

6-1-2020

Parameter Identification and L_2 Gain Based Backstepping Control Strategy for PMSG

Zengqiang Mi

State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, Electricity Department of North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

Xudong Guo

State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, Electricity Department of North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

Yu Yang

State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, Electricity Department of North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the [Artificial Intelligence and Robotics Commons](#), [Computer Engineering Commons](#), [Numerical Analysis and Scientific Computing Commons](#), [Operations Research](#), [Systems Engineering and Industrial Engineering Commons](#), and the [Systems Science Commons](#)

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

Parameter Identification and L_2 Gain Based Backstepping Control Strategy for PMSG

Abstract

Abstract: In allusion to the simultaneous time-varying characteristics of power source torque and moment of inertia in permanent magnet synchronous motor based mechanical elastic energy storage system, a *parameter identification and L_2 gain based backstepping control strategy* was proposed. Firstly, *Time-varying moment of inertia and input torque* were simultaneously identified through the *least squares algorithm with forgetting factor*. Then, *on the basis of identification results and combining backstepping control and L_2 gain disturbance suppression method*, a *nonlinear backstepping controller* was designed against *identification errors and parameters perturbation* to ensure the rotating speed and output currents of PMSG to track the given references. The simulation results show that the outputs of PMSG can track the target values rapidly and the proposed strategy has a certain anti-interference ability.

Keywords

mechanical elastic energy storage system (MEES), least squares algorithm with forgetting factor, backstepping control, L_2 gain, PMSG

Recommended Citation

Mi Zengqiang, Guo Xudong, Yu Yang. Parameter Identification and L_2 Gain Based Backstepping Control Strategy for PMSG[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(1): 144-153.

基于参数辨识及 L_2 增益的 PMSG 反步控制策略研究

米增强, 郭旭东, 余洋

(华北电力大学电力系, 新能源电力系统国家重点实验室, 河北 保定 071003)

摘要: 针对永磁电机式机械弹性储能机组动力源扭矩和转动惯量同时变化特性, 提出了一种基于辨识算法及 L_2 增益的反步控制策略。通过带遗忘因子的最小二乘算法同时辨识实时变化的转动惯量和输入转矩, 根据辨识结果, 考虑辨识误差以及发电机参数变化带来的不确定特点, 结合反步控制和 L_2 增益干扰抑制方法设计非线性反步控制器, 保证永磁同步发电机的转速和输出电流能够以给定参考值运行。仿真结果表明: 该控制策略能够较好地实现永磁同步发电机输出值对目标值的快速跟踪, 且具有一定的抗干扰能力。

关键词: 机械弹性储能机组; 带遗忘因子最小二乘辨识算法; 反步控制; L_2 增益; 永磁同步发电机
中图分类号: TP273 文献标识码: A 文章编号: 1004-731X(2017)01-0144-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.201701020

Parameter Identification and L_2 Gain Based Backstepping Control Strategy for PMSG

Mi Zengqiang, Guo Xudong, Yu Yang

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,
Electricity Department of North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: In allusion to the simultaneous time-varying characteristics of power source torque and moment of inertia in permanent magnet synchronous motor based mechanical elastic energy storage system, a parameter identification and L_2 gain based backstepping control strategy was proposed. Firstly, Time-varying moment of inertia and input torque were simultaneously identified through the least squares algorithm with forgetting factor. Then, on the basis of identification results and combining backstepping control and L_2 gain disturbance suppression method, a nonlinear backstepping controller was designed against identification errors and parameters perturbation to ensure the rotating speed and output currents of PMSG to track the given references. The simulation results show that the outputs of PMSG can track the target values rapidly and the proposed strategy has a certain anti-interference ability.

Keywords: mechanical elastic energy storage system (MEES); least squares algorithm with forgetting factor; backstepping control; L_2 gain; PMSG

引言

当前, 风力发电、光伏发电等新能源发电技术在我国发展迅速, 并逐步推广应用, 但由于这些绿

色电源所固有的“间接性”、“波动性”等特点, 其并网势必会给电网的功率平衡和电网调度带来巨大的挑战^[1-2]。而传统的增加调峰备用容量的方法需要耗费大量的人力物力, 因此, 设计一种大容量的电能储存装置, 对于实现电力系统的削峰填谷, 解决大规模新能源并网问题具有十分重要的意义。基于此, 文献[3-4]提出了一种新的储能技术, 构建了永磁电机式机械弹性储能机组。其基本工作原理是在电网低负荷时将电能转换为储能箱的弹性势能



收稿日期: 2015-11-19 修回日期: 2016-03-04;
基金项目: 国家自然科学基金(51407077), 国家电网公司总部科技项目(5204BB16000F), 高等学校博士学科点专项科研基金(优先发展领域)(20120036130001), 中央高校基本科研业务费(2014MS93);
作者简介: 米增强(1960-), 男, 河北石家庄, 硕士, 博导, 研究方向为新能源电力系统与智能电网和机械弹性储能机组技术等。

<http://www.china-simulation.com>

储存起来, 然后在电力高负荷阶段, 再将机械能转化为电能, 通过变流器实现并网。由于机械弹性储能机组是通过涡簧的弹性形变转换来实现, 针对涡簧质量大、惯性高的物理特性和力矩的时变性, 前期选用永磁同步发电机 (Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG) 作为能量转换执行机构^[5], 为保证机组的安全运行和储能机构的循环使用寿命, PMSG 的转速控制极为重要。

永磁同步发电机系统是一个多变量, 强耦合的非线性系统, 对电机的精确数学模型极度依赖的经典矢量控制策略难以实现系统的高精度性能。目前, 基于现代控制理论的非线性控制方法越来越受到关注, 其中反步法^[6]是在非线性逆系统法基础上提出的一种针对不确定非线性系统的控制方法, 特别适合不满足匹配条件的控制系统。目前已广泛应用于电机领域^[7-8], 对于控制精度要求高的机械弹性储能控制系统, 反步法除了要考虑到 PMSG 参数的变化的同时, 还需兼顾机械弹性储能机组的特性。发电过程中, 随着储能箱涡卷弹簧的释放, 输入转矩随时间逐渐减小, 转动惯量逐渐增大^[9], 而且连续时变的转动惯量和输入转矩难以通过常规的方法进行观测。因此, 如何应对转动惯量以及转矩的时变特性以及参数摄动带来的一系列问题, 成为机械弹性储能机组发电机转速控制的棘手问题。文献中多数采用参数辨识或者自适应的方法跟踪参数的变化, 例如, 文献[10-11]通过转动惯量辨识算法获取转动惯量或负载转矩, 文献[12]通过自适应算法获取转动惯量, 文献[13]在发电机参数不确定情况下, 提出了直驱型永磁同步风力发电机混沌运动下的反步自适应控制算法。然而, 这些算法提到的转动惯量和转矩是在外部干扰情况下的突变而不是实时改变的, 而关注 PMSG 在动力源输入转矩和转动惯量同时变化的情况并且考虑电机参数存在摄动的控制方法则更少。因此, 本文提出一种基于在线辨识算法和 L_2 增益非线性反步控制策略, 通过带遗忘因子的最小二乘辨识算法在线同时辨识出输入转矩和转动惯量, 基于辨识结果, 考虑

