

48 V 微混系统 IBSG 电机电压控制模式研究

孙新函, 万晓同, 韩 钰
(泛亚汽车技术中心有限公司, 上海 201208)

摘 要: 分析了微混系统在 48 V 电池异常情况下整个车辆的工作状态, 为了保证该情况下车辆仍能够像传统车一样运行, 此时起动机发电一体机 (IBSG) 不再处于常规的扭矩控制模式, 而是处于电压控制模式。为了研究电机转速和 12 V 负载变化对电压控制模式影响, 分别在电机台架和某 1.0 L 排量发动机的样车上进行测试验证。结果表明, 当 48 V 电池继电器断开后, 电机能够顺利进入电压控制模式且平稳运行。该运行模式保证了 48 V 电池异常后仍能使车辆继续运行, 作为一种辅助驾驶模式, 增强了车辆的系统安全性和鲁棒性。

关键词: 新能源汽车; 48 V 微混系统; 起动机发电一体机; 电压控制; 母线电压

中图分类号: TM 346⁺.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2020)05-0085-05

doi: 10.12177/emca.2020.012

Research on IBSG Voltage Control Mode of 48 V Micro Hybrid System

SUN Xinhan, WAN Xiaotong, HAN Yu
(Pan Asia Technical Automotive Center Co., Ltd., Shanghai 201208, China)

Abstract: Vehicle operation when the 48 V battery is in abnormal status is analyzed. In order to keep the vehicle to be driven as a traditional car, the integrated belt-driven starter/generator (IBSG) is no longer working in torque control mode, but in voltage control mode in this condition. For studying the influences of IBSG speed change and 12 V load change on the voltage control mode, validation is performed both in bench test and in vehicle test with 1.0 L engine. Results show that IBSG can enter the voltage control mode smoothly. The voltage control mode ensures that the vehicle keeps running when the 48 V battery is not on the DC bus. As a kind of auxiliary driving mode, this control mode enhances the security and robustness of the vehicle.

Key words: new energy vehicle; 48 V micro hybrid system; integrated belt-driven starter/generator (IBSG); voltage control; bus voltage

0 引 言

随着国家法规对油耗和排放要求的日益严格, 以及电气化系统的发展, 混合动力技术是实现节能减排的关键。《中国制造 2025》明确规定, 2025 年中国乘用车企业必须要满足平均燃料消耗量为 4 L/100 km, 2030 年中国乘用车企业必须要满足平均燃料消耗量为 3.2 L/100 km^[1]。为了适应国家政策和满足排放法规, 整车厂与零部件供应商均在寻找解决方案。但目前强混和插电式混合动力技术系统复杂、成本较高, 因此寻找一种

高性价比的混合动力方案尤为重要。

48 V 微混系统^[2]结构简单、成本较低、节能效果显著, 已经成为国内外新能源汽车企业的研究热点之一。全球大型供应商如法雷奥、博世、大陆等均相继开发出了成熟的方案^[3], 使整车厂可以在架构改动较小的情况下方便地将 48 V 微混系统移植到对应车型上。48 V 微混系统汽车除了能够实现节油率达 10% ~ 12% 外, 还可以明显改善车辆起停功能、动力性, 具有较好地驾驶质量和客户感受。国内如上汽通用汽车、吉利汽车、长安汽车等均开始大力推广 48 V 微混系统方案。

收稿日期: 2020-01-03; 收到修改稿日期: 2020-03-16

作者简介: 孙新函 (1986—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为新能源汽车电驱系统设计与开发。

可以预测,在未来相当长时间内,48 V 微混系统作为高性价比节能方案会占据可观的市场比例。根据 IHS Markit 预测,2025 年 48 V 微混车辆市场保有量将达到 18%。

此前,行业内主要基于 48 V 电池正常工作情况下对系统进行控制研究,没有研究 48 V 电池异常情况下的相关控制策略。本文考虑到车辆实际使用中 48 V 电池可能损坏或者在低温环境下电池无法正常充放电的情况,提出一种新的“电压控制”模式,通过该控制模式可以在 48 V 电池失效或者异常情况下继续使用车辆,延长车辆行驶距离。通过混合动力控制单元(HCU)控制打开电池继电器,模拟车辆实际行驶 48 V 电池不工作的条件,进行电压控制模式研究,并分别在台架和实车上进行了测试验证。测试结果表明,在 48 V 电池不工作条件下车辆仍能够像传统车一样继续运行。

