

燃料电池车用大功率 DC-DC 变换器 复合输入输出特性控制系统

汪殿龙¹, 王军¹, 胡云岩¹, 齐铂金²

(1. 河北科技大学材料科学与工程学院, 河北省 石家庄市 050018;

2. 北京航空航天大学机械工程与自动化学院, 北京市 海淀区 100083)

Compound Input and Output Feature Control System of High Power DC-DC Converter for Fuel Cell Electric Vehicles

WANG Dian-long¹, WANG Jun¹, HU Yun-yan¹, QI Bo-jin²

(1. School of Material Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, Hebei Province, China; 2. School of Mechanical Engineering and Automatization, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Haidian District, Beijing 100083, China)

ABSTRACT: Fuel cell electric vehicles (FCEV) are an emerging clean energy vehicle. In order to meet the requirements of the complex input and output features of the DC-DC converter for FCEV, a compound input/output feature control system was proposed which is based on the three-closed-loop control system consisting of output constant voltage, output constant current and input under-voltage, and a compound automatic controller was employed to dynamically choose the method to control the feature regulating signals. The mathematical model was built for the compound control system, and its working principle was analyzed in detail. The model was simulated with the software Simulink and the results were validated by the experiments. Simulation and experiment results verify the effectiveness and feasibility of the control system. The method enables the FCEV to control the external features of the input and output of the converter. The method has been applied to the 90 kW DC-DC converter, and proved to operate with reliability.

KEY WORDS: fuel cell electric vehicles; DC-DC converter; under voltage; feature control

摘要: 燃料电池电动汽车是一种新兴的清洁能源汽车, 针对燃料电池电动汽车用 DC-DC 变换器复杂的输入输出特性的要求, 在输出恒压、输出恒流和输入欠压 3 闭环系统的基础上, 通过增加复合自动控制器、动态选择控制特性调节信号

的方法, 设计一种复合输入输出特性控制方法。建立了该复合控制系统的数学模型, 并详细分析其工作原理, 用 Simulink 软件对该模型进行仿真, 通过实验对该模型进行验证。仿真和实验结果验证了控制系统的有效性和实验的可行性。该方法实现了燃料电池电动汽车对 DC-DC 变换器输入输出外特性控制, 并在所研制 90 kW 升压型 DC-DC 变换器中得到应用, 运行工作可靠。

关键词: 燃料电池汽车; DC-DC 变换器; 欠压; 特性控制

0 引言

燃料电池电动汽车(fuel cell electric vehicles, FCEV)是一种新兴的清洁能源汽车, 其动力源是燃料电池(fuel cell, FC), 但是由于 FC 电气输出特性较软且动态响应能力不足, 采用 DC-DC 变换器对其进行功率变换、能量传递和控制是一种有效的解决方案, 可实现对输入电压、输出电压和电流的控制, 并提高其动态性能。DC-DC 变换器输入输出特性控制的差异直接影响了 FCEV 整车的性能, 因此需要对 FCEV 用大功率 DC-DC 变换器的输入输出特性的控制展开深入系统的研究^[1-3]。

1 DC-DC 变换器输入输出特性要求

1.1 FCEV 动力系统构型

在 FCEV 动力系统中, 主 DC-DC 变换器是实现整车能量流动控制、提高整车动力性能的关键零部件, 受整车控制器(electronic control unit, ECU)的控制。

基金项目: 国家高技术研究发展计划项目(863 计划)(2006AA11A145); 河北科技大学校立研究基金(XL200706)。

The National High Technology Research and Development of China (863 Program)(2006AA11A145).

图 1 为燃料电池汽车的动力系统构型，主要由燃料电池发动机、主 DC-DC 变换器、蓄电池、电机控制器、电机及相关辅助设备构成。

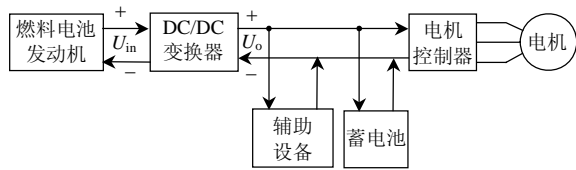


图 1 FCEV 动力系统构型

Fig. 1 Dynamic system configuration of the FCEV

1.2 FCEV 对 DC-DC 变换器输入输出特性要求

FCEV 所用 DC-DC 变换器具有输出恒压、输出恒流、输入欠压 3 种特性控制方式^[4-12]。在实际应用中，输入输出特性应满足如下控制逻辑：

1) 输入特性。要求 FC 总的输出电压工作在一定的范围，当 FC 输出电压到达欠压点以后，输出功率不再增加，否则会出现燃料电池单片电池电压过低的现象。无论 DC-DC 输出处于何种模式，当输入电压降至欠压给定值时，必须对 DC-DC 输出功率大小进行限制，使其输入电压不低于该给定值。

