

变桨距风力机分区段模拟方法及其控制策略

叶远茂¹, 吴捷¹, 张先亮¹, 邱晓欢²

- (1. 华南理工大学 电力学院, 广东省 广州市 510640;
2. 广东省绿色能源技术重点实验室, 广东省 广州市 510640)

Sectioned Simulation of Variable Blade Pitch Wind Turbine and Its Control Strategy

YE Yuan-mao¹, WU Jie¹, ZHANG Xian-liang¹, QIU Xiao-huan²

- (1. College of Electrical Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China;
2. Guangdong Provincial Key Lab for Green Chemical Product Technology, Guangzhou 510640, Guangdong Province, China)

ABSTRACT: Actual wind turbine with variable blade pitch adopts different operation modes for different wind strength, and the input and output of wind power generator are different correspondingly. The authors analyze working characteristics of wind power generator in different working-zones and obtain the relation between power output and wind speed in different working zones of wind power generator, then the simulation method for different working zones of wind power generator is given, in which the induction generator is controlled by fuzzy direct torque control (DTC) and the output characteristic of wind power generator under different conditions can be simulated. Simulation results show that the proposed method can overall and accurately simulate working characteristic within whole wind power generation process.

KEY WORDS: wind turbine; induction motor; sectioned simulation; parameter identification; direct torque control

摘要: 风力强度不同, 实际变桨距风力机的工作方式不同, 风力机的输入输出关系也不同。分析了风力机在各个工作区的工作特性, 得到了风力机在各个区段功率输出与风速的关系, 给出了不同区段风力发电机的模拟方法。运用模糊直接转矩控制异步电动机, 模拟不同情况下风力发电机的输出特性。仿真结果表明, 该方法能较准确和全面地模拟风力机在整个风力发电过程的工作特性。

关键词: 风力机; 感应电动机; 分区段模拟; 参数辨识; 直接转矩控制

0 引言

近年来, 人类社会的快速发展使人们的能源需求逐步增加。风能作为可再生能源开发的典型代表, 受到了世界各国的关注。虽然人类利用风能已

有很久的历史, 但真正意义上的开发利用是最近几十年才开始的, 特别是我国对风能的开发利用目前还处于起步阶段^[1]。由于风能的产生和大小无法人为控制, 所以怎样将风能最大限度地转化为电能是人们研究的焦点^[2]。在风力发电机的研究和测试中, 风力发电机桨叶的空气学特性试验通常依靠风洞来完成, 近年来一般用风力发电机模拟系统来进行上述试验。与真实的现场风机试验相比, 风机模拟系统不受环境限制, 便于在短时间内对各种气象条件下的风机运行特性进行全面分析与研究^[3]。

风力机的模拟是指模拟系统模拟风力机在风能驱动下输出机械功率的特性。目前, 主要采用直流电动机或异步电动机来模拟。直流电机模拟风力机通常采用开环调节进行风力机的静态模拟。而异步电动机模拟风机则有多种控制方法, 其中经模糊算法优化后的直接转矩控制就能使系统有很好的动态响应效果^[4]。目前, 风力发电机模拟系统大多只是单纯地模拟风力发电机的理想工作特性, 本文将结合实际风力发电系统的运行特点, 全面介绍风力机在实际变速恒频风力发电系统中的工作特性。

1 风力机模拟原理及系统总体结构

风力机将风能转化为机械能并带动发电机发电。根据贝兹理论, 风力机从风中捕获的机械能功率^[1]为

$$P_m = \rho \pi C_p(\lambda, \beta) R^2 v^3 / 2 \quad (1)$$

式中: ρ 为空气密度; $C_p(\lambda, \beta)$ 为风力发电机的功率转换系数; R 为风轮半径; v 为风速; λ 为叶尖速比, $\lambda = \omega R / v$; β 为桨距角; ω 为风力发电机转速。

对于整个发电系统, 风力机向发电机提供转速

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60534040)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (NSFC)(60534040).

