

基于 DSP 的永磁无刷直流电机弱磁控制系统

严 岚, 唐益民, 贺益康

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)



严 岚 1977 年 2 月生, 1999 年毕业于浙江大学电气工程学院电机及其控制专业, 现为该专业博士研究生。主要从事永磁电机设计及其控制, 电力电子在电气传动中的应用工作。

摘要 本文基于 TI 公司的 TMS320F240 系列 DSP 完成了永磁无刷直流电机基速以下恒转矩、基速以上恒功率运行的双模式调速系统的研制。首先从理论上提出永磁无刷直流电机弱磁控制的要求, 继而介绍了 TMS320F240 硬件结构、无刷直流电机双模式控制系统框图以及软件流程, 最后以一台永磁无刷直流电机为例, 试验结果说明了该系统的实用性。

关键词 永磁无刷直流电机 弱磁控制 DSP

Control System on Flux Weakening of Permanent Magnetic Brushless D. C. Motor Based on DSP

Yan Lan, Tang Yimin, He Yikang

Abstract: In this paper, the speed regulation system of the permanent magnet brushless D. C. motor with constant torque operation under base speed and constant power operation beyond base speed is introduced, based on the TI company's product TMS320F240. Firstly the theory about field weakening of permanent magnet brushless D. C. motor is induced. And then hardware architecture of TMS320F240, two mode system block figure and software flow figure are introduced. At the end an experiment based on permanent magnet brushless D. C. motor has been made, the practicality of this system is proven.

Key words: Permanent magnet brushless D. C. motor Flux weakening DSP

1 引言

在电动车辆、车床主轴驱动动力, 需要基速以下恒转矩、基速以上恒功率运行, 这就要求电机实现弱磁控制。但是永磁电机励磁不可调节, 给这类电机弱磁控制的实现带来了很多难点, 也引起了国内外学者的广泛研究。其中, 在永磁无刷直流电机中通过调节电流超前反电势角度 (即电流超前角) 的方法得到很大发展。通过增大电流超前角, 可以减小与永磁磁场交链的定子导体匝数, 从而减小了与永磁磁场交链的定子绕组磁链, 实现等效弱磁。为了尽可能地提高永磁无刷直流电

机的恒功率速度范围, 并在恒功率区实现速度可调, 需要从电机设计^[1~3]和电机控制两个方面着手解决。本文立足于后者详细阐述基速以上如何实现电流超前角控制, 以及两种模式之间如何做准确切换。根据永磁无刷直流电机自控式的特点, 对速度、电流、位置分别采样, 以速度环为外环, 速度环输出作为电流环给定。基速以下调节 PWM 占空比实现恒转矩控制, 基速以上调节电流超前角实现恒功率控制。

为了提高系统的可靠性和动态响应, 需要 CPU 具有较快的时钟和强大的计算能力。TI 公司提供的 TMS320F/C2XX 系列是一款针对电气传

动领域专门设计的 DSP 芯片。在硬件设计上,它通过数据总线与地址总线相分离,哈佛结构和流水线结构实现高速处理能力,其中 24X 系列的单指令周期可达 50ns,此外芯片内部还集成了三个全比较单元,可产生六路互补 PWM 输出;三路简单 PWM 输出,三路定时器 PWM 输出,双八路 10 位 A/D 采样单元,4 路 CAP 口(其中两路输出与 QEP 电路输出复用),内部集成异步串行通讯接口(SCI),异步串行外围接口(SPI),上述特点使得 TMS320F24X 系列 DSP 非常适合电气传动领域的需要^[4,5]。

