

基于模糊自适应PID的风力发电系统变桨距控制

宋新甫¹, 梁波²

(1. 新疆电力科学研究院系统研究所, 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 西北工业大学自动化学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 提出模糊自适应整定PID控制理论设计风力发电系统变桨距控制器。建立了风机及变桨距机构模型, 以发电机转速测量值, 发电机转速测量值与额定转速相比后误差为输入设计控制器。在随机风作用下对设计的模糊自适应整定PID控制器进行仿真, 结果表明基于模糊自适应整定PID控制理论的变桨距控制器具有良好的动态性能及对风速扰动的鲁棒性, 能够有效改善风力发电系统变桨距控制效果。

关键词: 风力发电系统; 变速恒频; 变桨距; 模糊自适应整定控制; 转速波动

Wind power system pitch control based on fuzzy self-learning emendation control theory

SONG Xin-fu¹, LIANG Bo²

(1. Department of Electrical System, Xinjiang Electric Power Research Institute, Wulumuqi 830000, China;

2. Department of Automation College, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Aiming at variable speed constant frequency (VSCF) system, a new pitch controller based on fuzzy self-learning emendation control theory is proposed to improve the power-output quality of VSCF. By using generator rotate speed and speed error as input value, it sets up fuzzy self-learning emendation controller. Besides, this paper carries out simulation of the controller under random wind speeds. The result shows that the controller produces good dynamic performance, good robustness and adaptability.

Key words: wind power system; variable speed constant frequency; pitch control; fuzzy self-learning emendation controller; rotational speed ripple

中图分类号: TM614; TP27 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)16-0050-04

0 引言

风力发电定桨距控制由于启动性能差, 低风速情况下的效率较低, 机子承受的动态负荷大以及额定功率会因空气密度和电网频率的变化而变化等已逐渐被变桨距所替代^[1]。文献[2]基于风机转速信号, 设计了对风机叶片变桨距控制的变速恒频风电机组的PI控制器; 文献[3]对模糊控制深入分析, 设计了以输出功率及输出功率的变化为输入量, 以桨距角变化为输出量进行风机叶片桨距角控制的模糊控制器; 文献[4]设计了神经网络控制, 用于对叶片桨距角的调节, 实现最大风能捕获, 改善了系统的控制性能; 文献[5,6]提出一种基于自抗扰控制理论的风力发电系统变桨距控制器, 它是一种基于过程误差的非线性鲁棒控制技术; 此外, 滑模变结构、模糊自适应、神经网络自适应等多种先进控制策略及其结合控制也在变桨距控制中得到了广泛应用^[7-10]。

模糊自适应整定PID控制运用模糊逻辑方法把控制规则用模糊集表示成规则库存入计算机知识

库, 计算机根据控制系统的实际响应情况, 进行模糊推理和决策, 即可自动实现对PID参数的最优调整, 系统动态性能得到明显改善, 具有良好的抗干扰性和鲁棒性^[11]。

本文给出变速恒频风力发电系统模糊自适应整定PID控制方案。该方案能很好地改善风速变化等随外部干扰的影响, 从而改善风力发电系统变桨距控制效果。结果表明, 该方法具有较快的响应速度, 较高的控制精度和较强的鲁棒性。

1 模糊自适应整定PID控制器

常规PID控制器结构简单、工作稳定, 但是不能很好地解决动态与静态之间的矛盾、跟踪设定值与抑制扰动之间的矛盾、鲁棒性与控制性之间的矛盾。模糊控制是一种智能控制方法, 具有控制适应性好和控制过程平滑的特点, 但本质上属于PD控制, 无法消除静态误差。将两者结合起来, 根据控制者的设计经验, 利用模糊控制法将PID参数的实

