

一种基于 DSP 的 PMSM 转子位置及速度估计新方法

张 剑, 温旭辉, 刘 钧, 华 旸

(中国科学院电工研究所, 北京市 海淀区 100080)

A Novel Sensorless Control Technique for Permanent Magnet Synchronous Motor Using Digital Signal Processor

ZHANG Jian, WEN Xu-hui, LIU Jun, HUA Yang

(Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Science, Haidian District, Beijing 100080, China)

ABSTRACT: On the basis of analyzing the mathematic model of the PM synchronous machine, a novel rotor position estimation scheme is suggested, which will meet the need of sensorless operation for PMSM. And then, a fully digitized sensorless vector control system of PMSM is set up based on this position estimation approach. Using the "electrical steady state" operation concepts, the actual rotor position as well as the motor speed can be estimated accurately during transit states. The error compensation algorithm of the state estimation is presented through analyzing the parameter dependency of the proposed system. This method has simpler control algorithms and little computational burden and can be easily implemented in digital control strategy. Experimental results based on Digital signal processor(DSP) TMS320LF2407A demonstrate the feasibility of the proposed strategy, and the dynamic and static performances are quite well.

KEY WORDS: permanent magnet synchronous motor; digital signal processor; sensorless control; error compensation

摘要: 在分析永磁同步电机数学模型的基础上, 针对永磁电机无位置传感器运行的需要, 提出了一种全数字化的基于估计坐标系的永磁同步电动机(PMSM)位置估算方法, 并应用这种方法建立了永磁同步电机无位置传感器的矢量控制系统, 在 DSP 芯片 TMS320LF2407A 上得到了具体验证和实现。该方案将电气稳态操作概念引入电机的状态估计中, 有效解决了暂态过程中转子速度、位置估计不精确的问题。在讨论状态估计算法对电机参数依赖性的基础上, 给出了估计误差补偿算法。该状态估计算法简单, 计算量小, 易于数字化实现。实验结果表明, 所提出的 PMSM 无传感器控制方法具有较强的鲁棒性和令人满意的性能。

关键词: 永磁同步电动机; 数字信号处理器; 无位置传感器控制; 误差补偿

0 引言

永磁同步电机由于具有功率密度大、效率高、转子损耗小等优点而被广泛的应用于电动汽车、数控机床等电气传动领域。由于变频调速方法具有高效率、较宽的调速范围和高精度的调速性能, 因此应用前景十分看好。但是, 要获得良好的调速性能, 电机转子位置和速度信号是必不可少的。电机速度和磁极位置的检测, 多采用光电编码器或旋转变压器等机械传感器^[1], 但这种方法增大了电机的体积和成本, 不适应恶劣的工作环境, 且电机易受干扰。这些问题限制了交流调速系统的应用, 近年来 PMSM 的无传感器控制已成为电气传动领域一个重要研究方向。

无传感器矢量控制系统的核心问题是转子位置和转速的估计, 系统性能的好坏取决于状态估计的精度和动态响应速度。目前, 无传感器 PMSM 矢量控制中已提出许多方法来估计电机转子位置和速度^[2-15]。文献[2-3]利用 PMSM 基本电磁关系估算位置和转速, 这种方法计算简单, 动态响应快, 然而它对电机参数特别敏感, 且电机转速较低时估计不准确, 不能用于要求电机正反转的场合。文献[4-6]中讨论了基于观测器的 PMSM 转子位置和速度的估计。但是这种方法算法复杂, 计算量相当大; 同时某些基于观测器的估计方法需要用到许多随机误差的统计参数, 由于模型复杂, 涉及因素较多, 使得分析这些参数的工作比较困

难。文献[7-9]提出了高频注入的方法，通过给电机注入高频电压，并检测其相应的电流来获取转子的位置和转速。该方法虽然可以应用于较宽的速度范围且低速时也可得到较好的估算结果，但是高频信号的注入会带来高频噪声问题，且需要特殊的硬件电路，只适于内埋式电机。文献[10]给出利用永磁电机凸极效应来估算转子位置和速度的方法。利用检测到的电压和电流值，计算出在这个位置时的电感，并与预先制好的表格中的电感值相比较，进而确定转子位置。由于暂态和低速时不容易准确地测量定子电压，计算得到的电感值也会有偏差。

