

基于单片机的永磁同步电机控制方法研究

在分析永磁同步电机数学模型和空间矢量控制算法的基础上,针对电机模型的多变量、非线性和强耦合等问题,采用空间矢量坐标变换法进行解耦。基于空间矢量控制策略,结合单片机和IRMCK201芯片,给出了永磁同步电机的控制方法,同时给出了硬件结构和软件框图并进行了实验验证。实验结果表明:永磁同步电机的空间矢量控制稳定可靠,控制系统设计合理,而且可实现永磁同步电机的快速响应和高准确度控制。

李 瑜/包头职业技术学院电气工程系



李 瑜/讲师

关键词/Keywords

永磁同步电机 ·
矢量控制 ·
SVPWM ·
单片机 ·

永磁同步电机(PMSM)具有体积小、可靠性高和效率高等优点,因而可被广泛地应用于各种自动化过程控制领域,如航空航天器、数控机床和武器系统等^[1]。但是永磁同步电机具有非线性、强耦合且参数时变等特性,运行过程中电机的参数会因“发热”、“漏磁”等因素发生变化,严重影响伺服系统的品质。为此,诸多控制理论和控制策略被提出和完善,如恒压频比控制、直接转矩控制和矢量控制等。其中,矢量控制技术实现了电机励磁和转矩的分开控制,降低了控制难度,因此被广泛使用^[2, 3]。永磁同步电机控制器可采用单片机、DSP、可程序控制器或FPGA等,可程序控制器使用成本较高、通用性较差;DSP、FPGA开发周期较长;单片机价格较低、开发简单,但是实时运算能力不足。为解决上述问题,本文基于矢量控制的基本原理,采用单片机,结合IRMCK201实现永磁同步电机的控制。

永磁同步电机控制原理

1. 永磁同步电机数学模型

永磁同步电机具有多变量、非线性

和强耦合等特性。为简化电机的数学模型和控制算法,作如下假设:忽略铁心磁阻,不计涡流、磁滞损耗;电机的三相绕组是完全对称的,绕组产生正弦感应电动势;忽略温度和频率变化对电机参数的影响;同时采用空间矢量坐标变换法对电机数学模型进行解耦^[4]。

在永磁同步电机的数学建模中,常用的三种坐标是:ABC三相静止坐标系、 $\alpha-\beta$ 两相静止坐标系和 $d-q$ 两相旋转坐标系。其中, $\alpha-\beta$ 坐标系的 α 轴和ABC坐标系的A轴重合; $d-q$ 坐标系的 d 轴为直轴,与电机转子的磁场方向重合, q 轴为交轴,与转子磁场方向垂直且超前 d 轴 90° ^[5],如图1所示。

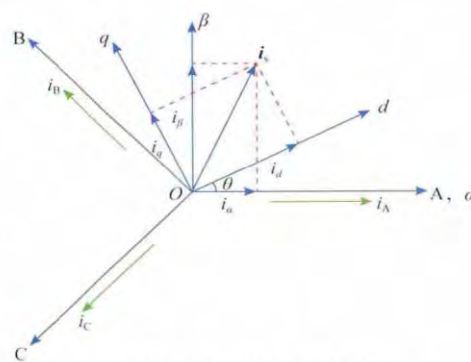


图1 ABC、 $\alpha-\beta$ 和 $d-q$ 坐标系

图1中的定子电流矢量 i_s 在 $\alpha-\beta$ 坐标系上的投影为 i_α 、 i_β ;在 $d-q$ 坐标系上的投影为 i_d 、 i_q ,则定子绕组的Park变换为

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中, θ 为 d 轴与A相轴线之间的电角度。

Park逆变换为

$$\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} \quad (2)$$

Clarke变换为

$$\begin{pmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{pmatrix} \quad (3)$$

根据Park变换、Clarke变换和Park逆变换，由式(1)~式(3)可得永磁同步电机在d-q坐标系下的变换方程为

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \\ i_o \end{pmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{pmatrix} \quad (4)$$

