

DOI: 10.7667/PSPC160106

# 基于转矩观测器的垂直轴风力发电最大功率跟踪反演控制

吴爱华<sup>1,2</sup>, 赵不贿<sup>2</sup>, 茅靖峰<sup>1</sup>, 顾梁<sup>1</sup>

(1. 南通大学机械工程学院, 江苏 南通 226019; 2. 江苏大学电气信息工程学院, 江苏 镇江 212013)

**摘要:** 为了提高垂直轴永磁直驱风力发电系统控制的鲁棒性和自适应性, 针对大范围风速扰动和系统参数不确定的特点, 应用非线性干扰观测器(NDO)实现垂直轴风力机气动转矩的估计, 再结合反演(Back-stepping)控制方法设计发电最大功率跟踪(MPPT)控制器。控制器采用基于最佳转速跟踪的 MPPT 策略, 通过逐步选择虚拟控制量和构造李雅普诺夫函数, 使每个被控子系统具有良好的渐近特性, 进而得到整个系统在大扰动下的全局渐近控制律。利用 Matlab/Simulink 建立系统的仿真模型, 通过与 PID 控制器的对比实验, 验证了反演控制器设计的正确有效性。

**关键词:** 垂直轴风力发电系统; 永磁同步发电机; 最大功率跟踪; 反演控制; 非线性干扰观测器

## Back-stepping control for vertical axis wind power generation system maximum power point tracking based on torque observer

WU Aihua<sup>1,2</sup>, ZHAO Buhui<sup>2</sup>, MAO Jingfeng<sup>1</sup>, GU Liang<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Nantong University, Nantong 226019, China;

2. School of Electrical and Information Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** For overcoming the disadvantages of wide range wind power perturbation and model parameter uncertainties, a novel maximum power point tracking (MPPT) controller for vertical axis wind power generation system is designed using back-stepping control method. The MPPT controller adopts wind turbine's optimum rotational speed tracking algorithm, and the wind turbine's dynamic aerodynamic torque is estimated by a nonlinear disturbance observer (NDO). According to the back-stepping controller design approach, virtual control signals and Lyapunov functions are constructed step by step. By employing Lyapunov stability theorem, back-stepping control law for each subsystem is worked out, thus, the global asymptotical stability for the overall system that all virtual control signals involved are guaranteed. The control system is simulated using Matlab/Simulink software, which is compared with conventional PID control method. The simulation results verify the correctness and effectiveness of the back-stepping controller.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61004053 and No. 61273151), Natural Science Foundation of Jiangsu Province (No. BK20141238), Qing Lan Project of Jiangsu Province, and Graduate Student Scientific Research and Innovation Project of Jiangsu Province (No. CXLX13\_681).

**Key words:** vertical axis wind power generation system; permanent magnet synchronous generator; maximum power point tracking; back-stepping control; nonlinear disturbance observer

## 0 引言

风力发电技术因其洁净、可持续的特点, 越来越受到世界各国的青睐<sup>[1-6]</sup>。目前, 水平轴风力机技术相对成熟, 商业化应用广泛。但在人们进一步研

究中发现, 垂直轴风力机具有叶片结构与工艺简单、整机重心低、气动噪声小、无需对风装置、制造成本少等优点, 能够较好地解决水平轴风力机面临的技术难题, 具有良好的发展前景<sup>[7-8]</sup>。

垂直轴永磁直驱风力发电系统中, 最常用的控制方法是多闭环 PID 控制, 但永磁同步风力发电机(PMSG)系统的  $dq$  轴解耦控制存在交叉耦合项, 导致 PID 控制对此类非线性系统的调节性能受到限制, 而且参数整定困难。因此, 很多研究者将非线

**基金项目:** 国家自然科学基金(61004053, 61273151); 江苏省自然学科基金(BK20141238); 江苏省高校青蓝工程资助项目; 江苏省高校研究生科研创新计划项目(CXLX13-681)

性控制方法应用到永磁直驱风力发电系统的控制中来。文献[9]阐述了内模控制在永磁直驱风电系统最大风能捕获(MPPT)中的应用;文献[10]提出基于分数阶PI<sup>λ</sup>控制的风力发电系统MPPT控制方案,并结合遗传算法对参数进行优化;文献[11]将自抗扰控制方法应用到MPPT控制器的设计中;文献[12]提出了基于自适应滑模控制与扩张状态观测器的风力发电系统复合MPPT控制器。

反演控制(Back-stepping Control)是以保证系统的全局一致性为前提,将复杂的非线性系统分解成多个不超过系统阶次的子系统,以递推的方式选择合适的Lyapunov函数,逐步导出最终控制率,实现对系统的有效控制。反演控制能够保证闭环系统全局稳定,是设计非线性系统跟踪与调节控制器的有效工具。但针对这种基于被控对象数学模型设计的控制器,常需配合运用系统不确定参数的估计或是未知扰动的观测技术,以进一步提高控制律的鲁棒性<sup>[13-15]</sup>。

