

电动汽车永磁同步电机最优制动能量回馈控制

卢东斌, 欧阳明高, 谷靖, 李建秋

(汽车安全与节能国家重点实验室(清华大学), 北京市海淀区 100084)

Optimal Regenerative Braking Control for Permanent Magnet Synchronous Motors in Electric Vehicles

LU Dongbin, OUYANG Minggao, GU Jing, LI Jianqiu

((State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy (Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: The permanent magnet synchronous motors (PMSM) is widely adopted for traction motor in the electric vehicles (EV) with the advantage of high efficiency and high torque density. Field oriented control (FOC) is appropriate for PMSM and the maximum efficiency control can be achieved. In this paper, the principle for electric braking control of PMSM under FOC was studied. Based on this, the optimal regenerative braking control strategy for EV was obtained with the model of the electric drive system (including PMSM, inverter and battery), which was significant for the economical operation of EV. In the existing electrical and mechanical coupling braking methods of EV, the parallel and the series braking control strategies were compared. The results showed that the optimal regenerative braking was achieved in the series braking control strategy and a good regenerative braking could be obtained by adjusting the free travel of mechanical brake appropriately with the parallel braking control strategy.

KEY WORDS: permanent magnet synchronous motor (PMSM); field oriented control (FOC); efficiency model; electric vehicle (EV); regenerative braking; series braking

摘要: 永磁同步电机具有高效率、高转矩密度等优点, 被广泛地用作电动汽车牵引电机。永磁同步电机通常采用磁场定向(field oriented control, FOC)控制算法实现最大效率控制。该文研究永磁同步电机在磁场定向控制下的制动原理, 结合电动汽车驱动系统(包括永磁同步电机、逆变器和电池)模型, 进而分析电动汽车最优制动能量回馈控制策略。根据现有的电动汽车电气和机械耦合制动方案, 对比分析常用的并联制动控制策略和串联制动控制策略, 得出串联制动控制策略可实现最优的能量回馈制动, 并联制动控制策略通过改变

机械制动的自由行程可实现较好的能量回馈制动。

关键词: 永磁同步电机; 磁场定向控制; 效率模型; 电动汽车; 制动能量回馈; 串联制动

0 引言

传统汽车在制动过程中其机械能大部分通过制动器的摩擦转化为热能消耗掉。电动汽车采用电机作为驱动部件, 可以利用电机的制动发电来回收制动能量。研究表明, 在城市工况下, 大约有 1/3 到 1/2 的能量被消耗在制动过程中^[1-2]。因此, 研究制动能量回馈对于降低电动汽车能耗, 缓解能源和环境压力具有重要意义。

Yimin Gao 等对理想再生制动策略、最优再生制动策略及并联再生制动策略 3 种不同的再生制动策略进行了仿真, 并给出了评价^[1]; 之后又提出了应用于纯电动汽车和混合动力汽车的集成了再生制动、制动力自动控制及防抱死功能的电制动系统, 并进行了仿真^[3]。A.M.Walker 等人分析了再生制动和摩擦制动的需求, 通过改进能量存储系统, 减小摩擦制动来获得更高的能量回收效率^[4]。张俊智等研究了混合动力客车的制动能量回馈技术, 实现了气压制动力和回馈制动力的协调控制、ABS 系统与回馈制动系统的协调控制^[5]; 之后又设计出串联、并联等多种制动力分配策略, 并且进行了试验测试^[6]。以上文献中, 缺少分析电机的制动特点, 关于摩擦制动和回馈制动转矩的分配最优问题只是凭借经验定性分析, 没有给出详细的理论分析和证明。关于串联、并联等制动模式差别也只是给出仿真和试验结果。

永磁同步电机具有高效率、高转矩密度等优点, 在电动汽车领域得到了越来越多的应用。永磁

基金项目: 面向中美清洁能源合作的电动汽车前沿技术研究(国际科技合作计划项目)(2010DFA72760)。

US-China Clean Energy Research Collaboration: Collaboration on cutting-edge technology development of electric vehicle (Program of International S&T Cooperation) (2010DFA72760).

同步电机一般采用磁场定向控制算法,实现最大转矩电流控制。基于磁场定向控制的永磁同步电机制动控制已有很多研究:文献[7]分析了以电动汽车为背景的永磁电动机系统再生制动过程;文献[8-9]详细分析了永磁同步电机伺服系统再生制动过程。

本文将结合永磁同步电机、逆变器和电池模型分析电动汽车永磁同步电机驱动系统的制动特点。在此基础上,推导了电动汽车制动能量回馈时最优的制动电磁转矩。针对目前电动汽车常用的串联和两种并联制动控制策略,分析和比较了各自的优缺点,并给出了3种控制策略下最优能量回馈制动的转矩解释。通过在Matlab/Simulink搭建整车动力学仿真模型,在城市工况下,给出了3种不同制动方案下的能流图。最后,通过试验验证永磁同步电机效率模型和电动汽车最优制动控制策略。

1 永磁同步电机驱动系统模型

1.1 永磁同步电机模型

永磁同步电机考虑铁心损耗时的 d 、 q 轴等效电路模型可参考文献[10-11]。定子的 d 、 q 轴电流 i_d 和 i_q 分别被分为铁耗电流 i_{di} 、 i_{qi} 和转矩电流 i_{dt} 、 i_{qt} 。稳态情况下,电压平衡方程可表示为

$$\begin{cases} u_d = R_a i_d - \omega \psi_q \\ u_q = R_a i_q + \omega \psi_d \end{cases} \quad (1)$$

磁链 ψ_d 和 ψ_q 的表达式为

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_{dt} + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_{qt} \end{cases} \quad (2)$$

电磁转矩方程式为

$$T_e = p(\psi_d i_{qt} - \psi_q i_{dt}) = p[\psi_f i_{qt} + (L_d - L_q) i_{dt} i_{qt}] \quad (3)$$

式中: u_d 、 u_q 为定子 d 、 q 轴电压; i_d 、 i_q 为定子 d 、 q 轴电流, i_{di} 、 i_{qi} 为定子等效的 d 、 q 轴铁损电流, i_{dt} 、 i_{qt} 为定子等效的 d 、 q 轴转矩电流; ψ_d 为定子 d 轴磁链,包括定子 d 轴电流产生的磁链和永磁体产生的磁链; ψ_q 为定子 q 轴磁链; L_d 、 L_q 为定子绕组 d 、 q 轴电感; ω 为转子电角速度; ψ_f 为永磁体产生的磁链; R_a 为定子绕组相电阻; p 为电机极对数; T_e 为电机电磁转矩。