实际系统根据速度指令决定电动机运行模式是恒转矩或恒功率运行,并以当前工作模式为依据作出相应的调节方式的选择。为了防止当电机运行于额定转速附近时,由于采样误差、转速计算误差等因素造成系统对工作模式所处状态辨识不清,以致系统在额定转速附近反复切换,需在模式切换处设置一滞环宽度。可设定门槛值 1 及门槛值 2,当给定转速低于门槛值 1,则认为电机工作于恒转矩模式;当转速给定高于门槛值 2 时,则认为电动机工作于恒功率模式。其中门槛值 1 略低于额定转速,门槛值 2 略高于额定转速。此外要求系统具备在任何一种工作模式进入另一工作模式中。从而实现基速以下恒转矩、基速以上恒功率的双模式工作。最后以一台 2.2kW,基速 1100r/min 永磁无刷直流电动机为对象^[6],试验结果表明该系统的可行性。

2 永磁无刷直流电机的弱磁原理

由于永磁无刷直流电机的励磁恒定不变,电机基速以下采用 PWM 调制实现调压调速,此时电机的反电势与转速、气隙磁通成正比。基速及基速以上运行时端电压已调节至最大,随着转速升高,电机反电势增大,造成电枢电流减小。当反电势等于端电压时,电枢电流将为零,无法产生电磁转矩,电机将停转。为了在基速以上端电压不变条件下保持一定电枢电流以产生所需转矩,必须设法使反电势不随转速上升而增大,这就需要减少与电机定子绕组交链的磁链,即实现弱磁。永磁电机弱磁无法通过调节励磁来实现,但通过调节电流超前角,可改变与永磁磁场交链的定子绕组导体数,从而调节了导通相绕组所交链的磁链。图 1 为电流超前角 $\gamma = 0$ 与 $\gamma > 0$ 时的各

相电流与反电势波形。

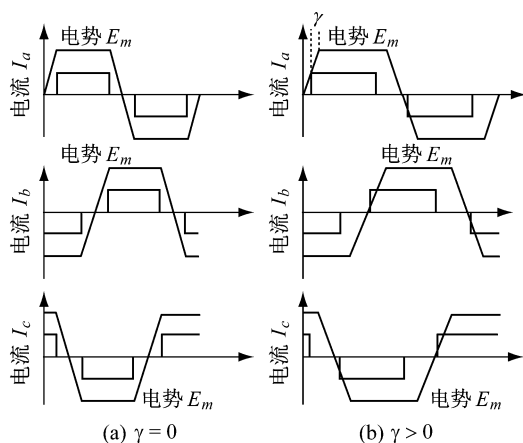


图 1 相电流与相反电势相位关系图

对于三相六状态的无刷直流电机常工作于如图 1 所示的 120° 导通模式,此时每 60° 为一最小对称区间,任意时刻只有两相导通。假设永磁磁场方波波形,且不计换相过程,当电机运行于基速以下,为了获得平稳的电磁转矩,要求电流与反电势同相,即 $\gamma = 0$,此时在每 60° 最小导通区间,与永磁磁场相交链的导通相槽导体数目不变,理论上无转矩脉动;基速以上时,电流超前反电势 γ ,由于导通相的提前,减小了与永磁磁场所交链的导体数目,因而减少了相绕组所交链的磁链。表现在图 1(b) 中,定子绕组相电流与对应相的感应电势平顶波峰值错开了 γ 角度,当导通相开通时,对应相的反电势还需过一段时间才逐步达到峰值。正是由于电流超前角 γ 的存在,导致基速以上,虽然相反电势平顶波幅值增大,电流仍得以灌入定子。

3 永磁无刷直流电机控制系统双模式工作

针对基速(额定转速)以下,恒转矩运行。基速以上,恒功率运行的要求。控制系统需具备双模式工作能力,具体方法为基速以下调节 PWM 占空比,以调节电机端部电压。基速以上,调节电流超前角实现等效弱磁。实质上就是通过调节电流的幅值和相位调节转速,控制框图如图 2 所示。图中可见,速度给定首先经过模式判定模块决定系统是处于恒转矩运行模式还是恒功率运行模式。