本文为了增强了垂直轴永磁直驱风力发电系统MPPT控制的鲁棒性和自适应性,应用反演控制方法,将风力机气动转矩的不确定性视为系统的未知外界扰动,通过非线性干扰观测器(NDO)来实时估计气动转矩,再利用反演控制器进行补偿,设计出具有鲁棒性和自适应性的垂直轴永磁直驱风力发电MPPT控制器。通过Matlab/Simulink进行系统建模并仿真,并与传统风力发电PID控制器进行比较,验证了设计的反演控制器在风力发电系统大范围风速扰动下均具有很好的MPPT控制跟踪效果。

## 1 最大风能跟踪原理

根据贝茨理论<sup>[16]</sup>,垂直轴风力机能够捕获的气动机械功率为

$$P_a = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (1)$$

式中:  $\rho$ 为空气密度;  $A$ 为扫风面积;  $\lambda$ 为叶尖速比;  $\beta$ 为桨距角;  $C_p(\lambda, \beta)$ 为风能利用系数;  $v$ 为风速。

叶尖速比  $\lambda$  为垂直轴风力机叶片旋转线速度与风速之比

$$\lambda = \frac{\omega_r r}{v} \quad (2)$$

式中:  $r$ 为叶片旋转半径;  $\omega_r$ 为风力机旋转的机械角速度。

当风速  $v$  一定时,风能利用系数  $C_p(\lambda, \beta)$  决定了风力机吸收风能的大小,其近似函数表达式为<sup>[12]</sup>

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\frac{c_5}{\lambda}} \quad (3)$$

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

式中:  $c_1=0.5176$ ;  $c_2=116$ ;  $c_3=0.4$ ;  $c_4=5$ ;  $c_5=21$ ;  $c_6=0.0068$ 。

当桨距角  $\beta$  固定时,  $C_p$  是关于叶尖速比  $\lambda$  的函数,其理论最大值为0.593。在不同的桨叶节距角  $\beta$  设置下,  $C_p(\lambda, \beta)$  与  $\lambda$  的关系曲线簇如图1所示。

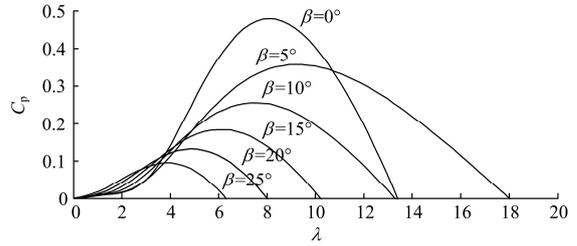


图1 风能利用系数与叶尖速比的关系

Fig. 1 Relationship of  $C_p$  versus  $\lambda$

在某一特定桨叶节距角  $\beta$  设置下,若叶尖速比  $\lambda$  达到其最优值  $\lambda_{opt}$ ,即风力机旋转的机械角速度达到最优值  $\omega_r = \lambda_{opt} v / r$ ,则功率系数  $C_p = C_{pmax}$ ,此时风力机捕获的风能功率最大。由式(1)、式(2)可得,风力机捕获的最大气动机械功率为

$$P_{aopt} = \frac{\rho A C_{pmax} r^3}{2 \lambda_{opt}^3} \omega_r^3 = K_{opt} \omega_r^3 \quad (5)$$

式中,  $K_{opt} = 0.5 \rho A C_{pmax} r^3 / \lambda_{opt}^3$  近似为常数。

相应地,风力机轴上输出的最大机械转矩为

$$T_{aopt} = \frac{P_{aopt}}{\omega_r} = \frac{\rho A C_{pmax} r^3}{2 \lambda_{opt}^3} \omega_r^2 = K_{opt} \omega_r^2 \quad (6)$$

当叶尖速比  $\lambda$  达到其最优值  $\lambda_{opt}$ ,  $K_{opt}$  为定值,风力机轴上输出的最大机械功率  $P_{aopt}$  与转速  $\omega_r$  的立方成正比,风力机轴上输出的最大机械转矩与转速  $\omega_r$  的平方成正比。

根据式(5)和式(6)可以绘出风力机在不同风速下输出的机械功率曲线簇,如图2所示。图中,  $v_1-v_4$  分别代表5种不同的风速,且  $v_1 < v_2 < v_3 < v_4$ 。

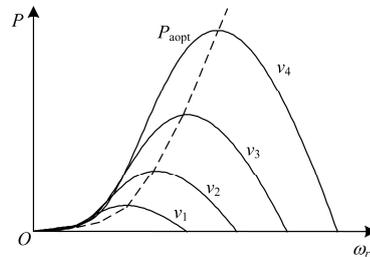


图2 最佳风能吸收功率曲线

Fig. 2 Optimum wind power curve

将图 2 中不同风速下的最大功率点连接起来, 即可获得风力机的最大功率曲线  $P_{a \text{ opt}}$ 。

由图 2 可知, 风力机在某一转速下, 风速越大, 输出功率越大。而对于某一风速而言, 总会有一个固定的最大功率点存在。只有当风力发电机运行在最佳叶尖速比时, 才能输出最大功率。最佳转速跟踪法是控制风力发电机的转速使得垂直轴风力机始终运行在最佳叶尖速比下, 从而捕获最大风能。

