

用双开关磁阻电机的汽车能量再生制动技术

何仁¹, 陈庆樟^{1,2}

(1. 江苏大学 江苏省汽车工程重点实验室, 江苏 镇江 212013; 2. 江西农业大学 工学院, 南昌 330045)

摘要:在分析开关磁阻电机再生制动机理的基础上,结合汽车制动要求,建立了再生制动转矩计算及能量回馈模型,设计了基于双开关磁阻电机前驱的汽车制动能量回收系统方案,并提出了系统控制策略。在汽车制动能量再生试验台上进行了在环仿真试验,结果表明,采用该系统方案的制动能量回收率在中小制动强度下比单个电机方案高10%以上,在制动强度越大,双机制动能量回收率值比单机制动时的越大。

关键词:车辆工程; 制动能量再生; 开关磁阻电机; 双电机方案

中图分类号:U463.52 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5497(2009)05-1137-05

Vehicle regenerative braking using dual switched reluctance motors/generators

HE Ren¹, CHEN Qing-zhang^{1,2}

(1. Jiangsu Province Key Laboratory of Automotive Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;
2. College of Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: Based on analyzing the mechanism of switched reluctance motor/generator regenerative braking, a model was set up for the regenerative braking torque computing and energy reclaiming. A dual switched reluctance motors/generators regenerative braking scheme was designed for a front-wheel-drive vehicle, and its control strategy was developed. The hardware-in-loop test was performed on the vehicle regenerative braking test bench, and the results show that the energy reclaiming ratio in the dual motors/generators scheme is 10% higher than that in the single motor/generator scheme at low to middle braking intensities, and the larger the braking intensity, the higher the energy reclaiming ratio.

Key words: vehicle engineering; regenerative braking; switched reluctance motor/generator; dual motors/generators scheme

汽车能量再生制动系统将汽车行驶的动能转化成电能回收再利用,提高了汽车能量综合利用率^[1-2],作为系统能量转换装置的制动电机是实现制动能量回收的最关键部件之一。开关磁阻电机(SRM)结构简单、成本低、容错能力强、起动性能好、没有电流冲击、效率高、调速范围宽,具有良好

的四象限工作状态,被认为是电动汽车及混合动力汽车中的一种最具潜力的驱动方式之一^[3-4],目前国际上逐渐采用感应电机、磁阻电机取代直流电机来获得更高的动静态性能。

本文在分析开关磁阻电机再生制动机理的基础上,结合汽车制动过程要求,建立了开关磁阻电

收稿日期:2007-11-14.

基金项目:江苏省自然科学基金项目(BK2007093).

作者简介:何仁(1962-),男,教授,博士生导师. 研究方向:汽车综合节能与环保技术,汽车机电一体化技术.

E-mail:email:heren@ujs.edu.cn

机再生制动转矩计算及能量回馈模型,并设计了基于双开关磁阻电机前驱的汽车制动能量回收系统方案。

1 SRM 再生制动工作机理

开关磁阻电机的转矩是磁阻性质,其运行遵循磁阻最小原理,本课题使用的是四相 8/6 极开关磁阻电机,结构原理如图 1 所示。

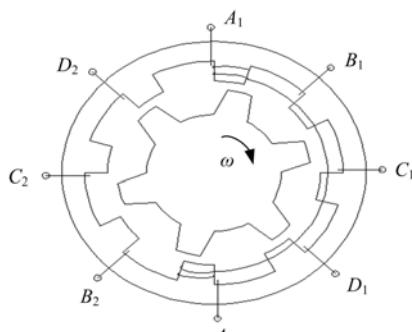


图 1 四相 8/6 极开关磁阻电机结构原理图

Fig. 1 Cross structure of four phase 8/6 type SRM

若忽略磁路的非线性,开关磁阻电机模型表示为^[5]

$$T = \frac{i^2}{2} \frac{\partial L(\theta)}{\partial \theta} \quad (1)$$

式中: L 为任意转子位移角下的相电感; i 为相电流; θ 为转子角位移。

转矩的方向与电流的方向无关,仅取决于电感随转角的变化情况,在电感上升期间,相绕组通以电流($\partial L / \partial \theta > 0$),则产生正转矩,处于电动机状态;在电感下降期间,($\partial L / \partial \theta < 0$),相绕组通以电流,则产生负转矩,处于发电机状态。通过调节开通角 θ_{on} 、关断角 θ_{off} 可实现电机的电动模式与再