1 48 V 微混系统架构和功能

48 V 微混系统可以在传统车结构基础上进行拓展,将传统发电机移除,增加起动发电一体机(IBSG),48 V 电池,DC-DC 转换模块及混动控制软件单元 HCU^[4],从混合动力的结构上分类属于 P0 并联式架构。在保留传统车 12 V 电压网络的同时,增加 48 V 电压网络,因为该电压网络低于 60 V 安全电压,所以不需要采取额外的电压防护。48 V 微混系统拓扑结构图如图 1 所示。其中,IBSG 电机通过皮带轮与发动机曲轴相连^[5],IBSG 电机、电池与 DC-DC 转换模块通过 48 V 总线两两相连,DC-DC 转换模块作为 48 V 系统与 12 V 系统的桥梁将 48 V 电压转换成 12 V 电压为车上用电负载和 12 V 电池提供能量。

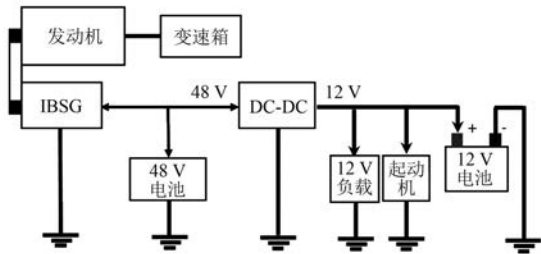


图 1 48 V 微混系统拓扑结构图

48 V 微混系统的主要功能如下^[6]:

(1) 起停功能。与传统 12 V 系统起停功能相比,48 V 系统起停可以通过电机将发动机拖到 800 r/min,IBSG 起动扭矩更大、响应速度更快,提升了起动性能,同时降低了油耗。

(2) 加速助力功能。当车辆行驶在上坡或者需要加速行驶时,电机可以提供正向扭矩辅助发动机驱动车辆,改善了驾驶体验。

(3) 智能充电。当车辆行驶在平稳路况时,可以调节发动机的工作点并将发动机能量转换成电能对电池进行充电,多余的电能可以通过 DC-DC 转换模块为车上 12 V 负载提供能量。

(4) 制动能量回收。车辆制动时电机通过发电模式将机械能转换成电能保存在电池中,维持了电池电量平衡。

本文搭载 1.0 L 发动机和 48 V 微混系统进行研究的样车主要参数如表 1 所示。

表 1 样车主要参数

参数名称	参数值
发动机排量/L	1.0
变速箱类型	DCT
48 V 电池容量/(A·h)	8
IBSG 电机峰值功率/kW	10
DC-DC 转换模块功率/kW	1.5

2 IBSG

作为 48 V 系统三电关键部件之一,电压控制模式由 IBSG 实现,本文所采用的 IBSG 自身集成电机控制器,使整车布置更为紧凑,电机选型为交流异步电机,电机核心部件定子采用扁线设计,提高了电机的功率密度,电机采用矢量控制方法^[7],与整车的通信方式为 CAN 通信。电机主要参数如表 2 所示。

表 2 电机主要参数

参数名称	参数值
峰值功率/kW	10
峰值扭矩/(N·m)	50
最高转速/(r·min ⁻¹)	18 000
电压范围/V	36~52
系统最大效率/%	85
速比	2.5
冷却方式	风冷

