

# 燃料电池汽车车载 DC/DC 变结构控制研究

冯 适,张立炎,全书海

(武汉理工大学 自动化学院,湖北 武汉 430070)

**摘要:**在介绍 DC/DC 变换器基本原理的基础上,针对燃料电池特定系统的设计,建立了燃料电池电动汽车车载 DC/DC 变换器的数学模型。在模型分析的基础上,提出了符合特性的 DC/DC 变换器滑模变结构控制方案。并用 Matlab 软件对所设计的控制系统进行了仿真实验,仿真结果证明了理论分析和计算的正确性。

**关键词:**滑模变结构控制;燃料电池电动汽车;DC/DC

**中图分类号:**TP273

**文献标志码:**A

燃料电池是最有前途的车用能源,也是未来汽车的主要能源。燃料电池尤其是以氢为原料的燃料电池,成了电动汽车发展的希望。我国电动汽车的研发与国外基本处于同一起跑线上,技术水平与产业化差距较小。从 2001 年起,国家在电动车领域的投资达到 100 亿元人民币,“863”计划中涉及这一领域的投资达到 8.8 亿元人民币<sup>[1]</sup>。燃料电池系统的输出电压通常较低,而且燃料电池的外特性(电压随电流的变化)斜率较大,当输出电流变化时,输出电压的波动较大。电池的充放电特性及其使用的安全性也要求电池的端电压在较小的范围内变化。因此,燃料电池难以直接与电池并联使用。解决这个问题的方法就是在燃料电池的输出端串接一个 DC/DC 变换器,对燃料电池的输出电压进行升压变换调节。

国内外对燃料电池电动汽车系统中的 DC/DC 变换器进行过很多探索和研究。文献[2]在 DC/DC 变换器的低压侧采用全桥电路,高压侧采用一种由两个有源开关组成的可控倍压电路,通过移相来控制经变压器传递的能量。但是相对来说,DC/DC 环节功率管个数较多,且控制比较复杂。

目前所使用的大功率 DC/DC 存在着自身功率损耗较大、能量转换效率不高等问题,而整车控制器 DC/DC 变换器可以更加有效地保护燃料电池,延长燃料电池的寿命。由于燃料电池发出控制命令时,要求 DC/DC 必须迅速地做出响应,因此要求一个设计合理的滑模变结构控制系统既要

保持系统的稳定性,又具有快速响应性,且对参数变化不敏感,不受外部扰动的影响。相对于传统的 PI 控制器其具有较好的快速性和鲁棒性。

BOOST 变换器是一种升压型 DC/DC 变换器。采用变结构(SMVSC)控制时,将使系统具有快速、良好的瞬态响应,对参数的摄动和外界干扰具有较强的鲁棒性、总的谐波失真小和电路实现较简单等特点<sup>[3]</sup>。SMVSC 控制的基本思想是,利用 DC/DC 变换器在导通和关断期间状态各不相同,通过寻求一控制集使系统在较短的时间内到达滑模面,在满足渐进稳定的同时,具有良好的动态品质。

## 1 燃料电池的输出特性

燃料电池的输出特性由燃料电池在能量转换过程及结构上的特性所确定,当输出电流变化时,其输出电压波动较大<sup>[4]</sup>。图 1 给出了燃料电池的电流-电压曲线。由图 1 可以看出,在燃料电池加载的起始阶段,其电压下降较快。之后,当负载电流增加时,其电压下降率仍比普通电池大得多,因而燃料电池的输出特性相对较软。此外,燃料电池的特点及结构决定了若其输出功率波动较大,将会导致其效率下降<sup>[5]</sup>。

## 2 DC/DC 变换器的模型

ZVT-BOOST 电路从根本上说是一个 BOOST 电路,将其简化为如图 2 所示的电路。假

收稿日期:2007-12-20.

作者简介:冯 适(1982-),男,湖北武汉人,武汉理工大学自动化学院硕士研究生.

基金项目:国家“863”计划专项基金资助项目(2006AA11A133);湖北省自然科学基金资助项目(2005ABA225).