生制动模式工作状态。

图 2 是开关磁阻电机发电时相电感 $L(\theta)$ 和相电流 $i(t)$ 的波形。图中,ABE 为励磁区域,转子位置满足 $\theta_{on} < \theta < \theta_{off}$ 时,对应的相主开关导通,吸收电能;BCDE 为发电区域,转子位置 $\theta > \theta_{off}$,对应相主开关关断,相电流通过续流二极管向母线上回馈能量,直到 i 降为零,这个过程是发电(再生制动)。一个周期中发电有效能量为续流回馈能量与励磁能量的代数和。

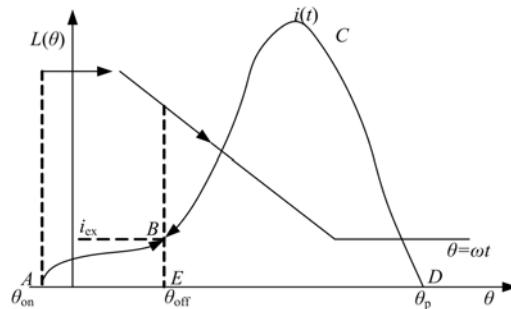


图 2 SRM 发电模式下的相电感和相电流

Fig. 2 SRM's phase inductance and current under generator mode

2 双 SRM 能量再生制动系统设计

汽车能量再生制动电机还起到驱动作用,把回收的能量合理地用到汽车驱动上,实现提高汽车能量综合利用的目的。本课题采用 2 个 7.5 kW 的开关磁阻电机作为汽车 2 个前轮的轮式驱动动力源,这样不但可以消除传动中的机械磨损与功率损耗,提高传动效率,还可以更充分地提高制动能量回收及利用率。

