

双馈型变速恒频风力发电系统的鲁棒控制

任丽娜, 焦晓红, 邵立平

(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: 研究了双馈变速恒频风力发电系统的鲁棒控制问题. 采用定子磁场定向的矢量变换技术, 建立了系统非线性数学描述, 利用非线性鲁棒控制技术, 设计了能实现发电机输出有功功率和无功功率鲁棒解耦控制, 同时具有鲁棒干扰抑制作用的转子励磁控制器. 理论分析和仿真结果均表明, 所设计的控制器可以保证在风速变化、系统参数不确定性和外部干扰的情况下, 风力发电系统仍能安全可靠地最大获取风能, 并且输出恒频恒压的电量.

关键词: 双馈感应电机; 变速恒频; 风力发电系统; 鲁棒控制; 干扰抑制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Robust control for doubly-fed induction generators (DFIG) with variable speed and constant frequency in wind power systems

REN Li-na, JIAO Xiao-hong, SHAO Li-ping

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

Abstract: The robust control problem is addressed for the variable speed/constant frequency wind power generation systems equipped with doubly-fed induction generators. The wind power system is mathematically modeled by using the field-oriented vector-transformation of the stator. A rotor excitation controller is designed by utilizing nonlinear robust control technology, which realizes the robust decoupling control for the active and reactive power of the generator, and the attenuation of the external disturbance. The theoretical analysis and the simulation show that under variable wind-speed, uncertain parameters and the external disturbances, the proposed controller guarantees the wind power system to achieve the maximal absorption of wind power in the secure and stable operation, and to output the electrical power with constant frequency and constant voltage for the grids.

Key words: DFIG; variable speed constant frequency; wind power system; robust control; disturbance attenuation

1 引言(Introduction)

对双馈型变速恒频风力发电系统, 一般采用基于定子磁场定向的矢量控制技术, 文献[1~4]均是基于这种控制技术给出了转子电流PI控制器, 实现对系统有功和无功功率的解耦控制. 然而由于风力发电系统所固有的非线性和不确定性, 以及存在外界运行条件的影响等因素, 应该使用先进的控制技术理论设计风力发电控制系统, 以增强实际系统的鲁棒性和可靠性. 文献[5~7]的研究结果正是基于这样的思想给出的. 文献[5]利用线性系统 H_∞ 混合灵敏度鲁棒控制原理, 设计了获取最大风能的风力机转速控制器, 一定程度上提高了风力发电系统转速控制的抗干扰性, 但是风力机系统固有的非线性特性是不容忽略的. 文献[6]基于无源性理论设计了风力机风能最大捕获控制器, 设计中将风力发电机的本征

非线性特性划归为干扰量处理, 但是从所给的系统稳定性分析中可以看出, 此非线性项对系统稳定性的影响并没有得到控制. 文献[7]试图利用非线性自适应控制方法设计从切入风速到切出风速全程风力机速度跟踪控制器, 但是在自适应控制器的设计过程中却将在3种运行模式下的不同功率系数看成了一个恒值. 因此所得到的自适应控制器只是最佳叶尖速比运行模式下的速度跟踪控制器.

鉴于以上分析, 本文研究双馈型变速恒频风力发电系统的非线性鲁棒控制问题. 首先利用定子磁场定向矢量变换技术和最大风能捕获原理, 建立双馈风力发电系统的动态数学模型, 然后针对系统模型的非线性、参数的不确定性以及外部干扰量, 基于Lyapunov稳定性理论设计了非线性鲁棒控制器, 保证系统即使在参数不确定性和外部干扰量存在

下,仍能通过控制转子电流的转矩分量调节风电机组转速,实现最大风能捕获且安全运行的目的,通过控制转子电流的励磁分量控制无功功率,达到恒频恒压的控制要求.同时通过仿真实验研究,验证了所设计控制器的有效性.

2 系统建模及控制问题(System modeling and control problem)

双馈变速恒频风力发电系统结构如图1所示.

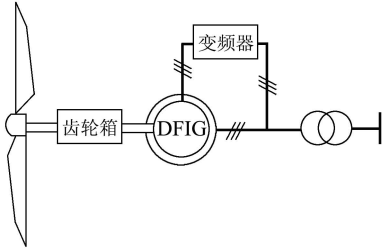


图1 基于双馈发电机的风力发电系统结构示意图

Fig. 1 Diagram of a DFIG-based wind power system

定、转子分别取发电机与电动机惯例,在 d, q 两相同步旋转坐标系下,电压和磁链方程为:

$$\begin{cases} u_{ds} = -R_s i_{ds} + \dot{\psi}_{ds} - \omega_1 \psi_{qs}, \\ u_{qs} = -R_s i_{qs} + \dot{\psi}_{qs} + \omega_1 \psi_{ds}, \\ u_{dr} = R_r i_{dr} + \dot{\psi}_{dr} - \omega_s \psi_{qr}, \\ u_{qr} = R_r i_{qr} + \dot{\psi}_{qr} + \omega_s \psi_{dr}. \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \psi_{ds} = -L_s i_{ds} + L_m i_{dr}, \\ \psi_{qs} = -L_s i_{qs} + L_m i_{qr}, \\ \psi_{dr} = L_r i_{dr} - L_m i_{ds}, \\ \psi_{qr} = L_r i_{qr} - L_m i_{qs}. \end{cases} \quad (2)$$

