

基于 DSP 控制的燃料电池客车用 DC/DC 变换器研究

白 伟, 齐铂金, 汪殿龙

(北京航空航天大学 机械工程与自动化学院, 北京 100083)

摘 要: 简要介绍了研究燃料电池客车用数字化 DC/DC 变换器的意义, 以 Boost 变换器为例分析了 DC/DC 变换器主电路工作原理, 设计了基于 TMS320LF2407A 的控制系统硬件电路平台以及控制系统的软件, 并给出了燃料电池客车用 90 kW Boost 变换器试验结果及其技术参数。数字化 DC/DC 变换器实现了变换器的软开关和可编程的数字化控制, 具有良好的输出和响应特性, 可以满足燃料电池客车复杂的控制要求及城市工况运行要求, 并且已经在城市工况下示范运行。

关键词: 燃料电池客车; DC/DC 变换器; 数字控制

Digital Control DC/DC Converter for Fuel Cell Bus

BAI Wei, QI Bo-jin, WANG Dian-long

(School of Mechanical Engineering and Automation, Beihang University,
Beijing 100083, China)

Abstract: The significance of researching on digital control DC/DC converter which used for fuel cell bus is simply introduced. The theory of Boost converter main circuit is described. The control system circuit based on the TMS320LF2407A and its software is particularly designed. The results of experiment and technical parameter of a 90 kW boost converter are given. The DC/DC converter has good output characteristic with soft switching, digital control and could meet the needs of complex control requirements of fuel cell bus and the actual roads test in city.

Keywords: fuel cell bus; DC/DC converter; digital control

中图分类号: TM464 文献标识码: A 文章编号: 0219-2713(2007)03-0010-05

0 引言

能源短缺及环境污染的问题成为当今世界迫切需要解决的综合问题, 而传统的汽车工业便是能源与环境最大杀手之一, 发展清洁、高效的汽车新动力能源已成为十分紧迫的任务。燃料电池(Fuel Cell)就是这样一种绿色能源技术。为了改善燃料电池较“软”的输出特性, 通过 DC/DC 变换器将燃料电池的电压变换后给主驱动电机及其控

制系统, 满足它们输入特性的要求, 这样就使得燃料电池输出特性变“硬”, 并且匹配了变换器的输出阻抗, 所以具有良好控制特性, 并且实现数字化控制、通讯和保护的可靠稳定的 DC/DC 变换器的研制就成为迫切的需求。

近年来 DSP 技术的日臻完善, 标志着数字化技术的兴起, 使得控制领域又面临着一次重大的技术变革。因此, 针对燃料电池客车专用大功率 DC/DC 变换器数字化技术进行研究, 开发出国产的专用数字化大功率 DC/DC 变换器, 对我国电动汽车的发展和普及, 将具有十分重要的理论意义和工程应用价值^[1]。

收稿日期: 2006-07-19

* 基金项目: 国家“863”计划 电动汽车重大专项

1 DC/DC 变换器主电路构成

变换器主电路是基础,直接影响到 DC/DC 变换器的性能。DC/DC 变换器主电路结构简单;工作效率高,显著提高整车的经济性;且自身工作频率高,具有高响应速度,易于实现复杂多变的输入输出特性,可以满足不同控制策略的要求。所以,燃料电池客车用功率混合转换装置放弃了全桥式逆变的主电路拓扑结构而选用 Boost 和 Buck 型主电路拓扑。

DC/DC 变换器按功能可分为:升压变换器(Boost Converter)、降压变换器(Buck Converter)和升降压变换器(Boost-Buck Converter),在燃料电池汽车中主要采用升压或降压变换器。其原理图如图 1 和图 2 所示。

