

# 基于 T-S 模糊加权的风电机组变桨距的双模切换优化控制\*

张 强, 侯 涛

(兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

**摘 要:** 传统的 PID 变桨距控制策略存在转速波动较大、变桨的跟随性差等不足。以风速在额定风速以上时,使风力发电机的输出功率稳定在额定功率为研究目标。针对变桨系统的惯性与延迟导致控制过程动态调节时间长、超调量大等问题,提出了基于 T-S 模糊加权的模糊与 PID 双模切换优化变桨距控制策略。以 Simulink 为试验平台,搭建了永磁直驱风力发电机组的变桨控制模型。通过仿真验证表明,所提方法具有模糊控制与 PID 控制两者的优点,控制输出的桨距角精度更高、响应速度更快、功率更加靠近发电机输出的额定功率。

**关键词:** 风力发电; 变桨; T-S 模糊加权; 双模控制

**中图分类号:** TM 315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2018)07-0122-05

## Variable Pitch Double Mode Switching Optimal Control of Wind Turbines Based on T-S Fuzzy Weighted\*

ZHANG Qiang, HOU Tao

(School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** The traditional PID variable pitch control strategy had large fluctuant rotation speed and low following features of the pitch angle. It was focused that the output power of the wind turbine was stable at rated power above the rated wind speed. For the inertia and delay of the variable pitch system, the problem of long dynamic adjustment time and large amount of overshoot are caused in the control process. A T-S fuzzy weighted dual mode pitch control strategy based on PID control and fuzzy control was presented. The direct-drive variable pitch PM wind turbine simulation model has been built with Simulink, through the simulation verification. The result showed that this method had the advantages of fuzzy control and PID control, had the accuracy of pitch angle higher and the response speed faster, so that the power of generator was more closed to rated power.

**Key words:** wind power generation; variable pitch; T-S fuzzy weighted; double model control

## 0 引 言

变桨距控制技术是当今大型风力发电机组发展的重要技术之一。大型的永磁直驱风力发电系统是一个大惯性、纯滞后的非线性系统。桨距角的变化对风速而言是非线性的,桨距角很小的变化会对转矩产生很大的影响,进而影响风力发电机的输出功率,故有必要提高桨距角控制的精度与快速

性<sup>[1-4]</sup>。PID 算法简单,最为常用,但易受外界干扰,抗干扰性弱;自适应控制抗干扰性较强,但参数调整时间较长,不适用复杂系统;神经网络控制能逼近系统的数学模型,控制较为精确,但与输入数据样本有极大的关联;鲁棒控制能获得较好的控制效果,但控制算法较复杂,难以工程实现<sup>[5-7]</sup>。

变桨距风力机是定桨距风力机的改进和发展。其功率调节依靠叶片固有的气动特性对桨距角的

\* 基金项目: 甘肃省自然科学基金项目(1606RJZA002);甘肃省高等学校科研项目(2017A-026)

作者简介: 张 强(1993—),男,硕士研究生,研究方向为风力发电与智能控制。

侯 涛(1975—),男,教授,工学博士,研究方向为智能信息处理与智能控制。

调节来实现。在额定风速以上时,通过改变桨距角来改变攻角,进而改变叶片的气动性能、发电机的电气性能及两者的协调性,从而限制对风能的吸收<sup>[8-9]</sup>。本文在传统的 PID 控制技术的基础上,提出了一种新型的基于 T-S 模糊加权的模糊与 PID 双模控制技术,通过测量传动机构的轴速来对桨距角进行控制,进而调节其输出功率。切换时根据传动机构的轴速与发电机额定转速的偏差大小及其变化率,利用 T-S 模糊型推理,使用加权平均法进行清晰化,使用加权求和法合成输出控制量。