式中: u, i, ψ 分别表示电压、电流和磁链,下标第1个字母表示 d, q 轴分量,第2个字母表示定、转子, L_s, L_r, L_m 定转子自感及互感, R_s, R_r 为定转子电阻, ω_1 为同步转速, ω_s 为转差速度, $\omega_s = \omega_1 - n_p \omega_r = s\omega_1$, ω_r 为发电机转子的机械角速度, s 为转差率, n_p 是电机极对数.

采用定子磁场定向矢量控制,将定子磁链矢量 ψ_s 定向在 d 轴上,有 $\psi_{ds} = \psi_s, \psi_{qs} = 0$. 稳态运行时,定子磁链保持恒定,忽略 R_s ,则有:

$$\begin{cases} u_{ds} = 0, \\ u_{qs} = \omega_1 \psi_s = U_s, \\ u_{dr} = a i_{dr} + b \frac{di_{dr}}{dt} - b \omega_s i_{qr}, \\ u_{qr} = a i_{qr} + b \frac{di_{qr}}{dt} + b \omega_s i_{dr} + c \omega_s. \end{cases} \quad (3)$$

其中: $a = R_r, b = L_r - L_m^2/L_s, c = L_m \psi_s/L_s$.

定子侧有功功率和无功功率分别为:

$$P_1 = u_{ds} i_{ds} + u_{qs} i_{qs} = \frac{L_m \psi_s}{L_s} \omega_1 i_{qr}, \quad (4)$$

$$Q_1 = u_{qs} i_{ds} - u_{ds} i_{qs} = \omega_1 \psi_s \frac{L_m i_{dr} - \psi_s}{L_s}. \quad (5)$$

可见, P_1, Q_1 分别与转子电流转矩分量 i_{qr} 和励磁分量 i_{dr} 成线性关系,通过调节两个电流分量就可以独立地控制 P_1, Q_1 ,实现解耦控制.

发电机转子的运动方程:

$$J_e \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - T_e - B_e \omega_r - K_e \theta_r. \quad (6)$$

其中: J_e, B_e, K_e 发电机转动惯性系数、摩擦系数和扭矩系数, θ_r 转子转角. T_m, T_e 增速齿轮箱输入到发电机的机械转矩和发电机的输出电磁转矩. 电磁转矩方程为:

$$T_e = n_p L_m (i_{qs} i_{dr} - i_{ds} i_{qr}) = \frac{n_p L_m}{L_s} \psi_s i_{qr}. \quad (7)$$

风力机的转矩方程:

$$J_m \frac{d\omega}{dt} = T_M - T - B_m \omega - K_m \theta. \quad (8)$$

齿轮箱的转矩传输:

$$T_m \omega_r = T \omega. \quad (9)$$

其中: J_m, B_m, K_m 风力机转动惯性系数、摩擦系数和扭矩系数, θ, ω 风力机转角和转速, T_M 风力机的驱动转矩, T 增速齿轮箱的输入转矩.

根据风力机、齿轮箱和发电机之间的转矩(功率)传输关系,可得折算后的风力机功率方程:

$$J \frac{d\omega}{dt} + B \omega + K \theta = \frac{P_M}{\omega} - n_g \frac{P_e}{\omega_r}. \quad (10)$$

其中: $n_g = \omega_r/\omega, J = J_m + n_g^2 J_e, B = B_m + n_g^2 B_e, K = K_m + n_g^2 K_e$. P_M 是风力机所捕获的风能所转变的机械功率, P_e 是发电机产生的电磁功率. 根据空气动力学理论, P_M 具有如下的非线性特性:

$$P_M = 0.5 \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) v^3 = k_w(\lambda) \omega^3. \quad (11)$$

其中: $k_w(\lambda) = 0.5 C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^5 / \lambda^3$, 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, $\lambda = \omega R/v$ 是叶尖速比. 在固定 β 的条件下, $C_p(\lambda, \beta)$ 只随 λ 的变化而变化.