IBSG 爆炸示意图如图 2 所示。主要结构包

括定子、转子、功率模块组件、控制板及前后端盖等。

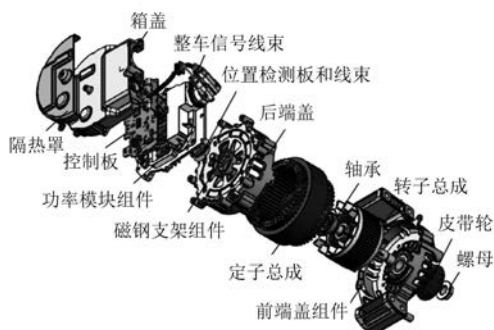


图2 IBSG爆炸示意图

3 电压控制模式

车辆在正常行驶过程中,无论是处于加速、匀速还是减速工况,电机均工作在扭矩控制模式^[8],此时HCU给电机正扭矩或者负扭矩命令,电机根据扭矩指令响应对应的扭矩,当电机响应正扭矩指令时,电机处于电动模式;当电机响应负扭矩指令时,电机处于发电模式^[9]。当48 V电池出现异常或者在低温环境电池无法正常充放电时,电机若继续工作在扭矩控制模式,由于缺少电池这个能量“缓冲”装置,母线电压很容易超出60 V阈值导致过压故障,同时也会对后级DC-DC转换模块模块造成损坏,因此电机无法继续工作在扭矩控制模式,车上12 V用电负载由于没有能量来源而无法继续工作,车辆无法继续运行。

基于此,为了保证后级DC-DC转换模块能得到正常范围的输入电压,车辆仍能像传统车一样继续行驶,本文提出一种电机电压控制模式,当遇到上述情况后电机工作模式由扭矩控制模式切换到电压控制模式,此时控制器控制变量为“电压”,该电机的工作模式切换由HCU进行控制,目标电压指令由HCU发出,目标电压的值可通过实际测试进行标定,电机在系统工作过程中实时响应该目标电压,维持母线电压处于36~52 V正常区间范围。电机扭矩大小不再受HCU控制,由于电压控制模式目标是使车上用电负载正常运行,对功率需求较小,一般不超过2 kW,故电机在该模式下运行的扭矩较小,其扭矩安全性可以由IBSG进行监测和管理^[10]。

电压控制模式控制示意图如图3所示。整个控制过程主要分4步:

(1) 当系统检测到48 V电池异常而断开继电器,此时由于12 V电池存在车辆12 V负载仍能工作一段时间,此时HCU将给DC-DC转换模块发出预充电指令,将母线电压建立到一定值,保证电压控制模式能够正常进入,该电压值与HCU发出的控制目标电压值保持一致。

(2) 当母线建立起电压后,HCU向电机发出电压控制指令和目标控制电压,电机进入电压控制模式,此时DC-DC转换模块退出预充电模式进入Idle状态。

(3) HCU向DC-DC转换模块发出工作指令,DC-DC转换模块由Idle模式进入Buck模式,DC-DC转换模块在模式切换时电机负载突然增大会拉低母线电压,为了保证系统的稳定性,在该过程中DC-DC转换模块增加软起动功能,使DC-DC转换模块在工作时电流以一定速率上升,该电流的变化速率可以通过软件进行标定得出。

(4) 当车上负载动态变化时,DC-DC转换模块通过Buck工作模式调整输出电流的变化,IBSG电机通过控制电压来保证母线电压稳定在一定范围。

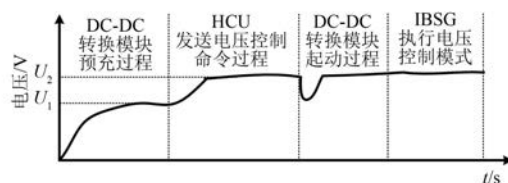


图3 电压控制模式控制示意图

4 测试验证

从整个控制系统分析可知,电机的转速变化和12 V负载的变化对电压控制影响较大,这2个变量的控制好坏直接决定了整个系统的稳定性,为了验证其对电机电压控制模式稳定性的影响,分别进行台架试验和实车测试。为了提高测试的效率,本文通过软件控制方法,强制将电池继电器打开来模拟电池异常的状态,同时考虑电机与发动机的速比关系和车用负载,测试试验电机转速选取范围为2 000~10 000 r/min,电子负载的选取范围为10~110 A。

4.1 台架测试验证

电压控制模式台架示意图如图 4 所示。图 4 中,实线为能量流,虚线为信号流。台架试验利用测功机来代替发动机,12 V 电子负载来代替车用负载,上位机代替 HCU,其他部件如电机、DC-DC 转换模块及 12 V 电池则与车用部件保持一致。

