

基于模糊 Smith 预估的直驱风电机组变桨距控制器研究

杨伟, 邓程城, 徐乐

(南京理工大学自动化学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 在大型直驱风电机组中通常采用变桨距的方法来提高风能利用率, 调节发电机组的有功功率。但由于风速变化的随机性和风力发电机组的非线性特点, 传统的 PID 控制算法并不能取得令人满意的效果, 为此提出了模糊 Smith 预估控制方法。在模糊理论和 Smith 预估控制理论的基础上, 分别对模糊控制器和 Smith 预估控制器进行设计, 最后将两者相结合, 并在 Simulink 平台上搭建了模型, 进行了仿真。仿真结果表明, 所提方法在风速变化超过额定风速的情况下, 能够通过控制桨距角使风力机转速稳定在额定值, 实现直驱风电机组的恒功率控制。

关键词: 直驱风电机组; 风能利用率; 桨距角; 模糊 Smith 预估控制; 额定风速; 恒功率控制

Pitch control of direct drive wind turbine based on the fuzzy Smith predictor

YANG Wei, DENG Chengcheng, XU Le

(College of Automation, Nanjing University of Technology and Engineering, Nanjing 210094, China)

Abstract: In the large-scale direct drive wind turbine, it usually changes the pitch to improve the utilization of wind energy and adjust the active power of generators. However, as the randomness of the wind speed and the nonlinear characteristic of the wind turbines, the traditional PID control algorithm can not obtain satisfactory results. For this reason, a fuzzy Smith predictor control method is proposed. Based on the fuzzy theory and Smith predictive control theory, the fuzzy controller and Smith predictor controller is designed, finally the both are combined, the model is set up by Simulink, and the simulation verification is performed. Results of simulation show that when the wind speed exceeds the rated wind speed, the proposed method can make the fan speed stable in ratings by controlling the pitch angle and achieve the constant power control of direct drive wind turbine.

Key words: direct drive wind turbine; wind energy utilization; pitch angle; fuzzy Smith predictive control; rated wind speed; constant power control

中图分类号: TM614

文章编号: 1674-3415(2016)01-0065-06

0 引言

在大型风力发电机组中通常采用变桨距的方法来提高风能利用率, 调节发电机组的有功功率。但是, 要很好的实现对变桨距系统的控制仍然面临诸多问题, 比如永磁风电机组的非线性、强耦合以及较大的转动惯量。

目前国内在风电机组变桨距控制方面应用最广且较为简单的是 PID 控制器。但由于风速变化的随机性以及风力发电机组的非线性特点, PID 控制算法并不能取得令人满意的效果。文献[1]在传统的 PI 控制基础上加入增益调整环以改善系统在高风速段的控制性能。文献[2]提出一种基于小世界优化算法在线整定的自适应 PI 控制策略。该策略利用 BP 神

经网络对被控对象进行在线辨识,同时引入小世界优化算法对 PI 参数进行动态调整和优化,使风力机输出功率维持在额定功率附近的允许范围内,控制效果比传统 PI 控制有很大改善。文献[3-4]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。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以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的控制效果。但是由于变桨系统的惯性和延迟,整个控制过程的动态调节时间长,超调量大。文献[5-7]提出模糊前馈与模糊自适应整定 PID 结合的新型变桨距控制方法。利用模糊推理,给出合适的桨距角前馈值,与模糊 PID 控制器的输出相加作为桨距角变化的设定值。在额定风速以上的不同风速段都能够有效地

减小系统的超调量，缩短调节时间。但是结构相对来说比较复杂。文献[8]提出一种基于功率变化判断和模糊控制的风力发电机组变速变桨控制方法。在高于额定风速的风况下，对于稳定风电机组的输出功率取得了良好的控制效果。文献[9]提出一种扩大过渡区的改进控制策略来消除额定功率运行点附近切换造成的功率波动。

本文在对直驱风电机组的组成结构和工作原理^[10-14]进行分析后，综合以上文献，针对较复杂的控制结构以及风力机变桨系统延时环节带来的问题提出将模糊控制与 Smith 预估补偿控制相结合构成模糊 Smith 预估控制方法。其中，模糊控制是一种新型智能控制，与其它的智能控制相比，具有很强的抗干扰能力和很好的鲁棒性等优点。再结合基于变桨距系统延时环节的 Smith 预估补偿方法。两种控制方法取长补短，在对参数变化的控制对象有较强适应能力的同时，又能对纯滞后特性有较好的补偿效果。

