

变速恒频风力发电系统风机转速非线性PID控制

赵永祥, 夏长亮, 宋战锋, 王慧敏, 陈 炜

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津市 南开区 300072)

Nonlinear PID Rotating Speed Control of Variable Speed Constant Frequency Wind Turbine System

ZHAO Yong-xiang, XIA Chang-liang, SONG Zhan-feng, WANG Hui-min, CHEN Wei

(School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Nankai District, Tianjin 300072, China)

ABSTRACT: Strong nonlinearity, big moment of inertia and changing mechanical damping with rotating speed are the characters of wind turbine. A new nonlinear-PID (NLPID) controller for rotating speed control in variable speed constant frequency (VSCF) wind turbine system is proposed. Fast response, small overshoot, high precision, strong adaptability and highly robustness are obtained by the proposed strategy. A fuzzy PID-PID dual-mode variable pitch controller is designed. Based on these, the VSCF wind turbine system running in the whole working wind speed range is studied by simulations. With the action of fuzzy PID-PID dual-mode controller, system can keep the rated output power above rated wind speed; when wind speed is under the rated value, system can estimate the optimal rotating speed without test of wind speed by fuzzy controller and reach the maximum wind-energy capturing or keep the rotating speed constant.

KEY WORDS: wind power generation; maximum wind energy capturing; adjustable-pitch; nonlinear-PID controller; fuzzy PID-PID dual-mode control

摘要: 针对变速风机非线性强、转动惯量大、转轴机械阻尼随转速变化的特点, 提出了变速恒频风力发电系统风机转速非线性PID(nonlinear-PID, NLPID)控制策略, 仿真研究表明, 非线性PID控制响应快, 超调小, 受系统参数变化的影响较小, 控制精度高, 具有一定的适应性和鲁棒性。此外, 该文设计了基于模糊规则切换的模糊PID-PID双模变桨距控制器, 在此基础上对变速恒频风力发电系统在全风速范围内的运行进行了数字仿真研究。在高于额定风速时, 通过变桨距控制器调节桨距角, 系统能较好地功率限制在额定值附

近; 在低于额定风速时, 通过模糊推理, 系统能够在免测风速的情况下给出转速参考信号, 实现最大风能捕获或恒转速运行。

关键词: 风力发电; 最大风能捕获; 变桨距; 非线性PID控制器; 模糊PID-PID双模控制

0 引言

变速恒频风力发电技术是目前最具规模化开发条件和商业化发展前景的风力发电技术之一, 已成为国内外风力发电领域的研究热点^[1-3]。变速恒频风力发电系统运行于额定风速以上、附近和以下时, 分别有不同的控制目标和控制策略。当其运行于额定风速以上时, 通常采用变桨距控制技术保证输出功率平稳; 运行于额定风速附近时, 要求保持转速恒定, 实现恒转速运行; 运行于额定风速以下时, 要求风轮的转速随风速变化并保持恒定的最优叶尖速比, 实现最大风能捕获。

由于气动性能的影响, 变速风机具有强非线性。此外, 其转动惯量大, 工作风速范围宽, 转轴机械阻尼随转速不断变化, 因而实现转速的精确控制较为困难。文献[4]将模糊控制应用到风机的转速控制中, 实现了转速对参考值的跟踪, 但系统稳态误差较大, 难以达到较高的控制精度; 文献[5]提出了基于自适应模糊控制的转速控制策略, 由辨识器和控制器产生电磁转矩指令, 取得了较好的控制效果, 但该方法需要采集一定数量的样本数据用最近邻聚类算法进行拟合, 实现较复杂。

本文设计了变速恒频风力发电系统风机转速非线性PID控制器, 该控制器响应快和超调小的特点改善了风机转速控制的动态过程, 提高了转速控制的精度, 具有一定的适应性和鲁棒性。在此基础上

基金项目: 国家自然科学基金项目(50777044); 教育部新世纪优秀人才支持计划项目(NCET-06-0246); 天津市应用基础及前沿技术研究计划重点项目(07JCZDJC09400)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50777044).

