

文章编号: 1006-4729(2012)01-0071-06

## 变桨距风力机的模糊控制系统仿真

程启明, 王映斐, 胡晓青, 周 凯, 白园飞

(上海电力学院 电力与自动化工程学院, 上海 200090)

**摘 要:** 针对变桨距风力机存在非线性、时变性、抗干扰性和滞后性等问题, 在分析风力发电机组系统特性和变桨距控制要求的基础上, 建立了风力发电机的数学模型, 并对变速恒频风力发电机组在低于和高于额定风速运行时的变速桨距调节分别设计了两个模糊控制器, 最后在 Matlab/Simulink 仿真软件上利用 SimPower-Systems 模块进行仿真. 仿真结果表明本方法有效、可行.

**关键词:** 风力发电机; 变桨距; 变速恒频; PID 控制; 模糊控制

**中图分类号:** TM614; TP273      **文献标志码:** A

## The Simulation of Fuzzy Control System on Wind Turbine of Variable Pitch

CHENG Qi-ming, WANG Ying-fei, HU Xiao-qing, ZHOU Kai, BAI Yuan-fei

(School of Electric Power and Automation Engineering, Shanghai  
University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of non-linear, time-varying, anti-disturb and time-lag, the mathematical model of variable pitch control system is established after analyzing the characteristics of wind turbine generator system and the requirement of pitch control; the two fuzzy controllers are designed for the control system of VSCF wind turbine when the wind speed is lower or higher than the rated wind speed. Finally, the proposed system is simulated on SimPowerSystems modules of Matlab/Simulink simulated software, the simulated result shows availability and feasibility of the method.

**Key words:** wind turbine; variable pitch; variable speed & constant frequency; PID control; fuzzy control

对风力机进行调节常用的两种形式是定桨距调节和变桨距调节, 定桨距失速型调节风力发电机不能达到最大的功率, 变桨距风力机根据发电机输出功率改变桨叶节距角, 使输出功率维持在额定值. 变桨距控制与定桨距相比, 不仅可更大程

度地获取风能, 而且可使功率输出平稳, 已成为当今国际风力机的主流产品<sup>[1-6]</sup>. 根据变桨距机构驱动性质可分为电动机驱动和液压驱动两种方式, 在大中型并网型风力发电机组中, 体积小的液压驱动方式更为常用. 由于风能的随机性、不确定

收稿日期: 2011-07-16

通讯作者简介: 程启明(1965-), 男, 教授, 硕士生导师, 浙江盐城人. 主要研究方向为清洁能源发电及并网控制, 发电过程控制, 先进控制与应用等. E-mail: chengqiming@sina.com.

基金项目: 2011 年上海市科委地方能力建设项目(1151050800).

性,以及气动效应等引起的负载扰动、变桨距开关的频繁动作、液压驱动大质量叶轮负载的惯性环节,使得变桨距控制系统具有非线性、时变性、滞后性,以及外界干扰大等技术特点,采用常规的PID控制很难满足要求。目前一些先进的控制理论,如滑模变结构、变论域自适应模糊等已被用来解决这些复杂特性问题<sup>[7-17]</sup>。智能控制是一个高度非线性的动力系统,由于它不依赖于数学模型,所以可以看成是一种介于逻辑推理和数值计算的工具和方法,具有很强的自适应性和学习能力、非线性映射能力、鲁棒性和容错能力。

本文设计了两个模糊控制器来对变桨距机构进行控制,其中当风速小于额定值时采用最佳功率给定法将追踪最大风能利用系数作为控制目标,设计出的模糊控制器可调节发电机输出功率;而当风速高于额定值时,设计的模糊控制器可快速调节桨距角,使输出保持额定功率。最后在MATLAB软件平台上对其进行计算机仿真。

## 1 风力发电机组的动态建模

为更好地分析风力发电机组的系统特性,检验所提出的控制方法的控制效果,首先运用空气动力学、转子动力学、电机学等方面的基础理论对所研究类型的机组进行动态建模。动态模型将风力发电机分为空气动力、传动、双馈异步发电机和变桨距执行等4个子系统<sup>[2]</sup>。整体结构见图1。

