

无刷直流电机非换相相电流采样的逆变器结构

王爽¹, 李铁才¹, 王治国²

(1.哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2.深圳航天科技创新研究院, 广东 深圳 518057)

摘要:提出了一种新型的逆变器结构,将传统的三相桥逆变器中与功率开关管反并联安装的续流二极管独立开,通过采用磁感应式电流传感器,实现无刷直流电机的非换相相电流的采样,从而使得电磁转矩的精确控制成为可能。理论分析及实验结果证明了该结构的可行性及有效性。

关键词:逆变器; 无刷直流电机; 非换相相电流; 电磁转矩控制

中图分类号: TM464

文献标识码: A

文章编号: 1000-100X(2010)04-0019-02

A Novel Inverter Structure Used for BLDCM Non-commutation Phase Current Sampling

WANG Shuang¹, LI Tie-cai¹, WANG Zhi-guo²

(1.Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2.Shenzhen Academy of Aerospace Technology, Shenzhen 518057, China)

Abstract: A novel inverter structure is proposed. Freewheeling diodes are isolated with power switches in this topology, which are anti-parallel connected with the power switches in traditional three phase bridge inverter. By adopting the magnetic induction current sensor, the non-commutation phase current of brushless DC motor (BLDCM) can be sampled with this inverter structure, and this makes it possible to realize the accurate control of electromagnetic torque. The theoretical analysis and experimental results both testify the feasibility and effectiveness of the proposed inverter structure.

Keywords: inverter; brushless DC motor; non-commutation phase current; electromagnetic torque control

1 引言

无刷直流电机(BLDCM)由于采用电子换相取代了直流电机的电刷功能,因此逆变器是无刷电机控制系统中的重要组成部分,其结构影响着系统的控制性能。目前BLDCM的逆变桥结构主要有采用PAM控制的半桥驱动系统架构^[1-2]和三相桥逆变器架构^[3],以及采用PWM控制的三相桥逆变器架构^[4]。后者具有更快的响应速度,提供了续流回路,在减少开关器件的同时增加了系统的可靠性,已逐渐取代PAM架构成为BLDCM系统的首选方案。通过采样直流母线电流来控制电磁转矩的方式目前被广泛应用于BLDCM控制领域,但换相期间由于逆变桥内会形成内环流,导致直流母线电流无法真实地反映产生电磁转矩的电流,因此控制直流母线电流的方式仅能应用于转矩的近似控制或过流保护控制。通过采样三相绕组电流,可实现电磁转矩的精确控制,但该方案需要3个独立的电流传感器、并需在3个采样值间进行切换控制,其控制电路累赘、复杂,且调整困难、可靠性差,所以极少被采用。为此设计了新型的三相逆变桥架构,通过采用磁感应式电流传感器,消除了检测死区,简单、准确地采样到非换相相绕组的电流,使电磁转矩的精确控制成为可能。

2 非换相相电流

BLDCM的转矩方程为:

$$T_e = \frac{1}{\omega_m} (e_u i_u + e_v i_v + e_w i_w) \quad (1)$$

式中: i_u, i_v, i_w 为电机相绕组的瞬时电流; e_u, e_v, e_w 为电机相反电动势瞬时值; ω_m 为电机的机械角速度瞬时值; T_e 为电磁力矩瞬时值。

三相星形连接的方波BLDCM大多采用三相六拍控制。在理想状态下,任意时刻都有两相导通,每60°电角度换相一次,从而产生步进的旋转磁场,定子磁场和转子磁场相互作用产生电磁力矩。实际上由于电机绕组的电感作用,在换相期间三相绕组会同时有电流通过。根据PWM调制方式的不同,逆变桥内会形成内环流,导致直流母线电流无法真实地反映产生电磁转矩的电流。

