

11-20-2019

## Adaptive Backstepping Control Based Closed-loop $I/f$ Control of Sensorless Permanent Magnet Synchronous Generator

Chang Da

*1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, Electricity Department of North China Electric Power University, Baoding 071003, China;; 2. Hebei Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Micro-grid, Baoding 071003, China;;*

Yu Yang

*1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, Electricity Department of North China Electric Power University, Baoding 071003, China;; 2. Hebei Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Micro-grid, Baoding 071003, China;;*

Zengqiang Mi

*1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, Electricity Department of North China Electric Power University, Baoding 071003, China;; 2. Hebei Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Micro-grid, Baoding 071003, China;;*

Xiaoming Zheng

*1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, Electricity Department of North China Electric Power University, Baoding 071003, China;; 2. Hebei Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Micro-grid, Baoding 071003, China;;*

*See next page for additional authors*

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.

---

# Adaptive Backstepping Control Based Closed-loop $I/f$ Control of Sensorless Permanent Magnet Synchronous Generator

## Abstract

**Abstract:** A novel strategy applied closed-loop adaptive back-stepping control to permanent magnet synchronous generator (PMSG) is proposed targeting the problem of the modification of torque for mechanical elastic energy storage (MEES) system utilizing PMSG as power source. *This paper establishes the mathematical model of MEES system and PMSG, and presents the closed-loop adaptive backstepping control which makes the angle between the dq axis oriented by the current of stator and the dq axis oriented by the rotor a constant value via the speed and current closed-loop based on the analysis of open-loop  $I/f$  control.* The closed-loop adaptive back-stepping control can suppress the speed fluctuation, sensorless, overcurrent and improve the PMSG robustness by identifying the stator resistance and inductance of generator. The ideal control result can be proved in the state of startup and steady operation of PMSG.

## Keywords

mechanical elastic energy storage system, sensorless, PMSG, closed-loop  $I/f$  control

## Authors

Chang Da, Yu Yang, Zengqiang Mi, Xiaoming Zheng, and Chenjun Sun

## Recommended Citation

Chang Da, Yu Yang, Mi Zengqiang, Zheng Xiaoming, Sun Chenjun. Adaptive Backstepping Control Based Closed-loop  $I/f$  Control of Sensorless Permanent Magnet Synchronous Generator[J]. Journal of System Simulation, 2019, 31(3): 556-565.

基于自适应反推控制的无传感器 PMSG 闭环  $I/f$  控制畅达<sup>1,2</sup>, 余洋<sup>1,2</sup>, 米增强<sup>1,2</sup>, 郑晓明<sup>1,2</sup>, 孙辰军<sup>3</sup>

(1. 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;

2. 河北省分布式储能与微网重点实验室, 华北电力大学电力系, 河北保定, 071003; 3. 河北省电力科学研究院, 河北石家庄 050021)

**摘要:** 针对机械弹性储能系统动力源扭矩变化特性, 提出一种无传感器永磁同步发电机(PMSG)闭环  $I/f$  反推自适应控制策略。建立机械弹性储能系统的数学模型和定子电流矢量定向下的 PMSG 数学模型, 在分析 PMSG 开环  $I/f$  控制不足的基础上, 提出基于自适应反推控制的  $I/f$  闭环控制方法, 通过转速和电流闭环使定子电流定向的  $dq$  轴和以电机转子定向的  $dq$  轴之间的转角恒定。仿真结果表明, 能够抑制转速波动,  $I/f$  控制的“转角-自平衡”特性使系统无须加装速度传感器, 能够防止启动阶段过流, 构建的定子电阻和电感自适应律可以准确辨识 PMSG 定子电阻和电感, 提高了控制的鲁棒性。

**关键词:** 机械弹性储能系统; 无传感器; PMSG;  $I/f$  闭环控制

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2019) 03-0556-10

DOI: 10.16182/j.issn1004731x.joss.17-0219

Adaptive Backstepping Control Based Closed-loop  $I/f$  Control of Sensorless Permanent Magnet Synchronous GeneratorChang Da<sup>1,2</sup>, Yu Yang<sup>1,2</sup>, Mi Zengqiang<sup>1,2</sup>, Zheng Xiaoming<sup>1,2</sup>, Sun Chenjun<sup>3</sup>

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, Electricity Department of North China Electric

Power University, Baoding 071003, China; 2. Hebei Key Laboratory of Distributed Energy Storage and Micro-grid, Baoding 071003, China ;

3. Hebei Electric Power Research Institute, Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract:** A novel strategy applied closed-loop adaptive back-stepping control to permanent magnet synchronous generator (PMSG) is proposed targeting the problem of the modification of torque for mechanical elastic energy storage (MEES) system utilizing PMSG as power source. This paper establishes the mathematical model of MEES system and PMSG, and presents the closed-loop adaptive backstepping control which makes the angle between the  $dq$  axis oriented by the current of stator and the  $dq$  axis oriented by the rotor a constant value via the speed and current closed-loop based on the analysis of open-loop  $I/f$  control. The closed-loop adaptive back-stepping control can suppress the speed fluctuation, sensorless, overcurrent and improve the PMSG robustness by identifying the stator resistance and inductance of generator. The ideal control result can be proved in the state of startup and steady operation of PMSG.

**Keywords:** mechanical elastic energy storage system; sensorless; PMSG; closed-loop  $I/f$  control

## 引言

风电等可再生能源具有间歇性和波动性的特



收稿日期: 2017-05-12 修回日期: 2017-10-12;

基金项目: 国家自然科学基金(51407077);

作者简介: 畅达(1991-), 男, 山西太原, 硕士, 研究方向为新能源电力系统; 余洋(1982-), 男, 重庆, 博士, 硕导, 研究方向为新能源电力系统。

点, 大规模风电接入电网会带来调峰、调频、安全稳定运行风险增加等问题<sup>[1]</sup>。机械弹性储能(mechanical elastic energy storage, MEES)具有能量转换效率高、储能容量可调、功率响应速度快、对环境友好等优点, 是解决目前新能源并网、消纳等问题的一种有效途径<sup>[2]</sup>。MEES 系统依靠涡簧储存机械能, 在电网低负荷时将电能转换为储能箱的弹

性势能储存起来, 然后在电力高负荷阶段, 再将机械能转化为电能<sup>[3]</sup>。机械弹性储能系统采用永磁同步发电机(Permanent Magnet Synchronous Generator, PMSG)作为发电运行能量转换执行机构, 在发电运行过程中涡簧转矩变化, 因此需要根据机械弹性储能特点提出合适的 PMSG 控制方法。