1 基本理论

1.1 模糊控制的基本理论

模糊控制是通过总结人类的行为方式，并对人的手动控制决策加以语言描述而实施的一种智能控制。而其中用来描述人的行为的一系列条件语句，被称为模糊规则。

模糊规则是由专业人员对他们所熟悉的被控对象的控制经验总结而得到的。模糊规则的条件语句由很多具有模糊性的词汇集合而成，如“偏低”、“较大”、“略小”等。而模糊控制器就是这些模糊条件语句所构成的。模糊系统中极具模糊性的输入、输出量以及状态量导致模糊系统的不确定性。换言之，模糊控制其实是一种计算机数学控制形式，其结构如图 1 所示。

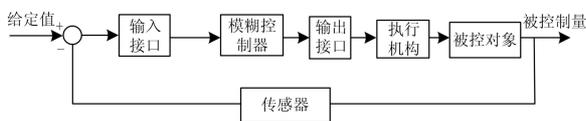


图 1 模糊控制器结构图

Fig. 1 Fuzzy controller structure

1.2 Smith 预估控制器基本理论

Smith 预估控制器是由 O.J.M.Smith 提出的一种时滞补偿的预估算法，常常应用于控制系统中。它通过对控制对象动态特性的估计，在常规控制器上并联时滞预估器，从而消除时滞对被调节量的影响，进而降低了时滞环节对整个控制系统造成的影响。Smith 预估控制系统将时滞环节转移到闭环以外，

因此具有提高控制性能的优点。但是它对控制对象的数学模型精度要求很高。当实际对象与估计模型有偏差时，控制质量会恶化，而且对外部干扰的敏感度会降低，鲁棒性能也会随之变差。系统结构如图 2 所示。

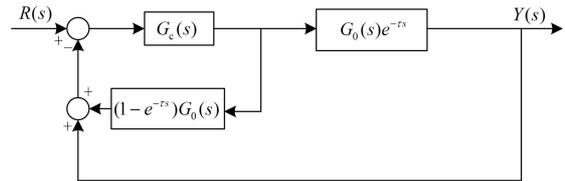


图 2 Smith 预估补偿反馈控制系统

Fig. 2 Smith estimated compensation feedback control system

2 控制器设计

2.1 模糊控制器设计

在模糊控制器进行设计之前，首先要确定控制的结构。模糊控制器的内部结构主要分为三大部分，包括：输入量的模糊化、模糊逻辑推理和输出量的解模糊化过程^[15]。

(1) 模糊控制结构选择

本文中采用二维结构单变量模糊控制器，即将输入量及其变化率同时送入模糊控制器作为输入量，如图 3 所示。

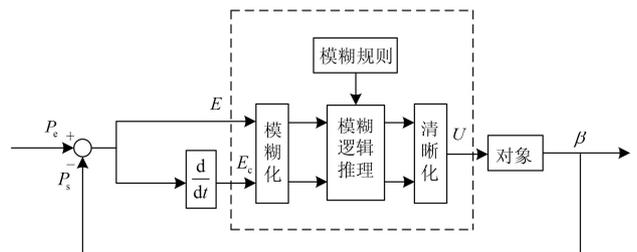


图 3 模糊控制器原理图

Fig. 3 Fuzzy controller principle

(2) 输入量的模糊化过程

模糊控制器的输入量 $E = \Delta P = P_c - P_s$ 、 $E_c = d\Delta P / dt$ 和输出量都是清晰量，为了将他们应用到模糊控制中，必须对其进行模糊化处理。而选择模糊空间与隶属函数是输入量模糊化的首要步骤。本文将 E 的状态表示为

