DOI: 10.3901/JME.2020.10.181

轮毂电机电动汽车的变压充电再生制动控制*

王骏骋 何 仁

(江苏大学汽车与交通工程学院 镇江 212013)

摘要: 为提升再生制动系统能量回收效率以及平衡动力电池包中单体动力电池的性能差异,提出一种基于 BMS 的轮毂电机变压充电结构,并对变压充电再生制动控制方法进行深入研究。介绍基于 BMS 的轮毂电机变压充电结构组成方式以及变压充电再生制动控制方法的工作原理;在建立轮毂电机变压充电理论模型的基础上,探索轮毂电机电动汽车的变压充电再生制动控制规律;采用最小二乘法设计充电电压求取控制算法,并通过台架试验验证充电电压求取公式的拟合精度;通过 Matlab/Simulink 仿真,模拟在不同制动工况下采用再生-液压复合制动系统进行防抱死控制的仿真过程。结果表明,变压充电再生制动控制方法能够精确实施轮毂电机的再生制动行为。

关键词: 汽车工程; 轮毂电机; 再生制动; 变压充电; 制动力矩

中图分类号: U461

Voltage Variable Charging Regenerative Braking Control Strategy for In-wheel Motors Driven Vehicle

WANG Juncheng HE Ren

(School of Automobile and Traffic Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013)

Abstract: To improve the regenerative braking energy recovery efficiency and balance the performance difference of the individual battery in a power battery pack, a voltage variable charging structure for an in-wheel motor is designed based on BMS, and an in-depth study is done in regard to the voltage variable charging control strategy. First, a voltage variable charging structure for an in-wheel motor is proposed based on BMS and the working principle of its corresponding control method are introduced. Second, the control law of regenerative braking system for an in-wheel motor is obtained based on the analysis of a theoretical model. Then, the least square method is used to design the control algorithm of charging voltage acquisition, and its fitting accuracy is verified by the bench experiment. Finally, simulation test of anti-locked braking control is conducted via the software of Matlab/Simulink under the different braking conditions. The effectiveness of the proposed control method is verified by simulation results.

Key words: vehicle engineering; in-wheel motor; regenerative braking; voltage variable charge; braking torque

0 前言

目前轮毂电机电动汽车的推广普及需要进一步地克服“续驶里程短”和“初始成本高”这两大关键难题^[1]。鉴于现阶段动力电池技术短期内很难取得实质性突破的现状,再生制动技术成为目前新能源汽车的研究热点技术之一^[2-3]。

现有再生制动技术的实现形式是在电机和动力电池包中间安装一个双向功率控制电路,通过对高

频功率开关通断时间的调节,实现再生制动力矩控制。相比于单向功率控制电路,双向功率控制电路能够实现电能量的双向传递交换。专家学者围绕如何提高控制精度,展开了一系列卓有成效的研究:陈燎等^[4]基于无源串联复合电源拓扑结构,提出了应用于一种串联式复合电源再生制动系统的恒流控制方法;初亮等^[5]结合电机工作特性,采用逻辑门限制 PWM 控制方法来优化逻辑门限值的大小,得出合理的工作方式;NAMAZI 等^[6]提出了一种基于开关磁阻电机、不对称变频器和 PWM 电流控制电路的再生制动控制方案,通过最佳占空比控制来实现制动能量回收最大化;刘志强等^[7]提出轮毂电机控制连续再生 ABS 系统,该控制系统能够准确跟踪

* 国家自然科学基金(51875258)和江苏省研究生科研与实践创新计划(KYCX17_1813)资助项目。20190408 收到初稿,20200331 收到修改稿

车轮目标滑移率。

此外,在电动汽车的驱动/制动过程中,由于动力电池包中的单体动力电池存在个体差异性,即使是初始状态接近的单体动力电池组合在一起使用,也会出现单体电池电量不平衡的问题,甚至会出现因为电路中某一单体动力电池的性能不良而导致整个电池模组失效的情况^[8]。为了克服由于单体电池电量不平衡所造成的某一单体动力电池的性能不良而导致整个电池模组失效的情况,现有的再生制动系统往往配置能量均衡单元,而能量均衡电路主要分为能量消耗型和能量转移型,前者是将高电量单体的电能消耗掉,后者则是通过控制电池间的能量流动,将高电压单体电池的能量输送到低电压单体电池以实现单体电池间的电量均衡^[9-10]。但是,上述两种能量均衡方法都会损耗部分电池组的电量,减小电动汽车的续航里程。从再生制动控制的综合效能来看,现有的再生制动控制技术存在以下几个缺陷:① 功率控制电路中高频功率开关等部件的会将部分再生制动能量耗散成热能;② 高频功率开关等部件的使用在一定程度上增加了再生制动系统的制造成本;③ 不论是能量消耗型或者是能量转移型的单体电池电量平衡措施,在工作过程中都会消耗一部分动力电池包的电能,影响电动汽车的续航里程。

