

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2016.02.004

# 基于龙伯格观测器的内埋式永磁同步电机无位置控制算法

陈卫兵<sup>1</sup>, 宗蔚<sup>1</sup>, 张凯泉<sup>1</sup>, 许中华<sup>1</sup>, 钟德刚<sup>2</sup>, 李德<sup>3</sup>, 刘建阳<sup>3</sup>

(1. 湖南工业大学 计算机与通信学院, 湖南 株洲 412007; 2. 武汉易威讯科技有限公司, 湖北 武汉 430223;  
3. 湖南长高高压开关集团股份公司, 湖南 长沙 410219)

**摘要:** 针对使用高分辨率位置传感器会增加永磁同步电机系统的成本和体积, 降低系统可靠性的问题, 提出低分辨率霍尔启动的龙伯格观测器内埋式永磁同步电机无位置控制算法。先采用低分辨率位置信号启动电机, 再用无位置控制算法观测电机转子角度和速度。仿真结果表明: 1) 该控制系统从霍尔位置算法到无位置控制算法过渡平滑, 电流波形正弦性好, 谐波少, 噪声小; 2) 该控制系统工作效率高, 在 1 000~4 000 r·min<sup>-1</sup> 的调速范围内, 系统工作效率高于 80%; 3) 该控制系统成本低。

**关键词:** 龙伯格观测器; 内埋式永磁同步电机; 无位置算法; PI 控制

中图分类号: TM341

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2016)02-0021-05

## A Sensorless Control Algorithm for Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Luenberger Observer

CHEN Weibing<sup>1</sup>, ZONG Wei<sup>1</sup>, ZHANG Kaiquan<sup>1</sup>, XU Zhonghua<sup>1</sup>, ZHONG Degang<sup>2</sup>, LI De<sup>3</sup>, LIU Jianyang<sup>3</sup>

(1. School of Computer and Communication, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;

2. Wuhan Easi Vision Technology Co., Ltd., Wuhan 430223, China;

3. Hunan Changgao High-Voltage Switch Gear Group Co., Ltd., Changsha 410219, China)

**Abstract:** In permanent magnet synchronous motor system, the use of high resolution mechanical position sensors may increase the system volume and cost and reduce the system reliability. Presents a sensorless control algorithm for the interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) based on the Luenberger observer with low resolution Hall startup, and applies the algorithm to estimate the rotor angle and speed. The simulation results show that: 1) The transition process from the Hall sensor algorithm to the sensorless control algorithm is smooth, the current waveform possess a continuous sine characteristic, less harmonics and less noise; 2) The control system is efficient, and the working efficiency is higher than 80% within the speed range of 1 000~4 000 r·min<sup>-1</sup>; 3) The cost of the control is low.

**Keywords:** Luenberger observer; interior permanent magnet synchronous motor; sensorless control algorithm; PI

## 0 引言

传统永磁同步电机 (permanent magnet synchro-

nous motor, PMSM) 控制中的位置信号是通过电机端部的光电编码器、旋转变压器等机械传感器来获

收稿日期: 2015-11-12

基金项目: 科技部国家国际科技合作专项基金资助项目 (2013DFG52740)

作者简介: 陈卫兵 (1966-), 男, 湖南湘潭人, 湖南工业大学教授, 主要从事嵌入式系统, 微电子器件方面的研究,

E-mail: [wb\\_cheng@163.com](mailto:wb_cheng@163.com)