当转速低于额定速度,电动机工作于恒转矩运行模式,此时采用双闭环结构控制,给定速度指

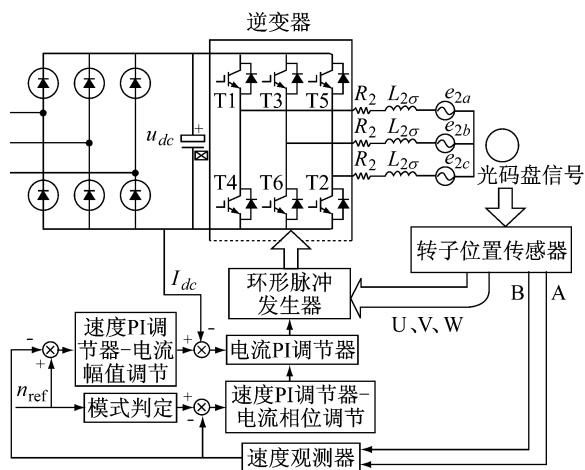


图2 永磁无刷直流电机恒功率/恒转矩运行框图

令,与速度反馈比较,其误差值通过速度PI调节器,输出作为电流给定,它与电流采样的值作比较,其误差经过电流PI调节器送入环形脉冲分配器。环形脉冲分配器根据光码盘的转子位置信号以及模式判定模块所得的当前工作模式来决定开关管的开通关断顺序。通过双闭环控制结构可以实现基速以下PWM调速。

当转速给定高于额定转速时,模式判断模块检测出电机工作于恒功率运行模式,速度反馈与速度给定的差值,通过速度PI调节器可以求出所需电流超前角 α 。光码盘提供A、B、U、V、W信号,其中A、B为增量式信号,每周 N 线,A、B提供电机转速信号,U、V、W为绝对式信号,两对极,每相互差 120° ,U、V、W位置信号作为永磁无刷直流电机逆变器开关管开通关断依据。恒转矩运行模式时,控制规律如表1所示。按照此开关表控制六只开关管开通、关断可以实现电流与反电势同相位,由图1可知,此时平均电流轴向位于交轴方向,全部用来产生转矩。

表1 恒转矩模式逆变器开关表

区间	1	2	3	4	5	6
UVW	101	100	110	010	011	001
顺	T4	T4	T6	T1	T1	T3
转	T3	T5	T5	T6	T2	T2
反	T1	T1	T3	T3	T5	T5
转	T6	T2	T2	T4	T4	T6

当系统工作于恒功率模式时,由速度调节器输出电流超前角 α 的值。检测光码盘的A、B上升沿与下降沿,每个电周期可产生 $4N$ 个脉冲。由于光码盘的位置信号表征转子磁极位置,而转子磁极位置又决定了反电势的位置。弱磁模式运行时,为了使电流超前于反电势 α ,需在某区间对

应位置信号到来之前导通该区间对应的电子开关器件。由表1可知,以U信号的上升沿作为每周期的起始信号,当DSP检测到U信号上升沿之后,即通过TMS320F240的QEP口对A、B脉冲计数,当脉冲数目达到对应 $(60^\circ - \alpha)$ 时,导通区间2的开关管,则相当于区间2对应的电子开关管,可见相对于恒转矩模式下的电流与反电势同相位的导通方式而言区间2的开关管提前导通。又根据无刷直流电机磁链每 60° 跳变一次的规则可知,按照表1的顺序每顺延 60° 切换一次开关管。直到第6区间开通之后,重复上面步骤,再次检测U信号上升沿,一方面可以消除积累误差,另一方面可读速度指令,作一次速度调节。

