

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2015.04.011

基于改进型滑模观测器的变频洗衣机 用 PMSM 无位置传感器控制

张耀中

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘 要:针对永磁同步电机(PMSM)位置传感器成本高、维护难等问题,设计了一套用于变频洗衣机的 PMSM 无位置传感器控制方案。采用改进型滑模观测器(SMO)实现电机转子位置与转速的估算,通过三电阻采样方式来检测三相电流,有效地降低了系统成本。系统采用矢量控制模式,针对洗衣机负载波动大、运行速度高的特点,在电流内环设计中增加了电压前馈补偿解耦控制环节,与传统 PI 调节器相比,该方案能够改善电流跟踪效果,提高控制性能。最后,在洗衣机样机平台上进行了实验验证,实验结果证明该控制方案运行可靠,控制效果良好,能够满足洗衣机的工作要求。

关 键 词:变频洗衣机;永磁同步电机;无传感器控制;滑模观测器;解耦控制

中图分类号:TM925;TM341

文献标志码:A

文章编号:1005-2895(2015)04-0044-05

Sensorless Control of PMSM for Washing Machine Based on Improved SMO

ZHANG Yaozhong

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Due to the problems of position sensors installed on the permanent magnet synchronous motor (PMSM), such as high cost, difficult maintenance and so on, a novel method for sensorless control of PMSM was presented, which is applied to washing machines. An improved sliding mode observer (SMO) was used to estimate rotor position and speed of the motor. Three-phase current was sampled through three shunt resistance, which greatly reduced the cost of the system. In the proposed system, vector control mode was used, and decoupling control link based on voltage feed forward compensation was added to the inner current loop for the characteristics of large load variations and high speed of washing machine. Compared with traditional PI controller, this scheme can improve the current tracking effect as well as the control performance. At last, the scheme is experimented in a washing machine prototype platform. The experiment results show that the control strategy works reliably and has good controlling performance, which meets the requirements of washing machines.

Key words: wash machine; Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM); sensorless control; sliding mode observer (SMO); decoupling control

目前,变频洗衣机正向着低成本、高性能、高效率趋势发展,而永磁同步电机(PMSM)由于其功率密度大、运行效率高、启动转矩大等优点,在高性能变频洗衣机系统及其他家电领域得到越来越广泛的应用^[1]。

变频洗衣机要求电机能够高效稳定运行,一般采

用矢量控制模式。矢量控制需要获取电机转子位置以及转速,而位置传感器的安装会增加系统成本、降低可靠性,出于成本考虑,某些场合会采用无位置传感器控制方法。无位置传感器控制方法有高频注入法^[2-3]、反电动势法^[4]、滑模观测器法^[5-6]、模型参考自适应

收稿日期:2015-01-25;修回日期:2015-02-30

作者简介:张耀中(1989),男,广东茂名,硕士研究生,主要从事 PMSM 无位置传感器控制方面的研究。E-mail:zhangyz_ee@163.com

法^[7]、扩展卡尔曼滤波器法^[8]等。滑模观测器法计算量较小,鲁棒性强,比较适合用于低成本的洗衣机系统中。因此,本文采用滑模观测器对转子位置及转速进行估算,用饱和函数代替传统的符号函数,并结合锁相环估算单元,有效地减小了抖振现象。采用三电阻采样方法对三相电流进行检测,避免使用昂贵的电流霍尔传感器,降低了成本。电流内环在传统 PI 控制基础上增加了电压前馈补偿解耦控制,提高系统动态响应,实现低成本高性能 PMSM 无位置传感器控制。以 TMS320F28027 作为主控芯片,搭建了试验平台,在洗衣机样机上进行加载实验。实验结果验证了方案的可行性和有效性,能够成功应用于变频洗衣机系统上。

1 基于滑模观测器的转子位置及转速估计

电机采用表贴式永磁同步电机 (SPMSM),其在静止两相坐标系下的数学模型为:

$$\frac{di_\alpha}{dt} = -\frac{R}{L}i_\alpha + \frac{1}{L}v_\alpha - \frac{1}{L}e_\alpha; \quad (1)$$

$$\frac{di_\beta}{dt} = -\frac{R}{L}i_\beta + \frac{1}{L}v_\beta - \frac{1}{L}e_\beta; \quad (2)$$

$$e_\alpha = -\lambda_f \omega_r \sin \theta; \quad (3)$$

$$e_\beta = \lambda_f \omega_r \cos \theta. \quad (4)$$

式中, $i_\alpha, i_\beta, v_\alpha, v_\beta, e_\alpha, e_\beta$ 分别为静止两相坐标系下的电流、电压及反电动势; R 为定子电阻; L 为定子电感; λ_f 为转子永磁磁链; θ 为转子位置角度; ω_r 为转子转速。