图 3 为本课题的再生制动系统模型结构原理

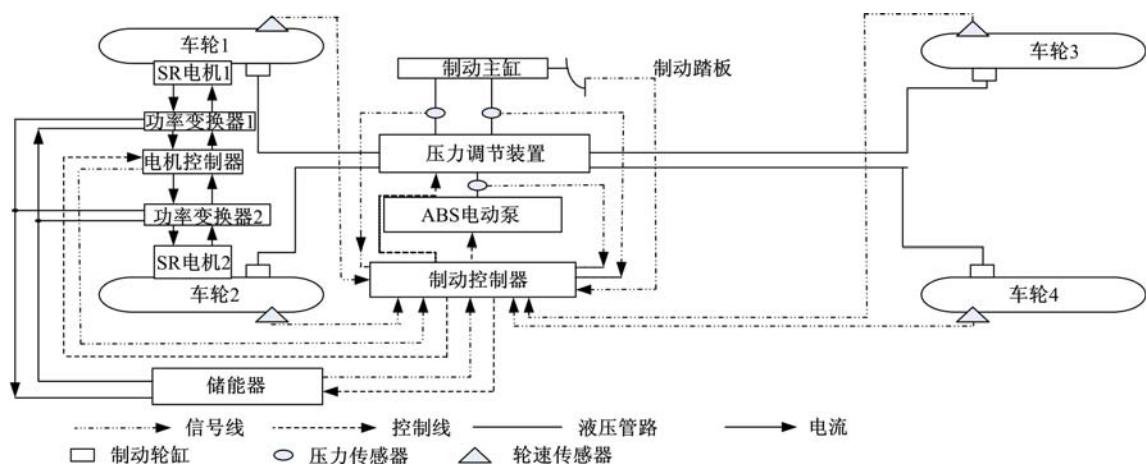


图 3 双 SRM 能量再生制动系统模型结构原理图

Fig. 3 Model sketch of energy regenerative braking based on double SRM

图。制动系统中的液压 ABS 制动部分与能量再生制动部分集成在一起,制动电机参与防抱死制动控制。制动控制器根据制动需求,对 ABS 电动泵、压力调节装置调整常规液压制动力大小,同时把按前后轮制动力分配要求及制动工况要求等条件计算出来的电机制动功率及车辆滑移率状态等信息送给电机控制器,电机控制器对 2 个开关磁阻电机制动功率、制动力矩进行调整控制,实现电机制动。储能器由阀控铅酸蓄电池及超级电容组合而成,以保证其既有较高的能量密度又有较高的功率密度,超级电容起着一个能量缓冲器的作用,这样可充分回收和利用制动能量。

制动控制器采用 TMS320C6713 DSK 作为微处理芯片,图 4 为控制器结构示意图。它的功能是实现前后制动力矩分配策略、机电制动力矩分配策略、车轮防抱死制动控制策略等。

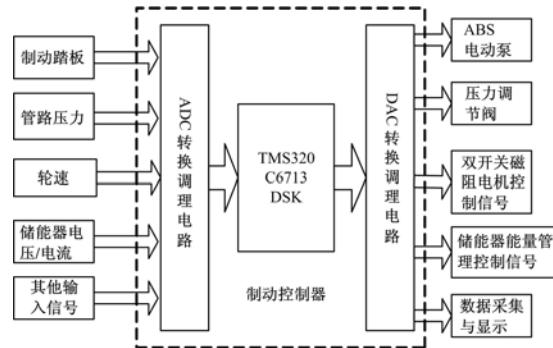


图 4 制动控制器结构示意图

Fig. 4 Sketch of integrated controller structure

图 5 为双开关磁阻电机制动控制电路系统。控制器根据制动控制器发送过来的需求电机制动矩、车辆转向角信号、车速信号计算出各电机制动力矩,通过驱动电路控制 2 个功率变换器开关电路,实现相应的制动力矩,把汽车制动动能转化成

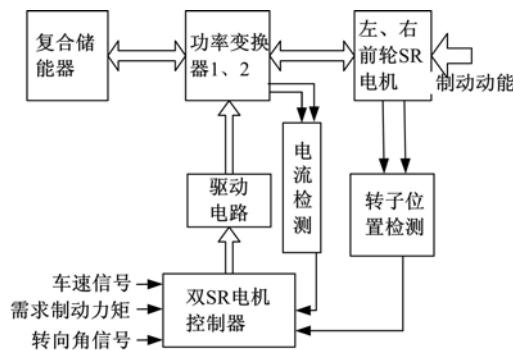


图 5 双 SRM 再生制动控制电路系统

Fig. 5 Double motor regenerative braking control

电能,回馈到复合储能器中。

3 系统控制模型策略

3.1 发电功率计算及再生制动转矩控制

如果忽略电磁饱和效应及相内阻压降,根据开关磁阻电机再生制动发电原理,其相电压平衡式为^[6]

$$u = \omega L(\theta) \frac{di_g(\theta)}{d\theta} + \omega i_g(\theta) \frac{dL}{d\theta} \quad (2)$$

式中: u 为相电压; ω 为电机转速; i_g 为发电模式下相电流。

设提供的母线电压 U_{bus} 不变,有 $u=U_{bus}$,求解式(2)可得发电模式下相电流表达式为

$$i_g(\theta) = \frac{U_{bus}}{\omega \frac{dL(\theta)}{d\theta}} (1 - e^{-\frac{\theta}{\tau(\theta)}}) \quad (3)$$

