

# 无刷直流电机双闭环控制系统的研究

张 勇

(神华准格尔能源有限责任公司 010300)

**摘 要:**本文根据无刷直流电机的原理和其特性,主要介绍了无刷直流电机的双闭环控制系统该系统以DSP 电机专用控制芯片TMS240LF2407A 作为主控制器;以模糊PID 为控制策略;来实现其具体功能。

**关键词:**无刷直流电机;双闭环控制系统;模糊PID

## 1 无刷直流电机的工作原理

在许多工业控制的应用中,同步电机的应用正在不断的推广。同步电机被分为正弦波式和梯形波式,正弦波式又叫永磁同步电机(PMSM),梯形波式实质是一个表面式永磁隐极电机,由于定子上的密集整距绕组,使得在电机端子处感应出三相梯形电压波形。其自控方式更接近于直流电机,正因如此,又常称为无刷直流电机(BLDC),它需要一个三相逆变器为绕组供电<sup>[1]</sup>。

无刷直流电机主要由电动机本体、位置传感器和电子开关线路三部分组成。图1中的电动机本体为三相两极。三相定子绕组分别与电子开关线路中相应的功率开关器件相联接,在图1中的A相、B相、C相绕组分别与功率开关管V1,V2,V3相接。位置传感器负责跟踪转子位置,并与电动机的转轴相联接。当定子绕组的某一相通电时,该电流与转子永久磁钢的磁极所产生的磁场相互作用而产生转矩,驱动转子旋转,再由位置传感器将转子位置信号转换成电信号,控制电子开关线路,从而使定子各相绕组按一定次序导通,定子相电流随转子位置的变化按一定的次序换相。由于电子开关线路的导通次序是与转子转角同步的,因而起到了机械换相器的作用。

用。

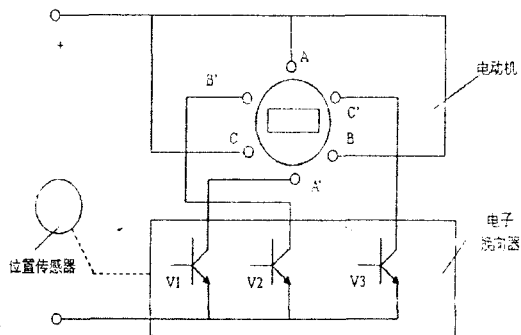


图1 无刷直流电动机结构原理图

## 2 三相无刷直流电动机的特性

无刷直流电动机转子采用弧形结构,可以获得梯形波的气隙磁场,定子采用整距集中绕组,由逆变器供给方波电流。其一相气隙磁场感应的反电动势与供电电流之间的关系如图2所示。采用相变量法,根据转子位置用分段直线表示感应电动势。无刷直流电动机的三相定子电压的平衡方程式可用下列状

为无直流的双极性曼彻斯特码,双极性曼彻斯特码信号经过运算放大器放大后进行正负脉冲分离。分离后的信号分别接D触发器的R、S端,则D触发器的Q端输出波形就是曼彻斯特码,输入单片机,由其内部的软件识别出同步头、地址后,将原数据还原出来,显示实际数据。

## 3 现场应用

自2005年底使用测井综合检测仪以来,检测、检修井下测井仪器70台次,为伽玛仪器光电倍增管作坪区35次,调节微差井温仪平衡点脉冲值28次,检测单芯曼码传输的伽玛、井温、磁定位、流量、含

水、压力等仪器22支次;检修仪器时可完全摆脱对数控仪器的依赖,方便了井下测井仪器的维修和检测,检修数据实时打印,使仪器的检修更加规范,提高了检测仪器的工作效率,保障了测井服务的质量。

### 【参考文献】

- [1] 郑学新,李会银.测井仪器原理——数控测井地面仪器.石油大学出版社,1993,(9).
- [2] 李华.MCS-51系列单片机实用接口技术.北京航空航天大学出版社,1993,(8).
- [3] 余永权.ATMEL89系列单片机应用技术.北京航空航天大学出版社,2002,(4).

收稿日期:2009-02-12

作者简介:张勇,男,工程师,在神华准格尔能源有限责任公司设备维修中心主要从事机电控制方面的研究。

态方程表达:

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_A & L_{AB} & L_{AC} \\ L_{BA} & L_B & L_{BC} \\ L_{CA} & L_{CB} & L_C \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix}$$

