

Simulation of Variable-Pitch Control for Direct Drive Permanent Magnet Synchronous Wind Turbine

Xuesong Chen¹, Hao He²

¹State Grid Sichuan Hongya Electric Power Supply Company Limited, Meishan Sichuan

²School of Electrical and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu Sichuan

Email: ananzhang@swpu.edu.cn

Received: Dec. 9th, 2015; accepted: Dec. 26th, 2015; published: Dec. 31st, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

When the wind turbines work in the high speed region, they capture more wind energy than generating units rated operating range. Therefore, in this paper, the way of adjusting the pitch angle was used to maintain generator power output in the vicinity of the rating. First of all, the paper introduces the characteristics and structure of variable-pitch wind turbine; then according to the strong nonlinear characteristics of wind power generation system, the fuzzy control strategy to realize the transformation of the pitch was proposed. By analyzing the principle of fuzzy control, the self-optimizing fuzzy PID controller is designed, and the simulation model of variable pitch control is established. And the comparison of the traditional PID regulation is accomplished.

Keywords

Wind Power Generation, Variable-Pitch Wind Turbine, Fuzzy PID Control

直驱永磁同步风力发电机组变桨控制仿真

陈雪松¹, 何 豪²

¹国家电网四川洪雅供电有限责任公司, 四川 眉山

²西南石油大学电气信息学院, 四川 成都

Email: ananzhang@swpu.edu.cn

收稿日期: 2015年12月9日; 录用日期: 2015年12月26日; 发布日期: 2015年12月31日

摘要

当风力机运行在高风速区域时, 捕获的风能超过了发电机组额定运行范围, 因此, 本文采用调节桨距角的方式维持发电机功率输出在额定值附近。首先介绍了变桨型风力机的特点和结构; 接着针对风力发电系统非线性强的特点, 提出采用模糊控制的策略实现桨距角的变换。通过分析模糊控制原理, 设计自优化模糊PID控制器, 并建立变桨控制仿真模型, 完成与传统PID调节的对比分析。

关键词

风力发电, 变桨风力机, 模糊PID控制

1. 引言

当实际风速大于风力机额定风速, 即 $v_w > v_{w-rated}$ 时, 风力机输出功率会随着风速的上升而增加, 如果不采取措施相应减少风力机截获风能的能力, 发电机输出功率会影响到系统的运行, 甚至会导致系统崩溃, 同时也可能超过机组机械应力能够承载的范围, 导致机组机械损坏。因此, 为了避免以上情况, 目前最有效的办法就是根据发电机转速和发电机输出功率做出风力机桨距角调整, 以维持额定功率输出, 这种方法即为变桨距控制。

变桨距调节的过程主要分为三个阶段, 分别是开机阶段、保持阶段和调节阶段[1]: 开机阶段: 当发电机组开启, 风力机到达起动条件时, 首先控制桨距角使得其调整到 45° 位置, 随着转速增加到一定值后, 再将桨距角调到 0° , 直到风速超过额定风速。保持阶段: 在风速未达到额定值时, 桨距角将始终维持 0° 不变化, 此时相当于定桨距, 从而使得风力机尽最大可能捕获风能。调节阶段: 当风速继续上升, 直至超过额定风速, 此时风力机的变桨调节控制正式运行。根据发电机的功率反馈值及时调节桨距角大小, 风速上升的时候调节桨距角增大; 风速减小时, 控制桨距角减小。总之, 当风速高于额定风速时, 通过控制调节桨距角变化使得发电机功率输出稳定在额定功率附近。

变桨距风力发电机组具有以下优点[2]: 1) 起动风速较低, 风速较低时, 只需将桨距角调整到合适的位置即可保证较大起动转矩; 2) 对功率输出具有主动调节优势, 这使得风力发电机组测试、启停、运行更加灵活方便; 3) 额定运行点之前的功率输出能保持最佳状态; 4) 额定运行点之后发电机输出功率更加稳定。

