

[文章编号] 1003-4684(2020)05-0046-04

# 100 W 无铁心永磁同步电机控制器设计

童雅静, 王晓光, 吕雪刚, 王宇非

(湖北工业大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068)

[摘 要] 根据无铁心永磁电机的数学模型,建立了该电机的矢量控制仿真系统,根据仿真结果可以看出,无铁芯永磁同步电机具有较好的瞬态和稳态性能。搭建了以 DSP28027 为核心的无铁心永磁同步电机驱动控制系统测试平台,实验结果验证了矢量控制算法的有效性。

[关键词] 无铁心永磁同步电机; 矢量控制; DSP28027

[中图分类号] TM351 [文献标识码] A

随着高性能永磁材料的发展,永磁同步电机逐渐成为电机市场的重要组成部分<sup>[1]</sup>。在此基础上,无铁心永磁同步电机具有体积小、重量轻、转矩脉动小、电磁转换率高等优点<sup>[2]</sup>,可以有效提高电动机驱动系统的过载能力和瞬态响应能力,在高性能伺服驱动领域、小功率无人机、高性能电动执行机构等领域具有较大的应用前景,所以无铁心永磁同步电机的控制技术成为必须解决的主要问题<sup>[3]</sup>。基于电力电子技术以及微型计算机的发展,矢量控制算法使电机具有出色的静态及动态性能,扩大了交流电机的使用范围和应用市场。笔者基于无铁心电机的参数特点,采用矢量控制算法实现了对电机驱动控制,为该电机驱动系统的发展提供一定的理论参考和开发经验。

## 1 永磁同步电机的数学模型

由于电机实际运行和理想状态不同,存在一些耦合以及高磁谐波的影响,使得电机的电磁关系变得极为困难,因此将进行以下假设:

- 1)电机定子绕组是星型接法,三相绕组在空间上是对称分布,两者差值为 120°。
- 2)电机的气隙磁场按正弦分布,忽略高磁谐波带来的影响。
- 3)电机的反电动势是按正弦分布。
- 4)忽略电机的阻尼作用;
- 5)电机的磁路是线性的,可以使用叠加原理,忽略涡流效应和磁滞。

满足以上假设的永磁同步电机可以被视为理想电机,忽略实际运行带来的影响,这样有利于建立基本的数学模型<sup>[4]</sup>。根据电机的双反应理论,可得到基本的电压方程及磁链方程:

$$\begin{cases} u_d^s = r_s i_d^s + p \psi_d^s - \omega \psi_q^s \\ u_q^s = r_s i_q^s + p \psi_q^s + \omega \psi_d^s \\ \psi_d^s = L_d i_d^s + \psi^r \\ \psi_q^s = L_q i_q^s \end{cases}$$

电机的转矩方程:

$$T_e = p_m (\psi_d^s i_q^s - \psi_q^s i_d^s)$$

因为盘式无铁心永磁电机交直流电感一样,即  $L_d = L_q$ ,所以采用  $i_d = 0$  的矢量控制算法,上式可写为

$$T_e = p_m \psi_d^s i_q^s$$

运动方程

$$J \frac{d\Omega}{dt} = T_e - T_L = \frac{GD^2}{375} \cdot \frac{dn}{dt}$$

其中:  $\Omega = 2\pi n/60$ ,  $n$  是电动机的转速;  $L_d$ 、 $L_q$  为永磁同步电机的  $d$ 、 $q$  轴电感;  $i_d^s$ 、 $i_q^s$  为定子电流矢量的  $d$ 、 $q$  轴分量。  $J$  为转动惯量;  $T_L$  为负载转矩;  $GD^2$  为电机和转矩的飞轮矩。

## 2 矢量控制算法设计

永磁同步电机的转子磁链是恒定的,因此选择使用转子磁链定向控制,这样控制电机的定子电流的幅值即可控制电磁转矩。无铁心永磁同步电机的  $d$  轴、 $q$  轴电感相同,因此采用  $i_d = 0$  的电流控制方式,转矩与电流幅值成正比,获得最大转矩电流控制。整个系统选用矢量控制原理,配合 SVPWM 调

[收稿日期] 2019-09-23

[基金项目] 大学生创新创业训练计划创新训练项目(201810500145)