## 2 系统数学模型

假设气隙磁场正弦分布、磁路不饱和, 忽略铁芯涡流和磁滞损耗, PMSG 在  $d$ - $q$  两相旋转坐标系下的数学模型可表示为<sup>[17]</sup>

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + L_d \dot{i}_d - \omega_g n_p L_q i_q \\ u_q = Ri_q + L_q \dot{i}_q + \omega_g n_p L_d i_d + n_p \omega_g \psi_f \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $u_d, u_q, i_d, i_q, L_d, L_q$  分别为定子电压、电流和电感在  $d, q$  轴上的分量;  $R$  为定子电枢电阻;  $\omega_g$  为转子机械角速度;  $n_p$  为发电机的极对数;  $\psi_f$  为永磁转子的磁链。

采用基于  $i_d=0$  的磁场定向解耦控制策略, 并考虑表贴式 PMSG, 由于  $L_d=L_q=L_s$ , 故其电磁转矩方程可简化写为

$$T_g = \frac{3}{2} n_p \psi_f i_q \quad (8)$$

当垂直轴风力机转轴与风力发电机直接相连时, 有  $\omega_g = \omega_r$ , 可得风力发电系统的传动轴运行模型为

$$\dot{\omega}_g = \frac{1}{J} (T_a - T_g - B \omega_g) \quad (9)$$

式中:  $B$  为摩擦系数;  $J$  为转动惯量;  $T_a$  为垂直轴风力机气动转矩。

将式(8)代入式(9)可得风力发电系统的机电耦合运动学模型为

$$\dot{\omega}_g = -\frac{B}{J} \omega_g - \frac{3n_p \psi_f}{2J} i_q + \frac{1}{J} T_a \quad (10)$$

由式(7)、式(10)可得基于 PMSG 的垂直轴直驱风力发电系统状态方程为

$$\begin{cases} \dot{i}_d = -\frac{R}{L_s} i_d + n_p \omega_g i_q + \frac{u_d}{L_s} \\ \dot{i}_q = -\frac{R}{L_s} i_q - n_p \omega_g i_d - n_p \omega_g \frac{\psi_f}{L_s} + \frac{u_q}{L_s} \\ \dot{\omega}_g = \frac{T_a}{J} - \frac{3n_p \psi_f}{2J} i_q - \frac{B}{J} \omega_g \end{cases} \quad (11)$$

## 3 气动转矩观测器设计

为了对风力发电系统机电耦合运动学模型式

(10)中的外部气动转矩  $T_a$  进行估计, 采用如下非线性气动转矩观测器形式

$$\begin{cases} \hat{T}_a = \vartheta + \eta \\ \dot{\vartheta} = -m \frac{1}{J} \vartheta + m \left( -\frac{1}{J} \eta + \frac{B}{J} \omega_g + \frac{3n_p \psi_f}{2J} i_q \right) \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $\hat{T}_a$  为气动转矩的观测值;  $\vartheta$  和  $\eta$  为中间变量;  $m$  为观测器增益。

定义气动转矩观测器的观测误差为

$$\tilde{T}_a = T_a - \hat{T}_a \quad (13)$$

显然, 相对于观测器毫秒级的动态特性, 秒级的风力机气动转矩  $T_a$  的变化是缓慢的, 即可认为

$$\dot{T}_a = 0 \quad (14)$$

则观测器误差的动态方程为

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{T}}_a &= \dot{T}_a - \dot{\hat{T}}_a = -\dot{\vartheta} - \dot{\eta} = \\ & m \frac{1}{J} \vartheta + m \left( \frac{1}{J} \eta - \frac{B}{J} \omega_g - \frac{3n_p \psi_f}{2J} i_q \right) - \dot{\eta} = \\ & m \frac{1}{J} \hat{T}_a + m \dot{\omega}_g - m \frac{1}{J} T_a - \dot{\eta} = \\ & -m \frac{1}{J} \tilde{T}_a + m \dot{\omega}_g - \dot{\eta} \end{aligned} \quad (15)$$