时调整策略制定为模糊控制规则, 实现 PID 控制的在线参数实时调整, 便可构成模糊自适应整定 PID 控制。

模糊自适应整定 PID 控制运用模糊数学的基本理论和方法, 把规则的条件、操作用模糊集来表示, 并把这些模糊控制规则以及有关信息(如评价指标、初始 PID 参数等)作为知识预存入计算机知识库中, 然后计算机根据控制系统的实际响应情况(即专家系统的输入条件), 运用模糊推理, 自动实现对 PID 参数的最佳调整, 这就是模糊自适应 PID 控制。模糊自适应 PID 控制器目前有多种结构形式, 但其工作原理基本相同。

PID 参数模糊自整定就是及时找出 PID 三个参数与 e 和 ec 之间的模糊关系, 在运行中通过不断检测 e 和 ec , 根据模糊控制原理来对控制器的 3 个参数进行在线修改, 而使被控对象有良好的动、静态性能。

在线实时模糊自适应整定 PID 控制器的结构如图 1 所示。

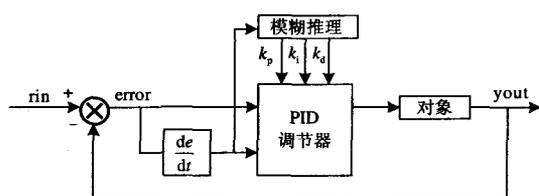


图 1 模糊自适应整定 PID 控制器结构图

Fig.1 Fuzzy self-learning emendation controller frame

2 变桨距模糊自适应整定 PID 控制方案

2.1 风机模型

风力发电系统叶片将风能转化为风机动能的过程是一个复杂的气动力问题。风力发电机组的输出功率主要受三个因素的影响, 可利用风能、发电机的输出功率曲线和发电机对风速变化的响应能力分析。建立风机的精确数学模型需采用叶素理论 (blade element theory)。风轮从风能中捕获的功率可以根据下式计算:

$$P_r = \frac{1}{2} C_p(\beta, \lambda) \rho \pi R^2 V_w^3$$

其中: P_r 为风机吸收功率 (W); ρ 为空气密度 (K_g/m^3); C_p 为风能利用系数, 最大值是贝兹极限 59.3%; β 为桨距角 (deg); R 为风轮半径 (m); V_w 为上风向风速 (m/s); 叶尖速比 $\lambda = \frac{\omega R}{V_w}$; ω 为风轮转速 (rad/s)。

风能利用系数 C_p 是叶尖速比 λ 和桨距角 β 的函数, 精确计算需要空气动力学和有限元分析方面的知识。本文采用以下函数计算:

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

$$\frac{1}{\lambda_t} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

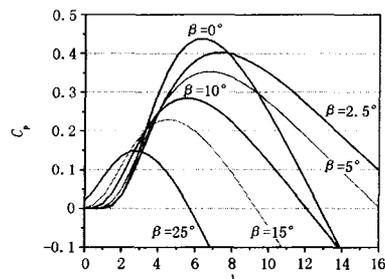


图 2 三叶片水平轴风机功率系数近似特性曲线

Fig.2 Power factor curve of the three blades wind turbine

由 $C_p(\beta, \lambda)$ 曲线可以看出, 稳定运行时, 对于固定的桨距角 β , 存在最佳叶尖速比 λ_{opt} 和最大风能利用系数 C_{pmax} 保持不变, 而当风轮转速达到最大值后, 相对于风速的变化, 也必存在最佳桨距角 β_{opt} 使风能利用系数 C_p 最大。即在高于额定风速时, 系统采用变桨距调节, 同时协调控制发电机电磁转矩, 将风机转速及系统输出功率维持在额定值附近。

2.2 模糊自适应整定 PID 控制器设计

模糊控制设计的核心是总结系统设计人员的技术知识和实际操作经验, 建立合适的模糊规则表。根据 PID 参数的整定原则; Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 对系统输出的影响及专家经验, 采用 IF-THEN 形式, 可得 Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 三个参数的分别整定的模糊规则。经大量仿真研究所得到的风机 PID 控制器参数的模糊整定表如表 1、表 2、表 3 所示。