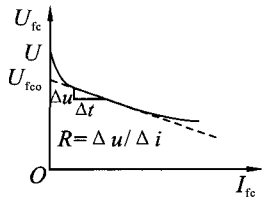


图1 燃料电池的输出特性曲线

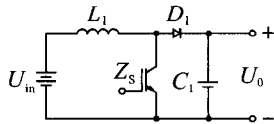


图2 BOOST 电路

定电路中各电感  $L$ 、电容  $C$ 、开关元件 (IGBT)、二极管均是理想的。开关元件和二极管理想是指其导通时电压为零,截止时电流为零,导通与截止的转换是瞬时完成的。设  $U=1$  时开关元件导通,  $U=0$  时开关元件关断<sup>[6]</sup>。

模态 1:  $U=0$  时

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} + U_C = E \\ i_L = \frac{U_C}{R} + C \frac{dU_C}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

令  $x_1 = i_L, x_2 = U_C$  ( $i_L$  为电感电流,  $U_C$  为电容电压), 则有:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{L}(E - x_2) \\ \dot{x}_2 = \frac{1}{C}\left(x_1 + \frac{1}{R}x_2\right) \end{cases} \quad (2)$$

模态 2:  $U=1$  时

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = E \\ i_L = -C \frac{dU_C}{dt} \end{cases} \quad (3)$$

同理有:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = \frac{1}{L}E \\ \dot{x}_2 = -\frac{1}{RC}x_2 \end{cases} \quad (4)$$

写成适合控制理论分析的状态方程:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \mu \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{E}{L} \\ 0 \end{pmatrix}$$

令  $\dot{x} = \begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix}$ , 则

$$f(x) = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{E}{L} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{L}x_2 + \frac{E}{L} \\ \frac{1}{C}x_1 - \frac{1}{RC}x_2 \end{pmatrix}$$

$$g(x) = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1}{L} \\ -\frac{1}{C} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{L}x_2 \\ -\frac{1}{C}x_1 \end{pmatrix}$$

$$\dot{x} = f(x) + g(x)\mu \quad (5)$$

式(5)即为 BOOST 变换器的状态空间方程模型。

### 3 车载 DC/DC 变换器的滑模变结构控制

在选择滑模面的时候必须选择连续的参量为控制量。对于 BOOST 变换器电路, 因其  $\frac{dU_C}{dt}$  是不连续的, 即输出滤波电容的电流  $i_C$  是不连续的, 因此在设计滑模面时不能选择输出电压作为滑模面的参量<sup>[7]</sup>。而当其输入电流连续时, 可以选择该参量构造滑模面方程。考虑到实际应用的情况, 有:

$$s(x) = x_1 - k$$

其中,  $k$  为给定电流值。

本系统模型中的控制对象实际上就是 DC/DC 变换器的输入电流, 同时也是电池的输出电流。它与传统的恒压控制方式不同, 因此在控制器的设计上, 也会有所区别。下面判别其滑模性:

$$L_g s = \langle \nabla s, g \rangle = \left( \frac{\partial s}{\partial x_1} \quad \frac{\partial s}{\partial x_2} \right) g(x) =$$

$$(1 \ 0) \begin{pmatrix} \frac{1}{L}x_2 \\ -\frac{1}{C}x_1 \end{pmatrix} = \frac{1}{L}x_2 > 0 \quad (6)$$

$$\text{取 } \mu = \mu_{eq} + \Delta\mu$$

$$\mu_{eq} = \frac{L_f S}{L_g S} = \frac{\langle \nabla s, f \rangle}{\langle \nabla s, g \rangle} = -\frac{\left( \frac{\partial s}{\partial x_1} \quad \frac{\partial s}{\partial x_2} \right) f(x)}{\left( \frac{\partial s}{\partial x_1} \quad \frac{\partial s}{\partial x_2} \right) g(x)}$$

$$(1 \ 0) \begin{pmatrix} -\frac{1}{L}x_2 + \frac{E}{L} \\ \frac{1}{C}x_1 - \frac{1}{RC}x_2 \end{pmatrix} = \frac{x_2 - E}{x_2}$$

$$(1 \ 0) \begin{pmatrix} \frac{1}{L}x_2 \\ -\frac{1}{C}x_1 \end{pmatrix}$$

$$\Delta\mu = K \times \Delta s \quad (7)$$

式中,  $K = 1/\Delta$ 。

在这里采用的准滑模控制集如下:

$$\mu = \begin{cases} \mu_{\min} & s > \Delta \\ \mu_{eq} + \Delta\mu & |s| \leq \Delta \\ \mu_{\max} & s < -\Delta \end{cases} \quad (8)$$

