

基于电压矢量注入法的 PMSM 无传感器控制^{*}

宋正强¹, 姜 凡²

(1. 扬州市职业大学 汽车与电气工程系, 江苏 扬州 225011;

2. 滨州市公路工程处, 山东 滨州 256600)

摘要:针对贴面式永磁同步电机的无传感器控制在低速和静止时一直存在着转子位置难以检测和估算的问题,提出了一种新的无传感器控制策略,即根据定子铁芯的非线性磁化特性,采用电压矢量注入法(Voltage Vector Pulse Method),在电机开始运行时,由闭环自适应磁通观测器估算转子位置、速度,实现转子初始位置检测。最终,通过 Matlab 仿真和实验,验证了该方法的有效性。

关键词:永磁同步电机;无传感器控制;系统仿真;自适应观测器

中图分类号:TM351

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2010)12-0106-04

Sensorless control of PMSM based on voltage vector pulse method

SONG Zheng-qiang¹, JIANG Fan²

(1. Department of Automobile and Electricity Engineers, Yangzhou Polytechnic College, Yangzhou 225011, China;

2. Road Engineering Management Department Binzhou, Binzhou 256600, China)

Abstract: A new approach to sensorless speed control and initial rotor position estimation for a surface permanent magnet synchronous motor (SPMSM) drive was presented. At a rotating condition, speed and rotor position estimation of SPMSM drive was obtained through a self-adaptive flux observer(SAO) by only measuring phase voltages and currents. The initial rotor position was performed by using the nonlinear magnetization characteristics of the stator core caused by the rotor magnets. Experimental results show that in both steady and transient state, the system can achieve expected performances.

Key words: permanent magnet synchronous motor(PMSM); sensorless control; system simulation; self-adaptive observer

0 引 言

上世纪 80 年代以来,永磁同步伺服电机以其高转矩惯量比、高能量密度和高效率等优异性能,在中小功率驱动范围内的发展日新月异,引起了越来越多的重视^[1-3]。在大多数变速驱动系统中,为了实现闭环控制,需要轴传感器安装在电机轴上检测转子位置。但是在实际应用中,机械传感器的存在降低了控制系统的可靠性和机械鲁棒性,提高了系统的价格。因此,在一些特殊场合及不要求低速特性的场合,无传感器控制得到了普遍重视。目前,各国学者已提出了许多方

法,用来完成转子速度和磁极位置的估算。其中一类方法为跟踪速度信息法(如反电势法)^[4-7],通过对电机的电压与电流的检测,合成积分得出定子磁场磁通矢量,进而通过磁通与电流间的夹角获得最优转矩控制。但这种方法在速度的估算中容易引入量化噪声,因而需要对估算的磁通量给于一定的补偿进行校正,同时还需要与非线性观测器、最优观测器和卡尔曼滤波器等技术相结合。第二种方法是跟踪电机的空间凸极性^[8-9],这种方法是在逆变器上加入高频信号,利用永磁电机的凸极效应来估计转子位置。尽管已经有许多估计转子位置的方法被提出,但大多数是针对内埋

式永磁同步电机($L_d < L_q$),而对于贴面式永磁同步电机,在静止或极低速时难以估计转子位置。

本研究针对这一情况,提出一种闭环补偿磁通估算法,估计贴面式永磁同步电机运行状态下的转子位置;采用 VVPM(Voltage Vector Pulse Method)方法向定子绕组输入不同的电压矢量,检测转子的初始位置,并观察相应电压下所产生的电流,根据电流的变化可以检测到转子 N 极所在的位置。在初始位置给定的前提下,利用 Matlab 工具对整个控制系统作仿真实验,其结果表明,该方法切实可行,无论在暂态和稳态方面都能获得较好的性能。

1 永磁同步电机的数学模型

一台 2 极贴面式永磁同步电动机的空间矢量图如图 1 所示^[10]。

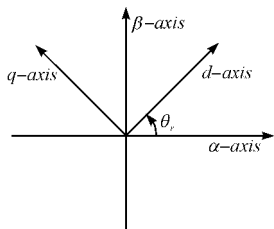


图 1 电机模型

电压方程为:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p & \omega \\ -\omega & p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

磁链方程为:

$$\begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_m \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中 p —微分算子, $p = d/dt$; r_s —定子三相绕组电阻; L_d, L_q — d 轴和 q 轴绕组电感; u_d, u_q — d 轴和 q 轴绕组电压; ω —转子角速度; i_d, i_q — d 轴和 q 轴绕组电流; ψ_m —永磁体磁通。