本文以表贴式永磁同步电机(surface mounted permanent magnet synchronous motor, SPMSM)为例,来分析永磁同步电机制动特性,研究方法适用于嵌入型永磁同步电机(interior permanent magnet synchronous motor, IPMSM)和感应电机(induction motor, IM)。在表贴式永磁同步电机中, $L_d=L_q$,记

为 L ,转矩方程可简化为式(4):

$$T_e = p(\psi_d i_{qt} - \psi_q i_{dt}) = p\psi_f i_{qt} \quad (4)$$

由式(4)可得出,表贴式永磁同步电机产生的电磁转矩与 q 轴转矩电流成正比,与 d 轴电流无关。

永磁同步电机的输入功率^[10]可表示为

$$P_{in} = u_d i_d + u_q i_q = (R_a i_d - \omega \psi_q) i_d + (R_a i_q + \omega \psi_d) i_q = R_a (i_d^2 + i_q^2) + \frac{\omega^2 (\psi_d^2 + \psi_q^2)}{R_i} + \omega \psi_f i_{qt} \quad (5)$$

式中: R_i 为铁耗电阻,可以通过试验方法来得到^[10]; P_{in} 为电机的输入功率;等号右边第1部分为铜耗 P_{Cu} ,第2部分为铁耗 P_{Fe} ,第3部分为电磁功率 P_e ,其为机械损耗 P_m 、杂散损耗 P_s 和机械输出功率 P_{out} 的总和,可表示为

$$\omega \psi_f i_{qt} = P_m + P_s + P_{out} \quad (6)$$

在表贴式永磁同步电机中,为了实现最大转矩电流控制,通过控制 d 轴电流 $i_d=0$ 来实现。根据等效电路^[10-11]和公式(1)~(5),可以推得铜耗、铁耗与转矩和电角速度的关系为

$$\begin{cases} P_{Cu} = R_a \left[\left(\frac{\omega^2 L^2}{R_i^2} + 1 \right) \frac{T_e}{p\psi_f} + \frac{\omega \psi_f}{R_i} \right]^2 \\ P_{Fe} = \frac{\omega^2 \left[\left(\frac{\omega L^2}{R_i} \frac{T_e}{p\psi_f} + \psi_f \right)^2 + \left(L \frac{T_e}{p\psi_f} \right)^2 \right]}{R_i} \end{cases} \quad (7)$$

1.2 逆变器效率模型

为了精确估计逆变器效率,必须考虑具体器件模型和PWM控制算法,否则只能通过试验来获得。但是,通过做如下假设,可以获得逆变器的解析模型来估计其损耗:功率型MOSFET为一个纯电阻;IGBT和二极管为一个电阻与电压源串联;开关损耗在一个设计非常好的软开关逆变器中可以忽略;对于非零电压开关情况,开关损耗需要考虑。本文将分析基于MOSFET的电机三相逆变电路损耗模型(硬开关),控制算法采用空间矢量脉宽调制(space vector pulse width modulation, SVPWM)的磁场定向控制算法(field oriented control, FOC)。

1) 导通损耗。

根据文献[12-14],功率型MOSFET和二极管导通特性可表示为

$$\begin{cases} V_{ds} = IR_{ds} \\ V_{ak} = V_f + IR_{ak} \end{cases} \quad (8)$$

式中: V_{ds} 和 V_{ak} 分别代表MOSFET和二极管的导通压降; V_f 为二极管零电流时的压降; R_{ds} 和 R_{ak} 分

别代表 MOSFET 和二极管的电阻; I 为器件的电流。

MOSFET 和反并联二极管的导通损耗分别为

$$\begin{cases} P_{c-MOSFET} = I_m^2 R_{ds} \left(\frac{1}{8} + \frac{m}{3\pi} \cos \varphi \right) \\ P_{c-D} = \frac{1}{2} I_m V_f \left(\frac{1}{\pi} - \frac{m}{4} \cos \varphi \right) + I_m^2 R_{ak} \left(\frac{1}{8} - \frac{m}{3\pi} \cos \varphi \right) \end{cases} \quad (9)$$

式中: m 为调制系数; φ 为负载功率因数角; I_m 为正弦电流的峰值。

采用磁场定向控制的逆变器导通损耗包括 MOSFET 的导通损耗和内部反并联二极管的导通损耗。由于采用 SVPWM 调制算法以及 MOSFET 的双向导通电流特性, 二极管仅在死区时间续流导通。考虑死区效应, 三相逆变器的 MOSFET 和二极管导通损耗可简化, 分别如下:

$$\begin{cases} P_{c-MOSFETs} = \frac{3}{2} I_m^2 R_{ds} \left(1 - \frac{2t_d}{t_c} \right) \\ P_{c-Ds} = \left(\frac{6}{\pi} V_f I_m + \frac{3}{2} I_m^2 R_{ak} \right) \frac{2t_d}{t_c} \end{cases} \quad (10)$$

式中: t_d 为死区时间; t_c 为 PWM 周期时间。

三相逆变器的导通损耗为

$$P_c = P_{c-MOSFETs} + P_{c-Ds} \quad (11)$$

2) 开关损耗。

根据文献[14], 硬开关的开关损耗可表示为

$$\begin{cases} P_{sw-on} = k_{on} I_m f_s / \pi \\ P_{sw-off} = k_{off} I_m f_s / \pi \end{cases} \quad (12)$$

式中: P_{sw-on} 、 P_{sw-off} 分别为开通损耗和关断损耗; f_s 为开关频率; k_{on} 、 k_{off} 可通过器件手册或测量数据得到。

三相逆变器的开关损耗为

$$P_{sw} = 3(P_{sw-on} + P_{sw-off}) \quad (13)$$

三相逆变器的总损耗为导通损耗和开关损耗之和, 表示为

$$P_{inv} = P_c + P_{sw} = \left(\frac{12t_d V_f}{\pi t_c} + \frac{3k_{on} f_s}{\pi} + \frac{3k_{off} f_s}{\pi} \right) I_m + \left[\frac{3R_{ak} t_d}{t_c} + \frac{3}{2} R_{ds} \left(1 - \frac{2t_d}{t_c} \right) \right] I_m^2 \quad (14)$$

式中相电流峰值 I_m 和 i_q 及 T_e 的关系如下:

$$I_m = \sqrt{\frac{2}{3}} i_q = \sqrt{\frac{2}{3}} \left[\left(\frac{\omega^2 L^2}{R_i^2} + 1 \right) \frac{T_e}{p\psi_f} + \frac{\omega\psi_f}{R_i} \right] \quad (15)$$