为了提升再生制动系统能量回收效率以及平衡动力电池包中单体动力电池的性能差异,本文提出了一种基于 BMS 的轮毂电机变压充电结构及其控制方法,实现了再生制动过程中充电电池可选控制功能,取代轮毂电机发电向动力电池包充电的功率控制电路;之后基于轮毂电机变压充电理论模型,得到轮毂电机电动汽车的变压充电再生制动控制规律;然后采用最小二乘法设计了充电电压求取控制算法,并通过台架试验验证了充电电压求取公式的拟合精度;最后通过 Matlab/Simulink 仿真,在不同路面附着系数制动工况下,验证了所提出的变压充电再生制动控制方法实现车轮防抱死控制的有效性。

1 基于 BMS 的轮毂电机变压充电结构

现有再生制动系统结构方案中往往是通过逆变器与轮毂电机电气相连实施再生制动控制,逆变器一般是由整流桥、控制逻辑和滤波电路(统称为功率控制电路)组成,在动力电池包中还会配备必要的电池检测模块和能量均衡单元。

为了降低轮毂电机电动汽车的制造成本,且避免

了制动能量回收过程中功率控制电路所造成的再生制动能量损耗,提出一种应用于轮毂电机电动汽车的变压充电再生制动系统,其结构方案如图 1 所示。

图 1 再生制动系统

图 1 中的轮毂电机再生制动系统主要包括车轮、轮毂电机、整车控制器、BMS 中心控制器、动力电池包和整流桥,轮毂电机中的三相绕组通过整流桥与动力电池包的充放电接口相连,动力电池包中内嵌安装 BMS 中心控制器,BMS 中心控制器信号连接整车控制器。为了更好地实现单体电池间的能量均衡,提出了一种基于 BMS 的轮毂电机再生制动的变压充电结构(图 2)。

图 2 中,轮毂电机电动汽车中的动力电池包由若干并联的动力电池模组和 BMS 中心控制器组成;动力电池包的实际需求额定电容量和单个动力电池模组的额定电容量决定了并联连接的动力电池模组的个数,根据数量多少对动力电池模组依次进行排序(动力电池模组 1、动力电池模组 2、…、动力电池模组 m);每一个动力电池模组中都串联一个相对应的控制开关,并对这些控制开关进行编号(S_1 、 S_2 、…、 S_m), m 个动力电池模组通过导线并联连接在动力电池包的充放电接口上;每一个动力电池模组由若干单体动力电池、控制开关、电池检测模块和导线组成,动力电池模组中单体动力电池数量由实际需求的动力电池包的最大输出电压值决定(假设每个动力电池模组内有 n 个单体动力电池),将这 n 个单独动力电池和 n 个控制开关交替串联连接,并使得每个单体动力电池都并联连接一对单独的控制开关和电池检测模块。对单体动力电池进行排序(以第 m 序列动力电池模组中的单体动力电池的编号为例: b_{m-1} 、 b_{m-2} 、 b_{m-3} 、…、 b_{m-n});按照排列顺序,对所有动力电池模组中的控制开关依次排序,具体序号详见图 2。电池检测模块全部信号连接 BMS 中心控制器,各个电池检测模块负责实时采集对应的单体动力电池的端电压信号并发送给 BMS 中心控制器,BMS 中心控制器信号连接整车控制器,并且可以实时控制动力电池包中全部开关的通断。

图 2 基于 BMS 的变压充电结构

图 2 中动力电池包的充放电接口通过整流桥连接轮毂电机的三相绕组；另外，动力电池包的连接模式中除了给单体动力电池配备必须的“电池检测模块”，并没有设置“能量均衡单元”，而是通过实施相应的变压充电控制策略(详见第 2 节)，在每一次再生制动控制过程中，优先选择若干端电压值较低的单体动力电池参与到制动能量回收过程中回收再生制动能量。综上所述，相比于现有再生制动控制，所提出的变压充电再生制动控制省略了功率控制电路和能量均衡单元，在物理结构上更为简单。

着眼于再生制动控制的综合效能，所提出的基于 BMS 的变压充电再生制动控制结构，一方面能够通过实现动力电池包端电压值的可变可调功能，取代轮毂电机发电向动力电池包充电的功率控制电路，降低轮毂电机电动汽车再生制动系统的制造成本的同时避免了功率控制电路造成的能量损耗；另一方面，对动力电池包中剩余电量较低的电池单体进行充电是发生在制动能量回收过程中，能量转换的实质是将汽车的动能或者势能通过发电机转换为电能，换言之，充电能量并非来自动力电池包本身，而是将外部输入到动力电池包内的能量优先充入低电压的单体电池中，动力电池包内部的动力电池模组和其内所有单体动力电池之间是不发生人为控制的能量传递和交换的。