取。但是,这样增加了电机的体积、转动惯量、成本,降低了电机系统的可靠性,限制了电机在特殊环境中的使用。针对上述不足,学者们对永磁同步电机无位置控制方法<sup>[1-2]</sup>进行了研究。其中,内埋式永磁同步电机(interior permanent magnet synchronous machine, IPMSM)的无位置控制方法成为控制领域的研究热点<sup>[3-9]</sup>。董苏等<sup>[6]</sup>采用滑模观测来实现无位置控制,该方法能实现从低速到高速的IPMSM无位置控制,但是,固有的抖振和低速下的启动存在一定问题,且低速启动有可能存在不成功的情况。易伯瑜等<sup>[7]</sup>提出基于双段卡尔曼滤波算法的无位置传感电机控制方法,该方法提高了运算精度,减少了运算时间,但对电机参数和模型精确度的依赖较高,算法计算量大,且低速启动有可能不成功。寿利宾、续丹等<sup>[8-9]</sup>研究了高频注入法辨识转子转速和位置、实现电机无位置启动和运转的方法,该方法通过外加持续高频激励来显示转子的凸极位置,适用于IPMSM,但存在信号处理精度低、延时较长的问题。

近年来,以龙伯格(Luenberger)观测器为代表的线性系统观测器的设计和应用日臻成熟。龙伯格状态观测器解决了在确定性条件下受控系统状态重构问题,使状态反馈成为一种可实现的控制律<sup>[10-11]</sup>。

综上所述,本文提出了基于低分辨率霍尔位置传感器启动的龙伯格观测器内埋式永磁同步电机无位置控制算法。先用低分辨率霍尔位置传感器启动电机,待电机旋转到一定转速,且无位置算法收敛后,再切换到无位置控制模式,对内埋式永磁同步电机采用最大转矩电流比策略和恒功率弱磁算法,充分利用磁阻转矩,以提高电机的转矩输出能力和系统工作效率。

## 1 内埋式永磁同步电机模型

三相静止A-B-C坐标系下,永磁同步电机定子绕组电压方程为:

$$\begin{cases} u_A = r_A i_A + \frac{d\psi_A}{dt} \\ u_B = r_B i_B + \frac{d\psi_B}{dt} \\ u_C = r_C i_C + \frac{d\psi_C}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u_A, u_B, u_C$  分别为A, B, C相绕组两端电压;

$r_A, r_B, r_C$  分别为A, B, C相绕组两端电阻;

$i_A, i_B, i_C$  分别为电机A, B, C相线电流;

$\psi_A, \psi_B, \psi_C$  分别为A, B, C相绕组总磁链,即

$$\begin{bmatrix} \psi_A \\ \psi_B \\ \psi_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_A & M_{AB} & M_{AC} \\ M_{BA} & L_B & M_{BC} \\ M_{CA} & M_{CB} & L_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \psi_f \begin{bmatrix} \cos\theta_r \\ \cos(\theta_r - 120^\circ) \\ \cos(\theta_r + 120^\circ) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中,  $\psi_f$  为永磁体磁链最大值,对于特定的永磁电机其为常数,  $\theta_r$  为永磁磁钢磁场方向与A相的夹角,  $L_A, L_B, L_C$  为各相绕组的自感,  $M_{AB}, M_{AC}, M_{BA}, M_{BC}, M_{CA}, M_{CB}$  为各相绕组之间的互感。

可近似认为  $r_A = r_B = r_C = r_s$ 。通过Clarke变换将永磁同步电机的电压方程由三相静止坐标系变换到 $\alpha$ - $\beta$ 坐标系,将 $\alpha$ 轴定位于A轴。电压方程为:

$$\begin{cases} u_\alpha = r_s i_\alpha + \frac{d\psi_\alpha}{dt} \\ u_\beta = r_s i_\beta + \frac{d\psi_\beta}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

磁链方程为:

$$\begin{cases} \psi_\alpha = L_s i_\alpha + \psi_f \cos\theta_r \\ \psi_\beta = L_s i_\beta + \psi_f \sin\theta_r \end{cases} \quad (4)$$

式(3)~(4)中:  $u_\alpha, u_\beta$  为 $\alpha, \beta$ 轴电压;

$i_\alpha, i_\beta$  为 $\alpha, \beta$ 轴电流;

$\psi_\alpha, \psi_\beta$  为 $\alpha, \beta$ 轴磁链;

$L_s$  为定子等效电感,即  $L_s = L_{ls} + 3L_{ms}/2$ , 其中  $L_{ls}$  和  $L_{ms}$  分别为相绕组的漏电感和励磁电感;

