

DOI:10.19651/j.cnki.emt.1802141

插电式混合动力汽车电驱动系统过压抑制最优控制^{*}

孙宝文

(广东科学技术职业学院 机械与汽车学院 珠海 519090)

摘要: 在复杂的行驶工况下,插电式混合动力汽车经常处于启停状态,大电流脉冲对汽车电驱动系统高压总线带来巨大冲击,造成高压总线峰值电压不断上升,从而极易造成车辆安全事故。针对插电式混合动力汽车电驱动系统高压总线过压问题,提出一种基于 Bang-Bang 控制策略来抑制高压总线上的峰值电压,在汽车电驱动系统过压保护装置的实验环境中验证采用的 Bang-Bang 控制策略的准确性,实验结果表明,采用 Bang-Bang 控制策略能够有效地抑制高压总线过压,保证混合动力汽车的行驶安全。

关键词: 行驶工况;插电式混合动力汽车;电驱动系统;过压抑制;最优控制

中图分类号: TN701 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.20

Overvoltage suppression optimal control for electric drive system of plug-in hybrid electric vehicle

Sun Baowen

(School of Electromechanical Engineering, Guangdong Polytechnic of Science and Technology, Zhuhai 519090, China)

Abstract: Plug-in hybrid electric vehicles are often in start-up and stop state under complex driving conditions. High current pulse has a great impact on the high-voltage bus of automotive electric drive system, resulting in the rising peak voltage of high-voltage bus, which is very easy to cause vehicle safety accidents. Aiming at the problem of high voltage bus overvoltage in plug-in hybrid electric vehicle electric drive system, a Bang-Bang control strategy is proposed to suppress the peak voltage on the high voltage bus. The accuracy of the control strategy is verified in the experimental environment of the overvoltage protection device of the electric drive system. The experimental results show that the Bang-Bang control strategy is adopted. It can effectively suppress high voltage bus overvoltage and ensure the safety of hybrid electric vehicles.

Keywords: driving cycles; plug-in hybrid electric vehicles; electric drive system; overvoltage suppression; optimal control

0 引言

随着社会对汽车环保、节能、安全要求日益严格以及人们对汽车驾驶安全性、便捷性及乘坐舒适性追求的不断提升,汽车产品已成为集机械电子化、网络化、信息化、智能化于一体的机电产品^[1]。插电式混合动力汽车有两套驱动系统,分别是发动机驱动系统和电机驱动系统,在混合动力汽车电驱动系统高压总线上挂载的永磁驱动电机、动力电池及其管理系统、电机控制器以及一些其他高压低功率附件(助力油泵、助力气泵),在复杂的城市行驶工况下,混合动力汽车高压总线上的大电流脉冲很容易冲击动力电池,导致动力电池过充,从而造成动力电池容量衰减,寿命下降。

为了抑制高压过压的发生,有在单独节点采取过压抑制的研究,在动力电池端采用均衡电压的方法^[2];在驱动电机端采用能量回收的方法^[3];在高压低功率附件端采用装置简单过压保护装置的方法^[4];对于混合动力汽车电驱动系统高压总线过压抑制最优控制策略有 PID 控制^[5]、浮动浪涌控制^[6]等。本文在混合动力汽车电驱动系统高压总线上采用装置智能过压保护装置来抑制过压现象,通过采集高压总线端的总电压与安全电压阈值进行比较,超过安全电压阈值,智能过压保护装置工作,形成闭环控制。

1 混合动力汽车电驱动系统

混合动力汽车有两套驱动系统,一套是以燃油消耗为

收稿日期:2018-09-21

^{*} 基金项目:珠海市先进装备制造与材料成型技术重点实验室项目(201802A)、校级科研项目(XJPY2016008)资助

主的发动机驱动系统,另外一套是以电池为主的电机为主的电驱动系统。在电驱动系统中,高压总线上有许多的用电装置,各个高压用电装置有对应的控制单元。由文献[7]可知,混合动力汽车和纯电动汽车都有和动力电池系统相连的高压总线,DC/DC 变换器以及用于低压器件和电机驱动系统的 DC/AC 逆变器。在混合动力汽车高压总线上还有高压低功率附件装置,如油泵、气泵、空调、电动助力转向电机以及除霜装置,混合动力汽车电驱动系统高压总线结构如图 1 所示。

