

风力发电系统的Hamilton建模及其无速度传感器控制

任丽娜, 刘福才, 焦晓红

(燕山大学 工业计算机控制工程河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要: 本文研究了基于端口受控哈密顿模型(PCH)的永磁同步风力发电系统的无速度传感器控制问题. 首先根据风力发电系统本身的物理结构特性, 建立其端口受控哈密顿结构模型, 然后基于此模型设计了系统的全维状态观测器, 得到系统的速度估计, 从而实现了系统无速度传感器控制. 这种控制器不仅简单易实现而且反映了系统内部结构以及动态特性的信息. 同时, 在控制器设计中还考虑了系统存在参数不确定情况下的自适应控制问题以及在控制器设计中用状态量的估值直接替代不可测状态量时存在的误差问题. 最后仿真实验证明了控制器的有效性.

关键词: 端口受控哈密顿模型; 永磁同步风力发电系统; 全维状态观测器; 无速度传感器控制; 自适应控制

中图分类号: TM614 **文献标识码:** A

Hamiltonian modeling and speed sensorless control for wind turbine systems

Ren Li-na, Liu Fu-cai, Jiao Xiao-hong

(Key Lab of Industrial Computer Control Engineering of Hebei Province, Yanshan University,
Qinhuangdao Hebei 066004, China)

Abstract: This paper presents a speed sensorless control for permanent magnet wind turbine generator with port-controlled Hamiltonian (PCH) model. Firstly, the PCH model is established by taking full advantage of the physics structure of wind turbine system. Then the full-order observer to estimate rotor speed is proposed based the PCH model. This controller is not only simple but also reflecting interior structure and dynamic characteristic of system. In addition, an adaptive controller is investigated under the uncertain parameters and the error is considered when immeasurable states is replaced by estimated states directly in the controller. The proposed controller is proved valid by the simulation illustration.

Key words: port-controlled Hamiltonian (PCH) model; permanent magnet wind turbine systems; full-order states observer; speed sensorless control; adaptive control

1 引言(Introduction)

随着世界各国对风电产业的大力支持和研究, 风力发电技术得到了迅猛发展, 装机容量大大增加. 基于永磁电机具有机械损耗小、运行效率高、维护成本低、无增速齿轮箱等优点, 很好地与风力机的特点相结合, 成为继双馈感应风电机组之后的又一重要机型而备受关注, 并逐渐开始投入使用. 在风力发电系统中, 变速运行方式是最大风能捕获的重要方式, 即根据风速的变化调整转速的变化, 达到最大功率跟踪, 因此转子转速是风力发电系统中的一个重要变量. 但是由于速度传感器易受环境影响, 在恶劣环境中性能不稳定, 并且价格昂贵, 维修困难. 为了解决这一问题, 出现了大量的无速度传感器控制方案^[1]. 文献[2, 3]是基于电机理想模型的开环计算方法, 这类方法计算过程简单, 但它是一种开环计算的方法, 无法保证电机在受到噪声干扰或当参数变化时仍能得到正确的结果; 文献[4~9]是基于各种观测

器模型的闭环算法: 有扩展卡尔曼滤波器法^[4]、滑模观测器^[5~7]、模型参考自适应算法^[8] 以及其它自适应算法^[9]等, 使得无速度传感器控制在速度观测精度和系统的稳定性上都有了很大的提高. 但是都存在一定的问题: 扩展卡尔曼滤波器方法是建立在对误差和测量噪声的统计特性已知的基础上的, 而获取这些参数比较困难, 而且算法复杂, 计算量大; 模型参考自适应算法适合低速性能要求不高的系统; 滑模控制存在抖动现象, 并且在设计过程中控制器和观测器的设计是分开进行的, 没有考虑控制器中的不可测状态量直接用观测估值替换后存在的误差问题等等. 文献[10]是以高频注入法为典型代表的基于电机非理想特性的算法, 但高频信号会产生额外的电磁转矩, 对电机运行有一定影响, 并且检测的磁场角度受负载影响, 需要对检测角度进行补偿降低了系统的鲁棒性.

比较各种方案的优缺点, 本文提出了一种基

于Hamilton模型的状态观测器实现风力发电系统的无速度传感器控制策略. 因为哈密顿系统可以明显地反映系统的物理结构特性, 使得在控制器的设计中能够充分利用系统的物理结构, 无需补偿不影响系统稳定性的“无功功率”部分, 减少了控制量, 并且使控制器中的调整参数具有明显的物理意义. 而且基于哈密顿系统的特殊结构, 可以把成熟的线性系统状态观测器设计方法用于设计非线性系统的状态观测器. 因此本文设计了基于Hamilton模型的全维状态观测器, 实现了风力发电系统的无速度传感器控制, 同时本文考虑了系统存在参数不确定时的自适应控制问题以及在控制器设计中用状态量的估值直接替代不可测状态量时存在的误差问题. 另外, 还对所提出的控制器设计方法进行了仿真研究, 以证明所设计控制器的有效性.

2 风力发电系统模型及控制问题形成(Wind turbine system model and control problem formulation)

2.1 风力发电系统模型(Wind turbine system model)

风力机模型

风力机的动态方程可以描述为:

$$J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + K\theta = T_m - T_e \quad (1)$$

$$T_m = \frac{P_M}{\omega} \quad (2)$$

$$P_M(v) = \frac{1}{2} \rho \pi r^2 C_p(\lambda, \beta) v^3 \quad (3)$$

其中, θ 表示风力系统的转角, ω 表示风机的转子转速, T_m 表示风对风轮机产生的驱动转矩, T_e 为发电机输出的电磁转矩, J 为风力系统的转动惯性系数, P_M 是风在风轮机上产生的机械功率, 也即表示风轮机所捕获的风能. ρ 空气密度, r 风力机转子半径, v 为风速, $C_p(\lambda, \beta)$ 表示功率系数, 由风力机的类型和运行条件决定, β 为桨距角, λ 是叶尖速比. B, K 分别代表风力发电系统摩擦系数和扭矩系数.