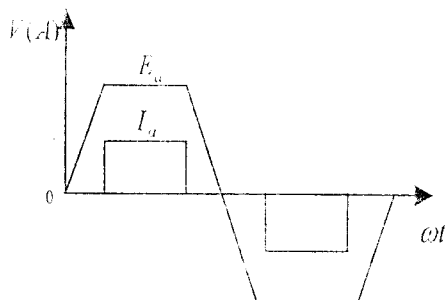


图2 方波无刷直流电动机波形图

在上式中:  $u_A, u_B, u_C$  为三相定子电压;  $e_A, e_B, e_C$  为三相定子反电动势;  $L_{AB}, L_{AC}, L_{BA}, L_{BC}, L_{CA}, L_{CB}$  为三相定子间互感;  $R_s$  为三相定子电阻;  $L_A, L_B, L_C$  为三相定子自感;  $p$  为微分算子。由于电动机结构的对称性可知, 和转子的磁阻不随转子位置变化而变化, 则式上式经整理后可变换为:

$$\begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix}$$

其等效电路如图3所示:

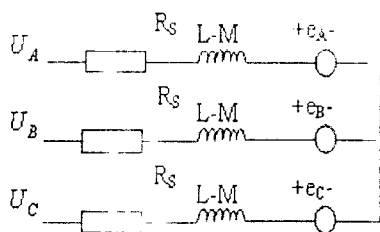


图3 电机等效电路图

电磁转矩方程为:

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega}$$

在上式中,  $T_e$  为电磁转矩;  $\omega$  为机械角速度。为了产生恒定的电磁转矩, 要求在每半个周期内, 方波电流的持续时间为  $120^\circ$  电角度, 梯形波反电势的平顶部分要求  $120^\circ$  电角度以上, 两者应严格同步, 理想情况下, 任何时刻定子绕组只有两相导通, 所以电磁转矩可以变为:

$$T_e = 2E_m I_m / \omega$$

在上式中,  $E_m$  为定子绕组各相反电势的幅值;  $I_m$  为定子绕组各相电流的幅值。因此电磁转矩表达式可等效为:

$$T = K_e \times I_e$$

式中,  $T$  为平均转矩;  $K_e$  为等效转矩常数;  $I_e$  为平均电流。

由上式可以看出, 无刷直流电动机电磁转矩大小与磁通和平均电流成正比, 所以控制逆变器输出方波电流的平均值即可控制无刷直流电动机的转矩。

对于星形连接的三相无刷直流电动机, 在理想条件下, 任何时刻只有两相定子绕组通电。令加在两相通电绕组上的平均电压为  $V_d$ , 则电压平衡方程式为:

$$V_d = 2E_m + I_m R = 2K_e \Phi_m n + I_m R$$

可以得到转速为:

$$n = \frac{V_d - I_m \cdot R}{2K_e \cdot \Phi_m}$$

式中:  $E_m$  为电机各相反电势;  $I_m$  为各相相电流;  $n$  为无刷直流电动机转速;  $R$  为回路等效电阻, 包括电机两相电阻和管压降的等效电阻。由上式可知, 无刷直流电动机的转速调节可以通过改变外施平均电压  $V_d$  来实现, 本系统是通过调节逆变器功率器件的 PWM 触发信号的占空比来改变外施的平均电压  $V_d$  从而实现无刷直流电动机的调速。

### 3 无刷直流电机双闭环控制系统的实现

根据上述无刷直流电机的原理及电机模型, 设计出双闭环控制系统, 下面系统控制原理、控制算法、硬件设计等方面进行叙述。

#### 3.1 双闭环控制原理

无刷直流电动机转速负反馈单闭环控制系统可以在保证系统稳定的条件下实现转速无静差, 但又不能完全按照需要来控制动态过程的电流或转矩, 因而常在对动态性能要求不高的场合采用。如果对系统的动态性能要求较高, 单闭环控制系统就难以满足要求。为了改善无刷直流电动机控制系统的动态特性, 就很有必要在转速负反馈单闭环控制系统的基础上再引入电流负反馈环来控制系统动态过程的电流和转矩<sup>[2]</sup>。为了满足无超调、抗负载扰动能力强、实时性和快速响应性好的要求, 系统采用转速环、电流环双闭环控制策略, 电流环的一个重要作用就是保证电枢电流在动态过程中不超过允许值, 即电流环首先能够起到抑止超调的作用, 对于转速环, 稳态无静差是最根本的要求。

本文的研究对象为三相永磁无刷直流电机, 根据双闭环调速系统的基本要求, 做出如图4的系统设计方案, 采用转速环和电流环构成双闭环控制系统。

控制系统的计算顺序是先计算转速环(图4中主回路大闭环), 后计算电流环(图4中副回路内

环)。控制方式有两种:一种是同步采样控制,即主、副回路的采样控制周期相同。另一种是异步采样控制,即主回路的采样周期是副回路采样周期的整数倍。这是因为一般串级控制系统中主回路受控对象的响应速度慢,副回路受控对象响应速度快的缘故。这时应根据副回路选择采样周期,因为副回路的受控对象的响应速度较快。