1.3 电池模型

电池的电模型是通过将电池作为一个集总系统来看待, 可以简化计算, 已被广泛地用来研究电

池电压和电流的动态特性[15-17]。通过电模型来分析电池的充放电动态特性, 可以使误差控制在 5% 以内^[17], 满足工程需要。电池电模型一般由基本器件, 如电阻、电容, 组成的电路模型来描述, 称为等效电路模型。电路结构一般由欧姆电阻和一个或多个 RC 网络串联组成来仿真电池的瞬态和稳态响应。图 1 是常用的一种等效电路。

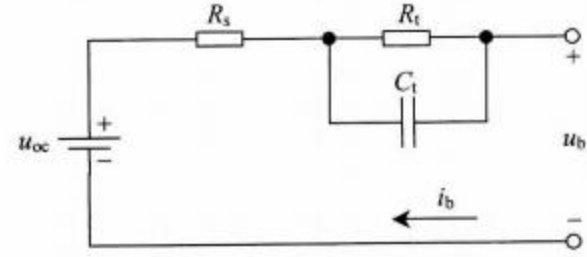


图 1 锂电池常用的等效电路模型

Fig. 1 A generalized ECM for lithium batteries

利用基尔霍夫定律, 等效电路动态模型可以表达为

$$\dot{u}_c = -\frac{1}{C_t R_t} u_c + \frac{1}{C_t} i_b \quad (16)$$

$$u_b = u_{oc} - R_s i_b - u_c \quad (17)$$

式中: R_s 为欧姆内阻; R_t 和 C_t 组成一个 RC 网络; u_{oc} 为开路电压, 上述变量都与 SOC 有关; u_c 为 RC 网络的电压; u_b 为端电压; i_b 为输出电流。

稳态情况下, 电池的能量损耗可表达为

$$P_{br} = (R_s + R_t) i_b^2 \quad (18)$$

2 永磁同步电机的制动原理分析

永磁同步电机制动控制采用磁场定向控制方法可实现最大转矩电流控制, 对于表贴式永磁同步电机, 通过控制 q 轴电流反向即可实现制动控制, 制动控制分为两种: 能量回馈制动和能量消耗制动。永磁同步电机的反电势能够提供所需的制动电流时, 电流将流向电池, 电机工作在能量回馈状态; 当永磁同步电机的反电势不足以提供所需的制动电流时, 电池将会提供剩余的制动电流, 二者电流之和共同消耗在电机的电阻上, 此时电机工作在能耗制动状态, 相量图如图 2 所示。

考虑到永磁同步电机无弱磁控制时, $i_d=0$, 忽略 d 轴铁耗电流, 可由式(1)~(5)推得稳态下永磁同步电机输入功率和电磁功率如下:

$$\begin{cases} P_m = (\omega\psi_f + R_a i_q) i_q \\ P_e = \omega\psi_f i_{qt} \end{cases} \quad (19)$$

由式(19)可以得出, 制动时, 需要提供负的电功率 P_e , 可通过控制 q 轴电流 $i_q < 0$ 来实现。电机

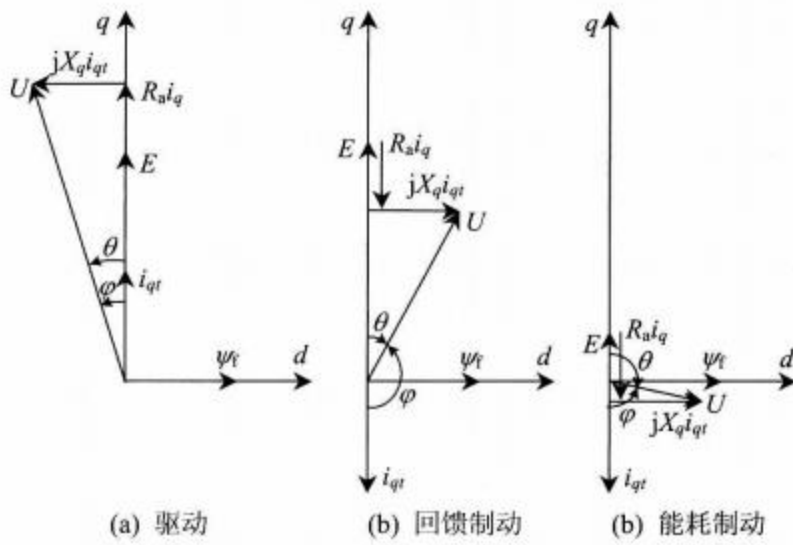


图2 永磁同步电机磁场定向控制下的相量图

Fig. 2 Phasor diagram of PMSM under FOC

输入功率 P_{in} 是 q 轴电流 i_q 的二次函数, 与 x 轴有 2 个交点, 分别是 $-\omega\psi_f/R_a$ 点和原点, 如图 3 所示。若 q 轴电流 $i_q < -\omega\psi_f/R_a$, 输入功率为正, 电机制动消耗功率; 若 q 轴电流 $-\omega\psi_f/R_a < i_q < 0$, 输入功率 P_{in} 为负, 电机制动回馈功率; 若 q 轴电流 $i_q = -\omega\psi_f/(2R_a)$, 输入功率为负的最大值 P_{brkmax} , 电机回馈最大功率。

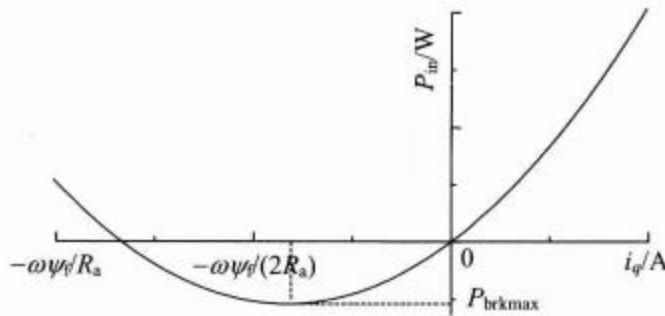


图3 ω 一定, 电机输入功率与 q 轴电流关系

Fig. 3 Relationship between motor input power and q -axis current in a certain ω

根据式(19), 可以得到不同转速下, 电机回馈制动的最大转矩以及电机回馈最大功率的 q 轴电流如图 4 所示。

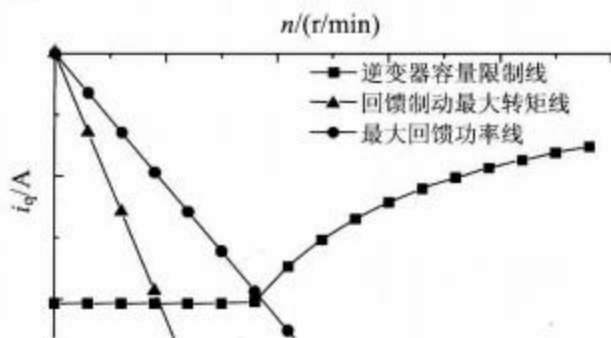


图4 不同回馈制动状态下的 q 轴电流

Fig. 4 q -axis current in different regenerative braking modes

根据以上分析, 可得到能量回馈制动时最大电磁转矩需满足的条件:

$$\begin{cases} T_{ebrk} = -\omega\psi_f^2 / R_a p \\ T_{ebrk} = -T_{emax}, & T_{ebrk} \leq -T_{emax} \\ T_{ebrk} = -P_{en} / \omega p, & P_e < -P_{en} \end{cases} \quad (20)$$