对于双馈异步发电机,有如下功率关系:

$$\begin{cases} P_1 = P_e - P'_1, P_2 = s P_e \pm P'_2, \\ P_e = \frac{P_m - P'_m}{1-s} = \frac{P_{m0}}{1-s}. \end{cases} \quad (12)$$

其中: P'_1 表示定子的铜损和铁损, P_m, P'_m, P_{m0} 分别为发电机的输入机械功率、机械损耗和吸收的净机械功率, P_2, P'_2 分别为转子功率和转子损耗.

对于风力发电系统, 控制目标除了输出电量的恒频恒压外, 还要考虑风的随机特性和风力机的机械结构特征, 在安全可靠运行的条件下尽可能最大化地利用风能, 将其转化为机械能. 由于实际中风轮转速和电气元件装置最大功率的受限, 根据风速、转子所允许的最大转速和额定功率, 将风力发电系统的运行分为3种状态区域, 在这3个区域里通过分别保证最佳叶尖速比、风轮转速恒定和风力机输出机械功率恒定, 可以保证风力机最大程度的获取风能. 风力发电系统在整个运行中, 应控制机械功率 P_M 和风力机转速 ω 按如图2所示的曲线运行.

其中: v_{in} 是切入风速, v_b 表示转子允许的最大转速时的风速, v_r 是额定风速, v_{out} 是切出风速.

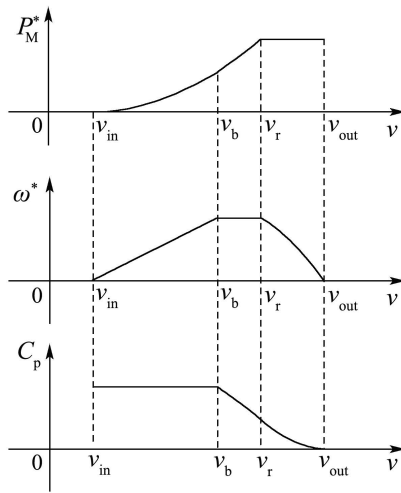


图2 风力机运行模式

Fig. 2 The operation modes of wind turbine

根据风力发电系统的功率传递关系, 有

$$P_1 = \frac{\omega_1(P_M - P'_M - P'_m)}{n_g n_p \omega} - P'_1. \quad (13)$$

其中: P'_M 为风力机上的机械损耗, 且有 $P'_M + P'_m = \omega(J\dot{\omega} + K\theta + B\omega)$. 则由式(4)和式(13)可知, 在忽略 P'_1 下, 若使系统捕获最大风能且输出电量频率恒定, 则加在转子上电流分量 i_{qr}^* 应满足:

$$\frac{P_M^*}{n_g n_p \omega^*} - \frac{1}{n_g n_p} (J\dot{\omega}^* + K\theta^* + B\omega^*) = \frac{L_m \psi_s}{L_s} i_{qr}^*. \quad (14)$$

再根据系统电网对无功功率的要求, 可知希望的无功功率 Q^* , 则根据式(5)可知双馈发电机转子电流的励磁分量 i_{dr}^* 应满足

$$i_{dr}^* = (L_s Q^* + \omega_1 \psi_s^2) / \omega_1 \psi_s L_m. \quad (15)$$

另外, 考虑到实际中一些系统参数的不确定性, 以及系统动态描述中存在的干扰量, 因此, 双馈型变速恒频风力发电系统的整体动态特性可描述为:

$$\begin{cases} \dot{\theta} = \omega, \\ \dot{\omega} = \frac{1}{J} [k_\omega \omega^2 - d i_{qr} - (B + \Delta B) \omega - (K + \Delta K) \theta + w_1], \\ \dot{i}_{dr} = \frac{1}{b} [u_{dr} - (a + \Delta a) i_{dr} + b(\omega_1 - n_p n_g \omega) i_{qr}] + w_2, \\ \dot{i}_{qr} = \frac{1}{b} [u_{qr} - (a + \Delta a) i_{qr} - (\omega_1 - n_p n_g \omega) (b i_{dr} + c)] + w_3. \end{cases} \quad (16)$$

其中: $d = n_g n_p \psi_s L_m / L_s$, $\Delta a, \Delta B, \Delta K$ 代表参数不确定性, 假设 $|\Delta a| \leq a_1, |\Delta B| \leq B_1, |\Delta K| \leq K_1$. w_1, w_2, w_3 代表干扰量.

因此, 双馈型变速恒频风力发电系统(16)的控制问题形成如下: 设计一个非线性鲁棒控制器

$$u_{dr} = \alpha(\theta, \omega, i_{dr}, i_{qr}), u_{qr} = \beta(\theta, \omega, i_{dr}, i_{qr}). \quad (17)$$

使得在系统不确定参数和外界干扰存在下, 风轮机的转角和转速、转子电流的转矩分量和励磁分量仍能按各自希望的轨迹运行, 以满足电网对电能质量恒压恒频的要求和风轮机的最大风能捕获.

