

# 新型四开关管直流无刷电动机系统的驱动电路

焦斌

(上海电机技术高等专科学校,上海 200240)



**摘要** 工业应用中希望低价高性能的直流无刷电动机控制系统。经研究分析,四开关管的直流无刷电动机控制系统结构简单、可靠性高,仿真研究显示三相无刷电动机反电势和电流波形符合要求。采用直接电流控制 PWM,可以使系统具有良好的动、静态性能。

**关键词** 直流无刷电动机系统 PWM 电流控制 驱动

焦斌 1958年6月生,2003年毕业于华东理工大学控制理论与控制工程专业,硕士,副教授,在读博士生。研究方向为电力电子技术应用、自动控制。

## Novel Four-switch Brushless DC Motor Drives

Jiao Bin

(Shanghai College of Electricity & Machinery Technology)

**Abstract:** Low cost and high performance brushless DC (BLDC) motor drives are needed in industrial application. Four-switch three-phase BLDC motor drives have the features of simple structure and high reliability by studying and analyzing. The simulation shows that the back EMF and current waveforms meet the requirements. The drives can get good dynamic and static performances by using direct current controlled PWM.

**Key words:** BLDCM PWM Current controlled Drive

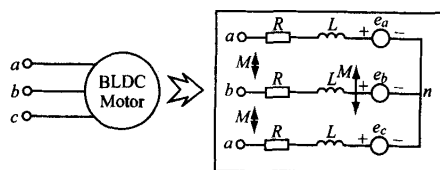
### 1 引言

直流无刷电动机系统既有交流电动机的结构简单、运行可靠、维护方便等特点,又具有直流电动机的运行特性而得到越来越广泛的应用。随之出现了各种无刷电动机的调速电路。有全硬件电路的调速系统,也有基于单片机的调速电路。应用中希望采用低价高性能的直流无刷电动机系统调速电路。为了降低调速电路的成本,可采用改变电路结构的方法。本文中阐述一种新型四开关管逆变器,比常规的六开关管逆变器减少了一对开关管,降低了成本且提高了运行可靠性。同时,采用 TI 公司 DSP TMS320LF240 构成的直流无刷电动机控制系统可以较好地满足控制性能的要求。

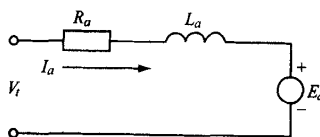
### 2 三相无刷电动机主电路分析

#### 2.1 主电路结构

三相无刷电动机及等效电路如图 1 所示。分



(a) 三相无刷电动机



(b) 一相等效电路

图 1 三相无刷电动机及等效电路

析时假定:①电机磁路不饱和;②定子三相绕组电阻、电感和互感为常数且均相等;③忽略电机铁耗;④逆变器中功率半导体器件为理想器件。

在上述假定下,定子三相绕组电压平衡方程式为

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中  $e_a, e_b, e_c$ ——定子三相绕组反电势  
电机电磁转矩为

$$T_e = \frac{1}{\omega_r} (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) \quad (2)$$

式中  $\omega_r$ ——转子角速度

电动机运动方程式为

$$T_e = T_L + J \frac{d\omega_r}{dt} + B\omega_r \quad (3)$$

式中  $T_L$ ——负载转矩

$J$ ——转动惯量

$B$ ——阻尼系数

根据图1(b)的等效电路,拉氏变换后的电压方程式为

$$\begin{aligned} V_i(s) &= E_a(s) + (R_a + sL_a)I_a(s) \\ E_a(s) &= k_E \omega_r(s) \\ T_e(s) &= k_T I_a(s) \\ T_e(s) &= T_L(s) + (B + sJ)\omega_r(s) \end{aligned} \quad (4)$$

由式(4)得

$$\begin{aligned} \omega_r(s) &= \frac{k_T}{(R_a + sL_a)(sJ + B) + k_T k_E} V_i(s) \\ &\quad - \frac{R_a + sL_a}{(R_a + sL_a)(sJ + B) + k_T k_E} T_L(s) \end{aligned} \quad (5)$$

假定  $B=0$ ,由式(5)得等效电路的传递函数

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{\omega_r(s)}{V_i(s)} \Big|_{T_L(s)=0} \\ &= \frac{k_T}{(R_a + sL_a)(sJ + B) + k_T k_E} \\ &= \frac{k_T}{sJ(R_a + sL_a) + k_T k_E} \\ &= \frac{1}{k_E (s^2 \frac{L_a J}{k_T k_E} + s \frac{R_a J}{k_T k_E} + 1)} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{k_E (s^2 \tau_m \tau_e + s \tau_m + 1)} \\ &= \frac{1}{k_E (s \tau_m + 1)(s \tau_e + 1)} \end{aligned} \quad (\because \tau_m \gg \tau_e) \quad (6)$$