2 变压充电控制策略

2.1 变压充电控制方法

基于 BMS 的轮毂电机变压充电再生制动控制主要由以下四个步骤实现。

步骤 1：整车控制器确定动力电池包的理想端电压值 U 。基于驾驶员制动意图和车辆行驶状况，整车控制器判断电动汽车当前应该采取的制动模式；如果判断实施再生制动行为，整车控制器会依据车轮实时转速和实际需求的再生制动力矩，进一步确定动力电池包理想端电压值 U 并传递给 BMS 中心控制器。

步骤 2：选择参与制动能量回收的动力电池模组。BMS 中心控制器接收电池检测模块测量的动力电池包中全部单体动力电池的端电压值信号，寻找端电压值最低的单体动力电池所在动力电池模组 i ($1 \leq i \leq m$) 参与制动能量回收工作，并闭合动力电池模组 i 所串联的控制开关 S_i ，断开其余动力电池模组所串联的控制开关 S_1 、 S_2 、 $\dots$ 、 S_{i-1} 、 S_{i+1} 、 $\dots$ 、 S_m 。

步骤 3：选择参与制动能量回收的单体动力电池。BMS 中心控制器对动力电池模组 i 中全部 n 个单体动力电池的实时端电压值按从小到大进行排序 ($u_1 \leq u_2 \leq \dots \leq u_j \leq u_{j+1} \leq \dots \leq u_{n-1} \leq u_n$)，并从 u_1 开始依次累加实时端电压值，使之满足 $u_1 + u_2 + \dots + u_j \leq U \leq u_1 + u_2 + \dots + u_j + u_{j+1}$ ，端电压值为 u_1 、 u_2 、 $\dots$ 、 u_j 。

所对应的 j 个单体动力电池参与再生制动能量回收过程。则 BMS 中心控制器控制断开上述 j 个电池个体所并联的控制开关, 闭合其他 $n-j$ 个电池个体所并联的控制开关同时断开与其交替串联的 $n-j$ 个控制开关。此时, 动力电池包的端电压值满足 $U_0 = u_1 + u_2 + \dots + u_j$, 近似等于整车控制器确定的动力电池包的理想端电压值 U 。

步骤 4: 实时调整动力电池包的端电压值。在轮毂电机电动汽车的制动过程中, 轮毂电机的反馈电动势会随着车轮转速降低而减小, 导致整车控制器计算的动力电池包的理想端电压值 U 也逐渐减小; 当 U 下降到 $u_1 + u_2 + \dots + u_{j-1} \leq U < u_1 + u_2 + \dots + u_j$ 范围内, BMS 中心控制器发出指令闭合端电压值为 u_j 的电池个体所并联的控制开关, 同时断开与其对应相邻串联的控制开关, 此时端电压值为 u_j 的单体动力电池不再参与制动能量回收, 动力电池包的端电压值满足 $U_0 = u_1 + u_2 + \dots + u_{j-1}$; 进一步, 当 U 下降到 $u_1 + u_2 + \dots + u_{j-2} \leq U < u_1 + u_2 + \dots + u_{j-1}$ 范围内, BMS 中心控制器发出指令闭合端电压值为 u_{j-1} 的电池个体所并联开关且断开与其对应相邻串联的控制开关的控制指令, 此时端电压值为 u_{j-1} 的单体动力电池不再参与制动能量回收, 动力电池包的端电压值满足 $U_0 = u_1 + u_2 + \dots + u_{j-2}$; 以此类推, 当 U 满足 $0 \leq U < u_1$ 时, 调整相应控制开关使得动力电池包的端电压值 U_0 降为 0, 再生制动过程结束。

再生制动过程中, 基于 BMS 来实施上述变压充电控制能够实现充电电池可选控制功能, 取代轮毂电机发电向动力电池包充电的功率控制电路, 因此轮毂电机电动汽车可以降低制造成本且避免功率控制电路所造成的再生制动能量损耗; 此外, 通过优先对动力电池包中剩余电量较低的电池单体进行充电, 能够削弱单体动力电池电量不平衡对动力电池包使用性能带来的影响。

2.2 充电电压求取控制算法设计

实施变压充电再生制动控制的核心在于解析轮毂电机时变转速和变充电电压数据对再生制动力矩的影响规律, 并据此设计充电电压求取控制算法。

基于图 1, 构建轮毂电机再生制动系统三相(a 相、b 相和 c 相)电路的等效数学模型^[11], 满足

$$\begin{cases} e_k - e_j - 2Ri_{kj} - 2(L-M)\frac{di_{kj}}{dt} = U_1 \\ \text{当 } e_k - e_j - 2(L-M)\frac{di_{kj}}{dt} > U_1 \\ i_k = i_j = 0 \\ \text{当 } e_k - e_j - 2Ri_{kj} - 2(L-M)\frac{di_{kj}}{dt} = U_1 \end{cases} \quad (1)$$

$$T_r = -\frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\dot{\theta}} \quad (2)$$

