

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2014.02.005

PWM 调制方案对无刷直流电机电动汽车再生 ABS 的影响

赵国柱^{1a,1b,2}, 韩英^{1a,1b}, 魏民祥², 李玉芳²

(1. 南京农业大学 a. 工学院; b. 江苏省智能化农业装备重点实验室, 南京 210031;

2. 南京航空航天大学 能源与动力工程学院, 南京 210016)

摘要:为研究 PWM 调制方案对无刷直流电机电动汽车再生 ABS 的影响,在分析单、双管 PWM 调制方案下的无刷直流电机再生制动原理基础上,通过调节占空比的方法来防止再生制动时驱动轮抱死。建立了单轮车辆再生制动力学模型,设计了再生 ABS 双闭环控制系统,外环控制滑移率,内环控制制动电流。以系统在结冰路面上再生制动为例,对系统在单、双管 PWM 调制方案下的防抱死制动性能进行了仿真试验。结果表明:与单管调制相比,双管调制时系统的制动距离短,回收能量多。

关键词:电动汽车;再生制动;制动防抱死系统(ABS);无刷直流电机;PWM 调制方案

中图分类号:U469.72

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2014)02-031-06

Effect of the PWM modulation scheme on the regenerative anti-lock braking system of the electric vehicle driven by a permanent magnet brushless DC motor

ZHAO Guozhu^{1a,1b,2}, HAN Ying^{1a,1b}, WEI Minxiang², LI Yufang²

(1a. College of Engineering; b. Jiangsu Key Laboratory for Intelligent Agricultural Equipment, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210031, China; 2. College of Energy and Power Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: To study the effect of the PWM modulation scheme on the regenerative anti-lock braking system (RABS) of the EV driven by a permanent magnet brushless DC motor, based on the analysis of the principle of the regenerative braking of the brushless DC motor under a single and double switching PWM modulation scheme, respectively, a method to adjust the PWM duty cycle is proposed to prevent drive wheels from locking during regenerative braking. A regenerative braking dynamics model of a single wheel vehicle is established, and a double-loop control model of the RABS is designed. The outer loop controls the wheel slip ratio, and the inner loop controls motor braking current. As an example of the EV's braking on ice-covered road, a simulation test is conducted for the RABS under a single and double switching PWM modulation scheme respectively. The result shows that the RABS has a shorter braking distance and more energy recovery under a double switching PWM modulation than a single.

Key words: electric vehicles; regenerative braking; anti-lock braking system; permanent magnet brushless DC motor; PWM modulation scheme

收稿日期:2013-08-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51005113);江苏省农机局科研启动基金项目(Gxz10003)

作者简介:赵国柱(1968-),男,副教授,博士,主要从事电动汽车再生制动技术研究,(E-mail)zhaogz@njau.edu.cn。

电动汽车再生制动防抱死控制系统(即再生 ABS)是指驱动轮在进行再生制动时,通过对再生制动力的控制,在回收能量的同时防止驱动轮抱死的一种电磁制动系统。当电动汽车在冰雪等低附着系数路面上进行再生制动时,即使制动强度小,也极有可能使驱动轮抱死;对处在转向再生制动工况下的后驱型电动汽车,即使驱动轮不抱死,也会使其操纵稳定性严重降低。Shin-ichiro Sakai 等^[1]利用模型跟随控制法对再生 ABS 和液压 ABS 进行了对比分析,结果表明再生 ABS 比液压 ABS 的反应速度快,控制精度高;Yoichi Hori 等^[2]对再生 ABS 分别运用滑移率控制法和模型跟随控制法进行对比研究,仿真结果表明滑移率控制法的控制精度高;Khatun P 等^[3]研究了再生 ABS 的模糊控制性能;Tur, O 等^[4]基于 simplorer 仿真软件对比分析了再生 ABS 与液压 ABS 的制动性能,表明了再生 ABS 的反应速度快于液压 ABS;Min-Hung Hsiao 等^[5]利用蓄电池与超级电容器的串、并联组合,利用滑模控制建立了离散型再生 ABS 模型。Chunting Mi 等^[6]利用迭代学习控制法设计了再生 ABS 防滑控制器。陈庆樟、赵国柱等^[7-8]利用简化的电机模型建立了再生 ABS 滑模变结构控制模型。