其中  $\tau_m = \frac{R_a J}{k_T k_E}$ ——机械时间常数

$\tau_e = \frac{L_a}{R_a}$ ——电气时间常数

根据式(6)来设计PI调节器,适当选择参数,可得到较好的动、静态特性。

### 2.2 直接电流控制 PWM 工作原理分析

图2所示为直流无刷电动机控制系统主电路。由图可见,电动机的两相绕组连接到四开关逆变电路的两个桥臂,另一绕组接到两个串联电容的中点。图3所示为电动机反电势、电流波形及开关状态。

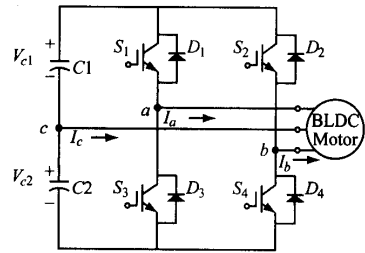


图2 直流无刷电动机控制系统主电路

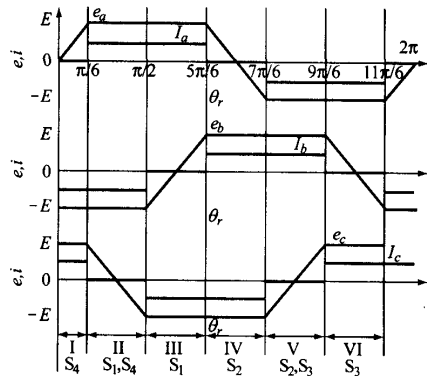


图3 四开关逆变器驱动的电动机反电势、电流波形

当定子三相绕组接成星形无中线时

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (7)$$

或

$$I_c = -(I_a + I_b) \quad (8)$$

式(8)表明其中一相电流可以由另外两相电流决定,即控制了两相电流就可以保证产生120°导通

的三相电流波形。为此,采用直接电流控制方式来控制四个开关管的开通与关断。图4为直接电流控制模式及各开关、二极管通断状态。

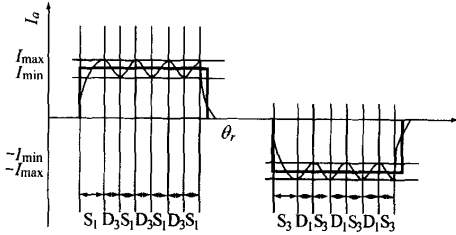


图4 直接电流控制波形图

下面以A相为例分析直接电流控制PWM的工作原理。

(1) 图4中状态1:电流正半波,  $I_a > 0$ 。

当  $I_a < I_{min}$  时:  $S_1$  开通; 当  $I_a > I_{max}$  时:  $S_1$  关断,  $D_3$  导通; 当  $I_{min} < I_a < I_{max}$  且  $dI_a/dt > 0$  时:  $S_1$  开通; 当  $I_{min} < I_a < I_{max}$  且  $dI_a/dt < 0$  时:  $S_1$  关断,  $D_3$  导通。

(2) 图4中状态2:电流负半波,  $I_a < 0$ 。

当  $I_a > -I_{min}$  时:  $S_3$  开通; 当  $I_a < -I_{max}$  时:  $S_3$  关断,  $D_1$  导通; 当  $-I_{min} > I_a > -I_{max}$  且  $dI_a/dt < 0$  时:  $S_3$  开通; 当  $-I_{min} > I_a > -I_{max}$  且  $dI_a/dt > 0$  时:  $S_3$  关断,  $D_1$  导通。