提出了完整的风能捕获控制策略:在额定风速以上,通过基于模糊规则切换的模糊PID-PID双模控制器对桨距角进行控制,保持恒功率运行;在额定风速以下,在免测风速的情况下,由模糊控制器推出最优参考转速,实现最大风能捕获;在额定风速附近,系统保持恒转速运行。

1 风能捕获

变速变桨距风机的特性采用非线性函数描述,其模型为

$$\begin{cases} T_m = C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^3 v^2 / 2\lambda \\ \lambda = \omega R / v \end{cases} \quad (1)$$

式中: T_m 为风轮转矩, N·m; ρ 为空气密度, kg/m³; R 为风轮半径, m; v 为风速, m/s; C_p 为风机的风能利用系数, 最大值是贝兹极限 59.3%; β 为桨距角, °; λ 为叶尖速比; ω 为风轮旋转角速度, rad/s。

对于变速变桨距风机, 采用逼近法近似地描述式(1)中的风能利用系数 C_p ^[5], 表达式为

$$\begin{cases} C_p(\lambda, \beta) = 0.22 \left(\frac{116}{A} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-12.5/A} \\ \frac{1}{A} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \end{cases} \quad (2)$$

图1所示为风能利用系数 $C_p(\lambda, \beta)$ 的曲线。由图中可知, 风能利用系数 C_p 随着桨距角 β 的增大而逐渐减小。风机在额定风速以上运行时, 可通过增大桨距角 β 以降低风能利用系数 C_p , 从而将系统的输出功率稳定在额定值附近。同时, 在桨距角一定的情况下, 有且只有唯一叶尖速比对应于风能利用系数的最大值, 该叶尖速比称为最优叶尖速比。如图1中所示, 当桨距角为0°时, λ_{opt} 即为最优叶尖速比, 对应最大风能利用系数 C_{pmax} 。因此, 可以通过保持恒定的叶尖速比实现最大风能捕获。

图2所示为变速风力发电系统的功率曲线。变速风力发电系统主要的运行区域: 恒 C_p 运行区、恒转速运行区、恒功率运行区, 如图2中AB、BC、CD所示。AB是风力发电系统的变速运行区域, 其控制目标是最大限度地将风能转变为动能, 根据风速的变化调整转速, 保持最优叶尖速比, 从而保持最大的风能利用系数 C_{pmax} , 该区域又称为恒 C_p 运行区; 风机运行到B点时, 受风力发电系统旋转部件机械强度的限制, 其转速已经达到极限值, 但风力发电系统的输出功率尚未达到额定值, 风机进入转速恒定区BC, 随着风速增大, 转速保持恒定, 功率在达到额定值之前一直增大; 随着功率增大, 发电

机和电力电子器件将最终达到功率极限, 通过桨距角调节, 适当减少从风能中捕获的功率, 系统进入功率恒定区CD。

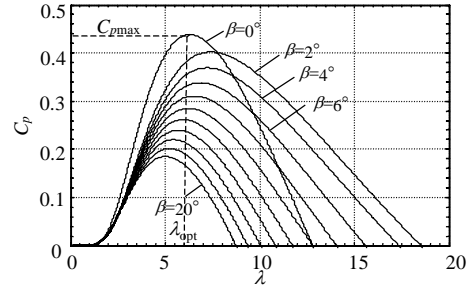


图1 风能利用系数 $C_p(\lambda, \beta)$ 曲线图
Fig. 1 Curves of wind power coefficient

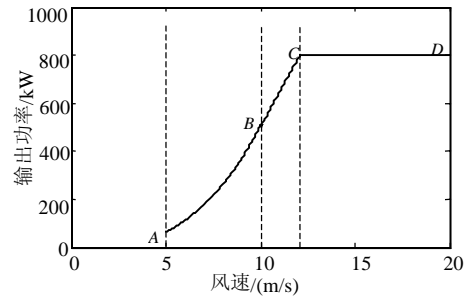


图2 变速风力发电系统的功率曲线
Fig. 2 Curve of output power in variable speed wind turbine

2 传动系统及变桨距执行机构模型

2.1 传动系统模型

风机转速通常较低, 而双馈电机运行于同步转速附近, 因此, 在风机和发电机之间需要设置增速齿轮箱, 构成的传动系统模型为^[6]

$$T_m - \gamma T_e = (J_m + \gamma^2 J_e) d\omega / dt + (B_m + \gamma^2 B_e) \omega \quad (3)$$

式中: T_e 为发电机电磁转矩, N·m; J_m 为风机的转动惯量, kg·m²; J_e 为发电机的转动惯量, kg·m²; B_m 、 B_e 分别为风机和电机侧的机械阻尼系数, N·m/rad; γ 为齿轮箱增速比。

