

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2011.08.023

基于模糊算法的智能变桨距控制技术

倪焕山, 康戈文

(电子科技大学自动化工程学院, 成都 611731)

摘要: 针对兆瓦级风电机组特性以及功率输出要求, 详细分析变速变桨距控制原理, 提出模糊智能变桨距控制算法。对双馈风力发电控制系统和模糊控制器的设计进行介绍, 以 1.5 MW 风力发电机为仿真对象, 利用风力发电领域的权威仿真软件 GH Bladed 对模糊算法进行仿真验证。仿真结果表明, 该算法具有良好的快速性和稳定性, 在高风速下, 能使输出功率稳定在额定功率附近。

关键词: 变速变桨距; 双馈电机; 稳定性; 模糊算法

中图分类号: TP273⁺.5 **文献标志码:** A

Technology of Intelligent Feather Control Based on Fuzzy Algorithm

Ni Huanshan, Kang Gewen

(College of Automation Engineering, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 611731, China)

Abstract: To satisfy the characteristics and the power-output requirements of the wind generator of megawatts level, analysis the theory about variable speed variable pitch very closely and put forward the fuzzy algorithm of intelligent feather control. It introduces the double-fed power control system and how to design the fuzzy controller. Taking the 1.5 MW wind generator as simulation object, it simulates and validates the fuzzy algorithm by using of the GH Bladed which is the authoritative simulation software in wind power field. The simulation results show that the algorithm has good quickness and stability. At the high speed of wind, it can keep the power-output nearby the rated power.

Keywords: variable speed variable pitch; double-fed generator; stability; fuzzy algorithm

0 引言

风力发电技术是一项新能源技术, 由于其低碳、环保、可再生而得到各国政府的大力扶持。尤其是近年来电力电子技术和智能控制技术的发展, 风力发电技术不断提高, 机组的单机容量由起初的千瓦级发展到现在的兆瓦级; 控制方式从定桨距失速调节向变桨距和变速恒频发展, 运行可靠性高达 98% 以上, 并且在风场运行的风力发电机组全部实现了集中控制和远程控制^[1]。

变桨距控制系统是风力发电机组控制系统中最重要的部分之一, 其中包括速度控制和功率控制 2 个主要控制器, 即并网前的转速控制和并网后的功率控制。在风电机组并网运行后, 若风速大于额定风速, 通过增加桨叶的桨距角, 使桨叶吸收的风能减少, 即控制系统能源输入减小, 从而保证发电机在额定功率工作; 反之减小桨叶的桨距角, 使桨叶吸收的能量增大, 转子转速上升, 发电机输出功率增加。通过对变桨距的控制, 实现了发电机始终维持在额定功率处运行^[2]。大型兆瓦级变速变桨风力发电机组变桨距的控制过程就是调节桨距角和发电机转子转速相配合的综合过程。兆瓦级风力发电系

统是典型的非线性、多变量、强耦合、时变的复杂系统, 很难建立精确的数学模型, 传统的 PID 很难满足控制要求。模糊理论起源于美国柏克莱加州大学电气工程系, 是在 1965 年 L. A. Zadeh 教授创立的模糊集合理论的基础上发展起来的, 已广泛应用于工业控制领域。因此, 笔者采用模糊算法, 对智能变桨距控制技术进行研究。

1 双馈风力发电控制系统设计

1.1 永磁同步电机和双馈异步电机的对比

目前在风力发电领域应用的发电机主要有永磁同步电机、双馈异步电机 2 种。

永磁同步发电机有以下 2 种形式: 一是带电磁转差离合器的同步发电机的风力发电系统, 利用电磁转差离合器使同步发电机的转速保持不变, 从而输出恒压恒频的交流电, 其优点是控制线路简单和输出电能质量高, 缺点是效率低, 相当一部分电能消耗在电磁转差离合器磁极的放热上。二是带变频器的同步发电机的风力发电系统, 当风速变化时, 同步发电机发出频率变化的电能, 通过中间变频器环节, 先整流再逆变即可把频率变化的电能转换为与电网频率相同的恒频电能送入电网。这种方案可

收稿日期: 2011-05-15; 修回日期: 2011-06-01

作者简介: 倪焕山(1985—), 男, 河南人, 硕士, 从事模式识别与智能系统、风力发电智能控制研究。

以在较宽的转速范围内得到频率恒定的交流电, 且无须中间调速机构, 具有较强的低压穿越能力。缺点是容量与发电机的容量相当的功率变频器。

双馈异步发电机构成的变速恒频风力发电方式有许多优点, 如变频器容量小, 原动机转速不受发电机输出频率限制, 发电机输出电压和电流的频率、幅值和相位也不受转子速度和瞬时位置的影响, 机电系统之间为柔性连接等。因此, 由双馈发电机构成的变速恒频风力发电系统已经成为目前国际上风力发电方面的研究热点和必然发展趋势^[3]。