式中, $L-M$ 为相电感; R 为相电阻; e_k 和 e_j 分别表示轮毂电机 k 、 j 相感应电动势; i_k 和 i_j 分别表示轮毂电机 k 、 j 相感应电动势, 其中 $k, j = a, b, c$; $k \neq j$ 且 $e_k > e_j$; i_{kj} 表示 k 和 j 相之间的线电流; U_1 为动力电池包的充电电压; $\dot{\theta}$ 为轮毂电机转子转速; T_r 表示再生制动力矩。

选用 Matlab/Simulink 软件中的自带 PMSM 电机模型, 输入电机参数, 通过仿真得到轮毂电机再生制动的实际特性曲线。电机的基本性能参数见表 1。

表 1 电机性能参数

参数	数值
磁链值/Wb	0.030 2
相电阻/ Ω	0.1
极对数	16
相电感/mH	0.08

考虑到式(1)中的轮毂电机模型是一个复杂的电磁物理模型, 存在非线性磁化特性和饱和特性, 为了简化控制过程, 需要对轮毂电机在时变转子转速下的反电动势以及时变转子转速和不同充电电压下的再生制动力矩的对应关系进行线性化处理。

首先, 假设轮毂电机转子转速从 0 匀速上升至 600 r/min, 仿真得到不同转子转速下的反电动势 U_2 的变化曲线, 并基于最小二乘法得到反电动势与转速相对应的线性数值拟合表达式

$$U_2 = k_u \dot{\theta} \quad (3)$$

式中, k_u 为反电动势系数, 取 0.081 2。

图 3 是轮毂电机在不同转子转速下实际反电动势与拟合反电动势的变化曲线。

图 3 反电动势随转子转速变化曲线

然后, 设定不同的充电电压值 U_1 ($U_1 = 0$ V、6 V、12 V、18 V 和 24 V), 仿真得到不同转子转速下的再生制动力矩的变化曲线。同样采用最小二乘法得到再生制动力矩与转速相对应的线性数值拟合表达式

$$T_b = \begin{cases} -k_t(\dot{\theta} - \dot{\theta}_{U1}) & \dot{\theta}_d < \dot{\theta} \\ 0 & 0 < \dot{\theta} \leq \dot{\theta}_d \end{cases} \quad (4)$$

式中, $\dot{\theta}_{U1}$ 表示充电电压为 U_1 时轮毂电机开始产生再生制动力矩时的转子转速; k_t 为转矩系数, 取 0.315。

图 4 是轮毂电机在不同充电电压情况下, 再生制动力矩随转子转速变化曲线。

图 4 再生制动力矩随转子转速变化曲线

为了评价式(4)中不同充电电压下再生制动力矩的拟合精度, 采用方均根误差率 s 和相关系数 r 两个进度指标来反映变量的误差程度。其中方均根误差率 s 的值越小, 说明拟合再生制动力矩与轮毂电机再生制动力矩之间的误差越小; 而相关系数 r 越接近 1 则表明两者密切程度越理想。 s 和 r 的表达式分别满足

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (T_{b-j} - T_{b-ij})^2}{\sum_{j=1}^n T_{b-ij}^2}} \quad (5)$$

$$r = \frac{E(f \cdot T_{b-i}) - E(T_{b-i}) \cdot E(T_{b-i})}{\sqrt{E(T_{b-i}^2) - (E(T_{b-i}))^2} \cdot \sqrt{E(T_{b-ij}^2) - (E(T_{b-i}))^2}} \quad (6)$$

式中, T_b 为拟合再生制动力矩; T_{b-i} 为轮毂电机再生制动力矩; E 为数学期望; j 为选取数据的组数。

基于式(5)、(6), 计算出关于再生制动力矩拟合精度的计算结果, 如表 2 所示。

表 2 再生制动力矩的拟合精度

精度指标	$S(\%)$	r
再生制动力矩 0 V	11.47	0.983 3
再生制动力矩 6 V	7.81	0.991 6
再生制动力矩 12 V	4.81	0.996 6
再生制动力矩 18 V	3.75	0.997 6
再生制动力矩 24 V	2.95	0.998 4

由表 2 可得, 随着充电电压的升高, 拟合再生制动力矩与轮毂电机再生制动力矩之间的方均根误差率 s 的值越小, 而相关系数 r 的值则越接近 1。当充电电压为 24 V 时, 方均根误差率为 2.95%, 相关

系数高达 0.998 4, 此时具有较佳的拟合效果; 而当充电电压为 0 V 时, 较高的方均根误差率和较低的相关系数说明此时拟合出来的再生制动力矩的精度相对较低。所以, 充电电压在中等或者较高取值范围内会更有利于提高再生制动控制精度。