{负大，负小，零，正小，正大}

英文缩写表示为 {NB, NS, ZO, PS, PB}。隶属函数采用平滑的高斯函数。

(3) 模糊规则制定

模糊逻辑推理是模糊控制器中至关重要的环节，而模糊逻辑推理又由模糊规则决定。模糊规则是对人工控制策略加以总结，然后通过语言对其

进行描述而获得的。一般控制策略由“if-then”的形式构成。

本文所设计的模糊控制器的模糊规则可以表示为

If $E(i)$ and $E_c(j)$ then $U(k)$,

其中, $E(i) (i=1,2,\dots,n)$ 为变量 E 的语言值, $E_c(j) (j=1,2,\dots,n)$, n 为 E 和 E_c 的模糊空间分隔数且都为 5, $U(k) (k=1,2,\dots,l)$ 为输出量 U 的语言值, l 为模糊分隔数为 7。

(4) 输出模糊量的清晰化

本文采用加权平均法对输出量进行清晰化计算。设 z_0 的变化范围为 $[z_{\min}, z_{\max}]$, 实际控制量 β 的变化范围为 $[\beta_{\min}, \beta_{\max}]$, 因此可以得到输出的实际控制量为:

$$\beta = \frac{\beta_{\min} + \beta_{\max}}{2} + \frac{\beta_{\max} - \beta_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}} \left(z_0 - \frac{z_{\max} + z_{\min}}{2} \right)$$

2.2 Smith 预估控制器设计

在直驱永磁同步风力发电机组变桨距系统的实际应用中, 对于桨距角的控制过程存在一定程度的纯滞后环节, 使得系统的稳定性和控制精度下降。如果滞后时间足够大时, 系统将失去稳定性, 这就是大延时会造成变桨距系统难以控制的最大因素。在这种情况下, 采用 Smith 预估控制可以实现将滞后环节转移到控制回路以外, 从而消除了时间滞后对系统控制的影响。根据变桨距系统的模型, 所设计的 Smith 预估控制的控制系统等效图如图 4 所示。

从图 4 可见, $G_c(s)$ 表示 Smith 预估补偿控制器的 PID 控制器, R 表示从模糊控制器输出的桨距角

β_f , U 表示经过 Smith 预估补偿控制器调节后的桨距角 β_p , Y 表示经过变桨距执行机构传递给风力机的桨距角 β_v 。

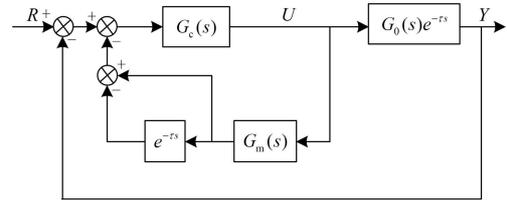


图 4 Smith 预估控制系统等效

Fig. 4 Smith predictor control system equivalent

3 仿真分析

3.1 仿真模型

仿真对象是一套 1.5 MW 的直驱式永磁同步发电机组。构建模糊控制器和 Smith 预估控制器, 得到基于功率变化的模糊 Smith 预估控制的变桨距结构图和仿真模型, 如图 5 和图 6 所示。