3 非线性鲁棒控制器设计(Nonlinear robust controller design)

令 $x_1 = \theta - \theta^*, x_2 = \omega - \omega^*, x_3 = i_{dr} - i_{dr}^*, x_4 = i_{qr} - i_{qr}^*$, 将系统(16)转化为误差方程式:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{J} [k_\omega x_2^2 + 2k_\omega \omega^* x_2 - d x_4 - (B + \Delta B) x_2 - (K + \Delta K) x_1 + w_1], \\ \dot{x}_3 = \frac{1}{b} [v_1 - (a + \Delta a) x_3 - b n_g n_p (\omega^* + x_2) x_4 + b \omega_1 x_4 - b n_g n_p i_{qr}^* x_2] + w_2, \\ \dot{x}_4 = \frac{1}{b} [v_2 - (a + \Delta a) x_4 + b n_g n_p (\omega^* + x_2) x_3 - b \omega_1 x_3 + n_g n_p (b i_{dr}^* + c) x_2] + w_3. \end{cases} \quad (18)$$

其中:

$$\begin{cases} v_1 = u_{dr} - a i_{dr}^* - b \frac{d i_{dr}^*}{dt} + b(\omega_1 - n_g n_p \omega^*) i_{qr}^*, \\ v_2 = u_{qr} - a i_{qr}^* - b \frac{d i_{qr}^*}{dt} - (\omega_1 - n_g n_p \omega^*) (b i_{dr}^* + c). \end{cases} \quad (19)$$

因此, 基于非线性鲁棒Backstepping设计技术, 可得到系统(18)的鲁棒控制器. 在控制器设计中利用了系统的一些物理特性, 设计思想如下:

首先考虑子系统 (x_1, x_2) , 将 x_4 看成虚拟控制输入, 令 $z_4 = x_4 - \alpha_1(x_1, x_2)$, 并选取

$$\alpha_1(x_1, x_2) = \frac{1}{d} (k_\omega x_2^2 + 2k_\omega \omega^* x_2 + k_1 x_1 + k_2 x_2) + \frac{2}{d J \gamma^2} [k_2 - J(1 + \frac{1}{2} \rho_2^2)] x_1 + \frac{2}{d \gamma^2} x_2. \quad (20)$$

其中 k_1, k_2 是可任选的正常数, 且 $k_2 > J(1 + \frac{1}{2}\rho_2^2)$, γ, ρ_2 分别为 L_2 增益和评价信号中的权系数, 则子系统 (x_1, x_2) 动态为:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{J} \{-dz_4 - (k_2 + B + \Delta B + \frac{2}{\gamma^2})x_2 + w_1 - [k_1 + K + \Delta K + \frac{2}{J\gamma^2}(k_2 - J(1 + \frac{1}{2}\rho_2^2))]x_1\}. \end{cases} \quad (21)$$

由系统物理特性知, 摩擦系数 $B + \Delta B$ 和扭矩系数 $K + \Delta K$ 都是正数, 尽管存在不确定项 $\Delta B, \Delta K$, 因此, 构造正定函数:

$$V_1(x_1, x_2) = \frac{1}{2}[x_1 \ x_2]P[x_1 \ x_2]^T. \quad (22)$$

其中正定对称矩阵 P 中的各元素选为:

$$\begin{aligned} P_{11} &= \frac{P_{12}(k_2 + B + \Delta B) + P_{22}(k_1 + K + \Delta K)}{J} + \frac{4P_{12}}{J\gamma^2}, \\ P_{12} &= \frac{k_2 - J(1 + \frac{1}{2}\rho_2^2)}{J}, k_2 > J(1 + \frac{1}{2}\rho_2^2), \\ P_{22} &= 1. \end{aligned}$$

则 V_1 沿着子系统 (x_1, x_2) 轨迹的微分为

$$\dot{V}_1 \leq -\frac{1}{J}(P_{12}x_1 + x_2)dz_4 - \frac{P_{12}}{J}(k_1 + K + \Delta K)x_1^2 - \frac{1}{J}(J(1 + \frac{1}{2}\rho_2^2) + B + \Delta B)x_2^2 + \frac{\gamma^2}{4J}w_1^T w_1. \quad (23)$$

考虑整个系统, 构造Lyapunov候选函数为

$$V(x_1, x_2, x_3, x_4) = V_1 + \frac{1}{2}x_3^2 + \frac{1}{2}z_4^2. \quad (24)$$