若令

$$\dot{\eta} = m \dot{\omega}_g \quad (16)$$

则有

$$\dot{\tilde{T}}_a = -m \frac{1}{J} \tilde{T}_a \quad (17)$$

由式(17)可见, 通过适当选择  $m > 0$ , 可使气动观测器的观测误差指数趋于零。

因此, 若选择  $m$  为大于零的常数, 可得到

$$\eta = m \omega_g \quad (18)$$

通过非线性气动转矩观测器式(12)估计外部气动转矩  $T_a$ , 将含有不可测量的非线性不确定系统式(11), 用非线性状态反馈化为“积分串联型”, 并在一定范围内具有良好的适应性和鲁棒性。把发电系统模型化为“积分器串联型”以后, 就能对其用“非线性状态误差反馈”, 设计出理想的控制器<sup>[18]</sup>。

## 4 MPPT 控制器设计

### 4.1 反演控制器设计

反演控制作为一种有效的非线性控制设计方法, 其设计过程是逐步选取虚拟状态和虚拟控制函数, 从原系统方程选取状态构造新的子系统, 然后构造 Lyapunov 函数, 逐步设计, 直到得到系统的实际控制使得整个系统稳定为止。

针对垂直轴永磁同步发电机系统进行反演控

制器设计, 其基本设计步骤为: ①选择一个系统的状态, 作为子系统, 构造该子系统的 Lyapunov 函数, 设计该函数的虚拟控制函数, 使该子系统能保持稳定。②根据①设计的虚拟控制函数, 设计误差变量, 由该误差变量以及前面的子系统成立一个新的子系统, 设计其 Lyapunov 函数, 再设定虚拟控制量, 使其能保持稳定。③如果还没有得到系统的实际控制函数, 则继续上面的设计。④如果已经得到了, 则采用设计出来的系统的实际控制器, 保证系统的稳定性。

下面对式(11)所描述的垂直轴永磁同步发电机系统进行反演控制器设计, 其主要步骤如下:

首先, 针对垂直轴永磁直驱风力发电机系统, 系统的控制目标是风力发电机最优转速跟踪, 则定义跟踪误差为

$$e = \omega_g^* - \omega_g \quad (19)$$

选择  $e$  为虚拟状态变量, 构成子系统。对式(19)两边求导, 得到系统方程为

$$\dot{e} = \dot{\omega}_g^* + \frac{1}{J} \left( B\omega_g - \hat{T}_a + \frac{3n_p\psi_f}{2} i_q \right) \quad (20)$$

式中,  $\hat{T}_a$  为观测器观测得到的风力机气动转矩。

为了使得转速跟踪误差趋于零, 假定  $i_q$  为虚拟控制函数, 对于子系统(20)构造如下 Lyapunov 函数

$$V_1 = \frac{1}{2} e^2 \quad (21)$$

对式(21)求导数可得

$$\dot{V}_1 = e\dot{e} = \frac{e}{J} \left( J\dot{\omega}_g^* + B\omega_g - \hat{T}_a + \frac{3n_p\psi_f}{2} i_q \right) \quad (22)$$

$$\frac{e}{J} \left( J\dot{\omega}_g^* + B\omega_g - \hat{T}_a + \frac{3n_p\psi_f}{2} i_q + k_1 J e \right) - k_1 e^2$$

式中,  $k_1 > 0$ 。

若令虚拟控制函数

$$i_q^* = \frac{2}{3n_p\psi_f} \left( \hat{T}_a - J\dot{\omega}_g^* - k_1 J e - B\omega_g \right) \quad (23)$$

则可保证  $\dot{V}_1 < 0$ 。

为了实现垂直轴永磁同步发电机和速度跟踪完全解耦, 选取直轴电流为零, 且选择交轴参考电流为

$$\begin{cases} i_d^* = 0 \\ i_q^* = \frac{2}{3n_p\psi_f} \left( \hat{T}_a - J\dot{\omega}_g^* - k_1 J e - B\omega_g \right) \end{cases} \quad (24)$$

为了实现两相旋转轴  $d$ 、 $q$  轴电流跟踪, 定义

电流跟踪误差

$$\begin{cases} e_d = i_d^* - i_d \\ e_q = i_q^* - i_q \end{cases} \quad (25)$$

以  $e$ 、 $e_d$  和  $e_q$  为状态变量构建新的子系统, 系统方程为

$$\dot{e}_d = \frac{R}{L_s} i_d - n_p \omega_g i_q - \frac{1}{L_s} u_d \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \dot{e}_q = & \frac{2}{3n_p\psi_f} \left[ \hat{T}_a - J\dot{\omega}_g^* + B \left( \frac{B}{J} \omega_g + \frac{3n_p\psi_f}{2J} i_q - \right. \right. \\ & \left. \left. \frac{\hat{T}_a}{J} \right) - k_1 \left( J\dot{\omega}_g^* + B\omega_g - \hat{T}_a + \frac{3n_p\psi_f i_q}{2} \right) \right] - \\ & \left( -\frac{R}{L_s} i_q - n_p \omega_g i_d - n_p \omega_g \frac{\psi_f}{L_s} + \frac{u_q}{L_s} \right) = \end{aligned} \quad (27)$$

$$\frac{2}{3n_p\psi_f} \left[ \hat{T}_a - J\dot{\omega}_g^* - k_1 J \dot{\omega}_g^* - \frac{B\hat{T}_a}{J} + k_1 \hat{T}_a + \right.$$

$$\left. (B - k_1 J) \left( \frac{3n_p\psi_f}{2J} i_q + \frac{B}{J} \omega_g \right) \right] +$$

$$\frac{R}{L_s} i_q + n_p \omega_g i_d + n_p \frac{\psi_f}{L_s} \omega_g - \frac{u_q}{L_s}$$