无刷直流电机是电动汽车目前最适合的动力装置^[9]。PWM 调制方案有单、双管调制 2 种类型^[10]。不同的 PWM 调制方案对无刷直流电机电动汽车再生 ABS 的制动性能是否有影响,影响有多大,目前却鲜见有此方面的研究报道。文章以无刷直流电机电动汽车为研究对象,建立其单轮车辆动力学模型,通过仿真方法对比分析该型电动汽车再生 ABS 性能的差异,以期对该型车辆再生 ABS 的设计具有一定的工程指导意义。

1 无刷直流电机再生制动原理

1.1 单管 PWM 调制下的再生制动机理

无刷直流电机再生制动在单管 PWM 调制模式下,任何时刻只有一个功率开关管工作,如图 2 所示,在某个 60° 电角度期间,只有 VT2、VT4、VT6 3 个管中一个管有开关动作,其他管均关闭^[11]。由于每个 60° 电角度区间内,虽通电绕组与导通的功率管会随转子位置变化而依次轮换,但任何时刻均只有

2 组绕组通电,起作用的开关管也始终只有一个,而且电机的各种波形与电压方程式也均相同。因此,只需分析电机在一个 60° 电角度区间内的再生制动原理。当 VT4 闭合时,电流沿图 1 中路径①流动,该电流方向与电机驱动时(以下简称“电动时”)相反,故电磁力矩产生制动作用。此时,反电动势产生的电能除一部分变成回路的电阻热外,其余全部变成磁场能储存于回路绕组电感中,故称此阶段制动为蓄能制动。忽略 VT4、D6 的管压降,电压方程为

$$0 = E_a + i_a R + L_a \frac{di_a}{dt},$$

式中: E_a 为电机反电势; i_a 为电枢电流; R 为回路电阻; L_a 为回路电感。

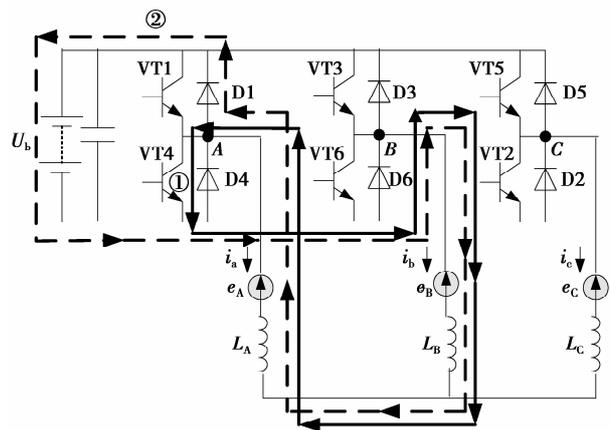


图 1 单管 PWM 调制时某 60° 电角度区间再生制动电流路径

当 VT4 截止时,电枢绕组电流不能突变,电流沿图 1 中路径②流动。该电流方向仍与电动时相反,故电磁力矩仍然对电机产生制动效果。此时反电动势产生的电能和 VT4 闭合期间储存于回路电感的磁场能,除部分变成回路的电阻热外,其余均回充到蓄电池中,故称此制动为回馈制动,忽略 D1、D6 的管压降,电压方程为

