

永磁同步电机制动能量回收系统的控制方法

卢智锋¹,李 军²,周世琼³,康龙云⁴

(1. 深圳市特种设备安全检验研究院,广东 深圳 518029;

2. 中山职业技术学院 机械工程系,广东 中山 528404;3. 深圳信息职业技术学院

交通与环境学院,广东 深圳 518029;4. 华南理工大学 电力学院,广东 广州 510641)

摘要: 在矢量控制的铅酸蓄电池-永磁同步电机系统的基础上,设计制动能量回收系统。通过设定 $-i_q$,控制采用正弦脉冲宽度调制(SPWM)的三相全桥逆变器,将永磁同步电机在制动时产生的交流电流整流为直流电流,对铅酸蓄电池进行充电,实现制动能量的回收。最后,通过搭载了该系统的电动车对制动能量系统进行了试验,分析制动电流与行驶速度、制动时间、电池放电深度等的关系。试验结果表明采用该系统后可以有效地增加持续里程。

关键词: 永磁同步电机; 能量回收; 矢量控制; 正弦脉冲宽度调制; 铅酸蓄电池; 同步电机; 脉冲宽度调制; 控制

中图分类号: TM 852

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.02.023

0 引言

能源是社会长期稳定发展的关键因素之一。随着社会的不断进步,对能源的需求量也日益增大,使得能源枯竭日益严重。能源危机是当今各国所共同面临也是必须解决的难题之一。如何有效地解决能源枯竭的问题,各国已经展开了广泛而深入的探讨,普遍认为应提高能源的利用率和开发新的能源。当然,提高能源的利用率并不能阻止能源的枯竭,但可起到延缓作用,从技术上缓解能源紧张的问题。提高能源的利用率也即节能技术,可以降低能源的使用成本,与广大能源消耗者的切身利益密切相关。

收稿日期:2012-04-19;修回日期:2012-12-03
基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)(2007AA05Z-244)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China(863 Program)(2007AA-05Z244)

提高能源利用率的方法很多,能量回收是其中之一。能量回收是通过回收系统中剩余的(多余的)或制动时产生的能量,以达到节约能源的目的。

随着电能大规模的应用,全球大多数电能都是通过电动机实现能量的转换。目前,永磁电机驱动系统已经大量使用,而且这种情况将会持续下去^[1]。电动机在制动过程中,特别是在频繁制动的场合,如日常使用的电梯、电动车等的电机系统,往往会浪费大量的能源。通过回收制动能量产生电磁制动转矩代替传统的机械制动,实现减速,是非常有必要的^[2-5]。对制动能量进行回收,一方面可以节约能源,另一方面也可以作为电机的辅助制动,更好地保护制动器,并使制动更加平稳简单。

现在已有大量研究通过 DC/DC 逆变器实现制动能量回收的文献^[6-10]。本文通过 AC/DC 逆变器实现制动能量^[11-13]回收,采用基于矢量控制的铅酸蓄电

PMSM position servo control based on wavelet neural network adaptive backstepping

LIU Da^{1,2}, LI Muguo²

(1. Faculty of Electronic Information and Electrical Engineering, Dalian University of Technology,

Dalian 116023, China; 2. The State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering,

Dalian University of Technology, Dalian 116023, China)

Abstract: An adaptive backstepping control scheme based on WNN(Wavelet Neural Network) is proposed for PMSM(Permanent Magnetic Synchronous Motor) control system, which, being robust to all kinds of uncertainties, evaluates and compensates the nonlinear uncertainty existing in the system, and adaptively adjusts the outputs of backstepping controller to obtain good position tracking performance. The overall system stability is ensured by applying Lyapunov theory in the design. The effectiveness of the proposed control scheme is verified by the theoretical analysis and simulative comparisons with PI controller and traditional backstepping controller.