1.2 双馈异步电机的原理框图

双馈异步风力发电结构如图 1, 定子侧直接接入电网, 转子侧通过双向功率变换器连接到电网。功率变换器在转子回路中, 流过的功率一般仅为定子额定功率的 1/4~1/3, 减少了对容量的需求, 且能量能够双向流动。

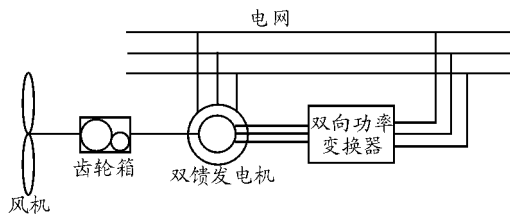


图 1 双馈异步风力发电系统结构框图

该系统对功率变换器容量需求较低, 能实现有功功率、无功功率的独立调节, 具有显著的优点。其缺点是转子上存在滑环和电刷, 不能避免滑环和电刷带来的弊端。目前这种风力发电技术得到了越来越多的风力发电工作者的关注, 发展前景较乐观。

1.3 变速变桨距控制器

这个控制器模型适于变速发电机, 这种发电机使用一个频率转换器从电网的恒频中解耦发电机转速, 超过额定风速时使用变桨距控制来限制功率。控制环见图 2。

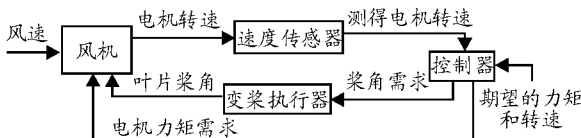


图 2 变速变桨距控制器结构图

2 模糊控制器的设计

2.1 模糊控制原理

模糊控制系统易于接受, 设计简单, 维护方便, 而且与常规控制系统相比, 具有稳定性好, 鲁棒性高等优越性。模糊控制还有一个好处是, 改变某些

规则对控制效果的影响很小, 最多影响控制效果的平滑性, 而不会影响轨道的大体趋势。模糊控制系统的基本原理如图 3。

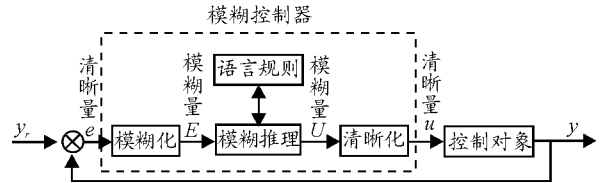


图 3 模糊控制系统原理

模糊控制的核心是模糊推理, 是一种非线性控制策略, 通过具体的模糊语言表达了操作经验以及常识推理规则。模糊控制系统的核心部分是模糊控制器, 它是一种语言推导型控制器。

2.2 模糊变桨距控制器的设计

研究表明, 采用模糊控制策略, 结合实际经验, 能够有效地适应非线性系统。变桨模糊控制器采用改变桨距角以改变空气动力转矩的方法来调节风力机风轮的功率系数, 进而控制风力机的输出功率。控制器的目标是在高于额定风速的任意风速下, 通过模糊控制器调节桨距角, 以此调节风力机的功率系数, 将输出功率限制在额定值附近。

为了实现模糊控制器的标准化设计, 目前在实际中常用的处理方法是 Mamdani 提出的方法, 即把偏差 E 和偏差变化率 EC 的变化范围设为 $[-6,+6]$ 区间内的连续变化量, 并使之离散化, 构成 13 个整数元素的离散集合: $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, 在变桨距运行工况下, 功率控制器的输入为功率误差, 输出为桨距角给定值, 模糊控制器输入语言变量功率误差 E 为 $\{PB, PM, PS, N, NS, NM, NB\}$, 功率误差变化率 EC 为 $\{PB, PM, PS, Z, NS, NM, NB\}$; 论域均为 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$, 输出语言变量值桨距角给定值 U 为 $\{PB, PM, PS, Z, NS, NM, NB\}$, 其中 $PB, PM, PS, Z, NS, NM, NB$ 分别对应“正大”、“正中”、“正小”、“零”、“负小”、“负中”、“负大”7 个档。

模糊控制规则是对系统控制经验的总结, 模糊控制规则的选择直接影响着整个模糊控制器的控制效果。推理合成法是一种有效建立模糊规则的方法。其主要的设计思想是根据已有的输入输出数据, 反复实验, 得出一套具有参考价值的、合适的模糊控制规则。文献[4]~[7]给出了一种根据系统输出的偏差及偏差变化率来消除偏差的模糊控制规则, 将其适当调整, 得出风力发电机组桨距角的模糊控制规

则，将其绘成表格成为模糊控制规则表，如表 1。

表 1 模糊控制规则表

U	E						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PM	PM	PS	Z	Z
NM	PB	PB	PM	PM	PS	Z	Z
NS	PB	PB	PM	PM	Z	NM	NM
EC	Z	PB	PM	PM	NS	NM	NB
PS	PM	PM	Z	NS	NM	NM	NB
PM	Z	Z	NS	NM	NM	NM	NB
PB	Z	Z	NS	NM	NM	NB	NB