综上所述, 在不同转子转速和理想需求再生制动力矩, 基于式(3)、(4)计算得到理想充电电压的求取表达式满足

$$U_{2\_ideal} = \frac{k_u}{k_t} (T_{b\_ideal} + k_t \dot{\theta}) \quad (7)$$

考虑实际控制系统中, 动力电池包的输出电压为若干单个电池的电压之和, 不能任意选取。假设单个动力电池的端电压为 u , 所以式(7)中计算所得的实际目标充电电压满足

$$U_{2\_a} = u \cdot \text{round}\left(\frac{U_{2\_ideal}}{u}\right) \quad (8)$$

式中, round 为取整函数。

2.3 充电电压求取控制算法的试验验证

建立如图 5 所示的轮毂电机电动汽车的复合制动系统试验台架。图 5a 中试验平台包括模拟车辆动力的电动机、模拟车辆惯性质量的飞轮、模拟路面附着的滚轮、车轮(内安装轮毂电机)、复合制动系统、转速转矩传感器和其他连接件等。其中复合制动系统的安装形式见图 5b。该试验台架能够实现测试轮毂电机电动汽车在制动过程中复合制动系统的制动特性。

车轮 (轮毂电机)
(a) 试验平台

(b) 复合制动系统

图 5 轮毂电机电动汽车的复合制动系统试验台架

为了验证第2.2节中式(3)、(4)中相关参数的拟合精确性,基于轮毂电机电动汽车的复合制动系统试验台架,在不同轮毂电机转速以及充电电压的情况下,通过采集端电压、线电流、再生制动力矩等参数,测试轮毂电机变压充电的工作特性。试验验证内容包括:①测试不同轮毂电机转速下轮毂电机反电动势的变化情况;②测试不同轮毂电机转速以及变充电电压情况下的再生制动力矩的变化情况。

轮毂电机外接整流桥,通过测量不同轮毂电机转速下的开路端电压来得到如表3所示的轮毂电机转速-反电动势试验数据。

表3 轮毂电机的转速-反电动势试验数据

序号	电机转速/(r/min)	反电动势/V	序号	电机转速/(r/min)	反电动势/V
1	0	0	6	316.8	26.5
2	63.7	5.5	7	369.2	31.2
3	121.3	9.2	8	431.4	36.0
4	206.9	18.2	9	474.3	41.7
5	250.0	20.0	10	555.4	48.9

处理表3中的试验数据,得到图6所示的轮毂电机反电动势模型计算与试验对比曲线。另一方面,为了测量不同轮毂电机转速以及变充电电压情况下的再生制动力矩的变化情况,将额定端电压为6V的蓄电池通过串联和或并联的形式来模拟不同充电电压,得到如图7所示的再生制动力矩模型拟合仿真与试验对比曲线。

图6 反电动势的拟合仿真与试验对比曲线

图7 再生制动力矩模型拟合仿真与试验对比曲线

如图6所示,轮毂电机反电动势与转子转速基本呈线性关系,轮毂电机的反电动势随着转子转速的增加而升高,模型计算曲线与试验结果基本吻合,说明了式(3)中基于最小二乘法得到反电动势与转速相对应的线性数值拟合表达式的合理性。

如图7所示,不同充电电压(0 V、6 V、12 V、18 V和24 V)下轮毂电机开始产生再生制动力矩所需要的最低转子转速分别为0 r/min、69.3 r/min、138.7 r/min、207.6 r/min和276 r/min,呈现了良好的等差相关关系。试验数据与理论拟合曲线在趋势上吻合较好,体现了上述线性拟合数学模型能够较为准确地预测不同转子转速和外接电压下轮毂电机所产生的再生制动力矩。但是其数值上仍存在一定的偏差,这可能由两个原因导致:①式(4)所示的线性数值拟合表达式在表达再生制动力矩与转速对应关系上简化了部分非线性磁化特性和饱和特性,其拟合精度仍然有待进一步提高;②试验过程中选用的电池实际端电压在充电过程中会有所上升,无法精确地按照理想外接电压进行测试,导致得到的试验数据曲线会向右偏移,如果在实际制动过程中完全依据所提出的基于BMS的变压充电再生制动控制方法,实现对充电电池电压可选可控功能,就能够有效地避免该问题的发生。

3 仿真分析

通过Matlab/Simulink软件来验证变压充电再生制动控制方法的有效性,在不同的路面附着工况下进行了车辆防抱死控制的仿真分析。在第3.1、3.2和3.3节分别介绍车辆仿真模型的建立、复合制动系统的防抱死控制策略设计和防抱死仿真分析。

3.1 车辆仿真模型

轮毂电机电动汽车往往采用液压制动系统作为主制动系统,再生制动系统作为辅助制动系统的复合制动系统来实现轮毂电机电动汽车的制动功能。为了研究轮毂电机变压充电再生制动实施车轮防抱死控制的精确性,建立如图8所示的车辆单轮纵向动力学模型。

图8 单轮纵向动力学模型

对图 8 分析得到车辆制动方程式^[12]

$$\begin{cases} \frac{1}{4}M\ddot{x} = -F_x - F_w - F_f \\ I\ddot{\theta} = rF_x - T_b - T_f \\ F_x = \frac{1}{4}Mg\psi_b \\ F_w = \frac{C_D A \rho_a}{2} v^2 \\ F_f = F_z f = T_f / r \\ T_b = T_r + T_h \end{cases} \quad (9)$$