图5为主电路工作状态。每一阶段电压方程式分别为

模式 a:  $V_{C2} = 2RI_c + 2L \frac{dI_c}{dt} + e_{cb}$

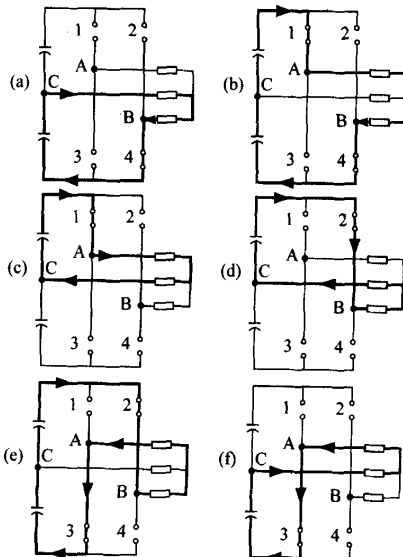


图5 主电路工作状态图

模式 b:  $V_{C1} + V_{C2} = 2RI_a + 2L \frac{dI_a}{dt} + e_{ab}$

模式 c:  $V_{C1} = 2RI_a + 2L \frac{dI_a}{dt} + e_{ac}$

模式 d:  $V_{C1} = 2RI_b + 2L \frac{dI_b}{dt} + e_{bc}$

模式 e:  $V_{C1} + V_{C2} = 2RI_b + 2L \frac{dI_b}{dt} + e_{ba}$

模式 f:  $V_{C2} = 2RI_c + 2L \frac{dI_c}{dt} + e_{ca}$

### 3 控制方案

直流无刷电动机系统调速控制的核心部分采用数字信号处理器 DSP, 这里采用 TI 公司的 TMS320LF2407 DSP。该芯片内部采用哈佛结构, 具有独立的数据存储空间和程序存储空间。这就允许 CPU 同时执行取指令(来自程序存储器)和取数据(来自数据存储器); 芯片内采用了专用硬件乘法器, 使得一次或多次乘法运算可以在一个单指令周期内完成; 设置了多个并行操作的功能单元, 使 DSP 芯片在相同时间内可完成更多的操作; 具有专用寻址单元, 地址的计算不再额外占用 CPU 的计算时间; 指令系统的流水线操作, 使 DSP 芯片可同时并行处理 2~4 条指令, 特殊的指令集, 充分发挥 DSP 算法及各系列芯片的特殊设计功能。所有这些特点, 都使 DSP 芯片工作速度大为提高, 指令周期缩短到 33ns。

直流无刷电动机控制系统见图6。

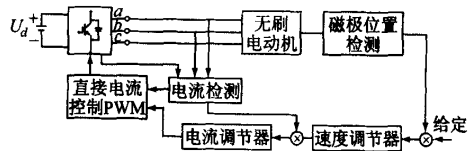


图6 直流无刷电动机控制系统

磁极位置检测可通过检测反电势来判断。电动机反电势的波形反映转子磁极的位置, 某相电势过零点对应该相磁通最大的位置, 也就是对应换相时刻。每一相由磁极感生的反电势波形在一周之内过零两次, 从而计算过零次数也可以判断电机的转速。

一般无刷电动机功率较小, 可采用电阻采样反馈电流, 通过线性光耦隔离送给 AD 转换器。模拟信号转换为数字量后送至 DSP。电阻采样反馈电流, 电机的实际电流更接近理想的电流波形。

主要表现在跟踪响应更快, 电流反馈迟滞时间更短, 其静、动态性能应更好。

#### 4 仿真结果

图7所示为采用直接电流控制 PWM 四开关管三相无刷电动机相电流仿真波形。图8所示为反电势波形图。

#### 5 结论

新型四开关管逆变器结构的研究为实现低价高性能直流无刷电动机控制系统提供了可能性, 由于该驱动电路比常见的六开关管驱动电路减少了一对开关管, 使电路可靠性增加, 具有一定的实用性。

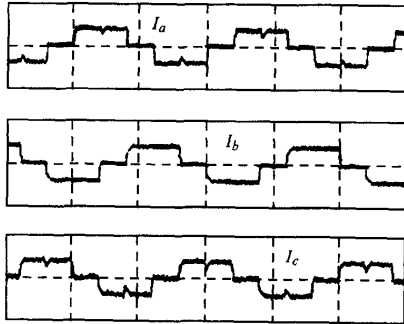


图7 电流仿真波形

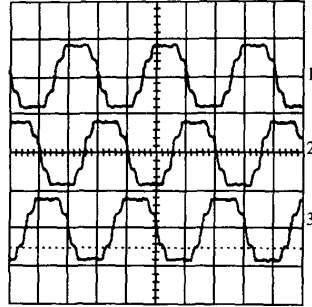


图8 反电势仿真波形

#### 参考文献

- 1 张琛. 直流无刷电动机原理及应用[M]. 机械工业出版社, 1996.
- 2 韩安太等. DSP 控制器原理及其在运动控制系统中的应用[M]. 清华大学出版社, 2003.
- 3 J. P. Johnson and M. Ehsani. Review of sensorless methods for brushless dc. [J]. in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, 1999, pp. 143 ~ 150.
- 4 S. K. Safi and A. G. Jack. Analysis and Simulation of the high-speed torque performance of brushless dc motor drives. [J]. Proc. IEEE. Vol. 142, no. 3, pp. 191 ~ 200, 1995.