

学校编码: 10384

分类号密级

学号: 23220091152915

UDC

厦门大学

硕士学位论文

基于机器学习的双馈风力发电机
参数辨识研究

Research on Parameter Identification of Doubly-fed
Wind Turbine Based on Machine Learning

温茜文

指导教师姓名: 罗键 教授

合作指导教师: 彭彦卿教授

专业名称: 系统工程

论文提交日期: 2012年4月

论文答辩时间: 2012年5月

学位授予日期: 2012年 月

答辩委员会主席:

评阅人:

2012年 6 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它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

根据当前世界能源的形势，风力发电作为新能源中技术最成熟、最具规模开发条件和商业化发展前景的发电方式之一，已成为各国学者竞相研究的热点。双馈风力发电机具有变频器功率小、功率因数高、动态性能稳定等优点，而且非常适用于中小容量伺服领域和高精度、高动态响应伺服场合。因此，双馈风力发电机是目前风力发电采用最广泛的机组类型。但由于双馈风力发电机又具有严重的非线性、强耦合、参数时变等特性，而且电机中的调节器大多采用 PI 控制为主。当工况参数发生较大变化时，常规的 PI 控制器很难获得满意的控制效果。因此，为了提高双馈风力发电机的动态性能，解决双馈风力发电机非线性、参数时变等问题，必须寻找到先进的参数辨识控制策略。

本文就是针对以上问题，提出了基于机器学习的双馈风力发电机参数辨识研究。本次研究分别实现了 BP 神经网络和支持向量机的 PI 参数辨识及双馈电机参数辨识的控制任务和仿真模型。实验结果表明：虽然这两种方法在参数辨识过程中仍存在一些各自的缺点，但是与传统的双闭环 PI 控制相比，这两种策略无需繁琐的坐标旋转变换，可以有效减小负载扰动的影响，加强了双馈风力发电机 PI 控制器的抗扰动能力，进一步提高控制系统的鲁棒性和电网电能质量。本文的结论也为机器学习应用在双馈风力发电机控制之外的其它参数辨识领域提供了一定的参考价值。

关键词：双馈风力发电机；PI 控制器；BP 神经网络；支持向量机；参数辨识

厦门大学博硕士学位论文摘要库

Abstract

According to the current situation of the world energy, wind power, one of the power generating ways with the most mature technology, the largest commercial development conditions and development prospect, has become a hot research area to scholars of all countries. Doubly-fed wind turbine has the advantages of low frequency converter, high power factor and stable dynamic performance, and is suitable for medium and small capacity servo areas and high precision, high dynamic response of the servo occasion. Therefore, the wind generator is the type of the most widely used at present. But the doubly-fed wind generator is with the characteristic of serious nonlinear, strong coupling, parameter time-variance, and the motor mostly uses PI controller. When working parameters change greatly, the conventional PI controller is hard to get satisfactory effect. Therefore, we should search for advanced parameters identification control strategy to improve doubly-fed wind turbine dynamic performance, solve nonlinear and parameters time-varying problem, etc.

In view of the problems above, the paper put forward parameter identification of doubly-fed wind turbine based on machine learning . We realized respectively PI parameter identification based on BP neural network and support vector machine (SVM), and the controlling tasks and simulation model of doubly-fed machine parameter identification. The experimental results show that while the two methods in the parameters identification can reduce the load disturbances, strengthen the anti-disturbance performance of PI controller of the doubly-fed wind generators the disturbance, and improve the robustness of the control system as well as power quality, although there still exist some shortcomings. The conclusion of this paper provides some reference value for the application of machine learning in doubly-fed wind turbine control parameter identification field.