## 1 变桨风电系统数学模型

### 1.1 风速模型

三维湍流风模型是最符合现实风能分布和变化情况的,在仿真中能模拟出风力机最真实的性能状况。本文采用文献[10]的方法,通过逼近一个线性滤波器模型来实现对湍流风模拟。输入为服从 Gauss 分布的白噪声,其均值为零,方差为  $\delta^2$ ,通过一个  $\frac{K}{s+a}$  的滤波器,比例因子为  $K$ ,一般取计算步长的倒数的平方根  $K = \sqrt{1/\Delta T}$ ,  $a$  为常值来模拟 Von Karman 模型的三维大气紊流<sup>[11-12]</sup>。

### 1.2 风力机数学模型

依据贝兹理论,风力机的数学模型<sup>[13]</sup>可表示为

$$\begin{cases} P_m = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 C_p(\beta, \lambda) v^3 \\ T_m = P_m / \omega_1 = \frac{1}{2} \pi \rho R^3 C_p(\beta, \lambda) v^2 / \lambda \\ \lambda = R \omega_1 / v \\ C_p = 0.5176(116\lambda_1 - 0.4\beta - 5)e^{-21/\lambda_1} + 0.0068\lambda_1 \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $\lambda_1 = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.0035}{\beta^3 + 1}$ ;

$P_m$ ——风机的机械功率;

$T_m$ ——风机的机械转矩;

$\rho$ ——大气密度;

$R$ ——风轮半径;

$v$ ——风速;

$\beta$ ——桨距角;

$\lambda$ ——叶尖速比;

$C_p$ ——风能的利用系数;

$\omega_1$ ——风机的转速。

### 1.3 传动轴数学模型

直驱风力发电机组传动轴的柔性较低,采用刚体模型:

$$J \frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - B\omega \quad (2)$$

式中:  $J$ ——系统的等效转动惯量;

$B$ ——黏滞系数。

### 1.4 变桨距执行机构数学模型

变桨的精度与灵敏度对功率有着很大的影响。其执行机构由伺服电机或液压装置驱动,等效为一阶惯性环节:

$$G_{pitch}(s) = \frac{\beta(s)}{\beta_{ref}(s)} = \frac{1}{\tau_b s + 1} \quad (3)$$

式中:  $\tau_b$ ——桨距角响应的时间常数;

$\beta$ ——实际的桨距角;

$\beta_{ref}$ ——桨距角控制的给定值。

## 2 T-S 模糊加权变桨距控制策略

在额定风速以上,发电机的功率已达到额定功率,由于受风电机组机械系统和电气系统运行极限的限制,应当限制风能的转化效率,使发电机的输出功率稳定在额定功率。此时桨距角的参考值可由风速、发电机转速和输出功率独立控制。但是由于风速不能精确测量并且变化迅速,在风轮平面内,风速并不相同<sup>[11]</sup>。因此一般不采用风速来进行控制。本文通过测量传动机构的轴速来对桨距角进行控制,控制桨距角来限制风轮吸收的功率,以此来稳定机组的输出功率。整体的控制框图如图 1 所示,  $\omega$  为发电机的额定转速,  $\omega_1$  为速度检测环节的转速输出。

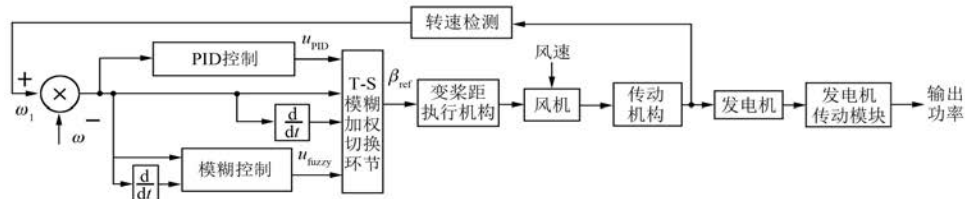


图 1 变桨距控制框图

## 2.1 PID 控制

PID 环节根据输入的传动机构的轴速与发电机额定转速的偏差来计算输出值  $U_{PID}$ 。PID 是一种线性控制器,其根据传动机构的轴速  $\omega(t)$  与发电机的额定转速  $\omega_1(t)$  构成控制偏差  $e(t) = \omega_1(t) - \omega(t)$  进行控制:

$$u(t) = k_p \left[ e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + \frac{T_d de(t)}{dt} \right] \quad (4)$$