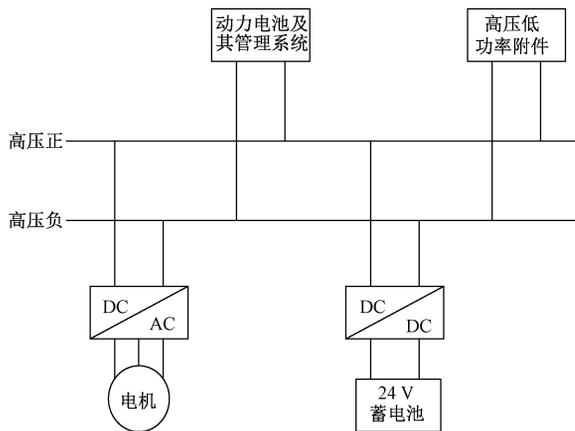


图 1 混合动力汽车电驱动系统高压总线

在混合动力汽车处于复杂的行驶工况下,当车辆需要频繁加速或制动时,电机需要大电流或回馈电能给动力电池,产生的强脉冲电流很容易对动力电池造成冲击,导致单体电池电压不平衡,影响动力电池的使用寿命以及整车的安全性能^[8]。对于在混合动力汽车高压总线上产生的过压现象,常常通过在高压总线上加装过压保护装置来抑制过压对动力电池的影响,加装过压抑制装置的电驱动系统结构如图 2 所示。

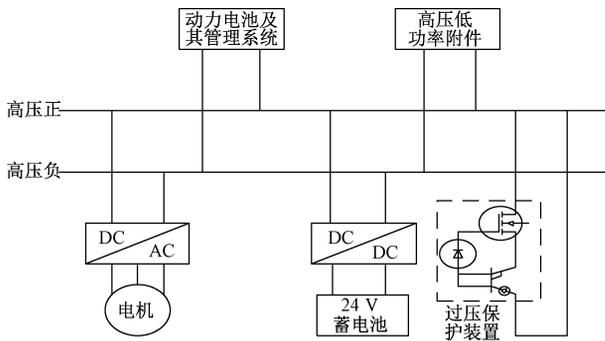


图 2 电驱动系统过压保护装置

过压保护装置的控制指令来自整车控制器,当高压总线上任意控制单元节点检测到高压总线过压,都会给整车控制器发送过压信号,整车控制器对过压信号进行甄别,超过安全点压阈值时,会直接关断高压总线继电器,车辆处于

停车状态,过压在阈值区间内,整车控制器发送过压保护启动指令给过压保护装置。

2 Bang-Bang 控制策略

综上所述,过压保护装置的开启/关断时间取决于所采用的控制方法,本文采用 Bang-Bang 控制策略,Bang-Bang 控制是一种时间最优控制,能快速改善系统暂态响应特性^[9]。把混合动力汽车电驱动系统看作一个控制域,在控制域中有动力电池端电压^[10]、充放电电流^[11]、电机需求功率^[12]以及过压保护装置开启/关闭时间^[13]等控制分量,采用的 Bang-Bang 控制就是在控制域从不同边界值切换过程中的一种开关控制。由文献[14]可知,能控的定常系统状态方程设定如下。

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \mathbf{A}x(t) + \mathbf{B}u(t) \\ x(0) = x_0, x(t_f) = 0, t_f \text{ 待求} \end{cases} \quad (1)$$

