

文章编号:1671-251X(2015)06-0044-05 DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2015.06.011
武瑞兵. 防爆电驱动无轨胶轮车永磁电动机回馈制动研究[J]. 工矿自动化, 2015, 41(6): 44-48.

防爆电驱动无轨胶轮车永磁电动机回馈制动研究

武瑞兵

(山西省交通规划勘察设计院, 山西 太原 030012)

摘要: 以防爆电驱动无轨胶轮车为研究对象, 分析了由三相桥式逆变器驱动的永磁无刷直流牵引电动机回馈制动的方式及制动微观状态, 提出了回馈制动控制策略。该控制策略采用 PWM 升压斩波方法, 通过闭环 PI 调节器, 合理分配每个 PWM 周期中的续流与充电时间, 实现回馈制动。仿真结果表明, 该控制策略安全可靠, 能有效实现能量回收, 提高了车辆的能量利用率; 当车辆的驱动电动机转速降到约 300 r/min 时, 整车动能已经明显降低, 此时能量回收已经不再起作用。该结论对防爆电驱动无轨胶轮车回馈制动踏板的开度设计具有重要意义。

关键词: 防爆电驱动无轨胶轮车; 回馈制动; 永磁无刷直流电动机; 开度设计

中图分类号: TD614 文献标志码: A 网络出版时间: 2015-05-29 13:38

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1627.TP.20150529.1338.011.html>

Research of regenerative braking of permanent magnet motor used in
explosion-proof electric driving trackless rubber-tyred vehicle

WU Ruibing

(Shanxi Communication Planning Survey and Design Institute, Taiyuan 030012, China)

Abstract: Taking explosion-proof electric driving trackless rubber-tyred vehicle as study object, regenerative braking method and braking microstate of permanent magnet brushless DC traction motor driven by three-phase bridge inverter was analyzed, and the regenerative braking control strategy was put forward. The control strategy adopts PWM chopper regulator method, and can distribute time of wheeling and charging of each PWM cycle through closed loop PI, so as to achieve regenerative braking. The simulation results show that the control strategy is safe and reliable, can effectively realize energy recovery, and improve the energy efficiency of vehicles. When the rotating speed of vehicle driving motor is reduced to about 300 r/min, the vehicle kinetic energy has been significantly reduced, and the energy recovery is noneffective. The conclusion has great significance to opening design of regenerative braking pedal of the explosion-proof electric driving trackless rubber-tyred vehicle.

Key words: explosion-proof electric driving trackless rubber-tyred vehicle; regenerative braking; permanent magnet brushless DC motor; opening design

0 引言

近年来, 防爆无轨胶轮车在煤矿辅助运输中得到了广泛应用, 但是由于井下恶劣的地质条件, 比如

在一些坡度比较大的地方, 车辆下坡时刹车片磨损非常严重, 影响了车辆的安全运行, 机械制动往往不够理想, 而电动机的电气制动则具有刹车速度快、无磨损的优势, 并且还能进行能量的回收利用, 但目前

收稿日期: 2014-12-12; 修回日期: 2015-04-09; 责任编辑: 张强。

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863 计划)课题(2013AA06A409)。

作者简介: 武瑞兵(1979—), 男, 山西太原人, 工程师, 现主要从事电气自动化产品的开发、设计工作, E-mail: wuruibing2004@163.com。

电气制动在矿用电驱动车辆方面的应用还处于初步阶段。电驱动车辆电气制动方式主要有能耗制动、反接制动和回馈制动。能耗制动需在电枢回路中串接耗能电阻,反接制动又必将消耗大量蓄电池电能,二者都不适用于电驱动车^[1]。回馈制动既可使蓄电池短时不供电而得以充分恢复电能,又可在较长时间回馈中补充电能,提高供电能力,增加续驶里程,因而适合应用于电驱动车辆的电气制动。传统的回馈制动由于受到功率整流桥的限制而难以实现,而由蓄电池及三相桥式逆变器驱动的永磁无刷直流电动机则可以利用三相桥式电路完成能量反馈。本文主要以防爆电驱动无轨胶轮车为研究对象,对三相桥式逆变器驱动的永磁无刷直流电动机的回馈制动进行研究与分析。

