

# 一种电动汽车能量高效回馈制动方法

任桂周, 常思勤

(南京理工大学 机械工程学院, 江苏省 南京市 210094)

## A High-Efficiency Regenerative Braking for Electric Vehicles

REN Guizhou, CHANG Siqin

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, Jiangsu Province, China)

**ABSTRACT:** To improve energy efficiency of electric vehicles, a method, which uses variable voltage system as electric motor driving system to implement energy recovery is proposed. Combining the ultra-capacitor (UC) banks, which is series-parallelly switchable, with bi-directional DC/DC power converter (BDPC) and adopting the control strategy containing two regenerative braking modes, the transferring efficiency and conversion efficiency of energy flow between electric motor and supply of driving system are improved, thus the energy recovery within wide speed range is attained. Comparing with conventional braking methods, the proposed method possesses the features of small size of driving system, low cost and high energy recovery efficiency. By means of simulation on Matlab/Simulink platform, the comparative analysis on three situations adopting different regenerative braking ways is performed, and the feasibility and effectiveness of the proposed method are verified by simulation results.

**KEY WORDS:** electric vehicle; ultra-capacitor banks; variable voltage system; regenerative braking; simulation

**摘要:** 为提高电动汽车的能量利用率, 提出了一种将可变电压系统作为电机驱动系统实现能量回馈的方法, 利用可串并联切换的超级电容器组与双向直流功率变换器相结合, 采用了2种回馈制动模式的控制策略, 提高了电机到驱动系统电源之间能量流的传递效率和变换效率, 实现了速度大范围变化的能量回馈。与常规制动方法相比, 上述方法具有驱动系统体积小、成本低、能量回馈效率高的特点, 通过计算机仿真对采用不同回馈制动方法时的3种情况进行了对比分析, 仿真结果验证了该方法的可行性和有效性。

**关键词:** 电动汽车; 超级电容器组; 可变电压系统; 回馈制动; 仿真

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(50876043); 国家863高技术基金项目(2006AA05Z236)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50876043); The National High Technology Research and Development of China (863 Program)(2006AA05Z236).

## 0 引言

混合动力型电动汽车和纯电动汽车等电动汽车的运行工况, 要求其驱动系统既可以正向提供电能, 又可以反向回馈制动能量。常规方法是, 选择满足电机所需额定电压值的供电电源, 正向降压为电机供电, 反向通过电机自身电感升压回馈制动能量<sup>[1-5]</sup>。这种方法使供电电源体积大, 成本高; 电机本身损耗较大; 当系统需要的电压增加到大于电源电压时, 必须改变供电电源电压值; 当系统电压变化范围较大时, 效率会降低或不能实现。另外一种不同的方法是, 丰田公司第2代Prius混合动力汽车THS II的供电系统<sup>[6-8]</sup>。该系统在电源与电机之间增加了直流升压变换模块, 系统电压和电源电压可以独立变化, 随不同车辆的动力需要而改变, 提高了能量回收效率。但其系统工作电压与电源电压的变压比小, 电机速度调节的范围小, 可实现能量回馈的速度范围小, 采用动力电池作为电源, 最大充电电流较小, 充电效率较低。

本文提出了一种新型可变电压系统作为电动汽车驱动系统<sup>[9]</sup>, 利用新颖的超级电容器组串并联切换技术实现了电源电压分级供电, 实现了大电流充电回馈制动, 并结合优化设计的双向直流功率变换器(bi-directional DC/DC power converter, BDPC), 实现了在电压大范围变化条件下将BDPC变压比控制在理想范围内的目标<sup>[10-11]</sup>, 提高了BDPC的变换效率, 增大了可变电压变换范围, 大大增加了电机的调速范围, 更利于电机的控制和能量的回馈。新型系统适用于直流电机和交流电机, 本文以永磁直流电机为模型, 对以H桥电压型逆变器为脉宽调制(pulse width modulation, PWM)驱动的拓扑结构进行分析研究。