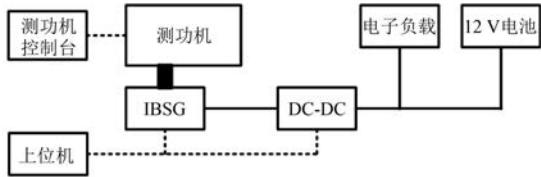


图 4 电压控制模式台架示意图

通过前文描述电压控制模式的实现过程,经过 DC-DC 转换模块预充电和软起动进入电压控制模式后,分别进行如下 3 组测试。

(1) 保持电机转速恒定,改变电子负载,测试条件及结果如表 3 所示。

表 3 电子负载与电机转速测试条件对应表

电子负载/A	电机转速/(r·min ⁻¹)			
	2 000	5 000	8 000	10 000
10~40	OK	OK	OK	OK
40~80	OK	OK	OK	OK
80~110	OK	OK	OK	OK
110~80	OK	OK	OK	OK
80~40	OK	OK	OK	OK
40~10	OK	OK	OK	OK

电压控制的目标是维持车辆端 12 V 电子负载正常工作,表 3 中“OK”表示在恒定转速时,改变电子负载过程中,IBSG 电机直流输出端无过压或欠压故障报出,DC-DC 转换模块可以输出对应的电流来满足电子负载需求。

(2) 保持电子负载恒定,改变电机转速,测试条件及结果如表 4 所示。

表 4 电机转速与电子负载测试条件对应表

电子负载/A	电机转速/(r·min ⁻¹)			
	10	40	80	110
2 000~5 000	OK	OK	OK	OK
5 000~2 000	OK	OK	OK	OK
2 000~8 000	OK	OK	OK	OK
8 000~2 000	OK	OK	OK	OK
2 000~10 000	OK	OK	OK	OK
10 000~2 000	OK	OK	OK	OK

表 4 中,“OK”表示在电子负载恒定时,改变电机转速过程中,IBSG 直流输出端无过压或欠压故障报出,DC-DC 转换模块可以输出稳定的电流保证电子负载需求。

(3) 同时随机改变电机转速和电子负载。测试结果分别如图 5~图 7 所示。图 5~图 7 中,5 条信号曲线从上到下分别为母线电压、电机工作模式、DC-DC 转换模块工作模式、DC-DC 转换模块输出电流、电机转速。由于项目要求,测试结果仅展示部分曲线来表征系统控制时 IBSG 电机直流侧母线电压实际输出的波动情况。

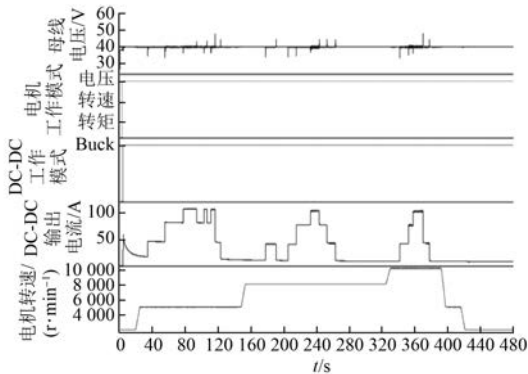


图 5 转速恒定负载变化曲线

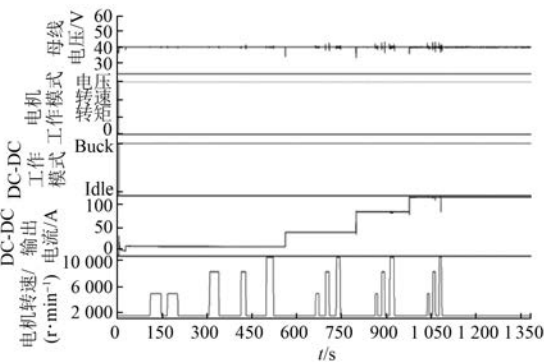


图 6 负载恒定转速变化曲线

从上述台架测试结果分析可知,母线电压随着电机转速和电子负载变化而波动,当电子负载恒定,改变电机转速,电机母线电压最稳定。综上所述,电压控制模式在台架上能够在电机转速和电子负载同时动态变化时稳定运行。