和相应的转矩^[5-7]。如果用异步电动机替代风力机, 运用一定的控制策略使其输出与风力机相同特性的转速和转矩, 就完全可以运用异步电动机代替风力机模拟风力发电。在异步电机模拟风力机的发电系统中, 一般有静态模拟和动态模拟 2 种方法。静态模拟是指控制异步电机在稳态时输出转矩和转速的对应关系, 使其与实际风力机转矩和转速的对应关系一致; 动态模拟是将异步电机的参考电磁转矩与风轮转速联系起来, 使异步电机的电磁转矩与风轮的气动转矩具有相同的变化规律。

在风力发电机模拟系统中, 仍以风速作为系统的输入。根据风力机的数学模型计算风力机在给定风速下的输出功率和转速, 得出异步电动机的控制指令, 使异步电动机输出与风力机相同的转速和功率, 达到利用异步电动机模拟风力发电的目的。

模拟系统结构如图 1 所示, 系统根据输入的风速信号和电机的转速反馈信号, 利用风力机的数学模型计算出电动机的控制指令。采用模糊直接转矩控制异步电动机, 模拟风力机带动发电机发电。图中: T^* 和 T 分别为原动机的给定转矩和实测转矩; ψ^* 和 ψ 分别为原动机给定磁链幅值和实测磁链幅值; θ 为实测的原动机磁链角度; v 为风速。

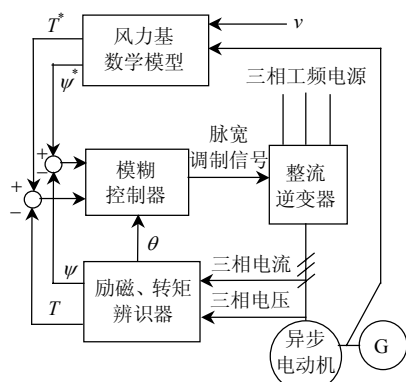


图 1 风力发电模拟系统结构

Fig. 1 Structure of the wind power simulation system

2 风力发电机实际运行情况

为提高变桨距风力发电机组的运行效率, 最大限度地将风能转换为电能, 根据变桨距风力发电机组的实际运行情况, 将风力发电机划分为如下 3 个运行区域^[8]:

1) C_p 恒定区。当风速达到起动风速后, 风轮转速由 0 增大到发电机可切入的转速, 风力发电机组开始发电运行, 通过控制发电机转速, C_p 不断上升, 直至 $C_p = C_{pmax}$ 进入 C_p 恒定区, 这时机组在最

佳状态下运行。这段区域主要是调节发电机阻力矩(有功功率给定值)使转速随风速变化, 使 λ 为某一定值 λ_m , 实现最大风能捕获。

2) 转速恒定区。随着风速的增大, 机组的转速也在增大, 最终达到机组允许的最大转速, 但风力机输出功率未达到最大限度, 风力机维持该转速不变。随着风速的增大, 风力机输出的机械功率增大, 但 C_p 减小。

3) 功率恒定区。随着功率的增大, 发电机和变流器最终达到功率极限。随着风速的增大, 风力机逐渐增大桨距角, 从叶片吸收的风能逐渐减小, 风力机输出的机械功率不变^[9-10]。

3 分区段模拟的原理

3.1 功率转换系数、叶尖速比和桨距角关系

由第 2 节的分析可以看出, 风力发电机运行的整个过程都围绕 C_p 这一参数在调整。由式(1)可知, 当风速一定时, C_p 直接决定风力机的输出功率。 C_p 是一个与叶尖速比 λ 和桨距角 β 有关的参数, 3 者的关系如图 2 所示。3 者之间的数学关系式为

$$C_p = \left(\frac{c_1}{\lambda_i} - c_2\beta - c_3\beta^4 - c_5 \right) e^{-\frac{c_6}{\lambda_i}} \quad (2)$$

式中: $\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + c_7\beta} - \frac{c_8}{\beta^3 + 1}$; $c_1 \sim c_8$ 为风力发电机参

数, 不同的风力机上述参数的取值不同。在模拟某一特定型号的风力机之前, 需要通过风力机生产厂家提供的功率与转速关系曲线进行参数辨识, 文献[11]对风力机参数的辨识原理和步骤进行了详细地介绍, 本文不再赘述。

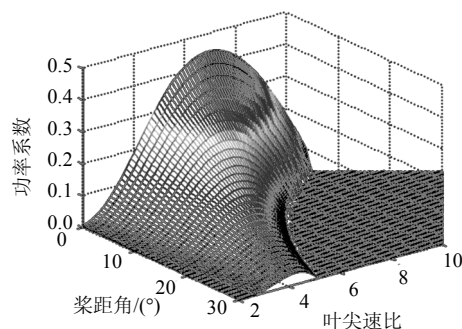


图 2 $C_p(\lambda, \beta)$ 曲线

Fig. 2 Curve of $C_p(\lambda, \beta)$

由图 2 可看出, 把桨距角 β 视为常数时, 风能利用系数 C_p 是叶尖速比 λ 的函数, 其中 λ_{max} 对应风能利用系数的最大值 C_{pmax} 。若将式(2)对 λ 求偏导并令其等于零, 则可求出风能利用系数最大时的 λ_{max} ,