1 电驱动系统构成及回馈制动原理

通过转矩控制车辆加速度,更加符合司机驾驶车辆的动力性与平顺性要求;同时由于永磁无刷直流电动机无需外加励磁电流,输出转矩与定子电流具有线性关系,所以防爆电驱动无轨胶轮车电驱动系统采用了转矩闭环控制策略,如图 1 所示。当司机踩下电子油门时,控制器接收到来自油门踏板的 CAN 总线开度信号,通过识别车辆所处坡度大小、起步与稳态工况约束、动力/经济模式选择后,查询对应合适的加速度曲线,生成转矩电流指令 I_t^* ,同时由采集到的电动机电流电压、霍尔位置信号进行磁链、转速计算、转矩补偿,给定与反馈进行 PI 调节、限流后,最后由三相 PWM 逆变器驱动电动机;当司机踩下制动踏板时,控制器接收到 CAN 总线格式的制动数据信号,进行车辆电动/刹车状态识别,确认允许电气制动后,首先对油门闭锁,通过占空比判断后,进入回馈制动策略子程序,经过制动电流给定 PI 调节与限流处理后,输出符合车辆电刹车力度的制动转矩。

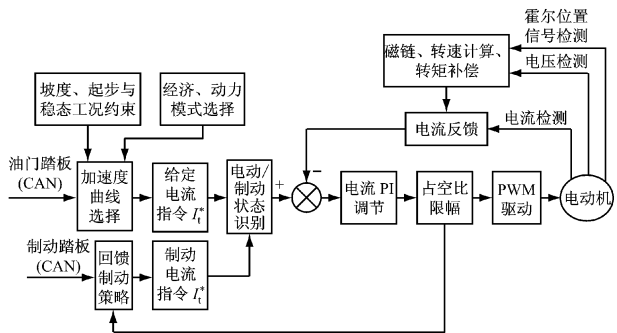


图 1 防爆电驱动无轨胶轮车电驱动系统

三相逆变器的功率器件采用三相绝缘栅晶体管 (IGBT),主回路拓扑结构如图 2 所示。图 2 中 $T_1—T_6$ 为功率开关器件, $D_1—D_6$ 为续流二极管。

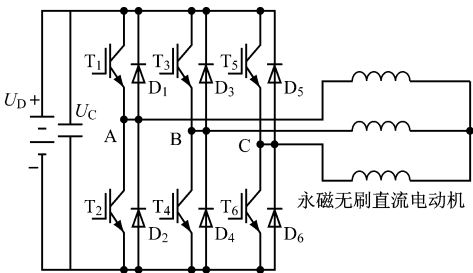


图 2 三相逆变桥拓扑结构

永磁无刷直流电动机 (BLDCM) 常用的工作方式 为两相导通方式,即一个霍尔位置换相周期内 ABC 各相正、负分别导通 120° ,且三相相位相差 120° ^[2-3]。为了获得制动力矩,在相反电势幅值最大的 120° 期间,通一反方向的电流即能够实现,但要能向蓄电池回馈能量,而不是从蓄电池汲取能量,则需要通过 IGBT 升压斩波来实现,这就是回馈制动的控制原理。设定电动机正向旋转,在一个 PWM 周期内,当逆变器不同桥臂的 IGBT 导通时,电池通过不同桥臂 IGBT 对电动机放电,此时绕组电感积蓄磁场能量,导致回路电流上升,该状态称为续流状态;当逆变器不同桥臂的 IGBT 关断时,电动机定子绕组电感磁场能量通过 IGBT 的反并联二极管对蓄电池充电,导致回路电流下降,称为充电状态。

电动机回馈制动时功率管采取两两导通方式,每一瞬间将有 2 个功率管导通,每间隔 $1/6$ 周期 (60°),功率管换相 1 次,具体换相时刻根据电动机的霍尔位置传感器信号进行判断,每次换相时一个导通的功率管被关断,而另外一个桥臂上原先关断的功率管导通,即桥臂之间进行轮流换相,各功率管的导通顺序为 $T_1T_4, T_1T_6, T_3T_6, T_3T_2, T_5T_2, T_5T_4, T_1T_4, \dots$,每个功率管导通 120° ,并同时处于 PWM 运行状态,如图 3 所示。