由于系统时变的转矩, 以及电机电阻、电感等参数受温度、环境影响可能发生未知改变, 传统单一的 PMSG 控制策略, 如 PI 控制、自校正控制、滑模变结构控制等很难满足 MEES 系统对 PMSG 提出的高控制要求, 将不同的控制策略结合或加观测器以获得更好的控制效果成为解决该问题的有效方法, 这也是当前 PMSG 控制策略研究的热点。文献[4]采用将模糊控制与传统的 PI 控制理论相结合的方法, 构造一种模糊 PI 复合型控制系统。该方法使得系统复合型系统既具有模糊控制控制灵活适应性强的特点, 又具有 PI 控制控制精度高的特点。文献[5]结合模型参考自适应辨识理论, 提出一种能够在线辨识系统转动惯量的新型扰动观测器, 通过对外界干扰进行前馈补偿, 降低滑模控制器中不连续项的幅值, 有效地削弱了抖振。文献[6]首先通过一个线性参考模型给出永磁同步电机控制系统的性能规范, 然后采用非线性自适应反步方法来设计系统的控制律及参数自适应律, 实现对 PMSG 的高性能控制。

为了实时获取电机的转速, 传统的方法是采用 PMSG 位置传感器, 但是这种方法增加了 MEES 系统的复杂性、限制了系统的应用场合, 因此采用无位置传感器的 PMSG 控制策略成为了关注点, 该研究大都是利用电机的凸极特性获取转子位置信息<sup>[7]</sup>, 主要有旋转高频信号注入法<sup>[8]</sup>、脉振高频信号注入法<sup>[9]</sup>和高频方波信号注入法<sup>[10]</sup>等。这类算法对电机结构有特殊要求, 不具备普适性; 还有通过计算得到转子位置的方法, 如基于开环的直接计算法<sup>[11]</sup>、反电势积分法<sup>[12]</sup>、基于闭环观测器的扩展卡尔曼滤波法<sup>[13]</sup>、模型参考自适应法<sup>[14]</sup>和滑模观测器法等<sup>[15]</sup>。开环算法比较简单, 但是电机参

数的准确性对计算结果有很大影响, 闭环算法的鲁棒性明显提高, 但是算法复杂, 对控制器要求较高。相比于上述控制方案,  $I/f$  控制有一定的抗扰性, 并且能够避免启动过程中出现过流情况<sup>[16]</sup>。但是基本的  $I/f$  控制方法是一种开环方案, 电流幅值和频率不能自动调节, 且存在易失步, 转速易受干扰等缺点<sup>[4]</sup>。

本文利用  $I/f$  控制思路, 针对电机电阻、电感参数未知变化, 以及涡簧所提供的动力源转矩实时变化的特点, 提出了一种电流矢量定向下速度、电流闭环的  $I/f$  控制方法, 通过对电阻和电感的辨识减小运行过程中系统参数改变对系统性能带来的影响, 并且无需速度传感器和专门的切换算法。仿真和实验均表明, 该控制算法在电机启动和运行时具有良好的控制性能。

## 1 机械弹性储能系统的数学模型

### 1.1 储能箱的数学模型

根据文献[2-3]储能箱的涡簧受力情况如图 1 所示。涡簧片一端与储能箱箱体外壁固定, 另一端与储能箱轴相连, 轴对涡簧片产生的反力矩很小可以忽略不计, 从而选任意择涡簧片的一小段  $dL$  进行分析, 设在初始状态下涡簧片的曲率半径为  $r_1$ , 在力矩  $T_m$  作用下曲率半径为  $r_2$ , 根据材料力学公式建立涡簧箱输出力矩的数学模型:

$$T_m = MH \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad (1)$$

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

式中:  $M$  为涡簧材料的弹性模量,  $H$  为横截面的惯性矩,  $a$  为涡簧片的宽度,  $b$  为涡簧片的厚度。假设所取  $dL$  在初始情况下相对于曲率中心的角度为  $d\delta_1$ , 在力矩  $T_m$  的作用下曲率中心的角度变为  $d\delta_2$ , 则有:

$$d\delta_1 = \frac{dL}{r_1} \quad (3)$$

$$d\delta_2 = \frac{dL}{r_2} \quad (4)$$

在力矩  $T_m$  的作用下, 可得出转角增加值为:

$$\varphi = \int_0^L \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) dL = \frac{T_m L}{MH} \quad (5)$$

式中： $L$  为涡簧长度。根据材料力学公式可求得外力矩为：

$$T_m = \frac{MH}{L} \varphi = \frac{Mab^3}{12L} \int_0^t \omega dt \quad (6)$$

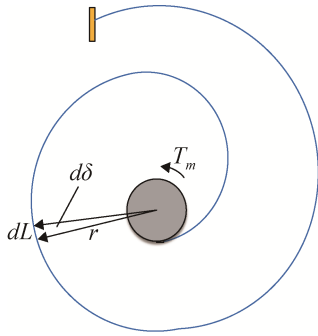


图 1 储能箱受力图  
Fig. 1 Structure of storage box

### 1.2 定子电流定向的永磁同步发电机模型

PMSG 结构简单，发电效率高，选择其作为机械弹性储能系统的能量转换元件。永磁同步发电机是一个高阶、非线性、强耦合的多变量复杂系统，为简化研究做出如下假设：①三相绕组完全对称；②忽略电机齿槽、电枢反应和换相过程的影响；③永磁体磁动势沿气隙正弦分布。

建立以电机转子为  $d$  轴的  $dq$  坐标系和以定子电流为  $d^*q^*$  轴的  $d^*q^*$  坐标系，如图 2 所示，电机定子电流  $i_s$  定向于  $q^*$  轴，可以得到永磁同步发电机的数学模型为：

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\omega_i}{n_p} - \omega_r \quad (7)$$

$$J \frac{d\omega_r}{dt} = T_m - \frac{3}{2} n_p \psi_r i_s \sin \varepsilon - B\omega_r \quad (8)$$

$$L \frac{di_s}{dt} = -R_s i_s - \psi_r \omega_r \sin \varepsilon + U_{sq^*} \quad (9)$$

$$U_{sd^*} = -\psi_r \omega_r \cos \varepsilon - \omega_i L i_s \quad (10)$$

式中： $\varepsilon$  为  $d$  轴与  $q^*$  轴之间的夹角， $\omega_i$  为  $d^*q^*$  轴的旋转速度， $\omega_r$  为  $dq$  轴的旋转速度， $\psi_r$  为转子励磁空间矢量， $T_m$  为储能箱施加给电机的转矩， $n_p$  为