式中:  $k_p$ ——比例系数;

$T_i$ ——积分时间常数;

$T_d$ ——微分时间常数。

## 2.2 模糊控制

模糊控制器采用二维模糊控制器。设传动机构的轴速与发电机额定转速的偏差为  $E$ , 其变化率为  $EC$ 。额定风速以上时,传动机构的轴速高于发电机额定转速,此时偏差为正,采用单边模糊控制。由于发电机的给定转速为 27.8 r/min (2.91 rad/s),故设  $E$  的论域为  $[0, 8]$ , 其模糊论域为  $[0, 4]$ ,  $EC$  的论域为  $[-14, 14]$ , 其模糊论域为  $[-6, 6]$ 。由于工程应用中要求桨距角在  $0^\circ \sim 25^\circ$  变化,设  $U$  的论域为  $[0, 25]$ , 其模糊论域为  $[0, 5]$ , 则量化因子  $k_e = \frac{4}{8} = \frac{1}{2}$ ,  $k_{ec} = \frac{6}{14} = \frac{3}{7}$ ,  $k_u = \frac{25}{5} = 5$ 。 $E$ 、 $EC$  和  $U$  的隶属函数都取为三角型。设  $E$  的模糊子集为  $\{PB, PM, PS\}$ , 偏差变化率的  $EC$  的模糊子集为  $\{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$ , 输出  $U_{fuzzy}$  的模糊子集为  $\{ZE, PS, PM, PB\}$ 。 $U_{fuzzy}$  的模糊控制规则表如表 1 所示。

表 1  $U_{fuzzy}$  的模糊控制规则

| $E$ | $EC$ |    |    |    |    |    |    |
|-----|------|----|----|----|----|----|----|
|     | PB   | PM | PS | ZE | NS | NM | NB |
| PB  | PB   | PB | PB | PM | PS | PS | ZE |
| PM  | PB   | PB | PM | PM | PS | ZE | ZE |
| PS  | PM   | PM | PM | PS | ZE | ZE | ZE |

## 2.3 T-S 模糊加权切换控制设计

### 2.3.1 设计原理

利用 T-S 模糊模型的推理输出是定常值这一特点来实现两种控制方式的加权切换控制。模糊与 PID 双模切换控制的控制策略就是在大范围偏差内模糊控制起控制作用,在小范围偏差内切换

为 PID 控制起控制作用。为了保证两种控制器之间的切换不会造成输出量的振荡,两者的切换采用基于模糊规则的环节来实现,确保控制环节之间的平滑过渡。合理地设置阈值,能兼顾模糊控制的动态性能和 PID 控制的稳态精度。T-S 模糊加权切换环节的输出为接近某一模态的权值。令  $k_{PID}$  和  $k_{fuzzy}$  为 T-S 模糊模型的两个推理输出,  $U_{PID}$  和  $U_{fuzzy}$  分别为 PID 环节和模糊环节的输出控制量,在小范围偏差内 PID 控制起控制作用,输出为  $U_{PID}$ ,此时  $k_{PID}$  为主导权值,在大范围偏差时切换为模糊控制起控制作用,输出为  $U_{fuzzy}$ ,此时  $k_{fuzzy}$  为主导权值。设定 T-S 模糊模型的两个输出  $k_{PID}$  和  $k_{fuzzy}$  的值都为 0 和 1,合理地设置模糊规则,  $k_{PID}$  和  $k_{fuzzy}$  根据偏差及其变化率经过模糊推理和清晰化后都输出为  $[0, 1]$  之间的精确值且  $k_{PID}$  和  $k_{fuzzy}$  的和始终等于 1。把  $k_{PID}$  和  $k_{fuzzy}$  分别加权到 PID 环节的输出  $U_{PID}$  和模糊环节的输出  $U_{fuzzy}$ ,即可实现双模加权切换控制。