式中, M 为轮毂电机电动汽车的总质量; $\ddot{x}$ 为车辆加速度; F_x 为车轮的地面切向反作用力; F_w 为空气阻力; F_f 为车轮的滚动阻力; I 为车轮转动惯量; $\ddot{\theta}$ 为车轮角加速度; r 为车轮有效半径; T_b 为总制动力矩; T_r 为再生制动力矩; T_h 为液压制动力矩; T_f 为车轮滚动阻力偶距; C_D 为空气阻力系数; A 为迎风面积; ρ_a 为空气密度; F_z 为车轮的地面法向反作用力; ψ_b 为车轮与地面的制动力系数, 与路面附着系数和车轮滑移率有关; f 为滚动阻力系数。

3.2 复合制动系统的防抱死控制策略

定义车轮滑移率满足^[13-14]

$$\lambda = \frac{\dot{x} - \dot{\theta}r}{\dot{x}} \quad (10)$$

式中, λ 为滑移率; $\dot{x}$ 为车辆行驶车速。

采用滑模控制算法实现防抱死控制, 对式(10)求导, 并将式(9)代入式(10)可得

$$\begin{aligned} \dot{\lambda} = & -\frac{\ddot{\theta}r}{\dot{x}} + \frac{r\dot{\theta}\ddot{x}}{(\dot{x})^2} = \\ & \frac{r}{I\dot{x}}T_b - \frac{r^2}{I}\psi_b F_z - \frac{r}{(\dot{x})^2} \frac{4}{M}(\psi_b F_z + F_w) \end{aligned} \quad (11)$$

防抱死控制中的滑模流型函数设定为

$$s = \lambda_{ideal} - \lambda \quad (12)$$

式中, λ_{ideal} 为理想滑移率。

采用非线性趋近率来求取理想再生制动力矩, 非线性趋近律满足^[15]

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks \quad (13)$$

式中, k 为大于 0 的线性趋近常数; ε 为大于 0 的非线性趋近常数。

由式(11)~(13), 得到如下等式关系

$$\begin{aligned} \dot{s} = & \dot{\lambda}_{ideal} - \left[\frac{r}{I\dot{x}}T_b - \frac{r^2}{I}\psi_b F_z - \right. \\ & \left. \frac{r\dot{\theta}}{(\dot{x})^2} \frac{4}{M} \left(\psi_b F_z + \frac{C_D A \rho_a}{2} \dot{x}^2 \right) \right] = \\ & -\varepsilon \operatorname{sgn}(s) - ks \end{aligned} \quad (14)$$

由式(14)可得

$$\begin{aligned} T_b = & \frac{I\dot{\lambda}}{r} \dot{\lambda}_{ideal} + r\psi_b F_z + \frac{4I\dot{\theta}}{M\dot{x}} \left(\psi_b F_z + \frac{C_D A \rho_a}{2} \dot{x}^2 \right) + \\ & \frac{I\dot{\lambda}}{r} (\varepsilon \operatorname{sgn}(\lambda_{ideal} - \lambda) - k(\lambda_{ideal} - \lambda)) \end{aligned} \quad (15)$$

一般来说, 理想滑移率值设定为 0.2, 此时式(15)可以改写为

$$\begin{aligned} T_b = & r\mu(\lambda)F_z + \frac{4I\dot{\theta}}{M\dot{x}} \left(\mu(\lambda)F_z + \frac{C_D A \rho_a}{2} \dot{x}^2 \right) + \\ & \frac{I\dot{\lambda}}{r} (\varepsilon \operatorname{sgn}(0.2 - \lambda) - k(0.2 - \lambda)) \end{aligned} \quad (16)$$

由文献[8]可知: 当再生制动系统的充电电压为轮毂电机反电动势一半时能够取得最佳制动能量回收功率。若将取得最佳制动能量回收功率时的再生制动力矩定义为 $T_{r\_e\_max}$, 并由此制定防抱死控制策略: 当目标制动力矩不大于 $T_{r\_e\_max}$ 时, 液压制动不参与制动过程, 再生制动系统单独参与车轮的紧急制动; 而随着车轮转速的降低, $T_{r\_e\_max}$ 小于目标制动力矩时, 液压制动系统参与防抱死制动, 进行制动力矩的补偿。

3.3 防抱死控制的仿真分析

本节模拟了 2 种不同路面附着系数下制动工况, 来验证所提出变压充电再生制动控制策略的有效性。所设定的制动工况如下: ① 初始速度为 60 km/h 的轮毂电机电动汽车在路面附着系数为 0.1 路面上进行防抱死制动, 定义为制动工况 1; ② 初始速度为 90 km/h 轮毂电机电动汽车在路面附着系数为 0.5 路面上进行防抱死制动, 定义为制动工况 2。