现以w相绕组作为非换相相,假设换相时刻反电动势保持不变,那么 $e_u = e_v = -e_w = \pm E$ 。因 $i_u + i_v + i_w = 0$, 根据转矩方程(1)可得:

$$T_e = \pm \frac{2E}{\omega_m} i_w \quad (2)$$

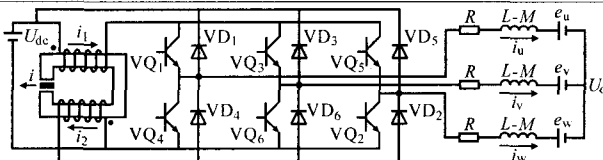
由此可见,产生转矩的电流为非换相相电流,因此通过控制非换相相电流即可控制转矩。

3 新型逆变器结构

将传统三相桥中与功率开关管反并联的二极管独立开,构成图1的新型逆变器拓扑。设电机三相对称,忽略凸极效应,每相绕组具有相同的特性和参数。

定稿日期: 2009-10-19

作者简介: 王爽(1977-),男,吉林长春人,博士研究生,研究方向为电机及电力传动技术。



R 为绕组的电阻; i_1, i_2 为流入绕组同名端的电流瞬时值
 U_o 为电机中性点的电压瞬时值; L, M 分别为绕组的自感和互感

图 1 力矩电流采样方式拓扑结构

4 电流模式分析

由于 PWM_ON 调制方式相比其他调制方式具有最小的换相转矩脉动^[5], 因此下文将对 PWM_ON 调制方式下换相期间及非换相期间的电流采样过程进行分析, 控制时序如图 2 所示。

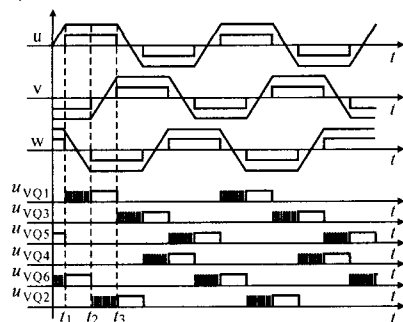


图 2 反电势波形与 PWM_ON 模式

4.1 非换相期间

(1) 上桥臂调制, 下桥臂恒通

以 $t_1 \sim t_2$ 段为例, 当 VQ_1 导通时, i_1 流入上端线圈同名端, 经 VQ_1, VQ_6, u 相和 v 相绕组构成回路, 得:

$$i_1 = i_u = -i_v, \quad i_2 = 0 \quad (3)$$

当 VQ_1 关断时, 电流通过 VD_4 续流, i_2 流入下端线圈同名端, 经 u 相和 v 相绕组、续流二极管 VD_4, VQ_6 构成续流回路, 可得:

$$i_1 = 0, \quad i_2 = i_u = -i_v \quad (4)$$

因此电流传感器输出电流 $i = i_1 + i_2 = i_u = -i_v$ 。

(2) 下桥臂调制, 上桥臂恒通

以 $t_2 \sim t_3$ 段为例, 当 VQ_2 导通时, i_1 流入上端线圈同名端, 经 VQ_1, VQ_2, u 相和 w 相绕组构成回路, 得:

$$i_1 = i_u = -i_w, \quad i_2 = 0 \quad (5)$$

当 VQ_2 关断时, 电流通过 VD_5 续流, i_1 流入上端线圈同名端, 经 VD_5, VQ_1 构成续流回路, 可与式(5)相同的表达式。因此有 $i = i_1 + i_2 = i_u = -i_w$ 。

由上述分析可知, 采用该拓扑结构非换相期间电流传感器采样的电流就是流经绕组的电流, 即产生电磁转矩的电流。

4.2 换相期间

换相期间由于绕组电感的作用, 关断相的电流不能立即降为零, 而是通过二极管续流, 此时产生电磁转矩的电流为非换相相电流。

(1) 上桥臂换相

以 t_3 换相时刻为例, u 相关断, v 相导通, w 相为

非换相相。当 VQ_3 导通时, i_u 通过 VD_4 续流, 并进入电流传感器下端线圈的同名端; i_v 从电流传感器上端线圈的同名端流入, 经 VQ_3 进入 v 相绕组, 可得:

$$i_1 = i_v, \quad i_2 = i_u \quad (6)$$

电流传感器的输出电流 $i = i_1 + i_2 = i_u + i_v = i_w$ 。

当 VQ_3 关断时, i_u 通过 VD_4 续流, 并进入电流传感器下端线圈的同名端; i_v 从电流传感器下端线圈的同名端流入, 经 VD_6 进入 v 相绕组, 可得:

$$i_1 = 0, \quad i_2 = i_u + i_v \quad (7)$$

电流传感器的输出电流 $i = i_1 + i_2 = i_u + i_v = i_w$ 。

(2) 下桥臂换相

以 t_2 换相时刻为例, v 相关断, w 相导通, u 相为非换相相。当 VQ_2 导通时, i_v 通过 VD_3 续流, 并进入电流传感器上端线圈的同名端; i_w 从电流传感器上端线圈的同名端流入, 经 VQ_1, VQ_2 进入 w 相绕组, 可得: $i_1 = i_v + i_w, i_2 = 0$ 。