为了保证式(26)和式(27)子系统稳定, 构造如下 Lyapunov 函数:

$$V_2 = (e^2 + e_d^2 + e_q^2) / 2 \quad (28)$$

对式(28)求导, 并由式(23)可得:

$$\dot{V}_2 = -k_1 e^2 + e_d \dot{e}_d + e_q \dot{e}_q \quad (29)$$

若令

$$\begin{cases} \dot{e}_d = -k_2 e_d \\ \dot{e}_q = -k_3 e_q \end{cases} \quad (30)$$

式中,  $k_2 > 0$ ,  $k_3 > 0$ , 则

$$\dot{V}_2 = -k_1 e^2 - k_2 e_d^2 - k_3 e_q^2 \quad (31)$$

可保证  $\dot{V}_2 < 0$ 。结合式(26)、(27)可推出实际控制函数为

$$u_d = R i_d - n_p L_s \omega_g i_q + k_2 L_s e_d \quad (32)$$

$$\begin{aligned} u_q = & \frac{2L_s}{3n_p\psi_f} \left[ \hat{T}_a - J\dot{\omega}_g^* - k_1 J \dot{\omega}_g^* + k_1 \hat{T}_a - \right. \\ & \left. \frac{B\hat{T}_a}{J} + (B - k_1 J) \left( \frac{3n_p\psi_f}{2J} i_q + \frac{B}{J} \omega_g \right) \right] + \\ & R i_q + n_p \omega_g L_s i_d + n_p \psi_f \omega_g + k_3 L_s e_q \end{aligned} \quad (33)$$

#### 4.2 系统稳定性证明

定理: 对于垂直轴直驱式永磁同步风力发电机

系统, 按式(32)和式(33)进行 PMSG 控制能实现发电转速的全局渐进跟踪, 形成风力发电系统的最大功率跟踪, 同时能达到风力发电系统的全局一致稳定。

证明: 1)由式(30)可知,

$$\dot{V}_2 \leq -k_1 e^2$$

因此, 可以推导出

$$V_2(0) - V_2(\infty) \geq \int_0^{\infty} k_1 e^2 dt \quad (34)$$

由于  $V_2$  有界, 因此根据 Barbalat 推论, 可得  $\lim_{t \rightarrow \infty} e = 0$ 。

可以证明得到, 转速跟踪误差渐进趋于零, 系统能够很好地实现转速跟踪, 满足最大功率跟踪要求。

2) 同理, 可以推导出  $d$ 、 $q$  轴电流跟踪误差  $\lim_{t \rightarrow \infty} e_d = 0$ ,  $\lim_{t \rightarrow \infty} e_q = 0$ 。

对于垂直轴永磁同步风力发电机控制系统, 控制 PMSG 的电流环按式(24)进行控制, 控制器能够实现风力发电机转速的渐进跟踪, 实现最大功率跟踪控制, 而且通过式(12)建立的非线性气动转矩观测器模型能够很好地抑制风力机转矩扰动对控制系统的影响, 可以在全局稳定的情况下实现快速的最大功率跟踪控制。

## 5 仿真结果与分析

应用 Matlab/Simulink 搭建垂直轴永磁直驱风力发电系统的仿真模型与控制系统, 其控制原理框图如图 3 所示。

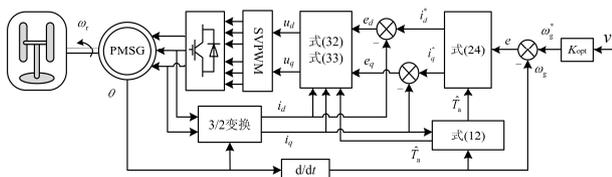


图 3 垂直轴永磁直驱风力发电系统反演控制图

Fig. 3 Back-stepping control structure for wind power generation system

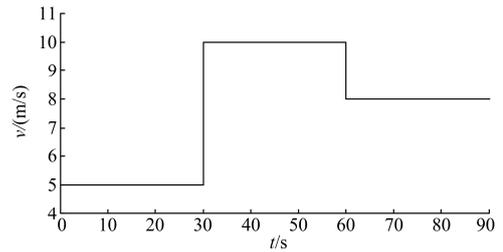
仿真系统参数设置包括垂直轴风力机参数: 风力机半径为 1.62 m, 扫风面积为 8.24 m<sup>2</sup>; 空气密度为 1.25 kg/m<sup>3</sup>; 额定风速为 12 m/s; 最大风能利用系数为 0.48; 最佳叶尖速比为 8.1; 转动惯量为 432 kg·m<sup>2</sup>; 摩擦系数为 0.2 Nm·s/rad。PMSG 参数: 额定功率为 10 kW; 额定转速为 500 rpm; 极对数为 10; 定子电感为 8.5 mH; 定子电阻为 2.87 Ω; 永磁转子的磁链为 0.192 Wb。非线性气动转矩观测器以及反演控制参数常量设置:  $m=600$ ;  $k_1=0.2$ ,  $k_2=0.5$ ,