发电机模型

永磁同步电机在 d, q 两相旋转坐标系下的动态描述为:

$$\begin{cases} u_d = -R_a i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q \\ u_q = -R_a i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_e \psi_d \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \dot{\psi}_d = -L_d i_d + \psi_f \\ \dot{\psi}_q = -L_q i_q \end{cases} \quad (5)$$

式中, u_d, u_q 分别为发电机 d, q 轴的电压分量, i_d, i_q 为

发电机 d, q 轴的电流分量, ψ_d, ψ_q 为发电机 d, q 轴的磁链分量, L_d, L_q 为 d, q 轴的电感, R_a 为定子电阻, ω_e 为发电机电角频率, 且 $\omega_e = n_p \omega$, ψ_f 为永磁体的磁链, n_p 是电机极对数. 这里假设 $L_q = L_d = L$, 则发电机转矩方程为

$$T_e = n_p [(L_d - L_q) i_d i_q + \psi_f i_q] = n_p \psi_f i_q \quad (6)$$

发电机的功率方程为:

$$\begin{cases} P_s = u_d i_d + u_q i_q \\ Q_s = u_q i_d - u_d i_q \end{cases} \quad (7)$$

从而根据风力机模型和永磁电机模型可以得到永磁同步风力发电系统整体动态方程为:

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = T_m - B\omega - K\theta - T_e \\ L \frac{di_d}{dt} = -R_a i_d + L n_p \omega i_q - u_d \\ L \frac{di_q}{dt} = -R_a i_q - L n_p \omega i_d + n_p \omega \psi_f - u_q \end{cases} \quad (8)$$

2.2 风力发电系统的PCH模型(PCH model for wind turbine system)

由于风力发电系统摩擦系数和扭矩系数值很小, 本文不予考虑. 考虑到实际系统中一些参数的不确定性, 系统可描述为如下形式:

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = T_m - n_p \psi_f i_q \\ L \frac{di_d}{dt} = -(R_a + \Delta R_a) i_d + L n_p \omega i_q - u_d \\ L \frac{di_q}{dt} = -(R_a + \Delta R_a) i_q - L n_p \omega i_d + n_p \omega \psi_f - u_q \end{cases} \quad (9)$$

其中, 可令 $\Delta R_a \rightarrow p$, 表示电阻存在的摄动, 其值是未知的.

把风力发电系统(9)描述为PCH模型. 首先定义系统的状态向量和输入向量分别为:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J\omega \\ Li_d \\ Li_q \end{bmatrix} = \mathbf{D} \begin{bmatrix} \omega \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{D} = \text{diag}[J, L, L], \mathbf{u} = [T_m - u_d - u_q]^T$$

根据系统物理结构, 选取系统的Hamilton函数为电能和机械动能总和, 即

$$H(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \mathbf{D}^{-1} \mathbf{x} = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{J} x_1^2 + \frac{1}{L} x_2^2 + \frac{1}{L} x_3^2 \right] \quad (10)$$

则系统(9)可写成PCH模型为:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{J}(\mathbf{x}, p) - \mathbf{R}(\mathbf{x}, p) \frac{\partial H(\mathbf{x}, p)}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{g}(\mathbf{x}) \mathbf{u}(\mathbf{x}, p) \\ &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & -n_p \psi_f \\ 0 & -(R_a + p) & L n_p \omega \\ n_p \psi_f & -L n_p \omega & -(R_a + p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ i_d \\ i_q \end{bmatrix} + g(\mathbf{x}) \begin{bmatrix} T_m \\ -u_d \\ -u_q \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{g}(\mathbf{x}) \frac{\partial H(\mathbf{x}, p)}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \omega & i_d & i_q \end{bmatrix}^T \quad (11)$$

\mathbf{y} 表示系统的输出, 系统模型相应的系数矩阵为

$$\mathbf{J}(\mathbf{x}, p) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -n_p \psi_f \\ 0 & 0 & Ln_p \omega \\ n_p \psi_f & -Ln_p \omega & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}(\mathbf{x}, p) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_a + p & 0 \\ 0 & 0 & R_a + p \end{bmatrix}, \mathbf{g}(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

2.3 控制问题形成(Control problem formulation)

实际系统中, 由于受风轮转速、电气装置和元件所承受的最大功率的限制, 本文采用定桨距变速控制方案, 利用文献[11]给出的三种状态区域运行策略, 在这三个区域里保证风力发电机最大程度的获取风能及安全可靠运行, 由此可以得到一定变化风速下期望的转速和扭矩运行曲线, 即 ω^* , T_m^* .

另外, 永磁同步风力发电机采用零 d 轴电流矢量控制策略, 即 $i_d = 0$, 则电磁转矩与定子电流呈线性关系, 使电机的转矩控制环节得到简化.

通过以上分析, 风力发电系统期望的运行状态量为 $\mathbf{x}^* = \begin{bmatrix} J\omega^* & 0 & Li_q^* \end{bmatrix}^T$, 即系统平衡点. 其中 i_q^* 可由式(9)得到, 即 $i_q^* = \frac{T_m^* - J\dot{\omega}^*}{n_p \psi_f}$.

同时, 本文考虑了风力机转子速度 ω 不可测以及电机电阻存在参数摄动问题, 因而, 风力发电系统(11)的控制问题可归结为设计一种自适应状态观测器, 实现系统的状态估计, 能够解决系统存在参数摄动的问题, 同时使得相应的闭环系统满足: 系统是Lyapunov稳定的, 并且 $\|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}\| \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$.

3 系统控制器设计(Controller design)

能量函数整形

根据PCH设计要求[12, 13], 系统的能量函数需要在期望的平衡点处为极小值, 进而可进行控制器设计. 若不为极小值, 则需要对系统能量函数进行整形. 经验证, 系统(11)的能量函数(10)在期望的平衡点 \mathbf{x}^* 处不为极小值, 因而需要对系统(11)的能量函数进行整形. 首先选取期望的哈密顿函数为

$$H_d(\mathbf{x}, p) = \frac{1}{2}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*)^T \mathbf{D}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) \quad (12)$$

此时有

$$\frac{\partial H_d(\mathbf{x}, p)}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{D}^{-1}(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*), \quad \frac{\partial^2 H_d(\mathbf{x}, p)}{\partial \mathbf{x}^2} = \mathbf{D}^{-1} \quad (13)$$

当 $\mathbf{x} = \mathbf{x}^*$ 时, $\frac{\partial H_d(\mathbf{x}, p)}{\partial \mathbf{x}} = 0$ 并且 H_d 的海森矩阵 $\frac{\partial^2 H_d(\mathbf{x}, p)}{\partial \mathbf{x}^2} > 0$, 由此可知, H_d 满足设计要求.