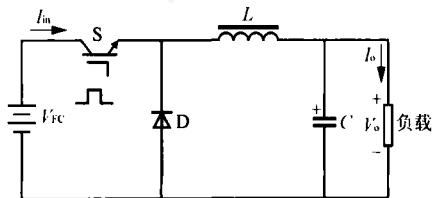


图 1 Buck 电路原理图

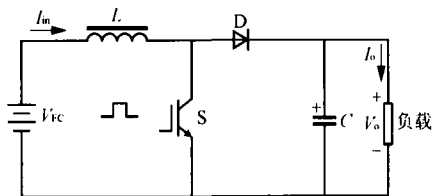


图 2 Boost 电路原理图

以图 2 Boost 变换器为例,简单分析其工作原理:当开关管 S 导通时,电流 I_m 流过电感 L ,电流线性增加,电能以磁能形式储存在电感线圈中。此时,电容 C 放电,负载上流过电流 I 。并在其两端形成输出电压 V_o ,极性上正下负。因为开关管 S 导通,二极管 D 阳极接负极,D 承受反压,所以电容不能通过开关管放电。开关管 S 由导通变为截止时,电感 L 中的磁场将改变线圈 L 两端的电压极性,以保持 I_m 的不变。这样磁能转化成的电压 V_L 与电源电压 V_{fc} 串联,以高于 V_o 的电压向电容 C 、负载供电。高于 V_o 时,电容 C 有充电电流;等于 V_o 时,充电电流为零;当 V_o 有降低趋势时,电容向负载放电,维持 V_o 不变。由于 V_L+V_{fc} 向负载供电时,

V_o 高于 V_{fc} ,从而有了升压的结果^[3]。

2 基于 TMS320LF2407A 的控制电路硬件设计

采用数字信号处理器作为开关电源的控制器不仅可以克服分立元件过多、电路可靠性差、电路复杂等优点,还可以解决单片集成控制器不灵活的弱点;而且 DSP 数字处理器具有工作频率高、指令周期短和改进的总线结构等优点,具有强大的数字处理功能。

TMS320LF2407A 是德州仪器(TI)公司 24X 系列 DSP 控制器的成员,它在电机的数字化方面已经得到了广泛的应用,通过编程和外部电路的配合,完全能够实现燃料电池用大功率 DC/DC 变换器的数字化。图 3 为控制系统的功能框图,控制系统以 TMS320LF2407A 为核心,通过外部附加电路来实现系统所需要的各项控制功能:

(1)通过滤波电路对传感器输入信号进行处理,然后由 ADC 采样电路进行数字采样并送入中央处理器;

(2)由 TMS320LF2407A 直接生成 PWM 控制信号,经过隔离驱动放大后来控制功率开关管的开通与关断;

(3)利用处理器内部的 I/O 口来实现一些外围的附加控制功能,比如:指示灯显示、电路的缓吸、接触器的控制、散热风扇的开关控制等;

(4)通过 CAN2.0 控制器与整车控制器进行远程通讯与控制。

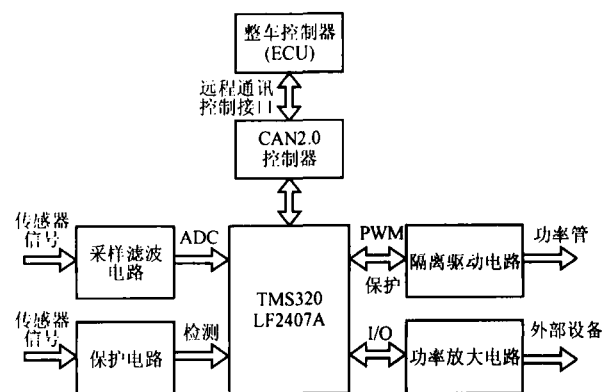


图 3 控制系统功能框图

燃料电池客车数据采样电路的目的是获取系统的输出电压、电流控制反馈信号;功率器件的温

度、电流、电压保护反馈信号。信号传输给控制板通过 TMS320LF2407A 内部集成的 10 位精度的带内置采样/保持的模数转换模块(ADC)后进行数据运算和逻辑判断。该 10 位 ADC 是高速 ADC, 最小转换时间可达到 500 ns, 对于 20~50 kHz 的开关电源来讲, 完全可以做到周期采样的控制要求, 从而保证了 DC/DC 变换器的高速响应时间^[4]。

在 DC/DC 运行过程中, 可能会发生一些异常状态, 例如由于器件损坏等原因, 造成 DC/DC 不工作; 电路出现短路; IGBT 和功率二极管过流; 散热器过热等。对于以上异常状态, 都从硬件电路上给予充分设计并采取相应的保护措施。