2.2 变桨距执行机构模型

变桨距执行机构通常由电机或液压系统实现, 由于叶片的转动惯量较大, 变桨距执行机构可以等效为一阶惯性环节:

$$\beta = \beta_r / (\tau s + 1) \quad (4)$$

式中: β_r 为桨距角指令值, °; τ 为时间常数, s。

3 控制器设计

3.1 基于非线性PID控制器的转速控制

非线性PID控制是利用非线性特性对线性PID控制的一种改进, 由具有非线性结构的跟踪-微分器产生控制器所需的比例、积分和微分信号, 通过

对这些信号的非线性组合获得控制量^[7]。该控制器不依赖于被控对象的具体数学模型，对外部扰动和系统参数变化有较强抗扰能力，具有较好适应性和鲁棒性，且保留了线性PID控制器结构简单、易于实现的优点，因而在一些复杂不确定性的非线性系统中得到广泛的应用。鉴于风力发电系统的时变非线性特性，在变风速和机械阻尼系数随转速变化的条件下，本文提出了风机转速非线性PID控制方案。

风机转速非线性PID控制器由非线性状态误差反馈控制律(nonlinear stator error feedback control law, NLSEF)和 2 个非线性跟踪-微分器(tracking differentiator, TD)组成。图 3 所示为非线性PID控制器的基本结构。图中，2 阶TD实现对输入信号的快速无超调跟踪，同时给出其 1 阶微分信号。 z_{11} 、 z_{21} 分别跟踪参考输入 $\omega_{ref}(t)$ 和系统输出 $\omega(t)$ ， z_{12} 、 z_{22} 为 $\omega_{ref}(t)$ 和 $\omega(t)$ 的微分信号； e_0 、 e_1 、 e_2 为参考输入与系统输出之间的偏差及其积分、微分量，NLSEF通过对这些信号的非线性组合形成控制量 T_e^* 。

以参考转速 ω_{ref} 作为输入，设计电磁转矩 T_e^* 的控制律使转速 ω 跟踪 ω_{ref} 。控制器表达式：

$$\begin{cases} \dot{z}_{11} = z_{12} \\ \dot{z}_{12} = -R_1 s[z_{11} - \omega_{ref}(t) + |z_{12}| z_{12} / (2R_1), \theta_1] \\ \dot{z}_{21} = z_{22} \\ \dot{z}_{22} = -R_2 s[z_{21} - \omega(t) + |z_{22}| z_{22} / (2R_2), \theta_2] \\ e_0 = z_{11} - z_{21} \\ e_1 = \int_0^t (z_{11} - z_{21}) dt \\ e_2 = z_{12} - z_{22} \\ T_e^* = k_p f(e_0, \alpha_0, \delta_0) + k_1 f(e_1, \alpha_1, \delta_1) + k_D f(e_2, \alpha_2, \delta_2) \end{cases} \quad (5)$$

其中，非线性函数表达式：

$$s(x, \theta) = \begin{cases} \text{sgn}(x), & |x| \geq \theta \\ x/\theta, & |x| < \theta \end{cases} \quad (6)$$

$$f(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \text{sgn}(e), & |e| > \delta \\ e/\delta^{1-\alpha}, & |e| \leq \delta \end{cases} \quad (7)$$

式中： R_1 、 R_2 分别为 2 阶TD(1)与 2 阶TD(2)的系统参数，通过调整 R_1 和 R_2 可以改变 2 阶TD输出信号对输入信号的跟踪过渡过程； θ_1 、 θ_2 为表征非线性函数 $s(x, \theta)$ 线性区间大小的参数； α_0 、 α_1 、 α_2 为表征非线性函数 $f(e, \alpha, \delta)$ 非线性程度的参数，当 $0 < \alpha < 1$ 时， f 函数具有“小误差，大增益；大误差，小增益”的特性，与控制工程界的经验知识相吻合，抑制误差信号的能力较强； δ_0 、 δ_1 、 δ_2 为表征非线性函数 $f(e, \alpha$