2) 输出特性。在输入电压不低于设定输入欠压点前提下，此时输出特性应具有如图 2 所示的恒压限流矩形特性和恒流限压矩形特性。DC-DC 变换器恒压输出，对输出电压进行闭环控制，输出目标值 u_g 由 ECU 来控制，并可以实时调节输出电压 u_o 大小， $i_{o\max}$ 为最大输出电流值；DC-DC 变换器恒流输出，对输出电流进行闭环控制，输出目标值 i_g 由 ECU 来控制，并且可以实时调节输出电流 i_o 大小， $u_{o\max}$ 为最大输出电压值。

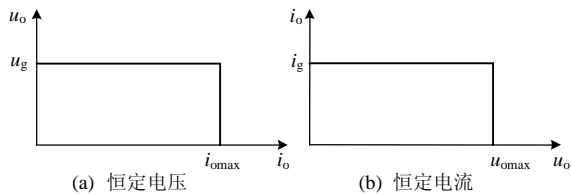


图 2 恒压限流与恒流限压矩形输出特性

Fig. 2 Constant voltage and limited current, constant current and limited voltage rectangular output characteristics

常规 DC-DC 变换器只对输出特性进行控制，比如输出恒压或者输出恒流，一般不涉及对输入特性的控制^[13-17]，而 FCEV 用 DC-DC 变换器具有输出恒压、输出恒流、输入欠压 3 种特性控制方式。

应用经典自控原理，上述欠压、恒压、恒流控制方式均可由闭环负反馈来实现。由于 FC 工作在较为复杂的状态下，它的输出电压和输出功率不断

波动，即 DC-DC 变换器的输入电压也在不断变化，这样就需要变换器实时对输入电压进行控制；同时，变换器也会根据负载的不同在输出恒压和恒流模式下相互切换。因此 DC-DC 变换器需要解决 3 种不同特性下的复合控制与自动切换。

2 复合输入输出特性控制系统的数学模型

2.1 复合输入输出特性控制原理

针对上述情况，提出了一种复合输入输出特性软切换控制方法^[3]，将 3 种特性复合在一起，根据 DC-DC 变换器的输入电压和输出负载的状况，对 DC-DC 变换器的输入输出特性进行自动切换，具体原理框图如图 3 所示。

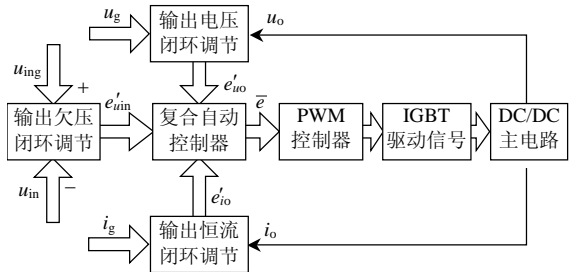


图 3 复合输入输出特性控制原理

Fig. 3 Principle of the external characteristic compound control system

首先应建立输出恒压、输出恒流和输入欠压控制的闭环调节系统，然后将 3 个闭环控制输出送入复合控制器，来选择当前的闭环调节系统。

图 3 中 u_o 、 i_o 分别为 DC-DC 变换器输出电压反馈信号和输出电流反馈信号， u_{in} 为 DC-DC 变换器输入电压信号，这 3 个信号由变换器根据输入输出检测得到； u_g 、 i_g 、 u_{ing} 分别为输出恒压给定信号、输出恒流给定信号、输入欠压给定信号，这 3 个信号由 FCEV 的 ECU 给出或预先设定。 e'_{uo} 、 e'_{io} 、 e'_{uin} 分别为 3 路闭环控制调节后得到的调节值，这 3 个调节值经过复合自动控制控制器，得到调节信号 \bar{e} ，由 \bar{e} 对 PWM 电路进行脉宽调制控制，调节绝缘栅双极型晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT) 的占空比，实现 DC-DC 变换器的输入输出控制。 \bar{e} 为 3 路特性信号之一，并且随着输入输出状态的变化不断自动变化。