电流传感器的输出电流 $i = i_1 + i_2 = i_v + i_w = i_u$ 。

当 VQ_2 关断时, i_v 通过 VD_3 续流, 并进入电流传感器上端线圈的同名端; i_w 经 VD_5 , 从电流传感器上端线圈的同名端流入, 可得: $i_1 = i_v + i_w, i_2 = 0$ 。

电流传感器的输出电流 $i = i_1 + i_2 = i_v + i_w = i_u$ 。

在换相期间电流传感器采样电流等于非换相相绕组的电流。由式(2)可知, 非换相相电流与电磁转矩成正比, 故基于所提出的逆变器拓扑结构, 磁感应式电流传感器的输出就对应着产生电磁转矩电流, 对该电流进行控制, 即可实现对电磁转矩的控制。

5 实验分析

全力矩电流采样硬件结构包括新型的三相逆变器和基于霍尔效应的电流传感器。逆变桥由不带续流二极管的 MOSFET 模块和高速肖特基二极管构成, 其连接方式如图 1 所示。

测试电机采用 8 极、400 W 的 BLDCM, 通过堵转产生电流; 调制方式为 PWM_ON 模式, 开关频率为 20 kHz。其中霍尔电流传感器的输出电压值 u 与采样电流值 i 的对应关系为 $i = (u - 2.5) / 0.8 (A)$ 。

图 3a 为下桥臂换相时, u 相作为非换相相时霍尔电流传感器的输出电压 u_u , u 相绕组电流 i_u , 总线电流 i_L , w 相位置传感器的霍尔输出信号 u_w 的波形。可见在 u 相导通的 120° 阶段, 霍尔电流传感器的输出与 u 相绕组电流的测量值一致。

图 3b 为换相时刻电流的变化曲线。可见当换相脉冲来临时, 霍尔电流传感器的输出与绕组电流一致, 存在续流过程, 而总线电流则与开通相电流波形相似, 从零开始缓慢上升。

图 3c 为 u_u, i_u, u_w 和 w 相下桥臂功率管控制信号 u_c 的波形。可见调制模式采用的是 PWM_ON, 其中信号为低电平有效。

(下转第 71 页)

的功率密度,功率损耗为 10%~20%,损耗以热量的形式散发^[4]。实装集控系统中,模块接插在机箱中,若不采取有效的散热措施,这部分热量将使电源模块和机箱内部升温,容易导致电源品质变差,出现故障直至失效,或导致机箱内部其他部件不能正常工作。为妥善解决该问题,除了在 VICOR 模块表面装有散热片外,再综合采用辐射散热、传导散热以及自然对流与强制对流相结合的散热设计措施,同时在机箱下方配置独立的风扇对电源及其他工作部件进行通风散热,以确保优良的散热性。通过采用上述技术手段,取消了在电源本体中设置风扇的常规性措施,避免了常规电源中风扇及其控制电路这一易发故障因素,从而提高电源的可靠性指标。

3.3.2 电源的电磁兼容性

良好的电磁兼容(EMC)设计是计算机与其他电子设备电磁兼容的有效保证,在设计中一般综合采用抑制干扰源,解决好电源共地,进行有效屏蔽、设计或选用合适的抗干扰滤波器等措施^[5]。电源电路中所选用的基于零电流开关技术的 VICOR 模块 EMC 性能良好,从元件选用上降低了噪声干扰;电路设计对电源本身共地问题及其与电源负载的共地进行了统筹考虑;电源壳体采用封闭式金属外壳(同时将外壳加工成具有良好散热特性的结构形式),保证具有良好的电磁屏蔽效果;实际电路会在 FARM 整流滤