Key Words: Doubly-fed wind generators; PI controller; The BP neural network; Support vector machine (SVM); Parameter identification

厦门大学博硕士学位论文摘要库

目 录

摘要.....	I
Abstract.....	III
第一章 绪论.....	1
1.1 课题意义.....	1
1.2 国内外风力发电发展现状.....	2
1.2.1 国外风电的现状.....	2
1.2.2 国内风电的现状.....	4
1.3 参数辨识的必要性.....	5
1.4 本文的研究工作.....	5
第二章 双馈风力发电机.....	7
2.1 双馈电机的基本原理.....	7
2.1.1 双馈电机的结构.....	7
2.1.2 双馈电机的工作原理.....	8
2.2 双馈电机的功率流程.....	12
2.3 双馈电机的数学模型.....	13
2.3.1 基本数学模型.....	13
2.3.2 各种坐标下的数学模型.....	16
2.4 双馈电机的矢量控制技术.....	18
2.5 本章小结.....	21
第三章 基于 MATLAB 的双馈风力发电机仿真研究.....	22
3.1 Simulink 电力模块库之电机子库.....	22
3.2 双馈电机控制模块的仿真实现.....	23
3.2.1 三相静止坐标变化为两相静止坐标的仿真.....	23
3.2.2 三相静止坐标变换为两相旋转坐标的仿真.....	24
3.2.3 两相旋转坐标到两相静止坐标的变换 $2r/2s$ 的仿真.....	25
3.2.4 定子磁链观测的仿真.....	25
3.2.5 前馈解耦的仿真.....	27
3.2.6 空间矢量 SVPWM 控制的仿真.....	29
3.3 双馈风力发电机的仿真研究.....	33
3.3.1 仿真模型建立.....	33
3.3.2 仿真结果分析.....	35
3.4 本章小结.....	36
第四章 基于 BP 神经网络的双馈风力发电机参数辨识.....	37

4.1 关于 PI 控制器的分析	37
4.1.1 PI 控制参数影响的分析	37
4.1.2 仿真结果分析	38
4.2 BP 神经网络基础	40
4.2.1 BP 网络的工作原理	40
4.2.2 BP 网络的算法设计	44
4.3 基于 BP 神经网络的双馈风力发电机参数辨识的仿真	44
4.3.1 BP 网络 PI 辨识器的设计	44
4.3.2 仿真模型的实现	48
4.4 仿真实验结果及分析	50
4.4.1 分析方法介绍	50
4.4.2 仿真结果	50
4.4.3 分析结论	54
4.5 本章小结	54
第五章 基于支持向量机的双馈风力发电机参数辨识	56
5.1 支持向量机	56
5.1.1 支持向量机的原理	56
5.1.2 支持向量机的训练算法	59
5.2 基于支持向量机的双馈风力发电机参数辨识的仿真	59
5.2.1 支持向量机的算法设计	59
5.2.2 仿真模型的实现	62
5.3 仿真实验结果及分析	64
5.3.1 实验结果	64
5.3.2 结论分析	65
5.4 支持向量机与 BP 神经网络的比较分析	67
5.5 本章小结	68
第六章 总结与展望	70
6.1 本文工作总结	70
6.2 未来工作展望	70
[参考文献]	72
攻读硕士学位期间的研究成果	76
致谢	77

Content

Abstract	I
Chapter 1. Introduction	1
1.1 Research Background	1
1.2 Developing Status of Wind Power	2
1.2.1 Foreign Developing Status of Wind Power	2
1.2.2 Domestic Developing Status of Wind Power	4
1.3 The Necessity Analysis of the Parameter Identification.....	5
1.4 The Research Contents and Significance	5
Chapter 2. The Doubly-fed Wind Generator.....	7
2.1 The Basic Principle	7
2.1.1 The Structure Of The Doubly-fed Machine.....	7
2.1.2 The Basic Principle Of The Double-fed Machine	8
2.2 Power Flow Of The Doubly-fed Machine.....	12
2.3 The Mathematical Model Of The Double-fed Machine	13
2.3.1 The Basic Mathematical Model.....	13
2.3.2 The Mathematical Model In The Diffirent Coordinate	16
2.4 The Vector Control Technology of the Doubly-fed Machine	18
2.5 Brief Summary.....	21
Chapter 3. The Simulation of Doubly-fed Wind Generator Based on MATLAB.....	22
3.1 Simulink Power System Blockset	22
3.2 The Simulation of Doubly-fed Generator Control Module	23
3.2.1 The Simulation of Three-phase Static Coordinate Change to Two-phase Static Coordinates.....	23
3.2.2 The Simulation Model of Three-phase Static Coordinate Change to Two-phase Rotation Coordinates.....	24
3.2.3 The Simulation of Two-phase Rotation Coordinate Change to Two-phase Static Coordinates.....	25
3.2.4 The Simulation of the Stator Flux Observer.....	25
3.2.5 The Simulation of Feedforward Decoupling.....	27
3.2.6 The Simulation of Space Vector SVPWM Control	29
3.3 The Simulations of the Doubly-fed Wind Power Generator.....	33
3.3.1 Simulation Modeling.....	33
3.3.2 Analysis of the Simulation Results.....	35
3.4 Brief Summary.....	36
Chapter 4. The Parameter Identification Design of the Doubly-fed Wind Power Generator Based on the BP Neural Network	37