4 恒功率运行模式软件研究

关于永磁无刷直流电机的恒转矩运行模式,已有很多文献论及,本文着重对恒功率运行模式以及由恒转矩模式进入恒功率模式的转换进行研究。图3为由恒转矩模式切入恒功率模式的程序流程图。图中可见,在获得速度指令之后,首先需判断给定速度是否高于转速阈值 2 ,若低于阈值 2 ,则继续运行于恒转矩模式。否则判断当前PWM占空比是否已经为 1 ,若还未达到 1 ,表明以恒转矩运行模式提高转速还有余地,仍然依恒转矩模式运行。若上面两条件都满足,则进入恒功率模式。首先计算速度指令对应的电流超前角 α ,并做限幅最大输出 $\alpha = 60^\circ$,若电流超前角 $\alpha < 60^\circ$,则需将电角度 $60^\circ - \alpha$ 转换成光码盘对应脉冲数目 T ,由下式可求得

$$T = \frac{4N \cdot (60 - \alpha)}{360 \cdot p} \quad (1)$$

式中 N ——光码盘A、B信号总线数

p ——电机极对数

在获得 T 之后置标志位FIRST.FIELD为 0 ,标志位FIRST.FIELD表示程序是在检测到U信号上升沿之后第一次进入T2定时服务子程序。完成上述准备工作之后,启动CAP3口捕获U信号上升沿信号。

当DSP的CAP3口采样到转子位置U信号上升沿,系统则进入CAP3的中断服务子程序。图4为TMS320F240的捕获口CAP3中断服务子程序流程图。在进入CAP3中断服务子程序之后首先读取速度指令,以确认系统工作模式,若发现速度指令低于阈值 1 ,则退回恒转矩运行模式,否则

将电流超前角 γ 对应的光码盘脉冲数目 T 作为定时器的周期值。同时打开定时器 2 中断屏蔽。

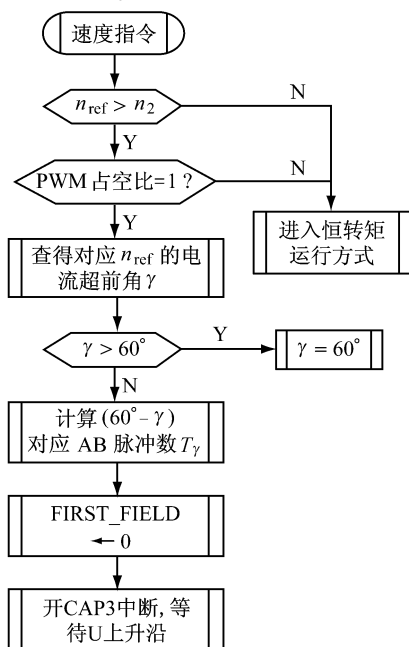


图3 恒转矩模式进入恒功率模式程序流程

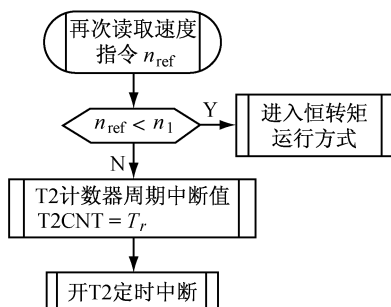


图4 捕获口 CAP3 上升沿中断子程序

当 T 个脉冲达到后, T2 定时子程序被启动。导通区间 2 对应的电子开关器件, 之后每隔 60 切换一次导通区间, 直到下一个 U 信号上升沿的到来。具体实现如下, 首先判断是否是第一次进入 T2 定时子程序。若是第一次进入, 则将 POSITION_FLAG 置 1, 同时令 FIRST_FIELD 为 1。标志位 POSITION_FLAG 表示当前所处工作区间的序号。若非第一次进入, 则判断是否处于第 6 个区间。若没有则将 POSITION_FLAG 加 1, 并将 T2 定时器的周期值改为对应 60 的脉冲数 $T_{60} = 4N \times 60 / 360^\circ \times P$ 当再次进入 T2 定时子程序开关状态转入下一区间, 实现换流。若已经是第 6 区间, 则需开捕获口 CAP3 中断, 检测 U 上升沿是否到来以消除累计误差。其中脉冲分配子程序是根据表 1 的位置信号分配开关管开关状态。