3 控制系统软件设计

控制系统负责整个变换过程的控制和通讯, 实现过程的数字化。燃料电池客车用大功率 DC/DC 变换器的控制软件采用 C 语言和汇编语言混合编制, 在完成其控制功能的同时, 力求程序结构合理简单, 以适应大功率开关电源对控制系统的稳定性和可靠性的要求。

3.1 软件的整体结构

控制软件主要包括以下几个部分: 采样处理环节; 由采样值来计算输出脉宽, 并根据此值调整输出的 PWM 脉冲宽度; CAN 通讯来接受控制指令并发送输出的电流、电压值、温度、状态码等信息; 中断服务程序; 故障处理及保护功能程序。控制系统初始化程序和主程序流程图如图 4 所示。

为了提高软件的运行效率, 把不需要及时处理的部分放在主程序里面, 而把一些需要及时处理的控制过程利用中断的方式来进行处理, 如 PWM 波形的调制等需要进行周期处理的工作和必须进行及时处理的工作利用中断方式来处理。另外 CAN 通讯程序也采用中断服务程序来处理, 根据接收到的信息来决定具体的工作模式和工作参数并对变换过程进行调整。

3.2 数字 PID 控制简要设计

PID 控制具有结构简单、参数易于调整等优点, 因而在连续系统控制技术中得到广泛的应用。它是一种按照被控制量偏差的比例、积分和微分

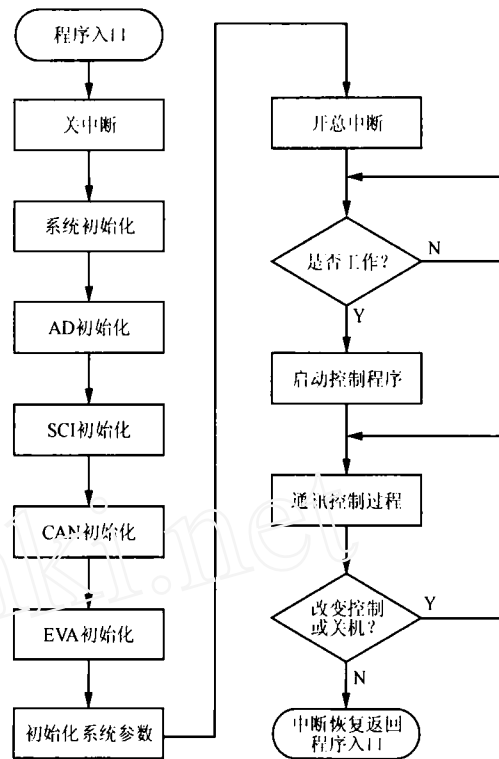


图 4 控制系统主程序流程图

通过线性组合进行控制的方法, 其控制规律为

$$u = K \left(e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e dt + T_d \frac{de}{dt} \right) + u_0 \quad (1)$$

式中: K 为比例系数;

e 为电压偏差信号;

T_i 为积分时间常数;

T_d 为微分时间常数;

u_0 为初始值。

由于数字 PID 控制是一种采样控制, 它根据采样时刻的偏差值计算控制量, 在式(1)中的积分和微分项不能直接准确计算, 因此在本控制系统中采用了增量式 PID 算法, 其控制规律的数值公式为

$$\Delta u_i = K \left[e_i - e_{i-1} + \frac{T}{T_i} e_i + \frac{T_d}{T} (e_i - 2e_{i-1} + e_{i-2}) \right] \quad (2)$$

式中: T 为采样周期。

由式(2)可以看出, 增量式算法只需要保存前三个时刻的偏差值, 占用空间小, 计算误差或精度不足时对系统影响小, 累计误差同样也比较小, 而且在每次重新启动时, 可以在原来的基础上进行控制, 减少系统的响应时间。同时也避免了因偶然因素造成控制器的输出做大幅度的剧烈变化, 使

系统的可靠性大大提高。

对于本系统, PID 控制器的参数主要是通过试验来确定。系统的采样周期就是 DC/DC 的开关周期, 根据前一个周期的采样值来计算下个周期的输出脉宽, 每一次采样中断就必须进行一次计算。PID 的算法嵌套在 ADC 的中断处理程序之中。