Δk_p 、 Δk_i 、 Δk_d 的模糊规则表建立后, 则可根据如下方法进行三个参数的自适应校正。

其模糊子集为 $e = \{NB, NM, NS, ZE, PS, PM, PB\}$, $ec = \{NB, NM, NS, NZ, PZ, PS, PM, PB\}$ 。子集 e 中元素分别代表负大、负中、负小、零、正小、正中、正大, ec 中 NZ、PZ 表示零正及零负。设 e , ec 和 k_p 、 k_i 、 k_d 均服从正态分布, 因此可得出各模糊子集的隶属度, 根据各模糊子集的隶属度赋值表和各参数模糊控制模型, 应用模糊合成推理设计 PID 参数的模糊矩阵表, 查出修正参数代入下式计算:

$k_p = k'_p + \Delta k_p$, 式中 $\Delta k_p = \{e_i, ec_i\}_p$ 由模糊规则表 1 可得出; $k_i = k'_i + \Delta k_i$, 式中 $\Delta k_i = \{e_i, ec_i\}_i$ 由模糊规则表 2 可得出; $k_d = k'_d + \Delta k_d$, 式中 $\Delta k_d = \{e_i, ec_i\}_d$ 由模糊规则表 3 可得出。在线运行过程中, 控制系统依据模糊逻辑规则进行运算与查表, 即可完成对 PID 参数的在线自校正。其工作流程图如图 3 所示。

表 1 Δk_p 的模糊规则表

Tab.1 Fuzzy rule table of Δk_p

Δk_p	ec	NB	NM	NS	NZ	PZ	PS	PM	PB
e	NB	PB	PB	PM	PM	PM	PS	ZE	ZE
	NM	PB	PB	PM	PM	PM	PS	ZE	ZE
	NS	PB	PB	PM	PS	PS	ZE	NM	NM
	ZE	PB	PM	PS	ZE	ZE	NS	NM	NB
	PS	PM	PS	ZE	ZE	NS	NS	NB	NB
	PM	ZE	ZE	ZE	NS	NS	NM	NB	NB
	PB	ZE	ZE	NS	NS	NS	NM	NB	NB

表 2 Δk_i 的模糊规则表

Tab.2 Fuzzy rule table of Δk_i

Δk_i	ec	NB	NM	NS	NZ	PZ	PS	PM	PB
e	NB	NB	NB	NM	NS	NS	NS	ZE	ZE
	NM	NB	NB	NM	NS	NS	ZE	ZE	ZE
	NS	NB	NB	NS	NS	ZE	ZE	PS	PM
	ZE	NB	NM	NS	ZE	ZE	PS	PM	PM
	PS	NM	NM	ZE	PS	PS	PM	PM	PB
	PM	ZE	ZE	PS	PM	PM	PM	PB	PB
	PB	ZE	ZE	PS	PM	PM	PM	PB	PB

表 3 Δk_d 的模糊规则表

Tab.3 Fuzzy rule table of Δk_d

Δk_d	ec	NB	NM	NS	NZ	PZ	PS	PM	PB
e	NB	PS	NS	NB	NB	NB	NM	NM	PS
	NM	PS	NS	NB	NM	NM	NM	NS	ZE
	NS	ZE	NS	NM	NM	NM	NS	NS	ZE
	ZE	ZE	NS	NS	NS	NS	NS	NS	ZE
	PS	ZE							
	PM	PB	NS	PS	PS	PS	PS	PS	PB
	PB	PB	PM	PM	PM	PM	PS	PS	PB

当风速超出额定风速时, 通过变桨距控制系统改变桨叶节距来限制风力机获取的能量, 使发电机保持运行于最大转速下。

由于桨距角变化具有一定的延时性, 当风速从小于额定风速变换到大于额定风速, 或者从大于额定风速变化到小于额定风速时, 为了保证桨距角不会因为风速的随机波动而误动作, 只有当风速小于额定风速或大于额定风速一定时间后, 桨距角才会变化。为了避免桨距角动作过快而引起控制组件的磨损, 对桨距角变化速度有一定限制, 一般小于 $3^\circ/s$ 。