再将其代入式(2)即可得到最大的风能利用系数。此时的风能利用系数只与桨距角 β 有关,用 $C_{pm}(\beta)$ 表示。

3.2 C_p 恒定区的模拟

在 C_p 恒定区,由于风力发电机运行在额定转速下,桨距角 β 始终为0,风能利用系数仅和 λ 有关^[12],主要通过调整风力机转速使其达到最佳叶尖速比 λ_{max} ,所以分2种情况对风力机进行模拟。

1) 风速不变,模拟风力机功率随转速变化时的变化特性。此时,叶尖速比 $\lambda=\omega R/v=k_1\omega$,式中 k 为常数。可以看出, λ 正比于风力机转速 ω ,风能利用系数可视为以 ω 为自变量的函数 $C_p=C_p(\omega)$ 。式(2)可改写为

$$P_m = k_2 C_p(\omega) \quad (3)$$

式中 k_2 是扫过风力机叶面的风能,在此为常数。可见,使异步电动机输出具有式(3)的特性,即可模拟风力机在风速恒定时功率随风机转速变化的曲线,如图3中9条曲线所示。

2) 风速变化,模拟风力机调整转速进行最大风能捕获。此时,调整风力机转速使 λ 保持最佳叶尖速比不变,则 $C_p=C_{pmax}$ ^[13-14]。风力机转速和功率分别为

$$\omega = \lambda_{max} v/R = k_3 v \quad (4)$$

$$P_m = \rho \pi C_{pmax} R^2 v^3/2 = k_4 v^3 \quad (5)$$

可见,转速与风速成正比,功率与转速的3次方成正比。模拟系统控制异步电动机的输出使其在输入的风速信号下按式(4)(5)的规律变化,模拟出的风力机最大风能捕获特性见图3中①所指的虚线。

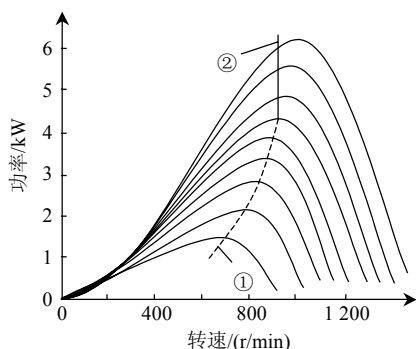


图3 变桨距风力发电机的运行特性
Fig. 3 Variable pitch wind turbine operating characteristics

3.3 转速恒定区的模拟

在转速恒定区段,风力机保持转速不变,即

$$\omega = \omega_e \quad (6)$$

桨距角 β 也可视为保持 0° 不变。风能利用系数只与叶尖速比有关,叶尖速比 $\lambda=\omega_e R/v=k_5/v$ 。此时风能利

用系数可看成是以风速为自变量的函数 $C_p=C_p(v)$ 。风力机输出机械功率为

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi C_p(v) R^2 v^3 = k_6 C_p(v) v^3 \quad (7)$$

可见,输出功率只与风速大小有关,所以控制异步电动机的输出在输入的风速信号下按式(6)(7)的规律变化,即可模拟出图3中②所指的风力机恒速运行区段特性。

3.4 功率恒定区的模拟

在功率恒定区段,调整桨距角使风力机输出功率保持在额定功率 P_e 附近,此时风力机以恒定转速 ω_e 运行,输出机械功率 P_m 恒定,其表达式为

$$P_m = P_e = \frac{1}{2} \rho \pi C_{pm}(\beta) R^2 v^3 = k_7 C_{pm}(\beta) v^3 \quad (8)$$

式(8)中风能利用系数 C_{pm} 是与风速的3次方成反比的函数,即

$$C_{pm}(\beta) = P_e/(k_7 v^3) = k_8/v^3 \quad (9)$$

此区段风机的运行可视为是一个风能最大捕获的逆过程,即已知最大能量输出,要寻找合适的桨距角使风力机吸收最少的风能。可见,在某恒定的桨距角下,系统仍然运行在最大风能捕获状态。由上述分析可知,此时的 $C_{pm}(\beta)$ 对应的是风能利用系数 C_p 对叶尖速比 λ 求偏导等于0的点,即

$$f(\lambda, \beta) = \partial C_p(\lambda, \beta)/\partial \lambda = 0 \quad (10)$$