性能指标为:

$$\min_u J = \int_0^{t_f} 1 dt \quad (2)$$

控制约束为:

$$-1 \leq u_i(t) \leq 1 \quad (3)$$

由上式可知,在整个控制域寻求最优控制 $u^*(t)$,就是求解给定状态 $x(t_0)$ 转移到原点的最短时间,也即在边界值的切换过程中寻求最短的切换时间 t_f 。结合最小值原理的哈密顿函数可以得知最优控制为:

$$u^*(t) = -\text{sgn}[(\mathbf{B}^T \lambda)_i], i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (4)$$

其中 $(\mathbf{B}^T \lambda)_i$ 为矢量 $\mathbf{B}^T \lambda$ 的第 i 行,sgn 是符号函数。

通过上述公式可设定 Bang-Bang 控制策略中过压保护装置的开启/关闭,如下所示:

$$\begin{cases} U_{\text{on}} = U_{\text{max}} - U_{t1} \\ U_{\text{off}} = U_{\text{max}} - U_{t2} \\ U_{t_i} = \begin{cases} 1, U_o \geq U_{\text{on}} \\ 0, U_o \leq U_{\text{off}} \end{cases} \\ U_{t1} > U_{t2} \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: U_{on} 、 U_{off} 分别表示过压保护装置的开启电压与关闭电压; U_{t1} 、 U_{t2} 分别表示电驱动系统高压校准电压; U_o 表示混合动力汽车电驱动系统高压母线电压; U_{max} 表示动力电池最大容许充电电压; U_{t_i} 表示过压保护装置的开启和关闭信号。

从式(5)可以看出,Bang-Bang 控制通过设定安全电压阈值来判定过压保护装置的开启和关闭,防止直流母线电压超过动力电池最大容许充电电压,采用 Bang-Bang 控制策略的过压保护装置结构如图 3 所示。

混合动力汽车电驱动系统 Bang-Bang 控制策略详细描述如下:

1) 当 $U_o \geq U_{\text{on}}$ 时,过压保护装置处于开启状态,说明混合动力汽车某高压耗能部件处于高功率需求状态时,动力电池输出高电压超过其限定值;混合动力汽车紧急制动时,电机回馈电流过大,高压总线的脉冲电流给动力电池充电,

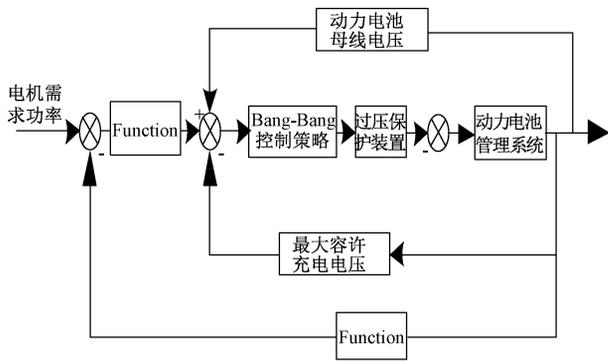


图3 Bang-Bang 控制策略结构

其充电电压超过电池最大容许充电电压。

2)当 $U_o \leq U_{off}$ 时,过压保护装置处于关闭状态,当出现高压总线出现过压情况时,电池管理系统内部以及过压保护装置都有相应的减压机制,电池管理系统通过电池主动均衡技术来抑制过压,过压保护装置通过电阻来消耗产生的剩余电能,当高压总线恢复到了正常的电压,过压保护装置会关闭。

混合动力汽车电驱动系统采用 Bang-Bang 控制策略来抑制高压总线过压得益于其容易实现,在控制域的边界值切换过程中能获得预期的稳定性,在整个暂态过程中,不会出现控制盲区,对于混合动力汽车电驱动复杂非线性系统来说具有强鲁棒性^[15]。