辨识误差带来的干扰以及发电机运行中的参数变化问题, 结合反步设计方法和 L_2 增益干扰抑制策略设计非线性反步控制器以实现闭环控制。仿真结果表明, 在辨识误差干扰、参数摄动的情况下, 所设计的闭环控制器能够保证系统动态过程中对控制目标进行快速追踪。

1 控制策略设计

1.1 储能箱数学模型

图 1 给出了储能箱内涡卷弹簧的受力原理图, 涡簧片一端与转轴相连, 一端在储能箱内壁处固定, 使得涡卷弹簧在转轴的力矩 T_L 以及固定点处轴承的反作用力矩下能够围绕转轴旋转拧紧, 经由理论分析发现, 与力矩 T_L 相比, 反作用力矩是可以忽略不计的, 因此, 整个涡簧片上每个截面所收到的力矩都是相同的 T_L 。在涡簧上任意一点处取单位长度 dL , 设其受力前初始状态下的曲率半径为 ρ_0 , 在力矩 T_L 的作用下曲率半径为 ρ_1 , 则作用力矩 T_L 可由下式表示:

$$T_L = EI \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_2} \right) \quad (1)$$

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (2)$$

其中: E 为涡簧材料的弹性模量; I 为横截面的惯性矩; b , h 分别为涡簧片的宽度和厚度。

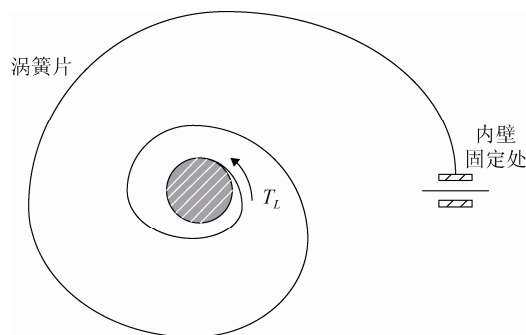


图 1 储能箱内部涡簧片受力分析图
Fig.1 Stress analysis figure of spiral spring installed in energy storage box

假定在外力矩 T_L 施加前, 所取涡簧段 dL 相对于曲率中心的角度为 $d\theta_0$; 受到力矩作用后, 其相

对曲率中心的角度为 $d\theta_1$ 。则：

$$d\theta_0 = \frac{dL}{\rho_0} \quad (3)$$

$$d\theta_1 = \frac{dL}{\rho_1} \quad (4)$$

那么在外力矩 T_L 的作用下，忽略涡簧厚度对变形角度的影响，转角增加值 φ 可由式(5)求得：

$$\varphi = \int_0^L d(\theta_1 - \theta_0) = \int_0^L \left(\frac{1}{\rho_1} - \frac{1}{\rho_0} \right) dL = \int_0^L \frac{T_L}{EI} dL = \frac{T_L L}{EI} \quad (5)$$

其中： L 为涡簧长度。由此，外力矩也就可以求出：

$$T_L = \frac{EI}{L} \varphi = \frac{Ebh^3}{12L} \varphi = \frac{Ebh^3}{12L} \omega t \quad (6)$$

1.2 永磁同步发电机的数学模型

由于永磁同步发电机具有结构简单，工作可靠，比功率大，发电效率高，低速运行时性能优越等众多优点，故选择其为 MEES 机组发电过程中的能量转换元件。假定电机的交直流电感相等，即 $L_d=L_q=L$ ，则永磁同步发电机在 $d-q$ 同步旋转坐标系下的数学模型为：

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L} i_q - n_p \omega_r i_d - \frac{n_p \phi_f}{L} \omega_r + \frac{1}{L} u_q \quad (7)$$

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L} i_d + n_p \omega_r i_q + \frac{1}{L} u_d \quad (8)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{T_b}{J} - \frac{3n_p \phi_f}{2J} i_q - \frac{B}{J} \omega_r \quad (9)$$

其中： u_d, u_q ，分别为 d, q 轴定子电压； i_d, i_q 分别为 d, q 轴定子电流； R_s 为电子电阻； L 为电子电感； n_p 为极对数； ω_r 为发电机旋转角速度； ϕ_f 为永磁磁通； T_b 为输入力矩，即储能箱弹性势能提供的外部力矩； J 为 MEES 机组的转动惯量； B 为粘性摩擦系数。

1.3 非线性控制器设计

1.3.1 机械弹性储能机组转动惯量及输入转矩的辨识

带遗忘因子的最小二乘算法在辨识时参数时，

收敛速度快，收敛精度高，适合在线计算，故选择该算法辨识式 MEES 机组转动惯量 J 以及输入转矩 T_b 。为简化辨识过程，粘性摩擦系数 B 忽略不计，对方程(9)进行离散化处理：

$$\frac{(\omega_r(k+1) - \omega_r(k))}{T_s} = \frac{1}{J(k)} T_b(k) - \frac{3n_p \phi_f}{2J(k)} i_q(k) \quad (10)$$

其中： T_s 为取样时间间隔。令：

$$\Delta \omega_r(k) = \omega_r(k+1) - \omega_r(k) \quad (11)$$

由式(4)可得：

$$i_q(k) T_s = -\frac{2J(k)}{3n_p \phi_f} \Delta \omega_r(k) + \frac{2T_L(k)}{3n_p \phi_f} T_s = A(k)^T B(k) \quad (12)$$

其中： $A(k) = [-\Delta \omega_r(k), T_s]^T$ ， $B(k) = \left[\frac{2J(k)}{3n_p \phi_f}, \frac{2T_b(k)}{3n_p \phi_f} \right]^T$ 。

带遗忘因子的最小二乘算法如下：

$$\hat{B}(k+1) = \hat{B}(k) + C(k+1)(i_q(k+1)T_s - A(k+1)^T \hat{B}(k)) \quad (13)$$

$$C(k+1) = \frac{D(k)A(k+1)}{\alpha + A(k+1)^T D(k)A(k+1)} \quad (14)$$

$$D(k+1) = \frac{(D(k) - C(k+1)A(k+1)^T D(k))}{\alpha} \quad (15)$$

其中： $C(k+1)$ 为增益矩阵； $D(k+1)$ 为协方差矩阵； α 为遗忘因子， $\alpha \in (0, 1]$ ， α 太小会降低辨识精度， α 若取为 1 会出现“数据饱和”现象，可根据实际情况在 $[0.9, 1]$ 范围内合理选取^[14]。