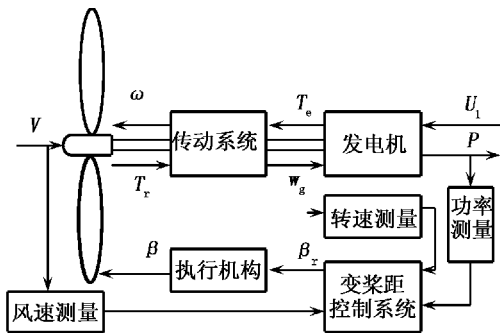


图1 风力发电机组动态模型结构

### 1.1 空气动力系统模型

当自然风以风速 $V$ (m/s)轴向流过风力机时,风轮从风能中捕获的功率和气动转矩为:

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) V^3 \quad (1)$$

$$T_r = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_T(\lambda, \beta) V^2 \quad (2)$$

式中: $P_r$ ——风轮吸收功率;

$T_r$ ——风轮气动转矩;

$\rho$ ——空气密度;

$C_T$ ——气动转矩系数;

$C_p$ ——风能利用系数,  $C_p(\lambda, \beta) = \lambda C_T(\lambda, \beta)$ ;

$\beta$ ——桨距角;

$R$ ——风轮半径;

$\lambda$ ——叶尖速比  $\lambda = \omega R/V$ ;

$\omega$ ——风轮转速。

风能利用系数 $C_p$ 代表了风轮从风能中吸收功率的能力,它为叶尖速比 $\lambda$ 和桨距角 $\beta$ 的高阶非线性函数,即为:

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left( \frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{12.5}{\lambda}} \quad (3)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (4)$$

根据式(3)和式(4)可知,风能利用系数随着桨距角的增大而减小,通过改变桨距角 $\beta$ 可限制风轮吸收的风能,从而控制功率输出的恒定。

由于风在流经风轮产生转矩时受到风轮的反作用力,会形成与旋转方向相反的尾涡流。同时,桨叶表面的气压差也会产生围绕桨叶的涡流,这样在实际旋转风轮叶片后缘就会拖出尾涡流。因此,当考虑风轮后尾涡流旋转影响时,风轮轴功率会有所损失,功率系数也会减小,即产生尾涡效应。为了使风轮模型更接近实际运行的风力发电机,减小模型误差,需要对功率系数 $C_p$ 稍做修正。

### 1.2 传动系统模型

在非直驱式风力发电机组的风轮与发电机之间需要设置增速齿轮箱,增速比为 $\gamma = \omega_g/\omega$ 。这里假设传动系统模型中传动轴绝对刚性,在靠近风轮的低速轴一侧的转子动力学方程为:

$$J_r \frac{d\omega}{dt} = T_r - T_D - \gamma T_m \quad (5)$$

式中: $J_r$ ——风轮转动惯量;

$T_m$ ——高速轴传递给刚性齿轮的扭矩;

$T_D$ ——能量传递系统的阻力矩。

假定能量传递系统的阻力矩集中于低速轴一侧,可将其表示为:

$$T_D = C_1 + \frac{C_2}{\omega} + C_3 \omega \quad (6)$$

式中: $C_1, C_2, C_3$ ——常数。



变化<sup>[7]</sup>. 先对输入的偏差  $e$ 、偏差变化率  $e_c$  进行模糊量化处理, 得到模糊变量  $E$  和  $E_c$ . 按模糊控制规则进行模糊决策后得到模糊控制量  $U$ , 再经过解模糊和比例变换得到实际控制量输出  $u$ .

本文对于低风速和高风速区域分别设计了两个模糊控制器. 在低风速时, 为了从风中获得最大能量, 桨距角设为  $0^\circ$ , 叶尖速比  $\lambda$  恒定为 9 ( $\beta = 0^\circ$ ,  $\lambda$  为 9 时风能利用系数  $C_p$  最大), 因此要得到最大的输出功率需要叶尖速比及其变化率的实时测量值; 在高风速时, 为了保持允许的最大功率,

应调节桨叶节距角, 使风能利用系数达到合适值, 因此需要功率和功率变化率的实时测量值. 在低风速和高风速时均选取二维模糊控制器, 低风速时所用模糊控制器的输入量为叶尖速比的误差  $E$  和误差变化率  $E_c$ , 其中  $E = 9 - \lambda_{out}$ , 输出量  $U$  为发电机定子电压的变化量; 高风速时所用模糊控制器的输入量为输出功率的误差或误差变化率  $E_c$ . 输出量为桨叶节距角的变化量  $U$ .