Key words: synchronous motors; neural networks; backstepping control; robustness; position servo system

池-永磁同步电机系统,通过制定相应的回收控制策略,利用逆变器对电动机制动时产生的交流电流进行整流,对蓄电池进行充电。本文首先介绍了制动能量回收系统的构成及系统的控制技术——电机系统采用矢量控制技术,逆变器采用正弦脉冲宽度调制 (SPWM) 技术;然后对能量回收系统的影响因素进行分析,制定控制策略;最后给出相应试验测试数据并进行分析。

1 能量回收系统构成

永磁同步电机常采用磁场定向控制策略^[14-15]。图 1(a)和图 1(b)分别为系统在驱动和制动 2 种状态下的能量流向图。直流电流以蓄电池对外做功为正,蓄电池吸收能量为负,即图 1(a)中直流电流为正,图 1(b)中直流电流为负。此外,从图 1 中可以看出,系统在驱动和制动 2 个过程中,都使用了逆变器和位置传感器。逆变器的作用为:驱动时通过逆变器驱动模块控制功率器件的导通和关断,将直流电流逆变为交流电流 (DC/AC),向电动机提供能量;制动时电动机作为发电机产生交流电流,通过逆变器整流 (AC/DC) 后,向蓄电池输入直流电流,实现制动能量回收。位置传感器的作用是检测永磁电机磁极位置的实时信号。

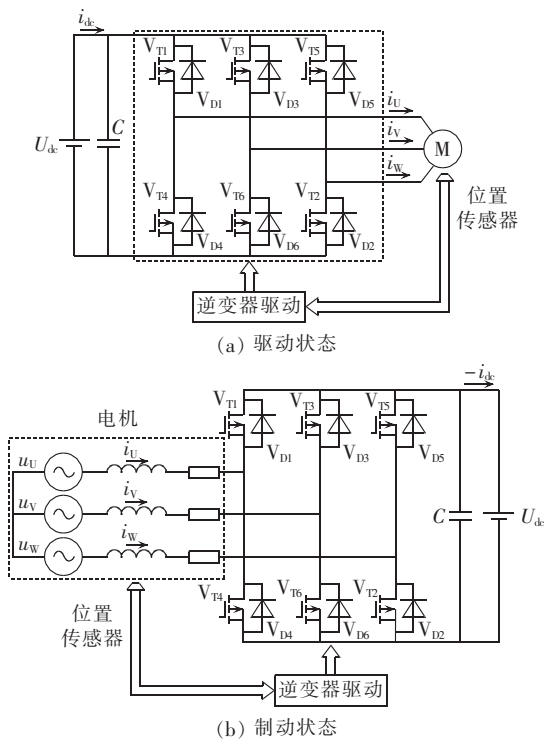


图 1 电机控制系统框图

Fig.1 Block diagram of motor control system

1.1 永磁电机的矢量控制

永磁电机的矢量控制原理和交流电机的类似。交流电机矢量控制的思想是将三相定子坐标转换为

两相定子坐标,然后再转换为同步旋转坐标。产生相同的旋转磁场的情况下,同步旋转坐标系中电流为直流,即实现了交流电机的解耦^[16]。坐标变换和逆变换分别如式 (1)、(2) 所示:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \\ -\sin \omega t & -\sin(\omega t - 2\pi/3) & -\sin(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_U \\ i_V \\ i_W \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_U \\ i_V \\ i_W \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \omega t & -\sin \omega t \\ \cos(\omega t - 2\pi/3) & -\sin(\omega t - 2\pi/3) \\ \cos(\omega t + 2\pi/3) & -\sin(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

由于永磁电机是采用永磁体作为励磁磁场的,空间矢量关系如图 2 所示,因此不需要向电机提供励磁电流,即 d 轴电流为 0,通常称之为 $i_d=0$ 的控制,但其矢量控制需要时刻检测磁极所在的位置。通过位置传感器检测磁极的位置信号,然后进行空间坐标变换,可得到直、交轴 (d, q 轴) 的电流,变换和逆变换公式分别如式 (3)、(4) 所示:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \times \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r - 2\pi/3) & \cos(\theta_r + 2\pi/3) \\ -\sin \theta_r & -\sin(\theta_r - 2\pi/3) & -\sin(\theta_r + 2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_U \\ i_V \\ i_W \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_U \\ i_V \\ i_W \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ \cos(\theta_r - 2\pi/3) & -\sin(\theta_r - 2\pi/3) \\ \cos(\theta_r + 2\pi/3) & -\sin(\theta_r + 2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ i_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中, $\theta_r = \omega t + \theta$, θ 为 $t=0$ 时刻 d 轴和 A 轴的夹角。