电机极对数， $i_s$  为定子电流， $B$  为阻尼系数， $L$  为等效同步电感， $U_{sq^*}$  为电机定子  $q^*$  轴电压， $U_{sd^*}$  为定子  $d$  轴电压。

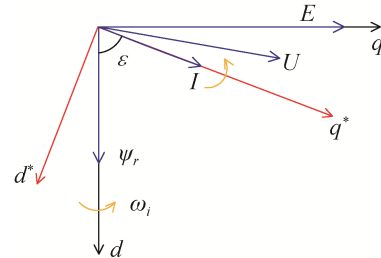


图 2 以定子电流定向的 PMSG 矢量关系图  
Fig. 2 Vector diagram of synchronous generator based on stator current orientation

## 2 开环 $I/f$ 控制

PMSG 的开环控制如图 3 所示。

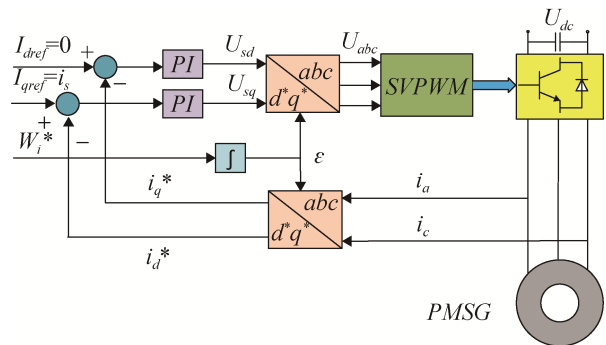


图 3 PMSG 开环  $I/f$  控制方案  
Fig. 3 Closed-loop  $I/f$  control method of PMSG

永磁同步发电机的电磁转矩为：

$$T_e = \frac{3}{2} n_p i_s \psi_r \sin \varepsilon \quad (11)$$

$$n_p (T_m - T_e) = J \frac{d\omega_r}{dt} \quad (12)$$

从式(11)可以看出电磁转矩  $T_e$  的大小与  $i_s$  和  $\varepsilon$  角的大小有关，当施加的转矩与电磁转矩平衡时，定子电流， $i_s$  与  $\psi_r$  的夹角  $\varepsilon$  保持一定，转子拖动电流矢量转动，使机械能转变为动能，若电磁转矩小于施加到转子的转矩  $T_m$ ，则转子加速旋转，定子电流和转子磁链的夹角将增大，在新的位置达到平衡。相反，若施加到转子上的转矩小于电磁转矩，则转子减速，定子电流和转子磁链的夹角将减

小, 同样会在新的位置达到平衡。保持定子电流不变  $\varepsilon$  角度的变化会影响电磁转矩的变化, 因此, 当  $\varepsilon=90^\circ$  时电磁转矩达到峰值,  $\varepsilon$  超过  $90^\circ$  时系统会失步, 因此应当限定  $\varepsilon$  的范围是:

$$-90^\circ < \varepsilon < 90^\circ \quad (13)$$

开环的  $I/f$  控制策略一般根据系统的具体情况给出合适的电流矢量幅值和  $d^*q^*$  旋转的速度  $\omega_i$ , 当  $i_s$  的值确定后产生的最大电磁转矩  $T_{e,\max}$  也可以确定, 此时应当限定  $\omega_i$  的加速度  $k_w$  为:

$$k_w < \frac{n_p}{J}(T_m - T_{e,\max}) \quad (14)$$

### 3 闭环 $I/f$ 控制

#### 3.1 控制方案设计

在开环  $I/f$  控制的基础上所提出的闭环  $I/f$  控制其算法如图 4 所示。所提出的控制策略在原有开环  $I/f$  控制所具有的“转角-自平衡”特性的基础上增加了速度和电流的双闭环, 能够有效的控制电机速度, 防止电机失步, 同时能够控制电机的电流防止电机电流过冲。电机系统在运行过程中温升等因素会对电机的电阻、电感等参数产生较大影响, 因此加入对永磁同步发电机定子电阻和电感的辨识, 增强了电机的抗干扰能力。通过式(11)可知当  $\varepsilon$  为  $90^\circ$  时永磁同步发电机在固定的定子电流就产生的电磁转矩最大, 机械能转换电能的效率最高, 因此将  $\varepsilon$  的参考值设定为  $90^\circ$ 。

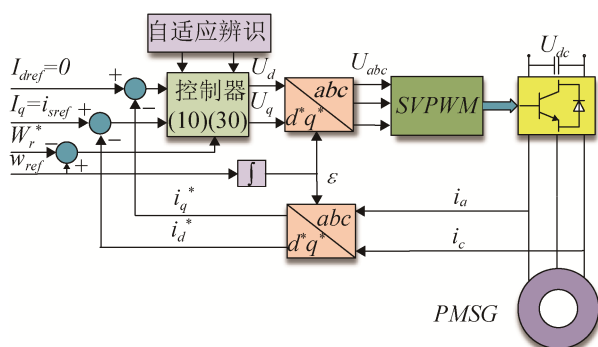


图 4 PMSG 闭环  $I/f$  控制方案

Fig. 4 Closed-loop  $I/f$  control method of PMSG

#### 3.2 控制算法提出

定义误差:

$$e_\varepsilon = \varepsilon - \varepsilon^* \quad (15)$$

$$e_w = \omega_r - \omega_r^* \quad (16)$$

$$e_i = i_s - i_s^* \quad (17)$$

式中:  $\varepsilon^*$  是  $d$  轴和  $q^*$  轴之间夹角  $\varepsilon$  的参考值,  $\omega_r^*$  是转子转速的参考值,  $i_s^*$  是定子电流的参考值。

对角度闭环控制

$$\text{令 } \omega_i' = \frac{\omega_i}{n_p} \quad (18)$$

$$\text{则 } \frac{de_\varepsilon}{dt} = \frac{d\varepsilon}{dt} - \frac{d\varepsilon^*}{dt} = \frac{\omega_i}{n_p} - \omega_r - \frac{d\varepsilon^*}{dt} \quad (19)$$

$$\text{取 } \omega_r^* = \omega_i' - \frac{d\varepsilon^*}{dt} + k_1 e_\varepsilon \quad (20)$$