3 实验验证

为了验证所采取的 Bang-Bang 控制策略的可行性,搭建了基于智能过压保护控制装置的插电式混合动力汽车电驱动系统实验环境,实验台架包括动力电池模拟接口、驱动电机模拟接口、高压低功率附件接口以及动力电池管理系统接口;飞思卡尔控制板、断路器以及数字万用表,其中,动力电池的标称容量为 65 Ah/375 V,驱动电机的额定功率为 75 kW,高压低功率附件的额定功率为 18 kW,断路器规格为 400 V/200 A,搭建的整体实验环境如图 4 所示。

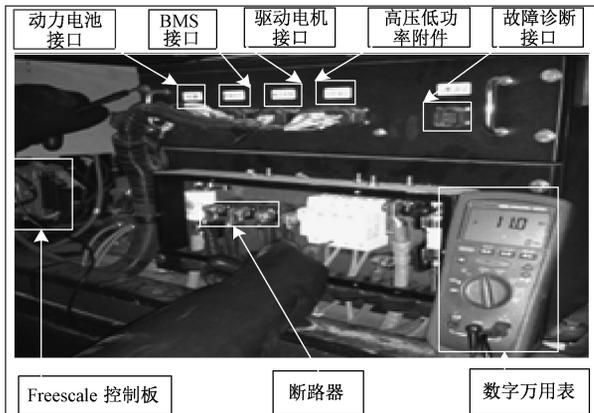


图4 系统高压总线过压抑制实验环境

将 Bang-Bang 控制策略代码烧录到在已搭建好的实验环境飞思卡尔控制板中,进行混合动力汽车电驱动系统高压总线过压抑制实验,实验对比结果如表 1 所示。

表 1 Bang-Bang 控制参数及结果

参数	实车控制	Bang-Bang 控制
U_{on}	U_o	395 V
U_{off}	U_o	375 V
t_f	12.7 ms	4.95 ms

从表 1 可看出,采用高压过压阈值判别的 Bang-Bang 控制策略开关开启/切断时间比实车的时间短,能快速的切断主继电器,以保护动力电池和整车的安全。

从图 5 所示需求功率曲线可以看出,混合动力汽车电驱动系统由于车辆频繁的启停,电机产生的回馈脉冲电流以及电机需求功率的突然增加都容易对高压总线产生过压,损伤动力电池系统性能,降低混合动力汽车的续航里程。

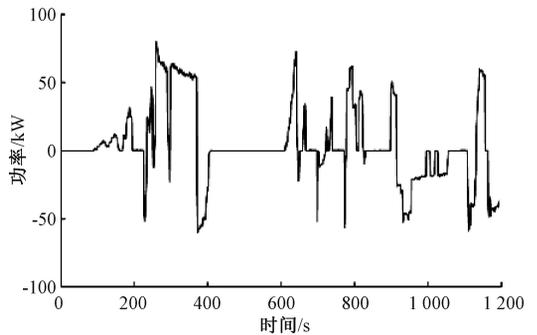


图5 驱动电机需求功率

从图 6~7 所示电压电流曲线可看出,在采用过压保护装置与 Bang-Bang 控制策略相结合的方法后,在混合动力汽车加速以及制动工况下,采用 Bang-Bang 控制后的总线电压与电流低于原车的电压电流,能有效地抑制高压总线过压,与此同时,又能满足混合动力汽车驱动电机的功率需求,且整个控制系统比较稳定,没有出现超调现象。