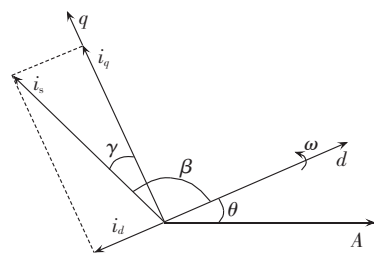


图 2 dq 轴的空间矢量

Fig.2 Space vector of dq axis

从式 (3) 和 (4) 中可以看出 q 轴的电流是电机控制的关键,只要通过控制 i_q 的大小即可制定三相电流的幅值,而通过位置传感器可以获得三相电流的相角关系,因此整个控制系统可以简化为只要实施对 i_q 的控制即可实现电机转速以及转矩的控制。

1.2 SPWM 技术

本电机系统的逆变器采用三相全桥电路,如图 3 所示,通过 SPWM 技术控制逆变器,使其按设定值进行输出/输入。SPWM 采用标准正弦作为 PWM 的调制波,是目前应用最为广泛的逆变控制技术^[17]。

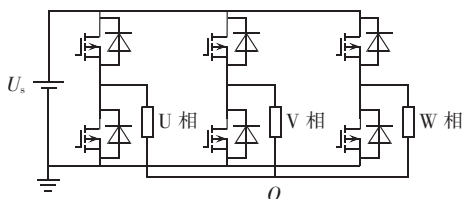


图 3 三相全桥逆变电路

Fig.3 Circuit of three-phase full-bridge inverter

通过霍尔位置传感器检测获得磁极的实时位置,并设定预期的三相电流作为调制波,以标准的三角波作为载波,制定功率器件的通断状态,使逆变器按预期的目标工作。SPWM 的工作原理如图 4 所示。调制波处于载波上方时,同一桥上的上半桥功率器件导通而处于下半桥的功率器件关断;调制波处于载波下方时,同一桥上的上半桥功率器件关断而下半桥功率器件导通。因此,在同一载波中输入三相正弦的调制波,可以控制三相全桥逆变器功率器件的导通与关断,从而可输出类似调制波的三相电流波形。三相电流可由式(4)计算得到。

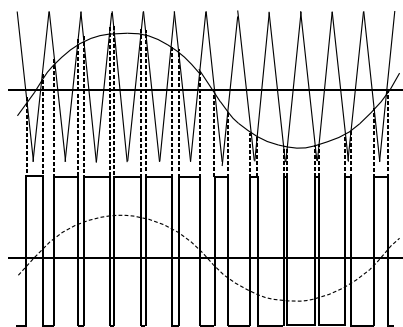


图 4 SPWM 工作原理

Fig.4 Schematic diagram of SPWM

2 能量的回收

由图 1(a)可见,电机系统的能量是通过蓄电池到逆变器再到永磁电机。电机处于制动状态时,如何按图 1(b)所示控制逆变器进行整流,使能量从永磁电机通过逆变器(充电器)回收蓄到蓄电池是本文重点。

2.1 能量回收的控制

在驱动过程中,矢量控制是通过设定 i_q 的参考值控制功率器件,从而输出实际的三相电流,而制动时能量的流向是驱动过程的反方向。因此,制动时可采取类似于驱动的控制策略:设定参考值 $-i_q$,根据矢量控制原理得到三相电流的参考值,以其作为 SPWM 的调制波控制功率器件的导通与关断,最后向蓄电池输出实际的直流电流,实现对蓄电池的充电。制动过程中的三相电流参考值可以通过式(5)获得。

$$\begin{bmatrix} i_U \\ i_V \\ i_W \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ -i_q \end{bmatrix} \quad (5)$$