2 电动机回馈制动过程分析

2.1 续流状态

当霍尔位置状态为 001 时,由图 3 对应关系可知,该时刻开关管 T_2, T_3 处于 PWM 状态,当功率管导通瞬间,结合图 2 主电路判断电动机 ABC 端电压,三相逆变桥与电动机的组合状态方程如下^[2]:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ U_D \\ E_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} +$$

$$\begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_O \\ U_O \\ U_O \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: U_D 为电池端电压, V; E_C 为电动机 C 相端电压, V; L 为绕组自感, H; M 为绕组互感, H; i_A, i_B, i_C 为相电流, A; R 为定子三相绕组电阻, Ω ; p 为微分算子 (d/dt); e_A, e_B, e_C 为三相反电势, V; U_O 为电动机中性点电压, V。

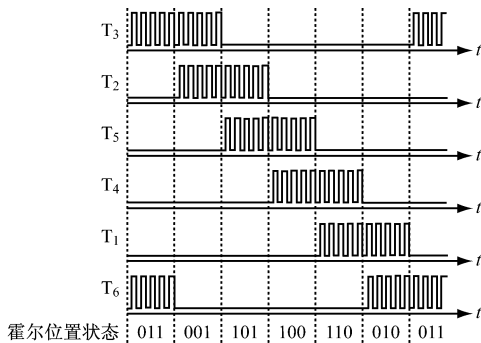


图3 霍尔位置传感器信号与开关管导通关系

当 T_2, T_3 导通时, $i_A = -i_B, e_A = -e_B, i_C = 0$, 将此条件代入式(1), 经过整理, 得到系统续流状态时的回路方程^[4]为

$$U_D + 2e_A = -2[(L - M)pi_A - 2Ri_A] \quad (2)$$

由于电动机处于制动状态, 故电动机的 A 相反电势 $e_A > 0$, B 相反电势 $e_B < 0$, 回路电流 i_A 处于上升阶段^[5], 车辆的动能转化为磁场能存储在绕组电感中, 其中有一部分能量以热的形式消耗在电动机的绕组阻抗上, 续流状态时的电流路径如图 4 所示。

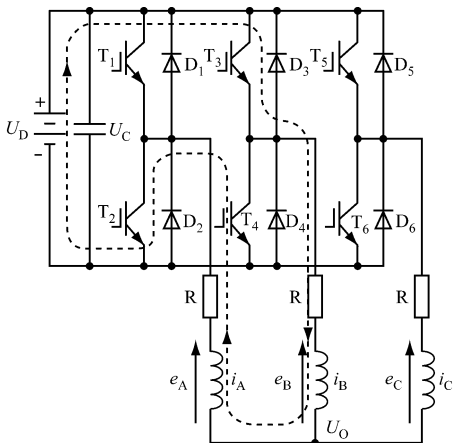


图4 续流状态时的电流路径

2.2 充电状态

同样以霍尔位置状态 001 为例, 该时刻开关管 T_2, T_3 处于 PWM 状态, 当功率管关断瞬间, 二极管 D_1, D_4 续流导通, 结合图 2 主电路判断电动机 ABC 端电压:

$$\begin{bmatrix} U_D \\ 0 \\ E_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} p \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_A \\ i_B \\ i_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_A \\ e_B \\ e_C \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_O \\ U_O \\ U_O \end{bmatrix} \quad (3)$$

同样将 $i_A = -i_B, e_A = -e_B, i_C = 0$ 的已知条件代入式(3), 经过合并整理, 得到系统充电状态时的回路方程^[4]为

$$U_D = 2e_A + 2[(L - M)pi_A + Ri_A] \quad (4)$$

虽然此时逆变器的功率器件 T_2, T_3 处于关断状态, 但由于电动机绕组电感的存在, 使得相电流无法突变。电动机的 A, B 相电流通过续流二极管 D_1, D_4 以及蓄电池构成了回路, 并对蓄电池进行充电, 此时电动机相电流开始减小, 存储在绕组中的磁场能量转化为电能, 充电状态时的电流路径如图 5 所示。

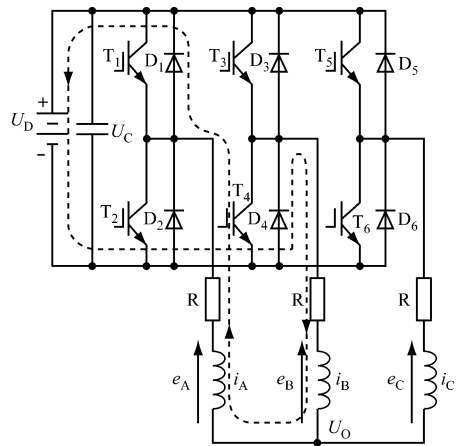


图5 充电状态时的电流路径

3 回馈制动控制策略的实现

在一个 PWM 周期内, 功率管导通时电感吸收的能量应等于关闭时释放的能量。当一相反电势达到最大时, 该相对应的 IGBT 占空比应控制为最小, 以保证充电电流最大。考虑电流增长的情况, 当忽略电阻压降以及电流波动时, 根据能量关系, 可以推出回馈制动时, 下述近似关系成立^[6]:

$$\alpha > 1 - 2E/U_D \quad (5)$$

式中: α 为占空比; E 为电动机相反电势。

由式(5)可以看出, 转速确定之后, 由于永磁体磁通的恒定特性, 反电势 E 随之确定, 保持电流增长的最小占空比 α_{min} 也就确定了, 而与各相电流值无关。当电流调节器选用 P(比例)调节器以提高动态品质时, 系统存在相对于反电势幅值恒定的静

差,即电流指令 I^* 与电动机反馈电流 I_i 之间满足^[6]如下关系式:

$$I^* = \frac{M}{K}M_{\text{com}} + K_1 I_i \tag{6}$$

式中: M 为调制度,由占空比 α 确定; M_{com} 为三角载波的峰值; K 为比例放大系数; K_1 为电流反馈系数。

考虑转矩补偿、转速计算后,闭环转矩控制的实质就演变为电动机定子电流闭环调节策略,精确控制电流指令值,使之跟随转速的变化而变化。而电流闭环后,可以得到一定范围内幅值恒定的电流,从而实现转矩的稳定控制。但是,当转速下降到一定程度后,占空比已经不满足判据条件,工作电流不再恒定,开始逐渐下降。当转速下降至一定程度后,电动机电流几乎为零,回馈制动不再继续起作用。具体回馈制动控制策略程序流程如图 6 所示。其中, i 为循环计数器变量; I_t, I_{t1}, I_{tm} 分别为当前转矩电流、转矩电流暂存值、最大制动电流。

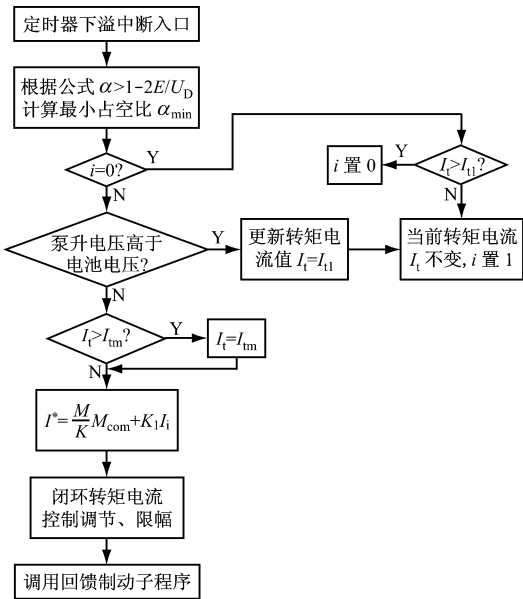


图 6 回馈制动控制策略程序流程

4 仿真与分析

为了验证回馈制动控制策略的正确性,利用 Matlab 仿真软件进行了仿真分析。仿真参数设置如下:电池端电压 $U_D=320\text{ V}$,电动机相电阻 $R=0.875\text{ }\Omega$,电动机折算电感 $(L-M)=18.5\text{ mH}$,电动机额定转速 $n_N=3\text{ }000\text{ r/min}$,电动机磁链 $\Psi=0.175\text{ Wb}$,电动机转动惯量 $J=0.18\text{ kg}\cdot\text{m}^2$,负载转矩 $T_L=4\text{ N}\cdot\text{m}$ 。实际当中电动机制动过程是一个非常快的暂态过程,需要事先进行设定。仿真工况设定:0.1 s 之前电动机处于正常电动运行状

态,在 0.1 s 时电动机发出制动指令。电动运行时 A 相电流与 A 相反电动势曲线如图 7 所示,发电运行时 A 相电流与 A 相反电动势曲线如图 8 所示,由电动变为发电运行时的电磁转矩曲线如图 9 所示,由电动变为发电运行时的转速曲线如图 10 所示。