[第一作者] 童雅静(1997-),女,湖北武汉人,湖北工业大学本科生,研究方向为电气工程及其自动化

[通信作者] 王晓光(1984-),男,河北唐山人,湖北工业大学副教授,研究方向为永磁电机及其驱动系统

制,可得到矢量控制的基本框图(图 1)。

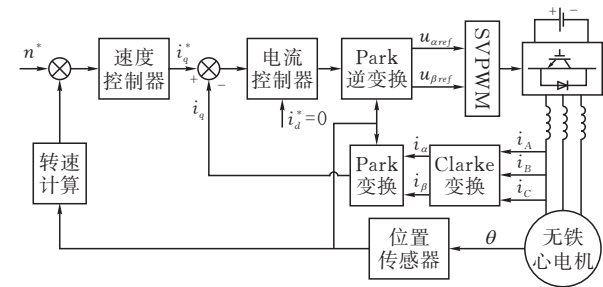


图 1 矢量控制基本框图

图 1 中,控制器将会分解控制信号,将其分解为两相旋转坐标系下相互垂直的信号  $i_{Sqref}$  和  $i_{Sdref}$ ,再通过 Park 逆变换将得到的控制信号分解为两相信号  $V_{Saref}$  和  $V_{Sbref}$ ,再通过 SVPWM 调制方法,将得到的控制信号转化为可以控制逆变器的三相交流信号  $i_A^*$ 、 $i_B^*$ 、 $i_C^*$ 。而电机运行时的电流反馈信号可以经过 Clarke 变换和 Park 变换等效成为  $i_d^*$ 、 $i_q^*$ ,这样就可以对转速进行自我调节,提高系统的稳定性和动态性能。

控制系统的电流环参数以及速度环参数均参照 I 型系统整定,并且采用内模控制器进行参数设计,减小参数调节的难度。最后得到电流环的调节参数为:

$$\begin{cases} K_{pd} = \alpha L_d \\ K_{id} = \alpha R \\ K_{pq} = \alpha L_q \\ K_{iq} = \alpha R \end{cases}$$

其中,  $\alpha$  是设计参数,与电机的时间常数有关。电机的时间常数

$$\begin{cases} T_d = L_d / R \\ T_q = L_q / R \end{cases} \quad (1)$$

选取其中较小的作为电机的时间参数  $\tau$ , 设定带宽  $\alpha = \frac{2\pi}{\tau}$ , 再根据式(1)来设计电流环参数。

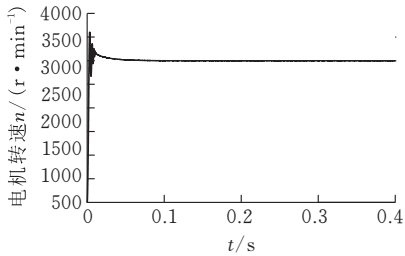
### 3 仿真结果分析

参照实验电机的基本参数,确定电机仿真所使用的电机参数,并且根据前面系统的参数设置来进行仿真的参数调节。电流环与速度环均采用内模控制器的方法正定成为 I 型系统。剩下部分,按照电机的数学模型以及矢量控制原理计算公式来建立仿真模型。电机的参数见表 1。基于 Simulink 的仿真结果见图 2、图 3 所示。当电机启动时,定子电流和电机转矩都会突然增加,电动机转速将超过预定量,但是很快就会回落并稳定下来,此时转矩约为  $0.17 \text{ N} \cdot \text{m}$ , 并且电机最大转速大概是  $3400 \text{ r/min}$ , 稳定在  $3000 \text{ r/min}$ , 电磁转矩存在一些高频转矩脉

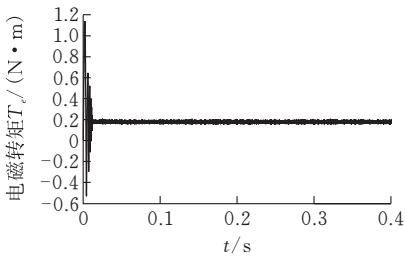
动,但转矩整体效果比较稳定。电机的电流在  $0.01 \text{ s}$  之后恢复到稳定的正弦波,电流峰值大概是  $4 \text{ A}$ ,正弦度较好。电机空载启动时,容易发生电流过大的情况,因此需要在控制算法中对最大电流进行限幅控制。由于电机的电磁转矩非常小,受到小电感的影响,电机转矩脉动较大,仿真结果见图 2。