# 1 能量回馈系统分析

## 1.1 系统构成及运行原理

新型驱动系统如图 1 所示。图中： $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$ 、 $SW$ 、 $V_1$ 、 $V_2$ 、 $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  为 IGBT 开关管； $KD_1$ 、 $KD_2$ 、 $KD_3$ 、 $SD_0$ 、 $VD_1$ 、 $VD_2$ 、 $SD_1$ 、 $SD_2$ 、 $SD_3$ 、 $SD_4$  为对应 IGBT 开关管的反并联二极管； $S$  为开关管； $i_1$  为超级电容器组输出电流； $i_2$  为 BDPC 输出电流与电容  $C_2$  输入电流的电流和； $i_o$  为 BDPC 输出电流； $i_M$  为电机电枢电流； $U_1$  为超级电容器组端电压； $U_{bus}$  为母线电压； $U_{AB}$  为电机端电压； $U_{C1}$  和  $U_{C2}$  为超级电容器组的电压。系统可划分为 3 部分：可串并联切换的超级电容器组、优化设计的 BDPC、H 桥电压型逆变器。新系统选择 2 组初始状态相同的超级电容器模块和 3 个开关管；BDPC 实现超级电容器组和电机之间能量在 2 个方向的变换和传递<sup>[12-13]</sup>；H 桥电压型逆变器的换向和续流功能使电机在 2 个方向上运动并保持电流连续。

应用常规方法的驱动系统只能实现电动降压供电和升压回馈制动 2 种运行模式，在一定车速范围内才可以进行能量回馈。当车速低于一定值时，电机无法提供高的充电电压而不能向电源充电，能量回馈效率低，使车速相对较低且频繁制动的城市公交车在制动过程中只能回馈较少的能量。新型驱动系统可实现车速大范围变化的制动能量回馈，改善常规驱动系统在低速状态下回馈能量效率低的问题。下文的分析基于图 1 所示变量，设  $U_{C1}$  和  $U_{C2}$  的额定工作电压值都为  $U_C$ ，电机反电动势为  $\varepsilon$ 。

电动汽车正常驱动行驶，当低速运行产生的反电动势  $\varepsilon$  小于  $U_C$  时， $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  断开， $U_{C1}$ 、 $U_{C2}$  并联放电，输出端电压为  $U_C$ ，此时，不需要控制 BDPC，由 H 桥 2 个桥臂上的 4 个开关管进行 PWM 降压斩波控制，得到电机需要的端电压驱动汽车行驶，其控制同常规方法。当  $\varepsilon$  大于  $U_C$  时， $U_{C1}$ 、 $U_{C2}$

继续并联放电。当  $\varepsilon$  大于超级电容器组输出端高电压值等级工作电压  $2U_C$  时， $K_1$ 、 $K_2$  断开， $K_3$  导通， $U_{C1}$ 、 $U_{C2}$  串联放电，输出端电压为  $2U_C$ 。在该运行模式下，控制 BDPC， $V_1$  断开， $V_2$  由 PWM 信号控制， $SW$  断开， $S$  断开，超级电容器组通过 BDPC 升压为电机提供所需端电压，同时控制 H 桥实现电枢电流的调节和换向。在 2 个工作模式中， $U_{C1}$ 、 $U_{C2}$  同时放电，实现了超级电容器组间放电的平衡。