则 V 沿着系统(18)轨迹的时间微分为

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq & \dot{V}_1 + x_3 \left\{ \frac{1}{b}[v_1 - (a + \Delta a)x_3 - b n_g n_p(\omega^* + x_2)x_4 + \right. \\ & b\omega_1 x_4 - b n_g n_p i_{qr}^* x_2] + w_2 \} + z_4 \left\{ [v_2 - b\omega_1 x_3 - \right. \\ & (a + \Delta a)x_4 + b n_g n_p(\omega^* + x_2)x_3 + n_g n_p(bi_{dr}^* + c)x_2] + \\ & w_3 - \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_2} \frac{1}{J}[k_\omega x_2^2 + 2k_\omega \omega^* x_2 - dx_4 - (B + \Delta B)x_2 - \\ & (K + \Delta K)x_1 + w_1] - \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} x_2 - \frac{\partial \alpha_1}{\partial k_\omega} \dot{k}_\omega - \frac{\partial \alpha_1}{\partial \omega^*} \dot{\omega}^* \}. \end{aligned}$$

上式中注意了系数 k_ω 是一个时变量, 它在整个系统运行中是随叶尖速比 λ 的变化而变化的. 对 $\dot{V}$ 中含有的参数不确定项和扰动量分别处理如下:

$$\begin{aligned} -\frac{1}{b}\Delta a x_3^2 + \frac{1}{J} \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_2} (\Delta B x_2 + \Delta K x_1) z_4 \leq \\ (\frac{a_1^2}{2b^2} + \frac{1}{2})x_3^2 + \frac{1}{2J^2} [\frac{\partial \alpha_1}{\partial x_2}]^2 (B_1^2 + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} K_1^2) z_4^2 + \frac{1}{2}x_2^2 + \frac{1}{2}x_1^2, \\ -\Delta a \frac{1}{b} x_4 z_4 = -\Delta a \frac{1}{b} (z_4 + \alpha_{11} x_1 + \alpha_{12} x_2) z_4 \leq \\ (\frac{a_1^2}{2b^2} + \frac{1}{2})z_4^2 + \frac{a_1^2}{2b^2} (\alpha_{11}^2 + \alpha_{12}^2) z_4^2 + \\ \frac{1}{2}x_1^2 + \frac{1}{2}x_2^2, \\ x_3 w_2 - \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_2} \frac{1}{J} z_4 w_1 + z_4 w_3 \leq \\ \frac{1}{2\gamma^2} x_3^2 + \frac{1}{\gamma^2} (\frac{1}{J} (\frac{\partial \alpha_1}{\partial x_2})^2 + \frac{1}{2}) z_4^2 + \\ \frac{\gamma^2}{2} w^T w - \frac{\gamma^2}{4J} w_1^T w_1. \end{aligned}$$

其中 $w = [\frac{1}{\sqrt{J}}w_1 \ w_2 \ w_3]^T$. 处理中利用了 $\alpha_1(x_1, x_2) = \alpha_{11}x_1 + \alpha_{12}x_2$. 那么选取控制输入 v_1, v_2 为:

$$\begin{cases} v_1 = (a - \frac{a_1^2}{2b} - \frac{b}{2\gamma^2} - bk_3 - \frac{b}{2})x_3 + b n_g n_p i_{qr}^* x_2 + \\ \quad b n_g n_p (\omega^* + x_2)x_4 - b\omega_1 x_4, \\ v_2 = \\ \quad \frac{bd}{J}(P_{12}x_1 + x_2) + ax_4 - b n_g n_p (\omega^* + x_2)x_3 + b\omega_1 x_3 - \\ \quad n_g n_p (bi_{dr}^* + c)x_2 + b[\frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} x_2 + \frac{\partial \alpha_1}{\partial k_\omega} \dot{k}_\omega + \frac{\partial \alpha_1}{\partial \omega^*} \dot{\omega}^* + \\ \quad \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_2} \frac{1}{J}(k_\omega x_2^2 + 2k_\omega \omega^* x_2 - dx_4 - Bx_2 - Kx_1)] - \\ \quad \frac{b}{J} (\frac{\partial \alpha_1}{\partial x_2})^2 [\frac{1}{2J}(B_1^2 + K_1^2) + \frac{1}{\gamma^2}] z_4 - \frac{b}{2\gamma^2} z_4 - \\ \quad b(\frac{a_1^2}{2b^2} (\alpha_{11}^2 + \alpha_{12}^2) + \frac{a_1^2}{2b^2} + \frac{1}{2} + k_4) z_4. \end{cases} \quad (25)$$