由此得到 DC/DC 变换器的滑模变结构控制律。

#### 4 仿真结果

由于燃料电池的输出特性偏软,当负载电流增加时,其电压下降较快。因此在整车控制器 DC/DC 变换器发出控制命令时,DC/DC 必须迅速做出响应。在这里,通过模拟系统的功率调节过程来验证所设计的 DC/DC 变换器是否符合设计要求。

根据图 3 的 ZVT - BOOST 变换器结构建立仿真模型。

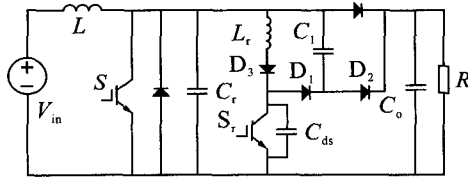


图 3 ZVT - BOOST 变换器结构

为了实现对电力系统和电力驱动的仿真, SimPowerSystems 提供了 7 类模块,其中包括联接模块、电源、线性 and 非线性无源元件、电动机和电力电子模块及测量模块等。通过电流测量模块和电压测量模块分别得到变换器的输出电压信号和电感电流信号,将这两种信号输入到控制器子系统模块,控制器子系统模块根据输入信号计算得到 IGBT 开关元件的占空比信号。控制器子系统的仿真模型如图 4 所示。

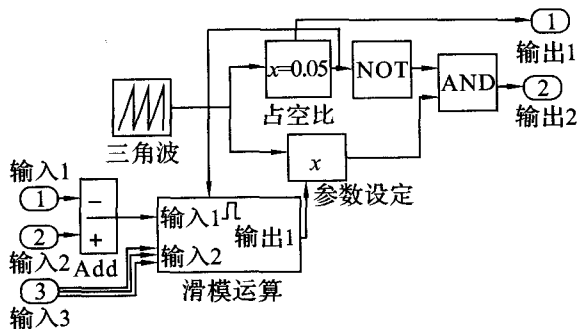


图 4 控制器子系统的仿真模型

控制器子系统是一个闭环控制系统。其将采样得到的输入电流与电流给定值相减,得到电流误差信号,并经过滑模运算,得到下一个周期占空比的值。与三角波信号比较后得到 PWM 输出波

形,并输出给变换器主回路中的 IGBT 开关元件,从而实现对整个系统的控制<sup>[8]</sup>。对于辅助管的控制采用恒定占空比的方式,它的占空比为 5%。对于主管采用滑模控制,控制器仿真的参数如下:

初值,即 0 秒时,输入电流为 50 A,输入电压为 200 V,等效负载电阻为 5  $\Omega$ 。

$$(L = 1.5 \text{ mH}, C = 420 \text{ } \mu\text{F}, L_r = 20 \text{ } \mu\text{H})$$

在 0.05 s 时刻,系统负载突然增加,整车控制器发出命令使燃料电池的输出功率逐渐增加。系统负载增加后,其等效负载电阻为 8  $\Omega$ ,整车控制器发出控制命令,将 DC/DC 变换器的输入电流由 50 A 逐渐增加至 100 A,调节时间为 0.1 s。