2.2 复合输入输出特性控制系统的数学模型

按照复合输入输出特性控制的原理，建立系统的数学模型，如图 4 所示。

DC-DC 变换器的 u_o 、 i_o 、 u_{in} 经传感器检测后，经过调节器 $H_{uo}(s)$ 、 $H_{io}(s)$ 、 $H_{uin}(s)$ 得到反馈信号 b_{uo} 、

b_{io} 、 b_{iin} ；恒压给定信号 u_g 、恒流给定信号 i_g 、欠压给定信号 u_{ing} 由ECU给出或预先设定,通过各自闭环调节环节得到3路误差信号 e_{uo} 、 e_{io} 、 e_{iin} ,有

$$\begin{cases} e_{uo}(s) = u_g(s) - b_{uo}(s) \\ e_{io}(s) = i_g(s) - b_{io}(s) \\ e_{iin}(s) = u_{ing}(s) - b_{iin}(s) \end{cases} \quad (1)$$

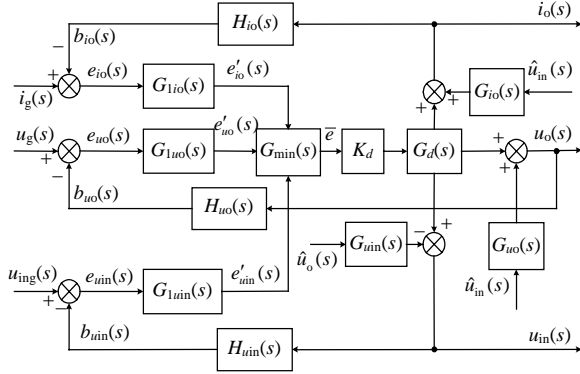


图4 复合输入输出特性闭环控制系统模型框图

Fig. 4 Model of the external characteristic compound close-loop control system

$G_{1uo}(s)$ 、 $G_{1io}(s)$ 、 $G_{1iin}(s)$ 分别为输出恒压、输出恒流和输入欠压控制调节器的传递函数,误差信号 e_{uo} 、 e_{io} 、 e_{iin} 经过各自调节器校正补偿后,得到 e'_{uo} 、 e'_{io} 、 e'_{iin} ,有

$$\begin{cases} e'_{uo}(s) = e_{uo}(s)G_{1uo}(s) \\ e'_{io}(s) = e_{io}(s)G_{1io}(s) \\ e'_{iin}(s) = e_{iin}(s)G_{1iin}(s) \end{cases} \quad (2)$$

将复合特性自动控制器传递函数定义为 $G_{min}(s)$,有

$$G_{min}(s) = \min\{e'_{uo}(s), e'_{io}(s), e'_{iin}(s)\} \quad (3)$$

$G_{min}(s)$ 的物理意义为3路闭环调节信号的最小值,这3个计算值经过复合自动控制器,得到信号 $\bar{e}(s)$

$$\bar{e}(s) = \min\{e'_{uo}(s), e'_{io}(s), e'_{iin}(s)\} \quad (4)$$

$\bar{e}(s)$ 为3路特性调节信号之一,由 $\bar{e}(s)$ 对PWM控制器进行脉宽调制,输出驱动信号,控制开关管占空比 d , K_d 、 $G_d(s)$ 分别为比例调节环节和PWM控制器的传递函数,定义控制系统输出为 $G(s)$,则 $G(s)$ 与 d 之间的关系为

$$G(s) = \min \begin{pmatrix} e_{uo}(s)G_{1uo}(s) \\ e_{io}(s)G_{1io}(s) \\ e_{iin}(s)G_{1iin}(s) \end{pmatrix} K_d G_d(s) \quad (5)$$

即

$$G(s) = \bar{e}(s)K_d G_d(s) \quad (6)$$

随着 $\bar{e}(s)$ 的确定, $G(s)$ 也随之确定。3种特性控制模式通过上述环节复合在一起,动态选择当前特性控制闭环,得到目标输入输出特性,不同特性之间