辨识误差可用以下方程表示：

$$\tilde{\theta}_1 = \left(\frac{T_b}{J} \right) - \frac{T_b}{J} \quad (16)$$

$$\tilde{\theta}_2 = \left(\frac{1}{J} \right) - \frac{1}{J} \quad (17)$$

1.3.2 反步控制器设计

将在线辨识出来的转动惯量和输入转矩带入发电机模型得到：

$$\frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L} i_q - n_p \omega_r i_d - \frac{n_p \phi_f}{L} \omega_r + \frac{1}{L} u_q \quad (18)$$

$$\frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L} i_d + n_p \omega_r i_q + \frac{1}{L} u_d \quad (19)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \left(\frac{T_b}{J}\right) - \frac{3n_p\phi_f}{2J}i_q - \frac{B}{J}\omega_r \quad (20)$$

为方便计算, 上述动态模型可用式(21)代替:

$$\begin{aligned} \dot{i}_q &= -a_1 i_q - n_p \omega_r i_d - a_2 \omega_r + a_3 u_q \\ \dot{i}_d &= -a_4 i_d + n_p \omega_r i_q + a_5 u_d \\ \dot{\omega}_r &= a_6 - a_7 \omega_r - a_8 i_q \end{aligned} \quad (21)$$

其中, $a_1 = \frac{R_s}{L}$, $a_2 = \frac{n_p \phi_f}{L}$, $a_3 = \frac{1}{L}$, $a_4 = \frac{R_s}{L}$,
 $a_5 = \frac{1}{L}$, $a_6 = \left(\frac{T_b}{J}\right)$, $a_7 = \frac{B}{J}$, $a_8 = \frac{3n_p \phi_f}{2J}$ 。

辨识算法不可避免会产生误差, 此外, 在永磁同步发电机的运行过程中, 随着环境的变化或运行状况的变化, 电机的实际参数会在一定范围内发生变化, 比如电机运行时, 绕组温度每上升 25 °C, 其电阻阻值会上升 6%, 这些变化会导致电机在运行中控制性能的下降。因此考虑到辨识误差和参数摄动, 方程(15)可由式(22)来表示:

$$\begin{aligned} \dot{i}_q &= -(a_1 - \Delta a_1) i_q - n_p \omega i_d - a_2 \omega + a_3 u_q \\ \dot{i}_d &= -(a_4 - \Delta a_4) i_d + n_p \omega i_q + a_5 u_d \\ \dot{\omega} &= (a_6 - \tilde{\theta}_1) - (a_7 - \tilde{\theta}_2) \omega - (a_8 - \tilde{\theta}_2) i_q \end{aligned} \quad (22)$$

式中: Δa_1 和 Δa_4 为永磁同步发电机定子电阻变化引起的参数不确定性, θ_1 和 θ_2 为参数辨识带来的误差。

由以上分析可知, 系统的控制形成如下: 对于

转动惯量及输入转矩时变, 存在参数辨识误差, 参数摄动的永磁同步电机发电系统, 通过结合反步设计方法和 L_2 增益干扰抑制策略设计非线性反步闭环控制器 $u = [u_d \ u_q]^T$, 为控制输入, 使得在系统参数摄动, 辨识误差干扰以及输入转矩、转动惯量时变的情况下, 永磁同步发电机的转速能够较好的跟踪目标转速, 且其波动被限制在一定范围内。具体的控制原理框图如图 2 所示。

反步设计作为一种有效的非线性控制设计方法, 在处理非线性控制问题方面具有独特的优越性, 它是将构造李雅普诺夫函数与设计控制器相结合的一种回归设计方法, 通过复杂系统分解的最低阶次微分方程开始, 引入虚拟控制, 逐步设计满足要求的虚拟控制, 并最终推导出实际的控制律^[15]。设计过程如下:

Step 1, 定义:

$$\begin{aligned} x_1 &= i_q - i_q^*, x_2 = i_d - i_d^*, x_3 = \omega - \omega^*, u_1 = u_q - u_q^*, \\ u_2 &= u_d - u_d^*, u_3 = a_6 - a_6^* \end{aligned}$$

其中: i_q^* , i_d^* , ω^* , u_q^* , u_d^* , T_b^* 分别是 i_q , i_d , ω , u_q , u_d , T_b 的目标值。令 $\dot{i}_d^* = 0$, 可实现永磁同步发电机的近似解耦, 其中 ω^* 由发电机的目标转速确定。

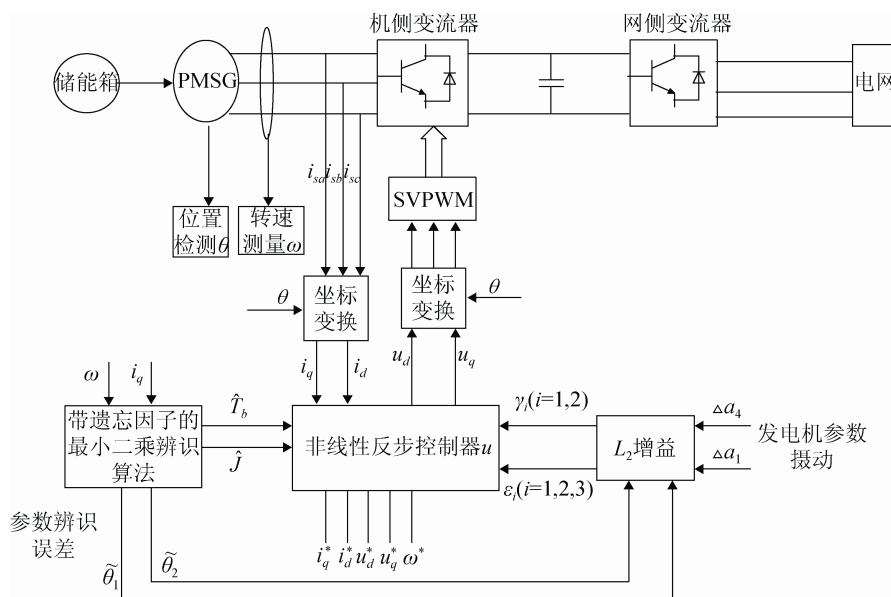


图 2 非线性反步控制器原理图

Fig.2 Schematic diagram of nonlinear backstepping controllers

则系统的整体误差方程为:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= -a_1x_1 + \Delta a_1x_1 - a_1i_q^* + \Delta a_1i_q^* - \\ & n_p(x_2x_3 + x_2\omega^*) - a_2x_3 - a_2\omega^* + \\ & a_3(u_1 + u_q^*) - \dot{i}_q^* \\ \dot{x}_2 &= -a_4x_2 + \Delta a_4x_2 + \\ & n_p(x_1x_3 + x_1\omega^* + x_3i_q^* + \omega^*i_q^*) + \\ & a_5(u_2 + u_d^*) \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_3 &= -\tilde{\theta}_1 - a_7x_3 + \tilde{\theta}_2x_3 - a_7\omega^* + \tilde{\theta}_2\omega^* - \\ & (a_8 + \tilde{\theta}_2)(x_1 + i_q^*) + u_3 + a_6^* - \dot{\omega}^* \end{aligned}$$