$$U_b = E_a + i_a R + L_a \frac{di_a}{dt}, \quad (2)$$

式中 U_b 为电源端电压。

1.2 双管调制下的再生制动机理

双管调制是指任何时刻有 2 个开关管同步工作。与单管调制一样,也只分析某个 60° 电角度内再生制动原理。调制方案如图 2 所示。

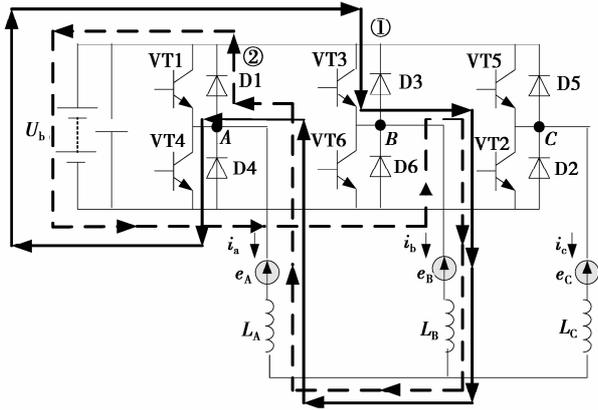


图2 双管PWM调制时某60°电角度区间电气制动电流路径

当VT3、VT4同时导通时,在电源与反电动势共同作用下,电流沿图2中路径①流动。该电流方向与电动时相反,电磁力矩对电机产生制动效果。此时从电源流出的电能以及反电动势产生的电能除一部分变成回路电阻热外,其余全部变成磁场能而储存于回路电感中。此时相当于电源反接,故称此制动为反接制动。忽略VT3、VT4的管压降,电压方程为

$$U_b = E_a + i_a R + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (3)$$

1.3 电机制动电流

设电机驱动时电枢电流流向为正方向,则制动时电枢电流 i_b 为负,即 $i_b = -i_a$ 。单管调制下,当电枢电流处于稳态时,在每个PWM周期 T 内,电枢电流在制动电流指令值上下波动,蓄能制动阶段与回馈制动阶段电流变化率的绝对值之比与每个阶段所占时间成反比,根据该关系,并考虑到制动电流的方向性有

$$i_b = \frac{E_a - (1-\alpha)U_b}{R} \quad (4)$$

同理,可得双管调制下稳态时电机制动电流为

$$i_b = \frac{(2\alpha-1)U_b + E_a}{R} \quad (5)$$

因此,再生ABS工作时,调节占空比 α ,即可调节电机制动力矩使驱动轮具有最佳滑移率。

2 单轮车辆再生制动动力学建模

以单轮车辆模型为例,忽略制动时载荷转移,其受力分析如图3所示,再生制动动力学模型为

$$m \frac{dv}{dt} = F_{xb} - F_w - F_f, \quad (6)$$

$$J_w \dot{\omega}_w = T_{ew} - F_{xb} r - T_f, \quad (7)$$

式中: m 为单轮车辆质量; v 为车辆纵向速度; F_{xb} 为地面制动力; F_w 为空气阻力; F_f 为滚动阻力; J_w 为车轮转动惯量; ω_w 为车轮角速度; T_{ew} 为驱动轮受到

的再生制动力矩; r 为车轮半径; T_f 为滚动阻力偶。

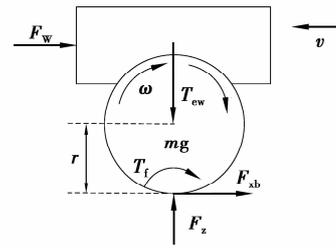


图3 单轮车辆再生制动时的受力分析

地面制动力为

$$F_{xb} = mg\mu(\lambda), \quad (8)$$

式中: g 为重力加速度; $\mu(\lambda)$ 为附着系数; λ 为车轮滑移率。

空气阻力为

$$F_w = 0.5C_D A \rho v^2, \quad (9)$$

式中: C_D 为空气阻力系数; A 为迎风面积; ρ 为空气密度。

滚动阻力为

$$F_f = \frac{T_f}{r} = mgf_r, \quad (10)$$

式中 f_r 为滚动阻力系数。

驱动轮受到的再生制动力矩为

$$T_{ew} = T_e i_g / 2, \quad (11)$$

式中: i_g 为轮边减速器传动比; T_e 为电机再生制动力矩,其大小为

$$T_e = k_t i_b, \quad (12)$$

式中 k_t 为电机电矩常数。

转速传动关系为

$$\omega_w = \frac{\omega_m}{i_g},$$

式中 ω_m 为电机机械角速度。

将式(8)至式(13)代入方程(7)与(8)整理得

$$\begin{cases} \frac{dv}{dt} = g\mu(\lambda) - \frac{\rho C_D A v^2}{2m} - g f_r, \\ \frac{d\omega_w}{dt} = \frac{i_g k_t i_b}{2J_w} - \frac{mg f_r}{J_w} - \frac{mgr}{J_w} \mu(\lambda). \end{cases} \quad (14)$$