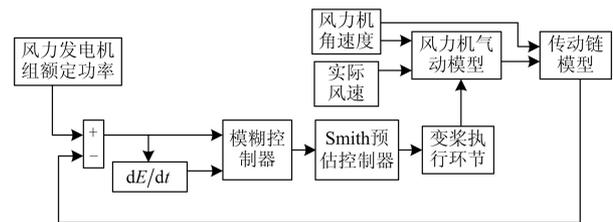


图 5 风力发电机组模糊 Smith 预估控制变桨距模型结构

Fig. 5 Wind turbine fuzzy Smith predictor variable pitch control model structure

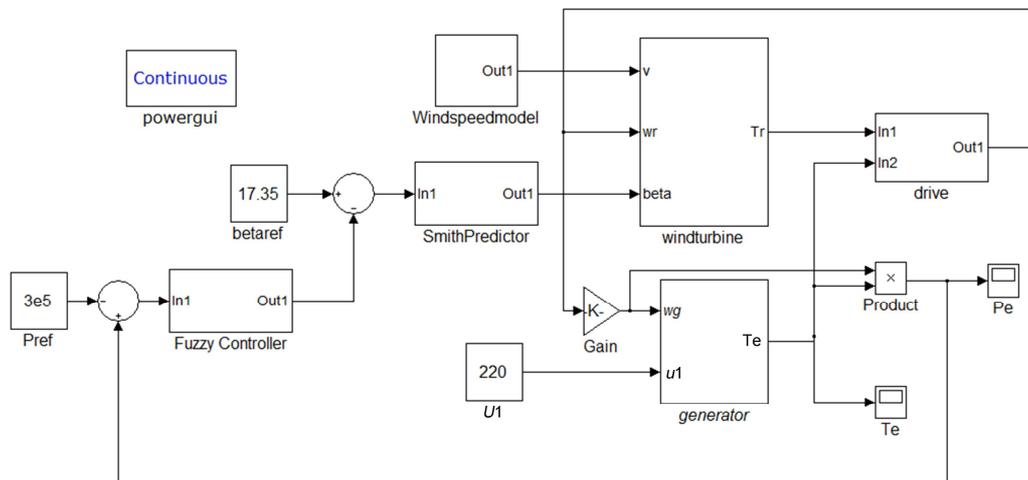


图 6 风力发电机组模糊 Smith 预估控制变桨距 Simulink 仿真模型

Fig. 6 Wind turbine fuzzy Smith predictor variable pitch control Simulink model

3.2 仿真结果及分析

额定风速为 12.5 m/s, 额定功率为 1.5 MW, 切出风速为 25 m/s, 风力机额定转速为 50 r/min, 变桨距系统时间常数 $T_\beta = 0.2$ s, 延迟时间 $\tau = 2$ s。

风速模型采用 12 m/s 到 21 m/s 的阶跃风, 仿真时间定为 1 000 s, 每隔 100 s 出现一次阶跃, 仿真波形如图 7 所示。

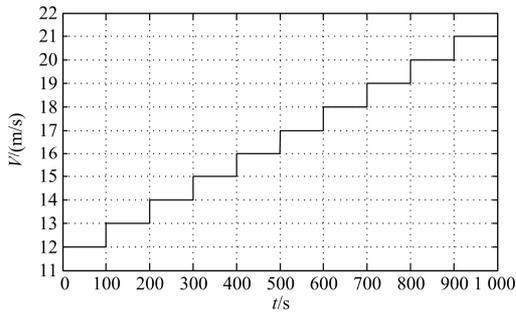


图 7 风速阶跃变化

Fig. 7 A step change in wind speed

图 8 中分别表示采用 PID 控制器和模糊控制器在 14~15 m/s 的阶跃风作用下的功率响应曲线, 可见当出现阶跃风时, 采用 PID 控制器输出的有功功率阶跃较大, 且达到额定值的时间较长; 采用模糊控制器输出有功功率几乎没有阶跃, 基本稳定在额定功率处。显然, 采用模糊控制器的控制效果和控制精度上都明显优于传统的 PID 控制器。

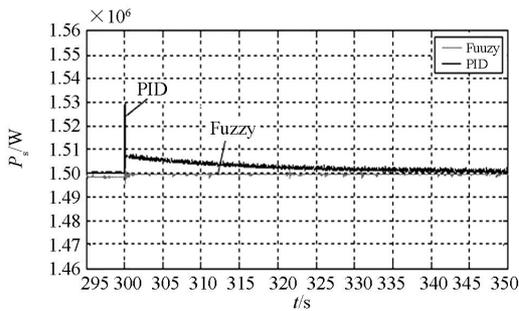


图 8 输出功率变化(模糊和 PID 对比)

Fig. 8 Output power variation (fuzzy and PID)

从图 9 中可以看出当不考虑变桨距执行环节的延时, 由模糊控制器来控制桨距角的功率响应时, 风电机组的输出功率稳定在 1.5 MW。然而当要考虑变桨距执行环节的延时问题时, 风电机组的输出功率不能很好地稳定在 1.5 MW, 而且随着风速的增加, 输出功率的偏差越来越大, 采用原来的模糊控制器不能达到很好的控制效果。因此本文在此基础上提出了一种新的控制策略, 即模糊 Smith 预估控制。

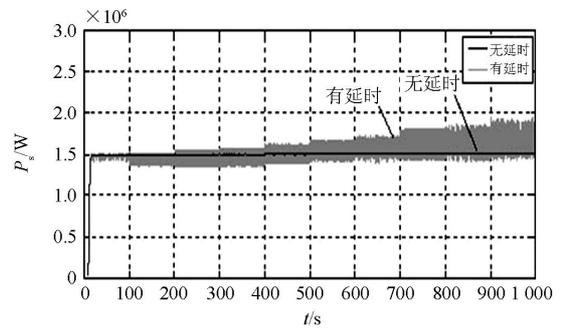


图 9 输出功率变化(模糊控制器单独控制)