本文在分析 PMSM 模型的基础上，提出了 1 种基于 DSP 的新型位置估计算法。在讨论估计算法对电机参数依赖性的同时给出了估计误差补偿算法。使用该方法不仅可以提高对电机参数变化的鲁棒性，而且有效地解决了暂态过程中位置估计准确性不够的问题。由于该方法只需检测两相定子电流，因此不需要特殊的硬件设备，降低了系统成本。利用美国 TI 公司设计的电机控制专用芯片 DSP TMS320LF2407A 构成 1 个 PMSM 无位置传感器全数字控制方案，实验结果表明该系统性能优良，它可以广泛应用于电动汽车或数控机床的驱动系统中。

1 基于估计坐标系的 PMSM 数学模型

基于两相静止 ab 坐标系的 PMSM 模型如下

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + DL_s & 0 \\ 0 & R_s + DL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} + y_f w \begin{bmatrix} -\sin q \\ \cos q \end{bmatrix} \quad (1)$$

经坐标变换可得其基于 d - q 轴系的电压方程

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + DL_s & -wL_s \\ wL_s & R_s + DL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + y_f w \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中： u_d 、 u_q 、 u_a 、 u_b 分别为定子绕组 dq 轴及 ab 轴电压； i_d 、 i_q 、 i_a 、 i_b 分别为定子绕组 dq 轴及 ab 轴电流； R_s 、 L_s 分别为定子电阻、电感； y_f 为转子永久磁体产生的磁势； q 为转子位置角； w 为转子电气角速度； $D=d/dt$ 为微分算子。

由于无位置传感器控制系统的转子位置是基于估算，并非通过实际检测得到，所以在实际转子位置 q 和估算位置 q_{est} 之间会存在误差

$$\Delta q = q - q_{est} \quad (3)$$

为讨论方便，设基于估算位置 q_{est} 的两相旋转坐标系为 gd ，则对应的空间矢量关系如图 1 示。

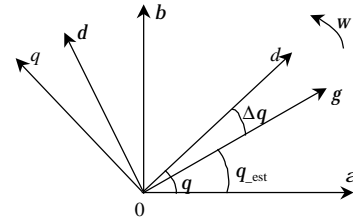


图 1 无位置传感器控制空间矢量图

Fig.1 Space-vector diagram of the sensorless PMSM

参照矢量变换原理，定义由两相静止坐标系 ab 到两相旋转坐标系 gd 的坐标变换矩阵为

$$T(q_{est}) = \begin{bmatrix} \cos(q_{est}) & \sin(q_{est}) \\ -\sin(q_{est}) & \cos(q_{est}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

gd 坐标系下定子电压、电流方程可表示为

$$\begin{bmatrix} u_g \\ u_d \end{bmatrix} = T(q_{est}) \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} i_g \\ i_d \end{bmatrix} = T(q_{est}) \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式(1)~(5)可得基于估算转子位置 q_{est} 的表面贴装式 PMSM 数学模型

$$\begin{bmatrix} u_g \\ u_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + DL_s & -(pq_{est})L_s \\ (pq_{est})L_s & R_s + DL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_g \\ i_d \end{bmatrix} + y_f w \begin{bmatrix} -\sin \Delta q & \cos \Delta q \end{bmatrix}^T \quad (6)$$

gd 坐标系下的反电动势 e_g 和 e_d 分别为

$$\begin{cases} e_g = -y_f w \sin \Delta q \\ e_d = y_f w \cos \Delta q \end{cases} \quad (7)$$

由式(6)可见，电机方程的反电动势项中包含转子估算误差 Δq 。因此，只需计算出反电势即可得到 Δq ，而转子实际位置角 q 可由 Δq 和已知的估算转子位置 q_{est} 通过式(3)计算得到。

由式(6)，电机的端电压包含定子电阻、电感上的压降和反电动势两部分，要想得到反电势必须将定子上的压降从电机端电压中移去，但是与定子电流微分项 $L_s(di_s/dt)$ 及位置估计微分项 $L_s(dq_{est}/dt)i_s$ 相关的压降很难准确计算。因此，为了得到反电势，必须通过特殊的处理将这些项摒弃。为此，本文引入了电气稳态的概念。