仿真过程中 ABS 的退出条件为车速低于 10 km/h, 忽略动力电池包中单体动力电池端电压存在的轻微差异(若以第 2.1 节所述的变压充电控制方法进行轮毂电机再生制动控制过程中, 需要根据 BMS 中心控制器对单体动力电池的实时端电压值进行监测, 并选择端电压较低的单体动力电池优先进行充电)。这里假设每一节动力电池的端电压均为 2 V, 即 $u_1 = u_2 = \dots = u_{j-1} = u_j = 2$ V。其他车辆仿真为 $M = 720$ kg; $C_D = 0.38$; $A = 1.87$ m²; $\rho = 1.225$ 8 kg·m⁻³; $I = 2.6$ m·kg²; $r = 0.25$ m。

图 9~12 分别表示轮毂电机电动汽车在制动工况 1 下进行防抱死制动时充电电压、再生-液压制动力矩、滑移率和速度随时间的变化曲线; 图 13~16 分别表示轮毂电机电动汽车在制动工况 2 下进行防抱死制动时充电电压、再生-液压制动力矩、滑移率和速度随时间的变化曲线; 表 4 为不同制动工况下再生制动能量回收效率。

图 9 制动工况 1 下充电电压随时间的变化曲线

图 13 制动工况 2 下充电电压随时间的变化曲线

图 10 制动工况 1 下再生-液压制动力矩随时间变化曲线

图 14 制动工况 2 下再生-液压制动力矩随时间变化曲线

图 11 制动工况 1 下滑移率随时间变化曲线

图 15 制动工况 2 下滑移率随时间变化曲线

图 12 制动工况 1 下速度随时间变化曲线

图 16 制动工况 2 下速度随时间变化曲线

表 4 不同制动工况下再生制动能量回收效率

制动工况	车辆总动能/J	再生制动回收能量/J	能量回收效率(%)
制动工况 1	25 000	11 378	45.5
制动工况 2	56 250	6 826	12.1

图 9 和 13 显示, 在制动工况 1 和 2 下, 采用第 3.2 节所述的复合制动系统的防抱死控制策略对轮毂电机电动汽车进行防抱死制动时, 实际充电电压能够较好地跟踪充电电压求取控制算法计算出来的理想充电电压值; 另一方面, 制动过程中轮毂电机转子转速会逐渐降低, 造成了实际充电电压呈现下降趋势的现象, 但是其最小跳动幅值为 2 V, 说明该方法是通过改变充电电压来进行再生制动控制的, 此时参与充电的单体动力电池的个数呈现逐渐减小的变化趋势, 其目的是为了追踪理想需求再生制动力矩值。

图 10 显示, 制动工况 1 下轮毂电机电动汽车进行制动过程的前期, 液压制动系统不参与防抱死控制, 变压充电再生制动控制方法通过改变充电电压, 调节轮毂电机产生的再生制动力矩大小进行理想滑移率的追踪; 但是随着制动过程中轮毂电机转子转速的降低, 当再生制动系统能够取得最佳制动能量回收功率时的再生制动力矩小于防抱死控制算法计算得到的目标制动力矩时, 液压制动系统参与防抱死制动进行制动力矩补偿控制。由图 14 可知, 车辆在制动工况 2 下实施防抱死控制, 再生制动系统和液压制动系统需要相互协调, 共同完成车轮防抱死控制目的。

图 11 和 15 显示, 在制动工况 1 和 2 下车轮滑移率方均根误差值分别为 7.10×10^{-3} 和 2.25×10^{-2} , 制动工况 1 下的滑移率控制效果要好于制动工况 2; 此外, 制动工况 1 下车轮滑移率存在轻微的抖动现象, 但是能够始终保持在 0.2 左右, 较好地完成了理想滑移率的追踪; 而制动工况 2 下的车轮滑移率波动相对较大, 主要是因为受到较低路面附着系数的约束, 车轮目标需求制动力矩较小, 较小的目标需求制动力矩会导致车辆保持在较小的制动减速度下进行减速运动, 此时能够更加充分地发挥出轮毂电机实施再生制动控制精度高和响应迅速的优势。

图 12 和 16 显示, 在制动工况 1 和 2 下进行防抱死控制过程中, 整个防抱死控制的时间分别为 15.7 s 和 4.66 s; 在上述制动工况下实施防抱死控制, 车轮均没有发生抱死的危险情况。

表 4 显示, 制动工况 1 和 2 下的能量回收效率分别是 45.5% 和 12.1%, 说明在附着系数较低的路面上进行防抱死控制有利于提高制动能量回收效率。

4 结论

(1) 提出了一种基于 BMS 的轮毂电机变压充电结构及其控制方法, 实现了再生制动过程中充电电池可选控制功能的同时, 尽可能地平衡了动力电池包中单体动力电池的性能差异。