在电动汽车制动工况下，电机作为发电机工作，向  $U_{C1}$ 、 $U_{C2}$  充电回馈能量。当  $\varepsilon$  大于  $2U_C$  时， $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  断开， $U_{C1}$ 、 $U_{C2}$  串联充电，输出端电压为  $2U_C$ ；当  $\varepsilon$  小于  $2U_C$  大于  $U_C$  时， $K_1$ 、 $K_2$  导通， $K_3$  断开， $U_{C1}$ 、 $U_{C2}$  并联充电，输出端电压为  $U_C$ ，此时  $V_1$  由 PWM 信号控制， $V_2$  断开， $SW$  导通， $S$  断开，BDPC 降压斩波向  $U_{C1}$ 、 $U_{C2}$  充电，控制 H 桥的 4 个开关管调节电机电枢电流；当  $\varepsilon$  小于  $U_C$  时， $U_{C1}$ 、 $U_{C2}$  继续并联充电，输出端电压为  $U_C$ ，此时  $V_1$ 、 $V_2$  断开， $SW$  导通， $S$  断开，通过对 H 桥的 2 对开关管进行 PWM 控制，利用电机自身电感升压向  $U_{C1}$ 、 $U_{C2}$  充电。在回馈制动运行的 2 个模式中， $U_{C1}$ 、 $U_{C2}$  同时充电，实现了超级电容器组间充电的平衡。同时由电机电枢电流获得制动转矩，实现电气制动，制动强度与电机电枢电流的平均值成正比，可能达到的最大制动强度与电机电枢电流限值及车速成正比，通过控制电机电枢电流得到需要的电磁制动转矩。

当高速制动或紧急制动时，需要较大的制动电流，使得 BDPC 电感  $L$  的尺寸大、绕组线圈粗，优化设计的 BDPC 使用了电感  $L$  的可屏蔽开关  $S$ 。当 BDPC 运行于大电流模式，向超级电容器组回馈能量时，屏蔽掉电感，利用大容量的超级电容器组对输入的 PWM 电压波进行滤波，对输出量实现平滑控制，使 BDPC 具有更高的可靠性。该优化设计有效减小了功率变换器的体积和成本，提高了功率变

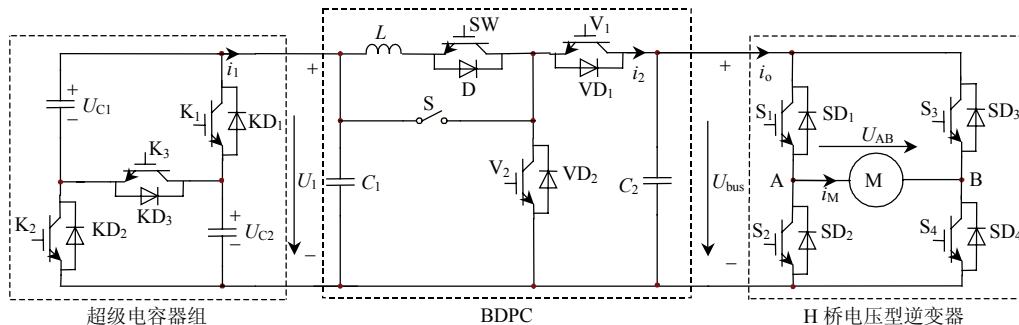


图 1 新型驱动系统

Fig. 1 Proposed novel drive system

换的效率。

## 1.2 能量回馈系统模型

在电动汽车制动过程中，本文基于图 1 建立能量回馈系统的数学模型。对于串并联实时切换的超级电容器组，由 3 个开关控制其输出电压值、充电状态。超级电容器组状态模型为

$$\begin{cases} U_1 = \begin{cases} U_C, & K_1 = K_2 = 1, K_3 = 0 \\ 2U_C, & K_1 = K_2 = K_3 = 0 \end{cases} \\ i_1 = U_1 / R \end{cases} \quad (1)$$

式中： $R$  为等效负载； $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  分别表示开关  $K_1$ 、 $K_2$ 、 $K_3$  的开关状态。

根据系统运行原理知，当  $\varepsilon$  大于  $U_C$  时，BDPC 运行在降压状态，为超级电容器组充电，由 BDPC 的降压原理得

$$U_1 = D_1 U_{bus} \quad (2)$$

式中  $D_1$  为开关管  $V_1$  的占空比。

设电机电感为  $L_M$ ，内阻为  $r_M$ 。当  $\varepsilon$  小于  $U_C$  且  $S_1$  和  $S_4$  导通时，有

$$\begin{cases} U_{bus} + \varepsilon = L_M \frac{di_M}{dt} + r_M i_M \\ i_{cd} = -i_2 + i_M = -C_2 \frac{dU_{bus}}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

