

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.06.024

## 交流伺服系统高精度电流矢量控制

杨建<sup>1</sup>, 周绪利<sup>2</sup>, 彭世忠<sup>1</sup>

(1. 驻一五二厂军代室, 重庆 401120; 2. 驻四九七厂军代室, 重庆 400071)

**摘要:** 针对电机转速的变化会导致系统对直轴电流、交轴电流的控制精度下降的问题, 提出一种新的电流矢量解耦控制线性化补偿方案。在对永磁同步电机进行理想化处理的基础上, 建立了永磁同步电机数学模型及控制模型, 设计了电流矢量控制方法程序流程图, 并在实验环境下搭建永磁同步电机调速系统的实验平台, 采用电流霍尔传感器及电压传感器分别对电机的两相电流、直流母线电压进行测量。测试结果表明: 随着转速的升高, 补偿后  $i_d$  精度明显提高, 提高了电机电流的解耦控制性能。

**关键词:** 交流伺服; 高精度; 矢量控制

**中图分类号:** TP273 **文献标志码:** A

## High-Accuracy Current Vector Control of AC Servo System

Yang Jian<sup>1</sup>, Zhou Xuli<sup>2</sup>, Peng Shizhong<sup>1</sup>

(1. Military Representative Office of No. 152 Factory, Chongqing 401120, China;

2. Military Representative Office of No. 497 Factory, Chongqing 400071, China)

**Abstract:** Focused on the problem that the control accuracy of the d-axis currents and quadrature axis will descend with the varying of the motor speed, a new kind of linearization compensating method of current vector decoupling control is proposed. Based on the idealized dealing with permanent magnet synchronous motor (PMSM), the mathematical models and control models are established, and the program flow chart of current vector control method is designed. Then a speed control system of PMSM is established in the test environment, two phase motor currents and the DC voltage are measured separately by current sensors and voltage sensor. The experiment result proves that after compensating with the growth of the motor speed, the accuracy of  $i_d$  is increased obviously so that the decoupling control performance of motor currents is improved effectively.

**Key words:** AC servo; high-accuracy; vector control

### 0 引言

交流伺服系统控制的关键是实现电机瞬时转矩的高性能控制。永磁同步电机(PMSM)<sup>[1]</sup>因其体积小、可靠性高、伺服性能优良等优点, 在现代交流伺服系统中得到了广泛的应用。目前, PMSM多采用  $i_d=0$  的矢量控制方法<sup>[2]</sup>。

典型的伺服系统采用的是电流环、速度环、位置环组成的三环反馈控制方法<sup>[3]</sup>, 电流环为内环, 因此电流控制性能直接影响速度和转矩控制性能。正常的电流反馈控制模型是一种近似解耦的控制模型, 随着电机转速的变化, 解耦性能受电流控制增益影响大, 导致系统对直轴电流、交轴电流的控制精度下降; 因此, 笔者提出一种新的电流矢量解耦控制线性化补偿方案, 并将该控制方法应用于实验室搭建的交流伺服系统。

### 1 永磁同步电机数学模型及控制模型分析

首先, 对永磁同步电机进行理想化处理: 假设气隙中磁通按正弦分布; 忽略电压、电流的高次谐波; 忽略铁芯损耗。

在  $dq$  轴同步旋转坐标系下建立数学模型<sup>[4]</sup>如式 (1):

$$\begin{aligned} u_d &= (R_a + PL_d)i_d - \omega L_q i_q \\ u_q &= (R_a + PL_q)i_q + \omega L_d i_d + \omega \psi_f \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $u_d$ ,  $u_q$  分别为永磁同步电机  $d$  轴和  $q$  轴的电枢电压分量;  $i_d$ ,  $i_q$  分别为永磁同步电机  $d$  轴和  $q$  轴的电枢电流分量;  $L_d$ ,  $L_q$  分别为永磁同步电机  $d$  轴和  $q$  轴的等效电枢电感;  $R_a$  为电枢绕组电阻;  $\omega$  为旋转角频率;  $\psi_f$  为永磁体磁链;  $P$  为微分算子。永磁同步电机的转矩<sup>[5]</sup>如式 (2):

收稿日期: 2012-01-03; 修回日期: 2012-02-15

作者简介: 杨建(1964—), 男, 四川人, 学士, 高级工程师, 从事火炮监造研究。

$$T = 1.5n_p[(L_d - L_q)i_d i_q + i_q \psi_f] = 1.5n_p i_q \psi_f \quad (2)$$

由式 (1) 可见, 三相永磁同步电机的模型是非线性的,  $d$  轴、 $q$  轴之间存在耦合项。采用电压型逆变器供电时, 将指令电流与反馈电流的差值经电流调节器作用得到  $dq$  坐标系下的电枢电压分量  $u_d, u_q$ , 分别为如式 (3):

$$\begin{aligned} u_d &= G_d(i_d^* - i_d) \\ u_q &= G_q(i_q^* - i_q) \end{aligned} \quad (3)$$