式中: T_{emax} 为电机最大电磁转矩; P_{en} 为电机的额定电磁功率。

制动能量回馈时, 永磁同步电机回收最大功率时的电磁制动转矩如下:

$$\begin{cases} T_{ebrk} = -\frac{\omega\psi_f^2}{2R_a} p \\ T_{ebrk} = -T_{emax}, & T_{ebrk} \leq -T_{emax} \\ T_{ebrk} = -\frac{P_{en}}{\omega} p, & P_e < -P_{en} \end{cases} \quad (21)$$

3 电动汽车制动控制策略分析

3.1 最优回馈制动的解析模型计算

由第 1 节的永磁同步电机、逆变器和电池模型可以推得永磁同步电机输入功率、逆变器损耗功率和电池损耗功率如下:

$$P_{in} = T_e \frac{\omega}{p} + R \left[\left(\frac{\omega^2 L^2}{R_i^2} + 1 \right) \frac{T_e}{p\psi_f} + \frac{\omega\psi_f}{R_i} \right]^2 + \frac{\omega^2 \left[\left(\frac{\omega L^2}{R_i} \frac{T_e}{p\psi_f} + \psi_f \right)^2 + \left(L \frac{T_e}{p\psi_f} \right)^2 \right]}{R_i} \quad (22)$$

$$P_{inv} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(\frac{12t_d V_f}{\pi t_c} + \frac{3k_{on} f_s}{\pi} + \frac{3k_{off} f_s}{\pi} \right) \left[\left(\frac{\omega^2 L^2}{R_i^2} + 1 \right) \frac{T_e}{p\psi_f} + \frac{\omega\psi_f}{R_i} \right] + \left[\frac{2R_{ak} t_d}{t_c} + R_{ds} \left(1 - \frac{2t_d}{t_c} \right) \right] \left[\left(\frac{\omega^2 L^2}{R_i^2} + 1 \right) \frac{T_e}{p\psi_f} + \frac{\omega\psi_f}{R_i} \right]^2 \quad (23)$$

$$P_{br} = \frac{[u_{oc} - \sqrt{u_{oc}^2 - 4(R_s + R_t)(P_{in} + P_{inv})}]^2}{4(R_s + R_t)} \quad (24)$$

电池的回馈功率为

$$P_{bat}(\omega, T_e) = P_{in}(\omega, T_e) + P_{inv}(\omega, T_e) + P_{br}(\omega, T_e) \quad (25)$$

因此, 电池回馈功率大小与电机的电磁转矩、电机角速度有关。在有变速箱的驱动系统构型中, 电机角速度可以与车速解耦, 可通过变速箱和电机输出转矩同时调节电机的工作点, 使其工作在高效率区。在直驱或只有固定减速比减速器的驱动系统构型中, 由于电机角速度与车速耦合, 因此, 只能通过调节电机的输出转矩来达到最优的制动能量回馈。本文只讨论后一种情况, 前一种情况可以在本文的基础上做进一步研究。

电池回馈功率 P_{bat} 对电磁转矩 T_e 求偏导, 如下:

$$\frac{\partial P_{bat}(\omega, T_e)}{\partial T_e} = 0 \quad (26)$$

考虑式(20)中 T_e 的取值范围, 即可得到最优回馈功率下的电磁转矩, 如图 5 所示。

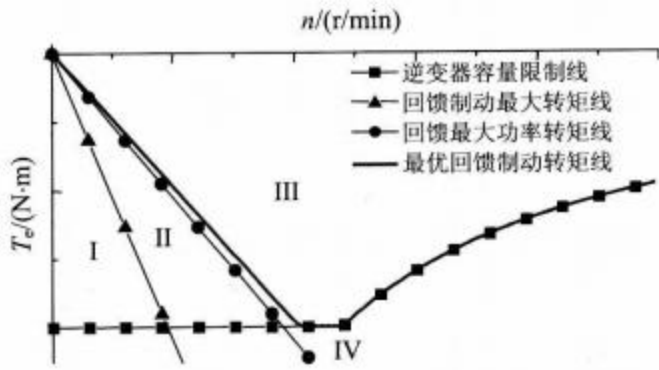


图 5 最优回馈制动转矩

Fig. 5 Optimal regenerative braking torque

图 5 中可分为 4 个区域, 区域 I 为能耗制动区; 区域 II 和区域 III 为回馈制动区, 回馈功率随着远离最优回馈制动转矩线而减小; 区域 IV 为电制动和机械制动混合制动区。因此在回馈制动时, 需求的制动转矩如果在区域 III 中, 则制动全部由电制动来实现。在区域 II 中, 电制动只提供最优制动转矩线上的制动转矩, 剩余由机械制动来提供。在区域 I 中, 为能耗制动, 制动转矩都由机械制动来提供。在区域 IV 中, 只依靠电制动已经不能满足制动需求, 电气制动只提供最优制动转矩线上的转矩, 剩余由机械制动来实现。

3.2 电动汽车制动控制方案分析

本文主要分析电动汽车 3 种制动控制策略: 并联制动控制策略方案 1(如图 6(a))、并联制动控制策略方案 2(如图 6(b))和串联制动控制策略(如图 6(c))。并联制动控制策略方案 1 是指电机制动力和机械制动力按照制动踏板开度线性分布, 踏板开度为零对应电机制动力为零, 踏板开度为 100%对应电机制动力为额定制动力。并联制动控制策略方案 2 是指踏板开度为零对应电机制动力为零, 踏板开度到达临界位置对应电机制动力为额定制动力, 随着踏板开度增加, 电机制动力一直保持不变, 机械制动力在电机额定制动力基础上增加。串联制动控