然后确定期望的互联矩阵 $\mathbf{J}_d(\mathbf{x})$ 和阻尼矩阵 $\mathbf{R}_d(\mathbf{x})$. 由系统方程(11)可知, 在第二个方程中出现 x_1 和 x_2 的耦合项, 在第三个方程中出现 x_1 和 x_3 的

耦合项, 因此, 为了通过能量函数的整形来抵消该耦合项的影响, 同时, 为了增加永磁电机阻尼, 可以选择

$$\mathbf{J}_c(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 & -J_{12} & J_{13} \\ J_{12} & 0 & -J_{23} \\ -J_{13} & J_{23} & 0 \end{bmatrix}, \mathbf{R}_c(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ r_{21} & r_2 & 0 \\ 0 & 0 & r_3 \end{bmatrix}$$

这里, J_{11} 、 J_{12} 、 J_{13} 、 J_{23} 与 r_{21} 、 r_2 、 r_3 分别为待定的互联和阻尼系数. $\mathbf{J}_c(\mathbf{x})$ 和 $\mathbf{R}_c(\mathbf{x})$ 分别为满足如下等式的函数阵:

$$\mathbf{J}_d(\mathbf{x}) = \mathbf{J}(\mathbf{x}) + \mathbf{J}_c(\mathbf{x}) = -\mathbf{J}_d^T(\mathbf{x})$$

$$\mathbf{R}_d(\mathbf{x}) = \mathbf{R}(\mathbf{x}) + \mathbf{R}_c(\mathbf{x}) \geq 0$$

最后, 寻找适当的控制器 $\alpha(\mathbf{x}, p)$, 使得下式定义的线性偏微分方程成立

$$\begin{aligned} & -[\mathbf{J}_d(\mathbf{x}, p) - \mathbf{R}_d(\mathbf{x}, p)] \mathbf{D}^{-1} \mathbf{x}^* \\ & = -[\mathbf{J}_c(\mathbf{x}, p) - \mathbf{R}_c(\mathbf{x}, p)] \mathbf{D}^{-1} \mathbf{x} + \mathbf{g}(\mathbf{x}) \alpha(\mathbf{x}, p) \end{aligned} \quad (14)$$

将相关参数代入上式可以得到

$$T_m = (n_p \psi_f - J_{13}) \frac{T_m^* - J\dot{\omega}^*}{n_p \psi_f} - J_{12} i_d + J_{13} i_q \quad (15)$$

对式(15)进行分析, 根据风力发电系统最佳运行原理, 希望风力机的输出转矩为 T_m^* , 转子转速为 ω^* , 以及输入到永磁电机的转矩为 $T_e^* = T_m^* - J\dot{\omega}^*$. 因而可以选择 $J_{13} = J_{12} = 0$, $J_{23} = k$. 此时由式(15)可得到系统(11)的输入转矩为 $T_m = T_m^* - J\dot{\omega}^*$. 根据转矩传递关系 $J\dot{\omega} = T_m - T_e$ 可知, 系统(11)可以在控制电压 u_d, u_q 以及配置矩阵 $\mathbf{J}_c(\mathbf{x})$ 下, 可以实现风力机运行在最大转矩 T_m^* , 以及输入到永磁电机的转矩为 T_e^* . 由式(14)可推得含有未知参数的预置控制律为:

$$\alpha(\mathbf{x}, p) = \begin{bmatrix} T_m^* - \\ -(Ln_p \omega - J_{23}) \frac{T_m^*}{n_p \psi_f} - r_2 i_d - J_{23} i_q + \\ -n_p \psi_f \omega^* + (R_a + r_3) \frac{T_m^*}{n_p \psi_f} - r_3 i_q + \\ J\dot{\omega}^* \\ r_{21}(\omega - \omega^*) \\ J_{23} i_d + p \frac{T_m^*}{n_p \psi_f} \end{bmatrix} \quad (16)$$

其中, k 是可以调节的自由参数, 根据PCH系统的反馈镇定原理, 可知 k 的选择并不影响系统的稳定性. 选取 $r_{21} = Ln_p i_q^*$, r_2 和 r_3 为任意正数.

此时, 系统(11)在状态反馈 $\mathbf{u} = \alpha(\mathbf{x}, p) + \mathbf{v}$ 作用下, 可整形为:

$$\dot{\mathbf{x}} = [\mathbf{J}_d(\mathbf{x}, p) - \mathbf{R}_d(\mathbf{x}, p)] \frac{\partial H_d(\mathbf{x}, p)}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{g}(\mathbf{x}) \mathbf{v} \quad (17)$$

自适应状态观测器设计

针对整形后的系统(17)进行控制器设计, 以此实现无速度传感器控制以及未知参数估计, 由此可得如下结论:

定理 1 若系统(17)满足以下假设条件:

S1 $\nabla H_d(\mathbf{x}, 0) \neq 0 (\mathbf{x} \neq \mathbf{x}^*)$ 且系统关于虚拟输出 $\mathbf{y}_2 = \mathbf{R}_d^{\frac{1}{2}}(\mathbf{x}, p) \nabla H(\mathbf{x}, 0)$ 和输入 \mathbf{v} 零状态可检测, 即由 $\mathbf{y}_2 \equiv 0, \mathbf{v} \equiv 0 \Rightarrow \mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x}^*$. 这里, 定义

$$[\mathbf{R}_d^{\frac{1}{2}}(\mathbf{x}, p)]^2 = \mathbf{R}_d(\mathbf{x}, p), \nabla H_d(\mathbf{x}, 0) = \frac{\partial H_d(\mathbf{x}, 0)}{\partial \mathbf{x}}$$

S2 存在非零矩阵 $\mathbf{L}(\mathbf{x})$ 和 $\mathbf{L}_1(\mathbf{x})$ 使得

$$\mathbf{W}(\mathbf{x}) = \mathbf{R}_d(\mathbf{x}, 0) + [\mathbf{g}_1(\mathbf{x})\mathbf{L}^T(\mathbf{x}) + \mathbf{L}(\mathbf{x})\mathbf{g}_1^T(\mathbf{x})] \geq 0 \quad (18)$$

$\mathbf{L}^T(\mathbf{x}) = \mathbf{L}_1^T(\mathbf{x})\mathbf{W}(\mathbf{x})$, 并且如下系统

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = [\mathbf{J}_d(\mathbf{x}, 0) - \mathbf{W}(\mathbf{x})]\nabla H_d(\mathbf{x}, 0) \quad (19)$$

关于 $\mathbf{y}_3 = \mathbf{W}^{\frac{1}{2}}(\mathbf{x})\nabla H_d(\mathbf{x}, 0)$ 零状态可检测.

S3 存在函数矩阵 $\Psi(\mathbf{x})$, 使如下匹配条件成立:

$$[\mathbf{J}_d(\mathbf{x}, p) - \mathbf{R}_d(\mathbf{x}, p)]\Delta_h(\mathbf{x}, p) - \Delta_\alpha(\mathbf{x}, p) = \mathbf{g}_1(\mathbf{x})\Psi^T(\mathbf{x})\theta \quad (20)$$

其中

$$\Delta_h(\mathbf{x}, p) = \frac{\partial H_d(\mathbf{x}, p)}{\partial \mathbf{x}} - \frac{\partial H_d(\mathbf{x}, 0)}{\partial \mathbf{x}} = 0$$

$$\Delta_\alpha(\mathbf{x}, p) = \alpha(\mathbf{x}, p) - \alpha(\mathbf{x}) = [0 \quad 0 \quad p i_q^*]^T$$

那么, 使闭环系统稳定且满足性能指标的自适应控制器为式(21), 并且式(22)是系统(17)的一个自适应观测器.