波模块的输入端接入 X 电容和 Y 电容,以进一步降低差模干扰和共模干扰。

4 模块配机试验及结论

将研制的电源模块接插于标准的 VEM 总线机箱内,按输入输出电气特性定义连接好输入输出线缆,给 VME 总线单板机和其他接口设备供电,长时工作试用和测试结果表明:①当主用电源电压降至约 175 V 时,电源输入自动切换至备用电源,电压回升至 194 V 时,再自动切换回主用电源,由于保持电容的作用,确保了切换瞬间电源输出连续稳定;②电源输出纹波峰值、负载调整率分别小于 1%和 0.5%,满足技术要求;③散热特性良好。可见,该电源设计方法和技术有效可行,可满足高性能电源工作要求。

参考文献

- [1] 刘海松,吴杰长,郭朝有.基于 VICOR 模块的船舶集控系统嵌入式单板机电源设计[J].机电设备,2009,(1):14-17.
- [2] VICOR.FARMTM Filter/Autoranging Rectifier Module Up to 1000Watts[Z].USA,VICOR Co.,Ltd.,2009.
- [3] VICOR.300V Input Mini Family DC/DC Converter Module[Z].USA,VICOR Co.,Ltd.,2009.
- [4] 欧寿春.VICOR 电源模块在某机载电子设备上的应用[J].自动化博览,2000,(2):6-8.
- [5] 欧寿春.提高稳压电源的可靠性是增加机载计算机可靠性的重要环节[J].光电与控制,1996,(3):57-64.

(上接第 20 页)

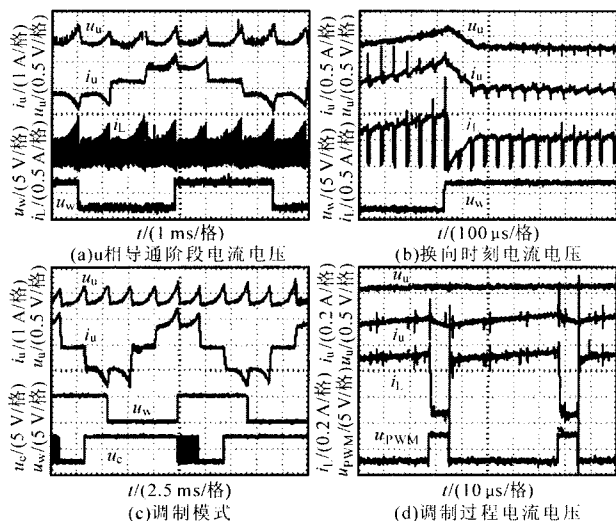


图 3 电流测量波形

图 3d 为每个 PWM 周期中电流的变化曲线。电流传感器由于霍尔器件的滤波作用及示波器的量程限制,电流波动较微小;绕组电流真实反映出 PWM 过程电流的变化;总线电流由于逆变器内部续流的原因,在信号关断阶段,无续流过程,电流跌为零。

6 结论

针对无刷直流电机电磁转矩精确控制的问题,

提出了能够实现非换相电流采样的新型逆变器拓扑结构。从上述实验分析和理论推导可见,总线电流采样无论在调制过程还是换相过程,都无法真实地反映绕组内电流的情况,而采用所提出的全力矩电流采样方案可准确采集到非换相相电流,从而证实了该方案的可行性和有效性。

参考文献

- [1] 郭永东,卢靖华.飞轮制动切换研究[J].微特电机,1998,(3):2-5.
- [2] 杜坤梅,李铁才.惯性飞轮电机力矩伺服控制系统[J].电机与控制学报,2001,6(5):119-120.
- [3] 张晓峰,胡庆波,吕征宇.基于 Buck 变换器的无刷直流电机转矩脉动抑制方法[J].电工技术学报,2005,20(9):72-81.
- [4] Yen-Shin Lai,Fu-San Shyu,Yong-Kai Lin.Novel PWM Technique without Causing Reversal DC-Link Current for Brushless DC Motor Drives with Bootstrap Driver[A].2005 Fortieth IAS Annual Meeting Industry Applications Conference[C].2005,3(2):2182-2188.
- [5] 张相军,陈伯时.无刷直流电机控制系统中 PWM 调制方式对换相转矩脉动的影响[J].电机与控制学报,2003,7(2):87-91.