$\delta)$ 线性区间大小的参数； k_p 、 k_1 、 k_D 为非线性组合的比例系数。

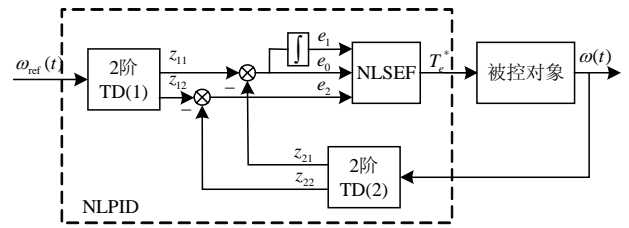


图 3 非线性 PID 控制器的基本结构
Fig. 3 Basic structure of NLPID controller

3.2 基于模糊控制器的参考转速推理

最优参考转速的准确获取是实现最大风能跟踪的前提。在风速可以测量的情况下，通过系统参数计算可以获得参考转速，但由于空气的流动性使风机叶面上各点的风速不同，而且受湍流、塔影等因素的作用，影响了测速计测量的准确性，降低了系统的可靠性^[8]。无测速计的最大风能跟踪控制策略主要有两种方法：①采用对风能利用系数的查表和功率映射的方法直接或间接估算风速，该方法需要通过大量的仿真和实验获得风机的风能利用系数曲线或功率曲线，而往往不同的风机有不同的特性曲线，导致了控制成本的提高，降低了控制策略的可行性^[8]；②基于智能控制策略的参考转速推理，在免测风速的情况下能够比较准确地推理出最优参考转速^[5,9]。

本文采用免测风速下基于模糊控制器的参考转速推理方法。以单位时间内输出功率的增量 $\Delta P(n-1)$ 和转速的增量 $\Delta \omega(n-1)$ 作为模糊控制器的输入，模糊控制器的输出为参考转速的增量 $\Delta \omega_{ref}(n)$ 。依据启发性知识建立模糊规则表：如果前一个转速(正或负)增量使系统输出功率正增长，则参考转速保持与前一个转速增量相同的生长方向，否则，参考转速的生长方向与之相反。参考转速为

$$\omega_{ref}(n) = \omega_{ref}(n-1) + \Delta \omega_{ref}(n) \quad (8)$$

式中： $\omega_{ref}(n-1)$ 为 $n-1$ 时刻的参考转速； $\omega_{ref}(n)$ 为 n 时刻的参考转速。

3.3 模糊 PID-PID 双模变桨距控制

当系统的输出功率超过额定功率值时，需要对风机进行变桨距控制。文献[10]通过功率反馈闭环控制系统，采用 PID 控制技术，实现了气动功率的稳定输出；文献[11]设计了桨距角自抗扰控制器，文献[12]设计了基于遗传算法寻优的桨距角模糊控制器，均获得了较好的控制效果。

本文设计了基于模糊规则切换的模糊PID-PID双模变桨距控制器。模糊PID-PID双模控制是将模糊控制与传统PID控制相结合，吸收了模糊控制和PID控制两者的优点，同时具备一定的自适应能力。基于模糊规则的“软切换”避免了模糊PID-PID双模变桨距控制器切换误差阈值确定的困难，实现了两种控制方式的平稳过渡^[13-15]。

取额定功率值为参考值，当功率偏差绝对值较大时，选择开关切换到模糊PID控制模式，由模糊控制器根据误差量的变化在线整定PID控制器的3个参数；当功率偏差绝对值较小时，为提高系统稳态精度，选择开关切换到PID控制模式。

图4所示为基于模糊规则切换的模糊PID-PID双模控制结构图。

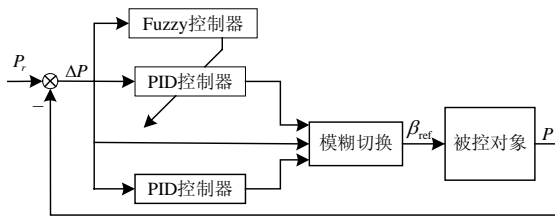


图4 模糊PID-PID双模控制结构图

Fig. 4 Structure of fuzzy PID-PID dual-mode controller

模糊切换规则为若 $e=A$, $e_c=B$, 则 $U=U_{PID}$; 否则 $U=U_{FuzzyPID}$ 。其中, e 和 e_c 分别为误差及其变化率; A 和 B 是隶属度函数, 可以通过改变隶属度函数来获得不同控制器的加权系数, 本文取隶属度函数 $A(x)=1-|x|$, $B(x)=1-|x|$ 即可达到比较理想的控制效果; U_{PID} 和 $U_{FuzzyPID}$ 分别为PID控制器和模糊PID控制器的输出量; U 为合成输出量。