令李雅普诺夫函数为:

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

则李雅普诺夫函数的导数为:

$$\begin{aligned} \frac{dV_1}{dt} &= e_\varepsilon \frac{de_\varepsilon}{dt} = e_\varepsilon (\omega_i' - \omega_r - \frac{d\varepsilon^*}{dt}) = \\ &= e_\varepsilon (\omega_i' - e_w - \omega_r^* - \frac{d\varepsilon^*}{dt}) = -e_\varepsilon e_w - k_1 e_\varepsilon^2 \end{aligned} \quad (22)$$

速度的闭环控制由式(8)可求得:

$$\begin{aligned} J \frac{de_w}{dt} &= J \left( \frac{d\omega_r}{dt} - \frac{d\omega_r^*}{dt} \right) = \\ T_m - \frac{3}{2} n_p \psi_r i_s \sin \varepsilon - B \omega_r - J \frac{d\omega_r^*}{dt} \end{aligned} \quad (23)$$

取

$$i_s^* = \frac{2}{3n_p \psi_r \sin \varepsilon} (T_m - B \omega_r - J \frac{d\omega_r^*}{dt} + k_2 e_w + e_\varepsilon) \quad (24)$$

取

$$V_2 = \frac{1}{2} J e_w^2 \quad (25)$$

可求得李雅普诺夫导数为:

$$\begin{aligned} \frac{dV_2}{dt} &= J e_w \frac{de_w}{dt} = e_w \left( J \frac{d\omega_r}{dt} - J \frac{d\omega_r^*}{dt} \right) = \\ &= e_w \left( T_m - \frac{3}{2} n_p \psi_r (e_i + i_s^*) \sin \varepsilon - B \omega_r - J \frac{d\omega_r^*}{dt} \right) = \\ &= -\frac{3}{2} n_p \psi_r \sin \varepsilon e_i e_w - k_2 e_w^2 + e_\varepsilon e_w \end{aligned} \quad (26)$$

令

$$R_s = \hat{R}_s - \tilde{R}_s \quad (27)$$

$$L = \hat{L} - \tilde{L} \quad (28)$$

式中： $R_s$ 、 $\hat{L}$  是  $R_s$ 、 $L$  的估计值  $R_s$ 、 $\tilde{L}$  是  $R_s$ 、 $L$  的偏差值。

由式(9)可得

$$L \frac{de_i}{dt} = L \left( \frac{di_s}{dt} - \frac{di_s^*}{dt} \right) = -(\hat{R}_s - \tilde{R}_s)i_s - \psi_r \omega_r \sin \varepsilon + U_{sq^*} - (\hat{L} - \tilde{L}) \frac{di_s^*}{dt} \quad (29)$$

取

$$U_{sq^*} = R_s i_s + \psi_r \omega_r \sin \varepsilon + L \frac{di_s^*}{dt} + \frac{3}{2} n_p \psi_r e_\omega \sin \varepsilon - k_3 e_i \quad (30)$$

取李雅普诺夫函数

$$V_3 = \frac{1}{2} L e_i^2 \quad (31)$$

$$\begin{aligned} \frac{dV_3}{dt} &= L e_i \frac{de_i}{dt} = e_i \left( L \frac{di_s}{dt} - L \frac{di_s^*}{dt} \right) = \\ &e_i \left( -(\hat{R}_s - \tilde{R}_s)i_s - \psi_r \omega_r \sin \varepsilon + U_{sq^*} - (\hat{L} - \tilde{L}) \frac{di_s^*}{dt} \right) = \\ &\frac{3}{2} n_p \psi_r \sin \varepsilon e_i e_\omega - k_3 e_i^2 + \tilde{L} \frac{di_s^*}{dt} e_i + \tilde{R}_s i_s e_i \end{aligned} \quad (32)$$

取

$$\frac{d\hat{R}_s}{dt} = -\lambda_1 i_s e_i \quad (33)$$

$$\frac{d\hat{L}}{dt} = -\lambda_2 e_i \frac{di_s^*}{dt} \quad (34)$$

最终的李雅普诺夫函数为：

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + \frac{1}{2\lambda_1} \tilde{R}_s^2 + \frac{1}{2\lambda_2} \tilde{L}^2 \quad (35)$$

$$\frac{dV}{dt} = \frac{dV_1}{dt} + \frac{dV_2}{dt} + \frac{dV_3}{dt} + \frac{1}{\lambda_1} \tilde{R}_s \frac{d\tilde{R}_s}{dt} +$$

$$\frac{1}{\lambda_2} \tilde{L} \frac{d\tilde{L}}{dt} = -k_1 e_\varepsilon^2 - k_2 e_\omega^2 - k_3 e_i^2 \leq 0 \quad (36)$$

通过式(36)表明系统的李雅普诺夫函数小于零，由系统稳定性定理可知控制系统是稳定的。

## 4 系统仿真和结果分析

### 4.1 仿真分析

为了验证本文所提出的 PMSG 闭环  $I/f$  控制方法的性能，在分别验证系统从静止状态到转速达到 10 r/min、20 r/min、30 r/min 的过程，以验证控制方法对系统各运行工况下均具有良好的控制效果。所用永磁同步发电机参数为：永磁磁通  $\psi_r = 0.3\text{wb}$ ，等效电感  $L = 0.033\text{H}$ ，定子电阻  $R_s = 3\Omega$ ，阻尼系数  $B = 0.002$ ，极对数  $n_p = 50$ 。

仿真运行实验一：动力源输出转矩不断增大时，PMSG 定速度输出。

在动力源输出转矩不断增大的情况下，对比开环  $I/f$  控制和闭环  $I/f$  控制速度由静止到 10 r/min、20 r/min、30 r/min，结果如图 5~7 所示，闭环  $I/f$  控制 PMSG 定子电流的波形分别如图 8~10 所示。