结合式 (1), 整理得式 (4):

$$\begin{aligned} i_d &= \frac{G_d}{R_a + PL_d + G_d} i_d^* + \frac{\omega L_q i_q}{R_a + PL_d + G_d} \\ i_q &= \frac{G_q}{R_a + PL_q + G_q} i_q^* - \frac{\omega L_d i_d}{R_a + PL_q + G_q} - \frac{\omega \psi_f}{R_a + PL_q + G_q} \end{aligned} \quad (4)$$

可见, 要想实现转矩的线性化控制, 调节器增益需要满足条件:  $G_d \gg \omega L_d, G_q \gg \omega \psi_f$ , 此时, 可近似得到:  $i_d \approx i_d^*, i_q \approx i_q^*$ , 从而实现三相永磁同步电机电流的近似解耦控制。

然而随着转速的提高, 控制条件越来越不能满足, 解耦性也越来越差。并且该控制方法对调节器参数的依赖性极强,  $G_d, G_q$  较大时可以有效地减小静态误差, 使解耦精度更高, 但相应的输出电流纹波也会随之变大。因此, 该方法并不是一种理想的控制方法。

为了提高电流控制精度, 经过多次实践论证, 针对性地提出一种新的电流矢量解耦控制线性化补偿方案如下:

设 2 个变量  $u_d^*, u_q^*$ , 使得  $u_d^* = G_d(i_d^* - i_d) = (R_a + PL_d)i_d^*$ ,  $u_q^* = G_q(i_q^* - i_q) = (R_a + PL_q)i_q^*$  加入补偿量, 得到式 (5):

$$\begin{aligned} u_d &= u_d^* - \omega L_q i_q \\ u_q &= u_q^* + \omega L_d i_d + \omega \psi_f \end{aligned} \quad (5)$$

这样, 就实现了电流的解耦控制, 从而实现转矩和磁通的独立控制, 这种控制方法对调节器参数的依赖性降低, 转速的高低不影响解耦性能。控制方法框图如图 1 所示。

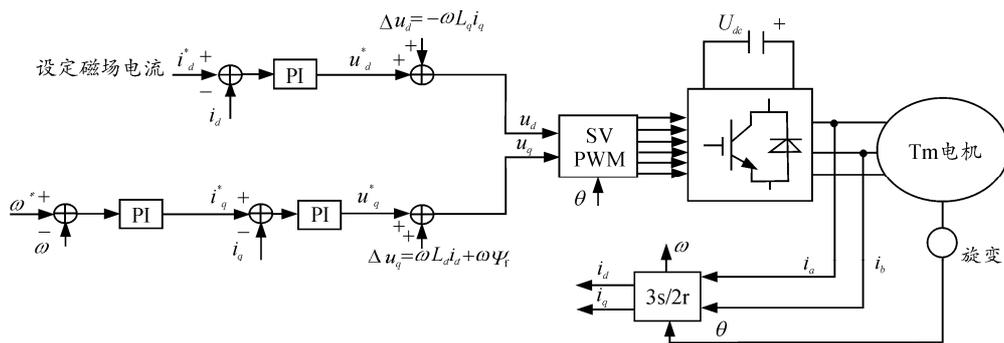


图 1 电流矢量控制框图

## 2 电流矢量解耦控制方法的软件设计

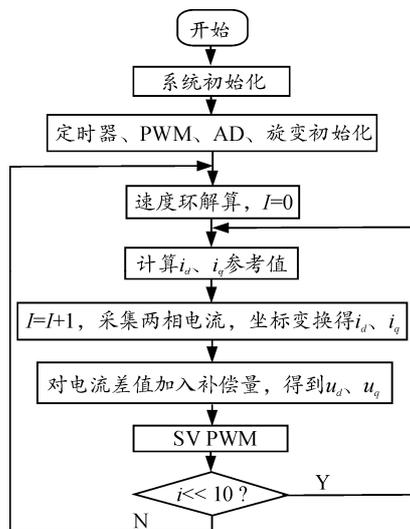


图 2 电流矢量控制方法程序流程图

主程序一开始首先对系统进行初始化, 接着初始化定时器、事件管理器相关寄存器、AD 寄存器等, 然后 DSP 发出指令, AD 开始采集数据, 执行矢量控制算法程序控制电机。电流矢量控制方法的程序流程如图 2 所示。

## 3 实验验证

基于以上的理论分析以及软件设计, 在实验环境下搭建永磁同步电机调速系统的实验平台。系统硬件电路主要由主控制器、主功率电路、传感器等构成。控制器芯片采用 TMS320F2812 型 DSP, 主要完成电机的核心控制算法。主功率电路采用 7 单元的 IPM 智能模块 PM150RLA120, 实现对电机的功率控制。