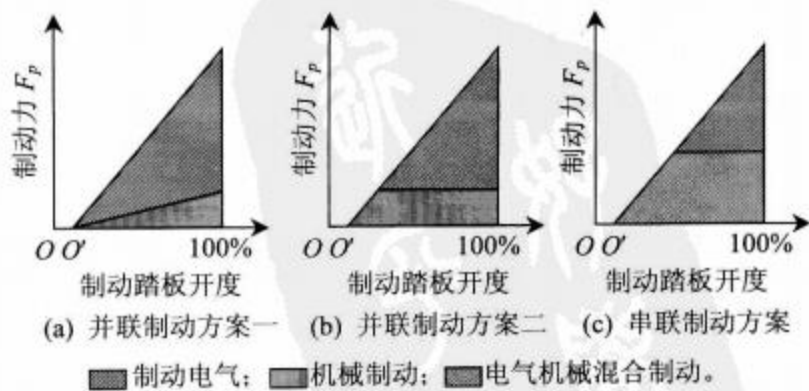


图 6 3 种制动控制策略制动力分配示意图

Fig. 6 Braking force distribution diagram in three braking control strategies

制策略是指电机制动力采用最优制动曲线, 需求的剩余制动力由机械制动力来提供。

3 种制动策略中, 并联制动控制策略方案 1 最容易实现, 只需在原有的制动系统中增加电制动即可; 并联制动方案 2 较容易实现, 需在原有制动系统中修改制动踏板的自由行程即可; 串联制动控制策略则需要原有机械制动系统制动力可实时调节, 实现较为复杂。

3 种制动控制策略电机需要提供的制动力分别如图 7(a)~(c)所示。并联制动控制策略方案 1 中, 需求的制动转矩由两部分来提供, 分别是电机制动转矩和机械制动转矩, 二者按照一定比例(1:4)。并联制动控制策略方案 2 中, 需求的制动转矩首先由电机制动转矩来提供, 制动需求大于电机额定制动力(以 40 N·m 为例)时, 才由机械制动来提供剩余制动力。两种并联制动控制策略制动转矩分配与车速解耦。串联制动控制策略方案中, 根据电机转速和转矩需求, 电机工作在最优能量回馈状态, 若此

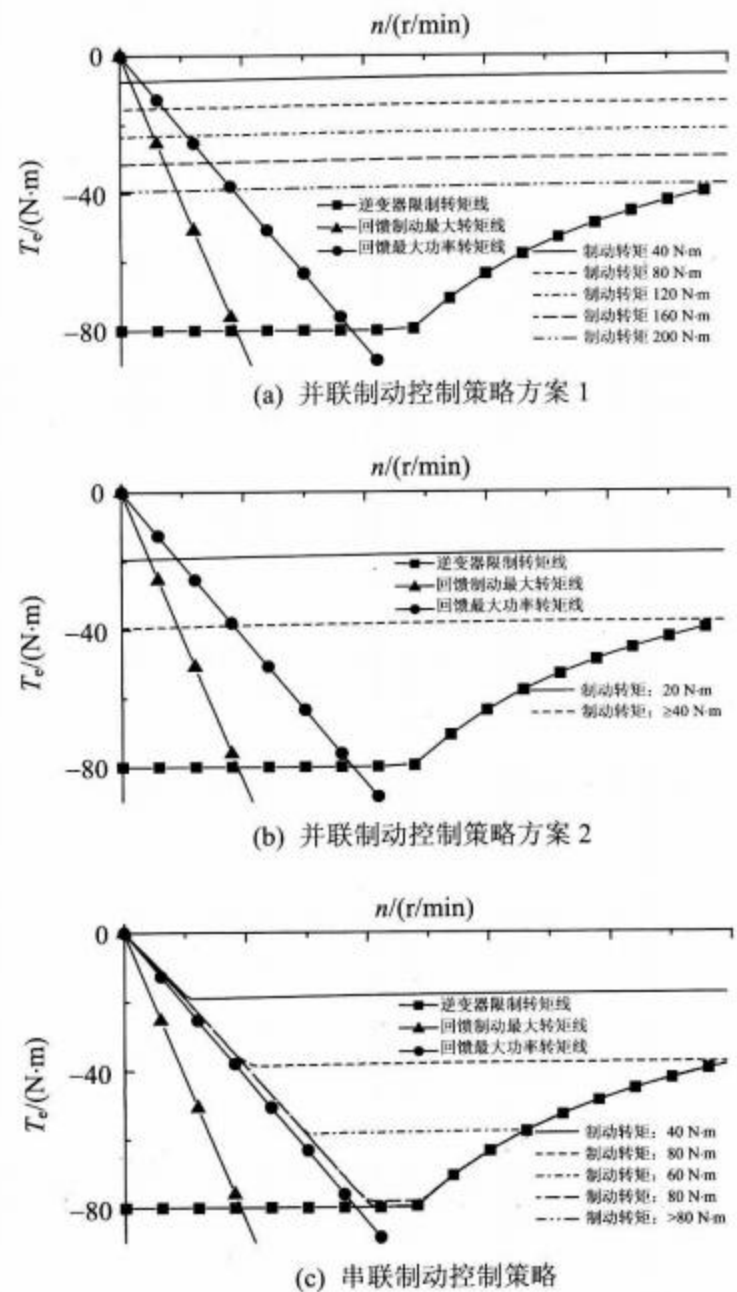


图 7 不同制动控制策略的电机制动电磁转矩

Fig. 7 Braking electromagnetic torque in different braking control strategies

时电机提供的制动转矩能够满足制动转矩需求,则全部由电机来提供制动转矩,反之,机械制动提供剩余制动转矩。串联制动控制策略方案中,可以实现电制动和机械制动的完全解耦,因此可以达到最优的制动控制策略。串联制动控制策略中的制动转矩分配与车速有关。

根据上文分析,3种控制策略下,电制动最优的制动踏板解释如图8所示。并联制动控制策略电制动提供的制动力主要与踏板位置有关,与电机转速基本无关,如图8(a)和(b)所示。串联制动控制策略电制动提供的制动力与制动踏板位置和电机转速都相关,如图8(c)所示。