$S_1$  和  $S_4$  断开时，有

$$\begin{cases} U_{bus} - \varepsilon = L_M \frac{di_M}{dt} - r_M i_M \\ i_{cc} = i_2 + i_M = C_2 \frac{dU_{bus}}{dt} \end{cases} \quad (4)$$

式中  $i_{cc}$  为电容  $C_2$  的充电电流。

根据稳态运行时电容的能量守恒定律，并假定  $C_2$  充放电过程中电流保持不变，得到

$$\begin{cases} i_{cd} = 2(1-D)i_M \\ i_{cc} = 2Di_M \\ i_2 = (1-2D)i_M \end{cases} \quad (5)$$

式中  $D$  为开关管  $S_1$  和  $S_4$  的占空比。

在制动状态下， $i_2$  的方向不变，则有  $0 < D < 1/2$ 。根据稳态运行时电感的能量守恒定律，得到

$$U_{bus} = \varepsilon / (1-2D) \quad (6)$$

当  $D > (U_1 - \varepsilon) / (2U_1)$  时，有  $U_{bus} > U_1$ ，即利用电机自身电感实现了升压向超级电容器组充电，满足能量回馈的要求。

## 2 仿真研究

为验证上述理论分析的正确性，本文基于 Matlab/Simulink 并与制动过程中的电动汽车动力

学模型结合，对回馈制动过程进行仿真研究。

根据汽车动力学理论<sup>[14]</sup>知，电动汽车在制动过程中的车辆动力学方程为

$$m \frac{dv}{dt} = -(F_w + F_f + F_i + F_b) \quad (7)$$

式中： $m$  为电动汽车质量； $v$  为车速； $t$  为制动时间； $F_w$  为空气阻力； $F_f$  为滚动阻力； $F_i$  为爬坡阻力； $F_b$  为制动阻力。

在城市工况可忽略空气阻力和爬坡阻力，则式(7)简化为

$$m \frac{dv}{dt} = -(F_f + F_b) \quad (8)$$

有

$$v_1 = v_0 - \int \frac{(F_f + F_b)}{m} dt \quad (9)$$

式中： $v_1$  为电动汽车制动结束速度； $v_0$  为电动汽车制动初始速度。

电机转速与车速的关系为

$$0.377 r_w n = av \quad (10)$$

式中： $n$  为电机转速，r/min； $r_w$  为车轮半径； $a$  为车轮到电机转轴的总传动比。

本文针对混合动力型电动汽车 EQ7200<sup>[15]</sup>进行仿真，相关参数如下：质量为 1 600 kg，车轮半径为 0.312 m，变速箱 2 挡 AMT 速比为 1.276，主减速器速比为 4.5385。选择 Maxwell 能量型超级电容器单体 BCAP3000-E270 组成超级电容器模块，仿真模型参数如下：每组超级电容器模块的额定工作电压为 60 V，容量为 130F，内阻为 0.02  $\Omega$ ；滤波电容  $C_1$  和  $C_2$  的容量为 20 mF，内阻为 0.02  $\Omega$ ；永磁直流电机额定电压为 336 V，发电功率为 14 kW，额定转矩为 118 N·m，额定转速为 2000 r/min。

在满足能量回馈制动的约束条件<sup>[15]</sup>下进行中度制动仿真，其中制动减速度大于 1 m/s<sup>2</sup> 且小于 3 m/s<sup>2</sup>，制动初始速度为 100 km/h，仿真系统采用回馈电流的比例-积分(proportional integral, PI)闭环控制，回馈电流即超级电容器组的充电电流，回馈电流大小受电机发电功率和电源最大充电电流限制，在制动过程中车速线性减小，车速变化曲线如图 2 所示。