$$\mathbf{v} = -\mathbf{g}_1(\hat{\mathbf{x}})\mathbf{L}^T(\hat{\mathbf{x}})\frac{\partial H_d(\hat{\mathbf{x}}, 0)}{\partial \hat{\mathbf{x}}} - \mathbf{g}_1(\hat{\mathbf{x}})\Psi^T\hat{\theta} \quad (21)$$

$$\begin{cases} \dot{\hat{\mathbf{x}}} = [\mathbf{J}_d(\hat{\mathbf{x}}, 0) - \mathbf{R}_d(\hat{\mathbf{x}}, 0)]\frac{\partial H_d(\hat{\mathbf{x}}, 0)}{\partial \hat{\mathbf{x}}} + \mathbf{g}_1(\hat{\mathbf{x}})\Psi^T\hat{\theta} + \\ \quad \mathbf{L}(\hat{\mathbf{x}})[\mathbf{y}_1 - \mathbf{g}_1^T(\hat{\mathbf{x}})\frac{\partial H_d(\hat{\mathbf{x}}, 0)}{\partial \hat{\mathbf{x}}}] + \mathbf{g}(\hat{\mathbf{x}})\mathbf{v} \\ \dot{\hat{\theta}} = \Gamma\Psi\mathbf{y}_1 \end{cases} \quad (22)$$

其中, \mathbf{y}_1 为系统输出. $\hat{\theta}$ 表示对参数 θ 的估计; Γ 为参数调整增益.

证明: 选取函数矩阵 $\Psi = [0 \quad i_q^*]$, 同时令 $\theta = -p$, 则系统(17)满足式(20)匹配条件, 系统可表示为:

$$\dot{\hat{\mathbf{x}}} = [\mathbf{J}_d(\mathbf{x}, p) - \mathbf{R}_d(\mathbf{x}, p)]\frac{\partial H_d(\mathbf{x}, 0)}{\partial \hat{\mathbf{x}}} + \mathbf{g}_1(\mathbf{x})\Psi^T\theta + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{v} \quad (23)$$

此时转速 ω 不可测, d, q 轴的电流可以通过功率关系式(7)得到, 由此定义系统输出为:

$$\mathbf{y}_1 = \mathbf{g}_1^T(\mathbf{x})\frac{\partial H_d(\mathbf{x}, 0)}{\partial \mathbf{x}} = \begin{bmatrix} i_d & i_q - \frac{T_m^*}{n_p\psi_f} \end{bmatrix}^T \quad (24)$$

这里 $\mathbf{g}_1^T(\mathbf{x}) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

在对观测器的设计中, 采用一种新型的扩张+反

馈的设计方法^[14], 避开了传统的设计思想中求误差系统的稳定性问题, 因为在非线性系统中很难得到误差系统. 由此结合式(23)和式(22)可得

$$\begin{pmatrix} \dot{\hat{\mathbf{x}}} \\ \dot{\hat{\theta}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{J}_d(\mathbf{x}, p) - \mathbf{R}_d(\mathbf{x}, p) & 0 \\ \mathbf{L}(\hat{\mathbf{x}})\mathbf{g}_1^T & \mathbf{J}_d(\hat{\mathbf{x}}, 0) - \mathbf{R}_d(\hat{\mathbf{x}}, 0) - \mathbf{L}(\hat{\mathbf{x}})\mathbf{g}_1^T \\ \Gamma\Psi\mathbf{g}_1^T & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{\partial H_d(\mathbf{x}, 0)}{\partial \mathbf{x}} \\ \frac{\partial H_d(\hat{\mathbf{x}}, 0)}{\partial \hat{\mathbf{x}}} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{g}_1(\mathbf{x})\Psi^T\theta \\ \mathbf{g}_1(\hat{\mathbf{x}})\Psi^T\hat{\theta} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{g}(\mathbf{x}) \\ \mathbf{g}(\hat{\mathbf{x}}) \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \mathbf{v} \quad (25)$$

令 $X = (\mathbf{x}^T, \hat{\mathbf{x}}^T, \hat{\theta})^T$,

$$\bar{H}(X) = H_d(\mathbf{x}, 0) + H_d(\hat{\mathbf{x}}, 0) + \frac{1}{2}(\theta - \hat{\theta})^T\Gamma^{-1}(\theta - \hat{\theta}) \quad (26)$$

这里, 利用 $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 是单位阵的特殊性以及 $\mathbf{g}_1(\mathbf{x}) = \mathbf{g}_1(\hat{\mathbf{x}})$ 特性, 将 $\mathbf{g}(\mathbf{x})$ 和控制器(21)代入后得

$$\dot{X} = [\bar{\mathbf{J}}(X, p) - \bar{\mathbf{R}}(X, p)]\frac{\partial \bar{H}}{\partial X} \quad (27)$$

其中

$$\bar{\mathbf{J}}(X, p) = \begin{bmatrix} \mathbf{J}_d(\mathbf{x}, p) - \mathbf{g}_1\mathbf{L}^T\mathbf{T}(\hat{\mathbf{x}}) - \mathbf{g}_1\Psi^T\Gamma & & \\ \mathbf{L}(\hat{\mathbf{x}})\mathbf{g}_1^T & \mathbf{J}_d(\hat{\mathbf{x}}, p) & 0 \\ \Gamma\Psi\mathbf{g}_1^T & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\bar{\mathbf{R}}(X, p) = \begin{bmatrix} \mathbf{R}_d(\mathbf{x}, p) & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{W}(\hat{\mathbf{x}}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{W}(\hat{\mathbf{x}}) = \mathbf{R}_d(\hat{\mathbf{x}}, 0) + [\mathbf{g}_1(\hat{\mathbf{x}})\mathbf{L}^T(\hat{\mathbf{x}}) + \mathbf{L}(\hat{\mathbf{x}})\mathbf{g}_1^T(\hat{\mathbf{x}})]$$

$$\frac{\partial \bar{H}}{\partial X} = \begin{bmatrix} \nabla^T H_d(\mathbf{x}) & \nabla^T H_d(\hat{\mathbf{x}}) & \frac{\partial \bar{H}}{\partial \hat{\theta}} \end{bmatrix}^T$$

若假设条件S2成立, 那么可知闭环系统(27)是一个耗散的PCH系统, 由此构造系统的能量函数为

$$V(\mathbf{x}, \hat{\theta}) = \bar{H}_d(X) \quad (28)$$

那么沿着系统的轨迹对时间的微分计算有

$$\begin{aligned} \dot{V} &= -\nabla^T \bar{H}(X)\bar{\mathbf{R}}(X)\nabla \bar{H}(X) \\ &= -\nabla^T H_d(\mathbf{x})\mathbf{R}_d(\mathbf{x}, p)\nabla H_d(\mathbf{x}) - \\ &\quad \nabla^T H_d(\hat{\mathbf{x}})\mathbf{W}(\hat{\mathbf{x}})\nabla H_d(\hat{\mathbf{x}}) \leq 0 \end{aligned} \quad (29)$$