设 $x_1 = v/r$, $x_2 = \omega_w$, $f_1 = g/r$, $f_2 = \rho C_D A r / (2m)$, $f_3 = g f_r / r$, $f_4 = i_g k_t / (2J_w)$, $f_5 = mg f_r / J_w$, $f_6 = mgr / J_w$, $u = i_b$ 。则式(14)变为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1 \mu(\lambda) - f_2 x_1^2 - f_3, \\ \dot{x}_2 = -f_5 - f_6 \mu(\lambda) + f_4 u. \end{cases} \quad (15)$$

这里轮胎模型为^[12]

$$\mu(\lambda) = \frac{2\mu_p \lambda_p \lambda}{(\lambda_p^2 + \lambda^2)}, \quad (16)$$

式中: μ_p 为峰值附着系数;结冰路面 $\mu_p = -0.1$; λ_p 为 μ_p 对应的滑移率;文中 $\lambda_p = -20\%$,该模型在

$-0.3 \leq \lambda \leq 0$ 时较精确。

3 再生 ABS 控制器设计

3.1 外环控制器

制动时滑移率 λ 定义为

$$\lambda = \frac{\omega_w - \omega_v}{\omega_v}, \quad (17)$$

式中 $\omega_v = v/r$ 。对式(17)求一阶导数,并把式(15)代入,得关于滑移率的动力学方程

$$\dot{\lambda} = y + bu, \quad (18)$$

其中: $y = -\frac{f_5 + f_6 \mu(\lambda)}{x_1} - (1 + \lambda) \frac{f_1 \mu(\lambda) - f_2 x_1^2 - f_3}{x_1}$; $b = \frac{f_4}{x_1}$; $u = i_b$ 。

由式(18)知滑移率动力学模型是一个一阶单输入非线性系统。对于滑移率的控制,简单而有效的控制方法是滑动模式控制,定义切换函数为

$$s = \lambda - \lambda_p, \quad (19)$$

式中 λ_p 为目标滑移率。对式(19)求导,并令 $\dot{s} = 0$, 得等效控制量为^[13]

$$u_{eq} = -\frac{\hat{y}}{\hat{b}}, \quad (20)$$

式中: \hat{y} 为 y 的估计值; \hat{b} 为 b 的估计值。

系统应满足达到条件

$$\frac{1}{2} \frac{d}{dt} s^2 \leq -\eta |s|, \eta > 0, \quad (21)$$

式中 η 为设计参数。为此,在等效控制基础上添加一个不确定控制量,即

$$u = \hat{b}^{-1} [\hat{u} - k \operatorname{sgn}(s)], \quad (22)$$

式中 $\hat{u} = -\hat{y}$, 而 k 值应满足

$$k \geq \beta(F + \eta) + (\beta - 1) |\hat{u}|, \quad (23)$$

式中 $\beta = \sqrt{\frac{b_{\max}}{b_{\min}}}$, F 为 y 与 \hat{y} 的最大估计误差。为防止式(23)的开关控制项引起系统抖振,在切换面附近引入一个厚度为 φ 的狭窄边界层来进行平滑,即用饱和函数 $\operatorname{sat}(s/\varphi)$ 代替式中的符号函数

$$\operatorname{sat}(s/\varphi) = \begin{cases} \frac{s}{\varphi} & |s| < \varphi, \\ \operatorname{sgn}(s) & |s| \geq \varphi. \end{cases} \quad (24)$$