2 自适应转子位置磁通观测器

在定子静止坐标系 S 下,定子电压方程为:

$$v_s = r_s i_s + \frac{d\psi_s}{dt} \quad (3)$$

定子磁链方程为:

$$\lambda_s = L_s i_s + L_m i_r e^{j\theta_r} \quad (4)$$

式中 L_m —永磁体所产生的电感; i_r —永磁体在转子轴上产生的等效电流; θ_r —转子角度。

将式(4)代入式(3)中,得:

$$v_s - r_s i_s = \frac{d}{dt}(L_s i_s + L_m i_r e^{j\theta_r}) \quad (5)$$

考虑到 $L_m i_r = \Phi_R$ (Φ_R 表示转子磁通),得:

$$v_s - r_s i_s = \frac{d}{dt}(L_s i_s + \Phi_R e^{j\theta_r}) \quad (6)$$

上式两边积分得:

$$\int (v_s - r_s i_s) dt = L_s i_s + \Phi_R e^{j\theta_r} \quad (7)$$

将式(7)最后一项展开为实虚部:

$$\Phi_R e^{j\theta_r} = \Phi_R \cos \theta_r + j \Phi_R \sin \theta_r = \Phi_{R\alpha} + j \Phi_{R\beta} \quad (8)$$

将式(8)分解为实部和虚部两部分:

$$\Phi_{R\alpha} = \int (V_{s\alpha} - r_s i_{s\alpha}) dt - L_s i_{s\alpha} \quad (9)$$

$$\Phi_{R\beta} = \int (V_{s\beta} - r_s i_{s\beta}) dt - L_s i_{s\beta} \quad (10)$$

则转子位置磁通观测器为:

$$\theta_r = \arcsin \frac{\Phi_{R\beta}}{\Phi_{R\alpha}} \quad (11)$$

用电机反电势积分的方法来估计磁链仅用到电机定子电阻一个电机参数,因而受电机参数影响小。永磁同步电机采用反电势积分法估计转子位置时,如果能够准确的估计出定子磁链的值,就可以准确估计出转子的位置。但是纯积分器观测方法存在积分初值问题,即正弦输入信号其初值如果不为峰值,积分结果会在余弦信号上叠加一个直流偏移量(如图 2 所示)。同时纯积分器方法对输入信号中直流分量没有抑制作用,即使很小的直流分量也将造成积分器饱和现象。为了解决纯积分器的偏移问题,通常采用 1 阶惯性滤波器 $[\tau/(1+\tau s)]$ 来代替磁链估计中的积分器($1/s$)。采用滤波器后的磁链曲线如图 3 所示。因此,必须采用消除积分初值影响的措施,以达到准确估计磁链的目的。然而,整个电机控制系统是动态的,简单的滤波器不能满足系统的动态要求。

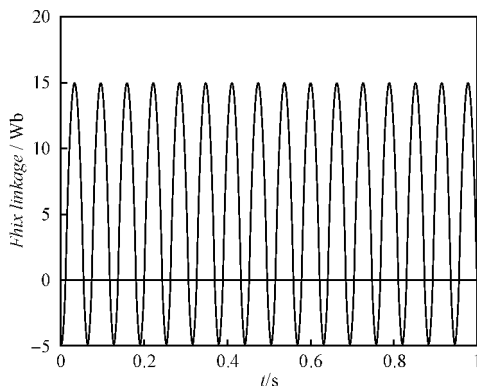


图 2 使用理想积分器的磁链曲线

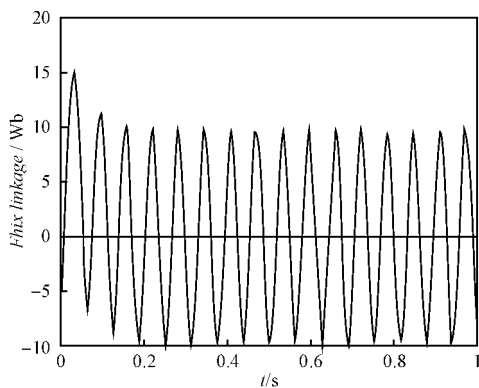


图3 采用滤波器后的磁链曲线

这里采用一种自适应闭环观测器,能够动态跟踪定子磁链的变化,并准确估算出转子的位置。由于其根据输入信号频率的不同,同时结合了纯积分器和 1 阶滤波器两者的优点,因此该方法具有较高的应用价值,有效地扩大了电机系统的调速范围,使观测的磁链更接近电机的实际磁链。