2.2 影响 $-i_q$ 的因素

为了避免混淆,下文以 $|-i_q|$ 表示制动过程中 q 轴电流的大小。制动过程中,影响 $|-i_q|$ 的主要因素如下。

a. 制动减速度。引入制动能量回收系统后,制动的实施(系统自身的阻力除外)由机械制动和电磁制动组成。设定的 $|-i_q|$ 过大,则电磁制动增大而机械制动作用不变,制动的减速度也相应增大,易出现急刹车的情况,降低电机系统的舒适性。

b. 蓄电池充电特性。充电时,应尽量避免因充电电流过大或充电时间过长而损坏电池。在实际的制动过程中由于充电时间通常较短,因此主要考虑充电电流的大小对电池的影响。

c. 逆变器在充电过程中的功耗。电机的制动能量通过逆变器对电池充电,如果设定的 $|-i_q|$ 偏小,产生的制动能量不足以抵消逆变器的功耗,不但起不到充电的作用,还增加了逆变器的工作负荷,影响逆变器的寿命。

2.3 $|-i_q|$ 的设定

根据上述对影响 $|-i_q|$ 的因素分析和制动时具有的动能 $E = \frac{1}{2}mv^2$,系统在不同的行驶速度下设定不同的 $|-i_q|$ 值,实行制动能量回收。 i_q 与电动车行驶速度 v 的关系如图 5 所示。

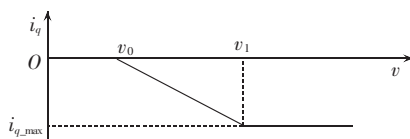


图 5 i_q 与行驶速度 v 的关系

Fig.5 Relationship between i_q and v

$-i_q$ 计算公式见式(6):

$$-i_q = \begin{cases} 0 & v \leq v_0 \\ -\frac{v-v_0}{v_1-v_0} i_{q_max} & v_0 < v < v_1 \\ -i_{q_max} & v \geq v_1 \end{cases} \quad (6)$$

为了避免电流的突变,回收系统引入制动时间 t 对 $|-i_q|$ 的控制,在制动的初始时刻 $|-i_q|$ 以一定的斜率增大;当制动时间 $t \geq t_0$ 时, $|-i_q|$ 才达到其最大值,如图 6 所示。

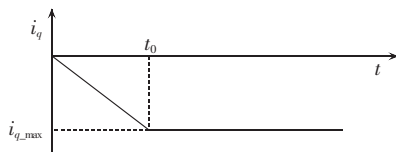


图 6 i_q 与制动时间 t 的关系

Fig.6 Relationship between i_q and t

2.4 影响回收量的其他因素

制动能量的回收量是能量回收系统的重要指

标,它反映了系统的实际价值以及存在的意义。除了制动次数和系统自身设定外,还有其他影响因素。

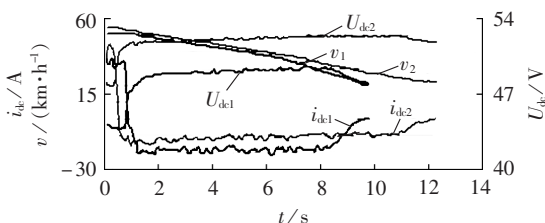
a. 制动紧急程度。不同的制动程度回收的制动量不同。制动紧急程度一般分为轻微制动、中度制动、紧急制动 3 种。3 种情况的机械制动的的作用程度不同,使得制动时间不同。回收量 $Q = \int -i_{dk} dt$, 则电磁制动力度不变的条件下,制动时间越长,回收得到的能量越多。

b. 蓄电池的放电深度,主要表现为电池侧的电压变化。在相同的速度 v 下实施制动(机械制动作用相同时),电动机产生的等效反电动势 U_0 相等。忽略电枢的自感 L ,逆变器的输出侧电压 $U_{out} = U_0 - U_n - i_{dk} r_m$, 蓄电池侧电压 $U_{in} = U_{dk} + i_{dk} r_i$ 。因为 $U_{out} = U_{in}$, 所以 $i_{dk} = (U_0 - U_n - U_{dk}) / (r_m + r_i)$ 。其中, U_n 为逆变器压降; r_m 为等效的电枢绕组电阻; r_i 为蓄电池内阻; i_{dk} 为回收的直流电流值。因此,当 U_{dk} 较大时,回收的直流电流值 i_{dk} 较小,从而在相同的制动时间内回收量也较少。