2 无位置传感器控制策略

2.1 无位置传感器控制系统结构

本文采用的 PMSM 无位置传感器控制系统结构如图 2 所示：内环为电流环，主要完成对电流的控制；外环为速度环，主要完成转子位置估计和速度的闭环控制。对于 1 个性能良好的电机双闭环数字控制系统，电流调节器的输入给定值 i^* 总是在速度环控制周期的开始由速度环的输出给定，若每个

如图 4 所示。

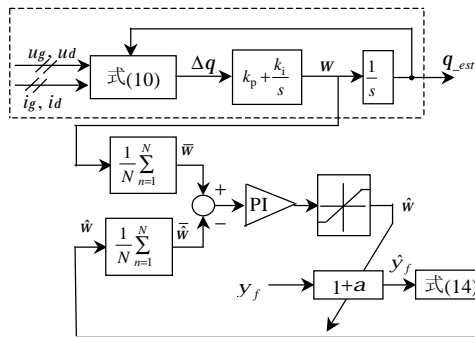


图 4 速度估计补偿框图

Fig.4 Diagram of speed estimation compensator

为提高补偿算法的稳定性，本文引入锁相环的结构，见图 4 中虚线框内。由 Δq 计算得到的转子速度 w 的平均值 \bar{w} 在稳态时被近似当作实际转速，由式(14)得到的估计转速求平均后得 $\bar{\hat{w}}$ ，与 \bar{w} 的差作为 PI 调节器的输入。如果 \hat{y}_f 与实际值不符，则必然导致稳态速度估计误差，PI 调节器通过调整 a 值来改变 \hat{y}_f 的值，最终使转速估计误差为零。

3 软件设计

本文设计的交流伺服系统利用了 DSP 丰富的软、硬件资源，并依据模块化的编程设计思想，将系统软件按功能分为两部分：主程序及 PWM 中断服务程序。

主程序主要完成系统的初始化，I/O 口初始化以及 DSP 内各个控制模块寄存器的设置。定时器 1 下溢出中断程序是整个伺服控制程序的核心，实现转子磁极位置及速度的估算、SVPWM 控制信号的生成以及转速环和电流环控制等功能。其中，PWM 周期设定为 $200\mu s$ ，每执行 10 次电流环执行一次速度环。控制系统时序如图 5 示。

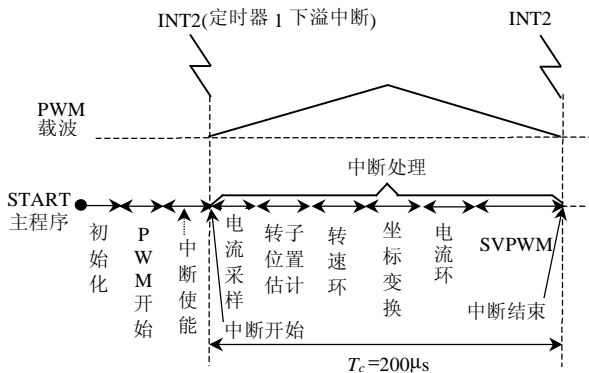


图 5 控制系统时序图

Fig.5 Time sequence of the control system

4 实验结果

实验系统结构框图如图 6 所示。用 TI 公司的 DSP TMS320LF2407A 作为控制核心，主回路采用智能功率模块(IPM)，整个主回路先经不控整流，后经全桥逆变输出。DSP 通过其内部 CAN 模块与 PC 机进行通讯，既可以将实时的数据传给 PC，也可从 PC 得到控制命令。