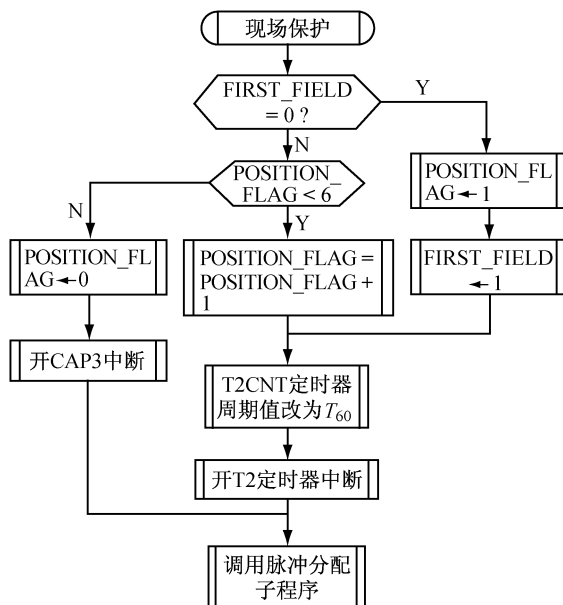


图5 T2 中断服务子程序流程图

5 试验研究

根据上面的分析, 以一台三相 4 极、2.2kW、额定转速 1100r/min 永磁无刷直流电机为例分析该系统的可行性。

图 6、7 分别为 $\gamma = 0^\circ$ 及 $\gamma = 55^\circ$ 时, a 相转子位置信号与 a 相电流波形, 其中 a 相转子位置信号与 a 相反电势相差 180° 。实测求得 $\gamma = 0^\circ$ 时转速为 1090r/min, $\gamma = 55^\circ$ 时转速为 3157r/min。从图 6、图 7 中可以看出基于 DSP 的永磁无刷直流电机调速系统能可靠完成基速以下恒转矩、基速以上恒功率两种运行模式。

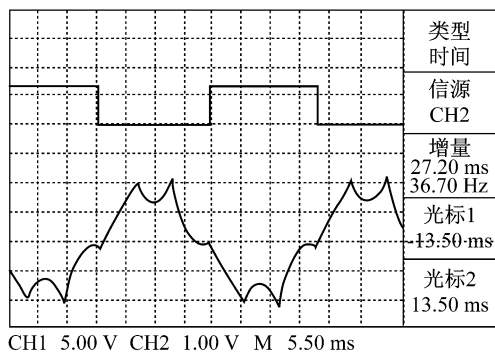


图6 $\gamma = 0^\circ$ 时 a 相转子位置信号与 a 相电流波形
CH1: 5V/div, CH2: 1V/div, t: 5ms/div

6 结论

基于 TI 公司的 TMS320F240 系列 DSP, 永磁无刷直流电机运行系统, 可方便准确地实现基速 (下转第 78 页)

载启动时,在转速升高到额定转速的 95 % 时,灭磁开关投入,发电机开始建压。此后,在发电机的升速、建压过程中,开始一切正常,但当发电机频率升高到接近 50Hz (低于 50Hz) 时,发电机电压急剧升高到 7.2kV 附近,且无法通过励磁调节电位器进行调整,观察发电机的励磁电流仅稍大于额定空载励磁电流,停机检查发电机的励磁装置无故障,再次开机时,又出现上述故障情况,后将发电机频率升高到 52Hz 附近,电压及励磁调节装置恢复正常,将发电机频率、电压调整到额定值附近(略高于 50Hz)同期并列,运行中无任何异常现象,这种情况一直持续近两个月时间。事后分析表明,这是一起典型的检修后发电机由于绝缘介质物理参数变化发生改变导致的高次谐波谐振引起的过电压故障,故障之所以在运行一段时间后自行消除,是因为运行过程中绝缘介质老化使定子绕组对地电容值改变而脱离谐振区的结果。