3.3 可编程数字化输入输出特性控制

燃料电池客车用大功率 DC/DC 变换器输入电压范围大约在 100V 左右, 需要设定输入欠压保护, 防止燃料电池电压过低导致故障。基于欠压保护程序实时高速采样对达到欠压点后进行功率限制, 保证燃料电池正常工作, 同时可以根据燃料电池和整车需求的变化进行数字化设置。

DC/DC 变换器输出特性要与电机控制器、动力电池的正常工作范围匹配, 又要配合整车控制器 (ECU) 复杂的控制策略。所以输出特性设计为恒压限流和恒流限压两种模式, 如图 5 所示。由 ECU 通过 CAN 发送给定值, 两种特性可以在发送一个 CAN 控制指令周期内切换, 实现了可编程的输出特性控制。

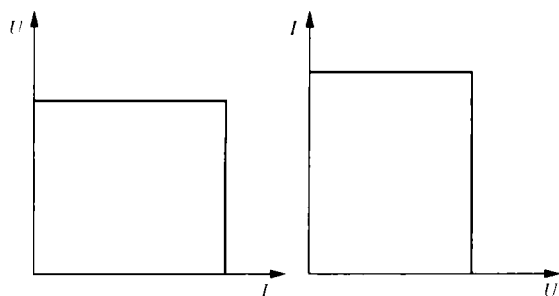


图 5 恒压限流、恒流限压输出特性曲线示意图

4 试验结果及技术参数

整个实验系统由所研制的燃料电池发动机用 90 kW Boost DC/DC 变换器、100 kW 燃料电池模拟装置、电机及其控制器、PC 机以及数字示波器等测试设备组成。变换器的 IGBT 开关电压波形, PWM 驱动波形的测试结果如图 6 所示, 从波形中可以看出, Boost 变换器开关管的开关电压和驱动波形均较理想, 变换器的开关功率损耗较小。

系统的输出响应曲线如图 7 所示, 从图 7 中可以看到, 系统的输出电压从 380 V 降到 340 V 只需要不到 200 ms 的时间, 响应速度较快、超调量小且稳态控制精度较高。

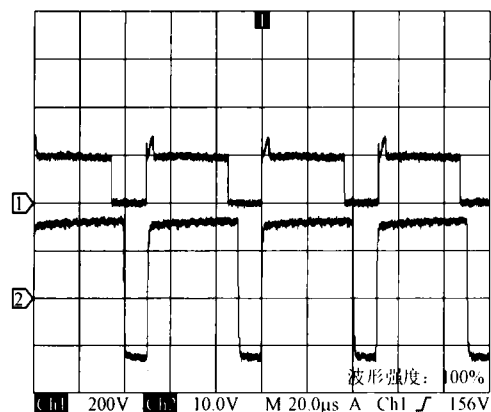


图 6 IGBT 开关电压和 PWM 驱动波形

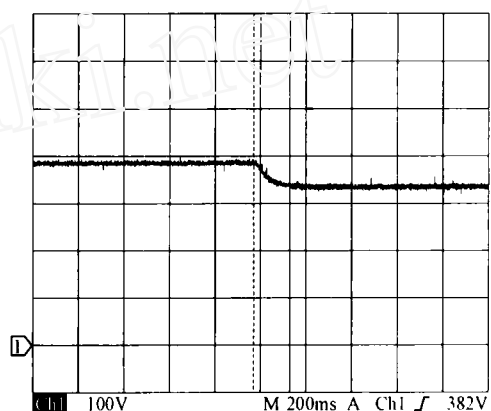


图 7 系统的给定响应曲线

燃料电池发动机用 90 kW Boost DC/DC 变换器技术参数如下:

- (1) 输入电压 DC $\leq 350\text{V}$;
- (2) 输出电压 DC 350~450V;
- (3) 输出电流 200~250 A;
- (4) 额定功率点效率 $\geq 97\%$;
- (5) 输出纹波 $\leq 1\%$;

(6) 通过 CAN 通讯实现具有可编程的外特性控制, 即恒压限流、恒流限压;

(7) 系统的自主控制与整车控制器 (ECU) 控制两种控制方式随意切换。

5 结语

所研制的燃料电池客车用数字化 90 kW Boost DC/DC 变换器采用 IGBT 作为功率开关管, 具有较高的效率和可靠性; 控制系统采用数字处理芯片和数字控制技术, 具有很高的实时性和良好的可编程控制功能, 满足了整车复杂的控制要