2. 矢量控制基本原理

永磁同步电机的矢量控制主要有以下几种模式： $i_d=0$ 控制、恒磁链控制、 $\cos \theta=1$ 控制、最大输出功率控制、恒功率控制和弱磁控制。其中 $i_d=0$ 控制模式下，电机输出转矩与转矩电流成线性关系，输出转矩控制简单，较容易实现转矩电流和磁场电流在坐标系内的解耦^[6]，故本文采用 $i_d=0$ 控制模式，系统结构如图2所示。

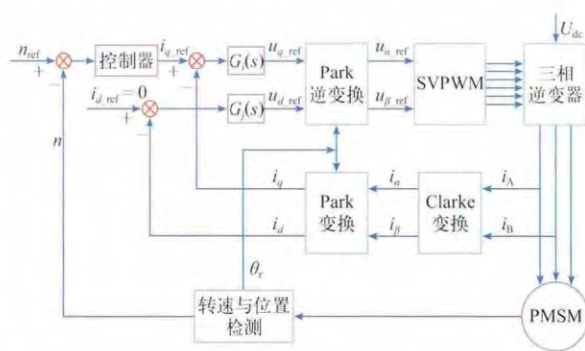


图2 $i_d=0$ 矢量控制系统结构图

由图2可知，通过转速与位置检测装置，得到电机实际的转速和电角度，并与设定的转速比较后，计算出偏差信号，由控制器处理后得到定子q轴分量的参考值 i_{q_ref} 。相电流检测装置检测出定子相电流，经Clarke变换和Park变换后，得到 i_d 和 i_q ，并与参考电流 i_{d_ref} 和 i_{q_ref} 比较，得出偏差信号，经电流控制器处理后获得电压控制量 u_{d_ref} 和 u_{q_ref} 。电压

控制量经Park逆变换后输入到SVPWM控制模块产生六路PWM信号，由逆变器改变电机绕组上的电压，这样就形成了完整的速度和电流双闭环控制系统^[7]。

永磁同步电机控制系统设计

1. 硬件电路设计

交流永磁同步电机的矢量控制需要大量的、快速的实时计算，单片机没有这种计算能力，因此本文使用芯片IRMCK201来辅助实现。如图3所示，单片机STC12C5A60S2通过SPI串行口与IRMCK201接口，完成向IRMCK201传送命令和数据，并从IRMCK201读出工作状态，从而实现对永磁同步电机的控制。

IRMCK201通过霍尔传感器HALLA、HALLB和HALLC获得电机的初始位置信号，以实现电机的起动；通过编码器接口ENA、ENB和ENC获得电机的转角位置信号和速度信号，实现速度控制和矢量控制；通过电流反馈专用接口IFB0和IFB1获得来自电流传感器芯片IR2175的相电流，实现电流控制；IRMCK201芯片的内部，由硬件实现2/3变换和3/2变换，生成SVPWM信号，通过PWM口发出SVPWM信号，控制IPM驱动电机运行^[8]。

2. 软件设计

软件设计主要包括单片机初始化程序设计、IRMCK201初始化程序设计和控制程序设计等，如图4所示。

单片机初始化程序设计主要包括P1.5/MOSI、P1.6/MISO和P1.7/SCLK方向的设置以及SPI控制寄存器的设置，中断初始化等。

IPMCK201初始化程序设计主要是对各寄存器进行参数确定，如增量式编码器寄存器组、PWM配置寄存器组、电流反馈配置寄存器组、速度控制寄存器组和系统控制寄存器组等。