Fig. 9 Output power variation (fuzzy controller individually controlled)

图 10~图 12 中分别表示仅有模糊控制和模糊 Smith 预估控制(考虑变桨距执行环节延时)的系统动态响应。由仿真结果可以看出, 当风速出现阶跃变化时, 仅有模糊控制作用, 由于变桨距执行环节存在时滞, 桨距角不能随着风速的变化及时调节到一个合适的值, 而是在不断地波动, 且波动的幅度很大, 使得风能利用系数也会不断地波动, 最终风

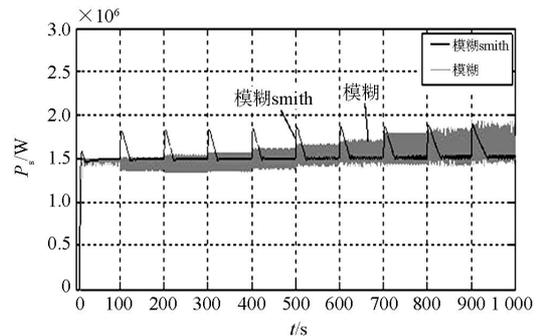


图 10 输出功率变化(考虑变桨距执行环节延时)

Fig. 10 Output power variation (consider the implementation aspects delay of pitch)

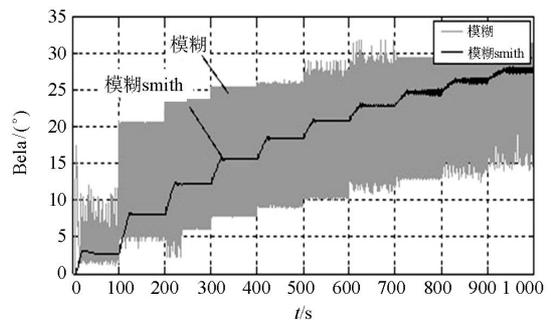


图 11 变桨距执行机构输出桨距角(考虑变桨距执行环节延时)

Fig. 11 Pitch actuator output pitch angle (consider the implementation aspects delay of pitch)

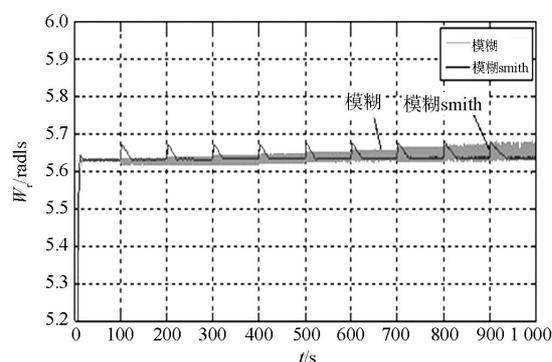


图 12 风力机风轮转速(考虑变桨距执行环节延时)

Fig. 12 Wind turbine speed (consider the implementation aspects delay of pitch)

发电机组的输出功率不能稳定在额定功率。而采用模糊 Smith 预估控制的方法, 风速出现阶跃变化时, 由于 Smith 预估控制器的作用, 使得桨距角能够及时稳定到一个合适的值, 风能利用系数也会稳定在相应的值, 最终使得风电机组的输出功率稳定在额定功率 1.5 MW。

4 结论

针对风电机组的非线性和时滞特性, 采用模糊 Smith 预估控制的方法, 设计了基于功率变化的模糊 Smith 预估控制器, 并进行了仿真。主要结论如下:

所设计的模糊 Smith 预估控制器, 性能优于单纯的模糊控制器; 当风速出现阶跃变化时, 使得桨距角能够及时稳定到一个合适的值, 风能利用系数也会稳定在相应的值, 从而得到稳定的功率输出。

参考文献

- [1] HANSN A, IOV F, SORENSEN P, et al. Overall control strategy of variable speed doubly-fed induction generator wind turbine[C] // Nordic Wind Power Conference, Goteborg, Sweden, 2004.
- [2] 李朝霞. 风电机组智能变桨距控制及优化研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
LI Zhaoxia. Research on intelligent pitch control and optimization for wind turbines[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011.
- [3] 宋新甫, 梁波. 基于模糊自适应 PID 的风力发电系统变桨距控制[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(16): 50-53, 58.
SONG Xinfu, LIANG Bo. Wind power system pitch

control based on fuzzy self-learning emendation control theory[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(16): 50-53, 58.