PID控制器输出量的加权系数 K_{PID} 和模糊PID控制器输出量的加权系数 $K_{FuzzyPID}$ 为

$$\begin{cases} K_{PID} = A(e) \times B(e_c) \\ K_{FuzzyPID} = 1 - K_{PID} \end{cases} \quad (9)$$

由加权平均法计算出的两控制器的合成输出控制量为

$$U = \frac{K_{FuzzyPID} U_{FuzzyPID} + K_{PID} U_{PID}}{K_{FuzzyPID} + K_{PID}} = \frac{K_{FuzzyPID} U_{FuzzyPID} + K_{PID} U_{PID}}{1} \quad (10)$$

由式(10)可知, 在暂态过程阶段, 误差及变化量均较大, 模糊PID控制器起主要作用; 在稳态阶段, 误差及变化量均较小, PID控制器起主要作用。2个控制器之间的切换比较平稳, 避免了预定阈值确定的困难, 同时保证了控制量的连续输出。

图5所示为变速恒频风力发电系统风机转速控制结构图。

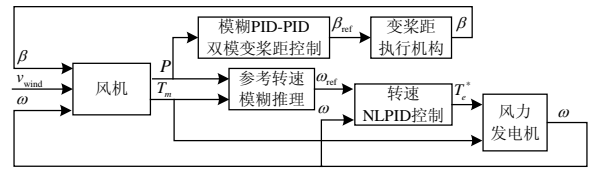


图5 变速恒频风力发电系统风机转速控制结构图

Fig. 5 Structure of rotating speed control for VSCF wind turbine system

4 仿真与结果分析

4.1 系统参数

风力发电系统主要参数如下: 风机类型为水平轴, 上风向; 额定功率为800 kW; 额定风速为12 m/s; 叶轮直径为49 m; 风机额定转速为23.4 r/min; 齿轮箱传动比为67.4; 发电机额定转速为1580 r/min。

4.2 风机转速非线性PID控制仿真

图6为风速阶跃变化时风机转速非线性PID控制响应曲线以及PID控制响应曲线。可以看出, PID控制超调较大, 调节时间较长。非线性PID控制较好地解决了线性PID控制中存在的超调量和快速响应之间的矛盾, 转速能较好地跟踪参考转速指令, 响应快, 超调小, 控制精度高。

图7为机械阻尼系数发生突变时风机转速响应曲线。可以看出, 在PID控制作用下, 机械阻尼系

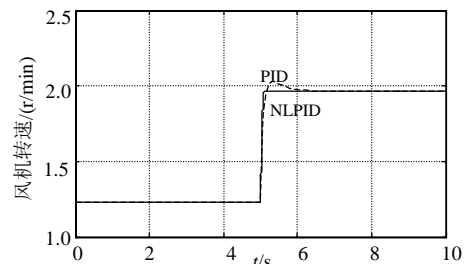


图6 风速发生阶跃变化时风机转速响应曲线

Fig. 6 Response curve of rotating speed to wind speed step change

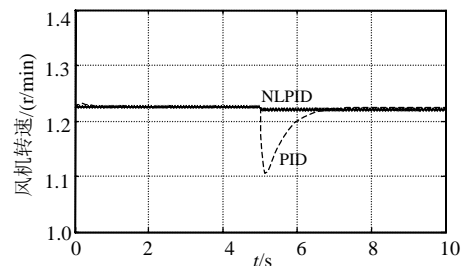


图7 机械阻尼系数发生突变时风机转速响应曲线

Fig. 7 Response curve of rotating speed wind to mechanical damping coefficient abrupt change

数发生突变后转速波动较大。在非线性 PID 控制中，该变化对转速的影响很小，非线性 PID 控制与线性 PID 相比，具有较好的适应性和鲁棒性。

4.3 全风速范围内系统运行仿真

图 8 是平均值为 10 m/s 的风速曲线；图 9 所示为桨距角指令曲线；图 10 所示为风机风能利用系数曲线；图 11 为变速恒频风力发电系统发电机转速曲线；图 12 为系统输出功率曲线。