### 2.3.2 T-S 模糊规则制定

T-S 型模糊加权算法的模态划分取决于传动机构的轴速与发电机额定转速  $E$  及其变化率  $EC$ , 利用这两个量基于模糊规则来确定控制器的模态。 $U_{sum}$  为合成输出量。由于风速处于额定风速以上,此时发电机转速高于额定转速,转速偏差为正,故采用单边模糊控制。选取  $E$  和  $EC$  的论域和模糊论域同模糊环节一样,  $E$  的模糊子集为  $\{PS, PM, PB\}$ ,  $EC$  的模糊子集为  $\{NB, NS, ZR, PS, PM, PB\}$ 。在模糊规则制定时,  $k_{PID}$  和  $k_{fuzzy}$  的值设定为 0 或 1,  $k_{PID}$  和  $k_{fuzzy}$  的模糊规则表,如表 2、表 3 所示,其中  $B_1 = 1, S_1 = 0$ 。

表 2  $k_{PID}$  模糊规则表

| $E$ | $EC$  |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | NB    | NS    | ZR    | PS    | PB    |
| PS  | $B_1$ | $B_1$ | $B_1$ | $B_1$ | $S_1$ |
| PM  | $B_1$ | $B_1$ | $B_1$ | $S_1$ | $S_1$ |
| PB  | $B_1$ | $S_1$ | $S_1$ | $S_1$ | $S_1$ |

表 3  $k_{fuzzy}$  模糊规则表

| $E$ | $EC$  |       |       |       |       |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
|     | NB    | NS    | ZR    | PS    | PB    |
| PS  | $S_1$ | $S_1$ | $S_1$ | $S_1$ | $B_1$ |
| PM  | $S_1$ | $S_1$ | $S_1$ | $B_1$ | $B_1$ |
| PB  | $S_1$ | $B_1$ | $B_1$ | $B_1$ | $B_1$ |

### 2.3.3 T-S 模糊模型清晰化

T-S 的清晰化采用加权平均法, 设第  $i$  条规则输出的结果为  $u_i$ , 权重为  $w_i$ , 则总输出为

$$U = \frac{\sum_{i=1}^m w_i u_i}{\sum_{i=1}^m w_i} = \frac{w_1 u_1 + w_2 u_2 + \cdots + w_m u_m}{w_1 + w_2 + \cdots + w_m} \quad (5)$$

此时输出  $U$  为  $k_{\text{PID}}$  和  $k_{\text{fuzzy}}$ 。合理地设置模糊规则,  $k_{\text{PID}}$  和  $k_{\text{fuzzy}}$  根据偏差及其变化率经过模糊推理和清晰化后都输出为  $[0, 1]$  之间的精确值,  $k_{\text{PID}}$  和  $k_{\text{fuzzy}}$  的和始终等于 1。

### 2.3.4 T-S 模糊合成输出

经过以上的规则设定, 在实际的控制过程中,  $k_{\text{PID}}$  和  $k_{\text{fuzzy}}$  的值在  $0 \sim 1$  间动态实时变化, 从而达到切换控制的目的。合成的输出控制量  $U$  采用加权求和法:

$$U_{\text{sum}} = k_{\text{fuzzy}} \times U_{\text{fuzzy}} + k_{\text{PID}} \times U_{\text{PID}} \quad (6)$$

## 3 仿真分析与验证

在 Simulink 下搭建直驱永磁同步发电系统的 PID 控制、模糊控制与 T-S 模糊加权双模控制的 3 种变桨控制模型, 并将 3 种控制方式的仿真结果进行对比。风机的额定风速为  $12 \text{ m/s}$ , 等效的转动惯量  $J$  为  $54\,894 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ , 叶片半径  $R$  为  $46.74 \text{ m}$ , 空气密度  $\rho$  为  $1.225 \text{ kg/m}^3$ , 发电机的额定功率  $P$  为  $2 \text{ MW}$ , 定子电阻  $R_s$  为  $0.006\,65 \Omega$ , 定子电感  $L$  为  $0.002\,4 \text{ H}$ , 永磁体的磁链  $\Phi$  为  $1.67 \text{ Wb}$ , 极对数  $p$  为  $60$ , 转动惯量  $J_m$  为  $411\,185 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。