4.1 Analysis of the PI Controller	37
4.1.1 Analysis of the Effect on PI Control Parameters	37
4.1.2 Algorithm Design of the BP Neural Network.....	38
4.2 The Foundation of the BP Neural Network.....	40
4.2.1 The Principle Of the BP Neural Network.....	40
4.2.2 Algorithm Design of the BP Neural Network.....	44
4.3 The Parameter Identification Simulations of the Doubly-fed Wind Power Generator Based on BP Neural Network	44
4.3.1 Design of PI Identification based on the BP Neural Network.....	44
4.3.2 Realization of the Simulation Model.....	48
4.4 Simulation Results and Analysis	50
4.4.1 Introduction of the Analysis Methods	50
4.4.2 The Simulation Results.....	50
4.4.3 Analysis of the Simulation Results.....	54
4.5 Brief Summary.....	54
Chapter 5.The Parameter Identification Design of the Doubly-fed Wind Power Generator Based on the SVM.....	56
5.1 SVM	56
5.1.1 The Principle of the SVM.....	56
5.1.2 Training Algorithm of the SVM I	59
5.2 Simulation Results and Analysis	59
5.2.1 Algorithm Design of the SVM	59
5.2.2 Realization of the Simulation Mode.....	61
5.3 Simulation Results and Analysis	63
5.3.1 Experimental Results.....	63
5.3.2 Analysis on the Conclusion	64
5.4 Comparative Analysis Between the SVM and BP Neural Network.....	67
5.5 Brief Summary.....	68
Chapter 6. Summary and Prospects.....	69
6.1 Achievements Summary.....	69
6.2 Prospects and Exploration.....	69
[Reference]	71
The Author's Papers	75
Acknowledgements.....	76

第一章 绪论

1.1 课题意义

当前，由于能源的日趋匮乏和科学技术的飞速发展，可供人类开发和使用的化石燃料不可再生^[1]。世界各国对能源的需求随工业化进程急剧上升，大量使用化石能源也会对人类所赖以生存的生态环境造成严重的破坏，例如燃烧化石能源所排放的 CO_2 、含氧硫化物等会导致温室效应和酸雨等环境污染问题的产生。在如何解决日益紧张的能源和环境的问题上，世界各国已达成共识，并开始积极寻找可再生的能源，去培养新能源的广泛应用。能源专家指出，核能、太阳能、风能、地热能、潮汐能、可燃冰和氢能是可再生能源，地球上可用来发电的风力资源约有 100 亿千瓦，几乎是现在全世界水力发电量的 10 倍^[2]。全世界每年燃烧煤所获得的能量，只占风力在一年内所提供能量的三分之一。如果把全世界风能理论蕴藏量的 1%用于发电，便可为当今世界经济发展提供强大的动力支持。风能作为一种可再生能源具有很高的潜力。根据当前世界能源的形势，加快风能的技术研究和产业化刻不容缓。

在所有能源中，风能不同于煤、石油、天然气等化石燃料，需要从地下采掘，运送到火力发电厂的锅炉设备中去燃烧；也不同于水能，必须建造堤坝去推动水轮机的运转；更不像原子能，需要如此昂贵的装置和防护设备。风能的利用方法简单而且机动灵活，特别是在缺乏水资源、燃料及交通不方便的沿海岛屿、山区和高原地带都具有速度很高的风^[3]。试想若能把所有风能利用起来进行发电，这将会给当地人民的生产和生活带来巨大的改善。随着科技的进步，计算机技术的飞速发展，常规异步电机和交流同步电机慢慢地被具有广阔发展前途的高新技术产品——双馈发电机所替代。