则 $\dot{V}$ 满足如下不等式

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq \frac{\gamma^2}{2} w^T w - \frac{P_{12}}{J} (k_1 + K + \Delta K - \frac{J}{P_{12}}) x_1^2 - \\ \frac{1}{J} (B + \Delta B + \frac{1}{2} J \rho_2^2) x_2^2 - k_3 x_3^2 - k_4 z_4^2. \end{aligned} \quad (26)$$

取对干扰量的评价信号

$$z = [\rho_1 x_1 \ \rho_2 x_2 \ \rho_3 x_3 \ \rho_4 z_4]^T. \quad (27)$$

则不等式(26)可以重新写为:

$$\begin{aligned} \dot{V} \leq \frac{P_{12}}{J} [k_1 + K + \Delta K - \frac{J}{P_{12}} (1 + \frac{1}{2} \rho_1^2)] x_1^2 - \\ \frac{1}{J} (B + \Delta B) x_2^2 - (k_3 - \frac{1}{2} \rho_3^2) x_3^2 - \\ (k_4 - \frac{1}{2} \rho_4^2) z_4^2 + \frac{\gamma^2}{2} w^T w - \frac{1}{2} z^T z. \end{aligned} \quad (28)$$

因此, 如果选取参数

$$k_4 \geq \frac{1}{2} \rho_4^2 + 1, k_3 \geq \frac{1}{2} \rho_3^2 + 1, k_2 > J(1 + \frac{1}{2} \rho_2^2),$$

$$k_1 > J^2(1 + \frac{1}{2}\rho_2^2)/[k_2 - J(1 + \frac{1}{2}\rho_2^2)],$$

$$k_4 = 10.$$

则有如下结论:

1) $w=0$ 时, 由式(28)有

$$\dot{V} \leq -\tilde{x}^T Q \tilde{x},$$

$$Q = \text{diag}\left\{\frac{P_{12}}{J}(K + \Delta K), B + \Delta B, 1, 1\right\},$$

$$\tilde{x} = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ z_4]^T,$$

则闭环系统在原点渐近稳定, 即当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\theta \rightarrow \theta^*, \omega \rightarrow \omega^*, i_{dr} \rightarrow i_{dr}^*, i_{qr} \rightarrow i_{qr}^*$.

2) $w \neq 0$ 时, 由式(28)有 $\dot{V} \leq \frac{\gamma^2}{2} w^T w - \frac{1}{2} z^T z$, 干扰量 w 被抑制在所设定的 L_2 增益 γ 指标下.

因此可以得出如下结论:

定理 1 对于风力发电系统(18), 考虑系统参数的不确定性及作用在其机械和电气动态描述上的外部干扰量, 设计一个具有鲁棒干扰抑制的转子交流励磁控制器式(25)和式(19), 能够使得闭环的风力发电系统实现安全可靠地最大限度捕获风能, 同时输出恒频恒压的电量.

4 仿真研究(Simulation research)

为了效验所设计控制器的有效性, 针对系统参数标称值选取如下的风力发电系统进行仿真研究:

$$R_r = 0.816 \ \Omega, L_s = L_r = 4 \text{ mH}, L_m = 146 \text{ mH},$$

$$n_p = 2, J = 5000 \text{ kg} \cdot \text{m}^2, B = 30, K = 20,$$

$$R = 12 \text{ m}, n_g = 80, f_0 = 50 \text{ Hz}, U_s = 220 \text{ V},$$

$$Q^* = 350 \text{ var}, \rho = 1.25 \text{ kg/m}^3.$$

不确定参数界均取为其标称值的50%, 即 $|\Delta a| \leq 0.41, |\Delta B| \leq 15, |\Delta K| \leq 10$. 系统切入风速为 $v_{in} = 4 \text{ m/s}$, $v_b = 8 \text{ m/s}$, 额定风速 $v_r = 16 \text{ m/s}$, 切出风速 $v_{out} = 30 \text{ m/s}$. 则可设计出鲁棒控制器如式(25)和式(19).

不失一般性, 仿真结果只给出一段风速内, 风力发电闭环系统的运行情况. 假定风速的变化为:

$$v = \begin{cases} 13 \text{ m/s}, & 0 \leq t < 30 \text{ s}, \\ 18 \text{ m/s}, & 30 \text{ s} \leq t < 90 \text{ s}, \\ 13 \text{ m/s}, & 90 \text{ s} \leq t \leq 120 \text{ s}, \end{cases}$$

则在此风速段内, 所希望的风力机转速和最大捕获的风能曲线如图3所示. 图4给出了系统参数摄动取 $R_r = 0.35, \Delta B = 10, \Delta K = 5$, 干扰量为 $w_1 = 100, w_2 = w_3 = 0.1 \sin t$ 时, 风力机转速、发电机转子 d, q 轴电流的响应情况, 如图中实线所示, 虚线为期望值曲线. 图5为转子上所加的交流励磁电压, 此时鲁棒控制器各参数选为 $\gamma = 0.1, \rho_1 = \rho_2 = \rho_3 = \rho_4 = 0.01, k_1 = 3000, k_2 = 6000, k_3 = 15,$