文献[15]采用常规方法进行回馈制动仿真分析，制动时仅利用电机自身电感进行升压回馈能量，电源选用了镍氢(NiMH)电池，额定电压值为 336 V，其工作电流被限制在很小的范围内，仅能吸收较少的能量。仿真结果表明，充电电流在  $t=13$  s

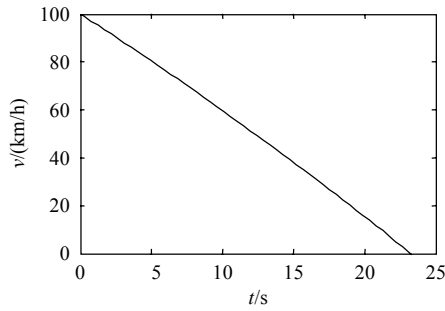


图2 车速变化曲线

Fig. 2 Curve of vehicle speed

左右时开始下降, 在  $t=19\text{ s}$  左右时降至 0, 能量回馈过程结束, 可实现能量回馈的范围较小, 能量回馈效率仅为 27.16%。

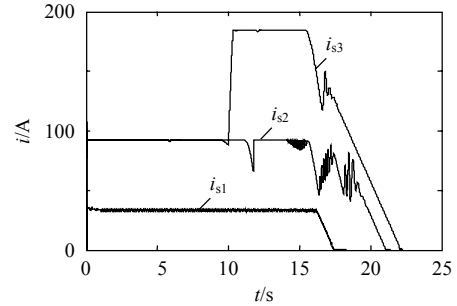
为了作对比分析研究, 本文对电源采用超级电容器组不同回馈制动方法时的 3 种情况进行仿真。第 1 种情况是采用常规制动方法, 利用电机自身电感进行升压能量回馈; 第 2 种情况是采用本文提出的新型系统, 作为本文研究控制方法的一个特例, 在回馈制动过程中, 超级电容器组始终为串联方式; 第 3 种情况是采用本文提出的新型系统, 且在制动过程中超级电容器组串并联实时切换。3 种情况的电源参数见表 1。

表 1 采用不同回馈制动方法时 3 种情况的电源参数

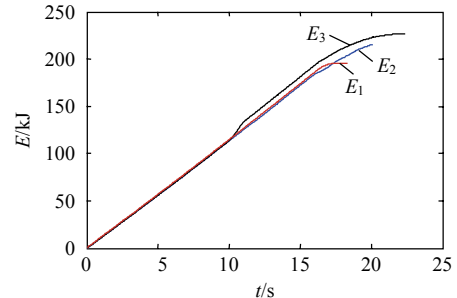
Tab. 1 Power parameters of three situations by different methods

方法	电源	电压/V	容量/F	内阻/ $\Omega$	可用能量/kJ
常规制动方法	6 组超级电容器组串联	336	22	0.12	931.392
新型系统	2 个 2 组超级电容器组串联	120	130	0.02	702
新型系统	可串并联切换的 2 个 2 组超级电容器组	串联时 120 并联时 60	串联时 130 并联时 520	串联时 0.02 并联时 0.05	702

电源采用超级电容器组, 其最大充电电流可达 800 A 以上, 则回馈电流大小的选择由电机发电功率  $P_m$  确定。经计算, 采用常规制动方法的回馈电流为 33 A; 采用本文提出的新型系统, 超级电容器组为串联方式时的回馈电流为 92 A, 超级电容器组为并联方式时的回馈电流为 184 A, 采用不同回馈制动方法时 3 种情况的回馈电流和回馈能量如图 3 所示。图 3(a)中:  $i_{s1}$  为采用常规制动方法的回馈电流;  $i_{s2}$  为采用本文的新型系统在回馈制动过程中, 超级电容器组始终为串联方式时的回馈电流;  $i_{s3}$  为采用本文提出的新型系统, 且在制动过程中超级电容器组串并联实时切换时的回馈电流。图 3(b)中:  $E_1$  为第 1 种情况的回馈能量;  $E_2$  为第 2 种情况的回馈能量;  $E_3$  为第 3 种情况的回馈能量。由图 3(a)可