由式(10)可知,此时桨距角 β 可由叶尖速比 λ 表示,叶尖速比 $\lambda = \omega R/v$ 。由式(6)可知,此时风力机的转速可视为恒定,其值为 ω_e 。综上所述,可通过风速的大小来确定桨距角,即

$$\beta = g(v) \quad (11)$$

当风速大于额定风速使风力机运行在恒功率区域时,模拟系统可以控制异步电动机工作在恒速恒功率状态。系统应根据输入风速信号的变化使用软件模拟输出一条图4所示的桨距角-风速关系曲线。

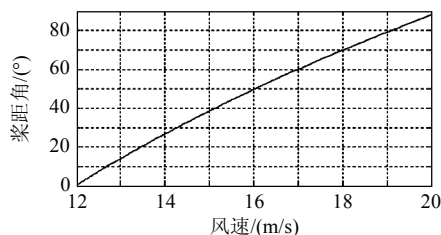


图4 桨距角-风速关系曲线

Fig. 4 The relation curve between pitch angle and velocity

4 异步电机的控制策略

异步电动机在 α - β 坐标系上的数学模型^[15]如下:

$$\psi_{s\alpha} = \int (u_{s\alpha} - i_{s\alpha} R_s) dt \quad (12)$$

$$\psi_{s\beta} = \int (u_{s\beta} - i_{s\beta} R_s) dt \quad (13)$$

$$\psi_s = \sqrt{\psi_{s\alpha}^2 + \psi_{s\beta}^2} \quad (14)$$

$$\theta = \arctan(\psi_{s\beta} / \psi_{s\alpha}) \quad (15)$$

$$T_e = \frac{3}{2} n_p (\psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \psi_{s\beta} i_{s\alpha}) \quad (16)$$

可见, 定子磁链 ψ_s 和电磁转矩 T_e 是定子电压在 α - β 坐标系下的分量 ($u_{s\alpha}$, $u_{s\beta}$) 和定子电流在 α - β 坐标系下的分量 ($i_{s\alpha}$, $i_{s\beta}$) 的函数。由此可见, 采用直接转矩控制时, 只需测量电动机定子侧电压和电流, 对其进行 3-2 变换, 运用式(12)~(16)即可计算出异步电机的转矩和磁链。将计算结果分别与给定转矩和磁链进行比较, 根据比较结果和磁链位置直接查找最优开关表, 以产生脉宽调制(pulse width modulation, PWM)信号, 直接对逆变器开关状态进行最优控制。

传统的直接转矩控制的滞环控制器的继电特性无法精确地区分转矩误差和磁链误差, 因此误差很大和误差很小时, 输出的转矩和磁链具有较大的脉动。考虑到直接转矩控制的控制量用范围表示, 是模糊变量, 因此采用模糊控制的方法来优化传统的直接转矩控制, 可以使系统具有良好的磁链和转矩输出特性^[5]。模糊控制器将运用模糊逻辑将转矩变化量 ΔT 、磁链变化量 $\Delta \psi$ 和 $\theta(k+1)$ 模糊化为模糊变量 E_ψ 、 E_T 和 θ 。其中 E_ψ 由 P 、 Z 、 N 这 3 个子集组成, E_T 由 P_b 、 P_s 、 Z_e 、 N_s 和 N_b 这 5 个子集组成。根据上述分区, 磁链位置角 θ 被划分为 12 个模糊子集, 即 $\{\theta_1, \dots, \theta_{12}\}$ 。这样就可以较精确地选择电压矢量, 从而减小输出的转矩脉动, 改善电机低速运行特性。

5 仿真结果与分析

为验证上述模拟方法的可行性, 本文选用 Matlab/Simulink 已有的异步电动机模型和新构建的风力机模型, 运用基于模糊理论的直接转矩控制对异步电动机响应进行控制, 分别对风力机运行在各区段的关键要素进行模拟。