$k_3=40$ 。

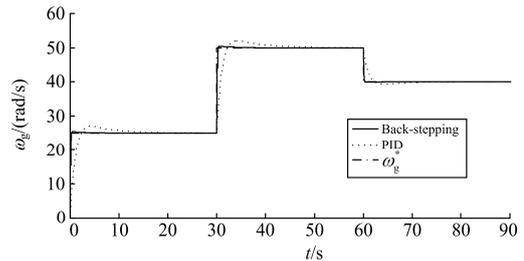
仿真中, 风速模型采用低风速条件下阶梯突变形式和额定风速下连续变化形式两种情况, 以验证分析反演控制方法的控制性能。

为了进行对比, 设计了 PMSG 发电转速跟踪  $dq$  解耦的 PID 控制器, PID 参数: 发电机转速外环  $K_{p\omega}=200$ ,  $K_{i\omega}=0.1$ ,  $K_{d\omega}=0.2$ ; 电流内环  $d$  轴  $K_{pd}=200$ ,  $K_{id}=10$ ;  $q$  轴  $K_{pq}=200$ ,  $K_{iq}=10$ 。

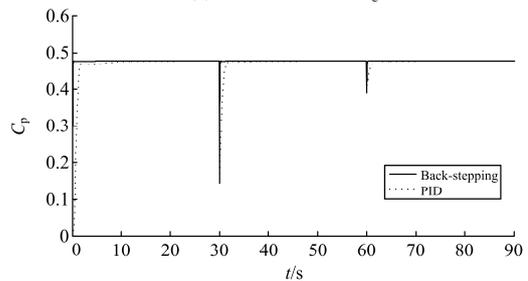
图 4 所示为在设定外部阶梯突变风速信号:  $v=5\epsilon(t)+5\epsilon(t-30)-2\epsilon(t-60)$ 条件下, 反演控制和传统 PI 控制跟踪最优发电转速  $\omega_g^*$  时的风力机发电转速  $\omega_g$ 、风能利用系数  $C_p$ 、叶尖速比  $\lambda$  响应曲线图。



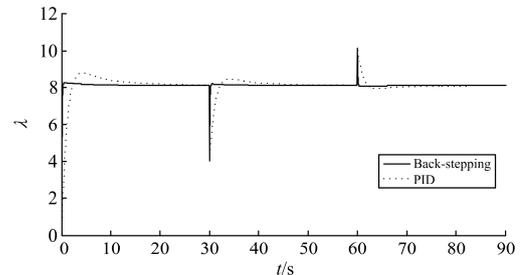
(a) 阶跃突变风速曲线



(b) 风力机发电转速  $\omega_g$  响应曲线



(c) 风力机风能系数  $C_p$  响应曲线



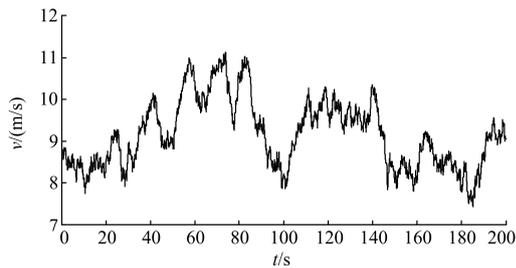
(d) 风力机叶尖速比  $\lambda$  响应曲线

图 4 阶跃突变风速情况的响应曲线

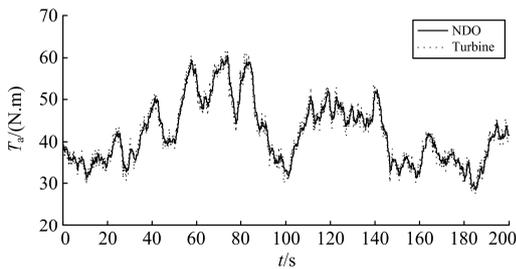
Fig. 4 MPPT response curves under step wind speed condition

由图4(b)可见,根据图4(a)所设定的阶梯突变风速信号,两种控制方法均能驱使发电机的实际发电转速 $\omega_g$ 较快地跟踪垂直轴风力机的最优发电转速 $\omega_g^* = \lambda_{opt} v / r = 25\varepsilon(t) + 25\varepsilon(t-30) - 10\varepsilon(t-60)$ 。但在风速阶梯变化瞬间,反演控制较传统PI控制在跟踪速度和抑制超调方面具有更好的调节表现。进一步,由图4(c)和4(d)可知,当风速稳定时,风能利用系数 $C_p$ 保持在最大值0.48,叶尖速比保持在最佳值8.1,表明系统实现了最大风能的跟踪。