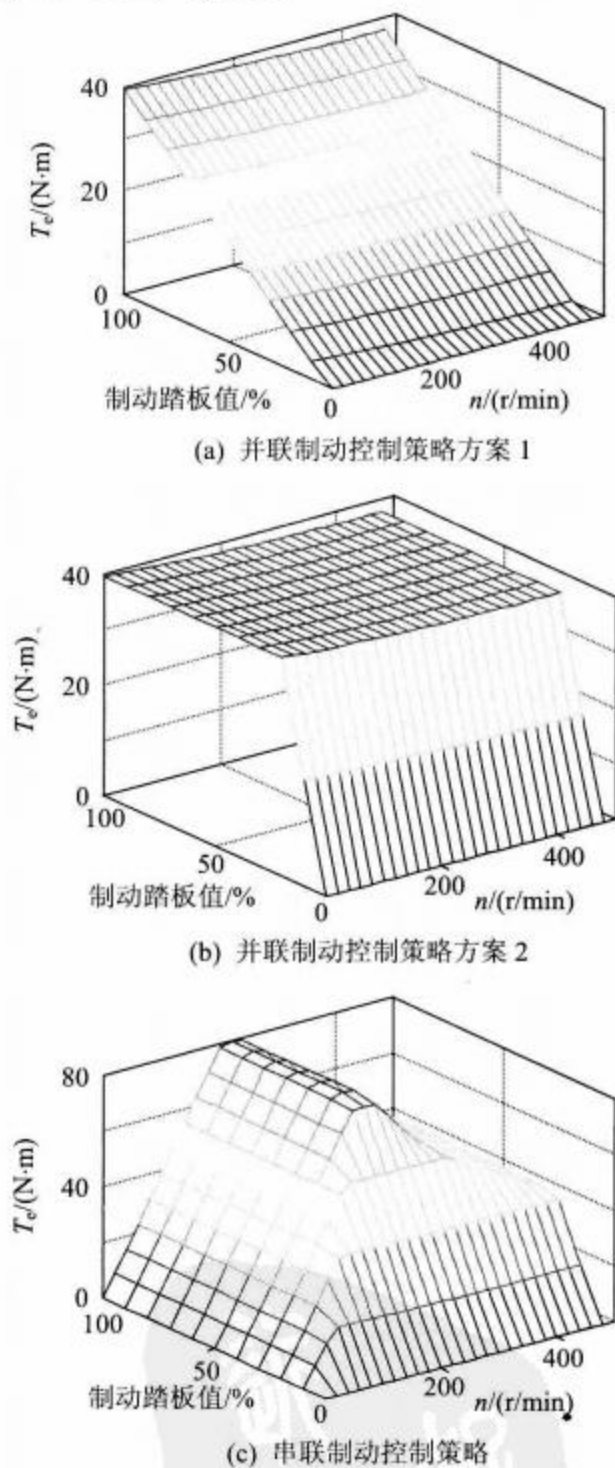


图8 3种制动控制最优的制动踏板解释

Fig. 8 Optimal brake pedal interpretation in three braking control strategies

4 仿真与试验结果

4.1 基于 Matlab/Simulink 的仿真分析

本文重点从能量角度研究电动汽车永磁同步

电机驱动系统制动能量回馈的共性问题,关于电动汽车的动力学特性(如 ABS 等)暂不考虑。仿真和试验所采用的电动汽车为四轮轮毂电机直接驱动的微型电动汽车。对于具有变速器的单电机驱动系统或其他构型可通过类似分析获得。

电机为表贴式永磁同步电机,逆变器采用功率型 MOSFET 作为开关器件,电池采用磷酸铁锂电池。永磁同步电机参数如表1所示。整车动力学及电池参数如表2所示。

表1 表贴式永磁同步电机参数

Tab. 1 Specifications of surface mounted permanent magnet synchronous motor

电机参数	数值
额定相电压/V	21.6
额定相电流/A	30
额定转速/(r/min)	500
额定转矩/(N·m)	30
极对数	23
定子电阻/ Ω	0.031
d轴电感/H	7.6×10^{-5}
q轴电感/H	7.6×10^{-5}
转子永磁体磁链/Wb	0.020 4
铁耗电阻/ Ω	$0.006\omega+1.5$

表2 电动汽车动力学及电池参数

Tab. 2 Parameters of electric vehicle and battery

整车参数	数值
整备质量/kg	660
车轮半径/m	0.25
迎风面积/ m^2	1.4
空气阻力系数	0.4
滚动阻力系数	0.014
电池电压/V	53
电池额定容量/Ah	100

在 Matlab/Simulink 中搭建整车系统模型,以验证不同制动控制策略下制动能量回收效率。采用城市道路工况仿真来验证不同制动控制策略下四轮驱动微型电动汽车的能流图,由于微型电动汽车的最高车速只有 60 km/h,因此将城市道路工况循环的车速按照 60/80 的比例缩小,如图9所示。电池初始荷电状态(state of charge, SOC)为 0.9。