(a) 回馈电流



(b) 回馈能量

图 3 采用不同回馈制动方法时 3 种情况的仿真结果( $P_m=14\text{ kW}$ )

Fig. 3 Simulation results of three situations by different regenerative braking methods ( $P_m=14\text{ kW}$ )

知: 当  $t < 16.5\text{ s}$  时,  $i_{s1}$  保持在 33 A, 当  $t > 16.5\text{ s}$  时, 由于可回馈能量减小,  $i_{s1}$  不能维持在恒定值而逐渐减小, 当  $t=17.5\text{ s}$  时,  $i_{s1}$  减小到 0, 回馈制动过程结束; 当  $t < 11.2\text{ s}$  时, 电机反电动势通过 BDPC 降压向超级电容器组回馈能量,  $i_{s2}$  很好地跟踪设定值, 随着反电动势的不断减小, 当  $t > 11.2\text{ s}$  时, BDPC 为升压回馈能量, 保持恒定  $i_{s2}$  继续充电, 当  $t > 16.1\text{ s}$  时, 随着可回馈能量的较小,  $i_{s2}$  不断减小, 在  $t=21.1\text{ s}$  时, 产生的反电动势低至难以升压回馈能量,  $i_{s2}$  为 0, 回馈制动过程结束; 当  $t < 10\text{ s}$  时, 超级电容器组为串联连接, 电机反电动势通过 BDPC 降压向超级电容器组回馈能量,  $i_{s3}=92\text{ A}$ , 随着反电动势的不断减小,  $t > 10\text{ s}$  时, 超级电容器组变为并联连接, BDPC 继续降压回馈能量,  $i_{s3}=184\text{ A}$ ,  $t > 16.1\text{ s}$  时, BDPC 变为升压回馈能量, 此过程中随着可回馈能量减小,  $i_{s3}$  不断减小,  $t=22.2\text{ s}$  时, 产生的反电动势低至难以升压回馈能量,  $i_{s3}=0\text{ A}$ , 回馈制动过程结束。

在整个制动过程中, 可通过计算车辆的动能和电源能量变化来确定能量回馈效率。车辆的动能为

$$E_v = m(v_0^2 - v_1^2) / 2 \quad (11)$$

电源得到的回馈能量为

$$E_r = \int_0^t U_s(t) i_s(t) dt \quad (12)$$

式中:  $U_s(t)$  为电源电压;  $i_s(t)$  为电源充电电流。

电源内阻消耗的能量为

$$E_s = \int_0^t r_s(t) i_s^2(t) dt \quad (13)$$

式中  $r_s(t)$  为超级电容器组内阻。

把参数代入式(11)得汽车动能  $E_v=617382.72\text{J}$ ，又由仿真结果得  $E_1=196\text{kJ}$ ， $E_2=218\text{kJ}$ ， $E_3=23\text{kJ}$ ，则有

$$\eta_1 = \frac{E_1 - E_{s1}}{E_v} = \frac{196\ 000 - 2\ 187}{617\ 382.72} \approx 31.39\% \quad (14)$$

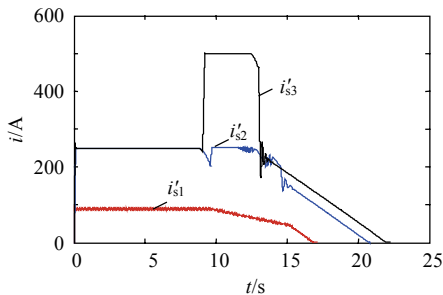
$$\eta_2 = \frac{E_2 - E_{s2}}{E_v} = \frac{218\ 000 - 3\ 021}{617\ 382.72} \approx 34.82\% \quad (15)$$

$$\eta_3 = \frac{E_3 - E_{s3}}{E_v} = \frac{230\ 000 - 2\ 983}{617\ 382.72} \approx 36.77\% \quad (16)$$