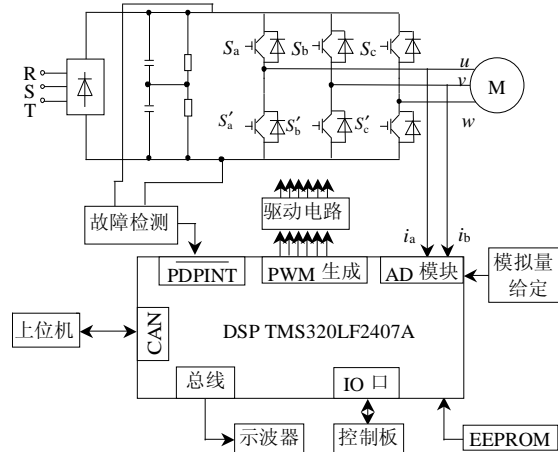


图 6 实验系统结构框图

Fig.6 The structure of experimental system

实验电机(定子星型接法)的参数如下：功率为 1.8kW；电枢电阻为 0.39Ω ；定子电感直轴分量为 $8.5mH$ ；定子电感交轴分量为 $8.5mH$ ；转动惯量为 $0.012kg \cdot m^2$ ；额定电流为 6.9A；极对数为 4。

本文针对不同负载在各种转速下对样机进行了实验研究。图 7(a)给出了转速给定值为 1000r/min，空载起动时实际转速和估计转速波形，其中实际转速由与电机同轴连接的光电编码器测得，作为参照与估计速度进行比较。图 7(b)为起动过程转子实际位置和估计位置波形。从图中可以看出，除了在起动的瞬间，估计位置与实际转子位置不一致外，当转速达到一定值时转子估计位置可以很快收敛于转子实际位置，这就保证了控制系统的正常运行。

图 8 给出电机带额定负载稳定运行在 +330 r/min 时的转子位置估计值和实际值波形，其中转子实际位置由光电码盘测得^[1]，可与转子位置的估计值作比较，验证估计算法的正确性。通过对比可见转子位置估计十分准确，在转速不太低的情况下几乎与光电码盘测得的转子位置一致。

图 9 给出了电机带 0.8 倍额定负载稳定运行在 40 r/min 时两相定子电流 i_a 、 i_b 波形，从图中可以看出两相定子电流为相位互差 120° 的正弦波，说明整个系统的电流环控制效果明显。

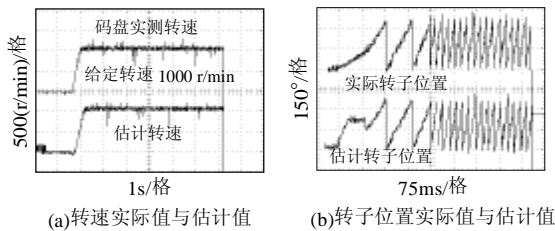


图7 空载启动时转速和转子位置实验波形
Fig.7 Experimental result of rotor speed and position estimator position estimator

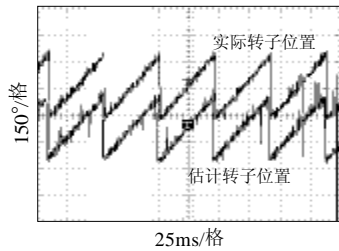


图8 330 r/min 稳态运行转子位置实际值和估计值
Fig.8 Real and estimated rotor position at 330 r/min

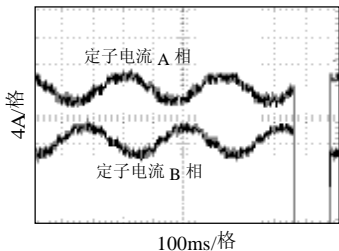


图9 40 r/min 带载运行定子电流 i_a 、 i_b
Fig.9 Phase current i_a 、 i_b at 40r/min

5 结论

本文给出的 PMSM 无位置传感器调速的新方法,很好地解决了暂态过程中转子速度、位置估计不精确的问题,提高了控制系统的参数鲁棒性。构建的基于 DSP TMS320LF2407A 的 PMSM 无位置传感器全数字控制系统充分利用了 DSP 芯片内部资源,易于数字化实现,实验结果证明了本文提出的状态估计方法的有效性。