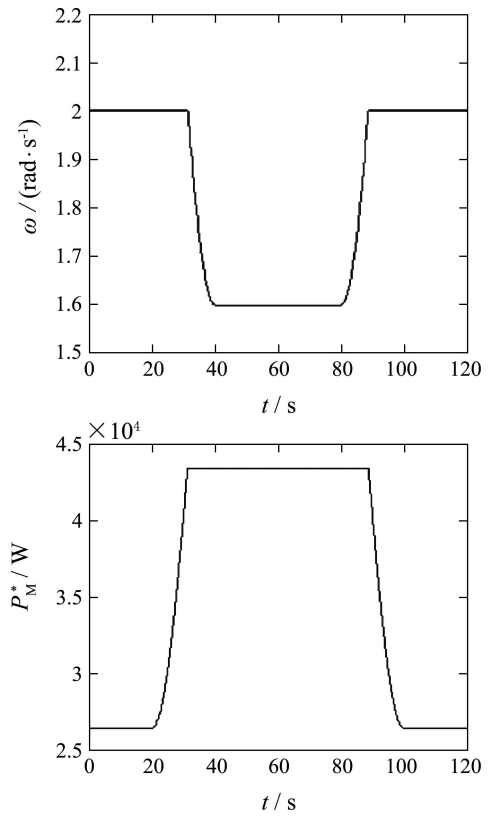
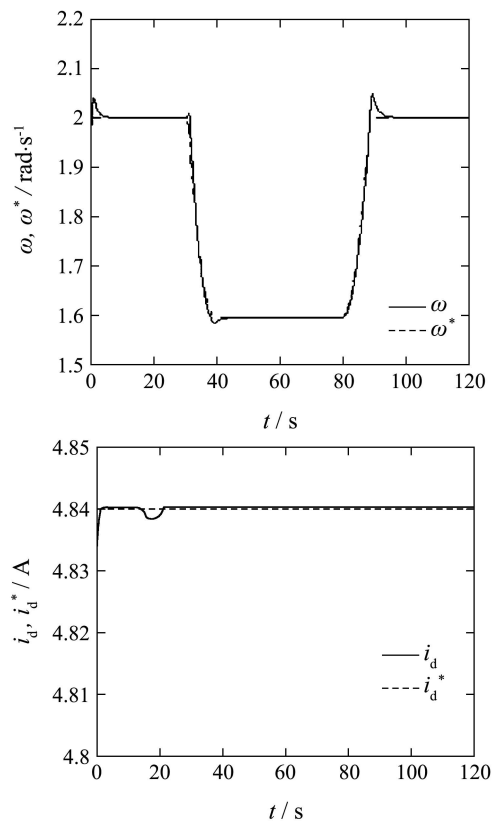


图3 希望的风力机转速 ω^* 和最大捕获的风能 P_M^*
Fig. 3 Desired speed ω^* and mechanical power P_M^*



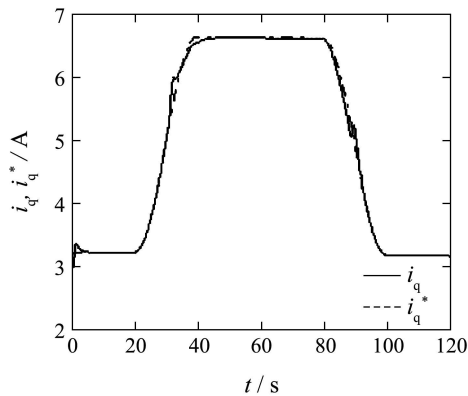
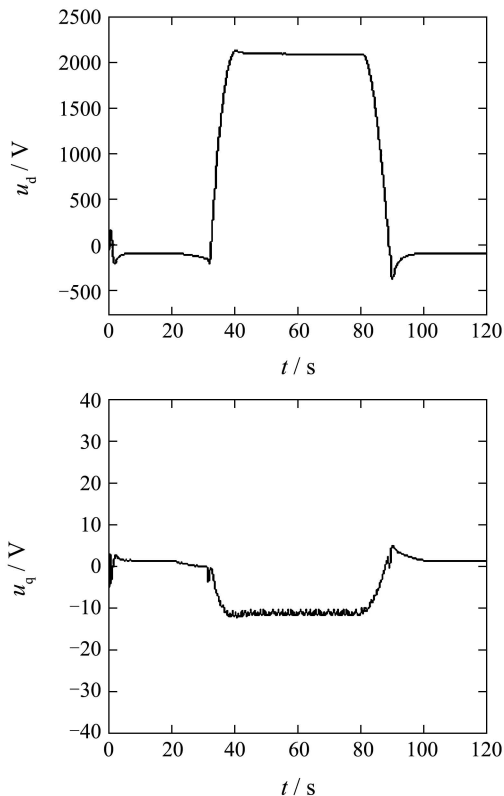
图4 风力机转速、发电机转子 d, q 轴电流及其期望值Fig. 4 Speed of the wind turbine, currents of d axis and q axis of the rotor and their desired values