本文模拟的风力发电机为 1 台额定功率为 11 kW 的小型风力机, 定切入风速为 3 m/s, 额定风速为 12 m/s, 切出风速为 20 m/s。式(2)中风力机参数 $\{c_1, c_2, \dots, c_7, c_8\} = \{111, 0.424, 0.0015, 2.14, 9.9, 18.4, 0.08, -0.035\}$ 。异步电动机参数如下: 额定功率 $P_n = 22$ kW, 额定电压 $U_n = 380$ V, 额定频率 $f_n = 50$ Hz;

定子电阻 $R_s = 1.253 \Omega$, 定子电感 $L_s = 0.0047 \Omega$; 转子电阻 $R_r = 1.322 \Omega$, 转子电感 $L_r = 0.0079 \Omega$; 互感 $L_m = 0.1697 \Omega$; 转动惯量 $J = 0.02 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 摩擦系数 $F = 0.0058$, 极对数 $n = 2$ 。

模拟得到的风速恒定时, 风力机功率-转速系统曲线见图 5。可见, 某一风速下风力机只有一个转速点对应最大输出功率, 而不同风速下对应的最大风能捕获点是不同的。实际风电场的风速是不断变化的, 因此风力机需要快速跟踪风速变化, 实现输出功率最大。图 6 为在风速变化情况下系统模拟风力机进行最大功率捕获的情况。可见, 系统能够快速和准确地模拟风机进行最大风能捕获。

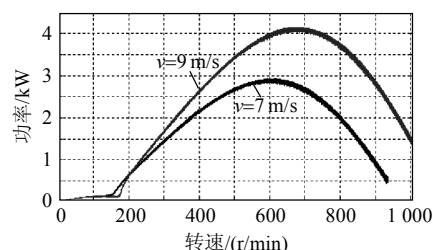


图 5 功率-转速关系曲线

Fig. 5 The relation curve between power and speed

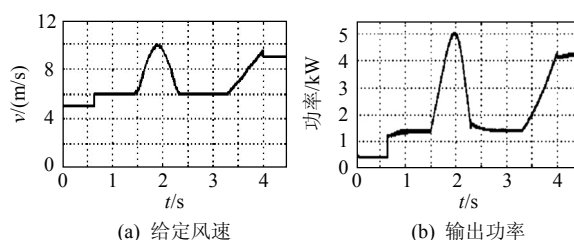


图 6 风力机进行最大风能捕获时的输出功率

Fig. 6 The output power of wind turbine when the largest wind power is captured

图 7 是在风速接近和超过额定风速时, 模拟得到的风力机分别运行在恒转速和恒功率区段时的输出功率。由图 7 可知: 在恒转速区段内, 风力机输出功率不再与风速的 3 次方成线性关系; 在恒功率区段, 需调节桨距角来维持风机输出功率恒定。

图 8 是风力机运行在恒功率区段时, 其桨距角随风速变化时的模拟输出曲线。图 8 可作为调节实际风力机系统桨距角的依据。

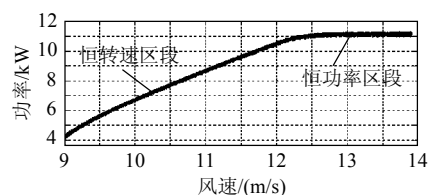


图 7 恒转速和恒功率区段风力发电机的响应

Fig. 7 The response of wind turbine in constant speed and constant power sections

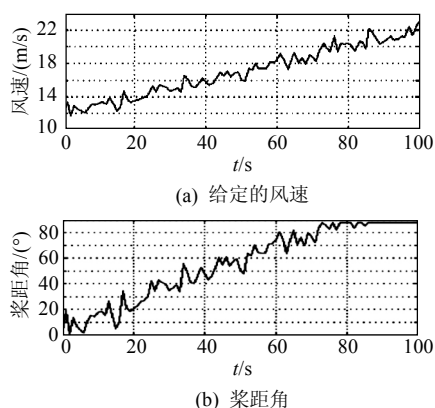


图8 恒功率区段风力机桨距角的变化情况
Fig. 8 The changes of wind turbine pitch angle in constant power section