Step 2, 选取李雅普诺夫函数 V_1 如下:

$$V_1 = \frac{1}{2}x_1^2 \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \text{则 } \dot{x}_1 &= \dot{i}_q - \dot{i}_q^* = -a_1x_1 + \Delta a_1x_1 - a_1i_q^* + \\ & \Delta a_1i_q^* - n_p(x_2x_3 + x_2\omega^*) - \\ & a_2x_3 - a_2\omega^* + a_3(u_1 + u_q^*) - \dot{i}_q^* \end{aligned} \quad (25)$$

$$\text{其中, 令 } u_q^* = \frac{1}{a_3}[(a_1 - \Delta a_1)i_q^* + a_2\omega^* + \dot{i}_q^*] \quad (26)$$

$$\text{则: } \dot{V}_1 = x_1[-a_1x_1 - n_p(x_2x_3 + x_2\omega^*) - a_2x_3 + a_3u_1] + \Delta a_1x_1^2 \quad (27)$$

对 \dot{V}_1 中的不确定项作如下处理:

$$\Delta a_1x_1^2 \leq (\frac{\varepsilon_1^2}{2} + \frac{1}{2})x_1^2 \quad (28)$$

其中: ε_1 为可调参数, 且 $\varepsilon_1 > 0$ 。则 V_1 满足式(29):

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &\leq x_1[(\frac{1}{2} + \frac{\varepsilon_1^2}{2} - a_1)x_1 - n_p(x_2x_3 + x_2\omega^*) - \\ & a_2x_3 + a_3u_1] \end{aligned} \quad (29)$$

Step 3, 选取李雅普诺夫函数 V_2 如下:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}x_2^2 \quad (30)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_2 &= -a_4x_2 + \Delta a_4x_2 + \\ & n_p(x_1x_3 + x_1\omega^* + x_3i_q^* + \omega^*i_q^*) + a_5(u_2 + u_d^*) \end{aligned}$$

$$\text{令: } u_d^* = -\frac{1}{a_5}n_p\omega^*i_q^* \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \text{则: } \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + x_2[-a_4x_2 + p(x_1x_3 + x_1\omega^* + x_3i_q^*) + \\ & a_5u_2] + \Delta a_4x_2^2 \end{aligned} \quad (32)$$

对 \dot{x}_2 中的不定项作如下处理:

$$-\Delta a_4x_2^2 \leq (\frac{\varepsilon_2^2}{2} + \frac{1}{2})x_2^2 \quad (33)$$

其中: ε_2 为可调参数, 且 $\varepsilon_2 > 0$ 。那么:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &\leq \dot{V}_1 + x_2[(\frac{\varepsilon_2^2}{2} + \frac{1}{2} - a_4)x_2 + \\ & p(x_1x_3 + x_1\omega^* + x_3i_q^*) + a_5u_2] \end{aligned} \quad (34)$$

Step 4, 取李雅普诺夫函数 V_3 如下:

$$V_3 = V_1 + V_2 + \frac{1}{2}x_3^2 \quad (35)$$

则 \dot{V}_3 满足不等式:

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &\leq x_1[(\frac{1}{2} + \frac{\varepsilon_1^2}{2} - a_1)x_1 - n_p(x_2x_3 + x_2\omega^*) - \\ & a_2x_3 + a_3u_1] + x_2[(\frac{\varepsilon_2^2}{2} + \frac{1}{2} - a_4)x_2 + \\ & p(x_1x_3 + x_1\omega^* + x_3i_q^*) + a_5u_2] + \\ & x_3(-\tilde{\theta}_1 - a_7x_3 + \tilde{\theta}_2x_3 - a_7\omega^* + \\ & \tilde{\theta}_2\omega^* - (a_8 + \tilde{\theta}_2)(x_1 + i_q^*) + u_3 + a_6^* - \dot{\omega}^*) \end{aligned} \quad (36)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_3 &= -\tilde{\theta}_1 - a_7x_3 + \tilde{\theta}_2x_3 - a_7\omega^* + \tilde{\theta}_2\omega^* - \\ & (a_8 + \tilde{\theta}_2)(x_1 + i_q^*) + u_3 + a_6^* - \dot{\omega}^* \end{aligned} \quad (37)$$

$$\text{令: } a_6^* = \dot{\omega}^* + (a_8 + \tilde{\theta}_2)i_q^* - \tilde{\theta}_2\omega^* + a_7\omega^* \quad (38)$$

$$\text{则 } \dot{x}_3 = -\tilde{\theta}_1 - a_7x_3 + \tilde{\theta}_2x_3 - (a_8 + \tilde{\theta}_2)x_1 + u_3 \quad (39)$$

$$\text{那么 } \dot{V}_3 \leq x_1[(\frac{1}{2} + \frac{\varepsilon_1^2}{2} - a_1)x_1 - n_p(x_2x_3 + x_2\omega^*) -$$

$$\begin{aligned} & a_2x_3 + a_3u_1] + x_2[(\frac{\varepsilon_2^2}{2} + \frac{1}{2} - a_4)x_2 + \\ & n_p(x_1x_3 + x_1\omega^* + x_3i_q^*) + a_5u_2] + \\ & x_3(-a_7x_3 - a_8x_1 + u_3) - \tilde{\theta}_1x_3 + \tilde{\theta}_2x_3^2 - \tilde{\theta}_2x_1x_3 \end{aligned} \quad (40)$$

对 \dot{V}_3 中的辨识误差项作如下处理

$$-\tilde{\theta}_1x_3 \leq \frac{1}{2\gamma_1^2}x_3^2 + \frac{\gamma_1^2}{2}\tilde{\theta}_1^2 \quad (41)$$

$$\tilde{\theta}_2x_3^2 \leq (\frac{\varepsilon_3^2}{2} + \frac{1}{2})x_3^2 \quad (42)$$

$$-\tilde{\theta}_2x_1x_3 \leq \frac{1}{2\gamma_2}x_3^2 + \frac{\gamma_2^2}{2}x_1^2 \quad (43)$$