由图 8~12 可以看出，当风速在 10 m/s 以下时，系统变速运行，保持最优叶尖速比和最大风能利用系数恒定；当风速高于 12 m/s 时，变桨距机构开始动作，由于桨距角的增大和叶尖速比的变化，风能利用系数明显降低，输出功率维持在额定值附近；当风速介于 10~12 m/s 时，即最大风能跟踪区和恒功率运行区之间的过渡过程，系统转速已经达到极限，功率尚未达到额定值，实现恒转速运行。

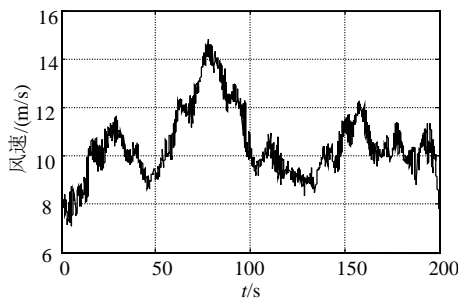


图 8 平均值为 10 m/s 的风速曲线
Fig. 8 Curve of wind speed with the average of 10 m/s

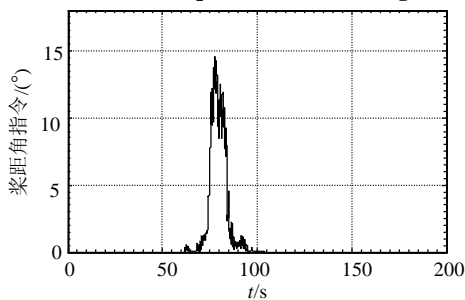


图 9 桨距角指令曲线
Fig. 9 Curve of pitch angle instruction

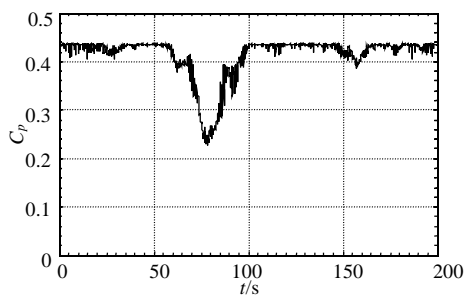


图 10 风能利用系数曲线
Fig. 10 Curve of wind power coefficient

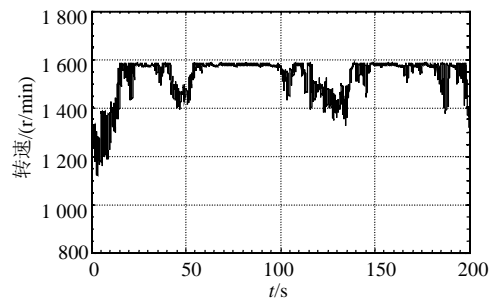


图 11 发电机转速曲线
Fig. 11 Curve of generator rotate speed

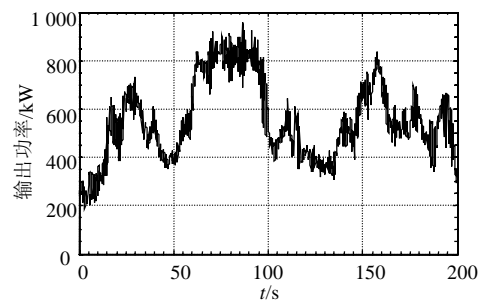


图 12 输出功率曲线
Fig. 12 Curve of output power

5 结论

提出了变速恒频风力发电系统风机转速非线性 PID 控制策略，同时利用模糊 PID-PID 双模控制器结构简单、动态响应好、适应性强、控制精度高的特点，设计了双模变桨距控制器。在此基础上，对风速阶跃变化、系统参数突变两种工况下变速恒频风力发电系统风机转速非线性 PID 控制和全风速范围内系统的运行进行了数字仿真研究。

仿真结果表明，非线性 PID 控制响应快、超调小，较好地解决了线性 PID 控制中存在的超调量和快速响应间的矛盾，受系统参数突变的影响比较小，控制精度高，具有较好的适应性和鲁棒性。此外，在全风速范围内对系统运行仿真表明，在高于额定风速时，系统能够较好地将输出功率稳定在额定值附近；在低于额定风速时，系统能够在无需测定风速的情况下给出转速参考信号，实现其最大风能捕获或恒转速运行，且转速能够实时、快速地跟踪参考值。