6 结论

1) 本文在分析变桨距风力机实际运行情况的基础上分区段对风力机进行了模拟,详细分析了各区段模拟的重点和方法。

2) 用异步电动机对风力发电系统在 C_p 恒定区、功率恒定区、转速恒定区的运行情况进行了模拟仿真,验证了本文方法及控制策略的可行性。

参考文献

- [1] Wu J, Chen S Z, Yang J H. Control on green energy source and ecologic environment[J]. Asian Power Electronics Journal, 2007, 1(1): 36-41.
- [2] 徐大平, 张新房, 柳亦兵. 风力发电控制问题综述[J]. 中国电力, 2005, 38(4): 70-74.
Xu Daping, Zhang Xinfang, Liu Yibing. Overview of relevant control problems of wind turbines[J]. Electric Power, 2005, 38(4): 70-74(in Chinese).
- [3] 贺益康, 胡家兵. 风力机特性的直流电动机模拟及其变速恒频风力发电研究中的应用[J]. 太阳能学报, 2006, 27(10): 1006-1013.
He Yikang, Hu Jiabing. The imitation of wind-turbine characteristic using DC motor in the investigation on VSCF wind-power generation [J]. Solar Energy Journal, 2006, 27(10): 1006-1013(in Chinese).
- [4] 陈彬, 宋平岗, 何鑫. 基于直接转矩控制的风力机模拟器的研究[J]. 防爆电机, 2007, 42(4): 18-21.
Chen Bin, Song Pinggang, He Xin. Study of wind turbine simulator based on direct torque control[J]. Explosion-Proof Electric Machine, 2007, 42(4): 18-21(in Chinese).
- [5] 孙国霞, 李啸骢, 蔡义明. 大型变速恒频风电系统的建模与仿真[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(10): 69-73.
Sun Guoxia, Li Xiaocong, Cai Yiming. Modeling and simulation of variable-speed wind generator system with large capacity[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(10): 69-73(in Chinese).
- [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): 93-97.

Xia Changliang, Song Zhanfeng. Pitch control of variable speed constant frequency wind turbine based on active-disturbance-rejection controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(14): 93-97(in Chinese).

- [7] Bianchi F D, Mantz R J, Christiansen C F. Power regulation in pitch-controlled variable-speed WECS above rated wind speed[J]. Renewable Energy, 2004(29): 1911-1922.
- [8] 张琦玮, 蔡旭. 最大风能捕获风力发电系统及其仿真[J]. 电机与控制应用, 2007, 34(5): 42-46.
Zhang Qiwei, Cai Xu. Maximum wind energy tracking wind turbine system and simulation[J]. Motor Control and Applications, 2007, 34(5): 42-46(in Chinese).
- [9] Yang J M, Wu J, Dong P, et al. Passivity-based control in wind turbine for maximal energy capture[C]. 2004 IEEE International Conference on Electric Utility Deregulation, Restructuring and Power Technologies, Hong Kong, 2004.
- [10] Datta R, Ranganathan V T. A method of tracking the peak power points for a variable speed wind energy conversion system [J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004, 18(1): 163-168.
- [11] 张仰飞, 袁越, 陈小虎, 等. 风力机参数的可辨识分析[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(6): 86-89.
Zhang Yangfei, Yuan Yue, Chen Xiaohu, et al. Analysis on wind turbine parameters identifiability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(6): 86-89(in Chinese).
- [12] 柳明, 柳文. 基于风速和空气密度估计的最大风能捕获[J]. 电网技术, 2009, 33(1): 56-60.
Liu Ming, Liu Wen. Maximized wind energy capture based on estimation of wind speed and air density[J]. Power System Technology, 2009, 33(1): 56-60(in Chinese).
- [13] 马炜炜, 俞俊杰, 吴国祥, 等. 双馈风力发电系统最大功率点跟踪策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 202-208.
Ma Weiwei, Yu Junjie, Wu Guoxiang, et al. MPPT control strategy for double-fed wind power generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(4): 202-208(in Chinese).
- [14] 王琦, 陈小虎, 纪延超, 等. 基于双同步坐标的无刷双馈风力发电系统的最大风能追踪控制[J]. 电网技术, 2007, 31(3): 82-87.
Wang Qi, Chen Xiaohu, Ji Yanchao, et al. Maximal wind energy tracing control for brushless doubly-fed wind turbine based on dual synchronous coordinates[J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 82-87(in Chinese).
- [15] 孙振川. 异步电机直接转矩控制理论和技术的研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.



叶远茂

收稿日期: 2009-07-08.

作者简介:

叶远茂(1984—), 男, 硕士研究生, 研究方向为风力发电控制技术, E-mail: tshb007@163.com;
吴捷(1937—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源发电中的控制技术、电力电子、电力系统自动化等。

(责任编辑 杜宁)