### 3.1 阶跃风速下

$0 \sim 5 \text{ s}$  风速为  $14 \text{ m/s}$ ,  $2.5 \text{ s}$  时跃变为  $18 \text{ m/s}$ 。阶跃风速如图 2 所示, 其转速曲线如图 3 所示, 桨距角响应曲线如图 4 所示, 功率曲线如图 5 所示。

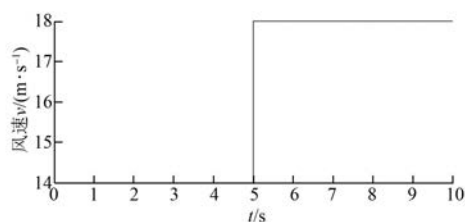


图 2 阶跃风速曲线

仿真结果表明: 阶跃风速下, T-S 模糊加权变

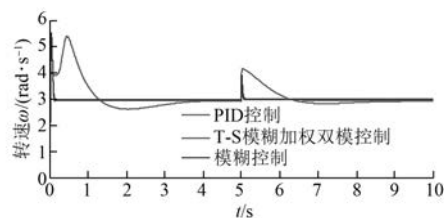


图 3 转速响应曲线

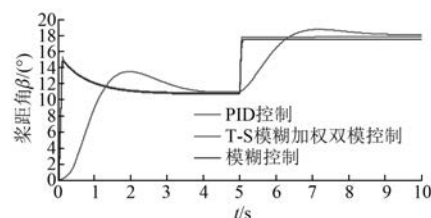


图 4 桨距角响应曲线

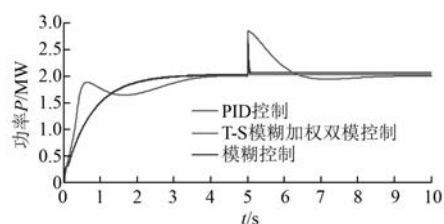


图 5 功率响应曲线

桨控制技术优于其他两种方法, 既具有模糊控制的优良动态性能, 又有 PID 控制的良好稳态精度。在  $5 \text{ s}$  加大扰动时, 又表现出良好的抗干扰性能。其输出的桨距角比模糊控制的控制精度更高, 响应速度比 PID 控制更快, 功率比 PID 控制和模糊控制更加靠近发电机输出的额定功率。

### 3.2 三维湍流风

采用文献中给出的湍流风。这是一种最接近自然风的风速模型, 取平均值为  $18 \text{ m/s}$ , 如图 6 所示, 得到其转速曲线如图 7 所示, 桨距角响应曲线如图 8 所示, 功率曲线如图 9 所示。