当变桨控制进入调节阶段后, 需做出转速控制向功率控制的切换, 风力发电机组开始额定功率运行, 变桨控制系统此时开始根据发电机输出功率的反馈信号进行桨距角调节。额定功率给定信号与发电机输出功率反馈信号比较, 当发电机输出功率大于额定功率时, 调整叶片使得迎风面积减小; 当发电机输出功率小于额定值时, 增大迎风面积, 从而增大风力机吸收风能的强度。其控制结构框图如图 1 所示。

由于本文主要研究的是高风速区域的变桨距控制, 因此在额定风速以下的桨距角控制不予考虑, 也就是说图 1 中的反馈控制信号只由发电机输出功率决定, 与转速无关。图 1 中虚线框包含内容即为机组的变桨控制系统。

由于风速具有随动性、突变性和间歇性较强等特点, 且整个风力发电机组系统变量复杂多变、非线性较强, 变桨控制器设计时, 使用传统 PID 调节难以在恶劣的风速环境情况下获得较好的控制效果, 因此本文变桨控制采用模糊控制的方式。模糊变桨控制策略能克服系统非线性, 且参数调节具有较强的鲁

棒性, 变桨控制时不依赖于被控对象的精确模型[3]。

2. 自优化模糊 PID 变桨控制器设计

模糊集合没有精确的边界可言, 它是从“属于一个集合”到“不属于一个集合”渐变转换的状态, 一般情况下, 有 5 种隶属度函数可以用来表征, 它们分别是三角形隶属度函数、梯形隶属度函数、高斯隶属度函数、Z 型隶属度函数、S 型隶属度函数[4]。选取好隶属度函数对控制效果会产生较大影响, 通常形状较为平缓的隶属度函数用于误差较大的控制范围, 隶属度函数形状较为尖的用于误差较小甚至误差为零的区域。

根据风力发电变桨距控制要求, 以发电机额定功率 300 kW 为控制目标。将功率偏差量 e 、功率误差变化率 ec 以及输出控制量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 都分为 7 个等级[5], 其在模糊集上的基本论域、模糊子集、模糊论域、量化因子如表 1 所示。

本文推理算法采用 Mamdani 法运算规则, 误差量 e 和误差变化率 ec 隶属度函数采用高斯型, 输出量 u 的隶属度函数均采用三角形函数。两种函数数学模型如下[6]:

(1) 高斯型隶属函数。其函数曲线由 σ 和 c 两个参数决定, 其中 σ 决定曲线宽度, c 决定曲线中心位置。即:

$$gaussmf(x, \sigma, c) = \exp\left[-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (2-1)$$

(2) 三角隶属度函数。其形状由三个参数 a 、 b 、 c 来确定, a 、 b 、 c 对应着三角形隶属函数的 x 坐标[7]。即:

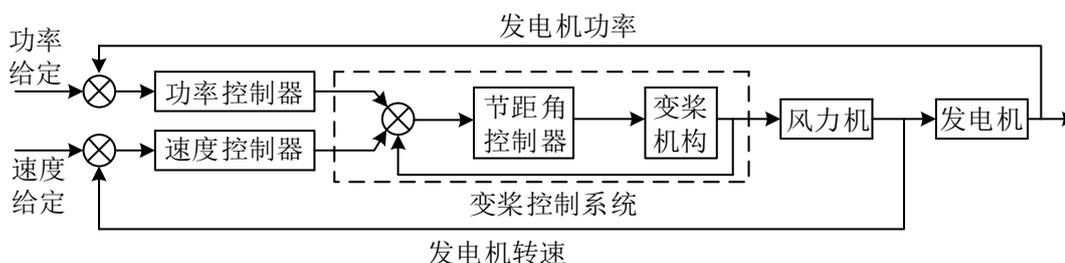


Figure 1. Variable pitch control structure diagram of direct driven permanent magnet wind turbine

图 1. 直驱型永磁风力发电机组变桨控制结构图

Table 1. Linguistic variables, basic theory, fuzzy sets, fuzzy theory and quantitative factors

