个基于线性模型的 MPC 控制器的形式设计插值 MPC 控制器，并与 DMC-MPC 控制器进行对比，结果表明插值 MPC 控制器的控制效果较好。

关键词：风力发电机；LPV 模型；辨识；MPC

厦门大学博硕士学位论文摘要库

Abstract

Wind energy is a kind of clean and renewable energy which has attracted more and more people's attention. Wind turbines are equipments which use wind energy to generate electricity. In recent years, wind turbines have gradually developed to high efficiency, high reliability, and large-scale, which make the dynamic model of wind turbines became more complex. In order to achieve stable and reliable operation of wind turbines, improve power generation efficiency, it is necessary to establish accurate wind turbine model and design advanced controller. In this paper, to deal with the complex dynamic nonlinear characteristics of wind turbines, we establish wind turbine models based on LPV model identification method. Then, the LPV models are used to design MPC controller. The main works are:

(1) The principle models of the wind turbine are discussed. Each block principle models and some commonly used computer simulation tools are respectively described.

(2) The single scheduling variable and double scheduling variables LPV model and identification methods are studied. Parameter interpolation LPV model, multi-model interpolation LPV models with linear weights, polynomial weights and Gaussian weights are respectively discussed. For different LPV models, different methods are used to determine the parameters. In order to improve the accuracy of identification model, Double loops iteration parameters optimization method is proposed. Parameters of weighting functions and local linear models are alternately optimized.

(3) Wind turbine simulation system is modeled by each LPV model identification methods. Operating characteristics of wind turbine system are analysed. The experimental test signals are designed and data is collected. Then the single scheduling variable and double scheduling variables LPV model identification methods are respectively used to build wind turbine models. Cross validation and step response test are implemented to verify the identified LPV models. The results show that the double scheduling variables Gaussian weights LPV model achieve best output

and step response fittings.

(4) LPV-MPC methods based on step response and state space are studied. DMC-MPC controller for wind turbine is designed based on step response LPV-MPC method and compared to the primeval PI controller. Then the MPC tool in Simulink is used to design interpolation MPC controller by interpolating several MPC controllers based on local linear models. The interpolation MPC controller is compared to the DMC-MPC controller. It shows that the interpolation MPC controller obtain better control result.

Keywords: Wind Turbine; LPV Model; Identification; MPC.

目录

第一章 绪论	1
1.1 研究背景	1
1.2 风力发电机	2
1.3 风力发电机建模	5
1.3.1 机理建模技术	6
1.3.2 数据驱动建模	6
1.3.3 LPV 模型辨识	7
1.4 风力发电机控制	9
1.5 论文的主要内容	11
第二章 风力发电机原理模型	13
2.1 风力发电机分块模型	13
2.1.1 风速模型	13
2.1.2 空气动力学模型	14
2.1.3 桨距模型	15
2.1.4 传动模型	15
2.1.5 发电机模型	16
2.2 风力发电机仿真工具	16
2.2.1 Bladed 软件	17
2.2.1 Mathworks 模型	17
2.2.3 Benchmark 模型	19
第三章 LPV 模型及辨识方法	21
3.1 单调度变量 LPV 模型方法	21
3.1.1 参数插值 LPV 模型方法	21
3.1.2 模型插值 LPV 模型方法	22
3.2 双调度变量 LPV 模型方法	25
3.2.1 参数插值 LPV 模型方法	26
3.2.2 模型插值 LPV 模型方法	27

第四章 风力发电机 LPV 建模	35
4.1 系统运行特性分析	35
4.2 辨识实验设计	38
4.3 全局线性模型辨识	42
4.4 单调度变量 LPV 模型辨识结果	45
4.4.1 参数插值 LPV 模型辨识	46
4.4.2 模型插值 LPV 模型辨识	48
4.5 双调度变量 LPV 模型辨识结果	57
4.5.1 参数插值 LPV 模型辨识	57
4.5.2 模型插值 LPV 模型辨识	59
第五章 风力发电机 MPC 控制器设计	67
5.1 基于阶跃响应的 LPV-MPC 方法	67
5.2 基于状态空间的 LPV-MPC 方法	68
5.3 风力发电机 MPC 仿真	71
第六章 总结和展望	75
6.1 总结	75
6.2 展望	76
参考文献	77
硕士期间的论文发表	80
致谢	81