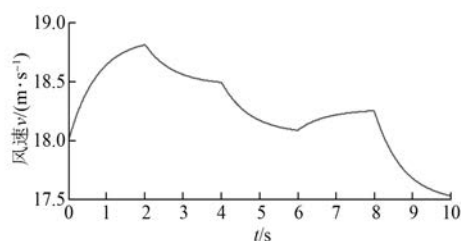


图 6 三维湍流风风速曲线

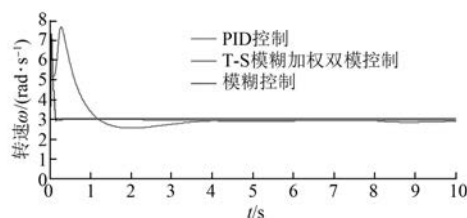


图7 转速响应曲线

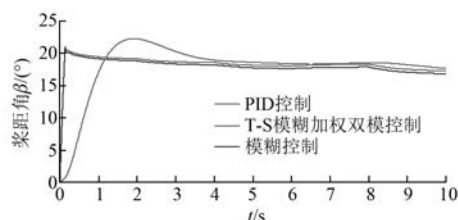


图8 桨距角响应曲线

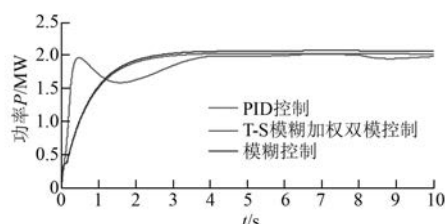


图9 功率响应曲线

仿真结果表明:在三维湍流风速这样的小范围更加符合实际风况的扰动下,T-S 模糊加权变桨控制技术也表现出了良好的快速性、稳态精度与抗干扰能力。输出的桨距角比模糊控制控制精度更高,响应速度比PID 控制更快;功率比PID 控制和模糊控制更加靠近发电机输出的额定功率。

## 4 结 语

本文针对传统的PID 变桨距控制策略所存在转速波动较大,变桨的跟随性差的不足和风力发电机组变桨系统的惯性与延迟导致控制过程动态调节时间长、超调量大的问题,提出了基于T-S 模糊加权的模糊与PID 双模优化控制技术。与常规的PID 控制技术和模糊控制技术相比,显著地改善了系统的各方面性能,具有良好的快速性、稳态精度和抗干扰能力,控制输出的桨距角精度更高,响应速度更快,功率更加靠近发电机额定功率。该方法对于直驱变桨永磁同步风力发电系统在额定风速

以上的恒功率运行有一定的借鉴价值和实际意义。

## 【参 考 文 献】

- [1] 秦斌,姜学想,周浩,等.基于SVM 的永磁直驱风电系统滑模变桨距控制[J].仪器仪表学报,2014,35(7): 1525-1531.
- [2] STOL K A, ZHAO W X, WRIGHT A D. Individual blade pitch control for the controls advanced research turbine (CART) [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2006, 128(3): 498-505.
- [3] 外力江·孜比布拉,李永乐,程志江.基于模式切换的直驱风力发电机最大功率跟踪控制[J].电测与仪表,2017,54(4): 56-62.
- [4] 周俊宇,邓文浪.永磁同步电机风力发电变桨控制系统设计[J].中南林业科技大学学报,2011,31(9): 165-169.
- [5] 汶占武,郭文.Terminal 滑模直驱风力发电变桨控制研究[J].电力系统保护与控制,2013,41(19): 75-80.
- [6] MEDJBER A, GUESSOUM A, BELMILI H, et al. New neural network and fuzzy logic controllers to monitor maximum power for wind energy conversion system[J].Energy, 2016(106): 137-146.
- [7] YIN X X, LIN Y G, LI W, et al. A novel fuzzy integral sliding mode current control strategy for maximizing wind power extraction and eliminating voltage harmonics[J].Energy, 2015(85): 677-686.
- [8] YUAN Y, TANG J. Adaptive pitch control of wind turbine for load mitigation under structural uncertainties [J]. Renewable Energy, 2017(105): 483-494.
- [9] 陈娟,董秀成,陈庆涛.直驱式永磁同步风电系统变桨距控制算法研究[J].西华大学学报,2012,31(3): 45-49.
- [10] 陈严,张锦源,王楠,等.风力机风场模型的研究及紊流风场的 MATLAB 数值模拟[J].太阳能学报, 2006, 27(9): 955-960.
- [11] 张峰,汪沛,王冲,等.基于 Von Karman 模型的三维大气紊流仿真[J].计算机仿真学报,2007,24(1): 35-38.
- [12] 周飞航,刘军.基于状态反馈的直驱风电系统模糊控制策略[J].电网技术,2016,40(19): 2758-2763.
- [13] 周波,龚华军,甄子洋.风切变和塔影效应对风力机变桨距控制的影响分析[J].可再生能源,2012,30(1): 27-32.

收稿日期: 2017 -12 -06