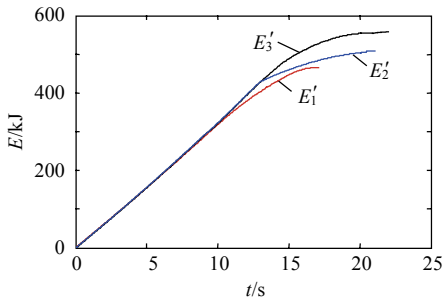
式中： $\eta_1$  为第 1 种情况的能量回馈效率； $E_{s1}$  为第 1 种情况电源内阻消耗的能量； $\eta_2$  为第 2 种情况的能量回馈效率； $E_{s2}$  为第 2 种情况电源内阻消耗的能量； $\eta_3$  为第 3 种情况的能量回馈效率； $E_{s3}$  为第 3 种情况中电源内阻消耗的能量。

当电源选择超级电容器组时，可充分利用其大电流快速充放电、内阻小的优点，通过提高制动时的回馈电流提高能量回馈效率。在电机电流允许范围内，回馈电流随电机发电功率的增加而增大，对比以上的仿真结果，采用发电功率为  $33\text{kW}$  且额定转矩为  $350\text{N}\cdot\text{m}$  的永磁直流电机，其它仿真参数和仿真条件完全相同，仿真结果如图 4 所示。

由仿真结果得  $E'_1=468\text{kJ}$ ， $E'_2=510\text{kJ}$ ， $E'_3=558\text{kJ}$ ，则能量回馈效率为



(a) 回馈电流



(b) 回馈能量

图 4 采用不同回馈制动方法时 3 种情况的仿真结果( $P_m=33\text{ kW}$ )

Fig. 4 Simulation results of three situations by different regenerative braking methods( $P_m=33\text{ kW}$ )

$$\eta'_1 = \frac{E'_1 - E'_{s1}}{E_v} = \frac{468\ 000 - 10\ 988}{617\ 382.72} \approx 74.02\% \quad (17)$$

$$\eta'_2 = \frac{E'_2 - E'_{s2}}{E_v} = \frac{510\ 000 - 19\ 250}{617\ 382.72} \approx 79.49\% \quad (18)$$

$$\eta'_3 = \frac{E'_3 - E'_{s3}}{E_v} = \frac{558\ 000 - 31\ 094}{617\ 382.72} \approx 85.35\% \quad (19)$$

仿真结果及其对比分析表明，采用常规制动方法时，与选择电池做电源相比，选择超级电容器组的能量回馈效率有较大提高；采用本文的新型系统，电源选择超级电容器组相比常规制动方法选择超级电容器组，不仅减小了电源体积和成本，而且增大了可实现能量回馈的速度范围，提高了能量回馈效率；采用本文提出的新型系统，电源选择超级电容器组串并联切换时，进一步增大了可实现能量回馈的速度范围，提高了能量回馈效率，特别适合于频繁制动的城市公交车的制动能量回馈及需要低速回馈能量的场合。

### 3 结论

本文提出的可变电电压系统作为电动汽车驱动系统实现能量回馈的方法具有以下优点：

1) 供电电源采用超级电容器组，且利用新颖的超级电容器组串并联切换技术，充分利用超级电容器组的大电流充放电特性、较高的充放电效率和快速充放电条件下保持性能稳定的特点，提高了系统效率，实现了可变电电压电源系统的设计。

2) 通过降低供电电源的电压和使用高效率功率变换器，实现了低电压值供电系统的设计。与常规驱动系统中使用的供电电源相比，新系统中功率变换器增加，这减小了系统体积和成本，提高了能量传递和能量变换效率。

3) 实现了降压回馈制动和升压回馈制动 2 种模式，整个制动过程中都可以实现能量回馈，这使车速相对较低且频繁制动的城市公交车回馈制动效率得到很大提高。

仿真实验结果验证了该方法的正确性和有效性。本文的方法适用于混合动力电动汽车、纯电动汽车等电动车辆的能量回馈，在实际中易于实现，具有较好的理论研究价值和实用价值。

### 参考文献

[1] 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.  
Cheng Wei, Xu Guoqing, Wang Xiaodong. Study on regenerative braking technology of brushless DC motor for electric vehicles[J].