参考文献

- [1] 林成武, 王凤翔, 姚兴佳. 变速恒频双馈风力发电机励磁控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(11): 122-125.
Lin Chengwu, Wang Fengxiang, Yao Xingjia. Study on excitation control of VSCF doubly fed wind power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(11): 122-125(in Chinese).
- [2] 刘其辉, 贺益康, 张建华. 交流励磁变速恒频风力发电机的运行控

- 制与建模仿真[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 43-50.
- Liu Qihui, He Yikang, Zhang Jianhua. Operation control and modeling simulation of AC-excited variable speed constant frequency wind power generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 43-50(in Chinese).
- [3] 夏长亮, 宋战锋. 双馈风力发电系统转子电流自抗扰控制[J]. 电工电能新技术, 2006, 26(3): 26-29.
- Xia Changliang, Song Zhanfeng. Rotor current control of doubly-fed induction generator based on active-disturbance-rejection controller [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2006, 26(3): 26-29(in Chinese).
- [4] Prats M A M, Carrasco J M, Galvan E, et al. Improving transition between power optimization and power limitation of variable speed, variable pitch wind turbines using fuzzy control techniques[C]. IECON 26th Annual Conference of the IEEE, Nagoya, Aichi, Japan, 2000.
- [5] Zhang Xinfang, Xu Daping, Liu Yibing. Intelligent control for large-scale variable speed variable pitch wind turbines[J]. Journal of Theory and Application, 2004, 2(3): 305-311.
- [6] 李东东, 陈陈. 风力发电机组动态模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 115-119.
- Li Dongdong, Chen Chen. A study on dynamic model of wind turbine generator sets[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 115-119(in Chinese).
- [7] 韩京清. 从PID技术到“自抗扰控制”技术[J]. 控制工程, 2002, 9(3): 13-18.
- Han Jingqing. From PID technique to active disturbances rejection control technique[J]. Control Engineering of China, 2002, 9(3): 13-18(in Chinese).
- [8] 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.
- Hu Jiabing, He Yikang, Liu Qihui. Optimized active power reference based maximum wind energy tracking control strategy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 32-38(in Chinese).
- [9] Chen Z, Arnalte Gomez S, McCormick M. A fuzzy logic controlled power electronic system for variable speed wind energy conversion systems[C]. Power Electronics and Variable Speed Drives Conference, London, UK, 2000.
- [10] 姚红菊, 赵斌. 变速恒频风电机组额定风速以上恒功率控制[J]. 能源与环境, 2005, (3): 12-13.
- Yao Hongju, Zhao Bin. Constant power control for VSCF wind power generator system running above rated wind speed[J]. Energy and Environment, 2005, (3): 12-13(in Chinese).
- [11] 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.
- Xia Changliang, Song Zhanfeng. Constant power output of variable speed constant frequency wind turbines based on active disturbance rejection controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(14): 91-95(in Chinese).
- [12] 王松, 姚兴佳. 遗传算法在变桨距风力发电控制系统中的应用[J]. 新能源, 2000, 22(12): 48-51.
- Wang Song, Yao Xingjia. Application of genetic algorithm in pitch control system for wind turbine[J]. New Energy, 2000, 22(12): 48-51(in Chinese).
- [13] 史婷娜, 徐绍辉, 夏长亮, 等. 超声波电机模糊-PI双模自适应速度控制[J]. 电工技术学报, 2003, 18(3): 1-4.
- Shi Tingna, Xu Shaohui, Xia Changliang, et al. Fuzzy-PI dual-mode adaptive speed control for ultrasonic motors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(3): 1-4(in Chinese).
- [14] 李祖欣, 张榆锋, 施心陵. 一种基于模糊规则切换的双模控制器[J]. 贵州科学, 2002, 20(4): 31-34.
- Li Zuxin, Zhang Yufeng, Shi Xinling. A new double model controller with fuzzy switching based on fuzzy rules[J]. Guizhou Science, 2002, 20(4): 31-34(in Chinese).
- [15] 牛志刚, 张建民. 应用于直线电机的平滑切换模糊PID控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(8): 132-136.
- Niu Zhigang, Zhang Jianmin. Method of smooth-switch fuzzy PID for linear motor control[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 132-136(in Chinese).

收稿日期: 2007-12-12。

作者简介:

赵永祥(1983—), 男, 硕士研究生, 研究方向为变速恒频风力发电技术, zhaoyx@tju.edu.cn;

夏长亮(1968—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电机系统及其控制, clxia@tju.edu.cn。

(责任编辑 王剑乔)