式中: $\tau(\theta) = \frac{L(\theta)}{dL(\theta)/d\theta}$ 。

假设 U_{bus} 始终大于电机运动电动势, θ_p 为磁链和续流电流均达到最小时的转子位移角,对确定的电机,确定的转速 θ_p 是确定的, N_r 为转子极数,这里 $N_r=6$,如图 2 中,转子位移角从 θ_{on} 到 θ_{off} 为励磁电流,而从 θ_{off} 到 θ_p 则为发电阶段,因此开关磁阻电机再生制动时发电有效电流为

$$r_{gr} = \sqrt{\frac{N_r}{2\pi} \int_{\theta_{off}}^{\theta_p} i_g^2(\theta) d\theta} - \sqrt{\frac{N_r}{2\pi} \int_{\theta_{on}}^{\theta_{off}} i_g^2(\theta) d\theta} \quad (4)$$

所以发电功率为

$$P_{gr} = ui_{gr} = U_{bus} i_{gr} \quad (5)$$

在制动过程中,根据制动系统控制策略,可计算出再生制动分担率,从而确定所需再生制动力矩的大小 T_{bneed} ,结合式(5)可得再生制动力矩为

$$T_{av} = T_{bneed} = U_{bus} i_{gr} / \omega \quad (6)$$

从式(3)至式(6)可以看出,要控制开关磁阻电机再生制动力矩,关键是要得到理想的电流波形,提高参考电流 i_{ex} 可以增加励磁有效电流,从而明显提高再生制动力与效率,而电流波形由开通角 θ_{on} 、关断角 θ_{off} 决定。 θ_{on} 、 θ_{off} 可根据有限元计算结果通过仿真寻优获得^[7],开关磁阻电机的激励电流 i_{ex} 可通过调节 PWM 的占空比来控制。

3.2 制动力分配策略

3.2.1 前后制动力分配策略

为达到制动能量回收最优化的目的,制动过程中需在保证制动效能的前提下尽可能控制优先由电机提供制动力矩。制动控制器在获取了制动

需求信息后按理想制动力分配 I 曲线进行计算,得出前后制动力 $F_{\mu 1}$ 和 $F_{\mu 2}$,当 $F_{\mu 1} \leq F_{\text{remax}}$ (F_{remax} 为根据储能器充电状态、双开关磁阻电机功率等计算出来的最大电机可提供的制动力)时,则前轴由电机单独完成制动;当 $F_{\mu 1} > F_{\text{remax}}$ 时,则由电机最大制动力与液压制动力共同来实现前轴制动,即 $F_{\mu 1} = F_{\text{remax}} + F_{\text{hl}}$ (F_{hl} 为常规液压制动系统提供的前轴制动力)。

前后制动力分配控制方法是通过对后轮制动液压压力调节阀进行控制实现的,当后轮在部分制动时,速度传感器发出 4 个车轮的转速信号,制动控制器根据这些信号计算车轮的转速及滑移率。如果后轮滑移率大于设定值 λ_{th} ,则由制动控制器调节后轮制动压力,使后轮制动降低,以保证后轮不会先于前轮抱死;当后轮滑移率小于设定值时,控制器调节后轮制动压力,增加后轮制动压力,以确保制动效果。

3.2.2 机电制动力分配策略

在按理想制动力分配 I 曲线进行制动力分配的基础上,前轴尽可能采用电机制动模式。以电机制动能力为依据,采用 3 种不同的电机制动模式,第一种为轻度制动,设置值为制动强度小于 0.1 时,单独采用前轴的电机制动;第二种为中度制动,制动需求按理想制动力分配 I 曲线,分配到前轴上的制动力小于电机所能提供的最大制动力 F_{bregmax} ,采用前轴电机制动加后轴按 I 曲线分配产生的摩擦制动;第三种为重度制动,制动需求按理想制动力分配 I 曲线,分配到前轴上的制动力大于电机所能提供的最大制动力 F_{bregmax} ,采用前轴电机与摩擦制动复合制动加后轴按 I 曲线分配产生的摩擦制动,并且电机参与防抱死制动控制。

3.3 电机防抱死制动控制策略

对开关磁阻电机外加一个控制电压 E_{ab} 来实现电机再生制动力矩防抱死控制,在滑移率低于参考值时, E_{ab} 为零,当滑移率超过参考值时, E_{ab} 增大,使得电机制动动力矩减小,达到防止电机制动过程中车轴抱死的目的。