根据上述讨论, 可得二维模糊控制器的控制原理示意, 如图 3 所示.

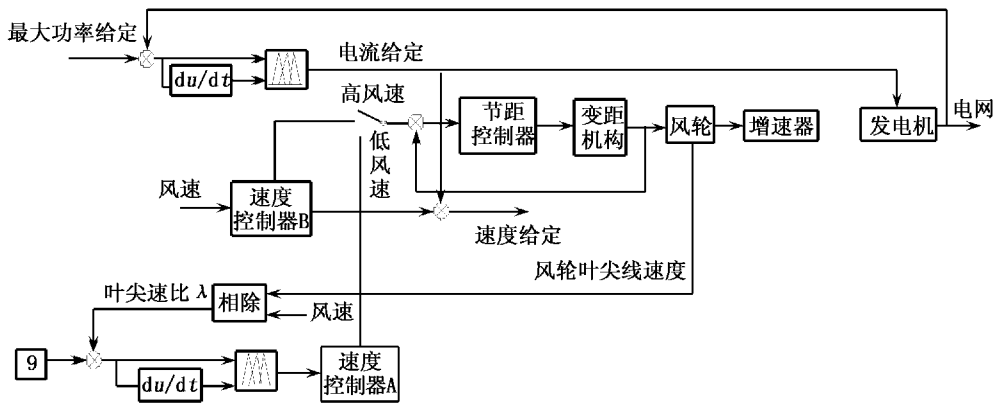


图3 二维模糊控制器的控制原理

### 3.2 模糊控制规则库的建立

为了将论域离散化, 偏差  $E$  可表示为  $\{PB, PM, PS, PZ, NZ, NS, NM, NB\}$ , 偏差的变化率  $E_c$  及被控量  $U$  可表示为  $\{PB, PM, PS, ZR, NS, NM, NB\}$ , 并将它们线性转换到  $[-6, 6]$  的模糊论域中, 其中本文选用了三角形隶属函数来描述模糊子集.

控制规则的选取原则是: 当误差大或较大时, 以尽快消除误差为主; 而当误差小或较小时, 要注意防止超调, 以系统稳定为主. 这样可得到在低风速和高风速时的模糊控制规则表, 见表 1 和表 2.

表1 低风速时模糊控制规则

$E_c$	$E$						
	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	ZR	ZR
NM	PB	PB	PB	PM	PS	ZR	ZR
NS	PM	PM	PS	PS	ZR	ZR	NS
NZ	PS	PS	PS	ZR	ZR	NS	NS
PZ	PS	PS	ZR	ZR	NS	NS	NS
PS	PS	ZR	ZR	NS	NS	NM	NM
PM	ZR	ZR	NS	NM	NB	NB	NB
PB	ZR	ZR	NM	NB	NB	NB	NB

表2 高风速时模糊控制规则

$E_c$	$E$						
	NB	NM	NS	ZR	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PM	ZR	ZR
NM	PB	PB	PB	PB	PM	ZR	ZR
NS	PM	PM	PM	PM	ZR	NS	NS
NZ	PM	PM	PS	ZR	NS	NM	NM
PZ	PM	PM	PS	ZR	NS	NM	NM
PS	PS	PS	ZR	NM	NM	NM	NM
PM	ZR	ZR	NM	NM	NM	NM	NM
PB	ZR	ZR	NM	NB	NB	NB	NB

## 4 仿真分析

本文以 MATLAB 软件为基础, 在 Simulink 中建立风力机变桨距控制系统. 仿真中风力发电机组的参数如下: 风轮直径 62 m; 额定风速 16 m/s; 额定功率 1 180 kW; 发电机额定转速 1 719 r/min; 定子额定相电压 690 V; 电机的电极对数  $P = 2$ ; 修正系数为 0.81; 空气密度为  $1.225 \text{ kg/m}^3$ ; 风力机叶轮转动惯量为  $2.64 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ , 桨距角  $\beta$  调整范围为  $0 \sim 30^\circ$ , 发电机转子的转动惯量为  $6.27 \times 10^4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ , 风力机额定转速为 4.15 r/s. 风力发电机组切入风速为 3 m/s, 风速达到 20 m/s 时, 风

力发电机组制动刹车. 本文采用了常规 PID 控制和模糊控制两种方法分别对风力机进行控制仿真, 其仿真曲线分别见图 4 和图 5.