其中: ε_3 为可调参数, 且 $\varepsilon_3 > 0$, γ 为辨识误差对系统性能的影响被抑制在设定的 L_2 增益指标, 且 $\gamma > 0$ 。

则 \dot{V}_3 可表示为:

$$\begin{aligned}
V_3 \leq & x_1 \left[\left(\frac{1}{2} + \frac{\varepsilon_1^2}{2} - a_1 + \frac{\gamma_2^2}{2} \right) x_1 - n_p (x_2 x_3 + x_2 \omega^*) - \right. \\
& a_2 x_3 + a_3 u_1 \left. \right] + x_2 \left[\left(\frac{\varepsilon_2^2}{2} + \frac{1}{2} - a_4 \right) x_2 + \right. \\
& n_p (x_1 x_3 + x_1 \omega^* + x_3 i_q^*) + a_5 u_2 \left. \right] + \\
& x_3 \left[\left(\frac{1}{2\gamma_1^2} - a_7 + \frac{\varepsilon_3^2}{2} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2\gamma_2} \right) x_3 - \right. \\
& a_8 x_1 + u_3 \left. \right] + \frac{\gamma_1^2}{2} \tilde{\theta}_1^2 \quad (44)
\end{aligned}$$

如果式(44)中的 u_1 , u_2 , u_3 分别采取如下形式的控制规律:

$$\begin{aligned}
u_1 = & \frac{1}{a_3} \left[\left(-\frac{1}{2} - \frac{\varepsilon_1^2}{2} + a_1 - \frac{\gamma_2^2}{2} \right) x_1 + \right. \\
& n_p (x_2 x_3 + x_2 \omega^*) + a_2 x_3 - k_1 x_1 \left. \right] \quad (45)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
u_2 = & \frac{1}{a_5} \left[\left(-\frac{\varepsilon_2^2}{2} - \frac{1}{2} + a_4 \right) x_2 - \right. \\
& n_p (x_1 x_3 + x_1 \omega^* + x_3 i_q^*) - k_2 x_2 \left. \right] \quad (46)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
u_3 = & \left(-\frac{1}{2\gamma_1^2} + a_7 - \frac{\varepsilon_3^2}{2} - \frac{1}{2} - \frac{1}{2\gamma_2} \right) x_3 + \\
& a_8 x_1 - k_3 x_3 \quad (47)
\end{aligned}$$

则 \dot{V} 满足不等式(48):

$$\dot{V} \leq -k_1 x_1^2 - k_2 x_2^2 - k_3 x_3^2 + \frac{\gamma_1^2}{2} \tilde{\theta}_1^2 \quad (48)$$

由以上推导可知, 非线性闭环控制器 $u = (u_d, u_q)^T$ 可以求出:

$$u_q = u_1 + u_q^* \quad (49)$$

$$u_d = u_2 + u_d^* \quad (50)$$

1.3.3 稳定性分析

如果考虑评价信号, $z = [\theta_1 x_1 \ \theta_2 x_2 \ \theta_3 x_3]^T$, 其中 $\theta_i (i=1, 2, 3)$ 是加权系数, 则 V 的时间微分可描述如下:

$$\begin{aligned}
\dot{V} \leq & \frac{\gamma_1^2}{2} \tilde{\theta}_1^2 - \frac{1}{2} z^T z - \left(k_1 - \frac{1}{2} \theta_1^2 \right) x_1^2 - \\
& \left(k_2 - \frac{1}{2} \theta_2^2 \right) x_2^2 - \left(k_3 - \frac{1}{2} \theta_3^2 \right) x_3^2 \quad (51)
\end{aligned}$$

如果我们定义一个函数如下所示:

$$\begin{aligned}
Q(x_1, x_2, x_3) = & \left(k_1 - \frac{1}{2} \theta_1^2 \right) x_1^2 + \\
& \left(k_2 - \frac{1}{2} \theta_2^2 \right) x_2^2 + \left(k_3 - \frac{1}{2} \theta_3^2 \right) x_3^2 \quad (52)
\end{aligned}$$

并选取常数如下: $k_1 \geq \frac{1}{2} \theta_1^2, k_2 \geq \frac{1}{2} \theta_2^2, k_3 \geq \frac{1}{2} \theta_3^2$,

那么 $Q(x_1, x_2, x_3) \geq 0$, 即:

$$\dot{V} \leq \frac{\gamma_1^2}{2} \tilde{\theta}_1^2 - \frac{1}{2} z^T z - Q(x_1, x_2, x_3) \quad (53)$$

综上所述, 当选取式(49), (50)作为永磁同步发电机的状闭环控制器, 根据李雅普诺夫函数稳定性定理和 L_2 增益干扰抑制技术, 显然, 如果不考虑辨识误差, 永磁同步发电机闭环系统平衡点处是李雅普诺夫稳定的, 并且其原系统状态收敛。即当 $t \rightarrow \infty$ 时, 有 $x_i \rightarrow 0 (i=1, 2, 3)$; 考虑辨识误差的情况下干扰量对系统性能的影响被抑制在一定的指标之下, 既有 $\int_0^T \|z\|^2 dt \leq \gamma_1^2 \int_0^T \|\tilde{\theta}_1\|^2 dt, \forall T > 0, \forall w$ 。

2 仿真与分析

为了方便推导, 本文用连续模型设计了控制器, 实际全部仿真过程是离散的。

基于以上分析, 在 MATLAB 用 m 文件编程, 并对本文永磁同步发电机的发电过程转速控制策略进行了仿真分析。

仿真中永磁同步电机的参数选取如下: 永磁磁通 $\varphi_f=0.8$ wb, 交直轴等效电感 $L=0.033$ H, 定子电阻 $R=2.875$, 粘滞系数 $B=0.002$ 。考虑到实际运行工况中系统阻尼系数和定子电阻受温度等因素的影响会产生一定的摄动, 在此取不确定参数摄动的界值为其标称值的 50%, 即 $|\Delta a_1| = |\Delta a_4| \leq 43.5$ 。非线性闭环控制器的可调参数选取如下: $K_1=100, K_2=1, K_3=100, \varepsilon_1=\varepsilon_2=5, \varepsilon_3=0.2, \gamma_1=\gamma_2=0.1$, 仿真步长设置为 0.001 s。

2.1 辨识仿真

为了使仿真过程更加接近实际情况, 在仿真中转动惯量和转矩的理论计算值基础上加入了 10% 的白噪声。仿真结果如图 3 所示, 从仿真曲线可以看出, 参数辨识约在 0.2 s 追踪上理论计算值。辨识存在一定误差, 但在可接受范围内, 总体上能够同时快速跟踪转动惯量和转矩的变化。