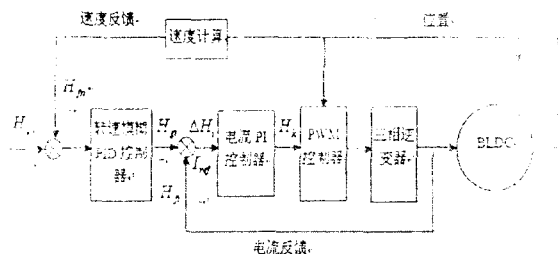


图4 BLDC 双闭环控制系统框图

转速外环和电流内环二者共同构成串级控制系统,通过PWM脉宽控制器,产生方波脉冲控制信号,经三相逆变器驱动电路,实现对电机的控制。这样系统不仅能控制转速,而且能控制电流,充分利用电机的过载能力,获得较快的动态响应。双闭环系统在突加给定信号的过渡过程中表现为恒值电流调节系统,在稳定和接近稳定运行中表现为无静差调速系统,发挥了转速和电流两个控制器的作用,获得了良好的静、动态品质。

### 3.2 控制策略的实现

电机是一个非线性、强耦合的系统,使用常规的PID算法难免出现超调量大、响应时间长。而模糊PID控制器具有快速响应和超调小等优点,且具有很强的鲁棒性,对直流无刷电机进行控制,可获得良好的控制效果。

### 3.3 控制系统硬件电路的实现

系统电路主要包括以下模块:DSP控制器模块(TMS240LF2407A);逆变器驱动模块、电机保护模块及电流、电压处理电路。其结构框图如图5所示。

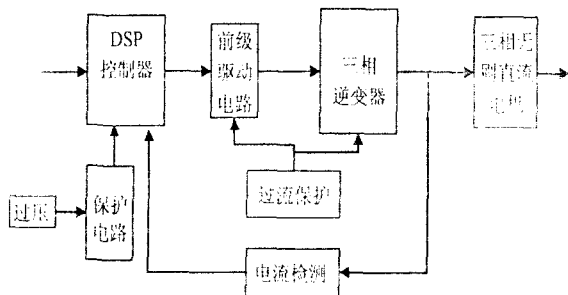


图5 系统硬件结构框图

控制电路采用DSP—TMS240LF2407A 控制器

为核心。该芯片计算速度快,外围电路丰富,容易生成6路PWM脉冲信号。采用该芯片设计控制器,只需少量的外围电路即可完成所有的控制任务。图6以TMS240LF2407A电机专用控制DSP芯片作为主控制器,采用PWM方式实现对无刷直流电机的双闭环控制。DSP的6路PWM输出信号经过隔离电路、前级驱动电路后,驱动逆变电路内的6个场效应管,来实现对电机的控制。无刷直流电机的位置参数由其自带的霍尔元件H1、H2、H3测出,经过整形隔离电路,由TMS240LF2407A的CAP端口进行捕捉定位。电机电流的测量是通过检测旁路电阻R上的压降来实现的,把检测到的电流信号输入到滤波放大电路,经过滤波放大后输入到DSP的ADC端口。

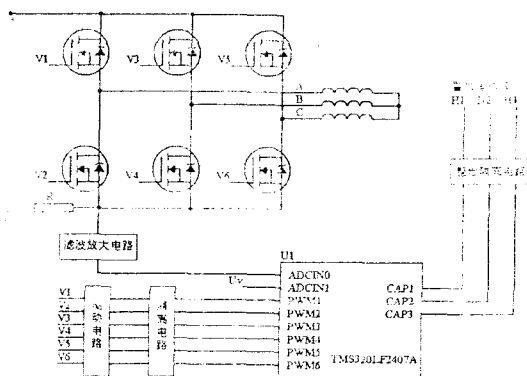


图6 系统硬件原理图

## 4 总结

本文根据无刷直流电机的原理和其特性,设计了无刷直流电机的双闭环控制系统。系统以DSP电机专用控制芯片TMS240LF2407A作为主控制器;以模糊PID为控制策略,来实现其具体功能。本文采用了多种保护措施,可使该系统能够安全、可靠、稳定地运行。初步试验表明该系统具有良好的性能。

### [参考文献]

- [1] Bimal K. Bose 著,王聪等译. 现代电力电子学与交流传动[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.
- [2] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统[M]. 北京:机械工业出版社, 2000.
- [3] 王保刚. 一种直流电机双闭环调速单元工作原理的分析与设计[J]. 河南大学学报, 1996, 26(4): 31—36.
- [4] 尹璐. 速度与电流双闭环不可逆直流调速系统分析[J]. 科技情报开发与经济, 2006, 16(7): 172—174.
- [5] 乔宏明. 双轮驱动电动汽车电机控制系统的研究[D]. 山东理工大学硕士学位论文, 2008.