最后,滑模控制器输出量含有大量的开关信号,其结果需经低通滤波才能应用。

3.2 内环控制器

为使电枢电流跟踪滑移率控制器输出的指令电流,当电机转速在基速以下时,电流调节器采用滞环比较方式的 PWM 电流跟踪控制可获得最佳电机性能^[14]。下面以电机某一相电流的控制为例说明其

控制原理^[15],实际电流 i 与指令电流 i^* 比较后,它们的偏差输入环宽为 h 的滞环比较器,如图 4 左图所示,当 $i > i^* + 0.5h$ 后,滞环比较器输出负电平,如图 4 右图所示,使功率开关 VT1 关断,VT4 导通, i 减小。当 $i \leq i^*$ 时,滞环比较器仍保持负电平输出,VT1 仍关断, i 继续减小,一直到 $i < i^* - 0.5h$ 时,滞环比较器翻转,输出正电平信号,使 VT1 导通,VT4 关断, i 又开始增大,直到增大到带宽的上限为止,如此循环,使得实际电流跟踪指令电流信号呈锯齿状变化。

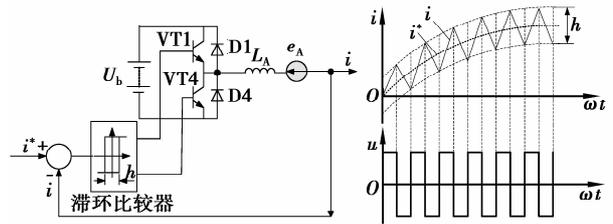


图 4 电流滞环跟踪控制原理图

4 仿真结果与分析

以图 3 所示单轮车辆模型在结冰路面上进行直线再生制动为例,对该车再生 ABS 分别在单、双管调制下的性能进行对比分析。相关参数如表 1 所示。

表 1 单轮车辆仿真参数

	类型	无刷直流轮毂电机
电机	额定电压 U_{Nm}/V	300
	额定电流 i_{Na}/A	250
	回路电感 L_a/mH	10
	回路电阻 R/Ω	0.099
	转矩系数 $k_t/(Nm \cdot A^{-1})$	1.086
	电势系数 $k_e/(Vs \cdot \text{rad}^{-1})$	1.086
电池组	额定容量 C/Ah	25
	额定电压 U_{Nb}/V	300
车辆模型	单轮车辆质量 m/kg	425
	车轮惯量 J_w/kgm^2	0.5
	迎风面积 A/m^2	3.1
	风阻系数 C_D	0.3
	车轮半径 r/m	0.325
	空气密度 ρ/Ns^2m^{-4}	1.225 8
	滚阻阻力系数 f_r	0.01
	轮边减速器速比 i_g	10
	初速度 $v_0/(km \cdot h^{-1})$	30

仿真所用电池模型为 Matlab/SimPower System 中铅酸蓄电池模型,设定其初始 SOC 为 0.6。此外,再生 ABS 与传统 ABS 一样,只在车速大于 5 km/h 时才起作用,当车速小于该值后,再生 ABS 停止工作,此后用常规机械制动系统停车,且车速很小后,为尽快停车,必须使车轮制动抱死。由于再生 ABS 制动时,充电电流持续时间较短,且制动之前,电池是处于放电状态,对于铅酸蓄电池,在最初的 5 min 内可用 5C 甚至 8C 的大电流充电而不会影响电池的使用寿命^[16]。仿真结果表明:尽管由于模型的不确定性而存在建模误差,但从图 5 可知 2 种调制方式下车辆滑移率均能稳定在目标滑移率附近,说明系统具有足够的稳定性。同时,图 5 表明双管调制时,再生 ABS 的控制品质比单管调制时的好,正因如此,对应的制动距离也短于单管调制时的制动距离,如图 6 所示。