Content

Chaper 1 Introduction	1
1.1 Background	1
1.2 Wind turbine	2
1.3 Wind turbine modeling	5
1.3.1 Mechanism modeling method.....	6
1.3.2 Data driven modeling method.....	6
1.3.3 LPV model identification.....	7
1.4 Wind turbine control	9
1.5 Main work of the dissertation	11
Chaper 2 Wind turbine principle model	13
2.1 Wind turbine block model	13
2.1.1 Wind model.....	13
2.1.2 Aerodynamics model	14
2.1.3 Blade pitch model	15
2.1.4 Drive train model.....	15
2.1.5 Generator and converter model.....	16
2.2 Simulation tools	16
2.2.1 Bladed software	17
2.2.2 Mathworks model	17
2.2.3 Benchmark model	19
Chaper 3 LPV model and identification method	21
3.1 Single scheduling variable LPV model method	21
3.2.1 Parameters interpolation LPV model.....	21
3.2.2 Multi-model interpolation LPV model	22
3.2 Double scheduling variables LPV model method	25
3.2.1 Parameters interpolation LPV model.....	25

3.2.2 Multi-model interpolation LPV model	27
Chaper 4 Wind turbine LPV modeling.....	35
4.1 System operating characteristic analysis	35
4.2 Identification test design.....	38
4.3 Global linear model identification	42
4.4 Identification results of single scheduling variable LPV model	45
4.4.1 Parameters interpolation LPV model results	46
4.4.2 Multi-model interpolation LPV model results	48
4.5 Identification results of double scheduling variables LPV model	57
4.5.1 Parameters interpolation LPV model results	57
4.5.2 Multi-model interpolation LPV model results	59
Chaper 5 MPC controller design for wind turbine	67
5.1 LPV-MPC method based on step response.....	67
5.2 LPV-MPC method based on state space	68
5.3 MPC controller simulation for wind turbine.....	71
Chaper 6 Summary and prospects	75
6.1 Summary.....	75
6.2 Prospects	76
References	77
Paper published during the Master	80
Acknowledgement.....	81

第一章 绪论

1.1 研究背景

能源是人类生存所必需的基础，是人类社会发展的动力[1]。每次能源利用上的改进和更替都推动着人类社会和文明进步。当今的社会繁荣和经济发展建立在很大的能源消耗之上。19 世纪年以来，发达国家通过消耗大量的不可再生能源资源，先后完成了工业化进程[2]。如今发展中国家要迈向工业化，也需要依赖能源消耗。最近几十年，世界人口正在快速增加，人们对生活水平的要求也越来越高，人类对能源的需求也将持续增加。

然而煤和石油等能源资源是不可再生资源，正在逐步走向枯竭。根据有关专家估计，煤和石油等能源将在未来的几十年到几百年耗尽。同时，化石燃料的使用给地球带来严重的环境污染。例如，燃料燃烧产生的二氧化碳引发了温室效应，导致全球气候变暖，海平面上升，自然灾害增加等。含硫的煤燃烧产生的酸性气体引起酸雨，腐蚀建筑物和农作物。石油运输过程泄露造成海洋污染，造成海洋中鱼类等资源的减产。在国内，火电和汽车尾气等已经造成很多地方出现雾霾天气，正在严重影响着人们的健康。因此，伴随经济和社会的发展，能源问题和环境问题日渐突出，成为人类社会所要解决的重要问题。

如果能源问题和环境问题不能得到解决，人类不仅不能实现可持续发展，生存也会受到威胁。我国由能源引起的环境问题比发达国家更为严重[3]，因为发达国家的能源结构已经转型，在一次能源中，清洁能源占百分之七十以上。我国的能源还是以煤为主，在一次能源中煤占百分之六十以上[4]。虽然提高常规能源的使用技术可以提高利用率、减轻对环境的影响，但是不能根本上解决资源短缺和环境污染问题。因此要根本解决能源问题和环境问题，必须重视清洁能源的开发利用。风能作为清洁可再生能源，已经越来越受到人们的关注。