采用双馈风力发电机的风能系统，定子绕组直接连接 3kv、6kv、10kv 的工频电网^[4]，转子电路的功率为滑差功率，风机和泵机所需要的调速范围小，一般为 30%左右，电力电子装置的功率仅为电机功率的 30%^[5]。而转子绕组可设计为低压，采用的低压变频装置容易和电力电子器件相匹配。这种设计不但降低了变频器的成本，还吸收由风速突变所产生的能量波动，避免主轴及传动机构承受过大的扭矩和应力，自由调整有功和无功功率。双馈风力发电机不仅在亚同步和超同

步调速范围内具有良好的调速性能，而且能够调节电网的有功和无功功率，最终改善电网系统的性能。综上所述，双馈风力发电机与传统电机相比具有显著优势，因此双馈风力发电技术是目前应用最为广泛和最为重要风能技术之一。

双馈风力发电机结构简单、稳定性高、成本低，已成为风电的一个重要发展方向。但由于双馈电机本身具有严重的非线性、强耦合、参数时变等特性^[6]，而且可控参数多、控制方案不好确定等都给控制增加了难度。双馈风力发电机中调节器大多以 PI 的控制算法为主，通过实时地现场调整控制器参数而获得期望特性。但双馈风力发电机的非线性和参数时变特性，使得采用常规的 PI 和其它线性控制方法难以设计出具有良好的动静态特性的速度调节器。为了提高双馈风力发电机的性能，必须寻找一种新参数辨识的控制策略，去解决非线性和参数时变的问题。

所谓机器学习，就是研究如何使用机器来模拟人类学习活动的一门学科，稍为严格的提法是：机器学习是一门研究机器获取新知识和新技能，并识别现有知识的学问。至今，神经科学于认知科学扮演先知者角色，数学填充了神经科学和认知科学与计算之间的沟壑。学习是一个有特定目的的获取知识过程，其内在行为是获取知识、积累经验、发现规律；外部表现是适应环境、改进性能、实现系统的自我完善。在研究方法上，AI 研究应该向非线性等领域学习，一类问题的深入研究比普适的研究更重要。机器学习现在似乎已经发展到一个新阶段——机器学习起源于人工智能，上一阶段的研究局限在人工智能这一领域中；而现在，机器学习已进入计算机科学的不同领域，成为一种支持和服务技术。目前，机器学习方面的研究不应再过多强调模拟人的学习能力，应该把机器学习真正当成一种支持技术，考虑不同领域甚至不同学科对机器学习的需求，对其中具有共性的、必须解决的问题进行研究。

1.2 国内外风力发电发展现状

1.2.1 国外风电的现状

世界能源组织报告^[7]：如果采取有效措施，风能到 2060 年将可提供给世界电力总需求的 10%，创造 240 万个就业机会，全球范围内二氧化碳废气的排放量减少 160 多亿吨。风力发电将成为世界上发展进度最快的能源^[8]，到 2015 年风力发

电总装机容量达到 60GW, 2020 年达到 0.1TW, 到 2015 年德国新增 600 万千瓦风电, 西班牙新增 650KW, 年生产能力将达到 1000KW, 可满足全国电力需求的 20%。随着技术的进步、规模的扩大化及风电发电成本的下降, 10 年后, 风能将完全可以和清洁的燃煤电厂竞争。由于 600KW 级大型风能机组技术成熟, 正在大批量生产, 2000KW 级风能机组不久将投入商业运行, 风能的造价由现在的 1000 美元/KW 有可能下降到 600-800 美元/KW, 发电成本从现在的 4-5 美分/KWH, 下降到 3-4 美分/KWH^[8]。由此可见, 风能有更加明显的经济效益, 而且风能又是对环境效益有贡献的可再生洁净能源, 可以和其他可再生能源相竞争, 这也是风能有强大竞争能力的原因。风能的迅猛发展也使那些能源短缺的国家, 尤其是发展中国家能够获取巨大的收益, 比如巴西、阿根廷、摩洛哥、埃及和哥斯达黎加等发展中国家, 这些国家的风能都在高速发展。