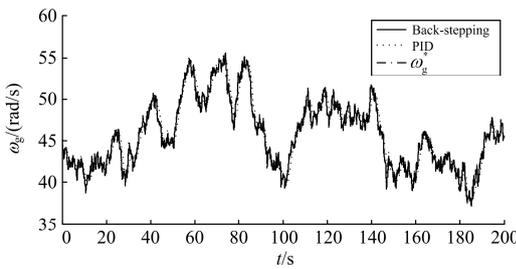
图5所示为设定风速在7.2~11.2 m/s范围连续渐变情况下,反演控制和传统PI控制跟踪最优发电转速 $\omega_g^*$ 时的风力机发电转速 $\omega_g$ 、非线性气动转矩观测值 $T_a$ 、风能利用系数 $C_p$ 、叶尖速比 $\lambda$ 响应曲线图。



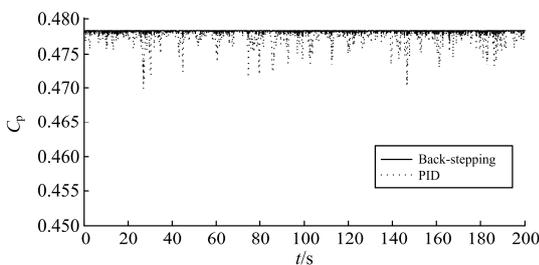
(a) 连续变化风速曲线



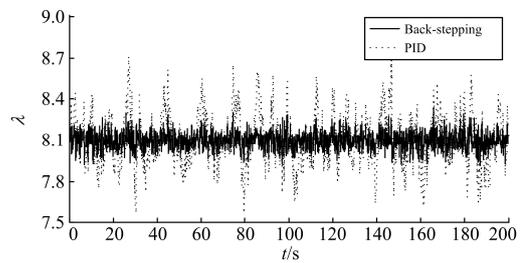
(b) 非线性气动转矩观测曲线



(c) 风力机发电转速 $\omega_g$ 响应曲线



(d) 风力机风能系数 $C_p$ 响应曲线



(e) 风力机叶尖速比 $\lambda$ 响应曲线

图5 连续变化风速响应曲线

Fig. 5 MPPT response curves under natural wind speed condition

由图5可见,非线性气动转矩观测器能够实时有效地估计出风力机的实际气动机械转矩,以实现反演控制策略的解算。在风速连续变化过程中,两种控制策略均使得风力机发电转速 $\omega_g$ 始终跟踪最优转速 $\omega_g^*$ 的变化,叶尖速比在7.5~8.8波动,风能利用系数在0.48~0.47波动,达到了较好的最大功率跟踪效果。但从两种控制策略响应曲线对比可以看出,采用反演控制方法比传统PID控制响应速度更快,抑制风速波动能力更强,得到的控制曲线更平稳,更好地达到最大功率跟踪控制的要求。

## 6 总结

本文设计了基于非线性转矩观测器的垂直轴永磁直驱风力发电系统的反演控制。控制器具有反演控制的许多优点,如抑制风速波动的鲁棒性强、响应速度快等。非线性干扰观测器用来估计风力机系统的气动机械转矩,实现了对大范围风速变化的良好自适应性。与传统PID控制策略的仿真对比结果,验证了设计的最大功率跟踪反演控制器的正确有效性和良好的控制性能。

## 参考文献

[1] 管维亚, 吴峰, 鞠平. 直驱永磁风力发电系统仿真与优化控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 54-60. GUAN Weiya, WU Feng, JU Ping. Simulation and optimized control of direct-drive permanent magnet wind power system[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 54-60.

[2] 王丹, 刘崇茹, 李庚银. 永磁直驱风电机组故障穿越优化控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 83-89. WANG Dan, LIU Chongru, LI Gengyin. Research on the fault ride-through optimal control strategy of PMSG-based wind turbine[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 83-89.

[3] 胡维昊, 王跃, 李明炬, 等. 基于MRAS的多相永磁直驱型风力发电系统无速度传感器控制策略研究[J].