该算法用到了自适应控制器。其理论是电机磁链正交于反电势,算法中用到的正交检测器用于检测估计磁链和实际反电势之间的正交度,由正交检测器输出偏差信号,经一个比例-积分调节器产生相应的补偿基准,其幅值大小由下式决定(在反馈信号饱和时,补偿基准幅值不再是固定不变):

$$\lambda_{cmp} = \left(k_p + \frac{k_i}{s} \right) \frac{\lambda_\beta \cdot emf_\alpha + \lambda_\alpha \cdot emf_\beta}{|\lambda|} \quad (12)$$

功能框图如图 4 所示。

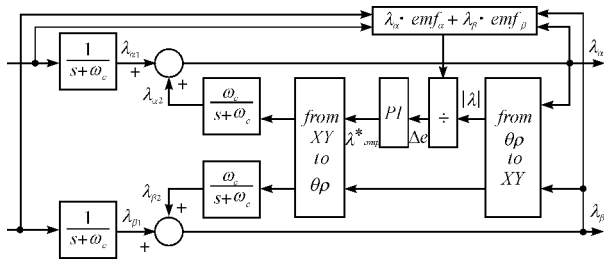


图4 自适应观测器结构

3 转子初始位置估算方法

永磁同步电机的初始位置对于电机启动是一个很关键的问题,而获取 SPMSM 转子初始位置的方法有:

(1) 通过给一相绕组加直流电使转子转动到预先设定的位置;

(2) 在静止时通过特定的算法估算转子位置。

如果想实现完全无机械传感器运行,则需要研究静止时的转子位置估算方法。目前,已经有一些转子初始位置估算方法被提出来,但是这些方法大多数适用

于内埋式 PMSM,是根据内埋式 PMSM 对于不同的转子位置其电感不同的原理。

3.1 电压脉冲矢量法(VVPM)的原理

本研究提出了一种静止时估算 SPMSM 转子位置的方法,即电压矢量注入法。估算方法是基于定子铁心的非线性磁化特性。当定子绕组电流产生的磁场与转子磁场反向时,磁路中的阻抗较高,定子电流减少;反之磁路饱和程度增强,磁阻较小,定子电流增大。因此,可以通过检测电流的变化来获得转子初始位置信息。

如图 5 所示为 PMSM 的坐标系(其中, x 为所施加的电压矢量, θ_v 表示电压矢量的方向与 α 轴的夹角)。

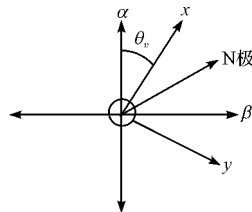


图5 电压矢量图

在逆变器中给电机施加不同的电压矢量,观察相应电压下的 x 轴电流。随着电压矢量接近转子 N 极,由于磁场的饱和效应,相应的 X 轴电流也逐渐增加,而在接近 S 极时磁场饱和密度减小,相应的 X 轴电流逐渐减少。因此,通过检测 X 轴电流变化的最大值,可以得出转子的初始位置信息。这种方法是检测电压矢量的电流响应,所以不受电机参数变化的影响。

3.2 VVPM 数学模型

如图 6 所示,正弦量 I_A 、 I_B 、 I_C 都可以表示为一个均值 I_0 加上一个偏移量 ΔI_0 ^[11],方程中含有转子机械角度 θ ,其方程如下:

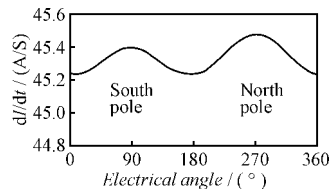


图6 轴向原静定子电流变化率

$$I_A = I_0 + \Delta I_0 \cos 2\theta \quad (13)$$

$$I_B = I_0 + \Delta I_0 \cos \left(2\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (14)$$

$$I_C = I_0 + \Delta I_0 \cos \left(2\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (15)$$

相电流与平均值之差定义为:

$$\Delta I_A = I_A - I_0 \quad (16)$$

$$\Delta I_B = I_B - I_0 \quad (17)$$

$$\Delta I_C = I_C - I_0 \quad (18)$$

相电流幅值变化最大的那部分区域与转子 N 极所

在的区域相关。余下的两相电流差值可以更准确地估算转子位置。例如,如果 A 相差值最大,那么 B、C 相就用来确定转子位置角度。方程式(14)除以方程式(15),然后将方程式(17)、式(18)代入可得:

$$\Delta I_B \cos \left(2\theta - \frac{2\pi}{3} \right) = \Delta I_C \cos \left(2\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \quad (19)$$