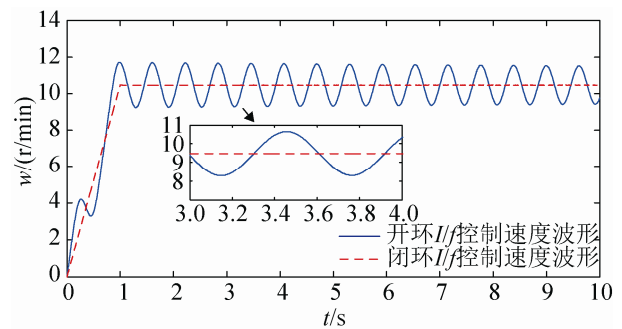


图 5 10 r/min 开环和闭环  $I/f$  控制下速度波形  
Fig. 5 Speed waveforms for open-loop  $I/f$  and closed-loop  $I/f$  control methods at speed of 10 r/min

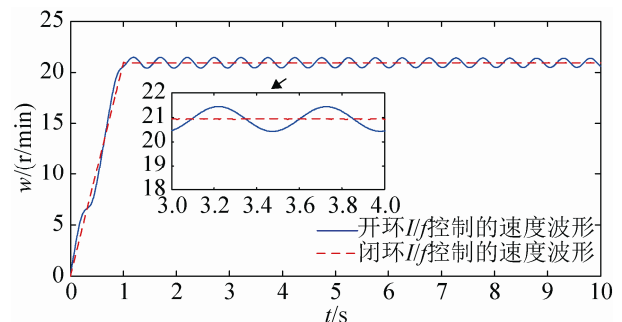
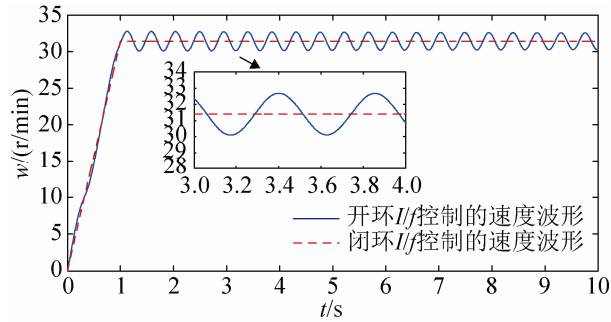
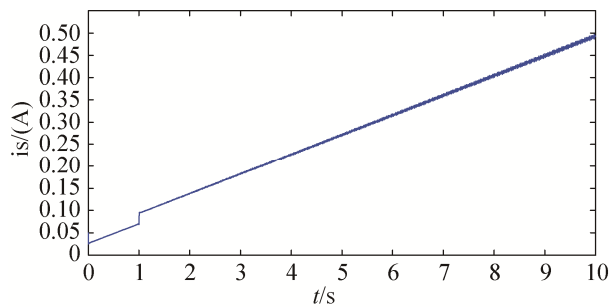
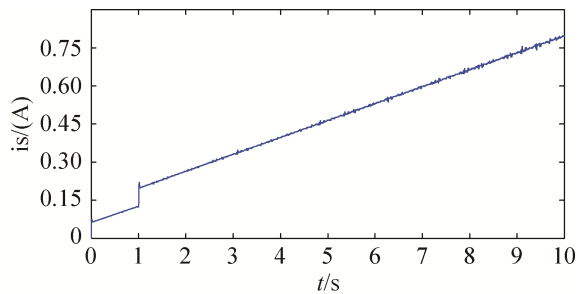
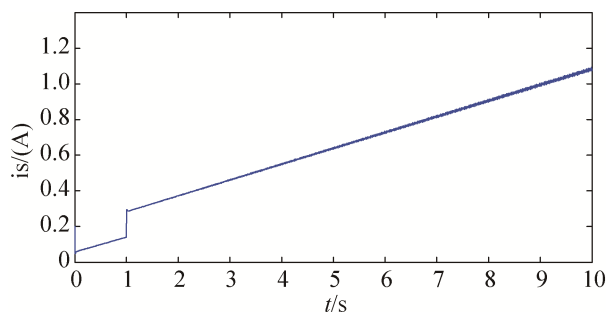


图 6 20 r/min 开环和闭环  $I/f$  控制下速度波形  
Fig. 6 Speed waveforms for open-loop  $I/f$  and closed-loop  $I/f$  control methods at speed of 20 r/min

图 7 30 r/min 开环和闭环  $I/f$  控制下速度波形Fig. 7 Speed waveforms for open-loop  $I/f$  and closed-loop  $I/f$  control methods at speed of 30 r/min图 8 10 r/min 闭环  $I/f$  控制下速度波形Fig. 8 Current waveform under closed-loop  $I/f$  control method at speed of 10 r/min图 9 20 r/min 闭环  $I/f$  控制下速度波形Fig. 9 Current waveform under closed-loop  $I/f$  control method at speed of 20 r/min图 10 30 r/min 闭环  $I/f$  控制下速度波形Fig. 10 Current waveforms under closed-loop  $I/f$  control method at speed of 30r/min

从仿真结果可以看出闭环  $I/f$  控制方法从静止状态到转速达到 10 r/min, 20 r/min, 30 r/min 的过程均有良好的控制效果。从图 5~7 可以看出, 由于“转角-自平衡”特性, 开环  $I/f$  控制转速存在波动, 而闭环  $I/f$  控制由于转速和电流闭环从而使系统快速跟踪给定速度并抑制转速的波动。

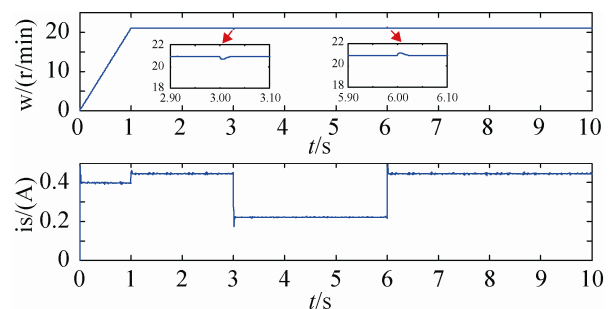
仿真运行实验二: 动力源输出转矩动态变化, PMSG 输出速度恒定。

图 11~13 分别为 PMSG 在闭环  $I/f$  控制下由静止到 20 r/min 的额定转速后改变转矩和额定转速的速度和电流波形, 其中图 11 是 PMSG 初始动力源扭矩为 10 N·m, 达到额定转速后在 3 s 突减 5 N·m 转矩, 运行 3 s 后在第 6 s 突加 5 N·m 转矩的速度和电流波形。

图 12 为动力源扭矩增大, 达到额定转速后在 3 s 突然改变额定速度为 10 r/min, 运行 3 s 后在第 6 s 突然改变额定速度为 30 r/min 的速度和电流波形。