3 试验及结果分析

以搭载了该铅酸蓄电池和永磁同步电机的二轮电动车作路面的行驶试验。永磁电机额定电压为 48 V,额定功率为 2.2 kW,最高转速达 1000 r/min;采用的动力电池为铅酸蓄电池,额定电压为 48 V,总容量为 48 A·h;数据的采样频率为 10 Hz。

图 7 为部分能量回收试验的结果。图 7(a)是制动时电动车行驶速度与直流电流、电压的对应关系。图 7(b)是在相同的机械制动作用下,采用不同回收电流(14.4 A 和 19.2 A)与制动时间对应关系,采用 19.2 A(即 i_{dk1})回收电流时,速度下降更快,制动时间更短。图 7(c)是相同的机械制动作用下,不同放电深度时完成一次制动能量回收时的能量回收量的对比。分别计算 2 次制动的回收量,放电深度大



(c) 放电深度与回收量关系

图 7 实验结果

Fig.7 Experimental results

即蓄电池电压较低(U_{dk1})时,回收量为 39.96 mA·h;放电深度小即蓄电池电压较高(U_{dk2})时,回收量为 32.45 mA·h。

在相同路段、相同制动次数及电池满充一次放电的情况下,进行制动能量不回收和回收行驶试验。不回收时,放电量为 31.53 A·h,放电深度为 65.7%,持续里程为 42.36 km;回收时,回收系统设定以 19.2 A 作为最大可回收的直流电流。整个过程放电量为 33.29 A·h,制动能量回收为 -2.59 A·h,占放电量的 7.8%,持续里程为 45.20 km,持续里程增加了 2.84 km。

4 结论

根据试验的结果可以得出:

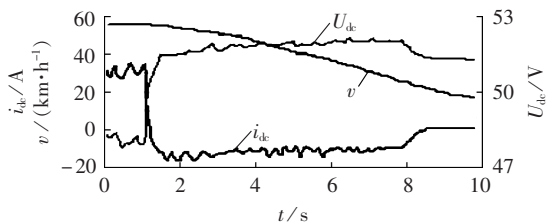
a. 采用 $-i_q$ 控制逆变器整流实行制动能量回收的控制策略,方法简单有效,具有很好的实用价值;

b. 根据制停距离和电池充电特性,设计出合适的回收电流,回收制动的能量;

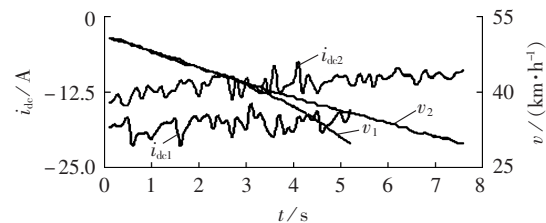
c. 根据电池放电深度对制动能量回收量的影响,可设定不同的制动策略,在不同的放电深度下调节电磁制动在制动过程中所占的比例。

参考文献:

- [1] KINJO T, SENJYU T, URASAKI N, et al. Output levelling of wind power generation system by EDLC energy storage[C]//The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Busan, Korea; IEEE, 2004; 3088-3093.
- [2] KAWAGUCHI K. Flywheel storage system for hybrid vehicles [J]. Railway Energy Technology, 2004, 61: 8-11.
- [3] YANG Y P, HU T H. A new energy management system of directly-driven electric vehicle with electronic gearshift and regenerative braking[C]//American Control Conference 2007. ACC'07. [S.l.]: IEEE, 2007; 4419-4424.
- [4] NOMURA H, MORIKI H. Fundamental research on braking system using control current source[C]//IEE Japan Natl Conf. [S.l.]: IEE, 2002; 4-217.
- [5] CIKANEK S R, BAILEY K E. Regenerative braking system for a hybrid electric vehicle[C]//American Control Conference 2002. ACC'02. [S.l.]: IEEE, 2002; 3129-3134.
- [6] DIXON J W, ORTLIZAR M E. Ultra-capacitors DC-DC converters in regenerative braking system[J]. IEEE Aerosp Electron Syst Mag, 2002, 17(8): 16-21.