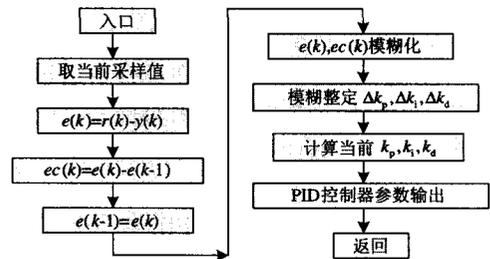


图 3 在线自校正流程图

Fig.3 On line self-turning flow chart

用于发电机转速限制的桨距角控制系统框图如图 4 所示。输入信号为同步发电机的转速测量值, 与发电机的最大转速相比较后得出误差信号, 输入模糊自适应 PID 控制器, 根据模糊规则指导桨距角调节, 产生桨距角参考值 β_{REF} , 再与实际的桨距角比较, 桨距角误差信号输入到桨距角控制系统的伺服机构。其中, T_{SERVO} 为伺服时间常数; β_{MAX} 、 β_{MIN} 为桨距调节的限值; $\frac{d\beta}{dt} MAX$ 、 $\frac{d\beta}{dt} MIN$ 为桨距变化的梯度限值。

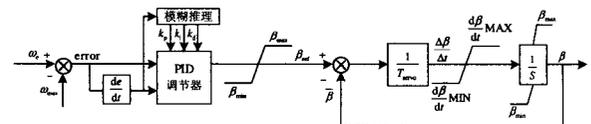


图 4 桨距角控制框图

Fig.4 Block diagram of pitch angle control

3 结果与分析

基于美国可再生能源实验室试验样机 CART (controls advanced research turbine) 对设计的变桨距模糊自适应整定 PID 控制器进行仿真研究。主要参数如下: 风机类型为水平轴、上风向; 额定功率为 600 kW; 额定风速 12 m/s; 风机额定转速 41.5 r/min; 风轮直径 43.3 m; 风机转动惯量 $2.58 \text{ kg} \times 10^5$

$\text{kg}\cdot\text{m}^2$; 发电机转动惯量 $6.41 \times 10^4 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$; 变桨距电动机运行速度为 $-10 \sim 10^\circ/\text{s}$; 变桨距电动机位移为 $0 \sim 30^\circ$; 变桨距电动机时间常数为 0.2 s 。

图 5 示出微分作用系数 K_d 、比例作用系数 K_p 和积分作用系数 K_i 的变化曲线。图 6 是平均值为 12 m/s 的风速曲线。此风速曲线包括基本风、阵风、渐变风和随机风,采用威布尔速率分布,很好地模拟了自然风速。图 7 所示为在图 6 所示风速下的转速波形。由图 7 可知,采用模糊自适应整定 PID 控制方案时的转速波动幅度较小、稳定速度快,具有较好的动态性能。由分析可知,模糊自适应整定 PID 在控制中不需要建立精确的被控对象数学模型,适用于风力发电系统这类强非线性、不能精确建立数学模型、运行过程中受外部扰动较强的控制问题。