图 13 是初始动力源扭矩为 10 N·m, 达到稳定运行后在 3 s 突然改变额定速度为 10 r/min 并且动力源扭矩突然减小 5 N·m, 运行 3 s 后在第 6 秒突然改变额定速度为 30 r/min, 并且动力源扭矩增加 5 N·m 的速度和电流曲线。

图 14 是 PMSG 在动力源扭矩不断减小情况下的速度、转矩、电流曲线。

图 11 20 r/min 闭环  $I/f$  控制下速度和电流波形Fig. 11 Speed and current waveforms for closed-loop  $I/f$  control method with constant torque at speed of 20 r/min



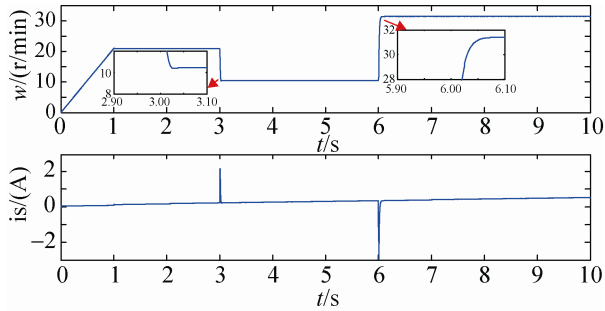


图 12 20 r/min 动力源扭矩增大时变速度闭环  $I/f$  控制下电流波形

Fig. 12 Current waveform for closed-loop  $I/f$  control method with increasing torque to modify rated speed at speed of 20 r/min

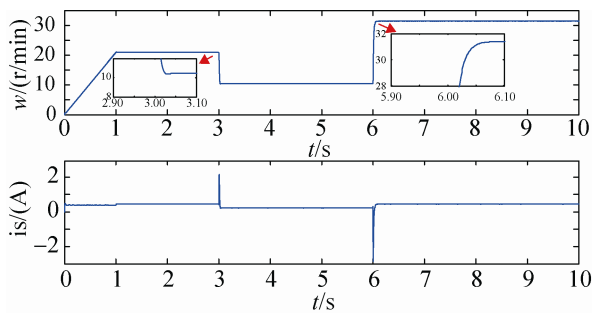


图 13 20 r/m 同时改变变转速和动力源扭矩闭环  $I/f$  控制下速度和电流波形

Fig. 13 Speed and current waveforms for closed-loop  $I/f$  control method with speed modified and torque under constant torque at speed of 20 r/min

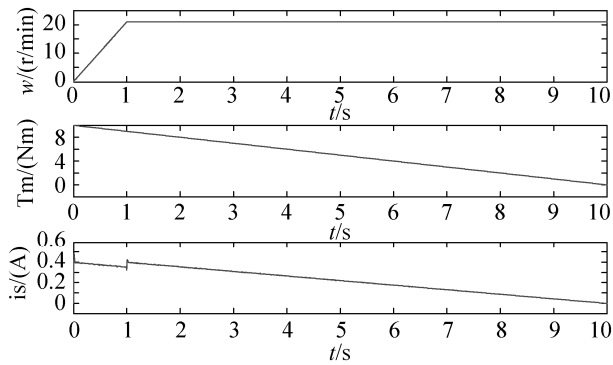


图 14 20 r/min 闭环  $I/f$  控制下速度、动力源扭矩、电流波形  
Fig. 14 Speed torque and current waveforms for closed-loop  $I/f$  control method with decreasing torque at speed of 20 r/min

从图 11~14 仿真结果可以看出 PMSG 在闭环  $I/f$  控制下能够快速响应转速的变化，并且能够在不同的动力源输出扭矩下平稳运行，具有良好的控制效果。

仿真运行实验三：参数辨识的自适应律验证

实验。

图 15~16 为考虑系统电阻和电感参数摄动情况下辨识系统的电阻和电感。为了验证辨识算法的有效性，在恒定动力源输出扭矩下转速设定为  $20\sin(20t)$  r/min，图 17~18 为检验辨识算法程序下的电阻和电感偏差值。