这里, 可选取如下矩阵构造假设S2成立条件

$$\mathbf{L}^T(\hat{\mathbf{x}}) = \begin{bmatrix} 0 & \Delta & 0 \\ 0 & 0 & \Delta \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{L}_1^T(\hat{\mathbf{x}}) = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\Delta}{(R_a + 2r_2 + 2\Delta)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\Delta}{(R_a + 2r_3 + 2\Delta)} \end{bmatrix}$$

其中 Δ 为常数, 可依据系统设定, 则有

$$\mathbf{W}(\hat{\mathbf{x}}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ r_{21} & R_a + 2r_2 + 2\Delta & 0 \\ 0 & 0 & R_a + 2r_3 + 2\Delta \end{bmatrix} \geq 0$$

因而, 根据式(29)可知系统(27)是稳定的. 从而当 $t \rightarrow \infty$ 时, 系统(27)收敛于包含下列集合内的最大不变集上:

$$\begin{aligned} S &= \{X : \frac{d\bar{H}(X)}{dt} = 0\} \\ &= \{X : \mathbf{R}_d^{\frac{1}{2}}(\mathbf{x}, p) \frac{\partial H_d(\mathbf{x}, 0)}{\partial \mathbf{x}} \equiv 0, \\ &\quad \mathbf{W}(\hat{\mathbf{x}})^{\frac{1}{2}} \frac{\partial H_d(\hat{\mathbf{x}}, 0)}{\partial \hat{\mathbf{x}}} \equiv 0\} \end{aligned} \quad (30)$$

若S1成立, 那么 $\mathbf{R}_d^{\frac{1}{2}}(\mathbf{x}, p) \frac{\partial H_d(\mathbf{x}, 0)}{\partial \mathbf{x}} \equiv 0 \Rightarrow \frac{\partial H_d(\mathbf{x}, 0)}{\partial \mathbf{x}} = 0$ 根据 \mathbf{y}_2 是零状态可检测的可知 $\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x}^*(t \rightarrow \infty)$. 同理由假设条件S2可知

$$\mathbf{W}(\hat{\mathbf{x}})^{\frac{1}{2}} \frac{\partial H_d(\hat{\mathbf{x}}, 0)}{\partial \hat{\mathbf{x}}} = 0 \Rightarrow \mathbf{L}(\hat{\mathbf{x}}) \frac{\partial H_d(\hat{\mathbf{x}}, 0)}{\partial \hat{\mathbf{x}}} = 0$$

则有 $\hat{\mathbf{x}} \rightarrow \mathbf{x}^*(t \rightarrow \infty)$. 因而, $\|\mathbf{x} - \hat{\mathbf{x}}\| = \|\mathbf{x} - \mathbf{x}^* + \mathbf{x}^* - \hat{\mathbf{x}}\| \leq \|\mathbf{x} - \mathbf{x}^*\| + \|\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{x}^*\| \rightarrow 0 (t \rightarrow \infty)$ 进而定理1得证, 闭环系统实现了无速度传感器控制.

注 1 由定理1可知基于风力发电系统(11)的控制器为

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \alpha(\mathbf{x}) + \mathbf{v} \\ &= \alpha(\mathbf{x}) - \mathbf{g}_1(\hat{\mathbf{x}})\mathbf{L}^T(\hat{\mathbf{x}}) \frac{\partial H_d(\hat{\mathbf{x}}, 0)}{\partial \hat{\mathbf{x}}} - \mathbf{g}_1(\hat{\mathbf{x}})\Psi^T \hat{\theta} \end{aligned} \quad (31)$$

但由于 $\alpha(\mathbf{x})$ 存在不可测变量, 可用 $\alpha(\hat{\mathbf{x}})$ 替代 $\alpha(\mathbf{x})$ 实现, 此时控制器在整个闭环系统中就会产生 $\alpha(\hat{\mathbf{x}}) - \alpha(\mathbf{x})$ 的误差问题, 因而对存在误差情况下的系统(11)重新进行分析, 此时系统(11)可写为

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= [\mathbf{J}(\mathbf{x}, p) - \mathbf{R}(\mathbf{x}, p)] \frac{\partial H(\mathbf{x}, p)}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{g}(\mathbf{x})\mathbf{u} \\ &= [\mathbf{J}_d(\mathbf{x}, p) - \mathbf{R}_d(\mathbf{x}, p)] \frac{\partial H_d(\mathbf{x}, p)}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{g}(\mathbf{x})(\alpha(\hat{\mathbf{x}}) - \alpha(\mathbf{x}, p) + \mathbf{v}) \\ &= [\mathbf{J}'(\mathbf{x}, p) - \mathbf{R}'(\mathbf{x}, p)] \frac{\partial H_d(\mathbf{x}, p)}{\partial \mathbf{x}} + \mathbf{g}(\mathbf{x})(\alpha(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{x}^*) - \Delta_\alpha(\mathbf{x}, p) + \mathbf{v}) \end{aligned} \quad (32)$$

其中, $\mathbf{J}'(\mathbf{x}, p) = \mathbf{J}(\mathbf{x}, p) = -\mathbf{J}^T(\mathbf{x}, p)$

$$\mathbf{R}'(\mathbf{x}, p) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ r_{21} & R_a + p & 0 \\ 0 & 0 & R_a + p \end{bmatrix} \geq 0$$

$$\alpha(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{x}^*) = \begin{bmatrix} 0 \\ J_{23}(i_q^* - \hat{i}_q) - r_2 \hat{i}_d \\ r_3(i_q^* - \hat{i}_q) + J_{23} \hat{i}_d \end{bmatrix}$$

由式(32)可以看出, 系统满足PCH结构, 进而进行控制器设计. 这里由于控制器 \mathbf{v} 的设计与系统的结构有关, 只要系统构成PCH结构, 就可依照系统(17)的设计方式设计控制器, 由此控制器可以设计为:

$$\mathbf{v} = -\mathbf{g}_1(\hat{\mathbf{x}})\mathbf{L}^T(\hat{\mathbf{x}}) \frac{\partial H_d(\hat{\mathbf{x}}, 0)}{\partial \hat{\mathbf{x}}} - \mathbf{g}_1(\hat{\mathbf{x}})\Psi^T \hat{\theta} \quad (33)$$

证明过程可按定理1证明过程进行分析验证.