3.4 双电机差速控制策略

在驱动时,根据来自加速踏板的转矩输入量和与方向盘操作对应的前轮转向角度输入量,参考路面状况和估算的偏转率,算出每个车轮在转向时的目标滑移率,通过开关驱动电路控制左右驱动轮独立地分配转矩^[8]。

4 仿真实验

图 6 为在 FUDS(联邦城市工况)前 400 s,对采用本文设计的能量再生制动系统方案能量回收与采用单一电机能量回收进行仿真比较。仿真中单电机功率为 30 kW(发电功率为 20 kW),双电机功率为 15 kW(发电功率为 10 kW),图中 SOC 为储能器充电状况,可以看出,该工况下双 SR 电机能量回收率比单电机能量回收率多 10% 以上。

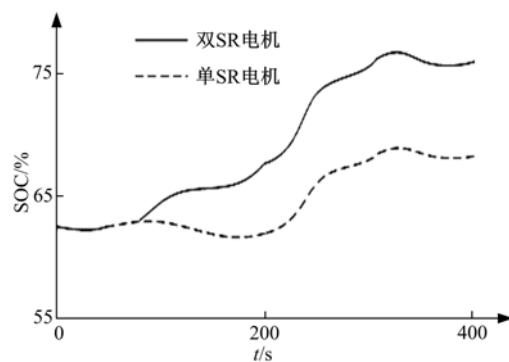


图 6 单、双 SRM 系统能量回收比较

Fig. 6 Reclaiming of braking energy between single and double SRM

图 7 为车辆转弯制动工况单、双电机的仿真结果,初始车速为 60 km/h,在 $t=0.5$ s 时输入 90° 转向阶跃,制动时间为 4.5 s,由超级电容单独储能,初始 SOC 设为 30%。从图 7 可以看出,在转弯制动中,采用单电机时横向加速度和横摆角速度变化幅度大,车辆行驶制动稳定性不如双电机制动,双电机制动方式制动距离比单电机也短些。从图 7(d)中可以看出,单电机制动时纵向加速度波动幅度比双电机制动的大。

为比较基于双开关磁阻电机再生制动系统的调试与性能,在本课题组建立的汽车制动能量再生试验台上进行了在环仿真实验。试验中用变频负载电机模拟工况,惯性飞轮模拟汽车惯性,开关磁阻电机为能量再生制动电机,采用超级电容与蓄电池并联的复合储能器回收制动能量。在一个制动循环中,分别对单电机回收、双电机回收进行比较试验。因为一个制动循环中制动能量不多,试验系统由超级电容单独完成储能功能,这样便于测试比较。试验结果用超级电容能量状态值(SOE)表示,制动初速度为 100 km/h,制动强度分别取 0.1、0.3、0.5 g,路面附着系数取 0.7,测试结果如表 1 所示。