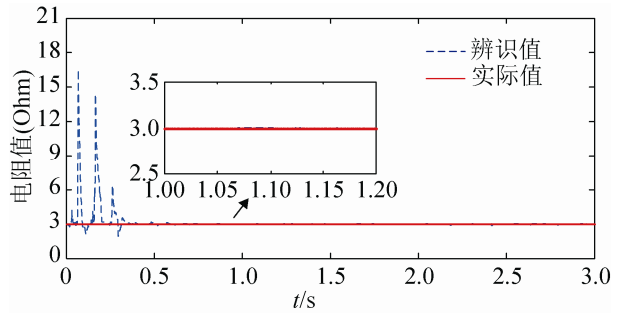


图 15 电阻的辨识

Fig. 15 Identification of resistance

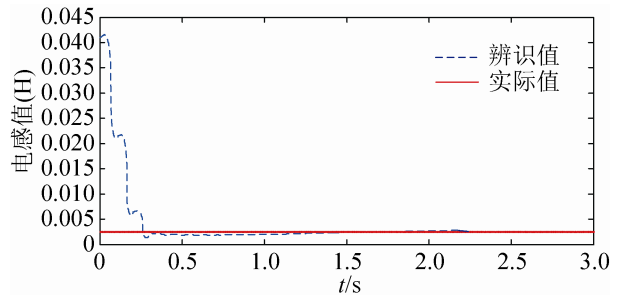


图 16 电感的辨识

Fig. 16 Identification of linkage

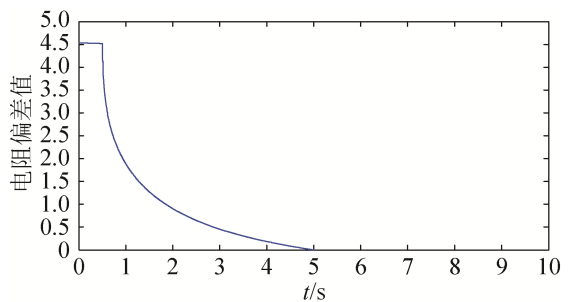


图 17 电阻的辨识误差

Fig. 17 Deviation for the identification of resistance

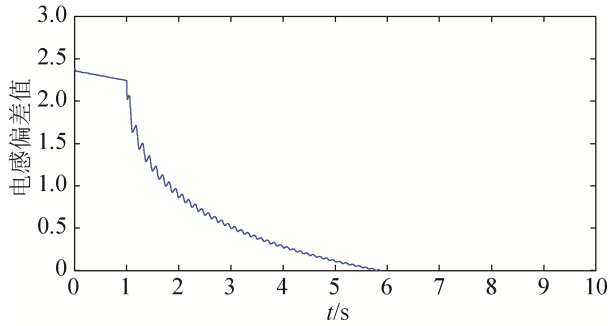


图 18 电感的辨识误差

Fig. 18 Deviation for the identification of linkage

从图 15~16 可以看出在电阻和电感初始值不准确的情况下, 在 0.5 s 内电阻和电感实际值曲线和辨识值曲线基本重合, 表明在闭环  $I/f$  控制中的参数辨识的自适应律算法能够准确辨识系统的电阻和电感。图 17~18 辨识误差结果证明了自适应辨识的有效性。仿真结果表明闭环  $I/f$  控制具有一定的抗干扰能力。

## 4.2 实验验证

为进一步验证所设计控制方法的性能, 研制了机械弹性储能实验系统, 如图 19 所示。涡簧箱输

出初始动力源扭矩为 50 N·m, 实验机械弹性储能系统的额定速度设为 20 r/min。图 20~21 分别为速度和电流波形。

图 20~21 表明, 闭环  $I/f$  控制能使系统稳定并且在动力源输出最大转矩时不发生过热。正是由于  $I/f$  控制具有的“转角-自平衡”特性使得电机转速和电磁转矩能够自动跟踪转矩的变化, 闭环的控制结构保证了系统的转矩角稳定, 使得系统具有良好的控制效果。