针对 $\alpha(\hat{\mathbf{x}}) - \alpha(\mathbf{x})$ 的误差问题, 根据式(32)可知需要在控

制器中补偿 $\alpha(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{x}^*)$ 项构成控制器为:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \mathbf{v} - \alpha(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{x}^*) + \alpha(\hat{\mathbf{x}}) \\ &= -\mathbf{g}_1(\hat{\mathbf{x}})\mathbf{L}^T(\hat{\mathbf{x}}) \frac{\partial H_d(\hat{\mathbf{x}}, 0)}{\partial \hat{\mathbf{x}}} - \mathbf{g}_1(\hat{\mathbf{x}})\Psi^T \hat{\theta} - \alpha(\hat{\mathbf{x}}, \mathbf{x}^*) + \alpha(\hat{\mathbf{x}}) \\ &= \begin{bmatrix} T_m^* - \\ -\Delta i_d - J_{23}(i_q^* - \hat{i}_q) - (L n_p \hat{\omega} - J_{23} i_q^* - J_{23} \hat{i}_q + \\ -\Delta(i_q^* - \hat{i}_q) - i_q^* \hat{\theta} - r_3(i_q^* - \hat{i}_q) - n_p \psi_f \omega^* + \\ J \hat{\omega}^* \\ r_{21}(\hat{\omega} - \omega^*) \\ (R_a + r_3) i_q^* - r_3 \hat{i}_q \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (34)$$

由控制器(34)可知, 系统(11)在选择配置互联矩阵后, 可使得风力发电机的输入矩阵为 $T_m^* - J \hat{\omega}^*$, 从而实现永磁电机获取最大输入转矩 T_e^* . 因而系统真正的控制量为 u_d, u_q .

由此可得控制器在整个闭环系统的实现框图, 如图1所示:

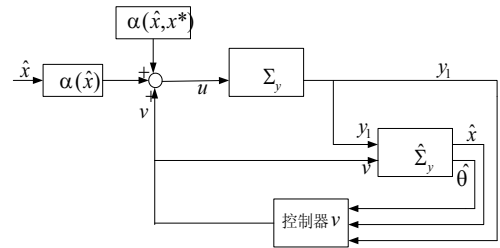


图 1 系统控制器实现结构

Fig. 1 Implement structure of system controller

因此, 通过以上分析可知系统(11)在控制器 u_d, u_q 的作用下在平衡点处是Lyapunov稳定的, 并且系统的状态变量 $(\mathbf{x}^T, \hat{\mathbf{x}}^T)^T$ 均具有渐近收敛性, 即 $\mathbf{x} \rightarrow \mathbf{x}^*, \hat{\mathbf{x}} \rightarrow \mathbf{x}^*$, 达到了设计目的和系统性能要求.

4 仿真研究(Simulation Research)

为了校验所设计的控制器的有效性, 针对一风力发电系统进行仿真研究. 所用的风力发电系统的物理参数的标称值分别选取为:

$$J = 100 \text{kgm}^2, r = 1.2 \text{m}, L = 0.051 \text{H}, R_a = 4 \Omega, n_p = 16$$

选取控制器可调参数为:

$$\Delta = 1, r_2 = r_3 = 2 \Omega, k = 1, \Gamma = 0.1$$

不失一般性, 仿真结果只给出在一段风速内, 所研究的风力发电闭环控制系统的运行情况, 风速曲线如图2所示. 针对本文的设计目的, 给出了两种不同情况下的仿真曲线: 一种情况是基于系统(11), 将预置控制器 $\alpha(\mathbf{x})$ 中的状态变量 \mathbf{x} 直接用观测估值 $\hat{\mathbf{x}}$ 替代, 控制器为式(31), 此种情况是不考虑直接替代后闭环系统存在的误差问题, 如图3所示; 另一种情况是基于系统(32)及此种结构下的观测器方程, 将预置控制器 $\alpha(\mathbf{x})$ 中的状态变量 \mathbf{x} 直接用观测估值 $\hat{\mathbf{x}}$ 替代后, 考虑直接替代后闭环系统存在的误差问题, 控制器补偿为式(34), 如图4所示. 其中各个图框

中的小图为局部放大图, 比较两者可以看出考虑了控制器中存在观测误差的仿真曲线性能更好, 使得控制器在调整阶段没有大幅瞬间变化, 很好的保护了控制器执行机构的电力电子器件; 大图为系统整体运行仿真图, 可以看出观测器很快跟踪上实际值, 并且实现了最佳转速跟踪, 从而达到了最大风能捕获及无速度传感器控制. 由此可知, 基于Hamilton模型的风力发电系统不仅可以实现无速度传感器控制目的, 而且针对系统参数扰动问题, 与一般非线性鲁棒控制设计方法^[15,16]相比, 控制器的物理意义明确, 且由于不需补偿系统无功功率而变得更加简单.

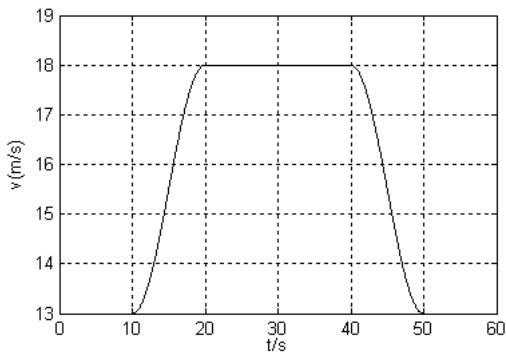
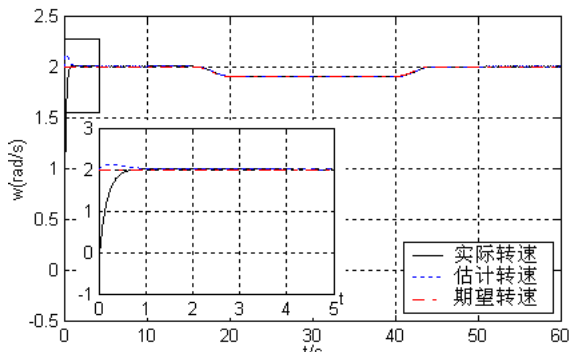
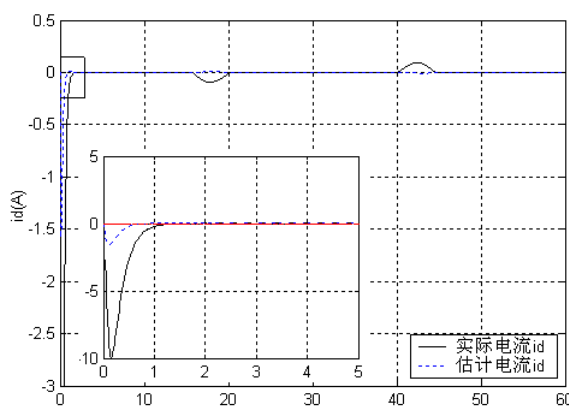