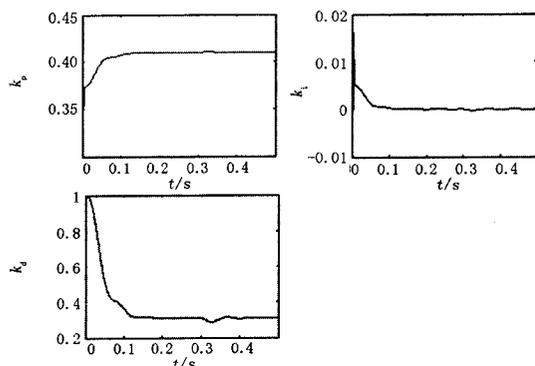


图 5 k_p 、 k_i 、 k_d 的自适应调整

Fig.5 Self-adaptive adjustment of k_p , k_i and k_d

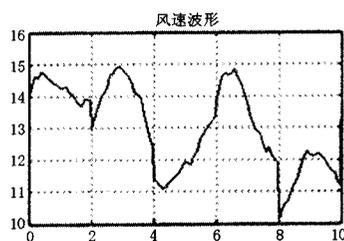


图 6 平均值随机风

Fig.6 Average 12m/s random wind

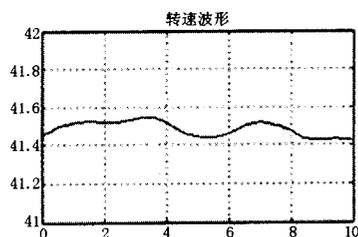


图 7 模糊自适应 PID 控制下转速波动

Fig.7 Rotational speed ripple under fuzzy self-learning emendation control theory

4 结论

将模糊自适应整定 PID 控制理论应用于变速恒频风力发电系统变桨距控制。实时反馈曲线表明,通过对 e 和 ec 的不断检测,根据模糊原理对三个参数进行实时在线修改,而使被控对象有良好的动态性能,改善了风力发电系统变桨距控制效果。在随机风条件下的仿真表明该控制系统动态性能较好,鲁棒性强。

参考文献

- [1] 杨金明,吴捷,杨俊华.基于自抗扰控制器的风力发电系统的最大风能捕获控制[J].太阳能学报,2004,4(25):525-529.
YANG Jin-ming, WU Jie, YANG Jun-hua. Maximum Wind Energy Capture Control with Auto Disturbance Rejection Controller[J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2004, 4(25): 525-529.
- [2] 吴治坚,叶枝全,沈辉.新能源和可再生能源的利用[M].北京:机械工业出版社,2006.
WU Zhi-jian, YE Zhi-quan, SHEN Hui. New Energy and Renewable Energy Utilization[M]. Beijing: China Machine Press, 2006.
- [3] Slootweg J G, Kling W L. Aggregated Modelling of Wind Parks in Power System Dynamics Simulations[J]. Power Tech Conference Proceedings, 2003, 3: 23-26.
- [4] Sakamoto R, Senjyu T, Urasaki N. Output Power Leveling of Wind Turbine Generators Using Pitch Angle Control for all Operating Regions in Wind Farm Intelligent Systems Application to Power Systems[A]. in: Proceedings of the 13th International Conference[C]. 2005.467-475.
- [5] HUI Li, Shi K L, McLaren P G. Neural-network-based Sensorless Maximum Wind Energy Capture with Compensated Power Coefficient Industry Applications[J]. IEEE Trans, 2005, 41(6): 1548 - 1556.
- [6] 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 Chang-liang, SONG Zhan-feng. Pitch Control of Variable Speed Constant Frequency Wind Turbines Based on Active Disturbance Rejection Controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(14): 91-95.
- [7] SUN Yao-jie, KONG Long-yun, SHI Wei-xiang. Robust Sliding Mode Control of Variable-speed Wind Power System[J]. Power Electronics and Motion Control Conference, 2004, 3: 1712- 1716.
- [8] 张新房,徐大平,吕跃刚,等.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):573-577.

(下转第 58 页 continued on page 58)