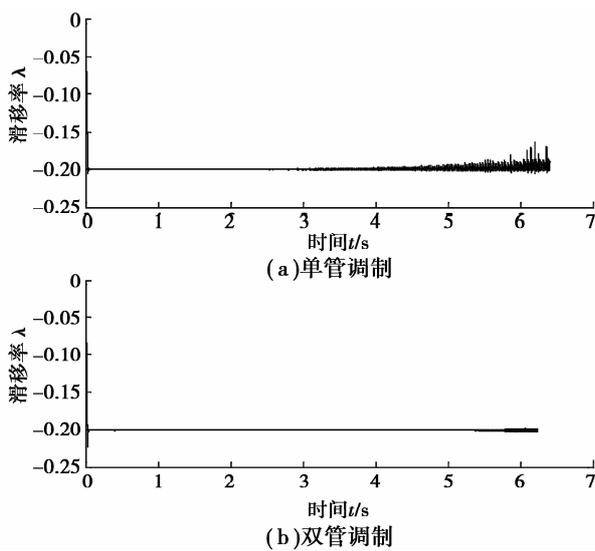


图 5 滑移率

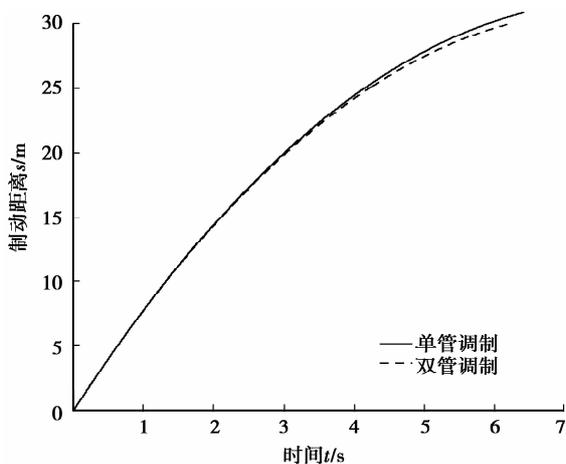


图 6 制动距离

双管调制下控制品质好的原因是由于双管调制时,电机工作于反接制动与回馈制动的交替,反接制动时,电流从蓄电池流出,如图 7(a)所示,与电机反电动势产生的发电电流叠加,并一起转化为回路电感的磁场能,增大了回馈制动阶段电枢电流,进而使回馈制动阶段电磁力矩增大,并且随着电机速度的下降,电机反电动势的降低,蓄电池端电压的上升,回馈制动充电负载增加,系统自动增大占空比,如图 7(d)所示,将延长反接制动的的时间,从而提高一个 PWM 周期内的平均电磁力矩以满足外环的请求,因而控制品质高。而在单管调制下,电机工作于蓄能制动与回馈制动的交替,电源只接受充电,如图 7(b)所示,其蓄能制动阶段储存于回路电感的磁场能只来自于电机反电动势,使回馈制动阶段的电磁力矩小于双管调制时对应阶段的电磁力矩,虽然系统也自动增大占空比来延长蓄能制动的的时间,如图 7(d)所示,以满足外环对制动力矩的请求,但随着车速的降低,反电动势越来越低,蓄电池端电压却越来越高,因而产生的发电电流也就越来越小,逐渐满足不了外环的请求,因此车速越低,滑移率控制品质越差,如图 5 所示。值得注意的是,双管调制时,虽然反接制动阶段电流流出蓄电池,但母线电流每隔 0.1 s 的平均值为负值,如图 7(c)所示,说明其电气制动性质宏观上仍是再生制动。