$\theta_r = p\omega_r t$ , 其中,  $p$  为转子极对数,  $\omega_r$  为转子角速度。

将磁链方程(4)代入电压方程(3)中,得:

$$\begin{cases} u_\alpha = r_s i_\alpha + L_s \frac{di_\alpha}{dt} + \psi_f p\omega_r \cos(p\omega_r t) \\ u_\beta = r_s i_\beta + L_s \frac{di_\beta}{dt} - \psi_f p\omega_r \sin(p\omega_r t) \end{cases} \quad (5)$$

根据输入量、内部状态量和输出量构建状态方程,由式(5)可以得到表贴式永磁同步电机的状态方程,即:

$$\begin{cases} \frac{di_\alpha}{dt} = -\frac{r_s i_\alpha}{L_s} - \frac{\psi_f}{L_s} p\omega_r \cos(p\omega_r t) + \frac{u_\alpha}{L_s} \\ \frac{di_\beta}{dt} = -\frac{r_s i_\beta}{L_s} + \frac{\psi_f}{L_s} p\omega_r \sin(p\omega_r t) + \frac{u_\beta}{L_s} \end{cases} \quad (6)$$

状态矢量  $x = [i_\alpha \ i_\beta \ \theta_r]^T$ , 输入矢量  $u = [u_\alpha \ u_\beta \ \theta_r]^T$ , 输出矢量  $y = [\theta_r]$ , 此为非线性模型。式(5)同样适用于内埋式永磁同步电机<sup>[10]</sup>, 因此可以定义电机反电动势状态量为:

$$\begin{cases} e_\alpha = \psi_f p\omega_r \cos(p\omega_r t) \\ e_\beta = -\psi_f p\omega_r \sin(p\omega_r t) \end{cases} \quad (7)$$

假设机械变量相对于电变量变化缓慢得多,则式(6)和式(7)可线性表示为:

$$\begin{cases} \frac{di_\alpha}{dt} = -\frac{r_s i_\alpha}{L_s} - \frac{e_\alpha}{L_s} + \frac{u_\alpha}{L_s} \\ \frac{di_\beta}{dt} = -\frac{r_s i_\beta}{L_s} - \frac{e_\beta}{L_s} + \frac{u_\beta}{L_s} \\ \frac{de_\alpha}{dt} = p\omega_r e_\beta \\ \frac{de_\beta}{dt} = -p\omega_r e_\alpha \end{cases} \quad (8)$$

则永磁同步电机的状态方程可线性表示为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}(t) = \mathbf{A}\mathbf{x}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t), \\ \mathbf{y}(t) = \mathbf{C}\mathbf{x}(t). \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{x}=[i_\alpha \ i_\beta \ e_\alpha \ e_\beta]^T$  为状态矢量;

$\mathbf{u}=[u_\alpha \ u_\beta]^T$  为输入矢量;

$\mathbf{y}=[i_\alpha \ i_\beta]^T$  为输出。

## 2 观测器构建及位置估计

### 2.1 观测器构建

根据控制理论,一个系统能够完全通过检测到的输出值来重构其系统状态,则认为该系统是可观测的。状态观测器能根据所观测系统的输入及输出值估计其内部状态。基于龙伯格观测器理论建立永磁同步电机模型,如图1所示。

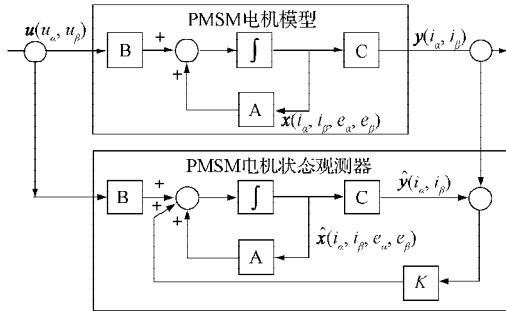


图1 PMSM模型和观测器框图

Fig. 1 The block diagram for PMSM model and observer

由图1可知, PMSM 的状态方程为:

$$\begin{cases} \frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} = -\frac{r_s}{L_s}\hat{i}_\alpha - \frac{\hat{e}_\alpha}{L_s} + \frac{u_\alpha}{L_s} + K_1(\hat{i}_\alpha - i_\alpha), \\ \frac{d\hat{i}_\beta}{dt} = -\frac{r_s}{L_s}\hat{i}_\beta - \frac{\hat{e}_\beta}{L_s} + \frac{u_\beta}{L_s} + K_1(\hat{i}_\beta - i_\beta), \\ \frac{d\hat{e}_\alpha}{dt} = p\omega_r\hat{e}_\beta + K_2(\hat{i}_\alpha - i_\alpha), \\ \frac{d\hat{e}_\beta}{dt} = -p\omega_r\hat{e}_\alpha + K_2(\hat{i}_\beta - i_\beta). \end{cases} \quad (10)$$

式中  $K_1(\hat{i}_\alpha - i_\alpha)$ ,  $K_2(\hat{i}_\alpha - i_\alpha)$  为修正项。

根据式(10),引入估测电流  $(\hat{i}_\alpha, \hat{i}_\beta)$  的反馈值并进行离散化处理,即:

$$\begin{cases} \hat{i}_\alpha(t+1) = \hat{i}_\alpha(t) - \frac{r_s T}{L_s} \hat{i}_\alpha(t) + K_1 T (\hat{i}_\alpha(t) - i_\alpha(t)) - \\ \quad \frac{T}{L_s} \hat{e}_\alpha(t) + \frac{T}{L_s} u_\alpha(t), \\ \hat{i}_\beta(t+1) = \hat{i}_\beta(t) - \frac{r_s T}{L_s} \hat{i}_\beta(t) + K_1 T (\hat{i}_\beta(t) - i_\beta(t)) - \\ \quad \frac{T}{L_s} \hat{e}_\beta(t) + \frac{T}{L_s} u_\beta(t), \\ \hat{e}_\alpha(t+1) = \hat{e}_\alpha(t) + K_2 T (\hat{i}_\alpha(t) - i_\alpha(t)) + p\bar{\omega}_r \hat{e}_\beta(t) T, \\ \hat{e}_\beta(t+1) = \hat{e}_\beta(t) + K_2 T (\hat{i}_\beta(t) - i_\beta(t)) - p\bar{\omega}_r \hat{e}_\alpha(t) T. \end{cases} \quad (11)$$

式中:  $T$  为采样时间;

$\bar{\omega}_r$  为  $\omega_r$  的平均值。

### 2.2 转子位置角及速度计算

永磁同步电机运行到一定速度后,可通过系统获得电机的相电流和母线电压。进一步计算,可得电机反电动势的  $\alpha, \beta$  分量。将式(7)中的  $e_\alpha, e_\beta$  相除,可得转子的位置角,即

$$\theta_r = p\omega_r t = \arctg\left(-\frac{\hat{e}_\beta}{\hat{e}_\alpha}\right). \quad (12)$$

将  $\hat{e}_\alpha$  和  $\hat{e}_\beta$  送到锁相环模块(见图2)。锁相环模块通过PI调节过程重构,计算得到电机转子角速度  $\omega_r, \omega_r$  积分得到转子位置角  $\theta_r, \theta_r$  进一步参与PI闭环调节,直到PI调节器输入为0,转子位置角领先反电动势一个采样周期,此时锁相环转子角速度  $\omega_r$  和位置角  $\theta_r$  锁定。