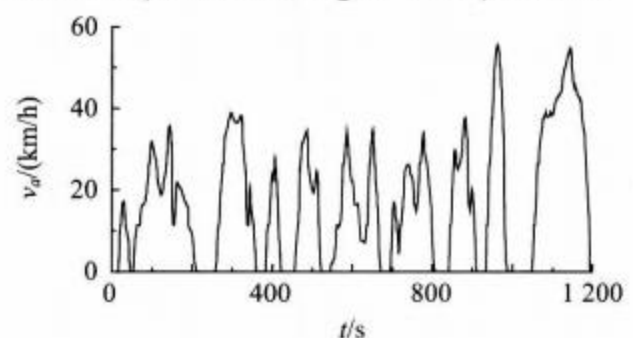


图9 城区工况

Fig. 9 Urban drive cycle

上述城市工况下，3种制动控制策略下微型电动汽车电驱动系统的能流图如图10所示。3种制动

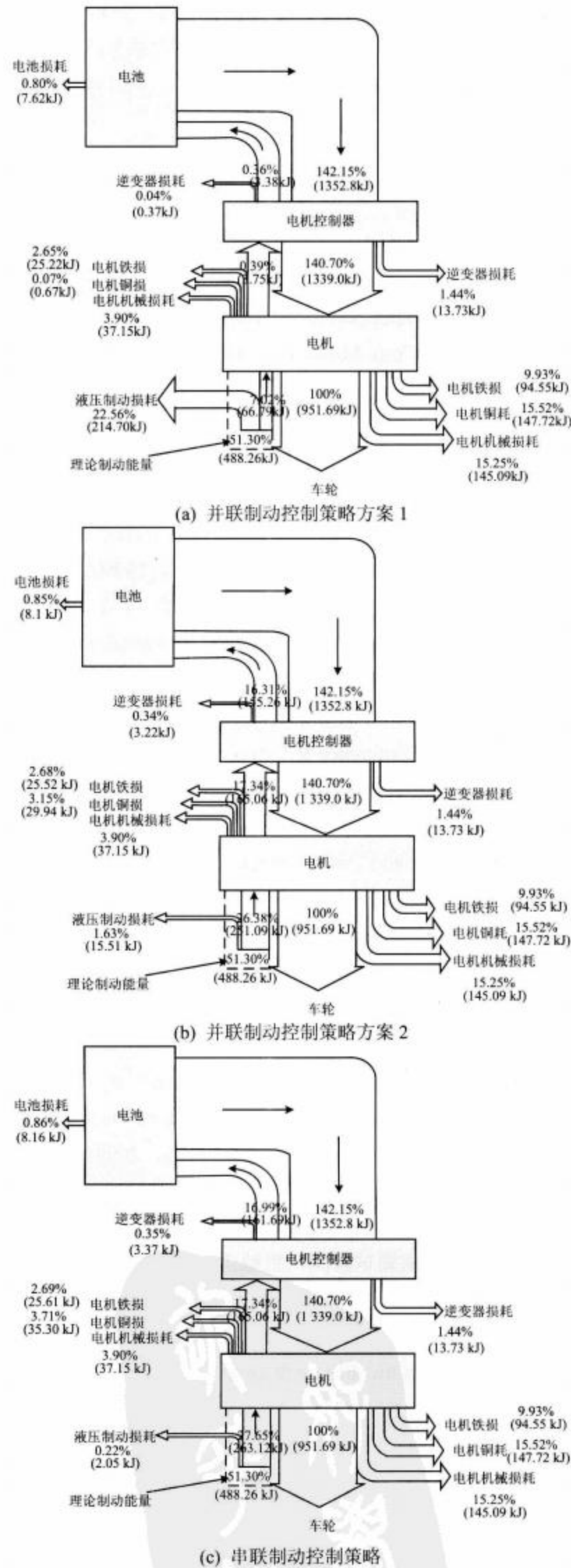


图10 3种制动控制策略能流图

Fig. 10 Energy flow diagrams in three braking control strategies

控制策略的驱动能流部分相同，制动能流部分差别较大。并联制动控制策略方案1回收能量很少，并联制动控制策略方案2回收能量较多。因此，通过增大并联控制策略的制动踏板自由行程，采用电制动来代替机械制动，可有效的增加制动回收的能量。串联制动控制策略回收能量最多，可以达到最优的制动能量回馈。

4.2 试验结果

制动能量回馈时，永磁同步电机模型计算出来的电机效率MAP图与实测的电机效率MAP图基本相符，如图11所示。

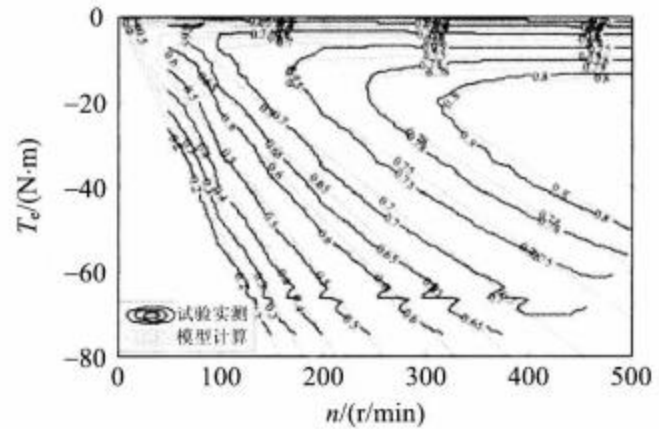


图11 制动能量回馈效率MAP图

Fig. 11 Regenerative braking efficiency MAP

本文第2节分析了永磁同步电机制动原理，当制动转矩需求较小时，电机工作在制动能量回馈状态；当制动转矩需求增加，以致反电势不足以提供这么大的制动转矩，电机需要消耗电池功率来补充剩余制动转矩需求，电机工作在能耗制动状态。两种制动状态切换试验如图12所示，电机转速为150 r/min，直流侧电流开始随着制动转矩增加从零开始增加到最大值后重新回到零，此过程为回馈制动过程，有最大制动回馈功率。随着制动转矩进一步增加，直流侧电流变为正值，电机工作在能耗制动状态。

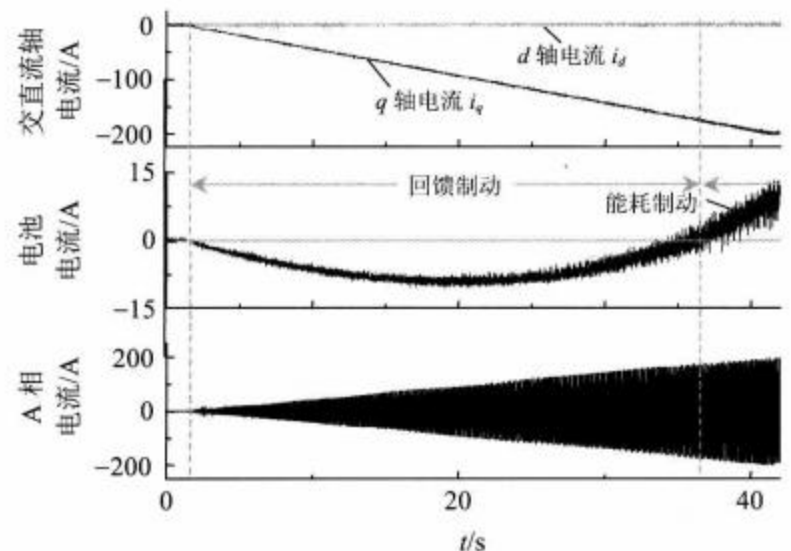


图12 150 r/min时磁场定向制动控制试验

Fig. 12 Brake Control of FOC at 150 r/min

各转速下实测的回馈制动最大转矩线与最大回馈功率转矩线与第2节分析结果进行对比,如图13所示。

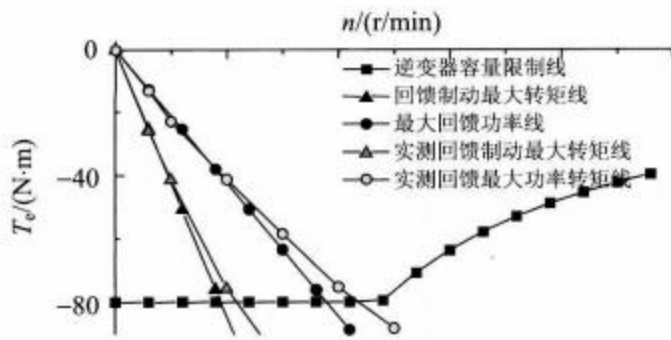


图13 回馈制动最大转矩线和回馈最大功率转矩线
Fig. 13 Maximum torque line in regenerative braking mode and torque line with maximum regenerative power

低负载下,试验中实测的再生制动最大转矩线和最大回馈功率转矩线与理论分析吻合,随着负载增加,实测曲线会稍偏离理论结果,这是由于负载增加,电机定子绕组变热导致定子电阻增加。因此,在实际电机运行时,需要根据电机内的温度对再生制动曲线进行修正。