(下转 P20)

2 保护功能设计与电磁兼容措施

图1中 D_1 、 D_2 、 D_3 为快恢复二极管,均为串联方式中的保护器件,功能是防止反向电压加到任一电源模块上,要求 D_1 、 D_2 、 D_3 反向耐压大于两倍的电源额定输出电压,电流大于两倍的电源额定输出电流,正向导通压降应尽量小。

图2中的 D_1 、 D_2 为TVS管(浪涌电压吸收器),TVS具有极短的响应时间和相当高的浪涌吸收能力,可抑制感性负载切换时产生的瞬变电压,也可用于保护设备或电路免受静电以及感应雷所产生的过电压的冲击。TVS以旁路吸收的方式保护了电源系统,同时降低了电磁干扰,提高了电源系统可靠性与寿命。使用中TVS管的击穿电压要比被保护电路工作电压高10%左右,以防止电路工作电压接近TVS击穿电压,造成TVS出现漏电流并影响电路正常工作;还可以避免因环境温度变化导致TVS击穿电压落入线路正常工作电压的范围。

在模块输出电压调整端加滤波电容有助于降低纹波。通过在电源系统调整端和输出端采用聚脂电容滤波,电源内部采用双绞线走线方式等多方面滤波措施,最终使得+75V电源系统的输出纹波控制在400~600mV,满足了+75V电源纹波电压 ≤ 750 mV的使用要求。

3 结语

分立元件设计方案中,采用的元器件种类及数量繁多,集成度低,可靠性较差。特别是大功率的开关变压器、功率全桥、散热器等功率部件体积较大,装配及安装复杂。而模块化设计的电源体积紧凑、形状规则、安装容易。依靠机箱壳体传导散热无须设计专门的散热器,散热面积大,其工作的可靠性已在实际应用中得到验证。随着DC/DC模块技术水平的提高,各类电源的设计手段越来越先进,在一些要求体积小、设计质量高、研制周期短的电源设计任务中,采用技术成熟的高可靠的DC/DC模块以串联模式完成升压电源设计,不失为一种首选的设计手段。

参考文献

- [1] 李为民, 吴曼曼. 直流电机伺服驱动专用电源的设计[J]. 电子产品世界, 2006.(6).
- [2] 杨克俊. 电磁兼容原理与设计技术[M]. 北京:人民邮电出版社, 2003.
- [3] LAMBDA公司. LAMBDA模块应用说明手册[Z]. 2003.

作者简介

李为民(1965-),男,华中光电技术研究所高级工程师,长期从事光电设备自动控制系统的研究工作。曾获国防科工委三等奖一次;部级二、三等奖各一次;院级科技进步三等奖一次,发表论文二十余篇。

(上接 P13)

求;整机采用模块化方式,可以和整车进行可靠的通讯,人机交互性好。该变换器已经成功地应用在国内第一辆燃料电池城市客车上,各项技术指标均满足使用要求。

参考文献

- [1] 陈全世, 仇斌, 谢起成, 等. 燃料电池电动汽车[M]. 清华大学出版社, 2005.
- [2] Quanshi Chen, Bin Qiu, Qicheng Xie. Fuel Cell Electrical Vehicle[M]. Tsinghua University Press. 2005.
- [3] Chan C C. The Present Status and Future Trends of Electric Vehicles [A]. Proceedings of First Circular of China-Japan Electric Vehicle Joint Conference [C]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press. 2001.

- [4] 张占松, 蔡宣三. 开关电源的原理与设计[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.
- [5] 刘和平, 王维俊, 江渝, 邓力. TMS320LF240x DSP C语言开发应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社, 2003.

作者简介

白伟(1982-),男,北京航空航天大学机械工程与自动化学院硕士研究生,研究方向为大功率特种电源技术及应用。

齐铂金(1963-),男,北京航空航天大学机械工程及自动化学院教授,博士生导师。

汪殿龙(1978-),男,北京航空航天大学机械工程及自动化学院博士研究生,研究方向为大功率特种电源技术及应用。