利用三角函数公式则可得到方程:

$$\frac{\sin (2\theta)}{\cos (2\theta)} = \frac{\cos \left(\frac{2\pi}{3} \right) (\Delta I_C - \Delta I_B)}{\sin \left(\frac{2\pi}{3} \right) (\Delta I_C + \Delta I_B)} \quad (20)$$

通过计算式(20)就可得到实际转子位置。在估算中,当 θ 很小时可假定 $\cos (2\theta) = 1, \sin (2\theta) = 0$ 。转子位置在某一确定的区域下,可作进一步计算:

$$\theta = k \frac{(\Delta I_C - \Delta I_B)}{(\Delta I_C + \Delta I_B)} \quad (21)$$

这里, $k = \cos (2\pi/3)/\sin (2\pi/3)$ 。

这个原理的位置角度误差与施加电压矢量的角分辨率有关。理论上,估算误差应该在 0.9375° 以内。

4 仿真分析

为了验证所提出的转子初始位置检测方法的可靠性、准确性,以及整个系统动静态特性,笔者首先利用 Matlab 工具进行了仿真实验,系统框图如图 7 所示。在转子初始角通过 VVPM 观测器估算出来后,将转子初始位置值赋予自适应补偿观测器,电机开始转动, VVPM 失去作用。而转子初始位置估计的准确性对整个控制系统的暂稳态特性有很大影响。

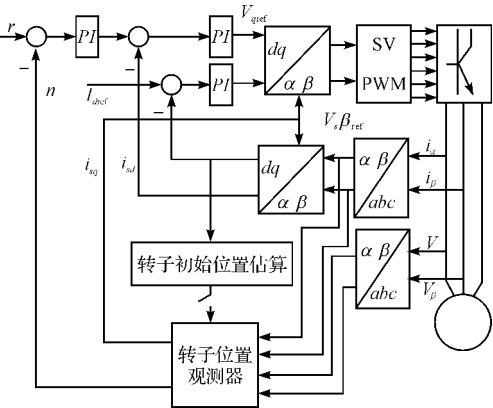


图 7 系统框图

电机转速曲线如图 8 所示,在大约 0.02 s 时电机达到 1 000 r/min 稳态值,在整个启动过程中,转速曲线有一些超调,发生振荡现象,但总体上仍能较快速地达到稳态值。

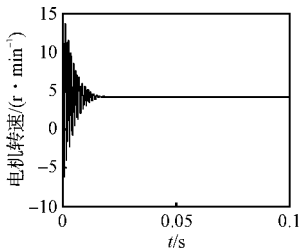


图 8 电机转速曲线

5 实验结果

在实验电路中,电机选用极对数为 3 的贴面式永磁同步电机,具体参数如表 1 所示。

表 1 SPMSM 技术参数

额定功率	1.2 kW
额定转速	6 000 r/min
额定电压	400 V
额定电流	2.8 A

在本研究中,微处理器选用 TI 公司的定点数字信号处理器(DSP)TMS320F240,用于完成整个系统的矢量控制算法和转子位置估算。整个系统运算周期为 66.67 μs, PWM 的开关频率为 15 kHz。

定子两相磁链 ψ_α 、 ψ_β 变化曲线如图 9 所示。电机速度和位移曲线如图 10 所示,由图可知,电机可以较平稳地启动、运行。

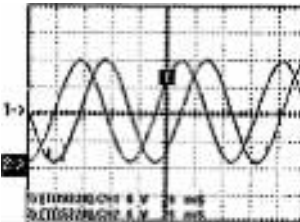


图 9 ψ_α, ψ_β 变化曲线

CH1: 1div = 0.35 Wb CH2: 1div = 0.35 Wb

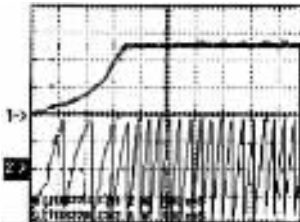


图 10 电机速度和位移曲线

CH1: 1div = 200 r/min CH2: 1div = 2π

6 结束语

针对贴面式永磁同步电机无传感器控制中的难点和存在的问题,本研究提出了一种基于闭环自适应补

(下转第 120 页)

4 结束语

静态环境下的路径规划技术已经取得了丰硕成果,但是满足动态环境下的路径规划算法还处于进一步完善阶段。本研究首先采用栅格法对环境进行全局建模,再利用改进适应度函数的粒子群算法规划出一条无碰、平滑的路径,该算法解决了粒子群算法容易陷入局部极值的问题,并且可以通过改变适应度函数权值,满足不同环境下的路径规划要求,仿真实验证明了该算法的可行性和有效性。