诊断取得了较好的诊断效果。

参考文献

- [1] 杨士元. 模拟系统的故障诊断与可靠性设计[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
YANG Shi-yuan. Fault Diagnosis and Reliability Design of Analog Systems[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1993.
- [2] Aminian M, Aminian F. Neural-Network based Analog-circuit Fault Diagnosis Using Wavelet Transform as Preprocessor[J]. IEEE Trans Circuits Syst-II, 2000, 44(3): 151-156.
- [3] 王淑娟, 陈博, 赵国良. 基于小波包变换预处理的模拟电路故障诊断方法[J]. 电工技术学报, 2003, 18(4): 118-122.
WANG Shu-juan, CHEN Bo, ZHAO Guo-liang. Analog Circuit Fault Diagnosis Based on Wavelet Packet Preconditioning[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(4): 118-122.
- [4] 张军, 陆森林, 和卫星, 等. 基于小波包能量法的滚动轴承故障诊断[J]. 农业机械学报, 2007, 38(10): 178-181.
ZHANG Jun, LU Sen-lin, HE Wei-xing, et al. Vibrating Diagnosis of Rolling Bearings Based on Wavelet Packet Energy Feature[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(10): 178-181.
- [5] 王承, 陈光, 谢永乐. 基于小波-神经网络的模拟电路 I_{rot} 故障诊断[J]. 仪器仪表学报, 2005, 26(11): 1106-1108.
WANG Cheng, CHEN Guang, XIE Yong-le. Fault Diagnosis in Analog Circuits IDDT Based on Wavelet Transform and Neural Networks[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2005, 26(11): 1106-1108.
- [6] 何怡刚, 梁戈超. 模拟电路故障诊断的 BP 神经网络方法[J]. 湖南大学学报, 2003, 30(5): 35-39.
HE Yi-gang, LIANG Ge-chao. A Method for Fault Diagnosis of Analog Circuit by BP Neural Network[J]. Journal of Hunan University, 2003, 30(5): 35-39.
- [7] 李春明, 王勇. 基于小波神经网络的模拟电路故障诊断[J]. 微计算机信息(测控自动化), 2007, 23(1-1): 204-205.
LI Chun-ming, WANG Yong. Analogue Circuit Faults Diagnosis Based on Wavelet Neural Network[J]. Microcomputer Information (Measurement Control Automation), 2007, 23(1-1): 204-205.
- [8] 张彤, 张维强, 宋国乡. 基于小波包变换的模拟电路故障诊断[J]. 现代电子技术, 2005, (1): 103-105.
ZHANG Tong, ZHANG Wei-qiang, SONG Guo-xiang. Fault Diagnosis of Analogue Circuit Based on Wavelet Packet Transform[J]. Modern Electronics Technique, 2005, (1): 103-105.
- [9] Hagan M, Demnith H B, Beale M H. 神经网络设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002. 197-205.
Hagan M, Demnith H B, Beale M H. Neural Network Design[M]. Beijing: China Machine Press, 2002. 197-205.
- 收稿日期: 2008-09-08; 修回日期: 2008-11-21
作者简介:
胡世玲(1983-), 女, 硕士, 主要研究领域为模拟电路故障诊断, 人工智能等; E-mail: hushiling0517@163.com
陈虎成(1966-), 男, 工程师, 主要从事电力生产安全监督管理工作;
郑新龙(1982-), 男, 硕士, 主要研究领域为高电压与绝缘测试、信号处理等, 主要从事海洋输电相关技术研究与应用。
-
- (上接第 53 页 continued from page 53)
- ZHANG Xin-fang, XU Da-ping, Lü Yue-gang, et al. Adaptive Fuzzy Control for Large-scale Variable Speed Wind Turbines[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(3): 573-577.
- [9] Bati A F, Leabi S K. NN Self-tuning Pitch Angle Controller of Wind Power Generation Unit[J]. Power Systems Conference and Exposition, 2006, 29: 2019-2029.
- [10] Senjyu, T, Sakamoto R, Urasaki N. Output Power Leveling of Wind Farm Using Pitch Angle Control with Fuzzy Neural Network[A]. in: Power Engineering Society General Meeting[C]. 2006. 18-22.
- [11] 钟斌, 程文明, 唐连生, 等. 随动系统的模糊自适应整定 PID 变阻尼控制[J]. 系统仿真学报, 2006, 18(11): 3200-3203.
- ZHONG Bin, CHENG Wen-ming, TANG Lian-sheng. Variable Damping Ratio Control of Servo System by Fuzzy Adaptive Adjust PID[J]. Journal of System Simulation, 2006, 18(11): 3200-3203.
- 收稿日期: 2008-09-27; 修回日期: 2009-05-12
作者简介:
宋新甫(1983-), 男, 硕士, 主要研究方向为变速恒频风力发电控制技术; E-mail: sxf024@163.com
梁波(1983-), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统综合自动化技术。