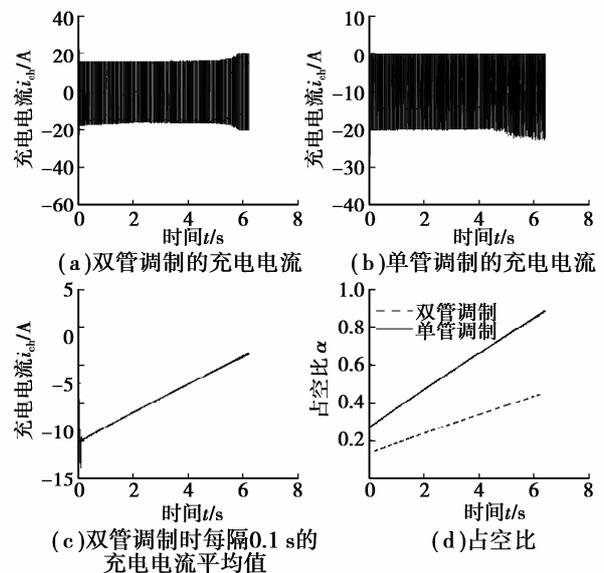


图 7 充电电流与占空比

反接制动时从电源流出的电能起到增强电机回收制动能的作用,而单管调制时,随反电势的降低与电池端电压的上升,为满足外环制动力矩的请求,蓄能制动时间越来越长,使消耗于回路电阻的热能增

加,从而使得整个过程回收的能量小于双管调制,如图 8 所示。

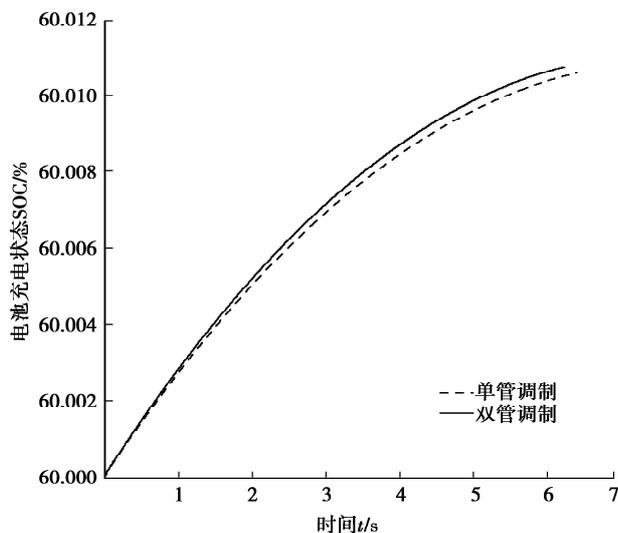


图 8 电池 SOC

该车再生 ABS 分别在单、双管调制方案下的制动距离与回馈能量如表 2 所示。

表 2 单、双调制方案下再生 ABS 性能的定量差异

调制方式	制动距离 S/m	回馈动能 E/KJ
单管调制	30.877	17.703
双管调制	30.063	18.005

从表 2 中可看出双管调制时不但能量回馈比单管调制时多了 0.202 KJ,即回收量提高 1.7%;更重要的是制动距离比单管调制时短了 0.814 m,即制动距离缩短了 2.6%,这对于提高该型电动汽车的制动安全性具有较大意义。

5 结 论

1) PWM 调制方案对于无刷直流电机电动汽车再生 ABS 的制动性能有一定的影响。

2) 与单管 PWM 的调制相比,双管 PWM 调制时,无刷直流电机电动汽车再生 ABS 不仅回收能量多,而且制动距离缩短效果明显。

参考文献:

[1] Sakai S, Sado H, Hori Y. Anti-skid control with motor in electric vehicle [C] // Proceedings of the 6th International Workshop on Advanced Motion Control, March 30-April 01, 2000, Nagoya, Japan. Piscataway:

IEEE Press, 2000: 317- 322.