根据式(1)~(4),可构建 PMSM 滑模观测器为:

$$\frac{d\hat{i}_\alpha}{dt} = -\frac{R}{L}\hat{i}_\alpha + \frac{1}{L}v_\alpha - \frac{1}{L}kH(\hat{i}_\alpha); \quad (5)$$

$$\frac{d\hat{i}_\beta}{dt} = -\frac{R}{L}\hat{i}_\beta + \frac{1}{L}v_\beta - \frac{1}{L}kH(\hat{i}_\beta). \quad (6)$$

式中, $\hat{i}_\alpha, \hat{i}_\beta$ 分别为静止两相坐标系下的电流估算值; $\bar{i}_\alpha = \hat{i}_\alpha - i_\alpha, \bar{i}_\beta = \hat{i}_\beta - i_\beta$, 为电流误差; k 为滑模增益; $H(\bar{i}_\alpha)$ 为切换函数,为了削弱抖振,这里采用饱和函数代替符号函数,即

$$H(s) = \begin{cases} 1, & s > \varepsilon \\ \frac{s}{\varepsilon}, & -\varepsilon \leq s \leq \varepsilon \\ -1, & s < -\varepsilon \end{cases} \quad (7)$$

式中, ε 是一个设定的正阈值, s 为电流误差。

由式(5)~(7)可以得到:

$$\frac{d\bar{i}_\alpha}{dt} = -\frac{R}{L}\bar{i}_\alpha + \frac{1}{L}e_\alpha - \frac{1}{L}kH(\bar{i}_\alpha); \quad (8)$$

$$\frac{d\bar{i}_\beta}{dt} = -\frac{R}{L}\bar{i}_\beta + \frac{1}{L}e_\beta - \frac{1}{L}kH(\bar{i}_\beta). \quad (9)$$

定义滑模面 $S = [\bar{i}_\alpha, \bar{i}_\beta]$ 。可以证明,当滑模增益 $k \geq \max(|e_\alpha|, |e_\beta|)$ 时,能保证满足滑模存在性、可达性、稳定性的条件^{[9]528}。

当电机在滑模面上运动时,有 $\bar{i}_\alpha = 0, \bar{i}_\beta = 0$,将其代入到式(8)和式(9),可得:

$$e_\alpha = kH(\bar{i}_\alpha); \quad (10)$$

$$e_\beta = kH(\bar{i}_\beta). \quad (11)$$

对信号 $kH(\bar{i}_\alpha), kH(\bar{i}_\beta)$ 进行低通滤波之后,便可得到估算的反电动势 $\hat{e}_\alpha, \hat{e}_\beta$ 。由式(1)和式(2)可知,反电动势信号包含转子位置信息,利用反正切函数可以直接得到转子位置。但由于抖振的存在,这种方法得到的转子位置误差较大。为了使估算结果更加平滑,提高估计精度,构造了基于锁相环(PLL)结构的转子位置估算单元^{[9]528},实现框图如图1所示。

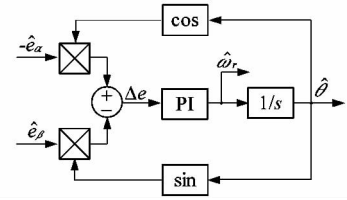


图1 PLL 实现框图

Figure 1 Block diagram of PLL

其中

$$\Delta e = -\hat{e}_\alpha \cos \hat{\theta} - \hat{e}_\beta \sin \hat{\theta} = \hat{\omega}_r \lambda_f \sin(\theta - \hat{\theta}). \quad (12)$$

式中, $\hat{\theta}$ 为估计转子位置角度; $\hat{\omega}_r$ 为估计转子转速。

当 $\theta - \hat{\theta}$ 比较小时, $\sin(\theta - \hat{\theta})$ 近似等于 $\theta - \hat{\theta}$, 因此,PLL 转子位置估算单元等效为图2所示单元。

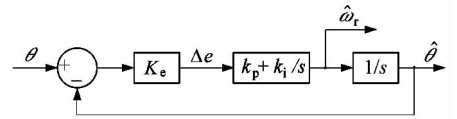


图2 PLL 等效图

Figure 2 Equivalent diagram of PLL

由图2可得该估算单元的开环传递函数为:

$$G(s) = \frac{K_e \cdot k_p \cdot s + K_e \cdot k_i}{s^2}. \quad (13)$$

其中, K_e 是锁相环系数,且 $K_e = \hat{\omega}_r \lambda_f, k_p$ 为 PI 调节器比例增益, k_i 为 PI 调节器积分参数。

一般转子位置信号可近似为斜坡函数,故系统稳态误差为:

$$\Delta e(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \frac{1}{1 + G(s)} \cdot \frac{1}{s^2} = 0. \quad (14)$$

可见运用 PLL 估算单元可以准确地从反电动势信号中提取出转子位置信息,从而实现转子位置及转

DSP 芯片 TMS320F28027 作为主控芯片,安装 3 个开关型霍尔传感器检测转子实际位置,作为观测结果的参考。实验数据通过上位机串口通信采集。

图 7 为带载情况下电机运行的转速实验波形,从图中可以看出,当转速变化时,滑模观测器得到的估计转速也能很好地跟踪实际转速,误差较小,转速响应快。图 8 为额定转速(700 r/min)下电机转子位置的观测结果,可以看出,转子位置观测值跟踪效果较好。这说明,系统在带扰动负载情况下能够准确地估测出转速及转子位置,鲁棒性较强。