(2) 通过仿真和试验方法, 验证了采用最小二乘法拟合的充电电压求取控制算法具有较高的控制精度, 能够用于轮毂电机电动汽车的变压充电再生制动控制。

(3) 在不同附着路面行驶工况下, 采用了复合制动系统的防抱死控制策略的轮毂电机电动汽车能够较好地进行防抱死控制, 此时变压充电再生制动控制策略能够精确实施轮毂电机的再生制动行为。

参 考 文 献

- [1] 应红亮, 黄苏融, 张琪, 等. 电动汽车用高性能直驱轮毂电机研制[J]. 机械工程学报, 2019, 55(22): 5-10.
YING Hongliang, HUANG Surong, ZHANG Qi, et al. Develop of high performance direct-driven in-wheel motor for electric vehicle[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(22): 5-10.
- [2] 王骏骋, 何仁. 电动车辆 ABS 的改进线性二次型最优控制[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(9): 108-115.
WANG Juncheng, HE Ren. Improved linear quadratic optimal control of ABS for an electric vehicle[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(9): 108-115.
- [3] WANG C Y, ZHAO W Z, LI W. Braking sense consistency strategy of electro-hydraulic composite braking system[J]. Mechanical Systems & Signal Processing, 2018, 109: 196-219.
- [4] 陈燎, 孙登辉, 盘朝奉. 串联式复合电源再生制动系统恒流控制[J]. 中国公路学报, 2019, 32(3): 155-162.
CHEN Liao, SUN Denghui, PAN Chaofeng. Constant current control of regenerative braking system of tandem-type compound power supply[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(3): 155-162.
- [5] 初亮, 祁富伟, 王彦波, 等. 汽车 ABS 电机 PWM 控制方法研究[J]. 华中科技大学学报, 2014, 42(10): 58-62.
CHU Liang, QI Fuwei, WANG Yanbo, et al. Research on ABS motor PWM control[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 2014, 42(10): 58-62.
- [6] NAMAZI M M, SAGAIANNEJAD S M, RASHIDI A, et al. Maximum power recovery of regenerative braking

- in electric vehicles based on switched reluctance drive[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2018, 13(2): 800-811.
- [7] 刘志强, 濮晓. 电动汽车连续再生制动系统防抱死制动试验研究[J]. 汽车工程, 2018, 40(7): 804-811.
LIU Zhiqiang, PU Xian. An experimental study on anti-lock braking of continuous regenerative braking system in electric vehicles[J]. Automotive Engineering, 2018, 40(7): 804-811.
- [8] WANG J C, HE R, KIM Y B. Optimal control of regenerative hydraulic composite braking system based on a voltage variable charging control scheme[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2020, 234(2-3): 536-551
- [9] STUART T A, ZHU W. Modularized battery management for large lithium ion cells[J]. Journal of Power Sources, 2011, 196(1): 458-464.
- [10] 陈泽宇, 熊瑞, 孙逢春. 电动汽车电池安全事故分析与研究现状[J]. 机械工程学报, 2019, 55(24): 93-116.
CHEN Zeyu, XIONG Rui, SUN Fengchun. Research status and analysis for battery safety accidents in electric vehicles[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(24): 93-116.
- [11] CHEN S A, LI X, ZHAO L J, et al. Development of a control method for an electromagnetic semi-active suspension reclaiming energy with varying charge voltage in steps[J]. International Journal of Automotive Technology, 2015, 16(5): 765-773.
- [12] WANG J C, HE R. Varying charge voltage in steps control method of ABS for in-wheel motors driven electric vehicle based on improved LQG scheme[J]. IEEE Access, 2018: 15039-15050.
- [13] 张雷, 于良耀, 宋健, 等. 电动汽车再生制动与液压制动防抱死协调控制[J]. 清华大学学报, 2016, 56(2): 152-159.
ZHANG Lei, YU Liangyao, SONG Jian, et al. Coordinated anti-lock braking control of regenerative and hydraulic braking systems in electric vehicles[J]. Journal of Tsinghua University, 2016, 56(2): 152-159.
- [14] WU M C, SHIH M C. Hydraulic anti-lock braking control using the hybrid sliding-mode pulse width modulation pressure control method[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I-Journal of Systems and Control Engineering, 2001, 215 (12): 177-187.
- [15] 王骏骋, 何仁. 电动轮轮内主动减振器的非线性最优滑模模糊控制[J]. 汽车工程, 2018, 40(6): 719-725.
WANG Juncheng, HE Ren. Nonlinear optimal sliding mode fuzzy control for in-wheel active vibration damper of electric wheel[J]. Automotive Engineering, 2018, 40(6): 719-725.
-
- 作者简介: 王骏骋, 男, 1990 年出生, 博士研究生。主要研究方向为车辆系统动力学及新能源汽车。
E-mail: wangjc90@163.com
何仁(通信作者), 男, 1962 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为汽车机电一体化技术。
E-mail: heren1962@163.com