- 电力系统保护与控制, 2014, 42(23): 119-124.
- HU Weihao, WANG Yue, LI Mingxuan, et al. Research on sensorless control strategy of direct drive multi-phase PMSG wind power generation system based on MRAS[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(23): 119-124.
- [4] 杨勇, 朱彬彬, 陶雪慧, 等. 混合励磁风力发电系统灵活功率控制[J]. 电工技术学报, 2014, 29(1): 246-524.
- YANG Yong, ZHU Binbin, TAO Xuehui, et al. A flexible power control based on hybrid excitation synchronous generator in wind power generation systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(1): 246-524.
- [5] 陈鉴庆, 邹旭东, 梁宗泽, 等. 基于反向电流跟踪的双馈风机低电压穿越控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 221-229.
- CHEN Jianqing, ZOU Xudong, LIANG Zongze, et al. An improved control strategy of doubly-fed wind turbine under voltage dips based on reverse current tracking[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(2): 221-229.
- [6] 张明锐, 梅杰, 李元浩, 等. 基于切换仿射系统的风电电压稳定控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 171-179.
- ZHANG Mingrui, MEI Jie, LI Yuanhao, et al. The voltage stability control in the wind power system based on the switched affine system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 171-179.
- [7] 戴庚, 徐璋, 钟英杰. 垂直轴风力机研究进展[J]. 流体机械, 2010, 38(10): 39-43.
- DAI Geng, XU Zhang, ZHONG Yingjie. Recent research progress in the vertical axis wind turbine[J]. Fluid Machinery, 2010, 38(10): 39-43.
- [8] 茅靖峰, 吴爱华, 吴国庆, 等. 垂直轴永磁直驱风力发电系统全风速功率控制[J]. 可再生能源, 2014, 32(9): 1339-1345.
- MAO Jingfeng, WU Aihua, WU Guoqing, et al. Study on power control at all wind speed range for VAWT-based direct-driven wind energy conversion systems[J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(9): 1339-1345.
- [9] 胡书举, 赵栋利, 郭金东. 永磁直驱风电系统 PMSG 的内模控制策略研究[J]. 可再生能源, 2009, 27(3): 21-26.
- HU Shuju, ZHAO Dongli, GUO Jindong. Study on the internal model control tactic of PMSG for direct-driven wind power system[J]. Renewable Energy Resources, 2009, 27(3): 21-26.
- [10] 李志民, 孙其振, 孙勇. PMSG 风力发电系统最大风能追踪的分数阶控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(6): 67-72.
- LI Zhimin, SUN Qizheng, SUN Yong. Maximum energy tracking of PMSG wind power generation power system by fractional-order control[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2012, 24(6): 67-72.
- [11] 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, 25(4): 525-529.
- YANG Jinming, WU Jie, YANG Junhua. Maximum wind energy capture control with auto disturbance rejection controller[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2004, 25(4): 525-529.
- [12] 茅靖峰, 吴爱华, 吴国庆, 等. 基于扩张状态观测的永磁直驱风力发电系统MPPT自适应滑模控制[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 58-65.
- MAO Jingfeng, WU Aihua, WU Guoqing, et al. Adaptive sliding mode MPPT control for PMSG-based wind energy conversion systems based on extended state observer[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 58-65.
- [13] 薛树功, 瞿成明, 魏立胜. 永磁同步电机自抗扰反步控制[J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(3): 209-212.
- XUE Shugong, QU Chengming, WEI Lisheng. Active disturbance rejection control and backstepping control for PMSM[J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(3): 209-212.
- [14] 王礼鹏, 张化光, 刘秀翀. 基于扩张状态观测器的SPMSM 调速系统的滑模变结构反步控制[J]. 控制与决策, 2011, 26(4): 553-558.
- WANG Lipeng, ZHANG Huaguang, LIU Xiuchong. Backstepping controller based on sliding mode variable structure for speed control of SPMSM with extended state observer[J]. Control and Decision, 2011, 26(4): 553-558.
- [15] TING Chensheng, CHANG Yongnong. Observer-based back stepping control of linear stepping motor[J]. Control Engineering Practice, 2013, 21(4): 930-939.
- [16] JLASSI I, ESTIMA J O, EL KHIL S K, et al. Multiple open-circuit faults diagnosis in back-to-back converters of PMSG drives for wind turbine systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2689-2702.
- [17] 陈晓红, 王一飞, 尚鹏. 永磁同步风力发电机转速浆距综合功率控制策略研究[J]. 可再生能源, 2014, 32(9): 1306-1311.
- CHEN Xiaohong, WANG Yifei, SHANG Peng. Study on an integrated power control strategy for permanent magnet synchronous generator[J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(9): 1306-1311.
- [18] CHANG J L. Dynamic output integral sliding-mode control with disturbance attenuation[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2009, 54(11): 2653-2658.

收稿日期: 2016-01-19; 修回日期: 2016-03-20

作者简介:

吴爱华(1978-), 女, 博士生, 副教授, 研究方向为风力发电技术; E-mail: wahmx@163.com

赵不贻(1957-), 男, 硕士, 教授, 博导, 研究方向为混杂自控 Petri 网系统, 风力发电技术, 智能农业; E-mail: zhaobuhui@ujes.edu.cn

茅靖峰(1976-), 男, 博士, 教授, 研究方向为风力发电技术, 电机及其控制。E-mail: mao.jf@163.com

(编辑 葛艳娜)