- Electric Drive, 2005, 35(11): 15-17(in Chinese).
- [2] Ke Y L, Chuang Y C, Chuang H S. Recovery electric bicycle with two-quadrant DC motor drivers[C]//Proceedings of IEEE Conference on Industry Applications Society Annual Meeting. Houston, Texas, USA: Wholesale W Electric, 2009: 1-7.
- [3] 张毅, 杨林, 李立明. 电动汽车无刷直流电动机的回馈制动控制[J]. 上海交通大学学报, 2005, 39(9): 1457-1460.  
Zhang Yi, Yang Lin, Li Liming. The regenerative braking control of DC brushless motor for electric vehicle[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2005, 39(9): 1457-1460(in Chinese).
- [4] Yildiz A B. Large-signal analysis of DC motor drive system using state-space averaging technique[J]. Energy Conversion and Management, 2008, 49(11): 3069-3074.
- [5] Ahmed N A. Modeling and simulation of AC-DC buck-boost converter fed dc motor with uniform PWM technique[J]. Electric Power Systems Research, 2005, 73(3): 363-372.
- [6] Munehiro K. Development of traction drive motors for the toyota hybrid system[J]. Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan, 2006, 26(9): 473-479.
- [7] Staunton R H, Ayers C W, Marlino L D. Evaluation of 2004 toyota prius hybrid electric drive system[R]. USA: Osk Ridge National Laboratory, 2006.
- [8] Hofman T, Steinbuch M, Drueten R M. Modeling for simulation of hybrid drivetrain components[C]//Proceedings of IEEE Conference on Vehicle Power and Propulsion. Windsor, UK: IEEE VT, 2006: 1-6.
- [9] 任桂周, 常思勤. 一种电能双向流动的储能系统及其控制方法: 中国专利, 20100508339.4[P]. 2010-10-15.
- [10] Hiroshi N, Ioannou P A. Development of a regenerative braking system using UC for EV[J]. Journal of Asian Electric Vehicles, 2003, 1(2): 429-432.
- [11] Chinnaiyan V K, Jovitha J. Design and Implementation of High Power DC-DC converter and speed control of dc motor using TMS320F240 DSP[C]//Proceedings of India International Conference on Power Electronics. Chennai, India: Numeric Power Systems Ltd, 2006: 388-392.
- [12] 廖志凌, 阮新波. 一种独立光伏发电系统双向变换器的控制策略[J]. 电工技术学报, 2008, 23(1): 97-103.  
Liao Zhiling, Ruan Xinbo. Control strategy for bi-directional DC/DC converter of a novel stand-alone photovoltaic power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(1): 97-103(in Chinese).
- [13] 刘海波, 毛承雄, 陆继明. 电子电力变压器储能系统及其最优控制[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 54-60.  
Liu Haibo, Mao Chengxiong, Lu Jiming. Energy storage system of electronic power transformer and its optimal control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(3): 54-60(in Chinese).
- [14] 白志峰, 曹秉刚, 李舒欣, 等. 电动汽车再生制动 H<sub>∞</sub>鲁棒控制仿真研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(12): 2975-2978.  
Bai Zhifeng, Cao Binggang, Li Shuxin, et al. Simulation on H<sub>∞</sub> robust control of regenerative braking of electric vehicle[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(12): 2975-2978(in Chinese).
- [15] 彭栋. 混合动力汽车制动能量回收与 ABS 集成控制研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.



任桂周

收稿日期: 2010-10-15。

作者简介:

任桂周(1979), 男, 博士研究生, 研究方向为适用于混合动力汽车、纯电动汽车以及电机双向运行场合的动力装置的电力电子装置研究、能量变换和存储技术, E-mail: renguizhou@tom.com。

(责任编辑 杜宁)