控制程序设计主要包括启动时编码器初始化、给定速度输入和故障检测等功能。

实验验证与分析

本文以三相8电极永磁同步电机为被控对象进

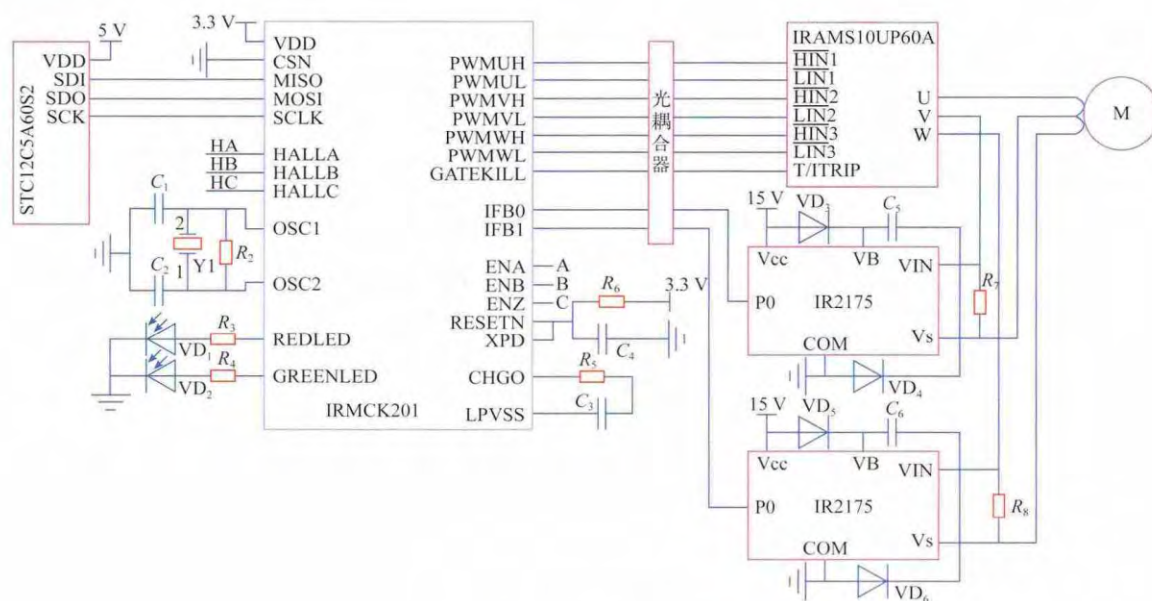


图3 硬件电路简图

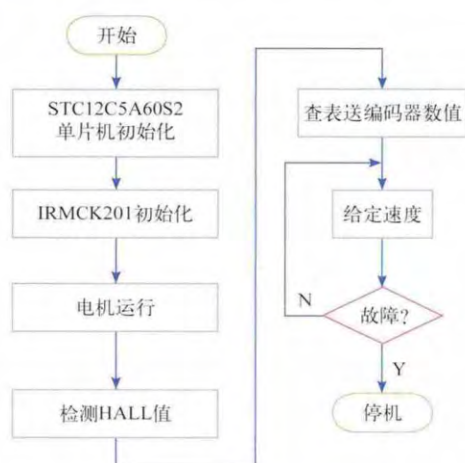


图4 软件框图

好，基于矢量控制算法结合STC12C5A60S2单片机、IRMCK201芯片可以较好地实现对永磁同步电机的控制。但是由于所用电机的额定功率较小，导致其容易受到干扰。

(a) $n = 300 \text{ r/min}$ 时电压波形图(b) $n = 2\,500 \text{ r/min}$ 时电压波形图

图5 实验结果

行实验，实验用电机的参数如下表所示。

表 永磁同步电机参数

额定功率/W	200	额定转速/(r/min)	3 000
相电流/A	1.27	额定转矩/N·m	0.64
相电阻/ Ω	13	磁极对数	4
相电感/m·H	31.87	电动机转子惯量/ $\text{kg}\cdot\text{cm}^2$	0.15

将单片机和控制电路连接后，在实验台上进行调试，基于矢量控制算法分别测试了电机在低速 $n = 300 \text{ r/min}$ 、高速 $n = 2\,500 \text{ r/min}$ 时的电压波形，实现了永磁同步电机的调速控制，实验结果如图5所示。从实验结果可知，电机的运行效果较