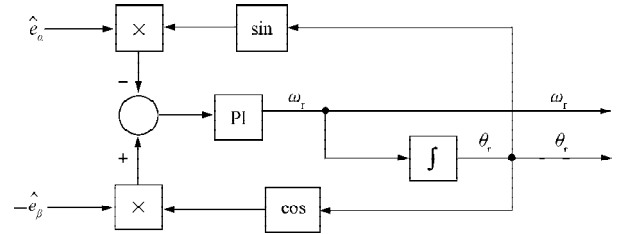


图2 电机转子位置角及速度计算锁相环

Fig. 2 Motor rotor position angle and speed calculation phase lock loop

## 3 系统控制策略

由于永磁同步电机在静止或低速时,反电动势为零或很小,很难通过反电动势来检测转子的位置。而采用无位置算法的永磁同步电机存在启动问题。针对上述问题,本文先采用低成本、低分辨率的霍尔位置传感器启动电机,待电机旋转到一定转速,且无位置算法收敛后,再切换到无位置控制模式,以提高电机在高转速下的运行平稳性及系统可靠性。系统控制结构如图3所示。图3中,上部分为传统PI控制,反电势计算、转子位置反馈和霍尔位置信号为本文研究的3个模块。

当得到的速度变化范围及方差满足式(13)要求时,算法收敛,系统切换到无位置控制算法。

$$\begin{cases} \sigma^2 \leq \mu^2 \Delta, \\ 0.8\omega_f \leq \mu \leq \omega_f. \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $\sigma$  为速度方差;

$\Delta$  为方差允许范围;

$\mu$  为电机平均转速;

$\omega_f$  为强制切换的最高转速。

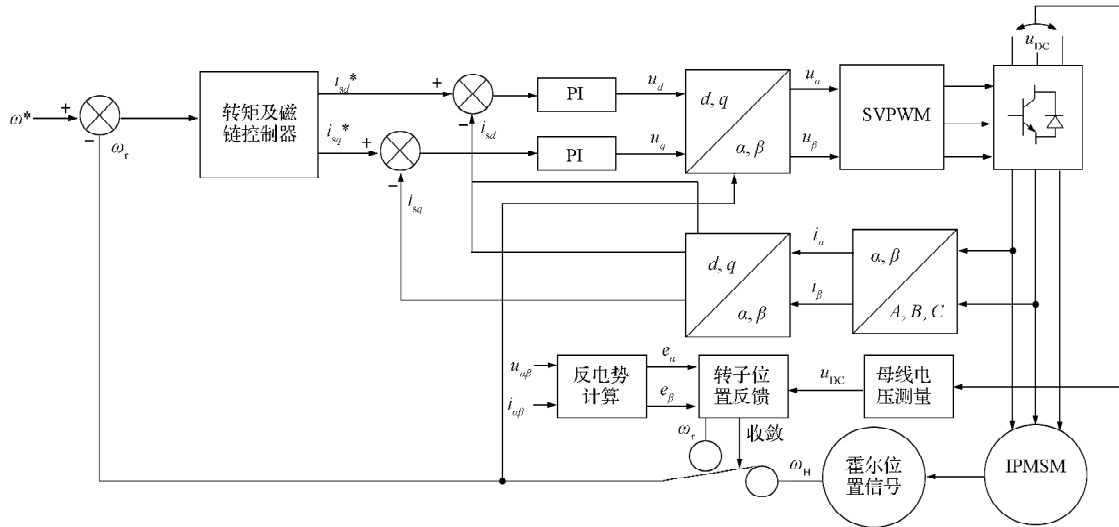


图3 基于观测器的内埋式永磁同步电机系统控制框图

Fig. 3 The block diagram for IPMSM system control based on observer

### 4 仿真分析

本控制系统基于低成本的32位ARM控制平台STM32F103(芯片主频72 MHz,片内Flash 128 kB),能满足无位置矢量控制要求。系统使用的开关频率为10 kHz。低速时,采用低成本、低分辨率的霍尔位置传感器启动电机,当速度达到一定值且无位置控制算法收敛时,再切换到无位置控制算法。同时系统采用最大转矩电流比以及弱磁控制方式,充分利用磁阻转矩,提高电机的转矩输出能力和系统效率。系统的电机参数如表1所示。