图2 给定风速

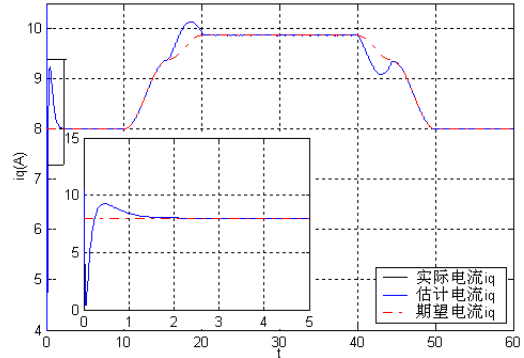
Fig. 2 Wind speed



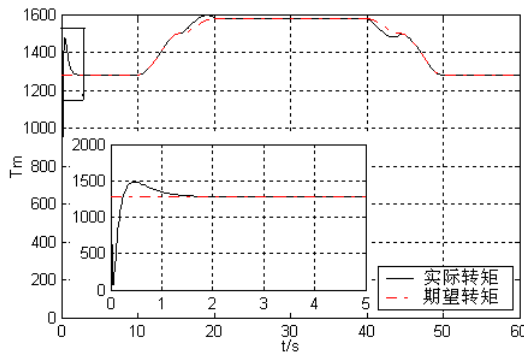
(a) 转子转速的实际值, 估计值及期望值



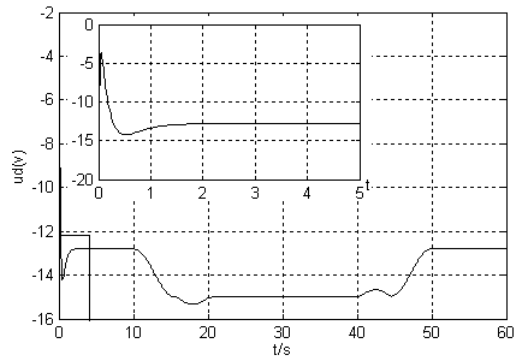
(b) d轴电流的实际值, 估计值



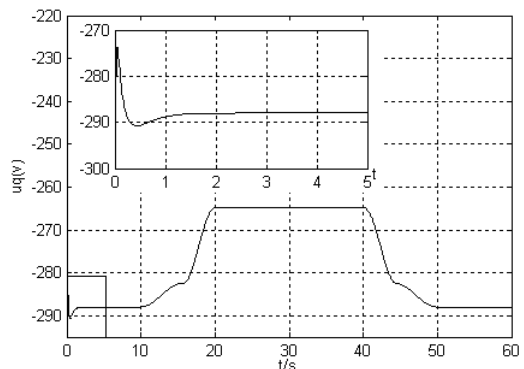
(c) q轴电流的实际值, 估计值及期望值



(d) 风力机转矩的实际值及期望值

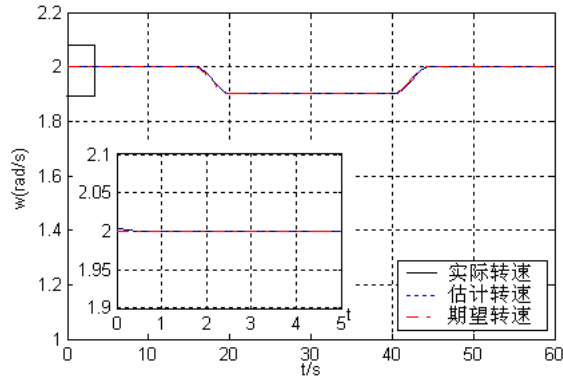


(e) d轴励磁电压

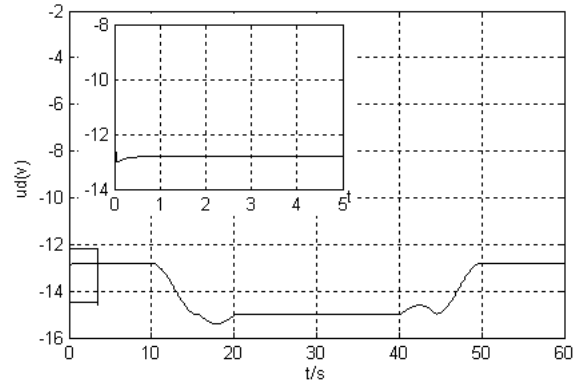


(f) q轴励磁电压

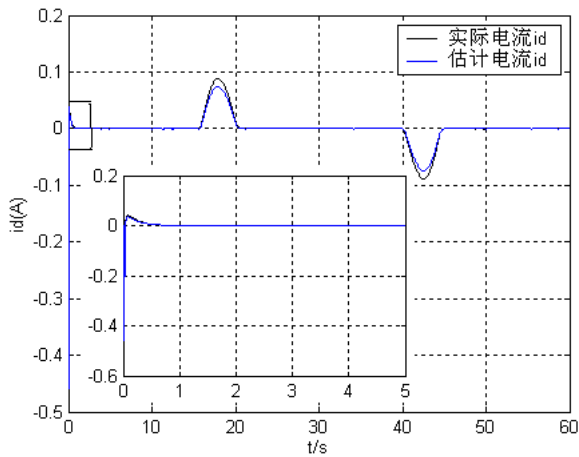
图3 未考虑观测误差情况下的转速及控制器曲线
Fig. 1 Speed and controller curve under observer error not considered



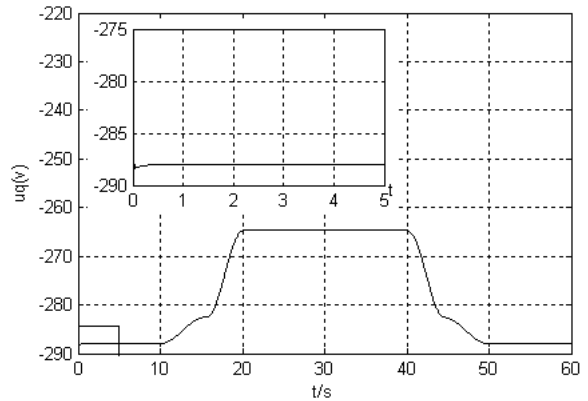
(a) 转子转速的实际值, 估计值及期望值



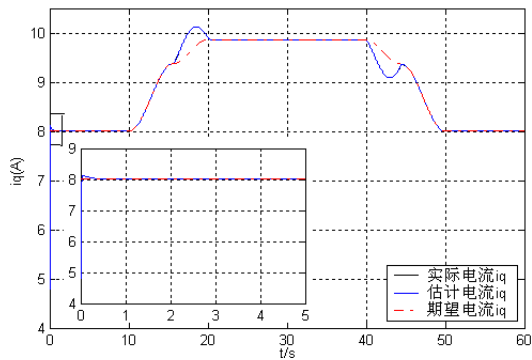
(e) d轴励磁电压



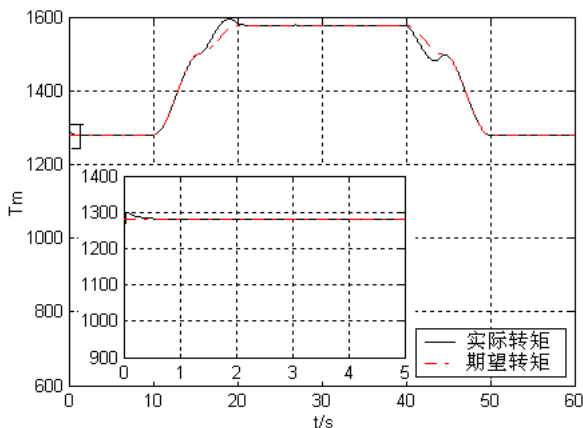
(b) d轴电流的实际值, 估计值



(f) q轴励磁电压



(c) q轴电流的实际值, 估计值及期望值



(d) 风力机转矩的实际值及期望值

图 4 考虑观测误差情况下的转速及控制器曲线

Fig. 1 Speed and controller curve under observer error considered

5 结论(Conclusion)