可以自动切换。

若考虑输入输出电压的扰动量 \hat{u}_{in} 、 \hat{u}_o 及其传递函数 G_{uo} 、 G_{io} 、 G_{iin} ,则变换器的输入输出为

$$\begin{bmatrix} u_o \\ i_o \\ u_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_d G_{1uo}(s) G_d(s)}{1 + K_d H_{uo}(s) G_{1uo}(s) G_d(s)} u_g + G_{uo} \hat{u}_{in} \\ \frac{K_d G_{1io}(s) G_d(s)}{1 + K_d H_{io}(s) G_{1io}(s) G_d(s)} i_g + G_{io} \hat{u}_{in} \\ \frac{K_d G_{1iin}(s) G_d(s)}{1 + K_d H_{iin}(s) G_{1iin}(s) G_d(s)} u_{ing} - G_{iin} \hat{u}_o \end{bmatrix} \quad (7)$$

若扰动量为零,则有

$$\begin{bmatrix} u_o \\ i_o \\ u_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{K_d G_{1uo}(s) G_d(s)}{1 + K_d H_{uo}(s) G_{1uo}(s) G_d(s)} u_g \\ \frac{K_d G_{1io}(s) G_d(s)}{1 + K_d H_{io}(s) G_{1io}(s) G_d(s)} i_g \\ \frac{K_d G_{1iin}(s) G_{iind}(s)}{1 + K_d H_{iin}(s) G_{1iin}(s) G_d(s)} u_{ing} \end{bmatrix} \quad (8)$$

3 复合输入输出特性控制系统的仿真

用Simulink对该控制系统进行仿真,图5为系统Simulink仿真模型。

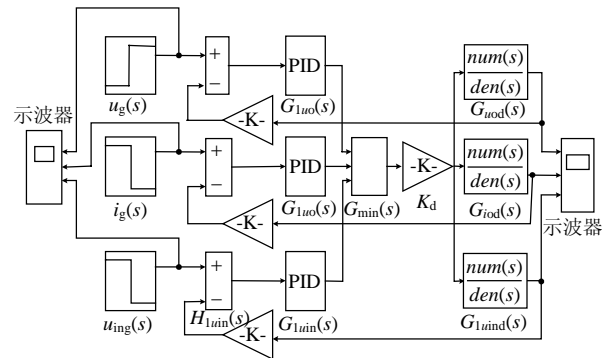


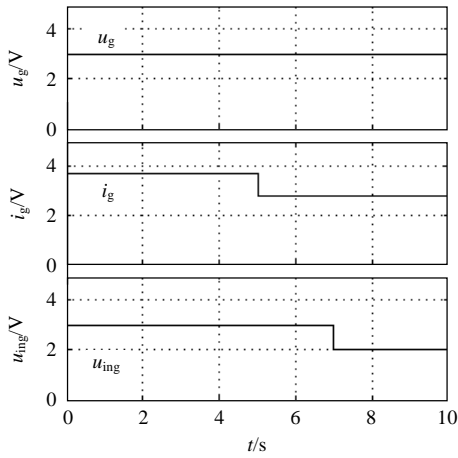
图5 Simulink仿真模型

Fig. 5 Simulation model by simulink software

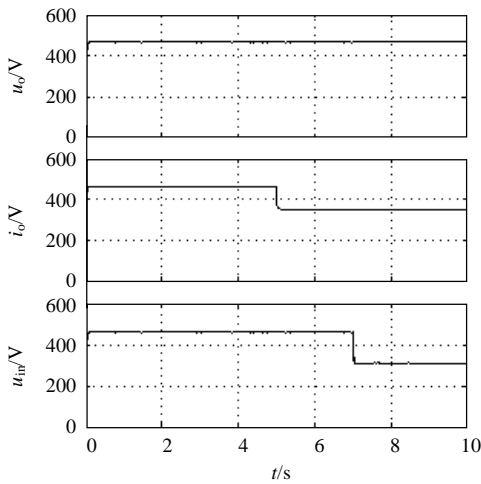
图6为仿真结果,在不同时刻输入输出特性给定值不同,对应不同的外特性,为了对比控制效果,变换器输出都是以电压形式给出,输出电压最小者为实际输出,目标切换顺序为恒压-恒流-欠压。

图6(a)为输入输出在不同时间段的给定值,给定值 u_g 、 i_g 、 u_{ing} 根据控制需要发生变化,如在起始时间段, u_g 最小;在中间时间段 i_g 发生变化, i_g 降至最小;在结束时间段, u_{ing} 发生变化, u_{ing} 降至最小。根据复合输入输出特性控制系统的算法,各给定值分别对应相应闭环的调节值 e'_{uo} 、 e'_{io} 、 e'_{iin} ,经过复合自动控制器求出最小值 \bar{e} ,对PWM控制器进行脉宽调制。