参考文献

- [1] 张剑,潘月斗,许镇琳.数控机床伺服系统高精度位置检测研究与实现[J].制造业自动化,2004,26(10):23-25.
Zhang Jian, Pan Yuedou, Xu Zhenlin. Research on the high-precision rotor position detection of the machine tools servo system [J]. Manufacturing Automation, 2004, 26(10): 23-25(in Chinese).
- [2] Maidu M, Bose B K. Rotor position estimation scheme of a permanent magnet synchronous machine for high performance variable speed drive[C]. IEEE IAS Annual Meeting, Houston, USA, 1992, 1: 48-53.
- [3] French C, Acamley P. Control of permanent magnet motor drives using a new position estimation technique[J]. IEEE Trans. on Ind., 1996, 32(5): 1089-1097.
- [4] Bado A, Bolognani S, Zigliotto M. Effective estimation of speed and

rotor position of a PM synchronous motor drive by a Kalman filtering technique[C]. PESC '92 Record. 23rd Annual IEEE, Toledo, SPAIN, 1992, (1): 951-957.

- [5] 林飞,张春朋,宋文超,等.基于扩张状态观测器的感应电机转子磁链观测[J].中国电机工程学报,2003,23(4):145-147.
Lin Fei, Zhang Chunpeng, Song Wenchao, et al. Flux observer of induction motor based on extended state observer[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 145-147(in Chinese).
- [6] 李鸿儒,顾树生.基于神经网络的PMSM速度和位置自适应观测器的设计[J].中国电机工程学报,2002,22(12):32-35.
Li Hongru, Gu Junsheng. Neural-network-based adaptive observer of position and speed of PMSM[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12): 32-35(in Chinese).
- [7] Corley M J, Lorenz R D. Rotor position and velocity estimation for a permanent magnet synchronous machine at standstill and high speed [C]. IEEE OAS Annual Meeting, San Diego, CA, 1996.
- [8] Wang limei, Lorenz R D. Rotor position estimation for permanent magnet synchronous motor using saliency-tracking self-sensing method[C]. IEEE IAS Annual Meeting, Rome, ITALY, 2000.
- [9] 秦峰,贺益康.两种高频信号注入法的无传感器运行研究[J].中国电机工程学报,2005,25(5):116-121.
Qin feng, He Yikang. Comparative investigation of sensorless control with two high-frequency signal injection schemes[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(5): 116-121(in Chinese).
- [10] Corley M J, Lorenz R D. Rotor position and velocity estimation for a salient-pole permanent magnet synchronous motor at standstill and high speeds[J]. IEEE Trans Ind., 1998, 34(4): 784-789.
- [11] Krishnan R, Ghosh R. Starting algorithm and performance of a pm dc brushless motor drive system with no position sensor[C]. Power Electronics Specialists Conference, 20th Annual IEEE, Milwaukee, WI, 1989.
- [12] Tursini, Petrella, Parasiliti. Adaptive sliding-mode observer for speed-sensorless control of induction motors[J]. Industry Applications, IEEE Transactions on, 2000, 36(5): 1380-1387.
- [13] 夏长亮,王明超,史婷娜,等.基于神经网络的开关磁阻电机无位置传感器控制[J].中国电机工程学报,2005,25(13):123-128.
Xia Changliang, Wang Mingchao, Shi Tingna, et al. Position sensorless control for switched reluctance motors using neural network [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 123-128(in Chinese).
- [14] 年珩,贺益康,秦峰,等.永磁型无轴承电机的无传感器运行研究[J].中国电机工程学报,2004,24(11):101-105.
Nian Heng, He Yikang, Qin Feng, et al. Sensorless operation of pm type bearingless motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 101-105(in Chinese).
- [15] 邹继斌,徐永向,于成龙.正弦波无刷直流电机的新型转子位置检测方法[J].中国电机工程学报,2002,22(12):47-49.
Zou Jibin, Xu Yongxiang, Yu Chenglong. A novel detecting method of the rotor position of PMSM[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12): 47-49(in Chinese).

收稿日期:2006-04-19.

作者简介:

张剑(1980—),硕士研究生,研究方向为交流电机变频调速、电动汽车驱动技术, zhangjian@mail.iee.ac.cn;

温旭辉(1963—),四川,博士,研究员,研究方向为交流驱动,电力电子技术等;

许镇琳(1939—),男,教授,博士生导师.主要研究方向为自动化,电力电子与电力传动。

(责任编辑 云爱霞)