人类很早以前就开始利用风能，比如三千年前，人类利用风车磨面，早期船的基本动力是风能等。人类利用风能发电可以追溯到 19 世纪末，Brush 等人制

作了一台直流风力发电，LaCour 等人也进行了风力发电机研究[5]。然而早期人们虽然对风电技术研究含有饱满的热情，但是并没有投入大量的资金发展风电产业。直到 1973 年世界石油危机导致石油价格上涨，促使一些欧美国家政府资助一系列重大风电项目的研究和发展。最近几十年以来，发达国家在风电技术上取得了巨大成就，上个世界八十年代问世的风力发电机并网技术，仅仅经过几年的时间就快速实现产业化，并且规模逐年增大。到现在，并网的风力发电机单机容量，已经发展到兆瓦级；控制方式从最初的单一定桨距失速控制，现在已经实现了变桨距和变速恒频控制，并逐渐向智能控制过渡。根据全球风能理事会（Global Wind Energy Council）《2014 全球风电装机统计数据》2014 年全球风电新增装机容量 514.77 亿瓦，我国新增装机容量 233.5 亿瓦，比 2013 年增长 45.1 个百分点，累计装机容量 1,150 亿瓦，比 2013 年新增 25.5 个百分点。

我国的风能资源比较丰富，全国可以开发和利用的风能资源在十亿千瓦以上[6]，其中陆地风能约占四分之一，海洋风能占四分之三。我国在发展风电技术初期，主要引进国外生产的的风电机组，在风能丰富的地区建立了许多风电场。同时，我国在风力发电机的研究和设计上也取得了很多成果。成功研发出并网风电机组的控制系统，这是一项大型风力大电机的关键技术。风电机组的一些部件如桨叶、发电机等，已经可以由国内的厂家生产，这为我国自己生产大型风力发电机垫底基础。

1.2 风力发电机

风力发电机是利用风能发电的设备，风力发电机的研发综合了多个学科，包括机械、电气、材料、控制和空气动力学等。近几年来，这些学科快速发展，为风力发电机的研发奠定了良好的基础。推动风力发电机向高效率、高稳定性和大型化发展[7]。

随着现代科技的不断进步，风电技术朝着单机容量不断增大，风速的利用范围不断扩大，变桨距控制方式取代失速恒功率控制方式、变速恒频取代恒速恒频控制方式、无齿轮箱机型占市场比例增大等方向发展。并且逐步由陆上风力发电发展到海上风力发电。

主流的风力发电机有三种，定桨距恒速风力发电机、变桨距风力发电机和变速风力发电机。目前最常见的风力发电机是水平轴、三叶片、上风向和管式塔结构的形式。

本文研究的对象，是一个三叶片、水平轴、带有完全变流器的风力发电机。在系统层面带有完全变流发电机的风力机和带有双馈感应发电机的风力机之间的差别很小，它们都是变速和可变桨控制的风力机。关于风力发电机组的发电机更具体的细节参考文献[5]和[8]。风力发电机的外部轮廓如图 1-1 所示。从图中可见，机舱放置在塔架的顶端。在机舱内部放置控制设备和能量转换设备。叶片安装在轮毂中心的主轴上。测试风速和风向的风速计位于机舱的顶部。图 1-2 表示机舱的内部，可见主轴通过齿轮和发电机相连；发电机通过变流器和高压变压器与电网相连。运行过程从风作用在叶片上产生压力开始，压力使风力发电机的转子旋转。能量从风的动能转换为旋转轴的机械能。能量的产生可以通过改变转子的空气动力学而控制。这是通过叶片变桨或者控制与风速相关的转速获得的。发电机和变流器把转轴上的机械能转化为电能输出到电网。在风轮和发电机之间连接着变速齿轮箱，提高风轮的转速。变流器可以用来设定发电机扭矩，也就等价与可以控制发电机的旋转速度。风力发电机功能更详细的描述参考[5,8,9]。