台架上模拟电动汽车从40 km/h(电机转速:424.4 r/min)减速到零,3种制动控制策略下制动转矩与能量回馈效率的关系,如图14所示。并联制动控制策略方案1在较小制动转矩需求下,回馈效率很低,随着需求的制动转矩的增加,回馈效率逐渐增加,并且逐渐接近并联制动控制策略方案2的回馈效率。并联制动控制策略方案2在制动转矩需求较小时,制动回馈效率与串联制动控制策略基本相同,随着需求的制动转矩的增加,回馈效率会小于串联制动控制策略。

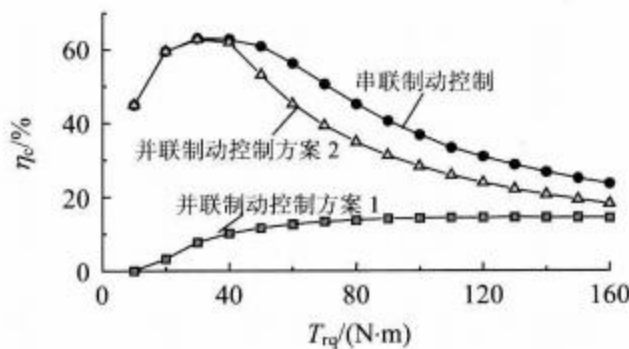


图14 能量回馈效率与需求制动转矩关系
Fig. 14 Relationship between regenerative energy efficiency and required braking torque

5 结论

电动汽车受制于电池技术,续航里程一直是电动汽车关注焦点,因此,研究电动汽车最优制动能量回馈具有重要意义。在分析了永磁同步电机的制动控制原理后,考虑电动汽车驱动系统永磁同步电

机、逆变器和电池模型,给出了最优的制动控制策略。分析了常用的3种制动控制策略下的回馈效率,通过合理分配电制动和机械制动比例,并联制动控制策略可以达到比较优的效果;串联制动控制策略中电制动和机械制动可实时调节,制动回馈效率可达最优。

参考文献

- [1] Gao Y, Chen L, Ehsani M. Investigation of the effectiveness of regenerative braking for EV and HEV [C]//Future Transportation Technology Conference & Exposition. Costa Mesa, CA, USA: Electric and Hybrid Electric Vehicles, Hybrid Electric Control Systems, 1999.
- [2] Ehsani M, GAO Y, Butler K L. Application of electrically peaking hybrid(ELPH) propulsion system to a full size passenger car with simulated design verification[J]. IEEE Transaction on Vehicular Technology, 1999, 48(6): 1779-1881.
- [3] Gao Y, Ehsani M. Electronic braking system of EV and HEV-integration of regenerative braking, automatic braking force control and ABS[C]// Future Transportation Technology Conference & Exposition. Costa Mesa, CA, USA: Smart Vehicle Control Issues, 2001.
- [4] Walker A M, Lamperth M U, Wilkins S. On friction braking demand with regenerative braking[C]//20th Annual Brake Colloquium And Exhibition. Phoenix, AZ, USA: Electronics, 2002:
- [5] 张俊智,薛俊亮,陆欣,等.混合动力城市客车串联式制动能量回馈技术[J].机械工程学报,2009,45(6): 102-106.
Zhang Junzhi, Xue Junliang, Lu Xin, et al. Series regenerative braking technique for hybrid electric buses [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(6): 102-106.
- [6] 张俊智,陆欣,张鹏君,等.混合动力城市客车制动能量回收系统道路试验[J].机械工程学报,2009,45(2): 25-30.
Zhang Junzhi, Lu Xin, Zhang Pengjun, et al. Road test of hybrid electric bus with regenerative braking system [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2009, 45(2): 25-30.
- [7] 赵辉,李铁才,孙立志,等.电池供电的永磁电动机系统的再生制动[J].电机与控制学报,1999,3(4):207-210.
Zhao Hui, Li Tiecai, Sun Lizhi, et al. Regenerative braking of permanent magnet motor system fed by battery [J]. Electric Machines and Control, 1999, 3(4): 207-210.
- [8] 陈荣,邓智泉,严仰光.基于转子磁场定向控制的永磁

- 同步电机制动过程分析[J]. 电工技术学报, 2004, 19(9): 30-36.
- Chen Rong, Deng Zhiqian, Yan Yangguang. Analysis of braking process of permanent magnet synchronous motor based on rotor field-oriented control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(9): 30-36.
- [9] 章玮, 潘剑, 梁文毅. 永磁同步电动机伺服系统再生制动过程分析[J]. 微电机, 2008, 41(3): 4-6.
- Zhang Wei, Pan Jian, Liang Wenyi. Research on regenerative braking of permanent magnetic synchronous motor servo system[J]. Micromotor, 2008, 41(3): 4-6.
- [10] Urasaki N, Senjyu T, Uezato K. An accurate modeling for permanent magnet synchronous motor drives[C]// Applied Power Electronics Conference and Exposition. New Orleans, LA, 2000: 387-392.
- [11] Morimoto S, Tong Y, Takeda Y, et al. Loss minimization control of permanent magnet synchronous motor drives [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1994, 41(5): 511-517.
- [12] Lai J S, Young R W, McKeever G W. Efficiency consideration of DC link soft-switching inverters for motor drive applications[C]// Power Electronics Specialists Conference, PESC' 94 Record. 1994: 1003-1008.
- [13] Lai J S, Young R W, Ott G W, et al. Efficiency modeling and evaluation of a resonant snubber based soft-switching inverter for motor drive applications[C]//Proc. 26th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Atlanta, GA, USA: IEEE, 1995: 943-949.
- [14] Dong W, Choi J Y, Li Y, et al. Efficiency considerations of load side soft-switching inverters for electric vehicle applications[C]//Proceedings IEEE Applied Power Electronics Conference. New Orleans, LA: IEEE, 2000: 1049-1055.
- [15] Benini L, Castelli G, Macci A, et al. Discrete-time battery models for system-level low-power design[J]. IEEE Transactions on VLSI Systems, 2001, 9(5): 630-640.
- [16] Gao L, Liu S, Dougal R A. Dynamic lithium-ion battery model for system simulation[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2002, 25(3): 495-505.
- [17] Chiang Y H, Sean W Y, Ke J C. Online estimation of internal resistance and open-circuit voltage of lithium-ion batteries in electric vehicles[J]. Journal of Power Source, 2011, 196(8): 3921-3932.



卢东斌

收稿日期: 2012-07-03。

作者简介:

卢东斌(1982), 男, 博士研究生, 研究方向为电动汽车电驱动系统控制, hustludb@126.com;

欧阳明高(1958), 男, 教授, 研究方向为汽车动力系统与控制;

谷靖(1986), 男, 博士研究生, 研究方向为电动汽车整车能量管理与控制;

李建秋(1972), 男, 教授, 研究方向为汽车电子。

(责任编辑 王剑乔)