- [4] 刘军. 风力发电机组控制策略优化与实验平台研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
LIU Jun. Research on optimized control strategy and experimental platform for wind turbine generator system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [5] GAO Feng, XU Daping, LÜ Yuegang. Pitch-control for large-scale wind turbines based on feed forward fuzzy-PI[C] // Proceedings of the 7th World Congress on Intelligent Control and Automation, Chongqing, China, June 25-27, 2008: 2277-2282.
- [6] 郭鹏. 模糊前馈与模糊 PID 结合的风力发电机组变桨距控制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(8): 123-128.
GUO Peng. Variable pitch control of wind turbine generator combined with fuzzy feed forward and fuzzy PID controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(8): 123-128.
- [7] 南贵清. 直驱式永磁风电机组智能控制研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2014.
NAN Guiqing. Research on intelligent control of direct-drive permanent magnet wind turbine[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [8] 韦徵, 陈冉, 陈家伟, 等. 基于功率变化和模糊控制的风力发电机组变速变桨距控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(17): 121-126.
WEI Zheng, CHEN Ran, CHEN Jiawei, et al. Wind turbine-generator unit variable-speed pitch control based on judgment of power changes and fuzzy control[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(17): 121-126.
- [9] 刘军, 何玉林, 李俊, 等. 变速变桨距风力发电机组控制策略改进与仿真[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 82-86.
LIU Jun, HE Yulin, LI Jun, et al. Design and simulation of an improved control strategy for variable-speed pitch controlled wind turbine driven generator system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5): 82-86.
- [10] 张元, 郝丽丽, 戴嘉祺. 风电场等值建模研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(6): 138-146.
ZHANG Yuan, HAO Lili, DAI Jiaqi. Overview of the

- equivalent model research for wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(6): 138-146.
- [11] 蒋文韬, 付立军, 王刚, 等. 直驱永磁风电机组虚拟惯量控制对系统小干扰稳定性影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 33-40.
- JIANG Wentao, FU Lijun, WANG Gang, et al. Impact of direct-drive permanent magnet wind turbines virtual inertia control on power system small signal stability analysis[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 33-40.
- [12] 高本锋, 刘晋, 李忍, 等. 风电机组的次同步控制相互作用研究综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 154-161.
- GAO Benfeng, LIU Jin, LI Ren, et al. Studies of sub-synchronous control interaction in wind turbine generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 154-161.
- [13] 叶瑞丽, 刘瑞叶, 刘建楠, 等. 直驱风电机组风电场接入后的电力系统暂态稳定计算[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 211-218.
- YE Ruili, LIU Ruiye, LIU Jiannan, et al. Transient stability calculation of power system integrated with direct-drive wind farm with permanent magnet synchronous generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 211-218.
- [14] 张安安, 郭红鼎, 于兵, 等. 一种风电机组在低风速区间的功率控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 1-6.
- ZHANG Anan, GUO Hongding, YU Bing, et al. A power control method of wind turbines in low wind speed area[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 1-6.
- [15] 刘栋良, 崔言飞, 赵晓丹, 等. 基于反推控制的永磁同步电动机速度的模糊控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(11): 38-44.
- LIU Dongliang, CUI Yanfei, ZHAO Xiaodan, et al. Fuzzy control of speed of permanent magnet synchronous motor based on backstepping control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(11): 38-44.

收稿日期: 2015-03-18; 修回日期: 2015-06-03

作者简介:

杨伟(1965-), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力系统分析与控制、分布式电源与并网控制、配网自动化、微电网技术及应用; E-mail: weiyang@mail.njust.edu.cn

邓程城(1991-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: dengcc_1203@126.com

徐乐(1988-), 女, 硕士, 主要研究方向为电力系统分析与控制。E-mail: xule0807@sina.com

(编辑 张爱琴)