表 1 实验样机参数

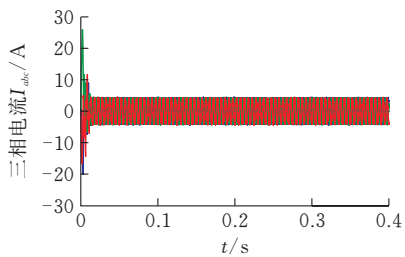
参数	数值	参数	数值
$N_p$	4	$P_N$	100 W
$n$	3000 r/min	$i_N$	4.6 A
$U_N$	24 V	$J$	$0.0588 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$
$R_s$	$3.14 \Omega$	$T_e$	$0.318 \text{ N} \cdot \text{m}$
$L_d$	$0.00121 \text{ H}$	$L_q$	$0.00121 \text{ H}$



(a) 电机转速



(b) 电磁转矩



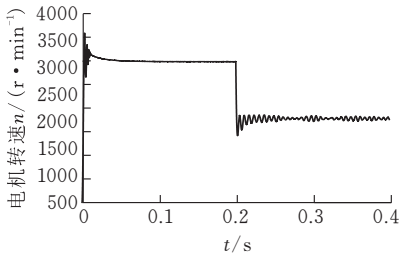
(c) 三相电流

图 2 空载启动

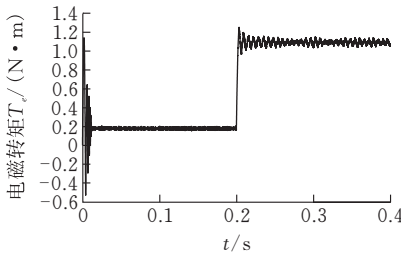
电机在过载运行时的仿真结果如图 3 所示,由于电机过载运行,电机的转速会迅速下降,稳定运行后,电机的转速还会有震荡,波峰和波谷之间相差大约  $200 \text{ r/min}$ 。在过载运行工况下,电机的电磁转矩有大量的高频脉动,这样的现象也发生在定子电流中,电流最大值接近  $23 \text{ A}$ ,此时已经接近电机可承受的最大电流,长时间的过载运行有烧毁电机定子绕组的风险。

从图 3 可以看出,当电机的负载发生变化时,转速下降,电流和转矩几乎是突变的,电机在过载运行

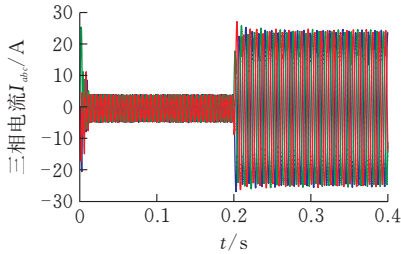
时,电机的负载能力到达顶峰,电机无法再提供更大的稳定的电流,由于电源电压的限制,电机的转速会有较大的下降。相较于轻度过载时的稳定运行,严重过载时电机的转速大约下降了一半,并且电流增大了一倍,电磁转矩也增加了1倍,这几乎是电机的极端运行情况,系统能在0.01 s内将转速基本稳定下来,虽然不是一条平滑的曲线,但是稳定在了一个低速运转的范围之内。



(a)电机转速



(b)电磁转矩



(c)三相电流

图 3 由额定负载到满载

由以上的仿真结果可以看出,系统的运行良好,PI控制的参数设置比较适宜,和电机的固定参数比较符合,但是受限于电机的数学模型简单,用MATLAB仿真结果比较理想。通过改变电机运行工况,可以获得系统不同状态下的参数,从而增强对参数的认识和分析,极大地提高了设计环节的效率。

4 实验结果及分析

本文采用的样机为盘式无铁心永磁同步电机,电机参数见表 1,所使用的控制器以 TMS320F28027F 为核心,以 DRV8301DCA 为驱动,配合电源等器材搭建了实验平台(图 4)。

实验过程中,以仿真出的参数为依据,对实际的电流环及速度环进行调整,并测量电机的运转情况。可以测得电机的实际相电流见图 5。

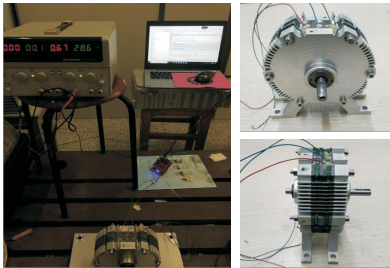


图 4 实验平台及样机

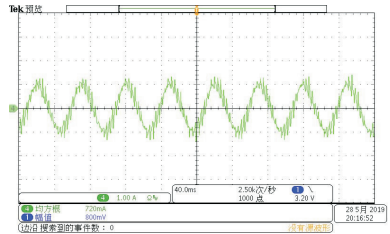


图 5 绕组相电流

从图 5 中可以看出,电机绕组相电流基本上是一个正弦波,但是电机的电流波形存在大量的高次谐波,导致电机在运行中存在高频的转矩脉动和噪音。主要是因为无铁心电机的定子绕组电感很小,导致电流变化很快。本实验中逆变桥的开关频率为 5 kHz,开关频率较低,不足以使得绕组中的电流连续,所以会产生高频的电流脉动。但是基本吻合电机的运行条件,实现以低电压控制器来驱动高速无铁心永磁同步电机的效果。