(a) 速度与直流电流、电压



(b) 不同的 i_{dk} 对应的制动时间 t

- [7] MORENO J, ORTUZAR M E, DIXON J W. Energy-management system for a hybrid vehicle using ultra-capacitors and neural networks[J]. IEEE Trans Ind Electron, 2006, 53(3): 614-623.
- [8] MARCHESONI M, VACCA C. New DC-DC converter for energy storage system interfacing in fuel cell hybrid electric vehicles [J]. IEEE Trans Power Electron, 2007, 22(1): 301-308.
- [9] TAKAHASHI K, SEKI H, TADAKUMA S. Safety driving control for electric power assisted wheelchair based on regenerative brake[C]//Proc IEEE Int Conf Ind Technol. [S.l.]:IEEE, 2006: 2492-2497.
- [10] YE M, BAI Z F, CAO B. Robust H₂/H_∞ control for regenerative braking of electric vehicles[C]//Proc IEEE Int Conf Control Autom 2007. [S.l.]:IEEE, 2007: 1360-1370.
- [11] WANG J, TAYLOR B, SUN Z G, et al. Experimental characterization of a supercapacitor-based electrical torque-boost system for downsized ICE vehicles[J]. IEEE Trans Veh Technol, 2007, 56(6): 3674-3681.
- [12] YANG M J, JHOU H L, MA B Y, et al. A cost-effective method of electric brake with energy regeneration for electric vehicles [J]. IEEE Trans Ind Electron, 2009, 56(6): 2203-2212.
- [13] YANG Y P, LIU J J, WANG T J, et al. An electricgearshift with ultracapacitors for the power train of an electric vehicle with a directly driven wheel motor[J]. IEEE Trans Veh Technol, 2007, 56(5): 2421-2431.
- [14] UDDIN M N, RADWAN T S, RAHMAN M A. Performance of fuzzy logic based indirect vector control for induction motor drive[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(5): 1219-1225.
- [15] SANTISTEBAN J A, STEPHAN R M. Vector control method for induction machines: an overview[J]. IEEE Transactions on Education, 2001, 44(2): 170-174.
- [16] 王成元, 周美文, 郭庆鼎. 矢量控制交流伺服驱动电机[M]. 北京: 机械工业出版社, 1995: 178-204.
- [17] 徐德鸿, 马皓, 汪樵生. 电力电子技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 134-199.

作者简介:

卢智锋(1982-), 男, 广东佛山人, 硕士, 从事电动汽车驱动与控制技术方面的研究 (E-mail: lnomad@163.com);

李 军(1982-), 男, 四川内江人, 硕士, 从事汽车安全技术方面的研究工作;

周世琼(1976-), 女, 河南信阳人, 讲师, 博士, 从事新能源汽车方面的研究工作;

康龙云(1961-), 男, 吉林延边人, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为能源转换与管理。

Control of PMSM braking energy regeneration system

LU Zhifeng¹, LI Jun², ZHOU Shiqiong³, KANG Longyun⁴

(1. Shenzhen Institute of Special Equipment Inspection and Test, Shenzhen 518029, China;

2. Zhongshan Polytechnic, Zhongshan 528404, China;

3. Shenzhen Institute of Information Technology, Shenzhen 518029, China;

4. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

Abstract: A braking energy regeneration system is designed based on the lead-acid battery and PMSM system under the vector control. The AC generated by PMSM braking is commutated to DC by the three-phase full-bridge inverter under the SPWM control via $-i_q$, which is then used to recharge the batteries to realize the energy regeneration. The braking energy regeneration system is tested with an electric vehicle and the relationship between the braking current and the electric vehicle speed, braking time or battery discharge depth is analyzed. Results show that the electric vehicle with braking energy regeneration system runs with higher efficiency.

Key words: PMSM; energy regeneration; vector control; SPWM; lead-acid battery; synchronous motors; pulse width modulation; control