根据上述对谐波谐振过电压的理论分析和高次谐波谐振引起发电机过电压的实例可知,要防止发电机空载情况下发生高次谐波谐振过电压,除了在发电机的设计制造过程中采取必要的措施保证在额定频率附近不发生高次谐波谐振外,在发电机大修时,还要注意由于各种原因引起的定子绕组绝缘介质物理性质的变化导致的电容数值改变引起高次谐波谐振可能性。在发电机大修后除了应对发电机进行例行试验和测试外,还有必要进行各种高次谐波的谐振校验,校验在额定频率附近是否会发生高次谐波谐振,只有经测试和试验合格,并确定不会在额定频率附近发生高次

谐波谐振后才可使发电机投入运行。谐振校验可按下面的方法进行。首先测量发电机组的正序分布电容和正序等效电抗,在测得发电机组的正序分布电容和正序等效电抗后,将 $n = 5, 7, 11, 13, 17 \dots$ 代入式(3)求得对应的 f_0 值,如计算表明谐振时基频频率 f_0 不在 45 ~ 55Hz 的范围,即认为谐波谐振校验合格。

如谐振条件计算结果不能保证在额定频率附近不发生高次谐波谐振,则应采取措施(例如在电压互感器二次侧接入小容量的电容器等)破坏其谐振条件。

4 结论

由非零序高次谐波谐振引起的发电机定子绕组过电压,发生在发电机建压后的同期并列操作过程中,由于发电机定子回路的电阻很小,谐振回路的 Q 值很高,不大的高次谐波电动势就会在发电机机端产生很高的过电压,轻则造成发电机无法实现同步并列,重则可能造成定子绕组端部绝缘击穿,必须引起足够的重视。特别是对于新安装的发电机组和经过大修后的机组在投入运行前必须做高次谐波谐振校验,只有经校验发电机不会在额定频率附近发生高次谐波谐振时才能将发电机投入运行,否则必须采取措施破坏其谐振条件,以保证发电机组的正常同期并列和安全运行。

参考文献

- 1 吴大榕. 电机学(下册). 水利电力出版社, 1979.
- 2 吴竟昌. 供电系统谐波. 中国电力出版社, 1998.
- 3 鱼米滩水电站 1 # 机组空载过电压故障分析报告, 1998. 11.

收稿日期: 2003-03-08

(上接第 75 页)

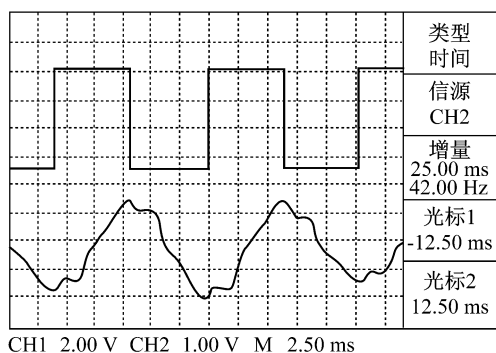


图 7 $\omega = 55^\circ$, a 相转子位置信号与 a 相电流波形

CH1: 2V/div, CH2: 1V/div, t: 2.5ms/div

以下恒转矩,基速以上恒功率双模式运行。控制系统简洁,运算能力强大、实时性好。试验系统的

成功充分验证了该系统软硬件的可靠性。

参考文献

- 1 B. J. Chalmers, R. Akmes and L. Musaba. PM Reluctance Motor with Two-part Rotor.
- 2 Nicola Bianchi, Silverio Bolognani and Brian J. Chalmers. Salient-Rotor PM Synchronous Motors for an Extended Flux Weakening Operation Range. IEEE IA, VOL. 36, NO. 4, 2000.
- 3 Brian J. Chalmers, and Lawrence Musaba. Design and Field-Weakening Performance of a Synchronous Reluctance Motor with Axially-Laminated Rotor. IEEE Industry Society Annual Meeting, New Orleans, Louisiana, October 5 - 9, 1997.
- 4 TMS320F/C24X DSP Controllers CPU and Instruction Set.
- 5 TMS320F/C24X DSP Controllers System and Peripherals.
- 6 严 岚, 贺益康, 严伟灿. 弱磁用复合式转子永磁无刷直流电机设计研究. 中小型电机, 2002. VOL. 29.

收稿日期: 2003-05-27