表 1. 语言变量、基本论域、模糊子集、模糊论域和量化因子

变量	e	ec	ΔK_p	ΔK_i	ΔK_d
语言变量	E	EC	K_p	K_i	K_d
基本论域	[-30 kW 30 kW]	[-3 kW 3 kW]	[-0.6 0.6]	[-0.3 0.3]	[-0.3 0.3]
模糊子集		{NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}			
模糊论域	[-6 6]	[-3 3]	[-6 6]	[-3 3]	[-3 3]
量化因子	0.2	1	0.1	0.1	0.1

$$\text{triangle}(x, a, b, c) = \begin{cases} 0 & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & b \leq x \leq c \\ 0 & x \geq c \end{cases} \quad (2-2)$$

3. 建模及其仿真分析

由于变桨距分析是基于风速随机变化的基础上的, 因此本章风速信号采用基本风速、突变风速、渐变风速和随机风速四种最基本的成分组成[8]。组合风仿真模型如图 2 所示。

本文桨距角的执行机构采用一阶延时函数, 变桨实际执行过程中会有一个滞后的时间, 考虑时滞时, 带时滞的一阶惯性数学模型如下所示

$$\beta(s) = \frac{k_\beta}{t_\beta s + 1} \beta^*(s) \quad (3-1)$$

式中: $\beta(s)$ ——桨距角执行机构输出角度(°);

$\beta^*(s)$ ——需求桨距角(°);

k_β ——比例系数;

t_β ——执行机构操作时间(s)。

为了防止桨距角变换频率过大, 超出执行机构变换能力, 本文还根据工程实际情况, 考虑参数饱和和溢出限制。变桨执行机构的动作速度控制在每秒 $1^\circ \sim 5^\circ$, 另外桨距角位置不能超过 $0^\circ \sim 90^\circ$ 的基本范围。

图 3 为本文自优化模糊 PID 控制桨距角变换的模型, 当图中实际风速大于额定风速时切换到桨距角变换, 开始按照控制策略调节桨距角大小, 减少风能捕获。风力机参数设置如下: 额定功率 $P_r = 300 \text{ kW}$, 额定风速 $v = 11.3 \text{ m/s}$, 空气密度 $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$, 最佳叶尖速比 $\lambda = 8.1$, 最大功率转换系数 $C_p = 0.48$, 叶片半径 $R_t = 15 \text{ m}$ 。

模拟高风速区域风速信号如仿真图 4 所示, 信号在额定风速 11.3 m/s 到 16.3 m/s 之间连续随机波动。仿真分析时, 首先采用传统的 PID 调节方式对桨距角进行控制, 仿真结果如图 5 和图 6。当图 4 中风速开始上升时, 图 5 中桨距角从 0° 开始增大, 而此时风能转换系数开始从 0.48 逐渐减小; 从整体结果来看, 桨距角和功率转换系数曲线的随动性良好, 紧跟风速波动信号。图 6 的输出功率曲线表明系统控制正确,