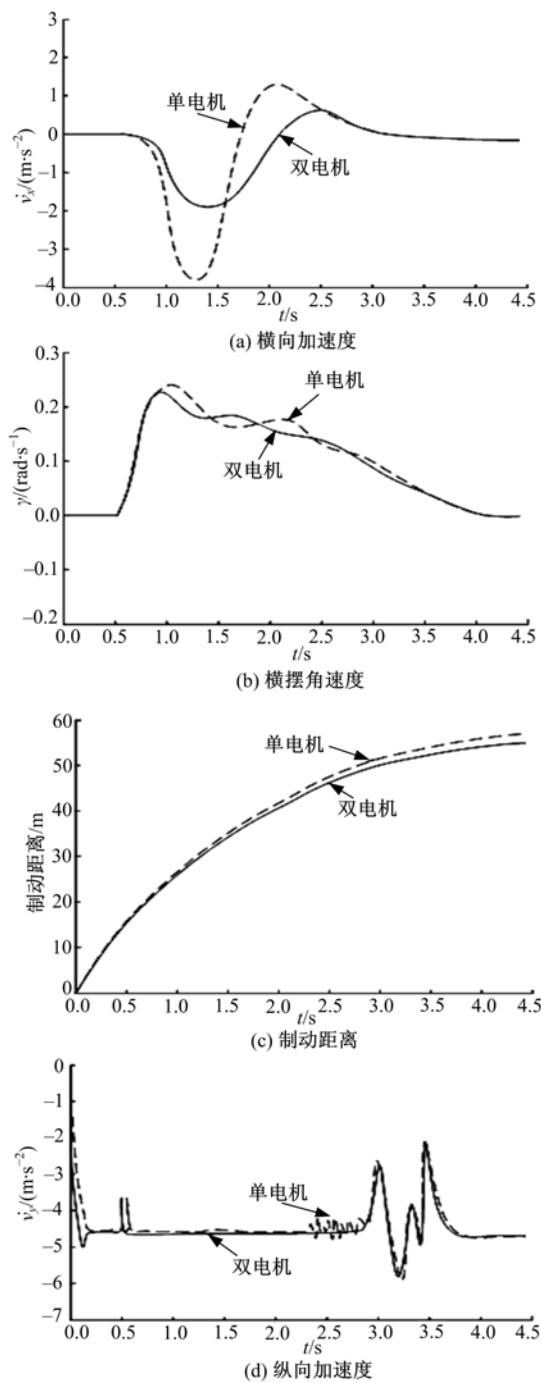


图7 单、双SRM系统转弯制动仿真结果

Fig. 7 Simulation results of turning-braking between single and double SRM

表1 测试结果比较

Table 1 Comparison of test results

测试项目	回收电机					
	单SR电机			双SR电机		
制动强度/g	0.1	0.3	0.5	0.1	0.3	0.5
SOE	0.82	0.66	0.47	0.93	0.84	0.85

5 结束语

在相同电机额定功率条件下,采用双电机回收能量比单电机多回收10%以上。在制动强度较大时,双机制动效能明显强于单电机,在机电制动力矩分配中,可承担更大的制动力矩,所以制动能量回收率远比单个电机再生制动系统能量回收率高。同时,采用双机制动方式的车辆制动行驶稳定性要比单机制动方式好,制动距离短。

采用前轮双开关磁阻电机布置形式的汽车混合动力方式,具有较高的驱动系统功率质量比,还消除了传动中机械磨损与功率损耗,有较高的传动效率、电机驱动效率和能量再生制动效率,整车综合能量利用率明显提高。

参考文献:

- [1] 何仁. 汽车制动能量再生方法的探讨[J]. 江苏大学学报:自然科学版, 2005(6):1-4.
He Ren. Study on methods of regenerative braking energy of automobile[J]. Journal of Jiangsu University(Natural Science Edition), 2005(6):1-4.
- [2] 何仁,孙龙林,吴明. 汽车新型储能动力传动系统节能机理[J]. 长安大学学报:自然科学版, 2002, 22(3):67-71.
He Ren, Sun Long-lin, Wu Ming. Fuel-saving mechanism of new energy-storing powertrain[J]. Journal of Chang'an University(Natural Science Edition), 2002, 22(3):67-71.
- [3] Miller J M, Emadi A, Rajarathnam A V, et al. Current status and future trends in more electric car power systems[C]// IEEE Veh Technol Conf, Houston, TX, 1999.
- [4] Rahman K M, Fahimi B, Suresh G, et al. Advantages of switched reluctance motor applications to EV and HEV: Design and control issues [J]. IEEE Trans, 2000, 36: 119-121.
- [5] 吴建华. 开关磁阻电机设计与应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2001.
- [6] Fahimi B, Emadi A. A switched reluctance machine-based starter/alternator for more electric cars[J]. IEEE Trans, 2004, 19:116-124.
- [7] Torrey David A. Switched reluctance generators and their control[J]. IEEE Trans, 2002, 49:3-14.
- [8] Park Jung-Woo, Koo Dae-Hyun, Kim Jong-Moo, et al. High performance drive unit for 2-motor driven electric vehicle[C]// IEEE Proc 4th Applied Power Electronics Conf and Exp Dallas, 1999.