分别采用滑模变结构控制和传统的 PI 控制。系统响应的输入电压、电流波形和输出电压波形如图 5 所示。

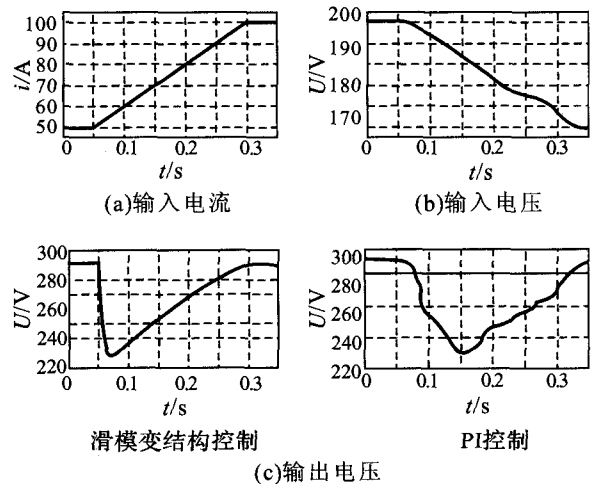


图 5 负载增加时响应输出波形

从图 5(c) 可以看到,无论是在前期的稳定状态还是最后的稳定状态中,系统输出都存在着一一定的纹波,这是由 DC/DC 变换器的固有属性所决定的。但是此时的纹波已经非常小 (< 3%),完全可以满足控制系统的要求。系统在调节过程中也出现了一定幅度的抖振,抖振幅度并不大,其纹波系数 < 10%。这段时间的抖振是由控制系统的时间滞后引起的。经过这段时间的调节后,系统达到滑模面,进入稳定状态。

负载突变过程中,DC/DC 系统的输出电压下降较快。在这里需要说明的是,实际中 DC/DC 变换器的输出端是与镍氢电池组并联的,因此在转换时刻不足的功率由镍氢电池组提供,母线上的电压仍钳位在 288 V 左右。随着输入电流的逐渐增加,DC/DC 变换器的输出电压也逐渐上升。而用 PI 控制会产生较大的纹波,不利于系统的稳定,最重要的是如采用 PI 控制,其响应时间不符合系

统快速性的要求,响应时间延后了0.1 s之多。

## 5 结论

在DC/DC变换器模型分析的基础上,提出了符合燃料电池电动车特性的DC/DC变换器滑模变结构控制方案,并用Matlab软件对所设计的控制系统进行仿真实验。仿真结果证明了理论分析和计算的正确性,所设计的滑模变结构控制器完全符合燃料电池的输出特性,使系统具有较好的快速性和鲁棒性,并且改善了燃料电池的输出性能,控制效果十分理想。

### 参考文献:

[1] 钱立军,赵 韩,高立新.电动汽车开发的关键技术及技术路线[J].合肥工业大学学报,2002,25(1): 17-21.

- [2] 王正仕,方红兴.辅助管实现无损吸收的零电压转移BOOST电路[J].电力电子技术,2000(4):7-12.
- [3] 刘金琨.滑模变结构控制 Matlab 仿真[M].北京:清华大学出版社,2005.
- [4] 王书贤.电动汽车的现状与发展趋势[J].中国汽车制造,2006,9(2):38-40.
- [5] 衣宝廉.燃料电池——原理·技术·应用[M].北京:化学工业出版社,2003.
- [6] JIN W, FANG Z P, JOEL A, et al. Low cost fuel cell converter system for residential power generation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 5(19): 1 315-1 322.
- [7] MAREIS M I, LAMBERT S. DC/DC converters for fuel cell powered hybrid electric vehicle [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005(9): 7-9.
- [8] LEE T W, KIM S H, YOON Y H, et al. A 3 kW fuel cell generation system using the fuel cell simulator [J]. Industrial Electronics, 2004,3(2):833-837.

## Study on the SMVSC DC/DC Converter Control

FENG Shi, ZHANG Liyan, QUAN Shuhai

**Abstract:** The basic principles of SMVSC control were introduced. The mathematical model of a fuel cell electric vehicle on-board DC/DC converter was designed. Based on the analysis of the model, the SMVSC control plan of DC/DC was presented. The simulation control systems were finished using MATLAB. The simulation results show the accuracy of the analysis and calculation.

**Keywords:** sliding mode variable structure control (SMVSC); fuel cell electric vehicles; DC/DC converter

**FENG Shi:** Postgraduate; School of Automation, WUT, Wuhan 430070, China.

[编辑:周廷美]

(上接第432页)

## Progress in the Study of Failure Waves in Brittle Materials under Shock Compression

CHEN Dengping, LI Mingfa, HE Hongliang, JING Fuqian

**Abstract:** The study of the failure wave originated in 1991 when Rasorenov reported that a small and abnormal recompression signal in their recording of the free surface velocity is taken in K19 glass when the shock stress is below or close to the Hugoniot Elastic Limit ( $\sigma_{HEL}$ ). A comprehensive review and comment on the studies of the physical properties and possible formation mechanisms of the failure wave in brittle materials under shock compression were given. The research and work done in this area was also presented.

**Key words:** shock wave; failure wave; mechanism of failure; brittle materials

**CHEN Dengping:** Lect.; School of Science, WUT, Wuhan 430070, China.

[编辑:周廷美]