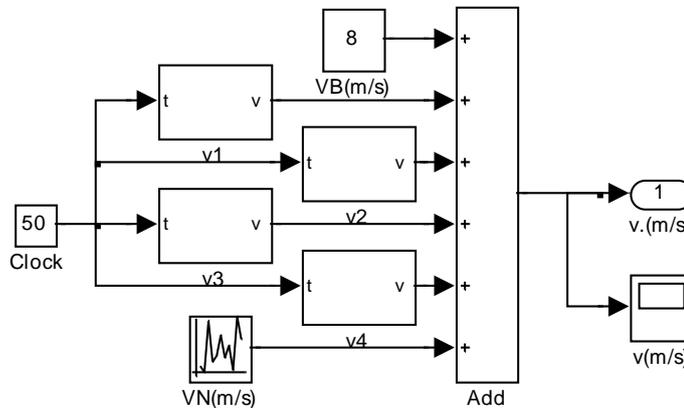


Figure 2. The simulation model of combined wind
图 2. 组合风仿真模型

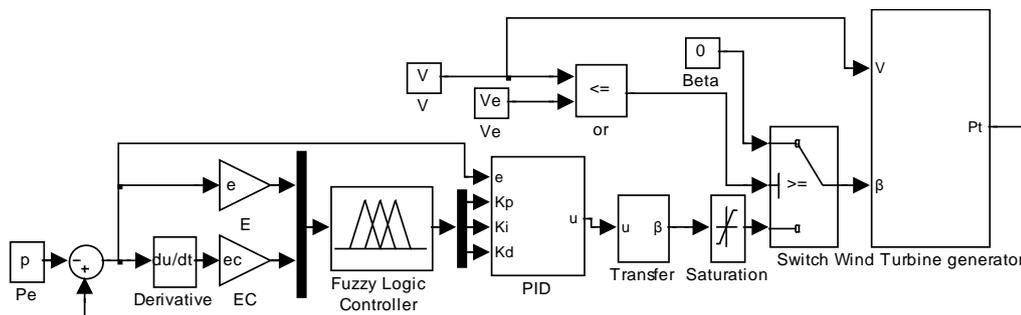


Figure 3. Self-optimization fuzzy PID control simulation model of pitch angle

图 3. 自优化模糊 PID 控制桨距角仿真模型

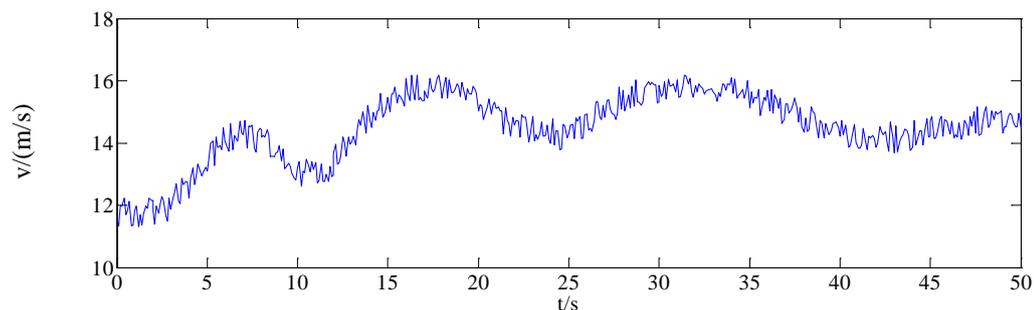


Figure 4. The speed signal of combined wind when the wind speed at 11.3 m/s higher than the rated seep

图 4. 高于额定风速 11.3 m/s 时的组合风速信号

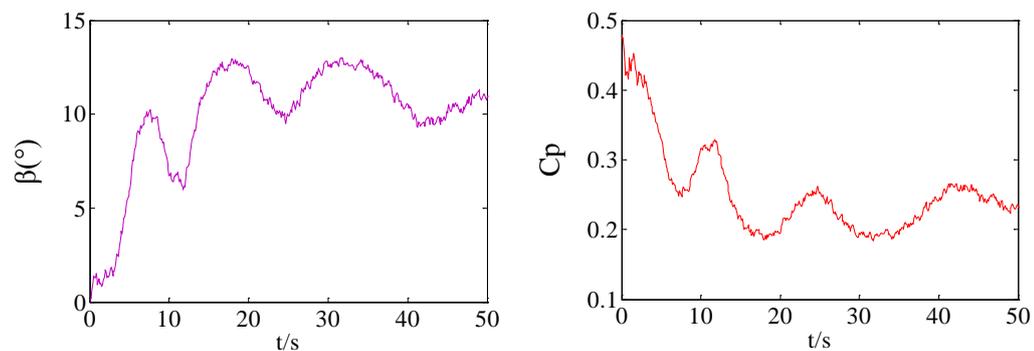


Figure 5. The change curve of the pitch angle β and wind energy conversion coefficient C_p