结束语

随着永磁同步电机应用越来越广泛，矢量控制理论日益成熟。本文基于空间矢量控制的基本原理，采用单片机STC12C5A60S2和IRMCK201芯片，设计了永磁同步电机控制器，并进行了调速实验。实验结果表明：基于单片机的永磁同步电机控制系统设计合理、算法可行，整个系统运行稳定。对永磁同步电机控制系统的开发和应用具有一定的借鉴意义。

(下转第81页)

应尽量对因短路跳闸和遭受短路冲击的变压器进行试验检查,以有效避免重大事故的发生。

5. 加强用户侧管理

为尽量避免系统的短路故障,应针对近年来由于用户侧设备故障造成变压器遭受冲击事故的情况,对专线用户进行全面的清查治理,要尽量减少因用户故障而造成主设备事故的发生。

加强对用户设备的审查,要求用户配备可靠动作的保护装置,在事故发生时,能迅速切除故障,避免事故进一步扩大。同时,加强对用户设备的监督管理,要求用户按电力行业的相关规定,积极认真地由具有相关资质的单位进行每年一次的保护定检和设备预防性试验工作。

结束语

随着电网规模的不断扩大,变压器等主要设备的短路电流耐受能力对电网的安全运行水平越来越起决定性因素。提高变压器抗短路能力,对于电力设备状态评价和状态检修具有迫切的现实意义。

变压器抗短路能力的校核有高压试验法和计算法,通过变压器突发短路试验,能够有效发现变压器短路缺陷,为采取进一步措施提供参考依据,电磁计算方法分析变压器抗短路能力,从设

计阶段杜绝不符合抗短路要求的设计,两者结合有助于进一步提高抗短路能力校核水平。

通过对老旧设备安排技改大修,完善变压器绕组变形试验,建立绕组变形数据库,加强新变压器选型和监造,加强设备运行管理和加强用户侧管理等措施,能够有效提高在运变压器应对突发短路的能力。

总之,提高变压器抗短路能力,定期开展在运变压器抗短路能力评价,适时安排状态检修,及时采取措施消除隐患,对于提高在运变压器可靠性,保障电网安全稳定运行具有重要的现实意义和良好的经济利益。

参考文献

- [1] 王志勇. 防止变压器近区短路和提高变压器抗短路能力[J]. 中国科技信息, 2009 (2) .
- [2] 刘新宇. 电力变压器抗短路分析[J]. 新疆电力技术, 2007, 94 (3) .
- [3] 王欣伟, 连建华, 俞华, 等. 电力变压器内绕组辐向抗短路能力的计算与分析[J]. 变压器, 2013, 50 (1) .
- [4] 邢海瀛, 刘少宇, 马继先, 等. 变压器抗短路能力核算与治理[J]. 中国电力, 2012, 45 (5) .

(收稿日期: 2014-06-30) EA

(上接第76页)

参考文献

- [1] 李静, 程小华. 永磁同步电机发展趋势[J]. 防爆电机, 2009 (5) : 1-4.
- [2] 李耀华, 刘卫国. 永磁同步电机矢量控制与直接转矩控制比较研究[J]. 电气传动, 2010 (10) : 9-12.
- [3] 张强, 任一峰, 林都, 等. 空间矢量脉宽调制算法(SVPWM)的原理及仿真研究[J]. 电气技术, 2010 (6) : 35-37.
- [4] Sanbo P, Junmin P, Zuohua T. A shifted SVPWM method to control DC-Link resonant inverters and its FPGA realization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59 (9) : 3383-3391.
- [5] 檀盼龙. 基于DSP的永磁同步电机驱动器研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2013.
- [6] 杨金星. 基于DSP的永磁同步电机控制系统的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
- [7] 吴茂刚, 赵荣祥, 汤新舟. 空间矢量PWM逆变器死区效应分析与补偿方法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2006 (3) : 469-473.
- [8] 王晓明. 电动机的单片机控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2012: 251-289.

(收稿日期: 2014-07-14) EA