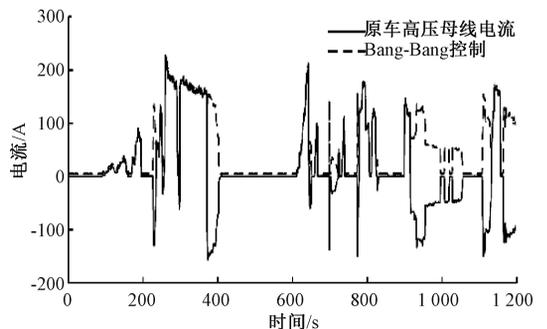


图6 高压总线电流

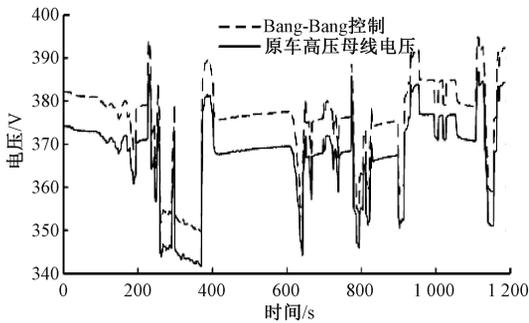


图 7 高压总线电压

4 结 论

针对复杂工况下,插电式混合动力汽车电驱动系统高压总线上时常存在过压现象,本文在插电式混合动力汽车电驱动系统结构基础上,采取 Bang-Bang 控制策略,设定安全电压阈值来判定过压保护装置的开启和关闭,防止直流母线电压超过动力电池最大容许充电电压,减缓动力电池的容量衰减,提高动力电池的使用寿命。在已搭建好的实验环境中验证该控制策略的可行性,实验结果表明,采用的 Bang-Bang 最优控制策略能有效的减短插电式混合动力汽车高压总线过压时间,有效地抑制了混合动力汽车高压总线过压,与此同时,也为以后更为复杂的控制策略提供借鉴意义。

参考文献

- [1] 杨柳青,疏祥林,潘希姣,等.面向新能源汽车和校企合作项目的高职汽车电子技术专业教学改革[J].合肥工业大学学报(社会科学版),2014,28(2):109-115.
- [2] 刘红锐,张昭怀.锂离子电池组充放电均衡器及均衡策略[J].电工技术学报,2015,30(8):186-192.
- [3] 孙大许,兰凤崇,陈吉清.基于 I 线制动力分配的四驱纯电动汽车制动能量回收策略的研究[J].汽车工程,

2013,35(12):1057-1061.

- [4] 曲晓冬,王庆年,于远彬.增程式电动车的 APU 控制策略的研究[J].汽车工程,2013,35(9):763-768.
- [5] 徐凌宇,董文婷,孙培德.一种新型的全桥电路副边过压抑制办法[J].微型机与应用,2017,36(1):38-39,43.
- [6] 冯庆胜,沈培富,戴淑军.基于有源钳位和动态负反馈相结合的 IGBT 过压保护[J].大连交通大学学报,2018,39(1):115-120.
- [7] LIU W. Introduction to Hybrid Vehicle System Modeling and Control [M]. Beijing: China Machine Press,2014.
- [8] 刘荣,童亮,马彬,等.复合电源系统能量管理实验研究[J].实验技术与管理,2018,35(1):80-84.
- [9] 曹建忠,罗飞,许玉格,等.基于 Bang-Bang 控制的智能开关预测控制算法[J].华南理工大学学报(自然科学版),2006(9):1-7.
- [10] 李蓓,王耀南,吴亮红,等.端电压模糊估算动力电池 SOC 的新方法[J].湖南大学学报(自然科学版),2009,36(9):47-50.
- [11] 高子萍,赵明富.镍氢电池大电流充放电性能研究[J].激光杂志,2015,36(11):91-93.
- [12] 张运昌.纯电动轿车双电机耦合驱动系统构型与控制策略研究[D].长春:吉林大学,2015.
- [13] 黄林忠,杨军,田毅.发电机转子灭磁及过压保护装置改进方案分析[J].内蒙古电力技术,2000(3):20-21.
- [14] 刘豹.现代控制理论[M].北京:机械工业出版社,2006.
- [15] 许佳妮,皇甫宜耿,卓生荣,等.大扰动下 Buck 电源变换 PCL 控制器设计[J].西北工业大学学报,2016,34(1):73-78.

作者简介

孙宝文,1975 年出生,副教授,主要研究方向为电力电子技术、新能源汽车电子电控技术。

E-mail: sbw1975@163.com