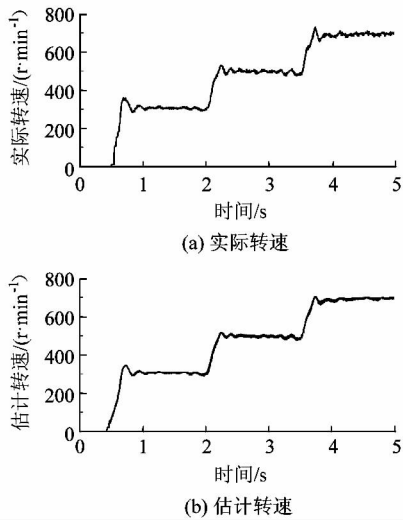


图 7 转速实验波形

Figure 7 Experimental waveforms of rotor speed

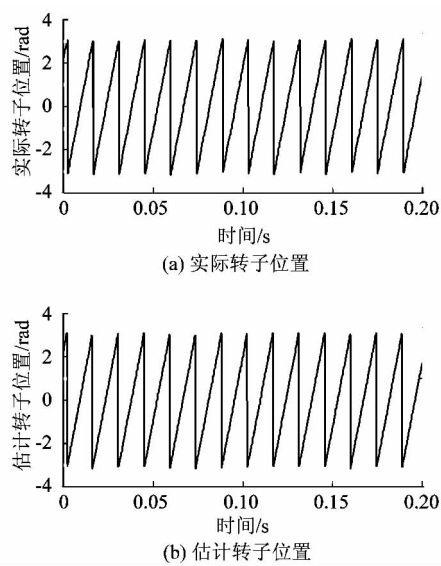


图 8 转子位置实验波形

Figure 8 Experimental waveforms of rotor position

为了验证解耦控制的有效性,在洗衣机平台对 PMSM 进行 2 种控制方法的带载实验。图 9 为采用传统 PI 控制器时的实验波形,图 10 为采用电压前馈补偿解耦控制的实验波形。在洗涤过程中,洗衣机负载波动大,导致给定 q 轴电流波动也比较大。可以看到,在负载波动大、转速较高的情况下,传统 PI 控制的电流响应并不理想,动态性能较差,而解耦控制能很好地改善电流跟随效果,减小了转速波动,提高了系统的动静态性能。

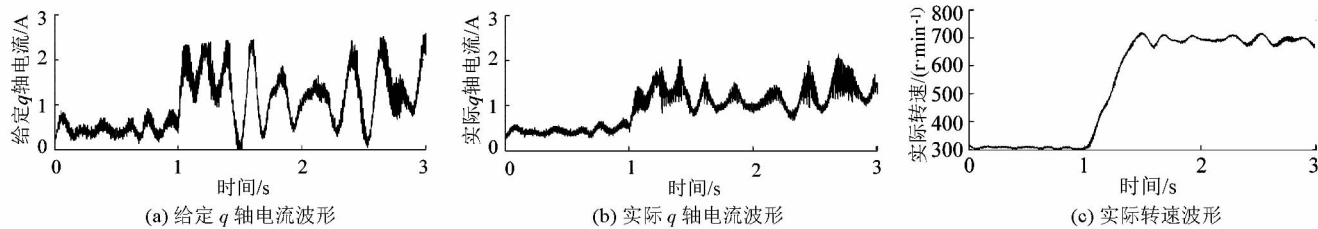


图 9 传统 PI 控制实验波形

Figure 9 Experimental waveforms of traditional PI controller

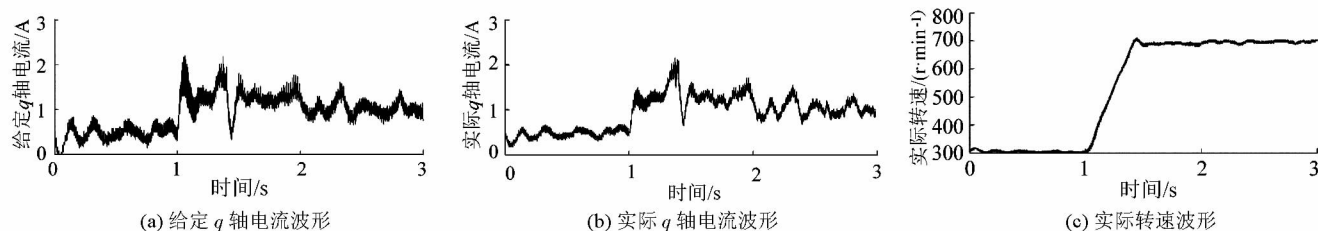


图 10 解耦控制实验波形

Figure 10 Experimental waveforms of decoupling controller