图 5. 桨距角 β 和风能转换系数 C_p 的变化曲线

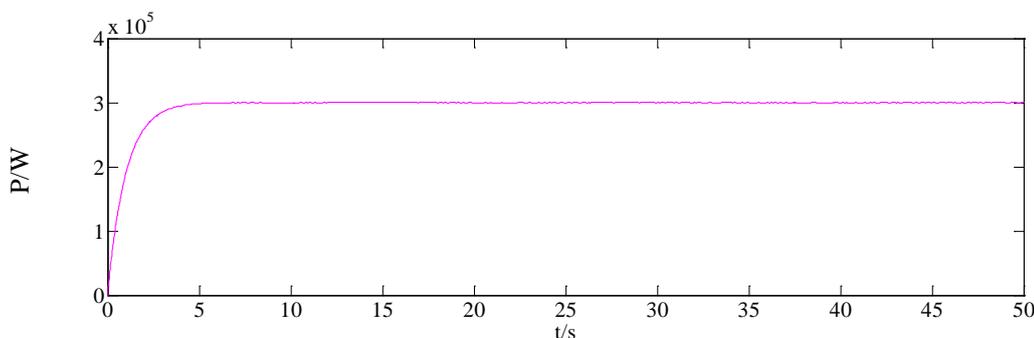


Figure 6. Curve of power output

图 6. 功率输出曲线

当风速在高风速区域波动时功率基本上能保持在 300 kW 附近稳定输出。

如图 5 和图 6 所示。本文模糊 PID 参数能够根据风速细微变化迅速做出调整, 如图 5 所示, 桨距角和风能转化系数曲线变化能反映该控制方法的时效性, 对风速信号的跟踪效果更佳, 响应更快。自优化模糊 PID 控制时调节时间相对较短, 且超调量几乎为零; 另外传统 PID 功率输出波动比本文方法大, 传统 PID 波动范围为 1.0%, 而本文方法为 0.66%。因此自优化模糊 PID 控制策略控制效果更佳, 更适应桨距角变换控制。

4. 结论

本文首先对变桨型风力机的特点和结构进行了介绍。然后针对风力发电系统非线性强的特点, 从变桨距控制的惯性误差和信号时滞角度出发, 提出了采用能适应实时工况的自优化模糊 PID 控制策略, 并设计了模糊控制器, 建立了仿真模型。从仿真分析结果可看出: 相比传统 PID 调节, 自优化模糊 PID 控制方法动态响应更快, 对风速高频率变化具有很强的适应能力, 当风速在 11.3 m/s 以上的高风速区域波动时, 功率输出更加平稳。

参考文献 (References)

- [1] 周浩. 基于智能滑模变结构控制的风力发电系统变桨距控制研究[D]: [硕士学位论文]. 株洲: 湖南工业大学, 2013.
- [2] 王佳雯, 龚华军, 陈永. 大型风力发电机组变桨距控制系统设计与仿真[J]. 电气自动化, 2011, 33(5): 18-20, 36.
- [3] Zhang, X.Y., Wang, W.Q., Li, F., *et al.* (2012) Individual Pitch Control Based on Fuzzy PI Used in Variable Speed Wind Turbine. 2012 12th International Conference on Control Automation Robotics & Vision (ICARCV), 1205-1208.
- [4] Singh, M. and Chandra, A. (2011) Application of Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System for Sensorless Control of PMSG-Based Wind Turbine with Nonlinear-Load-Compensation Capabilities. *IEEE Transactions on Power Electronics*, **26**, 165-175. <http://dx.doi.org/10.1109/TPEL.2010.2054113>
- [5] 李玉婷. 区间值模糊推理[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西北大学, 2007.
- [6] 崔湘军. 模糊模式识别中隶属函数选取的探讨[J]. 邵阳学院学报(自然科学版), 2010, 7(2): 5-8.
- [7] Chen, J.X. and Li, W. (2003) Application of Fuzzy Control PID Algorithm in Temperature Controlling Systems. 2003 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, **4**, 2601-2604.
- [8] 魏毅立, 韩素贤, 时盛志. 风力发电系统中组合风速的建模及仿真[J]. 可再生能源, 2010, 28(2): 18-20.