表1 电机参数表

Table 1 Motor parameters

相电阻 $R_s / \Omega$	电机极对数 $p$	直轴电感 $L_d / H$	交轴电感 $L_q / H$
0.012 3	2	0.25e-3	0.7e-3
永磁体磁链 $\psi_f / Wb$	额定转速 $N_n / (r \cdot \min^{-1})$	额定功率 $P_n / kW$	额定转矩 $T_n / (N \cdot m)$
0.065	4 000	1.8	6

系统根据所观测的电机转速,周期性地计算速度均值和速度方差。电机启动时的电流波形图如图4所示。由图4可知,在1.47 s时,电机转速在500~700  $r \cdot \min^{-1}$ 之间,速度方差小于系统设置的阈值(0.05\*速度均值),收敛条件满足,系统从霍尔位置传感器工作模式切换到无位置控制算法模式,系统切换过程非常平滑。

图5为电机运行在2 500  $r \cdot \min^{-1}$ , 5 N·m时,C相实际电流波形图。由图5可知,电流波形正弦性好,谐波少,噪声小。这表明通过龙伯格观测器估算的电机转子角度和速度准确,符合实际控制

要求。

系统工作效率曲线如图6所示。由图6可知,系统在2 000~3 800  $r \cdot \min^{-1}$ 调速范围内,其工作效率在85%以上;在1 000~4 000  $r \cdot \min^{-1}$ 调速范围内,系统工作效率也高于80%。

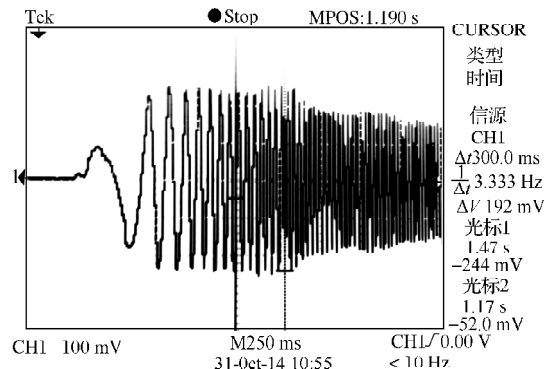


图4 电机启动时的电流波形图

Fig. 4 A current waveform at the motor startup

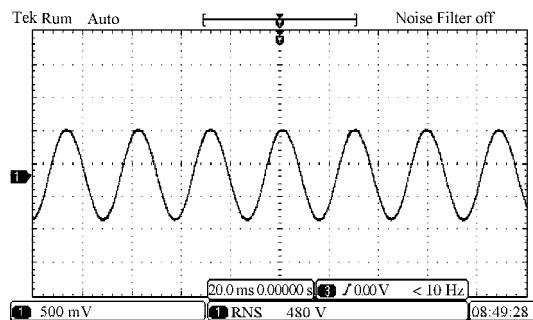


图5 电机运行在2 500  $r \cdot \min^{-1}$ , 5 N·m时,C相实际电流波形图

Fig. 5 The C phase actual current waveform when the motor running at 2 500  $r \cdot \min^{-1}$ , 5 N·m

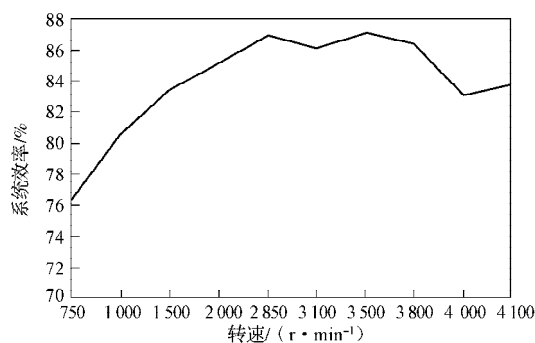


图6 系统工作效率图

Fig. 6 System working efficiency

综上所述,本控制系统从霍尔位置算法到无位置控制算法过渡平滑,电流波形正弦性好,谐波少,噪声小。同时系统工作效率高,在 $1\ 000\sim 4\ 000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的调速范围内系统工作效率高于80%。与传统霍尔位置传感器方案相比,控制系统控制精度高,控制效率高,且成本较低;与编码器方案相比,本控制系统具有低成本的优势。