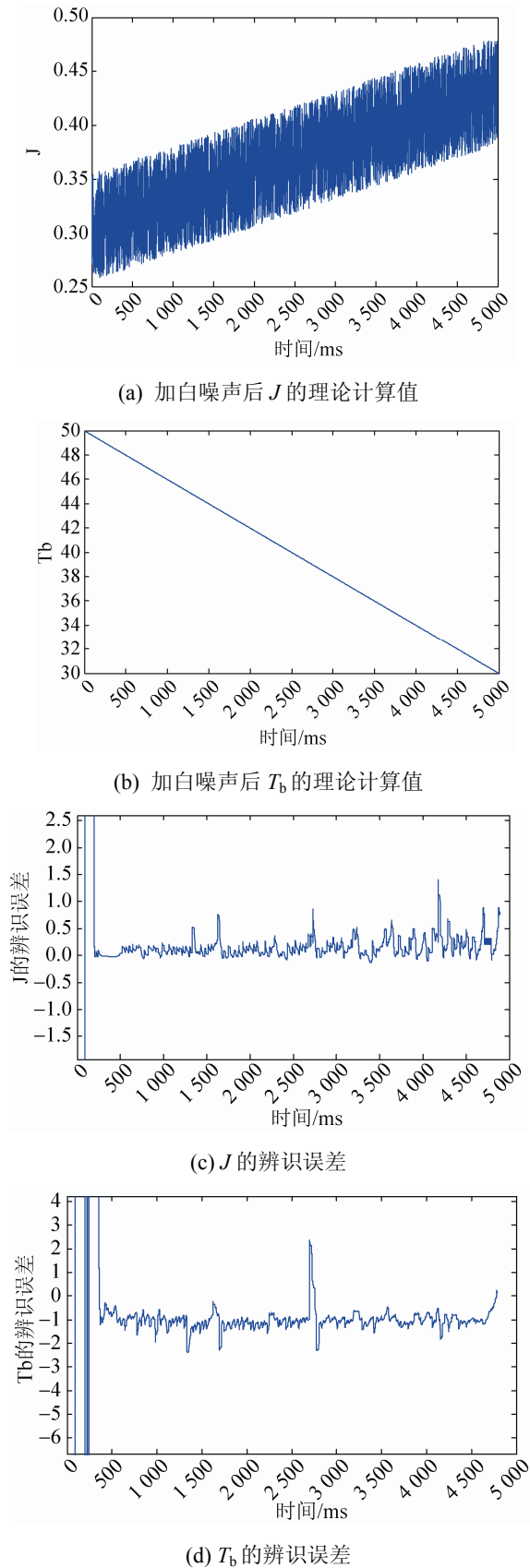


图3 辨识仿真结果

Fig.3 Simulation results of identification

2.2 控制结果仿真

2.2.1 L_2 增益干扰抑制效果仿真

仿真部分首先设置了有参数摄动和无参数摄动两种情况的对比以体现本文干扰被抑制在可接受范围，由于辨识误差是算法中客观存在的，不在人为设置无误差干扰情况进行对比。由于本文的控制目标是发电机转速，故将转速控制性能作为仿真结果进行对比。仿真中给定的参数摄动为 $|\Delta a_1| = |\Delta a_4| = 43.5$ 。目标转速给定值为 600 r/min。运行时间为 5 s。仿真结果如图 4 所示。显然，不加参数摄动时，转速能够更加平稳的跟踪目标指令，误差更小；在参数摄动情况下，在 L_2 增益对干扰的抑制下，系统仍然稳定，跟踪误差小于 1%，在允许范围内，说明了该策略的有效性。

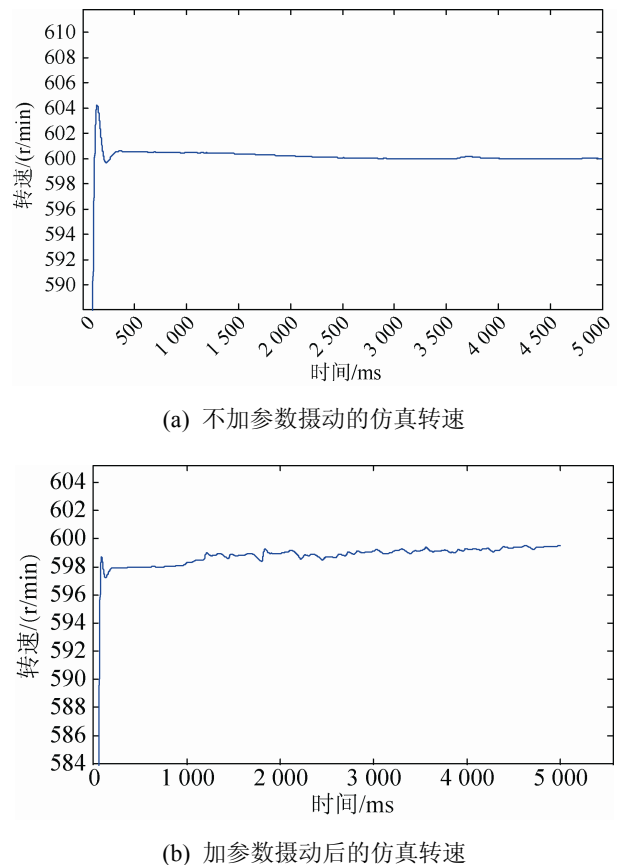


图4 L_2 增益干扰抑制效果仿真

Fig.4 Simulation of L_2 gain based interference suppression effect

2.2.2 L_2 增益干扰抑制效果仿真

为了更好地体现所提出策略的控制性能, 分别设置了稳态与动态两组仿真, 仿真中给定的参数扰动为 $|\Delta a_1| = |\Delta a_4| = 43.5$ 。仿真时间设置为 10 s。

(1) 稳态仿真: 给定转速为 600 r/min, 仿真结果如图 5 所示。由于白噪声和辨识误差的影响, 且由前文推导可知 q 轴参考电流追踪辨识转矩, 与输入转矩成正比, 所以仿真中 q 轴电流存在波动, 输出功率也就存在一定波动。永磁同步发电机大约在 0.1 s 左右的时候追踪上了指定转速, 速度快, 最大超调和波动小于 1%, 辨识误差和发电机参数摄

动的影响被降到最低, 系统鲁棒性较强。定子 d 轴电流为 0, 由此可见, 控制目标能够快速的跟踪给定信号。

(2) 动态仿真 2: 0~5 s, 给定转速为 600 r/min 时, 5~10 s, 给定转速 550 r/min, 仿真结果如图 6 所示。在发电运行阶段, 改变转速指令值, 发电机都能够迅速追踪目标转速, 仿真动态响应快, 由于改变指令造成一定时间辨识追踪不准确, q 轴电流和输出功率有短时间的波动, 速度迅速跟踪指令, 调整时间小于 0.1 s, 超调小于 1%, 可以体现设计系统的控制性能。