模糊控制器的输出是一个模糊集，它包含多条控制规则的控制效果，以及控制量的各种信息，但被控对象仅能接受一个精确的控制量，应从中选择哪一个控制量加到被控对象中去？这就需要对模糊控制器的输出进行清晰化。清晰化的方法有加权平均法、最大隶属度平均法、中位数法等形式。这里采用加权平均法。加权平均法比较适合于输出模糊集的隶属度函数是对称的情况，计算公式^[8]为：

$$z = \frac{\sum \mu C_j(w_j) \cdot w_j}{\sum \mu C_j(w_j)} \quad (1)$$

式中： w_j 和 $\mu C_j(w_j)$ 分别表示对称隶属度函数的质心和隶属度值。

3 控制系统仿真

笔者以水平轴、上风向、三叶片的风力机组 FD77(东方汽轮机有限公司制造)为仿真对象，通过风力发电领域的仿真软件 GH Bladed 仿真平均风速为 12 m/s 的湍流风速给定条件下的变桨距运行工况，如图 4。对于变桨距控制，系统采用了 2 种控制方法作为对比：一是采用模糊控制器；二是传统的 PID 控制，参考设计参数分别为 $KP=0.0132$ ， $Ki=0.00528$ ， $Kd=0$ 。仿真时间 10 min，仿真结果分别如图 5 和图 6，由仿真结果可以看出，在高于额定风速的情况下，与传统的 PID 控制相比，模糊控制器可以有效地调节桨距角跟随风速迅速变化，从而有效地调节风轮功率系数，控制风力机的输出功率稳定在额定功率。

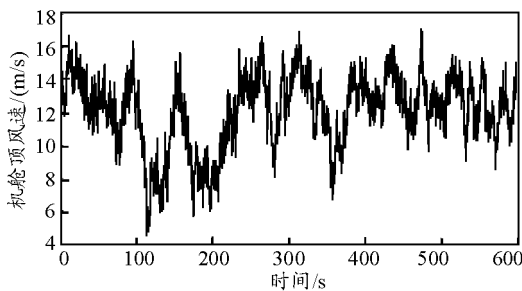


图 4 平均风速为 12 m/s 的湍流风速

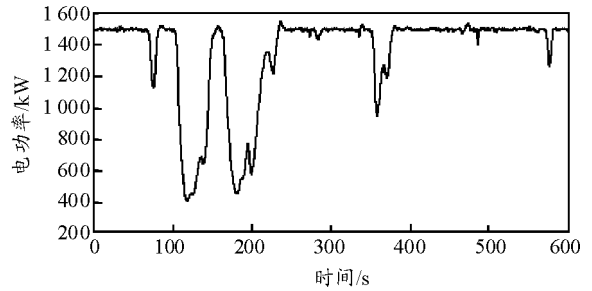


图 5 模糊变桨距功率输出

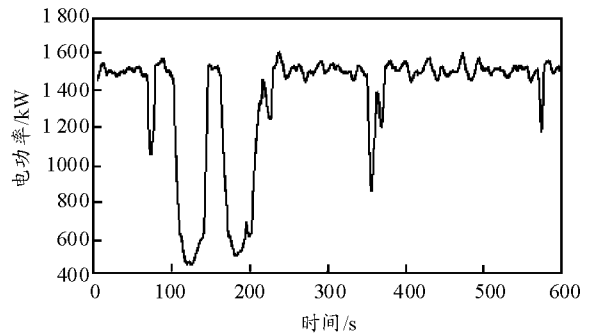


图 6 PID 变桨距功率输出

FD77 风力发电机组的主要参数：额定风速 11.5 m/s；切入风速 3 m/s；切出风速 25 m/s；风轮直径 77 m；齿轮箱传动比 1:104；发电机额定转速 1 770 r/min；轮毂中心高度 58.65 m。

4 结束语

仿真结果表明：控制算法具有很好的稳定性，在高风速下，大大减小了调节时间，降低了超调量，能够使输出功率稳定在额定功率附近，对极端风况也能起到很好的应对作用，具有较高的工程应用价值。

参考文献：

- [1] 叶杭冶. 大型并网风力发电机组控制算法研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [2] 邢钢, 郭威. 风力发电机组变桨距控制方法研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 11-18.
- [3] 郭家虎. 变速恒频双馈风力发电系统控制技术的研究[D]. 上海: 上海大学, 2008.
- [4] 易继锴, 侯媛彬. 智能控制技术[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2004: 177-217.
- [5] 叶杭冶. 风力发电机组的控制技术[M]. 2 版 北京: 机械工业出版社, 2006: 1-245.
- [6] 温和煦. 兆瓦级风力发电机组模糊控制[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2008.
- [7] 刘定邦. 大型风力发电机组的模糊控制研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [8] 张文修, 梁广锡. 模糊控制与系统[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998: 55-164.