5 结论

从无铁心永磁同步电机的结构特点出发,建立 PMSM 电机的数学模型,结合 SVPWM 搭建无铁心永磁同步电机矢量控制系统,运用传统的调速方法,结合无铁心电机的结构,采用转子磁链定向控制法,实施对于无铁心永磁同步电机电磁转矩的控制,之后建立 MATLAB 仿真并搭建相关的实验平台,仿真及实验结果验证该电机由于电感小导致高频转矩脉动的结论。同时也可以预见,提高逆变器的开关频率可以有效减小转矩脉动。而随着宽禁带功率开关器件技术的成熟及开关频率的提高,势必会为该电机驱动控制技术的发展提供有利条件,使得无铁芯电动机驱动系统得到广泛的应用。

[ 参 考 文 献 ]

[1] 肖扬,王成元,夏加宽.用 DSP 实现的空间矢量永磁同步电机控制系统[J].沈阳工业大学学报,2000(5):386-38.

[2] 王晓光,周晟,胡藏现,等.轴向磁通无铁心永磁同步电机性能分析(英文)[J].华中师范大学学报(自然科学版),2019,53(2):193-199,221.

[3] 余江,杨世春,李亚伦.永磁同步电机矢量控制系统建模仿真研究[J].计算机仿真,2019,36(3):179-183.

[4] 王晓远,王晓光.盘式无铁心永磁同步电机矢量控制技术分析[J].中国电机工程学报,2014,34(18):2952-2959.

[5] Xiaoguang Wang, Xiaoyuan Wang, Tao Fu, et al. Predictive instantaneous torque control for disc coreless permanent magnet synchronous motor with the current source chopper[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(12): 7100-7112

[6] Xiaoguang Wang, Wei Xu, Yun Zhao, et al., Modified MPC algorithm for NPC inverter fed disc coreless permanent magnet synchronous motor[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2016, 26(7): 1-5.

## Design of 100W Ironless Permanent Magnet Synchronous Motor Controller

TONG Yajing, WANG Xiaoguang, LYU Xuegang, WANG Yufei

(School of Electrical and Electronic Engin., Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China)

**Abstract:** The ironless permanent magnet synchronous motor has the characteristics of no cogging torque, light weight and strong overload capability, and can be used as an actuator for high-end equipment. Firstly, based on the mathematical model of the ironless permanent magnet motor, the vector control simulation system of the motor was established. According to the simulation results, the ironless permanent magnet synchronous motor had better transient and steady state performance. Finally, the test platform of the coreless permanent magnet synchronous motor drive control system with DSP28027 as the core was built. The experimental results verify the effectiveness of the vector control algorithm and provide theoretical basis and design experience for the application of such motors.

**Keywords:** ironless permanent magnet synchronous motor; vector control; DSP28027

[责任编辑: 张岩芳]

(上接第 12 页)

## Design and Experimental Research on Household Drum-Type Composting Box of Human Feces

SUN Jinfeng<sup>1</sup>, LI Yan<sup>1</sup>, YANG ZhiYong<sup>1</sup>, HU Long<sup>2</sup>, HU Yongliang<sup>2</sup>

(1 School of Mechanical Engineering, Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China;

2 Shanghai Esanitec Environmental Protection Technology Co., Ltd, Shanghai 201304, China)

**Abstract:** In order to realize the innocuity and resource utilization of human excrement, a kind of domestic drum type composting box for human excrement was designed. The composting box includes a box, a feeding system, a composting system, a heating system, a ventilation system and a control system. Among them, the feeding system could meet the automatic supply of compost auxiliary materials in the composting process, greatly saving manpower; the compost mixing system could mix materials well. The static analysis of compost drum shows that the maximum stress is 5.797mpa, which meets the design requirements. Through the 30 day aerobic composting performance test, the change of relevant physical and chemical indexes in the process of aerobic composting, such as temperature, pH value and oxygen concentration, was obtained, and the seed germination test was carried out. The results show that the compost products have been completely decomposed, and the performance of composting box meets the requirements of aerobic composting.

**Keywords:** aerobic composting; human excrement; drum; automatic supply; compost tank design

[责任编辑: 张 众]