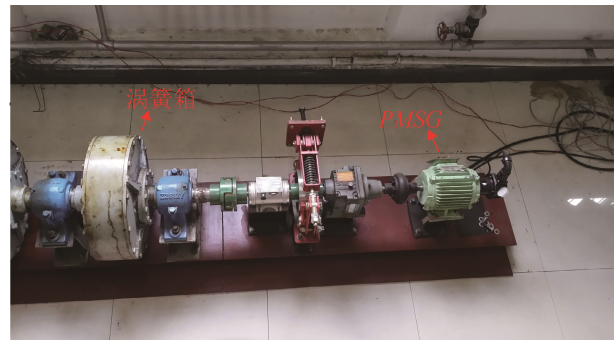


图 19 机械弹性储能实验系统

Fig.19 Experimental MESS system

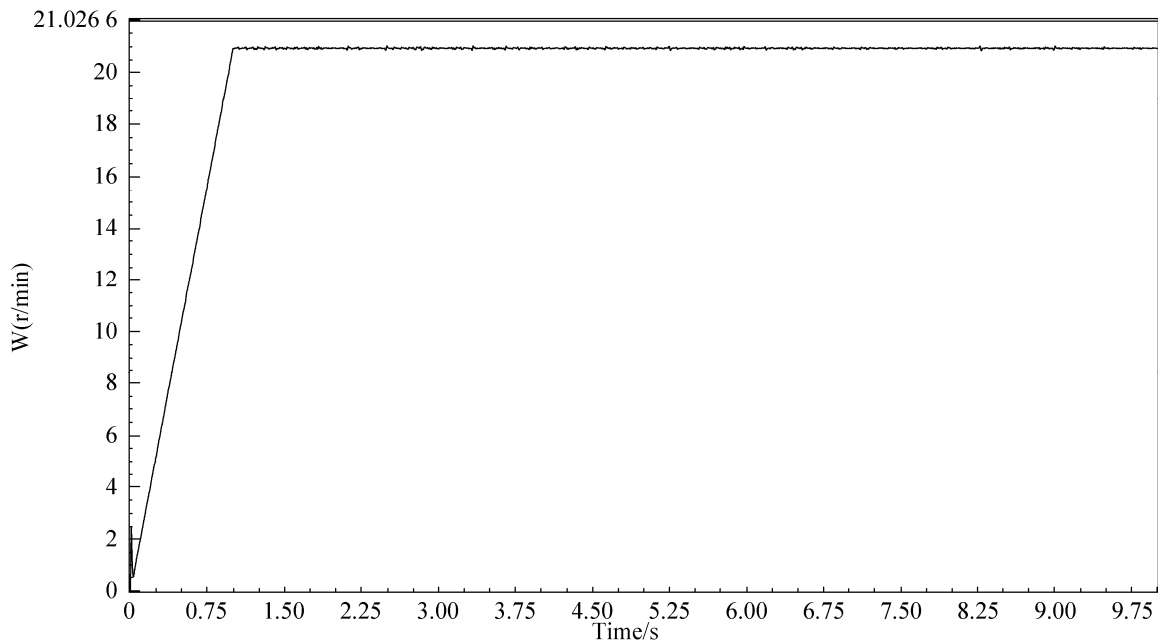


图 20 实验速度波形

Fig. 20 Speed waveform of MESS system

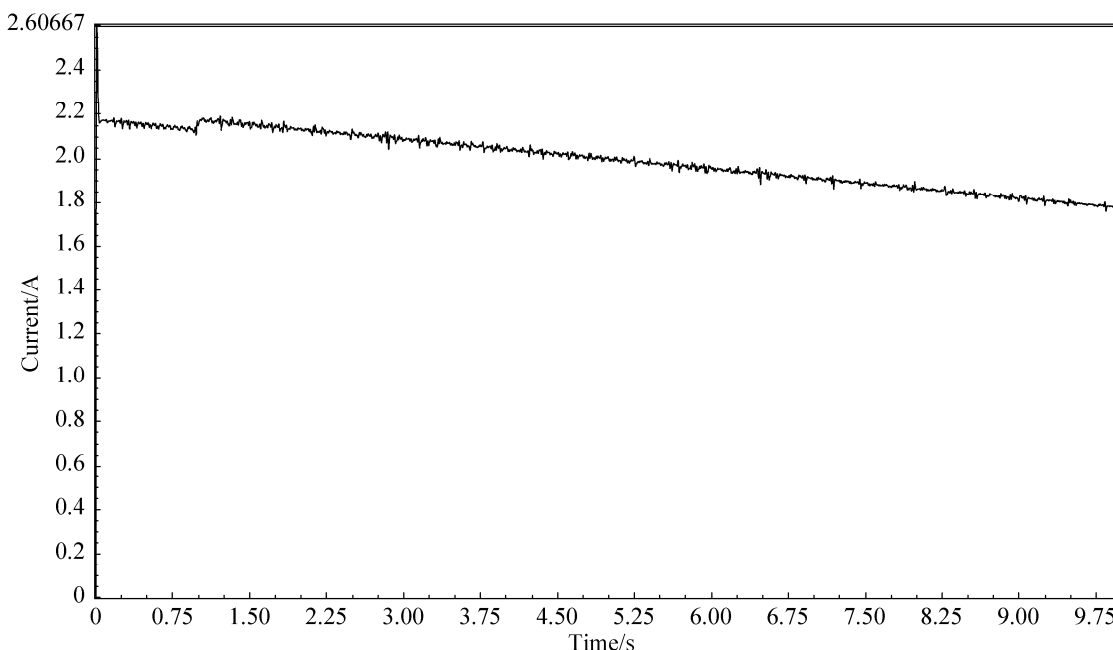


图 21 实验电流波形

Fig. 21 Current waveform of MESS system

## 5 结论

经过本文研究, 得到以下主要结论:

(1) 与转速和电流都要预先设定的开环  $I/f$  控制策略相比, 闭环  $I/f$  控制策略能保证速度平滑切换, 具有一定的抗干扰能力。

(2) 构建的辨识算法能够较精确地估计出 PMSG 未知的电阻和电感值。

(3) 闭环  $I/f$  控制策略在系统启动和稳定运行时都具有良好的控制性能。

## 参考文献:

- [1] 刘世念, 苏伟, 魏增福. 储能技术在风电并网领域的市场需求分析[J]. 科技管理研究, 2014, 34(1): 120-122, 146.  
LIU Shinian, SU Wei, WEI Zengfu. Forecast of Energy Storage Applied in Wind Power Integration[J]. Science and Technology Management Research, 2014, 34(1): 120-122, 146.
- [2] 徐以坤. 永磁电机式机械弹性储能机组储能箱优化设计与并网控制[D]. 保定: 华北电力大学(保定), 2015.  
Xu Yikun. Optimal Design of Energy Storage Box for Mechanical Elastic Energy Storage Unit Served by

Permanent Magnet Synchronous Motor and Its Grid-Connected Control[D]. Baoding, China: North China Electric Power University, 2015.

- [3] 米增强, 郭旭东, 余洋. 基于参数辨识及 L2 增益的 PMSG 反步控制策略研究[J]. 系统仿真学报, 2017, 29(1): 45-48.  
Mi Zengqiang, Guo Xudong, Yu Yang. Parameter Identification and L2 Gain Based Backstepping Control Strategy for PMSG[J]. Journal of System Simulation, 2017, 29(1): 45-48.
- [4] 卞延庆, 庄海, 张颖杰. 基于模糊 PI 的永磁同步电机矢量控制研究[J]. 微电机, 2015, 48(11): 62-66, 93.  
Bian Yanqing, Zhuang Hai, Zhang Yingjie. Study on Permanent Magnet Synchronous Motor Vector Control Based on Fuzzy PI[J]. Micromotors, 2015, 48(11): 62-66, 93.
- [5] 刘颖, 周波, 方斯琛. 基于新型扰动观测器的永磁同步电机滑模控制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(9): 80-85.  
LIU Ying, ZHOU Bo, FANG Si-chen. Sliding Mode Control of PMSM Based on a Novel Disturbance Observer[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(9): 80-85.
- [6] 张兴华. 永磁同步电机的模型参考自适应反步控制[J]. 控制与决策, 2008, 23(3): 341-345.  
ZHANG Xing-hua. Model reference adaptive

- backstepping control of permanent magnet synchronous motors. 2008, 23 (3): 341-345.
- [7] 王萌, 杨家强, 张翔, 等. 一种表贴式永磁同步电机电流矢量闭环  $I/f$  控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10): 2513-2521.  
WANG Meng, YANG Jiaqiang, ZHANG Xiang, et al. An  $I/f$  Control Method With Closed-loop Regulation of Current Vector for Surface Permanent Magnet Synchronous Motor Drives[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35 (10): 2513-2521.
- [8] Raca D, Harke M C, Lorenz R D. Robust Magnet Polarity Estimation for Initialization of PMSynchronous machines with near-zero saliency[J]. IEEE Transactions on Industry Applications (S1350-2352), 2008, 44(4): 1199-1209.
- [9] Jang J H, Sul S K, Ha J I, et al. Sensorless drive of surface mounted permanent magnet motor by high frequency signal injection based on magnetic saliency[J]. IEEE Transactions on Industry Applications (S1877-7058), 2003, 39(4): 1031-1039.
- [10] Young-Doo Y, Seung-Ki S, Morimoto S, et al. High-bandwidth sensorless algorithm for AC machines based on square-wave-type voltage injection[J]. IEEE Transactions on Industry Applications (S9843-2354), 2011, 47(3): 1361-1370.
- [11] Hoque M A, Rahman M A. Speed and Position Sensorless Permanent Magnet Synchronous Motor Drives[C]. Windsor, ON, Canada: Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 1994, 2: 689-692.
- [12] Wu R, Slemon G R. A Permanent Magnet Motor Drive Without a Shaft Sensor[C]. Portland, OR, United States: IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, 1990, 1: 553-558 .
- [13] Huang M C, Moses A J, Anayi F, et al. Linear Kalman Filter (LKF) Sensorless Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Orthogonal Output Linear Model[C]. Bologna, Italy: International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, SPEEDAM. 2011: 79.
- [14] Andreescu G D. Position and Speed Sensorless Control of PMSM Drives Based on Adaptive Observer[C]. Boston, MA, USA: EPEProc .1999, CD-ROM, 2006: 1381-1386 .
- [15] Li Changsheng, Elbuluk M. A Sliding Mode Observer for Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motors[C]. Chicago, IL, USA : Conference of the 36th Industry Applications Conference, IAS, 2001, 2: 1273-1278.
- [16] 张耀中, 黄进, 康敏. 永磁同步电机无传感器控制及其启动策略[J]. 电机与控制学报, 2015, 19(10): 1-6.  
ZHANG Yao-zhong, HUANG Jin, KANG Min. Sensorless control and start-up strategy of permanent magnet synchronous motor[J]. Electric Machines and Control, 2015, 19(10): 1-6.