根据风力发电机的结构，可以将其划分成三个子系统，如图 1-2 所示，包括桨叶和变桨子系统、传动子系统、发电机和变流器子系统。桨叶和变桨子系统描述风怎样转化为旋转力矩，桨叶分为水平轴和垂直轴两种类型。垂直轴风力发电机优点在于不用进行偏航，但是捕获能力较少，并且维护困难。水平轴风力发电机通过跟随风向的偏航，可以吸收更多的风能，并且维护比较容易。本文研究的风力发电机的桨叶为水平轴的。传动子系统将风轮上的转矩传递到发电机。发电机和变流器子系统把转轴上的机械能转化为电能输出到电网。

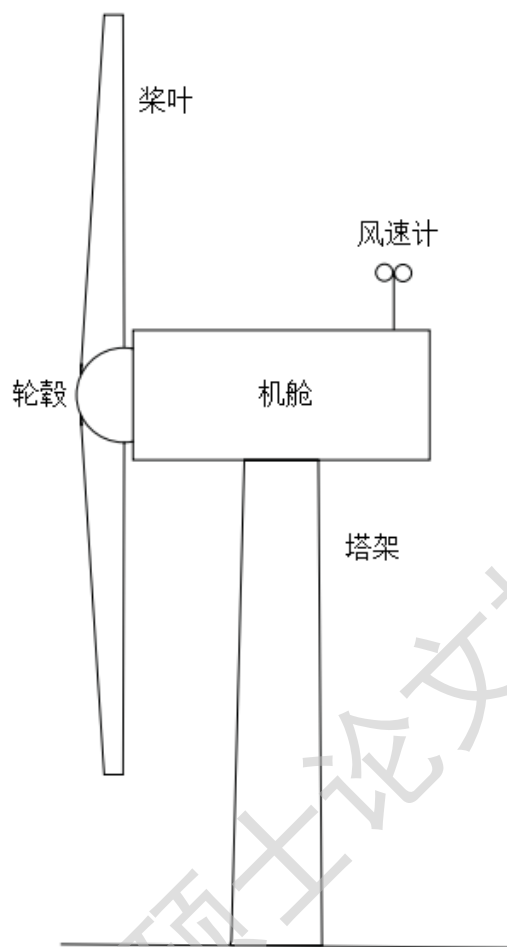


图 1-1 风力发电机外部轮廓图

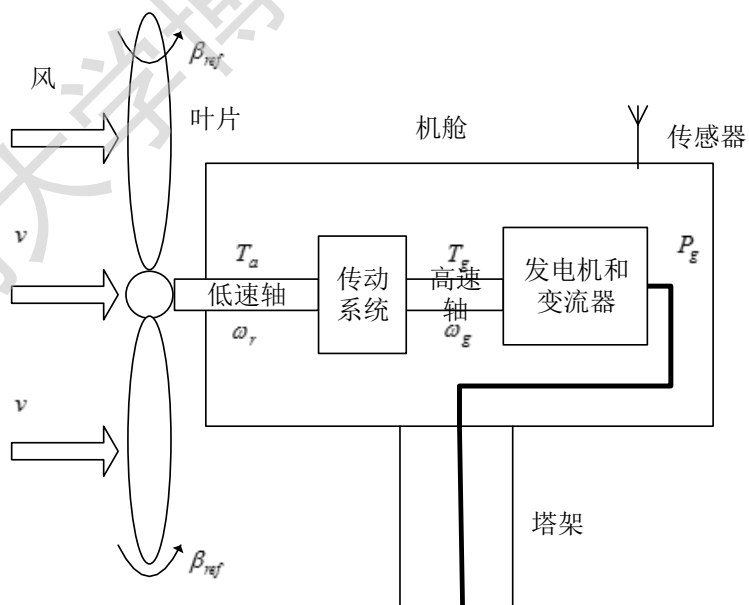


图 1-2 风力发电机结构示意图

Degree papers are in the “[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)”.

Fulltexts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.