风力发电技术真正获取充分的发展是在 20 世纪 50 年代中期之后^[9]。由于火电导致的环境问题日益突出, 人类有限的矿物资源日益减少的现象越来越严重, 全世界的能源和环境问题日益威胁到人类的生存, 风能作为清洁的可再生资源终于获取世界巨大的重视。特别是世界石油危机爆发以来, 各个国家大批量的研究人员和生产厂家开始了对风能的研究和实践。经过几十年的努力, 风能技术终于有了突飞猛进的进步, 而且风能的发展逐步走向产品, 走向实用。

在串级调速的基础上发展起来的双馈风力发电机的研究最早可追溯到上世纪三十年代。一直到二十世纪八十年代, 随着晶闸管的出现, 风力电机串级调速控制的风能系统作为在当时各种综合条件限制下的一种可实现的系统, 得到了学术界的广泛青睐, 在工程领域被列为重点发展的科研项目之一获取了一定程度的应用。然而串级调速控制的风力电机功率因数低、效率不高, 电机只能在同步转速以下的范围运行, 达不到同步转速更不可能使电机在超同步转速状态下运行。目前国外对双馈调速的研究基本都在风力发电方面。据统计, 1982 年开始^[10], 美国将风力发电厂都由串级调速系统改造成双馈控制系统。然而, 国内对双馈调速技术的研究起步较晚, 国内对双馈调速的研究是从 90 年代开始, 是由串级调速中演化而来, 把逆串级调速控制方案逐步转变发展为双馈调速手段。现今, 很多国家的研究主要集中在风能及双馈电机的结合研制, 并在美国和俄罗斯通过试验验证, 效果良好。对于双馈风力发电机, 不但能够有效调整无功功率, 而且还能够实现变速恒频恒压发电的效能。所以, 双馈风力发电机在风力发电系统中受到广泛关

注和重视。

1.2.2 国内风电的现状

我国幅员辽阔，陆疆总长达 2 万多千米，海岸线 1.8 万多千米，是一个风力资源非常丰富的国家，全国约有 2/3 的地带为多风带^[11]。风能总储量为 35.18 亿千瓦，实际可开发的风能储量为 3.22 亿千瓦，这些风能为可再生能源和新能源利用技术提供了丰富的资源条件。中国的多风带为西北、华北、东北和东南沿海地区，跨全国 21 个省、市、自治区。到 1999 年底已开发 16 万台微小户用型风能发电机，24 座并网型风力发电厂，26 万千瓦的总装机容量，其中绝大多数机组是从国外引进的，最大单机容量为 600KW。但由于我国利用可再生能源会受到一系列因素的限制，例如资金、技术政策等。合理利用风能，对我国经济的发展，能源的可持续利用，具有十分重要的意义。

我国利用风能起步较晚，与世界上风能发电发达国家如德国、美国、西班牙等国相比还有很大差距。风能是 20 世纪 80 年代才迅速发展起来的，发展初期研制的风机主需要为 1KW、10KW、55KW、220KW 等多种小型风电机组^[12]，后期开始研制开发可充电型风能机组，并在海岛和风能广泛应用。目前有的风机已远销海外。至今，我国已经在河北张家口、内蒙古、山东聊城、辽宁营口、黑龙江富锦、新疆达坂城、广东南澳和海南等地建成了多个大型风能场，并且计划在江苏南通、灌云及盐城等地兴建兆瓦级风电场。截止 2007 年底，我国风机装机容量已达到 6.05GW，年发电量占全国发电量的 0.8%左右，比 2000 年风电发电量增加了近 10 倍，我国的风能量已跃居世界第 5 位。

目前，我国风机设备的研发主要走的是“引进消化吸收再创新”的路子^[13]。近两年国家有关部门为促进我国可再生能源产业的发展，制定了一系列政策措施，鼓励相关技术的研发，并收到积极效果。由于我国风电发展进入机遇期，许多企业纷纷进入，重复引进国外技术的现象非常严重，导致风电成本仍没有下降。今后，风电设备企业只有更多地走自主创新的路子，才能使我国的风电成本真正下降。风电设备制造业是一个涉及多学科、多领域交叉的行业，我国在进行相关技术研究和推动产业发展的过程中应该抱着科学的态度。国内企业要想有所突破，必须下定决心、坚持创新，作好长远发展的心理准备。

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts 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.

厦门大学博硕士论文摘要库