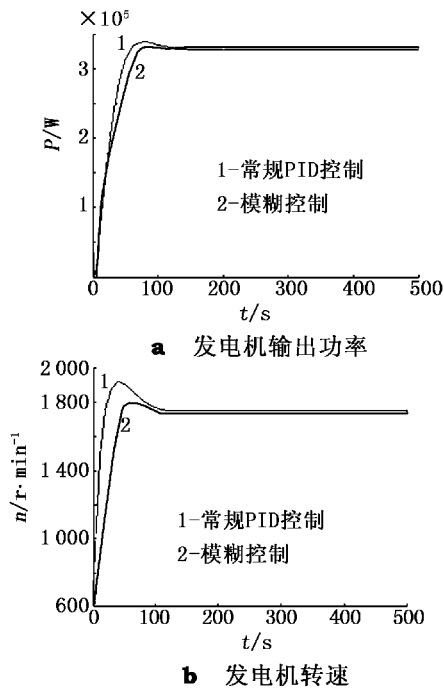


图4 风速为 8 m/s 时发电机输出功率和转速响应曲线

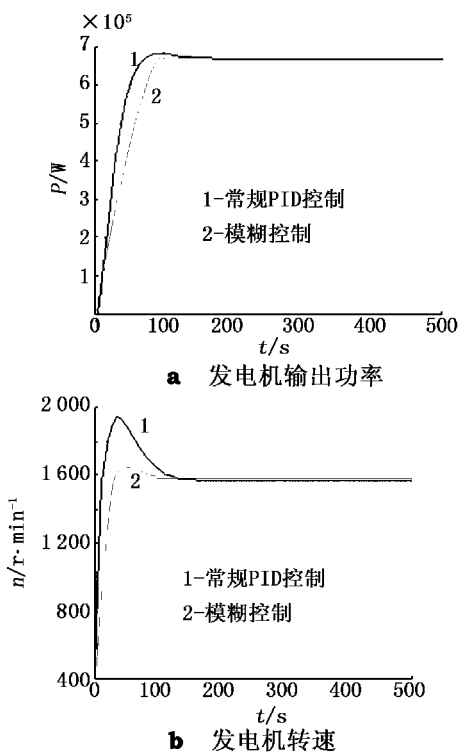


图5 风速为 15 m/s 时发电机输出功率和转速响应曲线

由图 4 和图 5 可知, 当风速在 8 m/s 和 15 m/s (均低于额定风速 16 m/s) 之间波动时, 转速能跟随风速的大体变化趋势而变化, 在 120 s 后发电机转速和功率都达到了其额定值并基本保持恒定. 转速基本维持在 1 700 r/min 左右. 从波形上看, 低风速时风力机基本上按照最佳叶尖速比运行, 可最大限度的捕获风能. 此外, 风力机没有完全随风速的波动而变化, 避免了高频震动, 提高了机组运行的稳定性.

图 6 为突加扰动信号发电机输出功率和转速响应曲线. 在 200 s 附近, 风速从 6 m/s (低于额定风速 16 m/s) 迅速增加到 19 m/s (高于额定风速 16 m/s) 时, 发电机转速基本能维持在 1 600 r/min 之下, 没有超速, 发电机的转速和功率都保持在允许值范围内, 系统保持稳定.