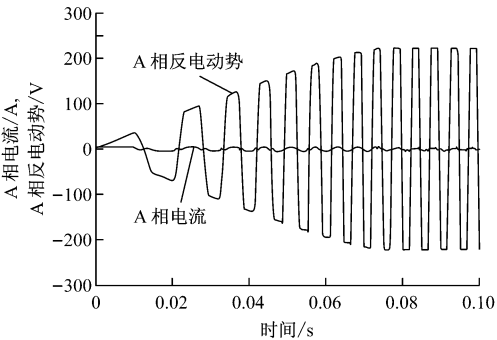


图 7 电动运行时 A 相电流与 A 相反电动势曲线

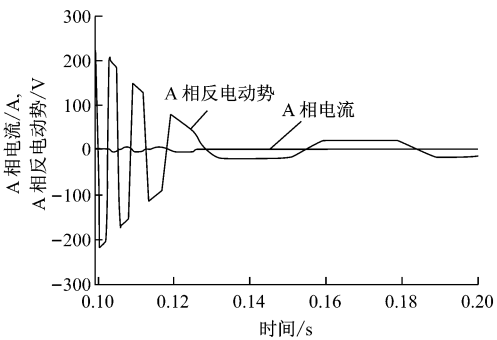


图 8 发电运行时 A 相电流与 A 相反电动势曲线

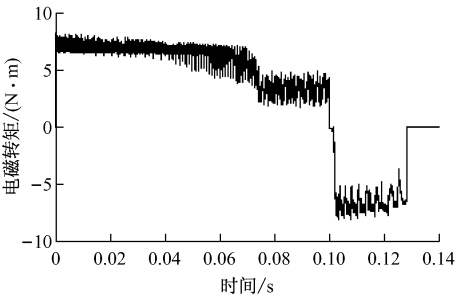


图 9 由电动变为发电运行时的电磁转矩曲线

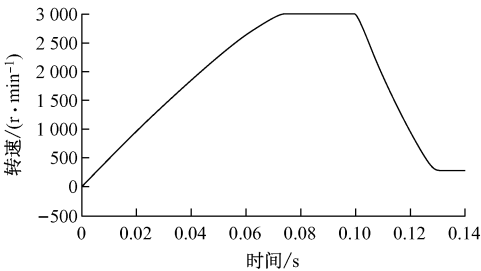


图 10 由电动变为发电运行时的转速曲线

由图 7—图 10 可看出,在 0.1 s 前后,电动机相反电动势与相电流方向发生了改变,说明电动机由第 1 象限(图 7)过渡到了第 2 象限(图 8),电磁转矩

由拖动变为了制动性质(图9),转速在制动转矩作用下迅速下降(图10)。图8中的制动电流比较平稳,说明逆变器实现了电动机转矩平稳可控,同时还能看出电动机的相反电动势与转速一样,在急速下降。

从图10可看出,转速从3 000 r/min开始制动,转速下降的时间比较快,大约降到300 r/min后变为了自由停车过程,此时速度很低,动能较少,已经不能再回馈能量;整车制动踏板开度设计时,将机械制动与电气制动的角度进行合理分配,转速低于300 r/min的能量由机械刹车完成,而将高速机械能由电动机制动转换为电能回收到电池。

5 结语

采用回馈制动策略能够回收车辆行走时产生的大部分动能,在保证系统安全的前提下,提高了车辆的能量利用率;当车辆的驱动电动机转速降到约300 r/min时,整车动能已经明显降低,此时能量回

收已经不再起作用。该结论对防爆电驱动无轨胶轮车回馈制动踏板的开度设计具有重要意义。

参考文献:

- [1] 宋小庆. 电动装甲车无刷直流电机驱动系统的回馈制动[J]. 微电机, 2001, 34(1): 27-30.
- [2] 刘慧博, 李朝阳. 无刷直流电动机积分反演模糊滑模控制[J]. 工矿自动化, 2014, 40(3): 64-69.
- [3] 胡邦南, 刘媛媛. 用择多函数实现反电动势滤波的无传感器无刷直流电动机的控制[J]. 工矿自动化, 2009, 35(6): 43-45.
- [4] 程伟, 徐国卿, 王晓东. 电动汽车用永磁无刷电机回馈制动技术研究[J]. 电气传动, 2005, 35(11): 15-17.
- [5] 黄斐梨, 王耀明. 电动汽车永磁无刷直流电机驱动系统低速能量回馈制动的研究[J]. 电工技术学报, 1995, 10(3): 28-31.
- [6] 孙立志, 陆永平, 邓召春. 永磁同步电动机回馈制动状态的分析与仿真[J]. 微特电机, 1997, 25(6): 8-10.