4.2 整车测试验证

为了进一步验证电压控制功能能够在整车上实现,将 48 V 三电零件搭载在 1.0 L 排量发动机

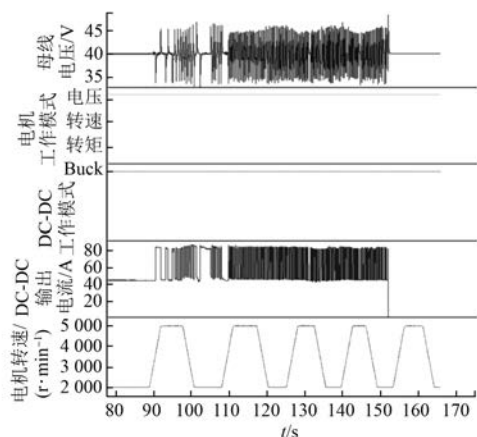


图7 转速和负载随机变化

和DCT变速箱的样车上进行验证。实际测试过程中,通过加速踏板和制动踏板来改变发动机转速和电机转速,通过开关空调、车灯、助力转向器、雨刮器等来改变车上用电负载,整个车辆处于自由驾驶模式。测试采集数据如图8所示。图8中的6条曲线自上而下分别为,母线电压、电机转速、电机扭矩、DC-DC转换模块输出电流、电机工作模式、DC-DC转换模块工作模式。整车试验采集数据表明,在电压控制模式下车辆能够稳定运行。

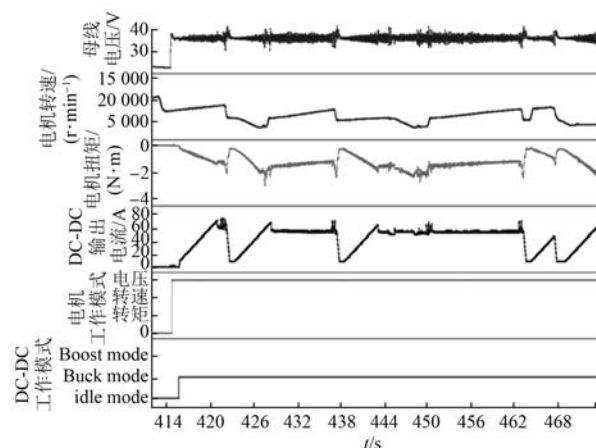


图8 电压控制模式实车采集数据图

5 结 语

本文通过对电机电压控制模式研究和分析,验证了当48 V电池异常情况下,利用该控制模式使车辆仍能像传统车辆一样运行。该控制模式能够较好地应用在天气寒冷或者因48 V电池异常造成的继电器打开的情景下。当48 V电池继电器打开后,电机能够顺利进入电压控制模式且运行平稳,在提醒驾驶员48 V电池异常的同时,也可以作为一种辅助驾驶模式使车辆继续运行,增强了车辆的安全性和鲁棒性。

【参考文献】

- [1] 张胜,张庆虎,丁安邦,等.汽车48 V P0混动系统开发及应用[J].汽车实用技术,2019(17): 170.
- [2] KUYERS M. Application of 48 volt for mild hybrid vehicles and high power loads[C]//SAE 2014 World Congress & Exhibition, 2014.
- [3] 严宏昇.48 V BSG 技术与趋势分析[J].价值工程,2019,38(6): 194.
- [4] 程吉鹏,陈丁跃,姜良超.48 V ISG 微混合动力系统车辆整车控制策略研究[J].重庆理工大学学报(自然科学版),2018,32(12): 14.
- [5] 徐力强,滕勤,关莹,等.某BSG混合动力发动机前端附件驱动特性研究[J].内燃机与动力装置,2016,33(5): 39.
- [6] 张秋新,祖润青.48 V-BSG混合动力系统研究[J].汽车电器,2019(3): 14.
- [7] 杨阳,王庆年,龚依民,等.异步电机弱磁区转矩最大化策略[J].电机与控制学报,2017,21(12): 51.
- [8] 范泽华,姜淑忠.BSG微混系统电机控制策略的研究[J].微特电机,2017,45(4): 1.
- [9] 杨飞,胡春明,张必军.48 V轻度混合动力系统控制策略的仿真研究[J].内燃机工程,2017,38(6): 111.
- [10] LEE S, CHERRY J, SAFOUTIN M, et al. Modeling and controls development of 48 V mild hybrid electric vehicles [C]//WCX World Congress Experience, 2018. <https://doi.org/10.4271/2018-01-0413>.