图 6(b)为 3 种输入输出特性经过复合控制后的输出仿真值，大小都用等效输出电压表示，与给定



(a) 不同时刻输入输出特性给定值



(b) 变换器输入输出特性切换曲线

图 6 输入输出特性之间自动切换仿真结果
Fig. 6 Simulation results of the external characteristic automatic switch

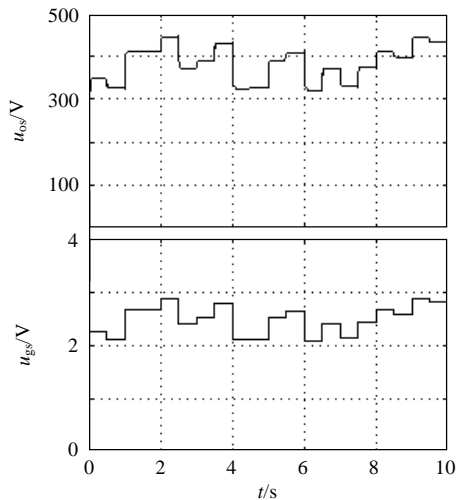


图 7 系统在恒压给定时输出动态响应曲线仿真结果
Fig. 7 Simulation results of output dynamic response curve of the system by constant voltage given

值 u_g 、 i_g 、 u_{ing} 相对应，变换器的输入输出 u_g 、 i_g 、 u_{ing} 能够根据控制信号的变化进行切换，切换顺序为恒压-恒流-欠压，和控制目标一致。

图 7 为控制系统在输出恒压特性情况下，给定值 u_{gs} 随机变化，变换器的输出动态响应曲线仿真结果。

由仿真曲线可知，给定值 u_{gs} 在工作范围内随机变化，变换器输出 u_{os} 能快速精确响应，变化趋势和给定值吻合，并且输出波形稳定性好，纹波小。

4 实验结果

图 8 为FCEV用 90 kW 升压型DC-DC变换器在输出恒压和输入欠压之间复合控制的实验结果。

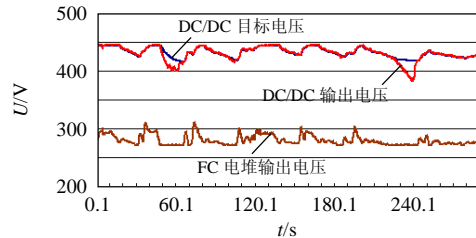


图 8 输入输出特性之间自动切换实验结果
Fig. 8 Experimental results of the external characteristic automatic switch

由图 8 可知，ECU 设定在输出恒压模式时，变换器能实时跟随目标电压，当FC电堆输出电压达到欠压点(265 V)时，变换器工作在欠压模式，限功率输出，FC电压上升后，偏离欠压点，变换器自动恢复输出恒压模式，实现了输出恒压控制、输入欠压控制及两者之间的自动切换。

相对于输出特性，输入欠压特性更为重要，主要目的是保护外特性较软的 FC，因此在控制系统中，应保证变换器能可靠实现输入欠压控制，在此基础上再完成输出特性控制。

图 9 实现了系统的恒流控制，变换器电流*I*按照 ECU 给定值曲线进行实时跟随，动态响应时间小于 100 ms，满足FCEV动力系统要求。

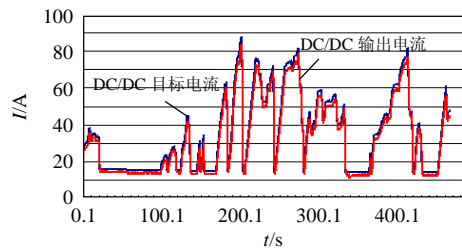


图 9 输入输出特性之间自动切换实验结果
Fig. 9 Experimental results of the external characteristic automatic switch

5 结论

针对 FCEV 用大功率 DC-DC 变换器快速复杂的输入输出特性的要求, 本文提出了一种 DC-DC 变换器复合输入输出特性控制方法, 由仿真和实验结果得出以下结论:

1) 复合输入输出特性控制系统通过动态选择控制特性调节信号, 实现了 FCEV 用大功率 DC-DC 变换器输入输出特性的自由切换与复杂控制。

2) FCEV 用 DC-DC 变换器外特性控制应在可靠实现输入欠压控制的基础之上再完成输出特性控制, 可有效保护 FC。

3) DC-DC 变换器复合输入输出特性控制系统动态特性好, 能快速响应给定值, 输出波形稳定性好, 纹波小, 满足 FCEV 使用要求。

参考文献

- [1] 陈全世, 仇斌, 谢起成. 燃料电池电动汽车[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 3-6.
- [2] 汪殿龙. 燃料电池车用大功率 DC/DC 变换器及其应用研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2007.
- [3] 齐铂金, 汪殿龙, 刘精明. 燃料电池 DC/DC 变换器控制电路中复合输入输出特性控制电路: 中国, z1200510080468.7[P]. 2005-12-21[2008-08-25].
- [4] 达飞鹏, 宋文忠. 一类非线性系统的自适应控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 20-24.
Da Feipeng, Song Wenzhong. Study on adaptive control for a class of nonlinear systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 20-24(in Chinese).
- [5] 倪雨, 许建平. 准滑模控制开关 DC-DC 变换器分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 1-6.
Ni Yu, Xu Jianping. Quasi-sliding-mode switching control for DC-DC converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(21): 1-6(in Chinese).
- [6] 顾亦磊, 吕征宇, 钱照明. 一种新颖的三电平软开关谐振型 DC/DC 变换器[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 24-28.
Gu Yilei, Lü Zhengyu, Qian Zhaoming. A novel three level soft switching resonant DC/DC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(8): 24-28(in Chinese).
- [7] Jang S, Lee T W. Bi-directional DC-DC converter for fuel cell generation system[C]. IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004.
- [8] Wai R, Lin C, Chu C. High step-up DC-DC converter for fuel cell generation system[C]. 30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, Busan, South Korea, 2004.
- [9] Ozpineci B, Leon M T, Su G. Optimum fuel cell utilization with multilevel DC-DC converters[C]. Nineteenth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Anaheim California, America, 2004.
- [10] Xu Haiping, Kong Li, Wen Xuhui. Fuel cell power system and high power DC-DC converter[J]. IEEE Trans. on Power Electronics, 2004, 19(5): 1250-1255.
- [11] Andersen G K, Klumpner. A new green power inverter for fuel cells[C]. IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference, Toronto, Ontario, Canada, 2002.
- [12] Napoli D, Crescimbeni. Multiple input DC-DC power converter for fuel-cell powered hybrid vehicles[C]. IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference, Toronto, Ontario, Canada, 2002.
- [13] 林维明, 黄是鹏, 张冠生, 等. PWM 型 DC/DC 开关变换器非线性闭环控制策略的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(3): 19-22.
Lin Weiming, Huang Shipeng, Zhang Guansheng, et al. Research on nonlinear control strategy for PWM DC-DC converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(3): 19-22(in Chinese).
- [14] 许峰, 徐殿国, 柳玉秀. 具有最优动态响应的 PWM 型 DC-DC 变换器非线性控制新策略[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 133-139.
Xu Feng, Xu Dianguo, Liu Yuxiu. A novel nonlinear control method for PWM DC-DC converter with optimum transient response [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 133-139(in Chinese).
- [15] Huang Yong, Zeng Fan, Zhou Qiang, et al. Study on the characteristics of boost converter in hybrid fuel cell city bus [C]. International Conference on Industrial Technology, Hong Kong, China, 2005.
- [16] Liu Danwei, Li Hui. Dynamic modeling and control design for bi-directional DC-DC converter for fuel cell vehicles with battery as energy storage element[C]. Fourtieth IAS Annual Meeting, Hong Kong, China, 2005.
- [17] Marei M I, Lambert. DC/DC converters for fuel cell powered hybrid electric vehicle[C]. 2005 IEEE Conference Vehicle Power and Propulsion, Chicago, USA, 2005.



汪殿龙

收稿日期: 2009-03-31。

作者简介:

汪殿龙(1978—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为新型电源技术及应用, 燃料电池电动汽车等, UC3875@163.com;

王军(1968—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新型电源技术及应用;

胡云岩(1957—), 男, 学士, 副教授, 研究方向为检测技术及应用;

齐铂金(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为新型电源技术及应用。

(编辑 吕鲜艳)