- [2] Horl Y. Future vehicle driven by electricity and control research on four wheel motored "UOT electric march II" [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(5): 954-962.
- [3] Khatun P, Bingham C M, Schofield N, et al. An experimental laboratory bench setup to study electric vehicle antilock braking/traction systems and their control [C] // Proceedings of the IEEE 56th Vehicular Technology Conference, 2002, Birmingham, Alabama. Piscataway: IEEE Press, 2002, 3: 1490-1494.
- [4] Tur O, Ustun O, Tuncay R N. An introduction to regenerative braking of electric vehicles as anti-lock braking system [C] // Proceedings of IEEE Intelligent Vehicles Symposium, June 13-15, 2007, Istanbul, Turkey. Piscataway: IEEE Press, 2007: 944-948.
- [5] Hsiao M, Lin C. Antilock braking control of electric vehicles with electric brake [C] // Proceedings of the SAE 2005 World Congress & Exhibition, April 11-14, 2005, Detroit, Michigan, USA, [S. 1] SAE Technical Papers, 2005: 2005-01-1581.
- [6] Mi C T, Lin H, Zhang Y. Iterative learning control of antilock braking of electric and hybrid vehicles [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2005, 54(2): 486-494.
- [7] 陈庆樟, 何仁, 赵连生. 汽车能量再生制动防抱死集成控制方法研究 [J]. 中国机械工程, 2009, 20(02): 245-248.
- CHEN Qingzhang, HE Ren, ZHAO Liansheng. Research on vehicle anti-lock regenerative braking integrated control method [J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(2): 245-248.
- [8] 赵国柱, 魏民祥, 杨正林. 电动城市客车再生 ABS 系统的建模与仿真 [J]. 南京航空航天大学学报, 2010, 42(2): 256-261.
- ZHAO Guozhu, WEI Minxiang, YANG Zhenglin. Modeling and simulation of regenerative braking of electric bus in antilock braking system [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2010, 42(2): 256-261.
- [9] Ehsani M, Gao Y M, Gay S. Characterization of electric motor drives for traction applications [C] // Proceedings of the 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, November 2-6, 2003, Roanoke, Virginia, USA. Piscataway: IEEE Press, 2003, 1: 891-896.

- PAN Wulue, XU Zheng, ZHANG Jing, et al. Dissipation analysis of VSC-HVDC converter [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(21): 7-14.
- [18] 胡建辉, 李锦庚, 邹继斌, 等. 变频器中的 IGBT 模块损耗计算及散热系统设计 [J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 159-163.
- HU Jianhui, LI Jingeng, ZOU Jibin, et al. Losses calculation of IGBT module and heat dissipation system design of inverters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(3): 159-163.
- [19] Luo Z H, Ahn H Y, Mahmoud A. A thermal model for insulated gate bipolar transistor module [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(4): 902-907.
- [20] 陈明, 胡安, 唐勇, 等. 绝缘栅双极型晶体管传热模型建模分析 [J]. 高电压技术, 2011, 37(2): 453-459.
- CHEN Ming, HU An, TANG Yong, et al. Modeling analysis of IGBT thermal model [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(2): 453-459.
- [21] Fuji Semiconductor GmbH. 2MBI150U4H-170 product specification datasheet [R]. Japan, 2008.
- (编辑 侯 湘)
-
- (上接第 36 页)
- [10] 胡庆波, 郑继文, 吕征宇. 混合动力中无刷直流电机反接制动 PWM 调制方式的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(30): 87-91.
- HU Qingbo, ZHENG Jiwen, LÜ Zhengyu. Study on PWM strategy for braking of brushless DC motor in hybrid electric vehicle [J]. Proceedings of the Chinese Society Electrical Engineering, 2007, 27(30): 87-91.
- [11] 黄斐梨, 王耀明, 姜新建, 等. 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(3): 28-31, 36.
- HUANG Feili, WANG Yaoming, JIANG Xinjian, et al. Study on regenerative braking of permanent magnet brushless DC motor drive system at Low speed for electric vehieles [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1995(3): 28-31, 36.
- [12] Unsal C, Kachroo P. Sliding mode measurement feedback control for antilock braking systems [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 1999, 7(2): 271-281.
- [13] Slotine J E, Li W. 应用非线性控制 [M]. 程代展, 译. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [14] Chan C C, Chau K T, Jiang J Z, et al. Novel permanent magnet motor drives for electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1996, 43(2): 331-339.
- [15] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术 [M]. 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2008: 162-163.
- [16] Valeriotte E M, Chang T G, Joehim D M. Fast charging of lead-acid batteries [C] // Proceedings of 9th Annual Battery Conference on Applications and Advances, January, 11-13, 1994, Long Beach, CA, USA. Piscataway: IEEE Press, 1994: 33-38.
- (编辑 詹燕平)