## 5 结语

本文提出了低分辨率霍尔启动龙伯格观测器内埋式永磁同步电机无位置控制算法,设计了转子位置与转速的状态观测器,采用低分辨率的霍尔位置传感器启动电机,待电机旋转到一定转速,且无位置算法收敛后,再切换到无位置控制模式。仿真结果表明,本系统稳定、可靠、精准,且成本低,因此,其具有广泛的应用前景。

### 参考文献:

- [1] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 247-257.  
TANG Renyuan. Modern Permanent Magnet Motor Theory and Design[M]. Beijing: China Machine Press, 2000: 247-257.
- [2] BOSE B K. A High-Performance Inverter-Fed Drive System of an Interior Permanent Magnet Synchronous Machine[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1998, 24(6): 987-997.
- [3] 钱东祥, 魏佳丹, 周波, 等. 无刷励磁同步电机无位置传感器启动控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 477-485.  
QIAN Dongxiang, WEI Jiadan, ZHOU Bo, et al. Sensorless Control of Brushless Synchronous Machines in the Starting Mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 477-485.
- [4] 黄飞, 皮佑国. 基于滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器控制的研究[J]. 计算技术与自动化, 2009, 28(2): 32-36.  
HUANG Fei, PI Youguo. Study of Position Sensorless Control for Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Sliding Mode Observer[J]. Computing Technology and Automation, 2009, 28(2): 32-36.
- [5] 王正平, 徐衍亮. 飞轮用无位置传感器无刷直流电动机的高速驱动系统[J]. 微电机, 2006, 39(1): 91-93.  
WANG Zhengping, XU Yanliang. The Design and Controlling System of the Sensorless BLDCM[J]. Micromotor, 2006, 39(1): 91-93.
- [6] 董苏, 赵焯, 戴鹏. 一种新型IPMSM无位置传感器矢量控制系统研究[J]. 电气传动, 2013, 43(5): 11-15.  
DONG Su, ZHAO Ye, DAI Peng. Research on a Novel Position Sensorless Vector Control System of IPMSM[J]. Electric Drive, 2013, 43(5): 11-15.
- [7] 易伯瑜, 康龙云, 林玉健, 等. 基于双段卡尔曼滤波的永磁电机无传感器控制[J]. 华南理工大学学报, 2013, 41(12): 49-55.  
YI Boyu, KANG Longyun, LIN Yujian, et al. Sensorless Control of Permanent Magnet Motor Based on Two Stage Kalman Filtering[J]. Journal of South China University of Technology, 2013, 41(12): 49-55.
- [8] 寿利宾, 袁登科. 基于高频旋转电压信号注入的无位置传感器控制[J]. 电机与控制应用, 2014, 41(12): 10-14.  
SHOU Libin, YUAN Dengke. Sensorless Control of Interior IPMSM Based on High Frequency Rotating Voltage Injection[J]. Electric Machines & Control Application, 2014, 41(12): 10-14.
- [9] 续丹, 包鑫, 霍小宁, 等. 永磁同步电机宽速域无位置传感器控制[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(9): 60-64.  
XU Dan, BAO Xin, HUO Xiaoning, et al. Sensorless Technique for Permanent Magnet Synchronous Motor with Wide-Speed-Range[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2013, 47(9): 60-64.
- [10] TURSINI M, SCAFATI A, GUERRIERO A, et al. Extended Torque-Speed Region Sensorless Control of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors[C]//ACEMP'07. [S. l.]: IEEE, 2007, 13(2): 647-652.
- [11] ZHANG Yongchang, ZHAO Zhengming. Speed Sensorless Control for Three-Level Inverter-Fed Induction Motors Using an Extended Luenberger Observer[C]//VPPC'08. [S. l.]: IEEE, 2008: 1-5.

(责任编辑: 邓彬)