参考文献 (References):

- [1] 杨林权. 机器人足球竞赛与设计[M]. 1 版. 武汉:华中科技大学出版社,2009.
- [2] 李 磊,叶 涛,谭 民,等. 移动机器人技术研究现状与未来[J]. 机器人,2002,23(5):475-480.
- [3] 梁毓明,徐立鸿. 移动机器人路径规划技术的研究现状与发展趋势[J]. 机电一体化,2009,(3):35-38.
- [4] 马兆青,袁曾任. 基于栅格方法的移动机器人实时导航避障[J]. 机器人,1996,18(6):344-348.
- [5] LIU Yu-shu, DENG Hong-bin, XU Yuan-qing. Obstacle-Avoidance Path Planning for Soccer Robots Using Particle

Swarm Optimization[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Kunming: [s. n.], 2006:1233-1238.

- [6] ELLIPS M, DAVOUD S. A Multi-Objective PSO-based Algorithm for Robot Path Planning[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology. Chile: [s. n.], 2010:465-470.
- [7] METEA M B. Route planning for intelligent autonomous land vehicles using hierarchical terrain representation[C]//Proc. of IEEE Int Conf. on Robotics and Automation. Raleigh: [s. n.], 1987:1947-1952.
- [8] 于红斌,李孝安. 基于栅格法的机器人快速路径规划[J]. 微电子学与计算机,2005,22(6):98-100.
- [9] 国海涛,朱庆保,徐守江. 基于栅格法的机器人路径规划快速搜索随机树算法[J]. 南京师范大学学报,2007,7(2):58-61.
- [10] KENNEDY J, EBETHART R C. Particle Swam Optimization[C]//Proceedings of IEEE international Conference on Neural Networks. Perth: [s. n.], 1995:1942-1948.
- [11] 孙 波,陈卫东,席裕庚. 基于粒子群优化算法的移动机器人全局路径规划[J]. 控制与决策,2005,20(9):1052-1055.

[编辑:张 翔]

(上接第 109 页)

偿观测器的无位置和速度传感器的控制方法,并专门对如何获得转子初始位置提出了 VVPM 法,并验证了可行性。进一步,利用电机中易测得的电压和电流信号,通过对磁通和电流的估计和校正,获得电机运行状态下转子位置和速度信号。实验研究表明,该方法能够获得电机较平稳的启动,并能准确地估计转子角度。

参考文献 (References):

- [1] 郑 敏,杨成忠. Fuzzy-PID 多模态控制器在永磁同步电机中的应用[J]. 机电工程,2009,26(4):42-46.
- [2] 张鹏飞,杜 建. 基于 DSP 的永磁同步电动机矢量控制系统[J]. 机电工程,2009,26(5):82-85.
- [3] 王 宏. 永磁同步电动机直接转矩控制系统的仿真研究[J]. 机电工程,2006,23(4):41-43.
- [4] WU R, SLEMON G R. A permanent magnet motor drive without a shaft sensor[J]. **IEEE Trans. Ind. Application**, 1991, 27(9-10):1005-1011.
- [5] KIM J S, SUL S K. A high performance PMSM drive without rotational position sensors using reduced order observer [C]//Proc. IEEE-IAS Annual Meeting, 1995:75-82.
- [6] KULKARNI A B, ESHANI M. A novel position sensor elim-

ination technique for the interior permanent magnet synchronous motor drive [J]. **IEEE Transactions IA**, 1992, 28(1):144-150.

- [7] AIHARA T, TOBA A, YANASE T, et al. Sensorless torque control of salient-pole synchronous motor at zero-speed operation[J]. **IEEE Trans Power Electron.**, 1999, 14(1):202-208.
- [8] LORENZ R D. Future trends in power electronic control of drives: robust, zero speed sensorless control and new standard approaches for field orientation[C]//Proc. IPEC Yokohama, 1995:28-34.
- [9] CORLEY M J, LORENA R D. Rotor position and velocity estimation for a permanent magnet synchronous machine at standstill and high speeds[J]. **IEEE Trans, on Ind. Appl.**, 1988, 34(4):784-789.
- [10] SCHMIDT P B, GASPERI M L, RAY G, et al. Initial rotor angle detection of a non-salient pole permanent magnet synchronous machine[C]//IEEE Industry Applications Society Annual Meeting New Orleans, Louisiana, 1997:5-9.
- [11] KULKANI A. A novel position sensor elimination technique for interior PMSM [J]. **IEEE Trans. Indus.**, 1992, 28(1):144-150.

[编辑:张 翔]