图5 转子交流励磁控制器的输出

Fig. 5 The output of the AC excitation controller of rotor

仿真结果表明,在所设计的鲁棒控制器作用下,风速变化时,风力机能够按最大捕获风能的风速曲线运行,发电机能将系统所捕获的最大风能转换为恒频恒压的电输出,满足电网的要求。另外,由仿真图4还可以看出,在存在系统参数摄动和外界干扰情况下,系统的各状态量均能渐近地跟踪所期望的曲线,说明所设计的控制器保证系统具有很好的鲁棒稳定性和动态性能。

5 结论(Conclusion)

研究了双馈型变速恒频风力发电系统的鲁棒控

制问题。针对双馈发电机特点,利用定子磁场定向的矢量变换技术,建立了风力发电系统的非线性数学描述,采用现代非线性鲁棒控制技术,设计了能实现发电机输出有功功率和无功功率解耦控制的具有鲁棒干扰抑制作用的转子交流励磁控制器。理论证明和仿真结果均表明,在风速变化、系统参数存在不确定和外部干扰的情况下,闭环系统各状态量均能渐近地跟踪所期望的曲线。即证明所设计的控制器可以保证风力发电系统实现安全可靠地最大获取风能的运行,并且输出恒频恒压的电量。

参考文献(References):

- [1] 刘其辉, 贺益康, 赵仁德. 变速恒频风力发电系统最大风能追踪控制[J]. 电力系统自动化, 2003, 23(27): 62–67.
(LIU Qihui, HE Yikang, ZHAO Rende. The maximal wind-speed tracing control of a variable-speed constant-frequency wind-power generation system[J]. *Acta Energine Solaris Sinica*, 2003, 23(27): 62–67.)
- [2] 陈学顺, 许洪华. 双馈电机变速恒频风力发电运行方式研究[J]. 太阳能学报, 2004, 25(5): 582–586.
(CHEN Xueshun, XU Honghua. Investigation of variable-speed constant frequency wind power generator operation[J]. *Acta Energine Solaris Sinica*, 2004, 25(5): 582–586.)
- [3] 赵栋利, 郭金东, 许洪华. 变速恒频双馈风力发电机有功、无功解耦控制研究与实现[J]. 太阳能学报, 2006, 27(2): 174–179.
(ZHAO Dongli, GUO Jindong, XU Honghua. The study and realization on the decoupling control of active and reactive power of a variable-speed constant-frequency doubly-fed induction generator[J]. *Acta Energine Solaris Sinica*, 2006, 27(2): 174–179.)
- [4] TAPIA A, TAPIA G, OSTOLAZA J X, et al. Modeling and control of a wind turbine driven doubly fed induction generator[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2003, 18(2): 194–204.
- [5] 贾要勤, 曹秉刚, 杨仲庆. 风力发电系统的 H_∞ 鲁棒控制[J]. 太阳能学报, 2004, 25(1): 85–91.
(JIA Yaoqin, CAO Binggang, YANG Zhongqing. H_∞ robust control of wind generation system[J]. *Acta Energine Solaris Sinica*, 2004, 25(1): 85–91.)
- [6] 杨金明, 吴捷, 董萍, 等. 基于无源性理论的风力机最大风能捕获控制[J]. 太阳能学报, 2003, 24(5): 724–728.
(YANG Jinming, WU Jie, DONG Ping, et al. Maximum wind energy capture control with passivity-based theory[J]. *Acta Energine Solaris Sinica*, 2003, 24(5): 724–728.)
- [7] SONG Y D, DHINAKARAN B, BAO X Y. Variable speed control of wind turbines using nonlinear and adaptive algorithms[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2000, 85(3): 293–308.

作者简介:

任丽娜 (1982—), 女, 硕士研究生, 研究方向为非线性鲁棒自适应控制、风力发电系统控制, E-mail: renlina0419@yahoo.com.cn;

焦晓红 (1966—), 女, 教授, 博士生导师, 目前研究方向为非线性系统、时滞系统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;

邵立平 (1983—), 男, 硕士研究生, 研究方向为非线性鲁棒控制、轧机自动控制。