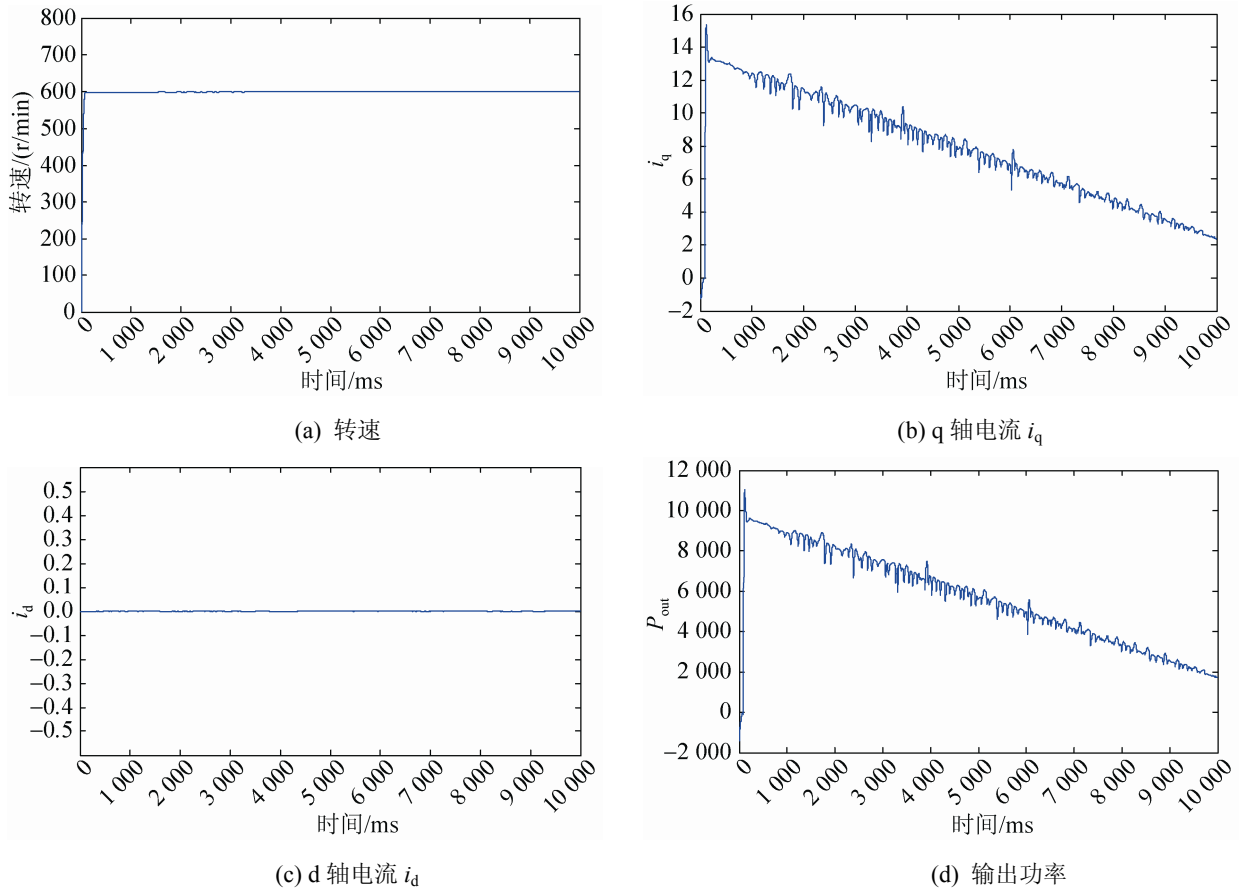
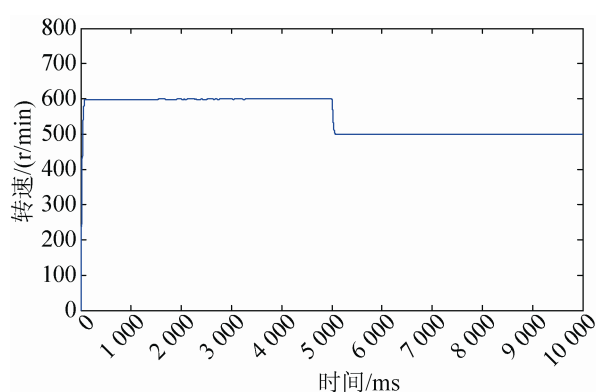
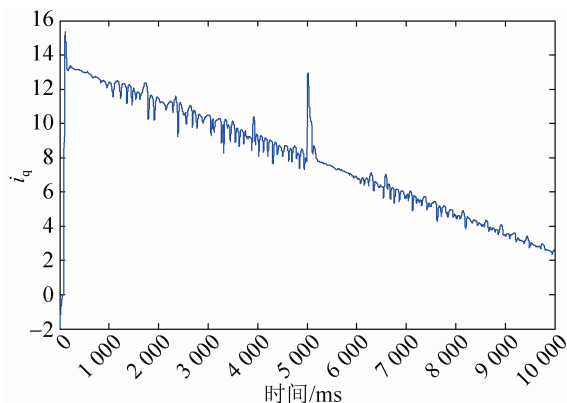
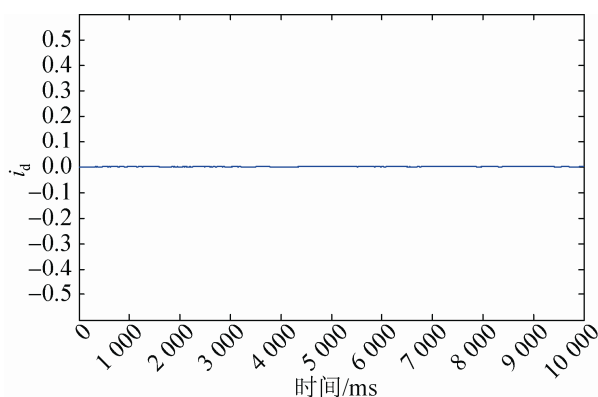
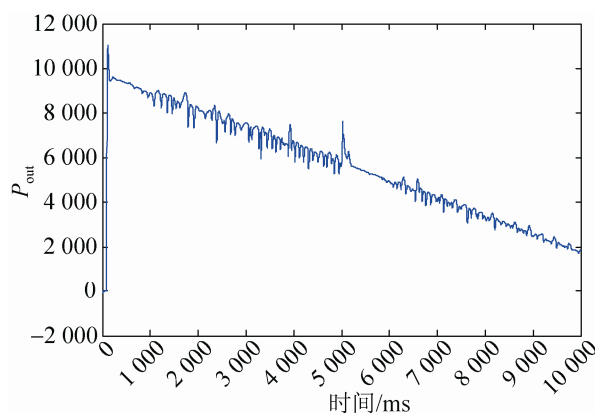