本文提出了基于PCH模型的风力发电系统无速度传感器控制策略. 利用PCH系统的特殊结构, 采用扩张反馈控制方法设计了系统的全维状态观测器, 以此实现系统的无速度传感器控制. 这种控制方法揭示了系统能量函数的构造和反馈控制的联系, 从而使所设计的控制器简单易行、物理意义明确. 理论证明和仿真结果均表明, 在系统参数存在摄动的情况下, 能够很好地实现速度估计. 即所提出的控制方法具有良好的鲁棒性, 可以很好的应用于风力发电系统.

参考文献(References):

[1] 李永东, 朱昊. 永磁同步电机无速度传感器控制综述[J]. 电气传动, 2009,39(10): 3-10.
(LI Yong-dong, ZHU Hao. Overview of Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motors[J]. *Electric Drive*, 2009,39(9): 3-10.)

[2] Kulkarni A B, Ehsani M. A Novel Position Sensor Elimination Technique for the Interior Permanent-magnet Synchronous Motor Drive[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 1992, 28(1): 144-150.

- [3] Chen Zhiqian, Tomita M, Ichikawa S, et al. Sensorless Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor by Estimation of an Extended Electromotive Force[C]//*IEEE Industry Applications Conference*, IEEE, Italy, 2000, 3:1814–1819.
- [4] Bolognani S, Tubiana L, Zigliotto M. EKF-based Sensorless IPM synchronous Motor Drive for Flux-weakening Applications[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2003, 39(3): 768–775.
- [5] Lascu Cristian, Andreescu Gheorghe-Daniel. Sliding-mode observer and improved integrator with dc-offset compensation for flux estimation in sensorless-controlled induction motors[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2006: 53(3): 1–6.
- [6] 张细政, 王耀南, 袁小芳, 等. 基于滑模与自适应观测器的感应电机非线性控制新策略[J]. *控制理论与应用*, 2010, 27(6): 753–760. (ZHANG Xi-zheng, WANG Yao-nan, YUAN Xiao-fang, et al. New nonlinear controller for induction motor based on sliding-mode control and adaptive observer[J]. *Control Theory & Applications*, 2010, 27(6): 753–760.)
- [7] 侯利民, 张化光, 刘秀翀, 等. 自适应模糊滑模软切换的PMSM无速度传感器鲁棒无源控制[J]. *控制与决策*, 2010, 25(5): 686–694. (HOU Li-min, ZHANG Hua-guang, LIU Xiu-chong, et al. Adaptive fuzzy sliding mode soft switch of speed sensorless for PMSM based on robust passivity-based control[J]. *Control and Decision*, 2010, 25(5): 686–694.)
- [8] Park Chul-Woo, Kwon Woo-Hyen. Simple and robust speed sensorless vector control of induction motor using stator current based MRAC. *Electric Power System Research*, 2004, 71(3): 257–266.
- [9] 黄志武, 桂卫华, 年晓红, 等. 基于自适应观测器的无速度传感器感应电机控制[J]. *控制理论与应用*, 2007, 24(6): 464–470. (HUANG Zhiwu, GUI Weihua, NIAN Xiaohong, et al. Adaptive observer-based sensorless speed control of induction motors[J]. *Control Theory & Applications*, 2007, 24(6): 464–470.)
- [10] Jang Ji-Hoon, Ha Jung-Ik, Ohto M, et al. Analysis of Permanent Magnet Machine for Sensorless Control Based on High Frequency Signal Injection[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2004, 40(6): 1595–1604.
- [11] Y. D. Song, B. Dhinakaran and X. Y. Bao, Variable speed control of wind turbines using nonlinear and adaptive algorithms[J], *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2000, 85(3): 293–308.
- [12] 孙元章, 焦晓红, 申铁龙. 电力系统非线性鲁棒控制[M]. 清华大学出版社, 2006.
- [13] Ortega R., A. J. van der Schaft, B. Maschke, G. Escobar. Stabilization of Port-controller Hamiltonian Systems: Passivation and Energy-balancing[C]. Eds. Stability and Stabilization of Nonlinear Systems, D. Aeyels, F. Lamnabhi-Lagarrigue, and A. vander Schaft, Springer-Verlag, London, 1999: 239–258
- [14] 王玉振, 葛树志, 程代展. 广义Hamilton系统的观测器及基于观测器的 H_∞ 控制设计[J]. *中国科学, E辑*, 2004, 34(12): 1313–1328. (Wang Yuzhen, Ge Shuzhi, Cheng Daizhang. Designed for observers of the generalized Hamilton systems and H_∞ control based observers[J]. *Science in China(Series E)*, 2004, 34(12): 1313–1328.)
- [15] 任丽娜, 焦晓红, 邵立平. 风力发电机速度跟踪自适应控制研究[J]. *太阳能学报*, 2008, 29(8): 1021–1027 (Ren Lina, Jiao Xiaohong, Shao Liping. Adaptive Control for Speed Tracking of Wind Turbines[J]. *Acta Energiæ Solaris Sinica*, 2008, 29(8): 1021–1027)
- [16] 任丽娜, 焦晓红, 邵立平. 双馈型变速恒频风力发电系统的鲁棒控制[J]. *控制理论与应用*, 2009, 26(4): 377–382 (Ren Lina, Jiao Xiaohong, Shao Liping. Robust Control of DFIG-based Variable Speed Constant Frequency Wind Power Systems[J]. *Control Theory & Applications*, 2009, 26(4): 377–382)

作者简介:

任丽娜 (1982—), 女, 博士研究生, 目前研究方向为非线性鲁棒自适应控制理论与智能控制及其在风力发电系统中应用的研究, E-mail: renlina0419@yahoo.com.cn;

刘福才 (1966—), 男, 博士生导师, 目前研究方向模糊辨识与预测控制等, E-mail: lfc_xb@263.net;

焦晓红 (1966—), 女, 博士生导师, 目前研究方向为非线性系统、时滞系统的鲁棒自适应控制及其在机械系统和电力系统中的应用, E-mail: jiaoxh@tsinghua.edu.cn.