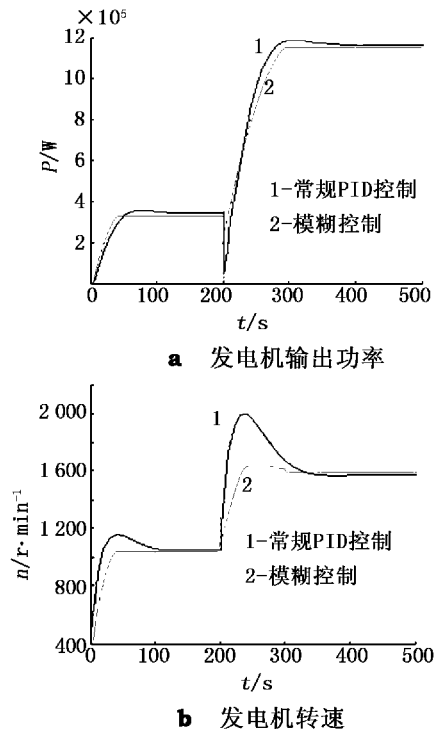


图6 突加扰动信号发电机输出功率和转速响应曲线

由以上分析可知, 仿真曲线与控制预期要求完全一致. 在低于额定风速时, 桨距角始终保持在  $0^\circ$ , 风轮转速随着风速的变化而变化, 从而达到最大的发电功率; 在高于额定风速时, 通过改变桨距角, 使风能利用系数减小, 保持输出功率恒定.

## 5 结 语

本文针对大型变桨距风力发电机组的系统特

性及变距控制要求设计的模糊控制器,从风力机空气动力特性出发,在额定风速以下,采用最佳功率给定法,以追踪最大风能利用系数作为控制目标,设计出的模糊控制器可调节发电机输出功率;在额定风速以上,设计的模糊控制器能快速调节风力发电的桨距角,使输出保持在额定功率.仿真结果表明,本文设计的模糊控制系统的控制性能优于常规PID控制系统,其调节时间短、超调量小、变桨机构动作稳定.

#### 参考文献:

- [1] 夏长亮,宋战锋.变速恒频风力发电系统变桨距自抗扰控制[J].中国电机工程学报,2007,27(14):91-95.
- [2] SAKAMOTO R, SENJYU T, KINJO T. Output power leveling of wind turbine generator for all operating regions by pitch angle control [C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005: 45-52.
- [3] 刘光德.风力发电机组电动变桨距系统的研究[J].电机与控制应用,2006,33(10):31-34.
- [4] HORIUCHI N, KAWAHITO T. Torque and power limitations of variable speed wind turbines using pitch control and generator power control [C]//Conference Proceedings of Power Engineering Society Summer Meeting, Canada, 2001: 638-643.
- [5] 林勇刚,李伟,陈晓波,等.大型风力发电机组独立桨叶控制系统[J].太阳能学报,2005,26(6):780-786.
- [6] 李晶,宋家骅,王伟胜.大型变速恒频风力发电机组建模与仿真[J].中国电机工程学报,2004,24(6):100-105.
- [7] 杨俊华,李建华,吴捷,等.无刷双馈风力发电机组的模糊自适应控制[J].电机与控制学报,2006(4):346-350.
- [8] SENJYU T, SAKAMOTO R, KANEKO T, *et al.* Output power leveling of wind farm using pitch angle control with fuzzy neural network [J]. Electric Power Components and Systems, 2008, 36(10): 1 048-1 066.
- [9] KANELLOS F D, HATZIARGYRIOUS N D. A new control scheme for variable speed wind turbines using neural networks [C]//IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, 2002: 360-365.
- [10] 胡家兵,贺益康,刘其辉.基于最佳功率给定的最大风能追踪控制策略[J].电力系统自动化,2005,29(24):32-38.
- [11] 张新房.大型变速风力发电机组的自适应模糊控制[J].系统仿真学报,2004,16(3):572-577.
- [12] SLOOTWEG J G, KLING W L. Aggregated modeling of wind parks in power system dynamics simulations [C]//IEEE Power Tech Conference Proceedings, Bologna, 2003: 23-26.
- [13] 刘新海,于书芳.模糊控制在大型风力发电机控制中的应用[J].自动化仪表,2004(5):13-17.
- [14] 徐大平,肖运启,吕跃刚,等.基于模糊逻辑的双馈型风电机组最优功率控制[J].太阳能学报,2008,29(8):12-19.
- [15] LI Hui, SHI K L, MCLAREN P G. Neural-network-based sensorless maximum wind energy capture with compensated power coefficient[J]. IEEE Trans. on Industry Applications, 2005, 41(6): 1 548-1 556.
- [16] 赵永祥,夏长亮,宋战锋,等.变速恒频风力发电系统转速非线性PID控制[J].中国电机工程学报,2008,28(11):133-138.
- [17] LI Jing, SONG Jia-hua, WANG Wei-sheng. Study and dynamic simulation of control strategy for variable speed wind turbine with doubly-fed generator considering frequency converter characteristics [J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 11-16.

(编辑 苏娟)