图 5 稳态运行时仿真结果

Fig.5 Simulation results of steady-state operation



(a) 转速

(b) q 轴电流 i_q (c) d 轴电流 i_d 

(d) 输出功率

图6 动态运行时仿真结果

Fig.6 Simulation results of dynamic-state operation

3 结论

通过研究得出以下结论:

(1) 在转动惯量和输入转矩时变、辨识误差干扰以及发电机参数摄动的情况下,所设计的闭环控制器能够保证系统的全局渐近稳定;

(2) 所提出的控制策略实现了发电机转速及电流能够对给定参考值的快速准确跟踪。 L_2 增益将辨识误差以及发电机参数变化带来的波动抑制到了可接受范围内;

(3) 在运行中可以实现发电机的动态控制,改变转速指令值,发电机能够迅速追踪目标转速,仿真动态响应快。

参考文献:

[1] 吴俊,李建设,周剑,等. 风力发电并网对电网的影响

[J]. 南方电网技术, 2010, 4(5): 48-52. (WU Jun, LI Jianshe, ZHOU Jian, et al. Influence of Wind Power Generation Integrating into Power Grids [J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(5): 48-52.)

[2] 陈炜,艾欣,吴涛,等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 26-32. (CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26-32.)

[3] 米增强,余洋,王璋奇,等. 永磁电机式机械弹性储能机组及其关键技术初探 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 26-36. (MI Zengqiang, YU Yang, WANG Zhangqi, et al. Preliminary Exploration on Permanent Magnet Motor Based Mechanical Elastic Energy Storage Unit and Key Technical Issues [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 26-36.)

[4] 余洋,米增强,吴婷,等. 永磁电机式机械弹性储能机组储能运行控制策略研究 [J]. 储能科学与技术, 2012,

- 1(1): 69-73.(YU Yang, MI Zengqiang, WU Ting, et al. Control strategy of energy storage operation for permanent magnet motor based mechanical elastic energy storage unit [J]. Energy Storage Science and Technology, 2012, 1(1): 69-73.)
- [5] 吴婷. 永磁电机式机械弹性储能机组建模与储能运行控制 [D]. 保定: 华北电力大学, 2012.(Ting Wu. Modeling and Control of Energy Storage Operation for Permanent Magnet Motor Based Mechanical Elastic Energy Storage Unit [D]. Baoding, China: North China Electric Power University, 2012.)
- [6] P V Kokotovic, A S Morse. Adaptive Output-feedback Control of A Class of Nonlinear System [C]// Proceedings of the 30th IEEE Conference on Decision and Control. USA: IEEE, 1991, 2(2): 1082-1087.
- [7] 刘栋良, 王家军, 崔丽丽. 永磁同步电机参数自适应调速控制 [J]. 电工技术学报, 2011, 26(8): 159-165. (Liu Dongliang, Wang Jiajun, Cui Lili. Speed Tracking Control of Permanent Magnet Synchronous Motors With Adaptive Parameters [J]. Transactions Of China Electrotechnical Society, 2011, 26(8): 159-165.)
- [8] 潘德栋. 永磁同步电机的自适应反推控制研究 [D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2014.(Pan Dedong. Research On Adaptive Backstepping Control System Of Permanent Magnet Synchronous Motor [D]. Shenyang, China: Shenyang University of Technology, 2014.)
- [9] 车一鸣. 双馈电机式机械弹性储能机组模型及其控制方法研究 [D]. 保定: 华北电力大学, 2013.(Yiming Che. Model and Control methods of the Doubly-fed motor Based Mechanical Elastic Energy Storage Unite [D]. Baoding, China: North China Electric Power University, 2013.)
- [10] Choi J W, Lee S C, Kim H G. Inertia identification algorithm for high-performance speed control of electric motors [J]. IEE Proceedings Electric Power Applications (S1350-2352), 2006, 153(3): 379-386.
- [11] Z Wang, C Wang, X Qi, et al. Study on Load Torque Identification On-line Based on Vector Control of Saliency PMSMs [J]. Procedia Engineering (S1877-7058), 2011, 23(5): 89-94.
- [12] 朱汉未. 永磁同步电机的自适应反推控制策略研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2013.(Zhu Hanwei. The Research on Adaptive Backstepping Control Strategy of Permanent Magnet Synchronous Motor [D]. Hangzhou, China: ZheJiang University, 2013.)
- [13] 郑刚, 邹见效, 徐红兵, 等. 直驱型永磁同步风力发电机组中混沌运动的反步自适应控制 [J]. 物理学报, 2011, 60(6): 113-120.(Zheng Gang, Zou Jianxiao, Xu Hongbing, et al. Adaptive backstepping control of chaotic property in direct-driven permanent magnet synchronous generators for wind power [J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(6): 113-120.)
- [14] J J Wang, G Z Zhao, J Qiu, et al. Position tracking control of permanent magnet synchronous motor servo system [C]// World Congress on Intelligent Control & Automation, Hangzhou, China. USA: IEEE, 2004, 5(6): 4512-4515.
- [15] 钱苗旺. 基于现代控制理论的永磁同步电机控制研究 [D]. 北京: 中国矿业大学, 2013.(Qian Miaowang. Study on the Control of Permanent Magnet Synchronous Machine Based on Modern Cybernetic [D]. Beijing, China: China University of Mining and Technology, 2013.)

(上接第143页)

- [17] 张昱, 张明智, 杨镜宇, 等. 一种基于OODA环的武器装备体系建模方法 [J]. 系统仿真学报, 2013, 25(增1): 6-11.(ZHANG Y, ZHANG M Z, YANG J Y, et al. Modeling Method for Weapon System of Systems Based on OODA Loop [J]. Journal of System Simulation, 2013, 25(S1): 6-11.)
- [18] Tony Allard, Slava Shekh. Hierarchical Multi-agent Distribution Planning [M]//M Thielscher, D Zhang (Eds.), AI 2012, LNCS 7691. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012: 755-766.
- [19] Jun Hu, Chun Guan, Maoguang, et al. Wang2Model of Emotional Agent [M]// Z Shi, R Sadananda (Eds.), PRIMA 2006, LNAI 4088. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006: 534-539.
- [20] 杜坚. 多Agent强化学习及其应用研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2011. (DU J.Research of Multi-Agent Reinforcement Learning and its Application [D]. Xi'an: Xidian University, 2011.)
- [21] 阿卜杜拉. 基于加权经验共享的多Agent强化学习的应用研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2012.(Abdulai I. Multi-Agent Reinforcement Learning Through Weighted Experience Sharing [D]. Changsha, China: Central South University, 2012.)